



HAL
open science

Evolution de la dynamique d'un marais salé: processus fonctionnels internes et relations avec le milieu côtier, la Baie du Mont Saint Michel

Olivier Troccaz

► To cite this version:

Olivier Troccaz. Evolution de la dynamique d'un marais salé: processus fonctionnels internes et relations avec le milieu côtier, la Baie du Mont Saint Michel. Sciences de l'environnement. Université de Rennes 1, 1996. Français. NNT: . tel-01179019

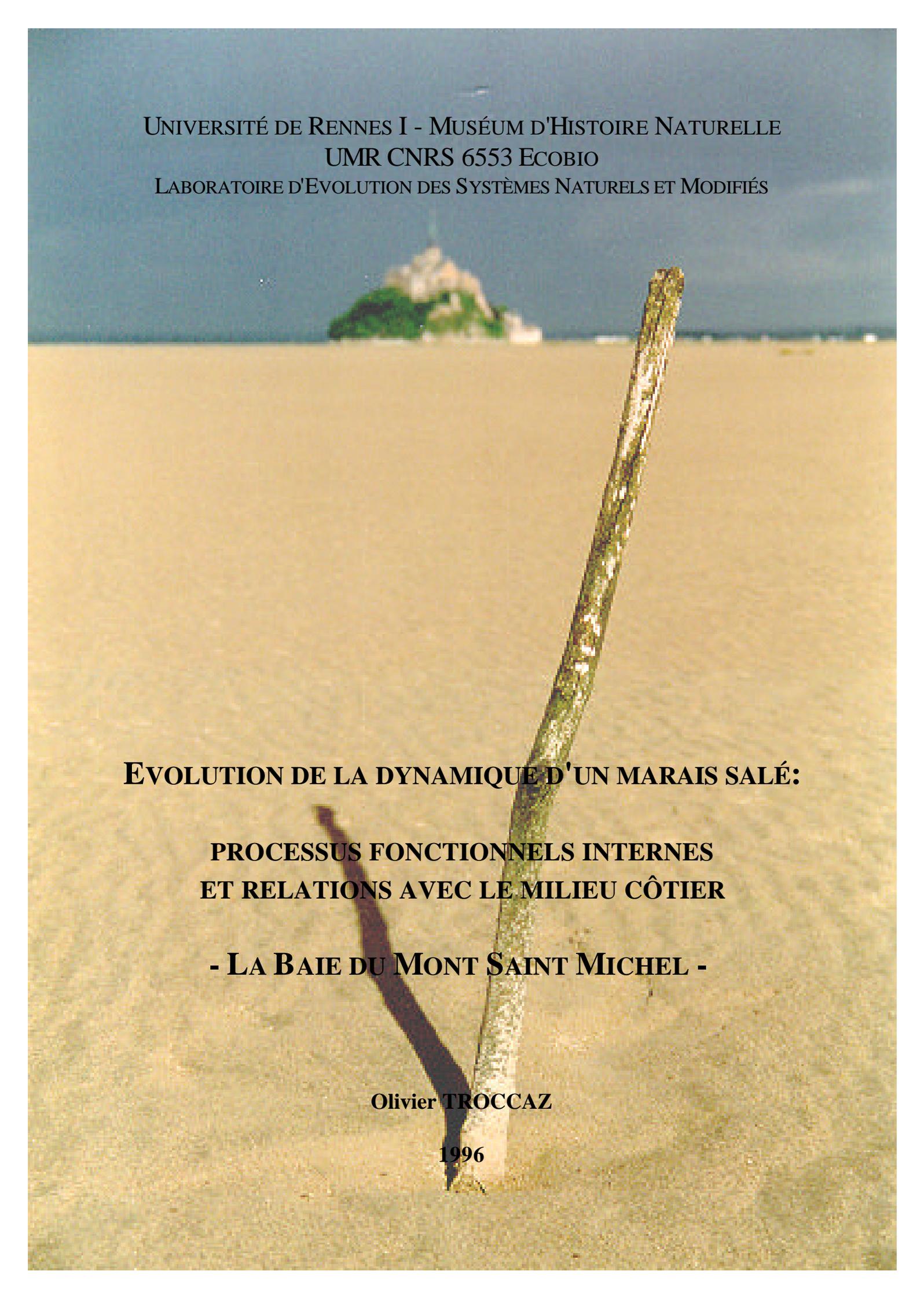
HAL Id: tel-01179019

<https://hal.science/tel-01179019>

Submitted on 21 Jul 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITÉ DE RENNES I - MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE
UMR CNRS 6553 ECOBIO
LABORATOIRE D'ÉVOLUTION DES SYSTÈMES NATURELS ET MODIFIÉS

ÉVOLUTION DE LA DYNAMIQUE D'UN MARAIS SALÉ:

**PROCESSUS FONCTIONNELS INTERNES
ET RELATIONS AVEC LE MILIEU CÔTIER**

- LA BAIE DU MONT SAINT MICHEL -

Olivier TROCCAZ

1996

N° d'Ordre : 24

THÈSE

présentée

devant L'UNIVERSITÉ DE RENNES I

U.F.R. SCIENCES DE LA VIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

pour obtenir

le DIPLOME DOCTORAL DE RECHERCHES EN SCIENCES

par

Olivier TROCCAZ

Sujet de la thèse: **EVOLUTION DE LA DYNAMIQUE D'UN MARAIS SALÉ: PROCESSUS
FONCTIONNELS INTERNES ET RELATIONS AVEC LE MILIEU CÔTIER
- LA BAIE DU MONT SAINT MICHEL -**

Soutenue le 20 Décembre 1996 devant la Commission d'Examen composée de:

MM.	Jean-Claude LEFEUVRE	Président et rapporteur
	Georges BERTRU	Examineur
	Edward MALTBY	Examineur
	Ramiro NEVES	Examineur
	Gilles PINAY	Examineur
	Paul TREHEN	Examineur

*" ... Et vous voici avec au coeur une fêlure
Voici que craque en vous le mur d'une prison
Une fenêtre s'ouvre sur une autre nature
Où des soleils poèmes dorent d'autres horizons ... "*

Gilles Servat - Il est des êtres beaux

REMERCIEMENTS

Lors de mon arrivée au laboratoire, j'ignorais absolument tout des marais salés de la Baie du Mont Saint Michel, y compris même leur existence. Aussi, lorsque Jean-Claude Lefeuvre m'a proposé de mener à bien l'étude des intersystèmes, j'étais partagé entre l'envie de la découverte et l'angoisse de l'inconnu. Je le remercie donc tout particulièrement pour la confiance qu'il m'a ainsi témoignée et pour sa passion de la Baie qu'il m'a fait partager.

Cette étude n'aurait jamais pu être aussi pertinente sans les conseils avisés et l'aide pluridisciplinaire (soudure, perçage, manutention, !...) de François Giraud, qui, dans les premières étapes de la rédaction de sa thèse, préférerait venir suivre des marées durant des nuits complètes! Qu'il fût dur par la suite de me passer de sa compagnie et des nombreuses discussions que nous avons régulièrement. Je lui témoigne ainsi toute ma sympathie pour sa présence active et pour les connaissances qu'il n'a jamais hésité à me transmettre.

La station expérimentale que nous avons développée consiste avant tout en une structure en bois comparable à un pont, laquelle doit être considérée comme l'un des piliers de cette étude. Un très grand merci donc à Alain Radureau d'avoir cru à ce projet un peu fou, d'en avoir élaboré l'architecture, et d'avoir été toujours prêt à passer des journées entières sur le terrain pour mener à bien la construction de cet édifice.

Georges Bertru m'a accueilli au sein de l'équipe hydrobiologie et a toujours cru en mes idées et porté intérêt à mon travail. Qu'il en soit remercié, ainsi que Luc Briant, sans qui je serai resté à jamais ignorant en matière d'analyses chimiques.

Les contrats européens sur lesquels a reposé cette étude étaient placés sous la tutelle directe de Françoise Burel. Un grand merci à elle d'avoir consacré son temps et sa patience à administrer ces projets et à en avoir assuré le bon déroulement jusqu'à terme.

Je tiens à remercier Jean-Claude Ferren de l'UR INRA Sciences du Sol et Bioclimatologie, qui, depuis le début de l'étude, m'a régulièrement fait parvenir les données météorologiques de la station des Polders de l'Ouest du Couesnon dont il s'occupe. Un grand merci à un autre pionnier de cette aventure, Maurice Bazile de la DIREN pour le prêt du limnigraphe mécanique qu'il nous a consenti, et qui a notamment servi de point d'abri (photos preuves à l'appui !) lors de notre premier suivi de marée, alors que le ponton n'existait que dans nos têtes.

Lorsque je repense aux années 1993 et 1994, je ne peux m'empêcher de me rappeler les trop fréquentes sorties sur le terrain, dont Anne Vezie a assuré sans ménagement aucun la majorité des analyses chimiques qui en découlaient. Je la remercie donc très chaleureusement, ainsi que Claude Heintz et Frédérique Marion qui ont initialement essuyé les plâtres. Un grand coup de chapeau à Jean-Paul Vivier pour avoir pu partager mon bureau, et par la même, mes régulières questions et remarques dont il se serait souvent bien passé.

Gilles Pinay ne s'est initié réellement aux marais de la Baie que récemment, mais ces remarques pertinentes ont toujours su trouver leur place dans la fin du parcours de ce travail et dans la rédaction de ce mémoire. Je le remercie donc vivement de m'avoir soutenu dans ce dernier élan et de m'avoir fait part de ses conseils avisés.

En tant que directeur de l'unité de recherche CNRS à laquelle j'appartiens, que Paul Trehen trouve ici toute ma reconnaissance pour avoir sacrifié un peu de son temps à la soutenance de cette étude.

La présence d'Edward Maltby et de Ramiro Neves parmi les membres du jury me flatte énormément. J'y vois là un grand honneur, eux qui consacrent toute leur passion aux marais salés, moi qui ne fait que les découvrir un peu plus chaque jour. Qu'ils soient remerciés de m'avoir consenti leur attention et de s'être déplacés en France à une période quelque peu incongrue.

Lors des dernières étapes d'un tel travail, la patience diminue fortement à l'approche de la date fatidique, et une irascibilité injustifiée tend à prendre le dessus. Anne a toujours su faire preuve d'une grande tolérance, alors qu'elle vit les mêmes angoisses pour sa propre thèse. Je veux ici la remercier de sa compréhension, et lui témoigner ainsi toute la complicité qui me lie à elle.

Mes parents et ma soeur ont régulièrement été des interlocuteurs curieux, et ont toujours su partager mon engouement pour ce travail (au point de venir suivre des marées la nuit avec moi !). Je tiens donc à les remercier très sincèrement du soutien omniprésent qu'ils m'ont apporté.

Imaginez-vous un chien perché à 3 mètres au-dessus du sol, sur un pont large d'un mètre, qui, de plus, est complètement entouré d'eau... Même à son désagrément, Oscar a ainsi constamment partagé mes sorties sur le terrain, la Baie étant devenue pour lui le plus grand jardin qu'il n'ait jamais arpenté. Je lui dois beaucoup car il a toujours su être un compagnon indispensable et, lorsque c'était le cas, me faire oublier les moments les plus pénibles.

La vie du laboratoire est un élément essentiel au bon déroulement d'une telle recherche. Je voudrai donc remercier tous ceux qui y ont participé, mais, décemment, je n'aurai jamais assez de place pour citer toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à cette étude, qu'ils trouvent donc ici toute ma reconnaissance.

La présente étude a été effectuée dans le cadre de programmes de recherches internationaux dirigés par J.-C. Lefeuvre, Directeur du Laboratoire d'Evolution des Systèmes Naturels et Modifiés (Muséum National d'Histoire Naturelle et Université de Rennes I), au sein de l'URA CNRS 1853 Ecobio.

Ils ont été financés par la CEE et par le CNRS d'après les intitulés suivants:

- "Comparative Studies on Salt Marsh Processes" - DG XII - N° EV4V-0172-F(EDB),
- "The effect of Environmental Change on European Salt Marshes " - DG XII - N° EV5V-CT92-0098,
- le programme environnement du CNRS.

RÉSUMÉ

EVOLUTION DE LA DYNAMIQUE D'UN MARAIS SALÉ: PROCESSUS FONCTIONNELS INTERNES ET RELATIONS AVEC LE MILIEU CÔTIER - LA BAIE DU MONT SAINT MICHEL -

L'objectif de cette étude est d'estimer quels sont les échanges préférentiels qui lient le marais salé de la Baie du Mont Saint Michel au milieu côtier adjacent, et quels en sont les impacts sur l'évolution générale des herbues. Naturellement, ce travail est à replacer dans le contexte du concept d'outwelling, dont la CEE a voulu notamment établir une étude approfondie dans le cadre des marais salés européens.

Les marais salés de la Baie couvrent une superficie totale de 4000 ha et progressent sur le milieu marin à raison de 30 à 35 ha par an. Le site que nous avons retenu est de taille beaucoup plus modeste (12 ha), mais reste néanmoins représentatif de l'ensemble dans la mesure où il correspond à l'un des nombreux sous-systèmes constitutifs du marais.

Afin de répondre aux questions posées, nous avons conçu et développé une station expérimentale de recherche en 1991. Elle a été pensée et équipée pour collecter régulièrement différentes informations quant aux variations d'état de nombreux paramètres essentiels au fonctionnement du marais. La base de données ainsi obtenue nous a permis d'adapter à cet environnement diverses approches modélisatrices descriptives dans l'étude des mécanismes et des impacts des échanges intersystèmes.

Durant l'année 1994, nous avons subdivisé le marais en sous-unités fonctionnelles, dont nous avons fait une étude détaillée des budgets respectifs. Dans ce contexte, nous avons insisté particulièrement sur la dynamique fonctionnelle de la colonne d'eau du chenal de marée et sur les transferts relatifs à la nappe d'eau souterraine. Considérant les résultats annuels obtenus pour les formes azotées pour les marées, intercycles et précipitations, respectivement de -224, -273 et 327 kg, il apparaît ainsi que les épisodes pluvieux peuvent avoir un impact considérable. Similairement, pour les autres éléments dissous, il ressort que les intercycles présentent des budgets dont les termes sont de même ordre, voire nettement supérieurs (-9937 kg / -4200 kg pour le carbone minéral), à ceux des marées. Ces résultats soutiennent la logique première que nous nous étions imposée, bien que trop souvent ignorée: ne pas sous-estimer les processus aux régimes hydrauliques apparemment limités. Ces observations relatives aux ressuyages des marées témoignent de l'extraordinaire potentiel biologique qui anime les processus des fonds de chenaux, notamment l'activité des diatomées au rôle clé dans la dynamique des nutriments en période d'intercycles.

Pour la période 1991-1994, nous avons étudié les tendances générales de l'évolution progressive du marais. Il apparaît ainsi que certaines classes d'amplitudes de marées participent aux échanges selon des degrés et des modalités distinctes (de 0 à 1,30 m, contribution passive; de 1,30 à 1,70 m, exports; de 1,70 à 2,00 m, imports; au-delà de 2,00 m, contribution nulle). De plus, la saisonnalité de la dynamique des échanges apparaît vérifiée puisque l'automne se distingue nettement des autres saisons. Bien que les tendances générales obtenues sur la période d'étude aient révélées de nets exports de matériel dissous en opposition aux imports de particulaire, il s'avère que les termes annuels intermédiaires témoignent d'une transformation certaine du marais. En effet, bien que la baisse progressive des exports d'éléments dissous reste peu significative (respectivement, -31, -25, -23 et -21 tonnes), à l'inverse, la diminution des imports de particulaire entre 1991 et 1993 (respectivement, 1149, 694 et 502 tonnes), qui se sont transformés en exports en 1994 (-50 tonnes), traduisent concrètement la maturation du système. Aucune modalité fonctionnelle cyclique n'ayant pu être corrélée avec ces observations, nous devons donc considérer qu'il s'agit de processus extrêmement rapides, dont les conséquences sont irréversibles du fait des perturbations profondes qu'ils entraînent. Ils révèlent l'évolution naturelle du marais qui, d'un stade en cours de maturation, a progressé vers un stade mûre jeune.

Compte-tenu de l'ensemble des données dont nous disposons actuellement et des connaissances que cette étude nous a permis d'acquérir sur les mécanismes des échanges intersystèmes du marais salé, nous nous orientons désormais vers une étude modélisatrice conceptuelle de ces transferts. Cette recherche devrait nous permettre notamment d'approfondir les mécanismes à l'origine du vieillissement du système, mais également, d'approcher l'évolution théorique future du marais, laquelle pourra partiellement être validée dans la mesure où nombreux des suivis effectués durant la période d'étude sont toujours réalisés à l'heure actuelle.

Mots-clés: Baie du Mont Saint Michel, budget dynamique, échanges intersystèmes, marais salé, modélisation, zone humide.

ABSTRACT

EVOLUTION OF THE DYNAMIC OF A SALT MARSH INTERNAL FUNCTIONAL PROCESSES AND LINKS WITH THE COASTAL ZONE - THE MONT SAINT MICHEL BAY -

According to the outwelling hypothesis, the main objective of this study is to estimate the preferential exchanges which are occurring between the salt marsh of the Mont Saint Michel Bay and the adjacent coastal zone, and the consequences of these processes on the evolution of the marsh.

The total area of salt marshes in the Bay is about 4000 ha and moves towards the sea for almost 30 to 35 ha per year. The study area we have retained is closest (12 ha), but, nevertheless, still representative from the whole, as it must be considered as one of the multiple sub-systems at the beginning of the marsh.

In response, we have designed and developed an experimental research station in 1991. It was thought and equipped in order to regularly bring many informations about the variations of some parameters that are fundamental for salt marsh processes. The data base obtained has allowed us to adapt some descriptive models in the study of the mechanisms and the consequences of the intersystems exchanges.

In 1994, we have divided the marsh into functional sub-units, in order to realize a precise budget study for each one. As a matter of fact, we have especially considered the dynamic of the water column of the tidal channel and the exchanges linked to the groundwater. The nitrogen terms obtained for tides, tidal intercycles and precipitations, respectively, -224, -273 and 327 kg, reveal that rains may be very important. In the same way, for the other dissolved nutrients, the budget of the tidal intercycles are similar, even much greater (-9937 / -4200 kg for inorganic carbon), than those from tides. These results correspond with the premium idea we have considered, also often ignored: not to under-estimate low regime processes. These trends linked to tidal intercycles reveal sufficiently the importance of the biological activity of the bed channels, especially that of diatoms which are essential in the dynamic of these processes.

Between 1991 and 1994, we have considered the general trends of the progressive marsh evolution. It appears also that the terms of the exchanges are closely linked to tidal range (from 0 to 1,30 m, passive contribution; from 1,30 to 1,70 m, exports; from 1,70 to 2,00 m, imports; more than 2,00 m, no contribution at all). Moreover, the dynamic seasonality seems to be verified as autumn really differs from the other seasons. We have also observed net exports of dissolved material, in opposition to particulate imports, the annual intermediary terms revealing a subsequent transformation of the marsh. In fact, even the progressive diminution of exports of dissolved nutrients appears to be insignificant (respectively, -31, -25, -23 and -21 tons), on the contrary, imports of particulate material decline greatly between 1991 and 1993 (respectively, 1149, 694 and 502 tons), and become exports in 1994 (-50 tons); concretely, this traduces the maturation of the ecosystem. Since no cyclical functional process have been correlated with these observations, we have to consider that they occur very fast, and their consequences are not reversible due to the real perturbations they bring. They appear as the natural evolution of the marsh, which, from a maturation state, has evolved towards a young mature one.

Taking into account the important data base and the knowledge we have acquired during this study for intersystems exchanges in the salt marsh, we are going to develop and validate some conceptual models about these processes. This research would not only allow us to understand better the mechanisms which are linked to the maturation of the marsh, but also to predict its theoretical evolution. This may be partially validated as several follow-ups realized during the study period are still in progress actually.

Key words: dynamic budget, intersystems exchanges, modelling, Mont Saint Michel Bay, salt marsh, wetland.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....1

- PREMIÈRE PARTIE -

**LA BAIE DU MONT SAINT MICHEL :
UN SITE UNIQUE ET COMPLEXE**

CHAPITRE 1 - LE MILIEU ET SES CONTRAINTES

1.1 - Contexte géologique et géographique.....6
 1.2 - La climatologie du site.....7
 1.2.1 - Des températures très douces.....8
 1.2.2 - Des courants de vent dominants.....8
 1.2.3 - Un bilan hydrique excédentaire.....9
 1.2.4 - Variabilité interne à la période d'étude (1991 - 1994).....9
 1.3 - Originalité des marais salés.....11

CHAPITRE 2 - CAS D'ÉTUDE D'UN BASSIN VERSANT

2.1 - Caractéristiques générales.....12
 2.1.1 - Le site d'étude.....12
 2.1.2 - Cinétique des marées.....12
 2.1.3 - Approche topographique.....13
 2.1.4 - Des profils de sol typiques.....14
 2.2 - Un pont très spécial.....15
 2.3 - Un outil clé: la centrale d'acquisition.....16
 2.4 - Equipements et innovations.....17
 2.4.1 - Les débits.....17
 2.4.2 - Les niveaux d'eau.....18
 2.4.3 - Les prélèvements.....19
 2.4.4 - Et s'il pleut ?.....20
 2.4.5 - Une alimentation électrique adaptée.....21
 2.4.6 - Vue d'ensemble.....21

CHAPITRE 3 - LES ÉCHANGES INTERSYSTEMES

3.1 - Contexte de l'étude.....22
 3.2 - Quels systèmes pour quels échanges ?.....23
 3.3 - Démarche adoptée.....25

CONCLUSIONS DE LA PREMIÈRE PARTIE.....29

- DEUXIÈME PARTIE -

L'ÉTUDE INTERSYSTÈME DU MARAIS

CHAPITRE 4 - L'HYDROLOGIE DU SYSTÈME

4.1 - Les marées.....	31
4.1.1 - Le flot.....	32
4.1.2 - Le jusant.....	33
4.2 - Les intercycles.....	34
4.3 - La nappe d'eau souterraine.....	34

CHAPITRE 5 - LA QUALITÉ DE L'EAU DURANT UNE ANNÉE COMPLÈTE D'ÉTUDE

5.1 - Les cycles et intercycles de marée.....	37
5.1.1 - Estimation des flux.....	37
5.1.2 - Les dynamiques élémentaires de la colonne d'eau.....	39
5.1.2.1 - Les niveaux de pleine mer de l'année 1994.....	39
5.1.2.2 - Les formes azotées.....	39
5.1.2.3 - Les formes phosphorées.....	42
5.1.2.4 - Les formes carbonées.....	43
5.1.2.5 - La silice.....	45
5.1.2.6 - La chlorophylle-a.....	46
5.1.2.7 - Les matières en suspension.....	47
5.1.3 - Approche synthétique de la dynamique générale.....	47
5.2 - La nappe d'eau souterraine.....	49
5.2.1 - L'évolution qualitative de la nappe.....	51
5.2.2 - Le budget estimé de la nappe.....	59
5.3 - Les précipitations.....	61

CHAPITRE 6 - LE BILAN INTERSYSTÈME

6.1 - Les composantes du bilan.....	63
6.2 - Un cas d'étude: la nappe d'eau souterraine.....	68
6.3 - Approche synthétique globale du bilan intersystème.....	74

CONCLUSIONS DE LA DEUXIÈME PARTIE.....	75
--	----

- TROISIÈME PARTIE -

L'ÉVOLUTION DU MARAIS

CHAPITRE 7 - LE PARAMÉTRAGE HYDRAULIQUE

CHAPITRE 8 - LA CONVERSION DES FLUX DE NUTRIMENTS

8.1 - Les bases de calcul.....	81
8.2 - Les modèles de régression.....	83

CHAPITRE 9 - L'ÉVOLUTION DES DYNAMIQUES

9.1 - Les termes généraux des budgets.....	85
9.2 - Etude de la variabilité saisonnière.....	87
9.3 - Etude de l'influence annuelle des marées.....	89
9.4 - Approche synthétique de l'influence des saisons et des marées sur les budgets.....	90

CONCLUSIONS DE LA TROISIÈME PARTIE.....	95
---	----

CONCLUSION GÉNÉRALE.....	97
--------------------------	----

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	99
----------------------------------	----

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1 - LE MILIEU ET SES CONTRAINTES

Figure 1.1 - Evolution de la ligne de rivage à l'ouest du Mont Saint Michel.....	6
Figure 1.2- Carte morphologique de la Baie.....	7
Figure 1.3- Température décadaire.....	8
Figure 1.4 - Fréquence et vitesse moyennes annuelles des vents.....	8
Figure 1.5- Bilan hydrique décadaire moyen.....	9
Figure 1.6 - Comparaison des séquences annuelles des températures (1.6a), des pluies (1.6b) et d'ETP (1.6c).....	10
Figure 1.7- Cycles et intercycles des marées.....	11

CHAPITRE 2 - CAS D'ÉTUDE D'UN BASSIN VERSANT

Figure 2.1 - Vue générale du bassin versant.....	12
Figure 2.2- Les différentes phases d'une marée.....	13
Figure 2.3 - Topographie du bassin versant et profil du chenal principal.....	13
Figure 2.4- Granulométrie des horizons.....	14
Figure 2.5 - Pertes en eau cumulées des horizons.....	15
Figure 2.6- Structure du ponton.....	16
Figure 2.7- Profil longitudinal de la section.....	17
Figure 2.8- Structure et principe des limnigraphes.....	18
Figure 2.9- Sonde modifiée du préleveur.....	19
Figure 2.10- Détail des piézomètres.....	20
Figure 2.11 - Collecteur d'eau de pluie.....	20
Figure 2.12- Présentation générale des équipements.....	21

CHAPITRE 3 - LES ÉCHANGES INTERSYSTEMES

Figure 3.1 - Les sites européens étudiés.....	23
Figure 3.2- Les sous-systèmes retenus.....	24
Figure 3.3- Echantillonnage d'une marée.....	25
Figure 3.4- Relation test du prélèvement intermédiaire.....	26
Figure 3.5- Organigramme simplifié du programme de la centrale.....	27

CHAPITRE 4 - L'HYDROLOGIE DU SYSTÈME

Figure 4.1 - Courbes de calibration du flot.....	32
Figure 4.2- Courbes de calibration du jusant.....	33
Figure 4.3- Courbes de calibration de l'intercycle.....	34
Figure 4.4 - Influence des marées (4.4a et 4.4d) et des précipitations (4.4b) sur les variations du niveau de nappe (4.4c).....	35
Figure 4.5- Processus hydrauliques de la nappe d'eau.....	36

CHAPITRE 5 - LA QUALITÉ DE L'EAU DURANT UNE ANNÉE COMPLÈTE D'ÉTUDE

Figure 5.1 - Niveaux de pleine mer en 1994.....	39
Figure 5.2 - Dynamique de $N-NH_4^+$	39
Figure 5.3 - Dynamique de $N-NO_3^-$	40
Figure 5.4 - Dynamique de l'azote organique dissous (DON).....	41
Figure 5.5 - Dynamique de l'azote particulaire (PN).....	41
Figure 5.6 - Dynamique de $P-PO_4^{2-}$	42
Figure 5.7 - Dynamique du phosphore organique dissous (DOP).....	42
Figure 5.8 - Dynamique du phosphore particulaire (PP).....	43
Figure 5.9 - Dynamique du carbone inorganique dissous (DIC).....	43
Figure 5.10 - Dynamique du carbone organique dissous (DOC).....	44
Figure 5.11 - Dynamique de la silice.....	45
Figure 5.12 - Dynamique de la chlorophylle-a.....	46
Figure 5.13 - Dynamique des matières en suspension (MES).....	47
Figure 5.14 - Dynamique des pools de nutriments de la colonne d'eau.....	48
Figure 5.15 - Relation entre niveau et volume d'eau de la nappe.....	49
Figure 5.16 - Variations des niveaux d'eau de la nappe en 1994.....	50
Figure 5.17 - Evolution des teneurs en $N-NH_4^+$ de la nappe d'eau.....	51
Figure 5.18 - Evolution des teneurs en $N-NO_3^-$ de la nappe d'eau.....	52
Figure 5.19 - Evolution des teneurs en azote organique dissous (DON) de la nappe d'eau.....	53
Figure 5.20 - Evolution des teneurs en $P-PO_4^{2-}$ de la nappe d'eau.....	54
Figure 5.21 - Evolution des teneurs en phosphore organique dissous (DOP) de la nappe d'eau.....	55
Figure 5.22 - Evolution des teneurs en carbone inorganique dissous (DIC) de la nappe d'eau.....	55
Figure 5.23 - Evolution des teneurs en carbone organique dissous (DOC) de la nappe d'eau.....	57
Figure 5.24 - Evolution des teneurs en silice de la nappe d'eau.....	58
Figure 5.25 - Evolution des budgets des nutriments de la nappe.....	60
Figure 5.26 - Impact décennaire des précipitations en 1994.....	61
Figure 5.27 - Evolution des teneurs et budgets des nutriments des précipitations.....	62

CHAPITRE 6 - LE BILAN INTERSYSTÈME

Figure 6.1 - Evolution mensuelle détaillée des budgets pour 1994.....	65
Figure 6.2 - Contributions relatives saisonnières des sous-systèmes aux échanges du marais en 1994.....	67
Figure 6.3 - Potentialités et devenir des nutriments de la nappe d'eau souterraine en 1994.....	69
Figure 6.4 - Bilan intersystème du marais salé en 1994.....	72

CHAPITRE 7 - LE PARAMÉTRAGE HYDRAULIQUE

Figure 7.1 - Fréquence des marées en rapport avec les classes de hauteur de pleine mer.....	77
Figure 7.2 - Hauteurs de pleine mer observées et estimées.....	80

CHAPITRE 9 - L'ÉVOLUTION DES DYNAMIQUES

Figure 9.1 - Influence des saisons sur les budgets.....	87
Figure 9.2 - Influence des marées sur les budgets.....	89
Figure 9.3 - Influence générale des saisons (9.3a et 9.3b) et des marées (9.3c et 9.3d) sur les budgets du matériel dissous (9.3a et 9.3c) et particulaire (9.3b et 9.3d).....	90
Figure 9.4 - Comparaison saisonnière inter-annuelle des principales classes d'amplitude de marée.....	92

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1 - LE MILIEU ET SES CONTRAINTES

Tableau 1.1 - Données climatologiques générales (1991 - 1994).....	9
--	---

CHAPITRE 2 - CAS D'ÉTUDE D'UN BASSIN VERSANT

Tableau 2.1 - Densités et porosités des horizons.....	14
---	----

CHAPITRE 6 - LE BILAN INTERSYSTÈME

Tableau 6.1 - Termes mensuels des budgets des sous-systèmes en 1994 (kg).....	64
Tableau 6.2 - Détail des budgets saisonniers des points de contrôle de la nappe d'eau souterraine.....	71
Tableau 6.3 - Impact saisonnier des sous-systèmes sur les échanges du marais salé en 1994.....	73

CHAPITRE 7 - LE PARAMÉTRAGE HYDRAULIQUE

Tableau 7.1 - Statistiques des marées de la période d'étude.....	78
Tableau 7.2 - Paramètres astronomiques de la station expérimentale.....	79

CHAPITRE 8 - LA CONVERSION DES FLUX DE NUTRIMENTS

Tableau 8.1 - Covariables des modèles de régression.....	82
Tableau 8.2 - Statistiques des modèles de régression.....	84

CHAPITRE 9 - L'ÉVOLUTION DES DYNAMIQUES

Tableau 9.1 - Bilan saisonnier des échanges.....	86
--	----

- INTRODUCTION GÉNÉRALE -



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Etrange système qu'un marais salé, bande terrestre colonisée par une végétation très particulière et fréquemment submergée tout ou partie par les marées. En y regardant de plus près, cette zone à l'apparence première uniforme, se révèle en réalité fragmentée en sous-unités comparables à des bassins versants terrestres classiques, du fait de l'existence d'un maillage plus ou moins complexe de chenaux de marées, organisés en réseaux hydrauliques. Par analogie aux unités terrestres auxquelles elles peuvent être apparentées, chacune de ces zones présente une interface directe avec le milieu côtier matérialisée par un exutoire. Celui-ci apparaît donc comme le point de rencontre des différents écoulements, dont la nature s'avère être la seule différence notable par rapport à un bassin versant terrestre, hormis le fait que les eaux qui les matérialisent sont assurément plus halines. Effectivement, à l'inverse des systèmes hydrauliques réellement continentaux, dans un chenal de marais, le sens des écoulements peut être successivement bi-directionnel, selon si nous considérons un flot ou un jusant de marée, mais aussi, des ressuyages d'intercycles. En effet, et cela s'avère particulièrement réaliste en Baie du Mont Saint Michel, les amplitudes de marée présentent des oscillations sinusoïdales dont le marnage, c'est-à-dire l'écart entre les cotes haute et basse, varie plus ou moins. De ce fait, le marais est soumis à une succession de périodes, ou cycles de marées, où les marées présentent des amplitudes suffisantes pour atteindre le système, et à d'autres, ou intercycles de marée, où seul le ressuyage des fonds de chenaux intervient. L'origine de ces dernières est par ailleurs directement dépendante des premières. Ainsi, parmi les marées qui atteignent le site, certaines aux amplitudes plus fortes vont submerger plus ou moins l'herbu, ceci s'accompagnant, par infiltration verticale, d'une recharge en eau de la nappe d'eau souterraine adjacente aux chenaux. En période d'intercycles et pour des marées d'amplitude inférieure à une certaine limite, la nappe d'eau s'exfiltre ensuite par les berges des chenaux, entraînant ainsi un écoulement continu vers le milieu côtier. La variabilité et la périodicité de ces régimes hydrauliques, en raison des contraintes qu'elles exercent sur les processus fonctionnels du marais salé, rendent l'étude de ces systèmes particulièrement délicate et spécifique.

Les premières études approfondies des marais salés restent relativement récentes puisqu'elles datent du début des années 1960. C'est effectivement à cette époque que certains auteurs ont mis en avant l'importance du rôle de ces systèmes dans le fonctionnement des milieux côtiers adjacents. Initialement développées sur la cote Est des Etats-Unis, les recherches ont transformé cette particularité en une loi générale univoque définie selon le concept d'outwelling. Brièvement, celui-ci stipule que les marais produisent plus de matériel qu'ils ne peuvent en dégrader ou en stocker, et donc, par conséquent, que l'excédent est exporté vers la zone littorale où il participe à la productivité des chaînes alimentaires.

Par la suite, de nombreuses études se sont intéressées à la nature et à l'importance de ces échanges pour différents sites, mais c'est seulement en 1979 que de telles recherches ont été développées pour des systèmes analogues du vieux continent, plus précisément aux Pays-Bas. Dans la mesure où les résultats différaient du concept d'outwelling, et, compte tenu de l'étendue des marais sur la cote Ouest, l'Europe a donc décidé de lancer des programmes de recherches dans le but d'établir une typologie de ces systèmes, d'après la comparaison de différents sites. Ainsi, quatre pays (Angleterre, Pays-Bas, Portugal et France) ont répondu à cet appel d'offre, lequel s'est traduit par le financement de deux contrats d'études consécutifs en 1990 et en 1993.

La Baie du Mont Saint Michel présente les marais salés les plus étendus des côtes françaises (5000 ha environ), fait partie des zones humides d'intérêt national de la convention Ramsar, et, enfin, est le seul site français à être inscrit sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO pour des raisons culturelles et naturelles. A ce titre, la Baie apparaissait logiquement comme le meilleur laboratoire grandeur nature dont nous pouvions étudier les caractéristiques fonctionnelles, notamment les échanges avec le milieu côtier, dont c'est l'un des objectifs principaux de l'étude présentée ci-après.

Dans cette optique, nous avons été amené à concevoir une station expérimentale d'étude, modèle unique en son genre, afin d'appréhender au plus près les divers mécanismes qui définissent le fonctionnement général du marais salé. Bien que le site d'étude que nous ayons retenu reste de superficie relativement modérée comparativement à l'étendue des herbues de la Baie du Mont Saint Michel (12 ha / 4000 ha), il n'en demeure pas moins représentatif des différentes modalités fonctionnelles générales caractéristiques de ces systèmes. De plus, les bases de recherche et les démarches adoptées constituent ainsi une approche concrète qui a été validée, et qui peut donc, de ce fait, être adaptée ou transposée intégralement à d'autres cas d'étude.

Dans le contexte des programmes de recherche européens, le travail que nous présentons s'inscrit directement dans l'étude des échanges intersystèmes liés au fonctionnement d'un marais salé. A ce titre, nos objectifs s'articulent autour de trois questions fondamentales: 1) quelle démarche adoptée pour un suivi pertinent des transferts internes et externes ? 2) comment les sous-unités fonctionnels du marais s'organisent et participent à son développement ? 3) quelle est l'évolution dynamique générale du système et sur quelles modalités repose-t-elle ? En d'autres termes, il s'agit d'estimer si le marais est effectivement à l'origine d'un enrichissement du milieu côtier, et, dans l'affirmative, quelles en sont les raisons ?

Parallèlement à cette étude, divers travaux se sont intéressés à dévoiler certaines des potentialités et caractéristiques des herbues de la Baie du Mont Saint Michel. Originalité fondamentale des marais salés, la nature et l'importance des échanges avec le milieu côtier ont ainsi été les supports premiers de l'ensemble de ces recherches, selon des approches très variées comme: les pesticides (Grare, 1996), l'influence du pâturage (Vivier, 1997), ou encore la dynamique du microphytobenthos (Brosse, 1996). De manière plus spécifique, le transfert de matière organique a ainsi servi de trame complémentaire à d'autres travaux, et a été abordé dans son intégralité (Creach, 1995; Méziane, 1997), et selon des composantes caractéristiques, telles que les halophytes (Bouchard, 1996), l'ichtyofaune (Laffaille, 1996), et les bactéries des fonds de chenaux (Lucas, 1997).

La première partie de notre recherche présentera les caractéristiques essentielles de la Baie du Mont Saint Michel, et, plus particulièrement, du bassin versant étudié. Nous verrons ainsi quels sont les particularités générales d'ordre physique du site (climatologie, hydrologie, pédologie,...), dont la connaissance est indispensable pour répondre aux questions posées, mais surtout, pour étayer les bases de comparaisons futures avec d'autres systèmes analogues. Nous insisterons ensuite sur la station expérimentale que nous avons conçue et développée, et comment nous l'avons régulièrement automatisée afin de la rendre quasiment autonome. Dans la mesure où elle est vouée aux suivis réguliers de l'état général du marais, nous détaillerons selon quelle logique nous avons fragmenté le système en différents sous-compartiments, et en quoi cette station s'est avérée indispensable pour la pertinence et la souplesse de l'étude

Grâce aux diverses informations fournies régulièrement par la centrale d'acquisition qui équipe le site, nous avons pu approcher avec précision le paramétrage hydraulique du bassin versant, lequel sera détaillé en début de deuxième partie. En se référant aux régimes qui ont caractérisé l'année 1994, et aux suivis qualitatifs réalisés parallèlement, nous avons adapté une base modélisatrice dans l'étude des échanges intersystèmes du marais. Celle-ci nous a permis d'approcher la nature et l'importance des inter-relations dont les sous-unités retenues dépendent, mais surtout, d'en préciser l'impact en termes de transferts avec le milieu côtier.

Dans la mesure où nous nous sommes fixés entre autres objectifs l'évolution du marais, nous avons utilisé un modèle descriptif pour approcher les tendances générales de la période 1991-1994, celles-ci nous ayant permis de dévoiler l'existence de certains processus fonctionnels typiques. Nous verrons cependant dans la troisième partie que leurs modalités d'expression peuvent différer d'une année sur l'autre, bien que, durant la période d'étude, le marais ait évolué régulièrement d'un état en cours de maturation à un état mûre jeune.

Même si les résultats de ce travail s'appuient en permanence sur des manipulations de nombres afin d'en extraire d'autres, nous voulons insister sur le fait que c'est avant tout durant les nombreuses heures passées sur le terrain que nous avons imaginé l'existence de certains mécanismes fonctionnels préférentiels, ces réflexions nous ayant ensuite guidé dans l'organisation et dans la logique conductrices à donner à cette étude.

- PREMIÈRE PARTIE -

LA BAIE DU MONT SAINT MICHEL:
UN SITE UNIQUE ET COMPLEXE



CHAPITRE 1 - LE MILIEU ET SES CONTRAINTES

CHAPITRE 2 - CAS D'ÉTUDE D'UN BASSIN
VERSANT

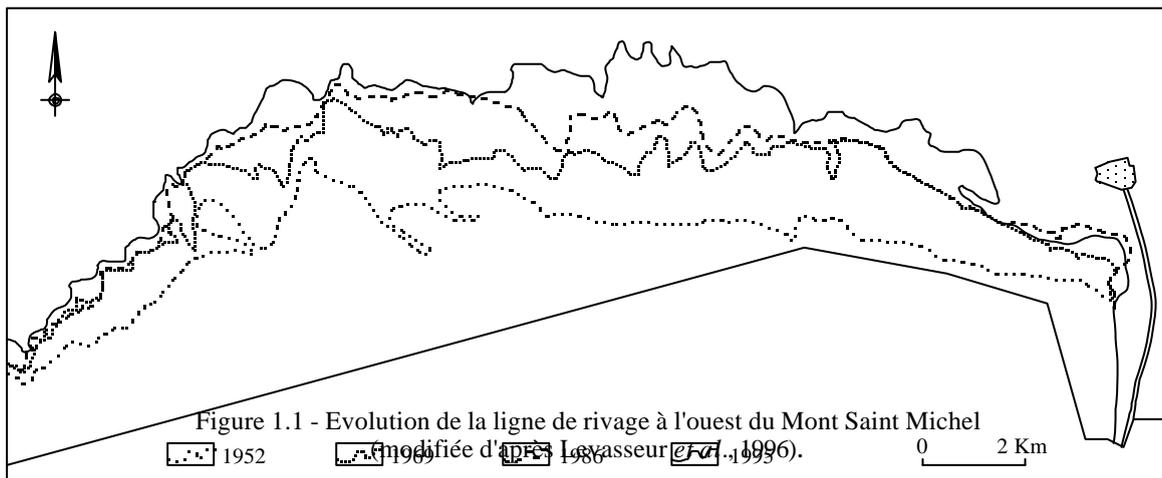
CHAPITRE 3 - LES ÉCHANGES INTERSYSTÈMES

CHAPITRE 1 - LE MILIEU ET SES CONTRAINTES

1.1 - Contexte géologique et géographique

La Baie du Mont Saint Michel a été une zone de sédimentation privilégiée depuis le début de la transgression marine flandrienne. Son remblaiement a surtout été rapide au début de l'invasion marine (période Atlantique), puis plus lent du fait des plus faibles variations du niveau marin. Avant la transgression, la ligne de rivage correspondait à une falaise entaillée dans des schistes briovériens. Elle s'est ensuite progressivement déplacée de 3 à 8 km vers le nord, donnant naissance à une vaste plaine au pléistocène (Jigorel, 1995). Il s'en détache actuellement deux pointements granitiques du substratum, le Mont Dol et le Mont Saint Michel. Les dépôts de cette plaine sont des sables et des tangues complétés par des lits d'argiles tourbeuses interstratifiés, ces derniers étant les témoins des régressions marines (Morzadec Kerfoun, 1974).

L'absence de relief et la très faible pente ont rendu la Baie très sensible aux oscillations du niveau marin, même de faible amplitude. Ainsi, la progression de la ligne de rivage s'est effectuée par étapes successives (Figure 1.1), celles-ci pouvant être soulignées par des cordons littoraux fossiles.



Comme nous pouvons aisément nous en rendre compte, la progression de la ligne de côte est relativement importante, ceci se traduisant concrètement par un gain de surface des herbues de l'ordre de 30 à 35 hectares par an.

Actuellement, dans sa partie maritime, la Baie couvre une superficie totale de 50000 ha, dont 24000 correspondent à l'estran. Ces chiffres doivent être complétés par ceux de différents systèmes pouvant être définis comme plus ou moins terrestres : le marais de Dol (12000 ha, dont 10500 pour le marais blanc et 1500 pour le marais noir), les polders récents (2800 ha), et enfin, les marais salés (4000 ha). Quatre bassins versants principaux alimentent ce système en eau douce: le Couesnon (110800 ha), la Sélune (101400 ha), la Sée (47200 ha) et le Guyoult (6900 ha).

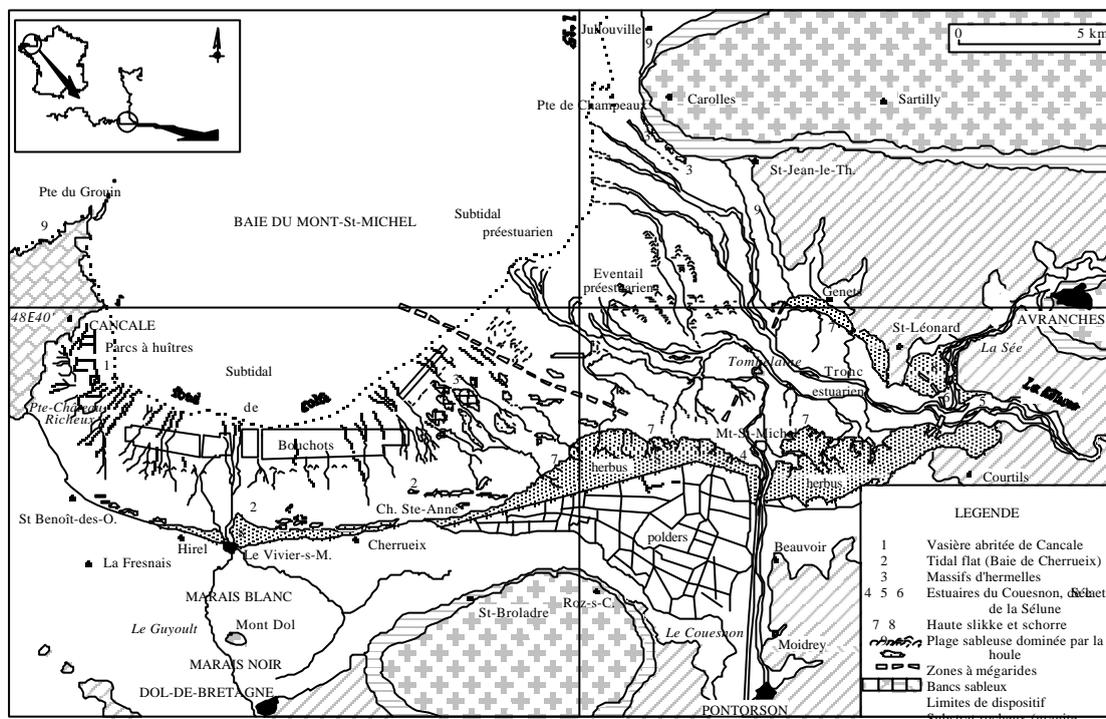


Figure 1.2 - Carte morphologique de la Baie (modifiée d'après Dorst et L'Hommer, 1989).

L'une des caractéristiques fondamentales de ce site réside dans l'amplitude des marées (12 m en moyenne et jusqu'à 16 m lors des tempêtes). Cette particularité est notamment à l'origine d'un bilan sédimentaire très important puisque l'on a estimé des apports annuels compris entre 1 et 1,5 millions de m³, provoquant des atterrissements spectaculaires.

1.2 - La climatologie du site

Toutes les données climatologiques proviennent de la station météorologique INRA de Beauvoir-Mont Saint Michel installée dans les polders, et de capteurs in situ.

Globalement, le climat est à classer parmi les climats tempérés océaniques, celui-ci étant caractérisé par une douceur des saisons, conséquence de la faible amplitude des écarts journaliers et saisonniers de température. Cependant, certains paramètres présentent des variations interannuelles spécifiques, qu'il est important de considérer dans le cadre d'une étude à long terme comme c'est le cas ici. Nous présenterons donc d'abord les tendances générales des paramètres considérées (données obtenues entre 1991 et 1996), puis une analyse plus fine de leur variabilité.

1.2.1 - Des températures très douces

La figure ci-contre présente les températures décadaires minimales, moyennes et maximales relevées depuis 1991. Comme mentionné ci-avant, il s'avère que les écarts d'amplitude restent très faibles. En effet l'écart décadaire moyen est de 8,5 °C seulement (celui-ci pouvant être considéré comme l'écart entre jour et nuit), et il y a une différence d'environ 13,6 °C entre les températures décadaires moyennes maximum et minimum obtenues (écart saisonnier maximum).

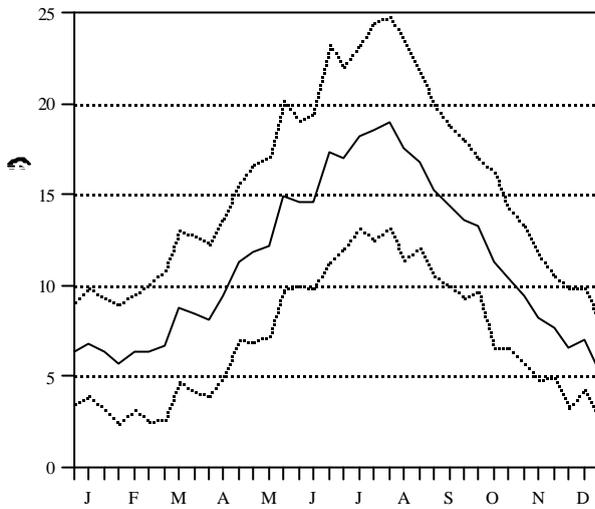


Figure 1.3 - Température décadaire (°C)

Les températures les plus basses sont observables entre décembre et février (moyenne = 6,1 °C), les plus fortes entre juin et août (moyenne = 17,2 °C). Par ailleurs, selon une échelle de temps journalière moyenne, il est très rare d'observer des températures

négatives durant les mois d'hiver (environ 5 jours par an) et supérieures à 20 °C en été (environ 7 jours par an). Afin d'en conclure sur les températures, le minimum mesuré a été de -8,4 °C en janvier 1993, le maximum de 31,5 °C en juin 1994.

1.2.2 - Des courants de vent dominants

La rose des vents ci-contre laisse apparaître un axe privilégié de courant, à savoir nord-sud, avec une sensible prédominance des vents de sud. Nous observons principalement des vents dont la

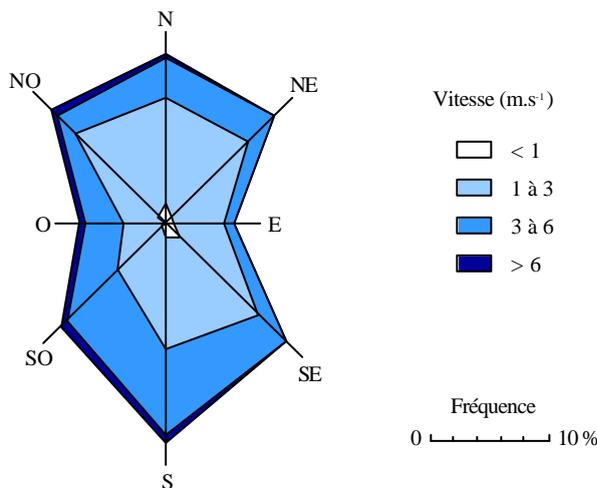


Figure 1.4 - Fréquence et vitesse moyennes annuelles des vents

vitesse est comprise entre 1 à 3 (61%) et 3 à 6 m.s⁻¹ (30%), les classes extrêmes n'étant que très faiblement représentées. Bien sûr, une telle schématisation ne permet pas d'apprécier l'existence et l'importance des tempêtes d'une année. En effet, celle-ci ayant été réalisée à partir de valeurs journalières moyennes, il y a un certain lissage des données. Ainsi, le maximum observé depuis cinq ans a été de 8.8 m.s⁻¹ seulement, alors que les coups de tempêtes ne sont pas rares en Baie du Mont Saint Michel.

1.2.3 - Un bilan hydrique excédentaire

La pluviométrie annuelle de 821 mm reste relativement bien distribuée au cours des saisons puisque 59% des précipitations sont réparties sur six mois de l'année, de septembre à février. A

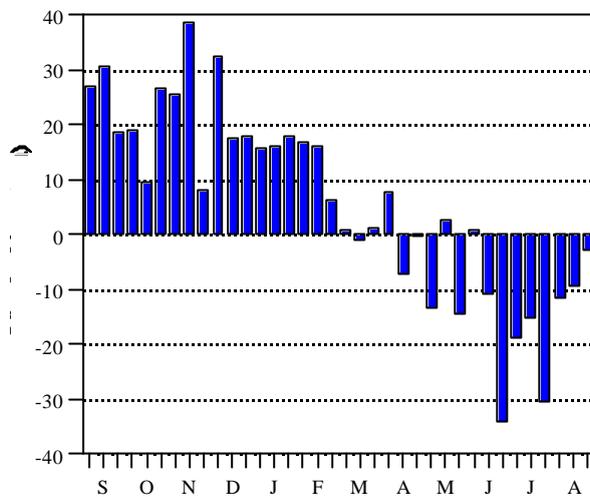


Figure 1.5 - Bilan hydrique décadaire moyen (mm)

mm.

l'inverse, l'évapotranspiration (ETP Penman) apparaît fortement déséquilibrée ; en effet, sur la base des 615 mm annuels, 80% interviennent de mars à août. De ce fait, le bilan hydrique est également déséquilibré : excédentaire de septembre à février (+362 mm) et déficitaire de mars à août (-156 mm), cette dernière caractéristique étant cependant principalement due à la période comprise entre juin et août (85% du déficit total). Sur l'année complète, il y a donc un excédent hydrique total de 206

1.2.4 - Variabilité interne à la période d'étude (1991 - 1994)

Le tableau suivant résume les valeurs moyennes ou totales obtenues pour la période d'étude.

	Températures			Précipitations (mm)	ETP (mm)	Bilan hydrique (mm)
	min (°C)	moy (°C)	max (°C)			
1991	6,8	11,0	15,2	780	581	199
1992	6,6	10,9	15,2	819	598	221
1993	6,5	10,6	14,7	810	546	264
1994	8,1	12,1	16,1	1039	633	406
<i>1991-1996</i>	<i>7,0</i>	<i>11,3</i>	<i>15,5</i>	<i>821</i>	<i>615</i>	<i>206</i>

Tableau 1.1 - Données climatologiques générales (1991 - 1994)

Nous notons une évolution assez marquée de ces paramètres au cours des 4 ans, notamment entre 1993 et 1994 :

- de 1991 à 1993, les résultats obtenus sont inférieurs aux moyennes générales (excepté le bilan hydrique), alors que l'année 1994 présente des valeurs toujours supérieures,
- élévation des températures d'environ 2 °C,
- hausse importante des précipitations (+ 28% en 1994 par rapport à 1993),
- bilan hydrique de plus en plus excédentaire.

Afin d'affiner la comparaison des séries de données entre elles, nous avons retenu la méthode des doubles-cumuls couramment appliquée en hydrologie (Oberlin, 1971). Elle consiste au cumul respectif des termes de chacune des séries X, donnant ainsi autant de nouvelles séries X' qu'à l'origine. Celles-ci peuvent être définies selon :

$$X'_i(t) = \sum_{j=1}^i X_j(t)$$

Chacune de ces nouvelles séries est ensuite comparée avec la transformée de la série moyenne (période 1991-1996) selon un graphe arithmétique. L'écartement potentiel des courbes avec la première bissectrice traduit des changements de tendance facilement identifiable dans le temps.

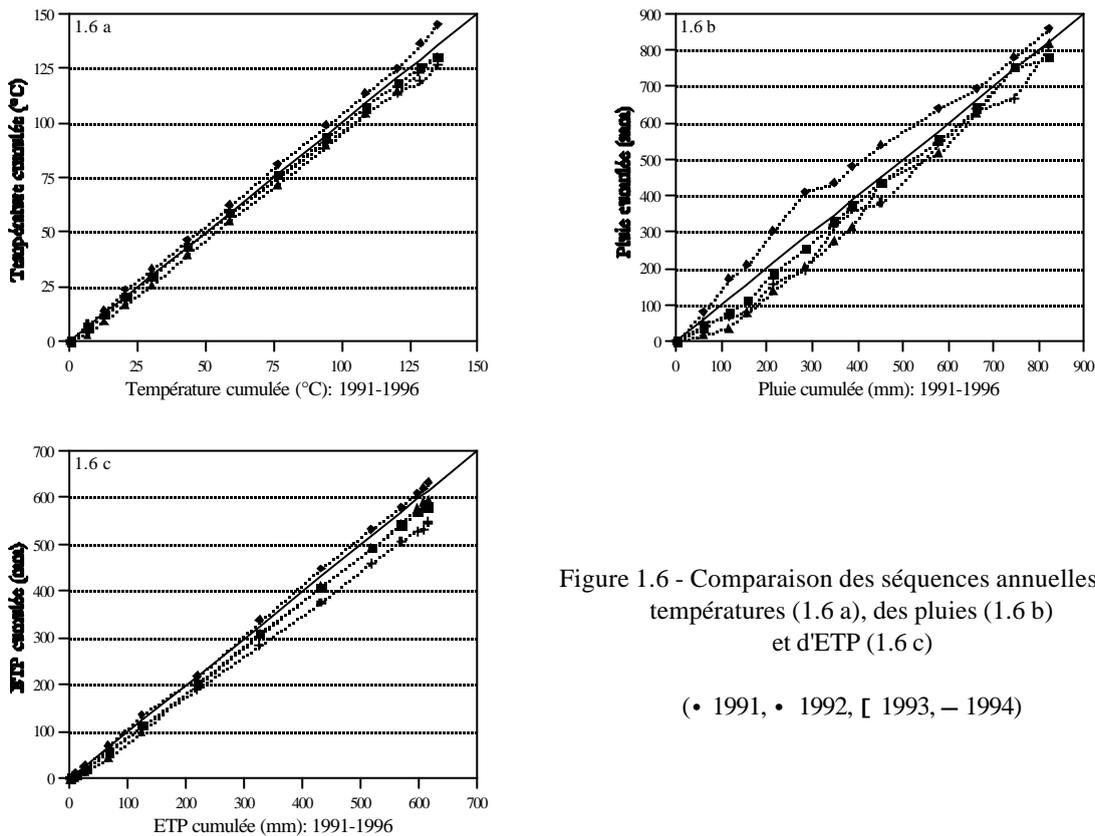


Figure 1.6 - Comparaison des séquences annuelles des températures (1.6 a), des pluies (1.6 b) et d'ETP (1.6 c)

(• 1991, • 1992, [1993, - 1994)

En complément aux remarques faites précédemment, il ressort que la hausse des températures observée en 1994 apparaît dès le mois de mars et se maintient assez constante par la suite. Les autres années présentent des tendances très proches de la première bissectrice, ceci traduisant l'absence de phénomène notable. Concernant les précipitations, l'année 1994 se distingue de nouveau puisque nous observons une hausse par rapport à la moyenne dès février avec un maximum en mai. A l'inverse, les autres années apparaissent comme des séquences relativement plus sèches. L'ETP présente des tendances très proches de la moyenne, excepté l'année 1993 qui s'en détache avec un déficit en progression constante.

Nous retiendrons donc que les variations interannuelles observées sont relativement peu importantes pour les 3 premières années d'étude, mais que 1994 se caractérise par une nette élévation des températures et de la pluviométrie. Par ailleurs, il ressort que les bilans hydriques de ces 4 années sont largement excédentaires.

1.3 - Originalité des marais salés

Mi-terrestres mi-marins, les marais salés présentent l'originalité d'être des systèmes interfaces en perpétuelle et rapide évolution. Ceci se traduit notamment par la présence d'unités de végétation pouvant offrir des changements de répartition ou de densité très spectaculaires (*Elymus cf. pungens*, *Halimione portulacoides*, *Suaeda maritima*, *Aster tripolium*, *Spartina anglica*,...). De ce fait, le fonctionnement interne de ces systèmes est très influençable car directement lié à la structure même du marais.

Vu d'avion, un marais salé se présente comme une frange terrestre pourvue d'un chevelu de petits canaux plus ou moins bien reliés à des chenaux principaux. En effet, au cours du temps, certains canaux ont été comblés par des apports sédimentaires marins et se trouvent ainsi déconnectés du reste du réseau. En fait, la comparaison de ces systèmes avec des bassins versants terrestres classiques apparaît justifiée puisque la structure et le fonctionnement en sont très proches. La seule différence notable concerne l'écoulement de l'eau. Alors que pour un cours d'eau continental il est toujours dirigé de l'amont vers l'aval, dans le cas d'un marais salé, en tout point du réseau, il peut être bi-directionnel selon le moment d'observation. Effectivement, en plus de la gravité à l'origine de l'écoulement typique, il existe une force motrice, la marée, qui peut, si l'amplitude est suffisante, mettre en eau tout ou partie du réseau. De plus, dans certains cas, il peut même y avoir recouvrement plus ou moins total du marais, phénomène à l'origine de la recharge en eau de la nappe souterraine adjacente aux chenaux. Après retrait de la mer, nous observons un ressuyage des chenaux, cet écoulement provenant de l'exfiltration de la nappe par les berges des chenaux.

Synthétiquement, nous distinguons deux modalités de fonctionnement hydraulique distinctes d'après l'(les)origine(s) de l'écoulement : 1) les phases de cycles de marée, et, 2) les phases d'intercycles.

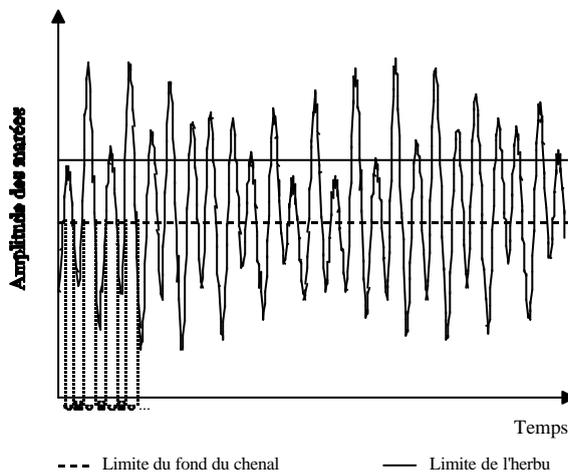


Figure 1.7 - Cycles (C) et intercycles (IC) des marées

Durant les premières, le système est alimenté, en général deux fois par jour, par la marée, qui, selon l'amplitude, recouvre plus ou moins complètement le marais. Il y a donc succession du flot (montée de la marée), du jusant (descente de la marée) et du ressuyage (exfiltration de la nappe), ceci se répétant pour chaque marée. Durant les deuxièmes, l'amplitude des marées est trop faible pour qu'elles parviennent au système, et, l'écoulement observable est strictement dû au ressuyage, sous la seule condition que la nappe soit suffisamment en charge. Dans la mesure

où l'amplitude des marées présente des variations sinusoïdales au cours du temps, il y a donc alternance successive de l'une et de l'autre des modalités.

Par ailleurs, du fait de l'existence quotidienne de deux pleines mers et deux basses mers, d'amplitudes respectives sensiblement équivalentes, les marées sont de type semi-diurnes.

CHAPITRE 2 - CAS D'ÉTUDE D'UN BASSIN VERSANT

2.1 - Caractéristiques générales

2.1.1 - Le site d'étude

Dans le cadre d'une telle étude, étant donnée l'ampleur des marais salés de la Baie du Mont Saint Michel, nous étions obligés, dans un premier temps, de différencier une aire d'étude plus

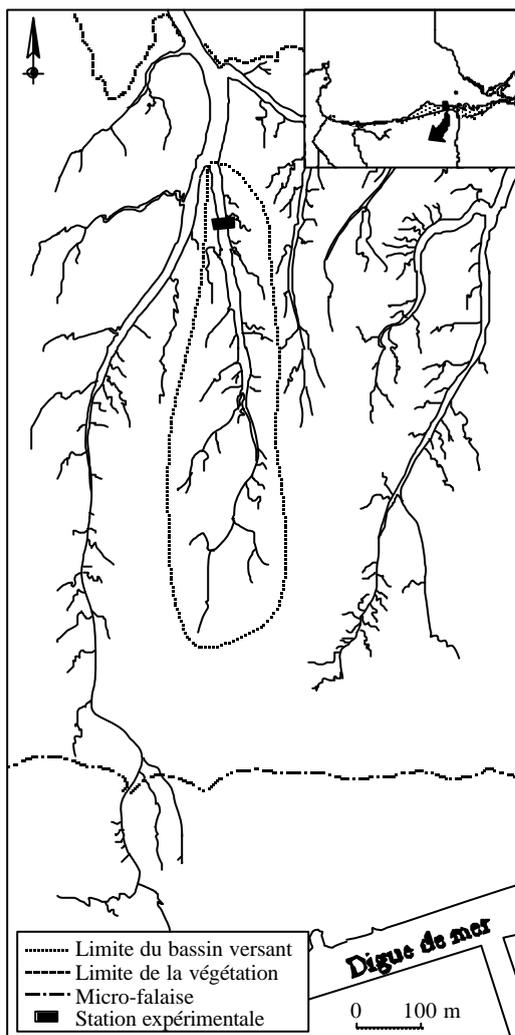


Figure 2.1 - Vue générale du bassin versant
(modifiée d'après Levasseur *et al.*, 1993)

restreinte, mais suffisamment représentative pour pouvoir espérer extrapoler à l'avenir les résultats obtenus à l'ensemble du site. De plus, le choix de limiter l'étude à une aire réduite permet de mieux contrôler, et surtout de mieux comprendre les différents mécanismes intervenant dans le fonctionnement du marais.

Le bassin versant que nous avons retenu se situe près du Mont Saint Michel et couvre une superficie d'environ 12 ha. Cette zone est dominée par *Halimione portulacoides* et n'est pas sous l'influence du pâturage des moutons.

Le linéaire du réseau est long de 2500 m et l'exutoire est localisé à proximité directe de la zone pionnière de la végétation. A cet endroit, le chenal de marée est large de 14 m et profond de 1,2 m.

Statistiquement, au cours d'une année complète, environ 43 % des marées atteignent l'exutoire (l'amplitude doit être supérieure à 11,25 m), dont 10 % inondent les herbus. L'alternance de cycles et d'intercycles de marée est relativement bien distribuée puisqu'on observe en moyenne 7 jours de cycles et

10 jours d'intercycles.

2.1.2 - Cinétique des marées

Du fait du caractère relativement fermé de la Baie du Mont Saint Michel et de la localisation assez éloignée du chenal par rapport au goulet principal, la cinétique des marées présente une forte asymétrie entre le flot et le jusant.

Une telle courbe peut être approchée par une équation empirique de la forme $H = at.exp(-bt)$ (H étant la hauteur d'eau, t le temps, a et b des constantes), ce type d'équation ne se justifiant aucunement vis-à-vis des périodes de retour ni des fréquences angulaires. D'après l'observation de la cinétique d'une marée, il apparaît que quatre phases principales peuvent être définies, celles-ci correspondant à des phénomènes liés à la configuration du système. La première, ou remplissage, coïncide simplement avec le flot de la marée, les suivantes avec le jusant. Cependant, en observant les variations de la baisse du niveau d'eau, nous pouvons différencier trois phases. Il y a tout d'abord une vidange rapide des chenaux (vitesse rapide constante), puis une étape transitoire où l'eau "stockée" sur le marais va ruisseler à des vitesses de plus en plus faibles (vitesse variable), puis le drainage de sous-surface ou ressuyage (vitesse faible constante). La durée de ces phases, voire l'existence de certaines, est directement dépendante de la hauteur d'eau de pleine mer.

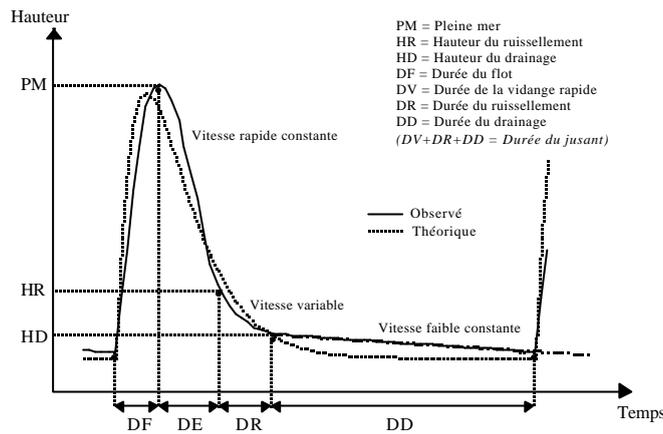


Figure 2.2 - Les différentes phases d'une marée

La première, ou remplissage, coïncide simplement avec le flot de la marée, les suivantes avec le jusant. Cependant, en observant les variations de la baisse du niveau d'eau, nous pouvons différencier trois phases. Il y a tout d'abord une vidange rapide des chenaux (vitesse rapide constante), puis une étape transitoire où l'eau "stockée" sur le marais va ruisseler à des vitesses de plus en plus faibles (vitesse variable), puis le drainage de sous-surface ou ressuyage (vitesse faible constante). La durée de ces phases, voire l'existence de certaines, est directement dépendante de la hauteur d'eau de pleine mer.

2.1.3 - Approche topographique

Dès le début de l'étude, nous avons réalisé une série de campagnes topographiques afin de dresser une carte comme celle présentée ci-dessus. L'altitude zéro avait été calée arbitrairement avec celle de l'échelle limnigraphique prévue pour la station expérimentale. Par la suite, l'IGN a réalisé de nouvelles campagnes et a référencé cette altitude zéro à 5,192 m IGN.

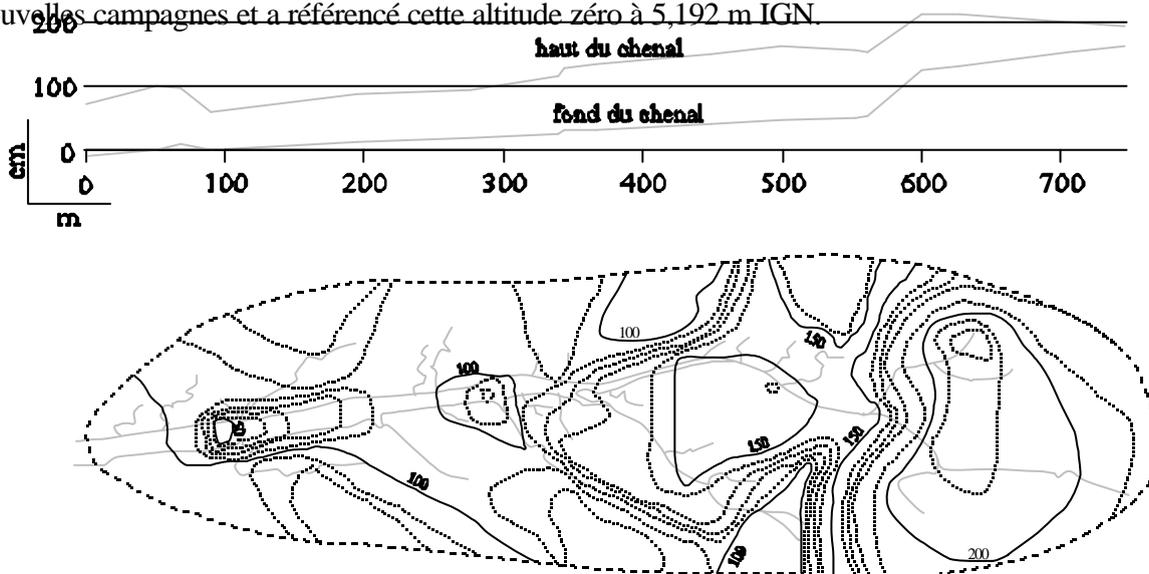


Figure 2.3 - Topographie du bassin versant et profil du chenal principal

Comme nous pouvons nous en rendre compte aisément, la pente générale reste très faible (1,50 m pour 700 m environ, soit une pente de 0,21 %). Il y a cependant deux dépressions qui viennent interrompre ce profil. La première se situe vers 100 m de l'exutoire et se traduit par une cuvette n'ayant affectée que la partie haute du chenal. La deuxième est localisée plus en amont, à environ 600 m de l'exutoire, et apparaît comme une traverse perpendiculaire au chenal, affectant le haut et le fond de celui-ci. A ce stade, nous pouvons émettre l'hypothèse que la première est l'historique de la seconde. En effet, l'existence de cette dépression en aval va certainement favoriser des écoulements d'eau préférentiels de part et d'autre du chenal, d'où une érosion accrue sur ces abords. A plus ou moins long terme, cela peut se traduire par l'apparition d'une micro-falaise similaire à celle située en amont.

2.1.4 - Des profils de sol typiques

En juillet 1993, nous avons réalisé deux fosses pédologiques à proximité directe de la station, l'une près du chenal, l'autre à la limite du bassin versant. Des échantillons prélevés à ce moment nous ont permis de décrire les caractéristiques essentielles des cinq horizons différenciés, dont les épaisseurs sont mentionnées en figure 2.10.

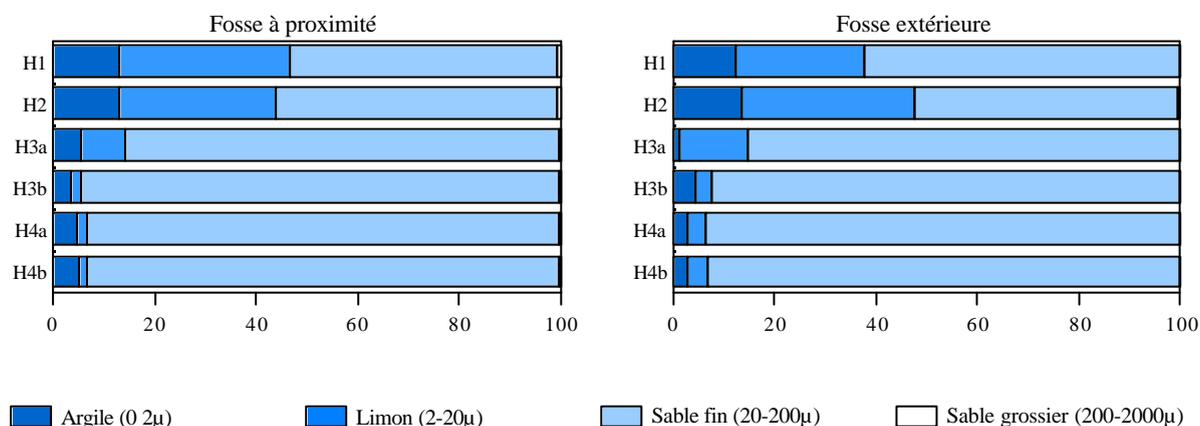


Figure 2.4 - Granulométrie des horizons

Il apparaît ainsi que les deux fosses ne présentent pas de différences notables. Nous notons une nette prédominance des sables fins (entre 53 et 95%), cette fraction allant croissant vers les horizons inférieurs. Les limons se rencontrent essentiellement dans les deux premiers horizons (entre 20 et 34%), tout comme les argiles (entre 7 et 13%). La fraction concernant les sables grossiers peut être considérée comme négligeable (<1%). Cette distribution granulométrique traduit bien l'origine marine des sols.

	Fosse à proximité						Fosse extérieure					
	H1	H2	H3a	H3b	H4a	H4b	H1	H2	H3a	H3b	H4a	H4b
Densité apparente	1,15	1,24	0,64	0,67	1,24	1,36	-	1,29	1,37	1,29	0,69	0,70
Densité du sol	2,08	2,11	1,16	1,21	2,21	2,50	-	2,12	2,00	2,55	1,13	1,19
Porosité	0,445	0,412	0,226	0,225	0,436	0,455	-	0,391	0,306	0,494	0,194	0,205

Tableau 2.1 - Densités et porosité des horizons

D'après les résultats de densités et porosité, nous nous apercevons que les horizons H1 et H2, H3a et H3b, H4a et H4b, présentent des caractéristiques similaires, mais qu'entre les deux points de mesure, H3- et H4- prennent des valeurs permutées. Ceci se confirme de manière assez nette (sauf pour H3a de la fosse à proximité) pour les pertes en eau cumulées.

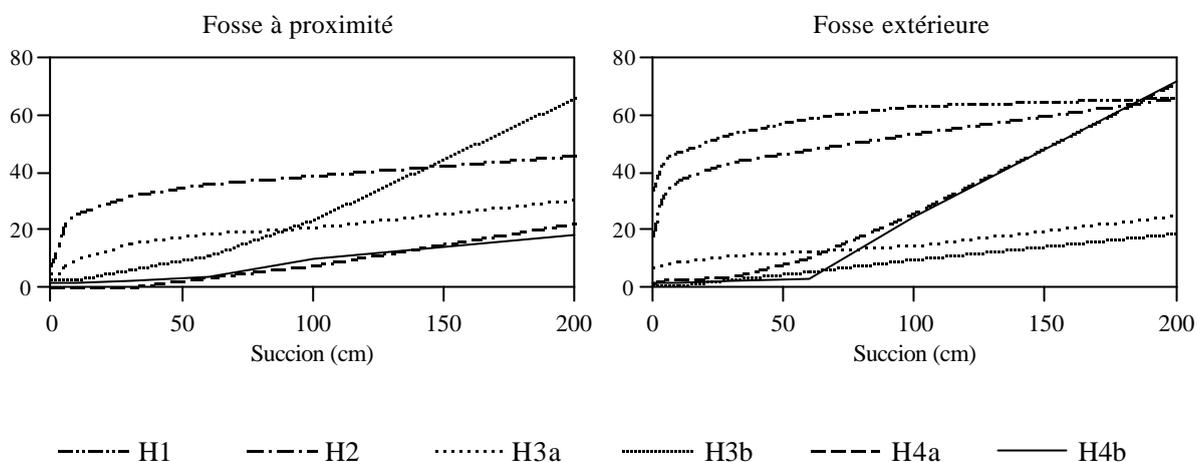


Figure 2.5 - Pertes en eau cumulées des horizons (en cm³)

Il apparaît qu'à la limite du bassin versant, les pertes en eau sont très rapides dans les horizons supérieurs et finalement maximales en haut et en bas du profil. Les horizons intermédiaires se caractérisent par des pertes progressant sensiblement et de manière constante avec l'augmentation des forces de succion. Cette zone peut donc être assimilée à un horizon préférentiel d'accumulation d'eau. A proximité du chenal, ces différences sont plus nuancées. Les pertes sont cependant de nouveau rapides en surface, et il semblerait qu'il y ait un gradient des pertes en eau des horizons supérieurs vers ceux inférieurs pour des forces de succion maximales.

2.2 - Un pont très spécial

Dans la mesure où le site est régulièrement inondé par les marées, et l'étude devant se poursuivre durant plusieurs années, nous avons abordé ce programme de recherches par la conception et la réalisation d'un ouvrage en bois permettant d'être hors d'eau et de stocker du matériel sur place. Cette structure devait devenir par la suite la base de la station expérimentale que nous avons développée.

Du fait que les marées atteignant le site restent essentiellement confinées dans les chenaux, ce ponton a été pensé de manière qu'aucun pilier intermédiaire ne soit nécessaire, les écoulements n'étant ainsi pas perturbés. Il a fallu également considérer le fait que l'exutoire retenu étant situé à plus d' un kilomètre du dernier point où un véhicule peut se rendre, tout le matériel nécessaire devait donc être apporté à bras d'homme.

Pour la structure porteuse, nous avons choisi deux poutres composites de marque Nail Webb®. Pour supporter la charge envisagée (plusieurs personnes et du matériel), chaque poutre, longue de 15 m, atteint une hauteur de 0,5 m pour 0,1 m d'épaisseur. Le poids de chaque poutre est assez modéré (60 kg environ) pour permettre le portage et la manipulation à la main.

P o u r l e s s u p p o r t s e t l e s fondations, nous avons retenu, après bien des hésitations (la portance du substrat est quasiment

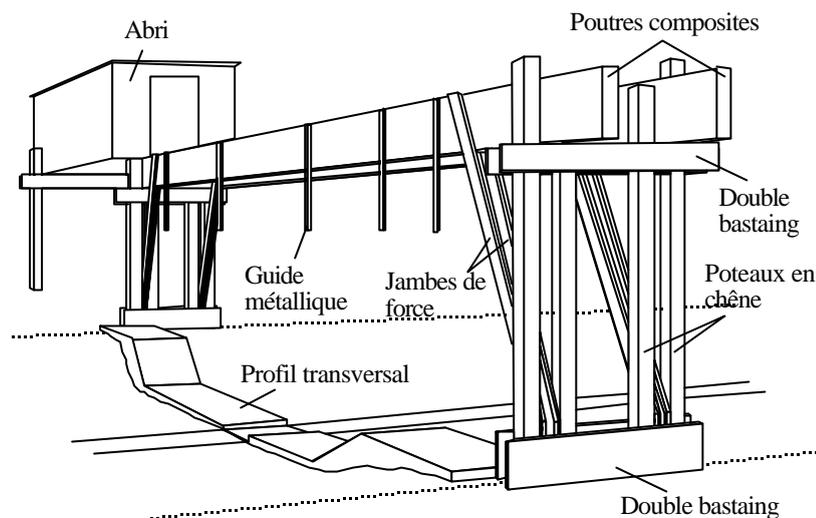


Figure 2.6 - Structure du ponton

impossible à évaluer compte tenu des variations de la teneur en eau), un système de poteaux-pieux, directement fichés dans le sédiment. De chaque côté du chenal, quatre pièces de chêne de 3,5 m de long (section 0,15 x 0,15 m) ont donc été enfoncées à environ 1,5 m de profondeur. Un double bastaing de liaison horizontale, cloué sur les piliers, assure le rôle de support des poutres porteuses. Ce système rustique n'impose pas une précision trop grande dans le

positionnement des poteaux, et, par le berceau qu'il crée, facilite la mise en place des poutres. Le tablier du pont, volontairement très étroit (1 m), est constitué de simples plaques de contre-plaqué (qualité CTB-X) soigneusement lasurées et directement clouées sur les poutres porteuses. Ce plancher sans solive, d'une part, allège la construction, et, d'autre part, sert de rigidificateur dans le plan horizontal. Pour garantir la stabilité longitudinale de l'ouvrage, des jambes de force diagonales consolident l'angle formé par les piliers verticaux et les poutres horizontales. Un habillage latéral de contre-plaqué protège les poutres des intempéries. La stabilité latérale du pont est assurée par un système de câbles contreventement, fixés sur des pieux enfoncés dans le sédiment.

Un abri ossature bois a ensuite été ajouté, les murs et le toit étant constitués de simples plaques de contre-plaqué lasurées et jointoyées à la colle mastic.

En dépit de sa simplicité, le pont a résisté à cinq hivers de tempêtes et grandes marées.

2.3 - Un outil clé : la centrale d'acquisition

Le ponton installé, il ne restait plus qu'à développer une station capable de réaliser des suivis et des prélèvements de manière autonome. En effet, même si de nombreux préleveurs automatiques sont désormais programmables selon des pas de temps définis par l'utilisateur, il n'en reste pas moins très aléatoire de prédire l'heure d'arrivée d'une marée dans un tel système.

Nous nous sommes donc orientés vers les centrales d'acquisition, en l'occurrence des appareils de marque Campbell Scientific® (CR10), qui présente, entre autres avantages, la possibilité d'être programmés intégralement pour leur fonctionnement (ceci étant spécifique aux appareils de cette marque), la capacité d'enregistrer des signaux électriques, et, surtout, l'aptitude à déclencher la mise en route d'autres appareils. La nécessité d'avoir à programmer un tel appareil pour qu'il puisse fonctionner pourra peut-être sembler rébarbatif à certains. Il n'empêche que cette option permet de s'affranchir de toutes les situations pré-programmées qui se seraient avérées obsolètes dans notre cas étant donné le but que nous recherchions avec la centrale, mais surtout, de conserver une liberté totale

quant au mode de fonctionnement de l'appareil (réalisation de procédures de test, sélection des données à stocker selon les périodes de cycles ou d'intercycles, pas de temps des enregistrements variables,...). Nous disposons ainsi d'un outil pouvant gérer à lui seul l'ensemble des équipements qui devaient être installées, et capable d'appliquer telle ou telle procédure de fonctionnement selon l'état du système. Par ailleurs, ce genre d'appareil est doté d'une mémoire tampon de 64 Kb, capable donc de stocker un nombre important d'informations, qu'il est possible de récupérer par la suite avec un simple ordinateur portable, voire par liaison téléphonique. Cette dernière possibilité a par ailleurs été envisagée et étudiée avec la société mère, qui a, de ce fait, retenue notre station comme un site pilote pour l'avenir.

2.4 - Equipements et innovations

2.4.1 - Les débits

Sous le ponton, nous avons disposé une structure métallique de manière à considérer toujours le même profil de section lors des mesures de courants. Compte tenu des variations potentielles rapides des niveaux d'eau, la méthode dite de calibration par intégrales (Roche, 1963 et John *et al.*, 1976) nous est apparue comme la plus adaptée. De plus, comparativement à des méthodes standards, elle présente de nombreux avantages : des résultats homogènes, un gain de temps de l'ordre de 20 à 50 % et une précision d'environ $\pm 2 \%$ (Diconne, 1972). Aussi, nous avons donc distingué cinq verticales en fonction des modifications de forme de la section du chenal. Celles-ci sont matérialisées concrètement par des guides métalliques fixés au ponton, ces derniers permettant de réaliser les mesures toujours au même endroit, mais aussi d'assurer une bonne verticalité pour les calibrations.

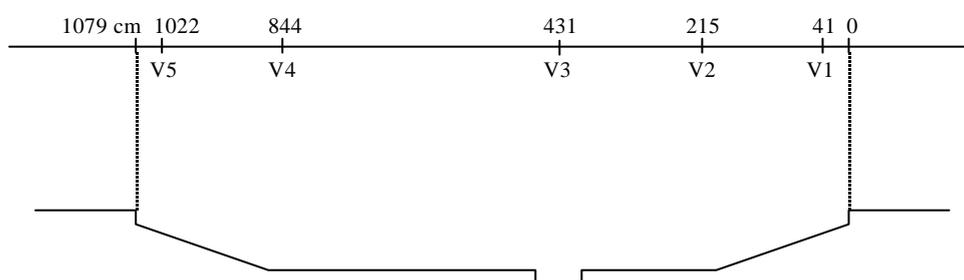


Figure 2.7 - Profil longitudinal de la section

La technique de calibration consiste à mesurer des vitesses élémentaires moyennes pour chacune des verticales (V1 à V5) en un temps donné sur toute la hauteur de la colonne d'eau. Pour cela, un débitmètre type moulinet est fixé à l'extrémité d'une longue règle que nous laissons glisser le long de chacun des guides, du haut de la surface de l'eau jusqu'au fond du chenal, et selon une vitesse de descente aussi constante que possible. Pour une marée, et donc pour une hauteur de pleine mer atteinte, nous obtenons ainsi une série de vitesses à mettre en rapport avec les hauteurs d'eau pour lesquelles elles ont été mesurées.

Dans un premier temps, il est nécessaire de tracer, pour chaque verticale, la courbe [vitesse du courant - hauteur d'eau], ceci afin de pouvoir estimer pour n'importe quelle hauteur d'eau la vitesse correspondante. En effet, en réalisant les séries de mesures, la hauteur d'eau du chenal passe d'un niveau initial H_i (pour V1) à un niveau final H_f (à V5), et ainsi de suite jusqu'à la pleine mer ou la fin de la marée. Il s'agit donc, grâce aux courbes réalisées ci-avant, d'estimer, pour chaque niveau moyen H_m ($H_m = (H_i + H_f) / 2$), les vitesses correspondantes V_m pour chaque verticale. Le produit $V_m \times H_m$ définit

un débit unitaire q_m ($m^2 \cdot s^{-1}$), encore appelé débit par unité de largeur. Pour chacun des niveaux H_m du flot et du jusant, l'intégrale de la courbe [q_m - distance des verticales] donne le débit Q_m de la section d'eau totale. Enfin, l'intégrale de la courbe [Q_m - temps] correspond aux volumes d'eau mis en jeu au flot et au jusant, lesquels, ramenés aux durées totales et aux sections moyennes, permettent d'estimer la vitesse moyenne de la phase considérée, pour le niveau de pleine mer atteint. En effet, les débits élémentaires pour une même hauteur d'eau élémentaire ne seront pas les mêmes selon l'amplitude de la marée. Il est donc nécessaire de calibrer le chenal pour des amplitudes différentes, afin d'obtenir une loi hauteur/vitesse fiable.

En complément aux séries de mesures effectuées comme décrit ci-avant, nous avons également réalisé des estimations de vitesse par simulations. En effet, lors d'une étude antérieure sur les Polders de l'Ouest du Couesnon, nous avons été amenés à développer un modèle de simulation d'aménagement (Giraud et Troccaz, 1990). Celui-ci, pour une hauteur d'eau donnée à l'exutoire d'un réseau, permettait d'obtenir notamment des renseignements concernant le linéaire, le volume, la surface en eau et le périmètre mouillé de tout ou partie du réseau en eau. En appliquant ce modèle au bassin versant étudié, nous avons pu estimer des vitesses pour des amplitudes de marée n'inondant pas le marais, en ramenant les volumes estimés aux durées et sections des phases, puisque les infiltrations latérales (chenal \pm nappe) sont négligeables (nous détaillerons cette particularité ultérieurement).

2.4.2 - Les niveaux d'eau

De façon à maîtriser, via la centrale d'acquisition, les variations permanentes des niveaux d'eau du chenal et de la nappe, nous avons équipé le site de différents limnigraphes.

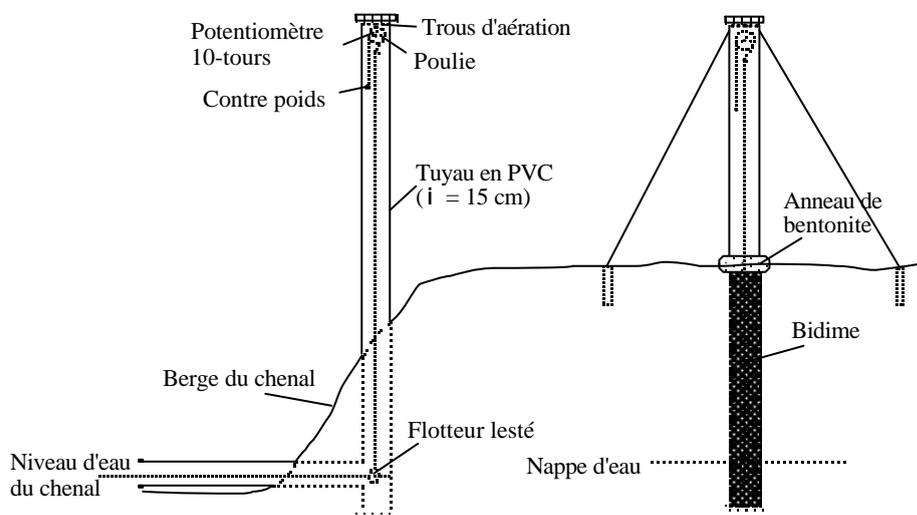


Figure 2.8 - Structure et principe des limnigraphes

A l'extrémité supérieure du tube PVC haut de 2 mètres (pour éviter que les marées ne puissent endommager l'électronique en place) se trouve une poulie dont l'axe est solidaire de celui d'un potentiomètre 10-tours. Celui-ci, en fonction des variations de niveau d'eau, qui se traduit par un

déplacement du flotteur et donc une rotation de la poulie, entraîne des variations de la valeur de la résistance du rhéostat. Pour traduire ces changements, une impulsion électrique (2000 mV dans notre cas) est envoyée par la centrale au potentiomètre, laquelle enregistre le voltage en retour. Connaissant le diamètre de la poulie, il devient très facile d'établir la relation qui existe entre les variations de voltage et celles des niveaux d'eau :

$$\frac{\Delta h \text{ (cm)}}{\Delta V \text{ (mV)}} = \frac{D \text{ (cm)} \times \Delta \theta \times n}{P \text{ (mV)}} = 0,14 \text{ cm.mV}^{-1}$$

avec: D = Diamètre de la poulie = 8,89 cm,
 n = nombre de tours du potentiomètre = 10,
 P = impulsion électrique = 2000 mV.

Ceci signifie que lorsque le flotteur se déplace de 0,14 cm, une différence de potentiel de 1 mV est enregistrée.

Ainsi équipée, la centrale enregistre les hauteurs d'eau du chenal et de la nappe souterraine. A la différence du limnigraphe du chenal, ceux destinés à la nappe sont enfoncés dans le sol à une profondeur de 2 m, perforés tout du long de la partie souterraine, et recouverts de bidime (genre de fibre de verre perméable) afin de limiter les entrées de particules dans le tube. Lors de la mise en place de ces limnigraphes, nous avons comblé l'espace vide restant entre le tube et le trou creusé dans le sol par du fin gravier, afin d'assurer un bon écoulement de l'eau. De plus, autour du tube à la surface du sol, nous avons réalisé un col de bentonite pour empêcher l'érosion qu'aurait pu engendrer la marée lors de l'inondation du marais. Nous avons implanté deux limnigraphes de ce type, l'un à proximité immédiate du chenal, l'autre à la limite de partage des eaux souterraines du bassin versant. Il est ainsi possible d'étudier en parallèle l'évolution de la nappe pour ces deux points, et d'observer quels sont les écoulements préférentiels.

2.4.3 - Les prélèvements

Les suivis des différents niveaux d'eau couplés aux courbes de calibration ont naturellement pour but l'estimation de flux de nutriments. Ceci amène donc aux prises d'échantillons. Les prélèvements

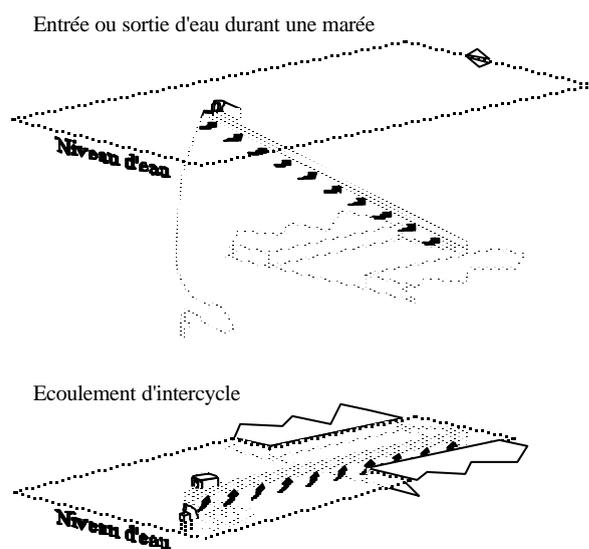


Figure 2.9 - Sonde modifiée du préleveur

de l'eau du chenal sont assurés par un préleveur automatique, type ISCO® 3700, directement connectés, et donc pilotés, par la centrale d'acquisition. De manière à réaliser un échantillonnage de la colonne d'eau aussi homogène que possible, nous avons remplacé la sonde classique de ce genre de préleveur par une spéciale. Un tube en polypropylène rigide de 1,5 m de long, perforé tous les 0,15 m, est relié à l'extrémité du tuyau d'aspiration de la pompe du préleveur. L'une des

extrémités du tube est fixée à la section à l'intérieur du chenal, l'autre est libre et équipée d'un flotteur, permettant ainsi au tube d'être toujours placé en travers de la colonne d'eau. Quel que soit le niveau d'eau du chenal, le prélèvement est donc représentatif de toute la colonne.

Dans la mesure où les fosses pédologiques ont révélé la présence de cinq horizons de sols différents, nous avons disposé cinq piézomètres aux deux endroits (limite du bassin versant et proximité du chenal), de telle façon qu'ils collectent l'eau du sol pour chacun des horizons.

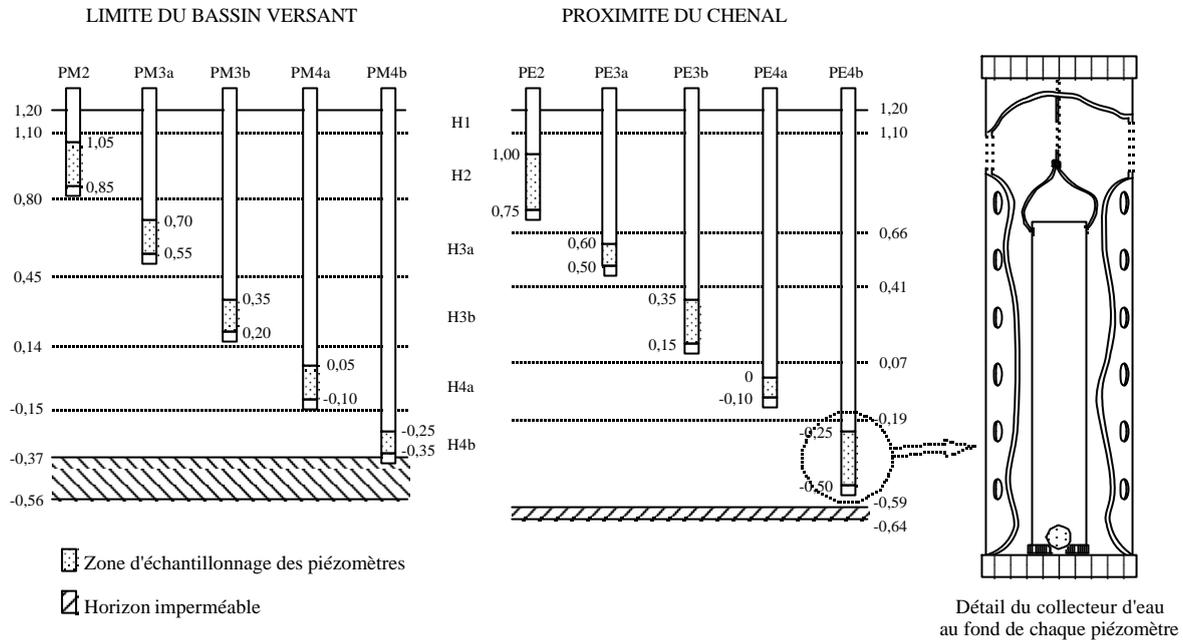


Figure 2.10 - Détail des piézomètres

Chacun des piézomètres est perforé uniquement pour sa zone d'échantillonnage, un film de bidime protégeant des intrusions de particules. Tous sont équipés d'un collecteur d'eau individuel, laissé toujours en place à l'intérieur, afin d'éviter les contaminations éventuelles par l'utilisation d'une pompe commune pour les prélèvements.

2.4.4 - Et s'il pleut ?

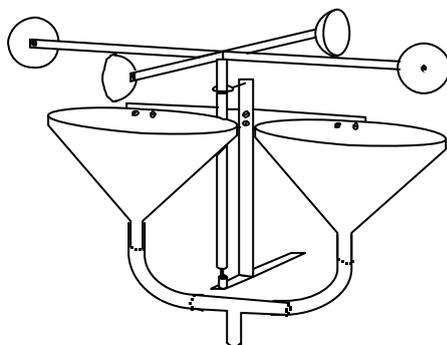


Figure 2.11 - Collecteur d'eau de pluie

Pour tenir compte des apports éventuels en nutriments de la pluie, pour réduire l'impact des oiseaux (!) et des transformations bactériennes et chimiques de l'eau récupérée, nous avons installé le dispositif décrit ci-contre sur le toit de l'abri du ponton, la prise au vent en étant ainsi facilitée. Après le tube en T, l'eau est acheminée à l'intérieur de l'abri dans un petit conteneur. Pour quantifier l'intensité des pluies, un pluviomètre à auget basculeur (Campbell Scientific® Tipping Bucket Rainauge ARG 100 - précision 0,1 mm) est raccordé à la centrale.

2.4.5 - Une alimentation électrique adaptée

L'ensemble des équipements installés, et notamment le préleveur automatique, sont des consommateurs certains d'énergie électrique. Bien sûr, il est toujours possible d'utiliser un jeu de batteries de voiture que l'on recharge à tour de rôle, mais, transporter une telle charge en plus des différents prélèvements, du micro-ordinateur,... n'est pas très judicieux, surtout sur plus d'un kilomètre à pied. Aussi, nous avons très rapidement installé deux panneaux solaires (Photowatt® - 2x46W - 12V) fixés sur le toit de l'abri. Ceux-ci rechargent une batterie solaire durant la journée par l'intermédiaire d'un contrôleur pour éviter les surcharges.

2.4.6 - Vue d'ensemble

En parallèle avec ces divers équipements, il nous a semblé intéressant de prendre en considération certains paramètres physiques pouvant s'avérer nécessaires à l'interprétation des phénomènes observés.

Aussi, nous avons installé trois thermocouples (type K) en connexion avec la centrale : le premier renseigne sur la température de l'air, le deuxième sur celle de l'eau du chenal, le dernier sur celle de la partie superficielle du sol sous végétation (5 premiers centimètres).

Pour préciser l'impact de la mer ou des apports d'eau douce sur la qualité de l'eau du chenal, un salinomètre raccordé à la centrale est installé au milieu du chenal.

Enfin, très récemment, nous avons complété la station par la mise en place d'une sonde à humidité (Campbell Scientific® Soil Moisture Sensor 257), celle-ci renseignant sur la partie superficielle du sol sous végétation.

La figure ci-après résume l'ensemble des gros équipements constitutifs de la station.

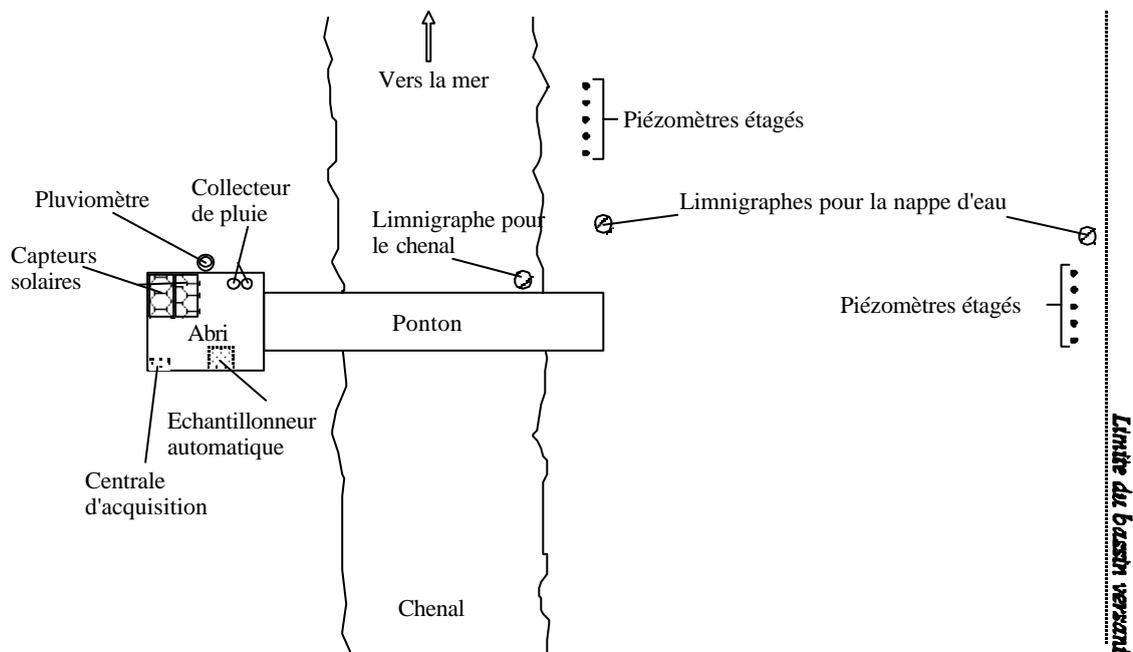


Figure 2.12 - Présentation générale des équipements

CHAPITRE 3 - LES ÉCHANGES INTERSYSTÈMES

3.1 - Contexte de l'étude

Teal (1962) a été l'un des premiers auteurs à dévoiler le rôle essentiel des marais salés dans le fonctionnement des milieux côtiers adjacents. Il a en effet estimé que jusqu'à 45% de la production primaire pouvait être exportée vers le milieu littoral. Ceci a été repris par Odum et de la Cruz (1967), et a finalement débouché sur le concept d'outwelling d'Odum (1968, 1980). Cette hypothèse avance que les marais salés produisent plus de matériel qu'ils ne peuvent en dégrader ou stocker par leur fonctionnement interne, et que cet excès est exporté vers le milieu littoral où il participe à la productivité des chaînes alimentaires. Depuis, de nombreuses recherches se sont intéressées à décrire les différents processus qui caractérisent ces écosystèmes, et notamment à estimer quels étaient les bilans des échanges avec le milieu côtier. Il en ressort qu'un tel concept ne peut être raisonnablement appliqué à tous les marais, et que les bilans des échanges dépendent de nombreux facteurs encore insuffisamment connus (Woodwell *et al.*, 1977; Valiela et Teal, 1979; Nixon, 1980; Daly et Mathieson, 1981; Jordan *et al.*, 1983; Wolaver *et al.*, 1983; Dame *et al.*, 1986; Whiting *et al.*, 1987; Bowden *et al.*, 1991; Childers *et al.*, 1993).

Une des questions fondamentales est donc d'estimer quelle part de la production du marais est éventuellement exportée vers le milieu littoral, et, parallèlement, quelle est la contribution de la zone estuarienne au développement du marais. Ensuite, il est nécessaire d'affiner ces bilans globaux par l'étude du fonctionnement interne du marais pour en cerner les processus généraux. A ce titre, la connaissance du fonctionnement hydrologique du marais est fondamentale puisque l'ensemble des mécanismes d'échanges intersystèmes en dépendent directement. En effet, les marées inondent périodiquement la surface des marais salés et conduisent ainsi à une infiltration d'eau marine dans le sol. Celle-ci peut être soit horizontale au travers des berges des chenaux (Jordan et Correll, 1985; Harvey *et al.*, 1987), soit verticale à la surface du sol (Hemond et Burke, 1981; Hemond *et al.*, 1984; Yelverton et Hackney, 1986). Enfin, les apports pluvieux peuvent également participer à la recharge de la nappe. A marée basse, l'eau s'exfiltre des berges des chenaux (Gardner, 1976; Jordan et Correll, 1985; Yelverton et Hackney, 1986) et est perdue par évapotranspiration (Hemond et Fifield, 1981; Nuttle, 1986).

Comme nous pouvons nous en rendre compte avec la bibliographie citée ci-avant, la majorité des études, pour ne pas dire la totalité, a été réalisée aux États-unis, plus précisément sur la côte est. C'est seulement en 1979 que les premières recherches européennes ont apporté des résultats (Wolff *et al.*, 1979). L'Europe, consciente de l'importante superficie couverte par des marais salés sur le littoral ouest, a de ce fait voulu développer un programme de recherches, notamment basé sur l'hypothèse d'outwelling, afin de réaliser une étude comparée de leur fonctionnement. Ceci s'est traduit par le financement par la CEE de deux contrats d'étude : un premier en 1990 intitulé "Comparative Studies on Salt Marsh Processes" - EV4V-0172-F(EDB) et un second en 1993 portant sur "The Effect of Environmental Change on European Salt Marshes" - EV5V-CT92-0098.

Quatre pays, et donc quatre équipes, ont été retenus à l'origine, les projets ayant été placés sous la responsabilité générale de l'équipe française du Professeur Lefeuvre. Comme nous pouvons le voir sur

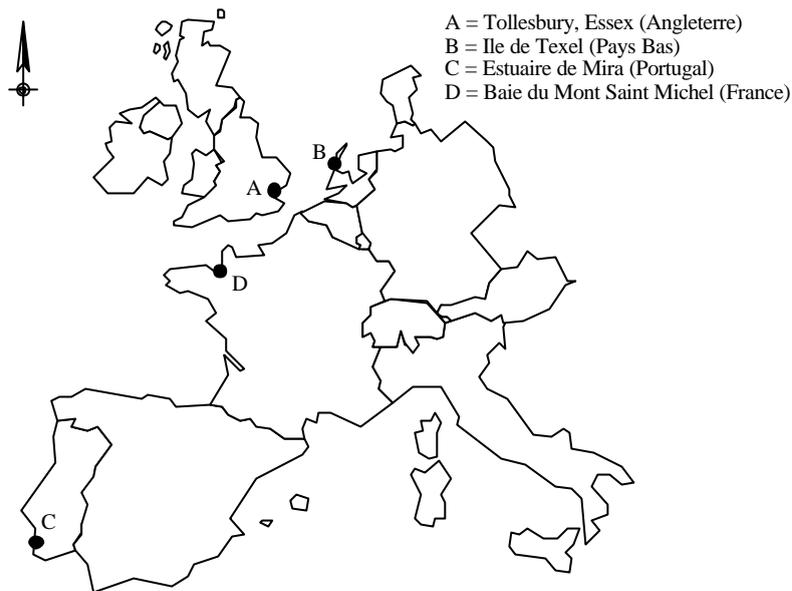


Figure 3.1 - Les sites européens étudiés

la carte ci-contre, la disposition géographique des sites retenus permet d'obtenir un gradient optimal des conditions externes d'existence de ces marais (climat, orientation, marées,...), critère indispensable pour la définition d'une typologie des marais dont c'est également l'un des objectifs finaux de ces études.

La Baie du Mont Saint Michel présente les marais salés les plus

étendus des côtes françaises (près de 5000 ha), lesquels servent régulièrement d'aire protectrice à de nombreux oiseaux migrateurs ou sédentaires. De plus, l'estran possède une richesse biologique fascinante (poissons plats, crevettes, moules et huîtres), dont l'homme a su tirer profit depuis de nombreuses années. Enfin, c'est le seul site français à être inscrit sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO pour des raisons culturelles et naturelles, et il fait également partie des zones humides d'intérêt international de la convention Ramsar. Aussi, pour l'ensemble de ces raisons, la Baie du Mont Saint Michel nous est apparue comme un idéal laboratoire grandeur nature dans l'étude des processus fonctionnels d'un marais salé (Lefeuvre *et al.*, 1994).

L'eau contenue dans le sol des marais est très riche en éléments dissous (Nixon, 1980; Vivier et Troccaz, 1996), et les flux de nutriments qui s'y rattachent sont une composante importante des bilans globaux (Gardner, 1976; Nestler, 1977; Valiela *et al.*, 1978; Jordan et Correll, 1985). Malheureusement, la quasi-majorité des recherches qui ont traité des bilans import-export d'un marais salé avec le milieu côtier, s'est focalisée sur l'étude des marées les plus fortes de certains mois, voire d'une année complète. Aussi, notre démarche générale a consisté à prendre en considération, non seulement l'ensemble des marées de l'année, mais également les écoulements en phase d'intercycle de marée, ceci ayant été réalisable grâce au développement de la station expérimentale (Troccaz, 1995).

3.2 - Quels systèmes pour quels échanges ?

L'étape première de cette étude a consisté à subdiviser le système étudié en sous-systèmes, afin de réaliser une étude plus fine des échanges qui les rendent dépendants. Dans la mesure où le vecteur principal s'avère être l'eau, la compartimentation a été envisagée d'après des propriétés hydriques.

Tout d'abord, nous avons différencier les systèmes strictement terrestres de ceux atmosphériques dont les échanges ont été restreints aux précipitations et à l'évapotranspiration (A). Bien sûr, il aurait fallu y

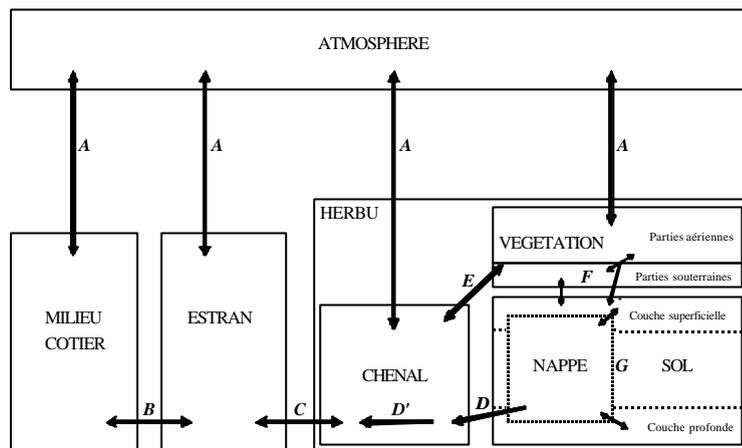


Figure 3.2 - Les sous-systèmes retenus

ajouter certains flux gazeux caractéristiques des marais salés (NO_x), mais cela sortait du domaine d'application que nous avons fixé initialement (échanges hydriques strictement).

Dans un second temps, nous avons différencié les trois sous-compartiments principaux de la Baie du Mont Saint Michel. En effet, comme nous l'avons précisé dans le chapitre 1, la Baie peut être entrevue, de manière très simplifiée, selon : la partie réellement maritime intégrée à la

Manche, l'estran, caractérisé par des dépôts vaseux, sans végétaux supérieurs mais colonisé par des algues et des bactéries, et, les systèmes terrestres plus en amont, dont les marais salés font partie. Aussi, lorsque l'on parle d'échanges entre un marais salé et le milieu littoral, il faut en fait distinguer les connexions entre milieu côtier et estran (B), et, estran et marais salé (C). Dans le cadre de cette étude, nous n'avons malheureusement pas pu tenir compte des échanges B qui auraient nécessité une mise en oeuvre trop lourde, notamment les fréquentes sorties en mer pour les prélèvements. Nous avons donc focalisé cette recherche sur les relations C mettant en jeu l'estran et les chenaux de marée.

Intervient ensuite le fonctionnement interne du marais. A ce stade, nous pouvons distinguer quatre composantes essentielles : les chenaux, la végétation, le sol et la nappe d'eau souterraine. Lors des périodes d'intercycles, les échanges fondamentaux (C), unidirectionnels dans ce cas, se limitent à l'exfiltration de la nappe par les berges de chenaux (D) et au ressuyage ensuite (D'). Nous avons utilisé la même lettre pour ces deux phénomènes car ils dépendent d'un même processus physique: le drainage de sous-surface. Cependant, comme nous le montrerons plus tard, d'après leurs caractéristiques qualitatives, ils ne peuvent être regroupés sous un même symbole. Via le jeu des marées, le chenal sert de structure conductrice d'amenée d'eau à l'intérieur du marais. Sous certaines conditions d'amplitude, la marée reste canalisée dans le réseau de chenaux et en complément du flot et du jusant (C), intervient le drainage de sous-surface (D + D'). A l'opposé, sous d'autres conditions, la marée inonde les herbues et, à la différence du cas précédent, il faut prendre en compte le ruissellement de surface (E). Comme nous l'avons déjà précisé ci-avant, cette submersion est à l'origine de la recharge en eau, totale ou partielle, de la nappe souterraine. Celle-ci s'accompagne de phénomènes de lessivage (F) de divers éléments à la surface du marais vers les horizons de sol superficiels. Cependant, il s'avère que, du fait de certaines forces de pression, l'inondation du marais est également responsable d'une remontée du niveau de nappe par les horizons inférieurs, phénomène nettement prépondérant comparativement au lessivage. Ainsi, ces mouvements d'eau (G) et le lessivage (F) sont les facteurs clés de la dynamique de la nappe, laquelle fera l'objet d'une étude particulière ultérieurement.

C'est sur cette base schématique des échanges intersystèmes que nous avons axé notre recherche, l'objectif final étant d'en dresser les propriétés et importances relatives générales.

3.3 - Démarche adoptée

Le protocole que nous avons développé correspond en fait au stade final de nombreuses étapes transitoires (Troccaz *et al.*, 1994) dont nous ne précisons pas les caractéristiques. De la même façon, même si notre but premier était d'étudier toutes les marées de l'année, et donc de réaliser un suivi quotidien du marais, cela n'a malheureusement pas pu être envisageable dès le début de l'étude du fait de l'investissement en temps et en coût que cela représente. Néanmoins, nous présenterons ici la démarche adoptée selon un pas de temps journalier.

Réaliser un suivi quotidien du marais sous-entend un nombre important d'échantillons à ramener régulièrement au laboratoire, mais surtout à analyser et à interpréter ensuite. Il était donc fondamental

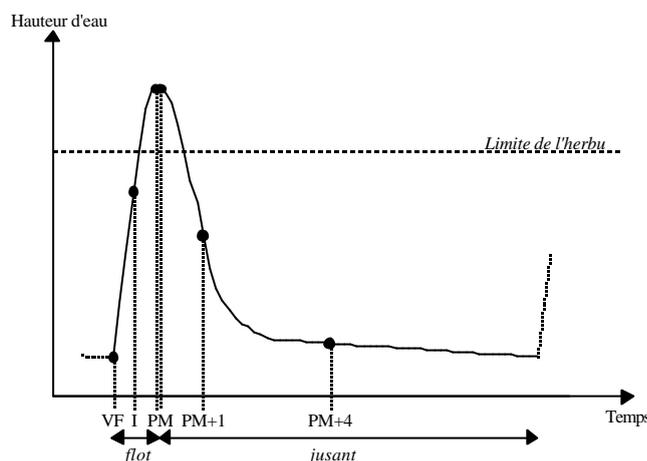


Figure 3.3 - Echantillonnage d'une marée

de rester modeste et de limiter les prises d'eau afin d'obtenir un protocole relativement souple mais assez précis. Dans cette optique, nous avons restreint les suivis des marées à deux prélèvements moyens, un pour le flot et l'autre pour le jusant, chacun étant constitué en fait de trois échantillons. Pour ce faire, le préleveur automatique est pré-programmé de telle façon qu'il change de flacon récepteur tous les trois échantillons. Pour le flot, ils correspondent à 1) la vague de flot

(VF), 2) un échantillon intermédiaire (I) en temps entre vague de flot et pleine mer, et, 3) la pleine mer (PM). Pour le jusant, il s'agit de 1) la pleine mer, 2) une heure après la pleine mer (PM+1), et, 3) quatre heures après la pleine mer (PM+4). Dans la mesure où, de manière quasi-générale, il y a deux marées chaque jour, cela constitue quatre prélèvements quotidiens de marée en période de cycle. Bien évidemment, c'est la centrale d'acquisition qui est à l'origine des impulsions de prélèvement. Du fait qu'elle le limnigraphe du chenal toutes les minutes, la mise en évidence de la vague de flot répond à un simple test. A chaque nouvelle minute, la centrale garde en mémoire la hauteur d'eau de la minute précédente et s'interroge sur l'écart d'hauteur observé entre ces deux mesures. S'il est supérieur à 2 cm, c'est une vague de flot et la procédure d'échantillonnage de marée commence avec un premier échantillon, sinon, il n'y a aucun changement. Cette valeur de 2 cm a été retenue d'après les premiers enregistrements de niveaux d'eau du chenal que nous avons obtenus : assez élevée pour éviter de confondre une marée avec les remontées d'eau accidentelles dues aux pluies, mais assez faible pour ne pas éliminer les marées de faible amplitude dont les vitesses d'élévation du niveau d'eau sont relativement lentes. De manière similaire, l'échantillon de pleine mer est réalisé selon la réponse au test suivant : si la variation d'hauteur d'eau en une minute est inférieure à 0,4, l'étal de pleine mer est alors atteint, d'où le troisième échantillon du flot. Là aussi, la valeur test est choisie assez forte pour éviter de confondre une baisse accidentelle et temporaire de l'élévation du niveau d'eau avec l'étal. Les limites du flot (vague de flot et étal) restent donc relativement faciles à caractériser si l'on se base sur des variations de plan d'eau et non pas sur des horaires comme la logique initiale le voudrait.

Concernant l'échantillon intermédiaire, nous avons là aussi adopté une procédure de test basée sur des niveaux d'eau, plus précisément, sur

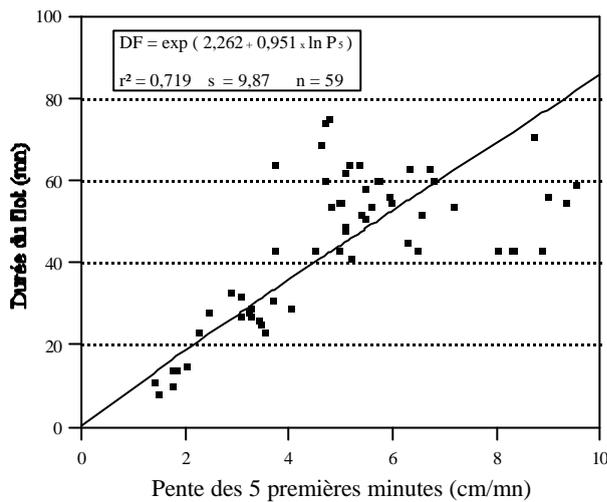


Figure 3.4 - Relation test du prélèvement intermédiaire

environ 8 minutes, nous étions donc limités en temps. L'équation mentionnée avec le graphe ci-dessus traduit cette relation, et est obtenue en transformant les données en séries logarithmiques, l'ajustement final étant meilleur que par une simple régression linéaire. De la même façon, nous aurions pu améliorer cette tendance en considérant, au-fur-et-à-mesure des mois écoulés, les nouvelles données obtenues par les enregistrements. Cependant, dans la mesure où cet ajustement répondait toujours bien à l'objectif recherché, nous n'avons pas jugé nécessaire de le modifier (d'où le faible nombre de marées pris en compte).

la valeur d'une pente. En effet, dès les premiers enregistrements de marée obtenus, nous avons pu mettre en évidence qu'il existait une relation assez significative pour estimer la durée du flot (DF) d'après la pente d'élévation du niveau d'eau des cinq premières minutes (P_5) suivant la vague de flot. Bien sûr, l'ajustement aurait été meilleur si l'on avait considéré un intervalle de temps supérieur, mais, dans la mesure où les plus faibles marées observées (8 cm) se caractérisent par un flot durant

Concrètement, dès qu'une vague de flot arrive dans le chenal, la centrale mémorise l'heure d'arrivée et le niveau initial de la marée. Cinq minutes plus tard, par simple différence entre le niveau alors atteint et celui de départ, le tout étant divisé par 5, nous pouvons aisément approcher la durée totale du flot. Divisé par 2, et sommé à l'heure d'arrivée de la marée, nous en déduisons l'horaire de l'échantillon intermédiaire.

Pour le jusant, la procédure est nettement plus simple puisque basée uniquement sur des pas de temps horaires. En effet, cinq minutes après le dernier échantillon du flot, nous effectuons le premier du jusant, puis un autre une heure plus tard, et le dernier quatre heures après. Ainsi, les prélèvements de flot et de jusant se caractérisent par un échantillon de pleine mer, ceci ayant été pensé de manière à intégrer les limites de chacun de ces processus.

Concernant les écoulements d'intercycles, le préleveur restant toujours pré-programmé pour trois prises d'échantillon pour un prélèvement, nous avons adopté une fréquence bi-quotidienne. Les échantillonnages sont ainsi réalisés toutes les quatre heures : à 9, 13 et 17 heures pour le prélèvement de jour, et, 21, 1 et 5 heures pour celui de nuit. Le fait de différencier les périodes diurnes des nocturnes avait pour objectif de mettre en évidence une éventuelle modification qualitative des activités biologiques. Par ailleurs, le choix des heures retenues n'est pas anodin. En effet, nous nous sommes aperçus que, de manière régulière, lorsqu'un cycle de marées commence, la première marée à atteindre le chenal intervient soit avant 9 heures, soit avant 21 heures, ceci se justifiant par le caractère cyclique des périodes de retour des marées. Aussi, en retenant ces limites comme première heure d'échantillon d'intercycle, nous étions sûrs de ne pas faire coïncider une séquence d'échantillons d'intercycle et une vague de flot.

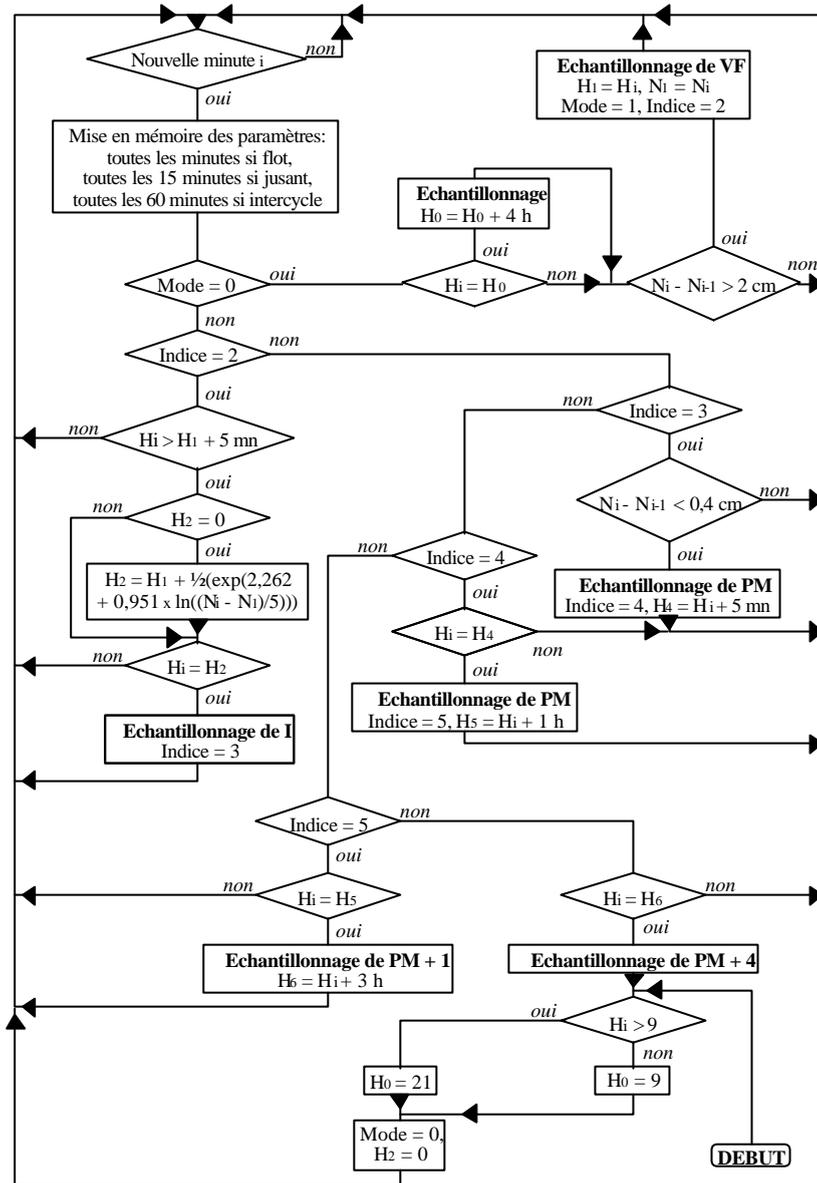


Figure 3.5 - Organigramme simplifié du programme de la centrale

Légende

- Mode = mode de prélèvement = 0, si intercycle, 1, si cycle,
- Indice = n° des échantillons de cycle = 2, 3, 4 ou 5 (1 et 6 sont sous-entendus par la procédure),
- Ni = niveau d'eau pour la minute i, Hi = horaire (hhmm) pour la minute i,
- H0 = horaire des échantillons d'intercycle (1, 5, 9, 13, 17 ou 21 heures),
- N1 = niveau d'eau au moment de la vague de flot VF, H1 = heure d'arrivée de la vague de flot VF,
- H2 = horaire de l'échantillon intermédiaire I,
- H4 = horaire de l'échantillon de pleine mer PM pour le jusant,
- H5 = horaire du deuxième échantillon de jusant (PM + 1 heure),
- H6 = horaire du troisième échantillon de jusant (PM + 4 heures).

Compte tenu de la capacité maximale de 24 flacons du préleveur, nous avons décidé d'aller deux fois par semaine sur le site pour récupérer les prélèvements. Nous en profitons également pour échantillonner les deux séries de cinq piézomètres et pour recueillir éventuellement l'eau de pluie stockée dans le container. Ainsi, si nous nous basons sur une période de 7 jours pour les cycles de marée et de 10 jours pour les intercycles, nous obtenons, en 15 jours, 88 prélèvements d'eau, sans tenir compte de ceux de la pluie (4x7 jours + 2x10 jours + 2x5x4 sorties sur le terrain).

Tous ces prélèvements sont ramenés au laboratoire en vue d'analyses chimiques. Pour les prélèvements du chenal, de la nappe et d'eau de pluie, une fraction est passée sur filtre Whatman®

0,45 µm GF/C, et analysée pour :

- N-NH₄⁺, méthode au bleu d'indophénol (Chaney *et al.*, 1962),
- N-NO₃⁻, après réduction en nitrite avec une colonne de cadmium traitée au sulfate de cuivre (Standard Methods, 1981), les nitrites étant dosés après formation d'un coloré rouge pourpre avec l'acide sulfanilique et le NED dihydrochloride (Standard Methods, 1981),
- P-PO₄²⁻, méthode au molybdate et à l'acide ascorbique (Murphy et Riley, 1962; Stephens, 1963),
- H₂SiO₄, méthode à l'acide chlorhydrique et au molybdate (Mullin *et al.*, 1955),
- l'azote total dissous-DN, après oxydation de tous les composés azotés sous forme nitrate par minéralisation avec une solution alcaline au persulfate (Koroleff, 1972; D'Elia *et al.*, 1977), le nitrate étant dosé comme décrit ci-avant,
- le phosphore total dissous-DP, après transformation du phosphore en phosphate inorganique soluble par minéralisation avec une solution acide au persulfate (Glibert *et al.*, 1977; Koroleff, 1977), le phosphate étant dosé comme décrit ci-avant,
- le carbone organique (DOC) et inorganique (DIC) dissous (avec un Shimazu® TOC 5000 Total Organic Carbon Analyzer).

Pour les échantillons du chenal, une fraction non filtrée est utilisée pour estimer :

- les matières en suspension, après passage sur filtre Whatman® 0,45 µm GF/C et pesée du filtre sec après 24 heures à 40°C (Standard Methods, 1981),
- la chlorophylle-a, après extraction à l'acétone 90% durant 24 heures au frais, puis déterminée avec les équations trichromatiques (Scor-Unesco, 1966),
- l'azote total-TN, selon la même méthode que pour DN,
- le phosphore total-TP, selon la même méthode que pour DP.

Par ailleurs, certaines de ces méthodes ont été modifiées et d'autres adaptées aux eaux salines d'après des indications mentionnées par Strickland et Parsons (1968) et Golterman *et al.* (1978).

Enfin, afin de vérifier la stabilité qualitative des échantillons du préleveur, à chaque déplacement sur le terrain, un prélèvement annexe est réalisé, une fraction restant à l'intérieur même du préleveur, une autre étant ramenée au laboratoire, puis analysée. La fraction laissée in situ est analysée au retour du déplacement suivant, et les résultats obtenus sont comparés avec ceux de l'autre fraction. Nous pouvons ainsi déceler d'éventuelles contaminations algales ou bactériennes, notamment durant les saisons les plus chaudes, et compenser certains des résultats obtenus pour les suivis. Toutefois, nous n'avons jamais observé de différences significatives entre les deux fractions test, ceci pouvant être expliqué par l'intervalle de temps relativement court entre deux déplacements.

CONCLUSIONS DE LA PREMIÈRE PARTIE

La Baie du Mont Saint Michel apparaît donc comme un système très diversifié, mi-maritime et mi-terrestre. Cette dualité est en fait la traduction d'une progression permanente du milieu terrestre sur la zone maritime du fait du jeu des marées, associé à un bilan sédimentaire excédentaire. L'homme en a tiré profit depuis longtemps (polders) et encore actuellement (pêcheries, parcs à huîtres, bouchots), ceci étant à mettre en relation également avec le climat océanique très doux qui caractérise cette région. L'envasement de la Baie s'accompagne d'une augmentation de la surface de marais salés, limite terrestre très particulière puisque régulièrement inondée par les marées, caractérisée par un substrat constitué essentiellement de sable grossier et colonisée par une végétation maritime spécifique. Très étudiés actuellement, ces systèmes sont soupçonnés être des sources importantes d'éléments vitaux des réseaux trophiques maritimes voisins. A ce titre, depuis cinq ans environ, l'Europe a décidé de lancer des programmes de recherches sur les marais de la côte ouest. Quatre pays (Angleterre, Pays Bas, Portugal et France) ont répondu à l'appel, et ont retenu des sites de telle manière à obtenir un gradient optimal des conditions géographiques pour des comparaisons pertinentes.

L'étude que nous présentons a pour objet d'étudier une zone restreinte mais représentative des marais salés, et notamment d'en préciser les modalités fonctionnelles et contributions respectives avec le littoral. Dans cette optique, nous avons développé une station expérimentale autonome, implantée à la limite même de la zone terrestre colonisée par la végétation. Cette structure, relativement unique en son genre, nous permet d'observer en temps réel l'évolution du comportement du marais d'après différents critères (marées, contraste jour/nuit, saisons,...). La complexité du système nous a amené à penser et matérialiser différents dispositifs expérimentaux afin de maîtriser l'ensemble des paramètres retenus comme fondamentaux. Dans l'idée de coordonner et de contrôler les mesures effectuées, nombreux de ces équipements ont été raccordés à une centrale d'acquisition. Celle-ci, véritable mini-cerveau informatique, est capable de commander les appareils, d'enregistrer les réponses en retour et de répondre à des tests, ces procédures restant très souples puisque directement liées au programme en mémoire écrit par l'utilisateur.

Bien entendu, l'étude d'un tel système ne peut s'entrevoir sans une compartimentation en sous-systèmes. Notre démarche a donc consisté à établir une classification selon des paramètres hydriques, l'eau étant assurément la force motrice commune au fonctionnement général du marais. Nous avons ainsi pu différencier les compartiments principaux du système et définir les caractéristiques des échanges fonctionnels qui les rendent dépendants. C'est sur ces bases que le protocole d'échantillonnage a été défini et suivi pendant quatre années consécutives.

- DEUXIÈME PARTIE -
L'ÉTUDE INTERSYSTÈME DU MARAIS



CHAPITRE 4 - L'HYDROLOGIE DU SYSTÈME

CHAPITRE 5 - LA QUALITÉ DE L'EAU DURANT UNE
ANNÉE COMPLÈTE D'ÉTUDE

CHAPITRE 6 - LE BILAN INTERSYSTÈME

CHAPITRE 4 - L'HYDROLOGIE DU SYSTÈME

4.1 - Les marées

De manière à estimer les budgets du système, différentes formules empiriques ont été développées pour traduire les caractéristiques hydrauliques des écoulements de flot, de jusant et d'intercycle. Pour les cycles de marée, elles sont toutes référencées au niveau de pleine mer atteint (H_{pm} , en m), pour les intercycles, au niveau moyen de la nappe d'eau souterraine (H_{nap} , en m). Pour les durées du flot et du jusant, nous avons utilisé plusieurs séries de données déduites d'enregistrements de la centrale pour 61 marées. Les équations mentionnées pour les sections en eau du chenal correspondent en réalité à des moyennes, résultat de l'intégration des sections calculées pour chaque minute i et ramenée à la durée totale du phénomène (flot ou jusant) :

$$Section\ moyenne\ (m^2) = \frac{\sum_{i=1}^D Section\ réelle(i)}{D}$$

avec D = Durée totale du flot ou du jusant

Ces dernières relations sont établies d'après les mêmes enregistrements considérés pour les durées (donc pour 61 marées). Par ailleurs, lorsque la marée inonde l'herbu, nous considérons la largeur maximale du chenal, et non pas une largeur infinie, les débits s'en trouvant donc légèrement sous-estimés. Ceci reste cependant très acceptable dans la mesure où, dans ces cas de figure, les écoulements restent préférentiellement localisés au-dessus des chenaux. Les écoulements latéraux hors chenaux apparaissent donc négligeables comparativement aux volumes mis en jeu par les écoulements principaux.

Les vitesses sont estimées directement selon les méthodes de calibration décrites dans le chapitre 2 (mesures au moulinet et estimations par le modèle de simulation), l'ensemble étant réalisé pour 16 marées.

Toutes ces équations sont testées et obtenues par des modèles de régression non linéaires développés avec le logiciel Statgraphics®. Les débits et volumes sont déduits des résultats obtenus des diverses équations.

4.1.1 - le flot

Les formules mathématiques de calibration obtenues sont les suivantes :

$$\text{Durée}(mn)' 45,4 \times \sqrt{H_{pm}} \quad r^2' 0,919 \quad s' 4,8$$

$$\text{Section}(m^2)' 9,4 \times [\ln(H_{pm}\%1)]^{1,71} \quad r^2' 0,995 \quad s' 0,27$$

$$\text{Vitesse}(m.s^{-1})' 0,2 \times \exp[8,16 \times (H_{pm} - 0,82)^{3,45}] \times \frac{0,77}{[1\%0,77 \times 10^6 \times \exp(5,67 \times H_{pm}^{2,29})]} \quad r^2' 0,997 \quad s' 0,013$$

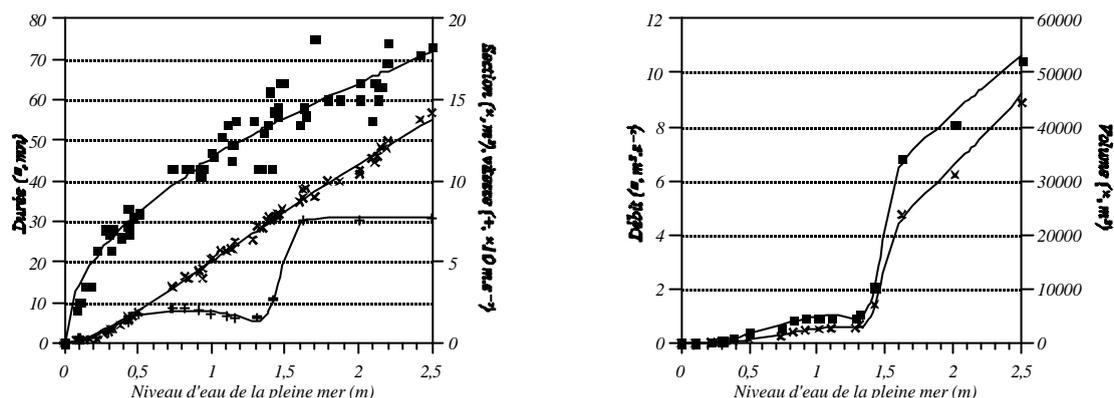


Figure 4.1 - Courbes de calibration du flot
(les courbes traduisent les équations mentionnées, les points, les valeurs réellement observées)

Il apparaît que le flot se caractérise par une durée relativement courte du phénomène. En effet, pour la plus forte hauteur de pleine mer observée durant cette étude (2,50 m), la montée d'eau a duré 72 mn, alors qu'une marée complète s'étale en moyenne sur environ 12 h 20 mn (soit 740 mn). Ceci est d'ailleurs une caractéristique fondamentale du marais de la Baie du Mont Saint Michel qui permet de le classer parmi les marais à flot dominant.

L'évolution quasi-linéaire de la section moyenne du chenal s'explique par la progression assez constante des durées en fonction des niveaux de pleine mer. La courbe typique obtenue pour la vitesse moyenne est à mettre partiellement en relation avec la physionomie du chenal. En effet, au point d'implantation de la station, et donc de mesures des vitesses de courant, celui-ci est profond d'environ 1,20 m. Ceci signifie, qu'au-delà de ce niveau, les marées vont inonder le marais. Nous observons effectivement une légère diminution des vitesses entre 1 et 1,30 m, la section d'entrée d'eau du chenal devenant plus importante. Entre 1,30 et 1,50 m, les vitesses moyennes augmentent considérablement, pour se stabiliser ensuite, au-delà de 1,50 m. Ce niveau correspond en réalité à celui de la micro-falaise située à 600 m de l'exutoire, dont nous avons déjà évoqué l'existence dans le chapitre 2. Celle-ci joue en réalité un rôle de butée à la progression de la marée, les vitesses s'en trouvant par conséquent ralenties.

L'évolution des débits et volumes moyens traduit la combinaison de ces différentes caractéristiques. Les courbes sont très semblables du fait de la relation quasi-linéaire entre durée et niveau de pleine mer. Pour la même raison, avec comme intermédiaire direct la section moyenne, leur allure générale n'est que l'amplification de la courbe des vitesses, caractérisée par une forte augmentation des valeurs obtenues au-delà de 1,30 m.

4.1.2 - le jusant

Les formules mathématiques de calibration obtenues sont les suivantes :

$$Durée(mn)' 83,2 \times Hpm^{0,62} \frac{544}{[1\%(544 \times 10^6 \times \exp(8,42 \times Hpm^{1,55}))]} \quad r^2' 0,998 \quad s' 11,6$$

$$Section(m^2) \quad \begin{matrix} \text{Tsi } Hpm < 1,50m & Section' & 3,89 \times Hpm^{1,29} & r^2' & 0,995 & s' & 0,27 \\ \text{Tsi } Hpm \ge 1,50m & Section' & (107,3 \times Hpm^{86,09})\%(4,26 \times Hpm^{7,93}) & r^2' & 0,888 & s' & 0,37 \end{matrix}$$

$$Vitesse(m.s^{-1})' 0,18 \times \exp[6,0 \times (Hpm^{0,68})^{1,70}] \frac{0,72}{[1\%0,72 \times 10^6 \times \exp(7,11 \times Hpm^{1,62})]} \quad r^2' 0,997 \quad s' 0,011$$

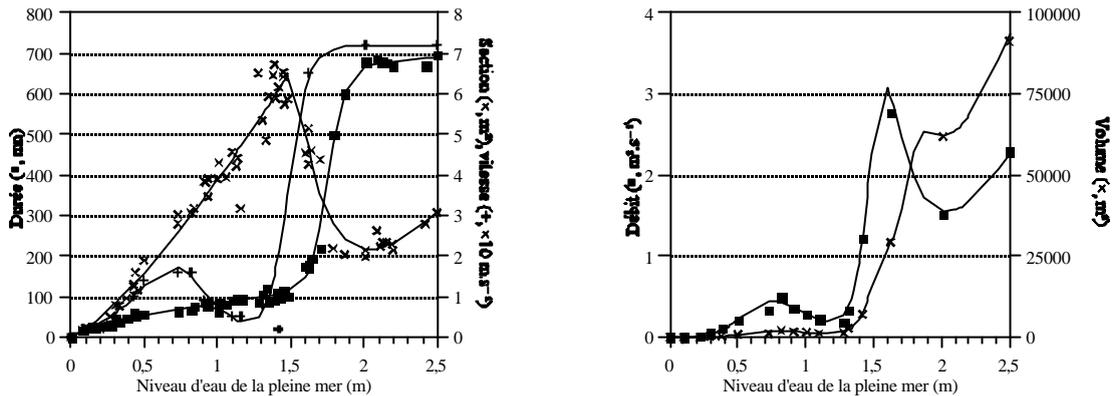


Figure 4.2 - Courbes de calibration du jusant
(les courbes traduisent les équations mentionnées, les points, les valeurs réellement observées)

En toute logique avec ce qui a été écrit précédemment, à l'inverse du flot, le jusant peut s'étaler durant environ 700 mn pour les niveaux de pleine mer maximum. Nous constatons cependant que la courbe des durées n'est linéaire que pour des niveaux inférieurs à 1,50 m environ. Au-delà, il y a communication entre le bassin versant et ceux adjacents. Du fait d'une situation altimétrique légèrement plus basse du système étudié, en condition d'immersion du marais, le jusant se caractérise alors par une collecte d'une partie des eaux des systèmes voisins. Ceci explique la forte augmentation de la durée du phénomène pour les niveaux supérieurs à 1,50 m. De ce fait, la courbe de la section moyenne présente une cassure nette pour ce même niveau caractéristique, ceci ayant impliqué la recherche de deux équations pour traduire cette évolution. En effet, la forte augmentation des durées a pour conséquence directe une rapide diminution de la section moyenne, les niveaux d'eau variant peu.

Les vitesses présentent des variations très similaires aux durées, tout du moins pour la partie de la courbe représentée pour des niveaux supérieurs à 1,30 m, ceci découlant des remarques mentionnées ci-avant. En deçà de 1,30 m, nous retrouvons une tendance linéaire semblable à celle observée pour le jusant, les deux phénomènes étant alors très proches : toute l'eau qui rentre dans le réseau ressort intégralement.

L'évolution des débits reste très semblable à celle de la section moyenne, tandis que les volumes ne cessent d'augmenter considérablement au-delà de 1,30 m. Ainsi, nous observons des volumes maximums de l'ordre de 93000 m³, alors qu'ils ne représentaient que 46000 m³ pour le flot. Cette différence s'explique par le rôle collecteur que peut jouer le bassin versant avec ceux adjacents.

4.2 - Les intercycles

Les formules mathématiques de calibration obtenues sont les suivantes :

$$H_{dr} \text{ (cm)}' 9,67 \times (H_{nap} \% 0,25)^{0,266} \quad r^{2'} 0,831 \quad ET' 0,039$$

$$Q_{dr} \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}' 6,71 \times 10^{13} \times H_{dr}^{10,29} \quad r^{2'} 0,987 \quad ET' 0,11$$

Les volumes mentionnés correspondent à ceux obtenus durant une journée entière de ressuyage. Dans le cas de cycle de marée, la dernière phase du jusant correspond très souvent à un ressuyage, et, dans

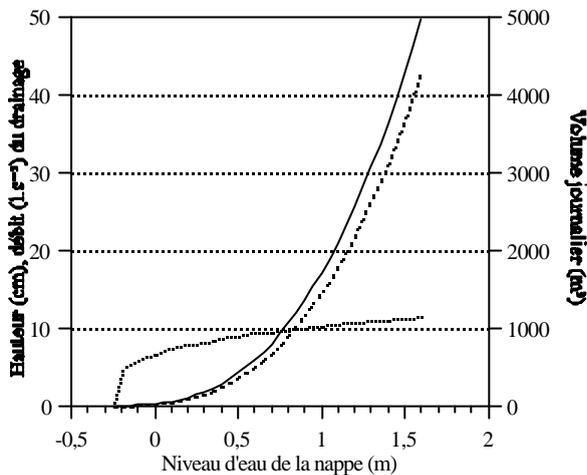


Figure 4.3 - Courbes de calibration de l'intercycle
(pointillés, hauteur; —, débit; tireté, volume)

ce cas, les mêmes formules de calibration peuvent être appliquées. La seule différence réside dans la durée à considérer qui n'est alors plus de 24 h (ou 1440 mn), mais de 12h 20 mn (ou 740 mn, ceci correspondant à la durée moyenne d'une marée), de laquelle il faut retrancher les durées des phases précédentes.

Dans le cas de l'intercycle, nous avons recherché directement la relation qui existait entre débit et niveau de nappe, sans prendre les vitesses et sections moyennes comme intermédiaires. En effet, le niveau d'eau de ressuyage du chenal

variant très peu, les sections sont quasiment constantes, et cette étape intermédiaire aurait été en réalité inutile. Comme nous pouvons le constater, les débits ne présentent pas d'évolution très spécifique, les courbes de type puissance étant relativement fréquentes pour les lois de ce type.

Les volumes mis en jeu quotidiennement restent relativement faibles comparativement à ceux des marées, mais nous verrons plus tard que les périodes d'intercycle sont d'une importance capitale dans le fonctionnement général du système.

4.3 - La nappe d'eau souterraine

L'hydrologie de la nappe d'eau souterraine influe directement sur celle des périodes d'intercycle que nous venons de décrire. En effet, ce sont les variations du niveau de nappe qui sont à l'origine de son exfiltration par les berges des chenaux. Ces fluctuations sont sous la dépendance de trois facteurs essentiels : les marées inondant le marais, les précipitations et l'évapotranspiration.

En collaboration avec F. Giraud (BRGM Montpellier), nous travaillons actuellement sur l'application à notre site du modèle de simulation Drainmod, développé par Skaggs (1975). Celui-ci, initialement prévu pour des parcelles agricoles, simule les mouvements de nappe dus au drainage (à interpréter comme ressuyage dans notre cas) ou à l'irrigation (sous-entendu infiltration verticale des pluies ou marées pour un marais salé). Bien que prometteurs, les résultats obtenus jusqu'à présent ne permettent de transcrire la réalité de manière assez fiable. Aussi, nous nous limiterons à une simple présentation des caractéristiques hydrauliques principales.

Les graphes ci-dessus résument l'impact des différents phénomènes affectant l'hydrologie de la nappe d'eau souterraine, ces séquences provenant d'enregistrements obtenus durant novembre 1994. Ainsi,

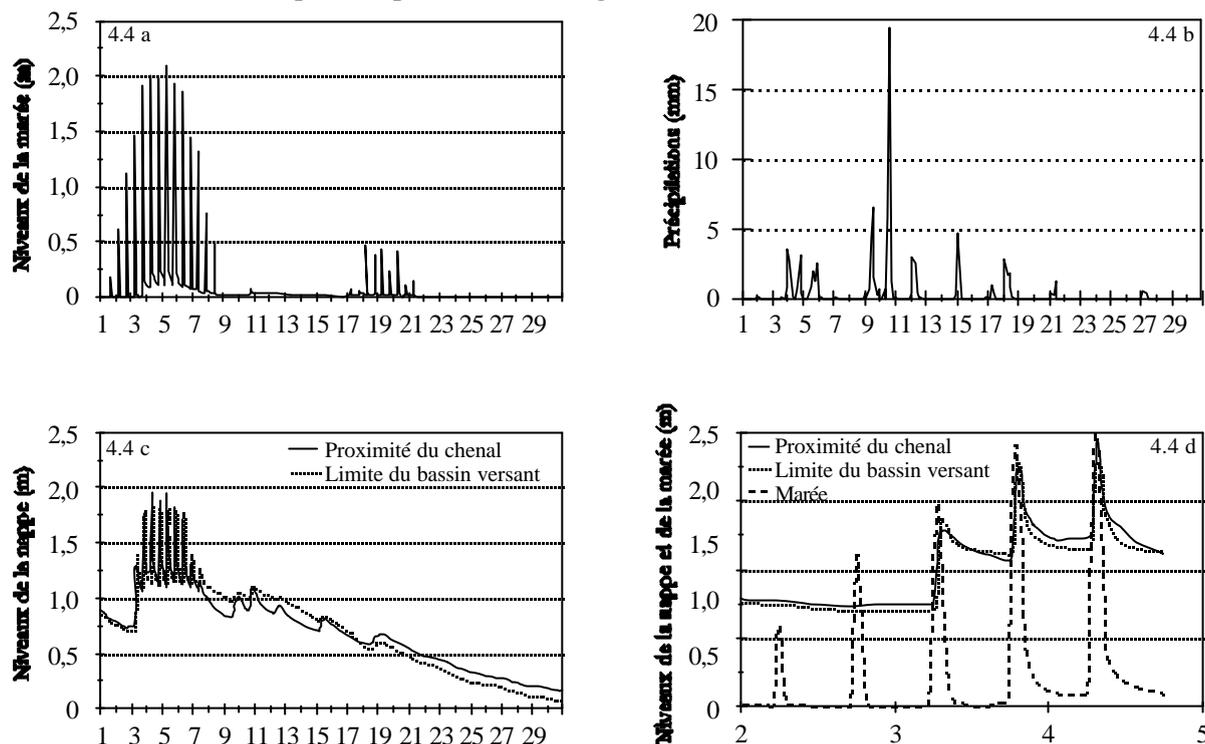


Figure 4.4 - Influence des marées (4.4 a et 4.4 d) et des précipitations (4.4 b) sur les variations du niveau de la nappe (4.4 c)

il apparaît nettement que la nappe est principalement influencée par les marées inondant l'herbu (niveau de pleine mer supérieur à 1,20 m).

Le graphe 4.4 d correspond en réalité à un zoom de l'influence des premières marées du cycle du début du mois sur les niveaux de la nappe. La deuxième marée mentionnée (2 novembre au soir), bien que submergeant partiellement le site, ne présente pas une charge en eau suffisante pour entraîner une remontée des niveaux. A l'inverse, la suivante, qui atteint presque 2,00 m, s'accompagne d'une recharge instantanée de la nappe à son niveau maximal (environ 1,40 m). Cependant, il ressort que l'impact des marées inondant le système ne se limite pas à une remontée ou à un maintien du niveau de nappe. Effectivement, il s'accompagne d'un exhaussement de la nappe hors des limites du sol, ceci étant imputable aux différences de pression hydraulique engendrées (Chambers, 1992). Ainsi, la recharge de la nappe provient d'une infiltration verticale d'un mélange d'eau de mer et d'eau du sol. Cette caractéristique influe par ailleurs directement sur les échanges intersystèmes puisque les divers composés situés à la surface du sol et susceptibles d'être lessivés, ne sont donc pas entraînés en profondeur de manière directe, mais seulement après une exfiltration verticale de la nappe. En effet, ils sont ainsi remis en suspension avec le milieu marin, déplacés du fait des courants, puis entraînés par infiltration dans la nappe.

A l'inverse, nous pouvons remarquer que les précipitations interviennent directement sur la recharge de la nappe (infiltration verticale donc), ceci étant plus marqué à proximité du chenal qu'à la limite du bassin versant. Par ailleurs, les fortes averses entraînent un ruissellement à la surface du marais, ceci s'observant par un léger pic des niveaux d'eau du chenal (le 10 au soir).

La qualité de l'eau durant une année complète d'étude

Par ordre décroissant d'importance sur les variations du niveau de nappe, interviennent ensuite les cycles de marée de faible amplitude. En effet, comme nous pouvons le constater, le cycle du 17 au 21 novembre a eu un impact très limité sur la nappe, celui-ci étant de plus accompagné d'une pluie le 18. Ceci démontre ce que nous avons évoqué dans le chapitre 2 : pour la recharge de la nappe, l'infiltration latérale par les berges des chenaux est négligeable.

Ces processus constituent donc l'alimentation en eau de la nappe. Les pertes sont sous la dépendance de deux mécanismes principaux, directement liés à l'état structural du sol : l'évapotranspiration et l'exfiltration par les berges. Sans les discerner et hors période de marée ou de précipitation, ils peuvent entraîner une baisse moyenne du niveau de nappe atteignant jusqu'à 9 mm.h^{-1} . Par ailleurs, il apparaît que pour un niveau moyen situé aux alentours de $0,60 \text{ m}$, la pente de la nappe s'inverse. En effet, au-delà de cette valeur, le niveau de nappe à la limite du bassin versant est supérieur à celui à proximité du chenal, d'où une pente dirigée vers le chenal. En deçà, l'ordre des cotes des deux points de mesure s'inverse, d'où une pente contraire. Ceci ne modifie cependant pas les écoulements de ressuyage engendrés, dans la mesure où nous n'avons pas observé de changement spécifique dans les volumes estimés en fonction du niveau de nappe.

Avec seulement deux cotes références du niveau de la nappe pour l'ensemble du bassin versant, nous ne pouvons estimer les volumes d'eau mis en jeu directement par la nappe. Aussi, nous avons considéré que les volumes mesurés à l'exutoire en période de ressuyage provenaient intégralement de l'exfiltration de la nappe. Cette approximation permet ainsi d'avoir un aperçu indirect des mouvements d'eau phréatiques moyens à l'échelle du bassin.

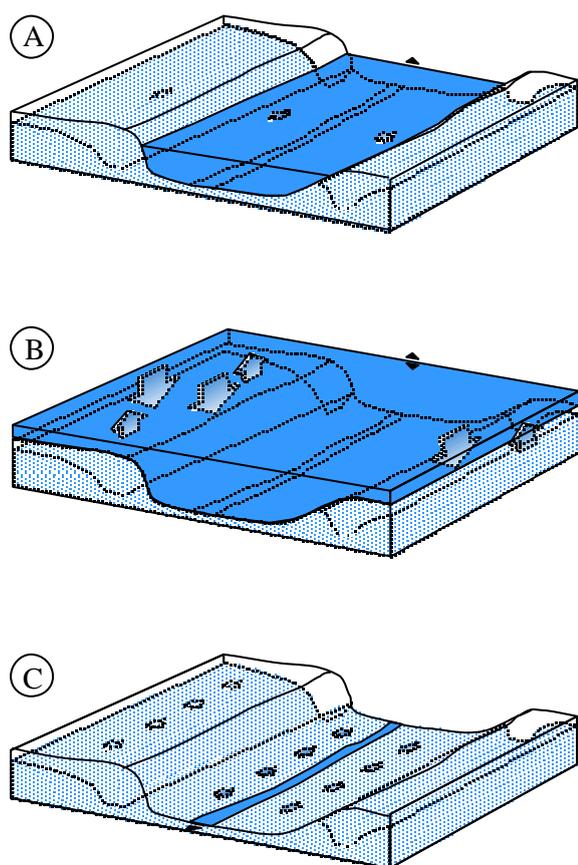


Figure 4.5 - Processus hydrauliques de la nappe d'eau

Le graphe ci-dessous reprend les différentes modalités de la dynamique hydraulique de la nappe d'eau, les apports par précipitations et pertes par évapotranspiration étant sous-entendus. Lorsqu'une marée parvient au chenal (A), même si ce processus reste relativement limité, nous pouvons observer une entrée d'eau réduite par les berges des chenaux, cette infiltration latérale entraînant une sensible augmentation du niveau de la nappe.

A l'inverse, quand l'herbu est inondé par une marée (B), l'infiltration verticale prédomine alors nettement, le passage d'une seule marée suffisant à recharger complètement la nappe. Toutefois, dans ces mêmes conditions, du fait du jeu des différences de pressions hydrauliques, nous pouvons observer simultanément un exhaussement de la nappe hors des limites du sol. Nous n'avons malheureusement pas mené d'expériences pour déterminer l'importance relative de ces deux processus.

Enfin, lorsque la mer s'est retirée du chenal, ou lors des périodes d'intercycles (C), la nappe souterraine s'exfiltre régulièrement des berges des chenaux, ceci engendrant un écoulement d'eau continu que nous avons assimilé au ressuyage des lits de chenaux.

CHAPITRE 5 - LA QUALITÉ DE L'EAU DURANT UNE ANNÉE COMPLÈTE D'ÉTUDE

Les résultats que nous allons présenter dans ce chapitre proviennent d'analyses réalisées durant l'année 1994. En effet, c'est la seule année complète pour laquelle nous disposons de données analytiques et physiques quotidiennes, que ce soit pour les marées, les intercycles, la nappe d'eau souterraine ou les précipitations.

5.1 - Les cycles et intercycles de marée

5.1.1 - Estimation des flux

L'un des objectifs essentiels de cette étude est d'estimer quelle part de la production du marais est exportée vers le milieu marin, et, réciproquement, quel rôle joue le milieu côtier dans le fonctionnement de l'écosystème. A ce titre, l'étude des échanges intersystèmes est capitale, et surtout, l'estimation des flux doit être la plus fine possible.

Le raisonnement premier consisterait à considérer les concentrations observées, à les multiplier par les volumes mis en jeu correspondants, et à sommer les flux ainsi obtenus. Eventuellement, les résultats peuvent être ramenés aux surfaces inondées concernées du système, de façon à obtenir des valeurs significativement comparables. Quoique très largement employée, cette méthode de calcul présente l'inconvénient d'être trop statique. En effet, elle ne prend absolument pas en considération la variabilité de qualité des nutriments observable d'un jour sur l'autre. Aussi, nous avons préféré appliqué la méthode développée par Childers *et al.* (1993), qui se révèle beaucoup plus proche de la réalité car elle correspond en fait à une étude dynamique du système. Elle est basée sur l'utilisation d'un modèle hydrologique des marées pour estimer les surfaces du marais inondées quotidiennement, celles-ci étant couplées avec les flux de nutriments observés en parallèle.

La première étape consiste à estimer un budget dynamique en multipliant les flux mesurés (en $\text{mg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$) par l'aire pondérée-temps de la surface du marais inondée (en $\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{j}^{-1}$), selon:

$$\text{Flux mesurés}(\text{mg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}) \cdot \frac{\text{Concentration observée}(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}) \times \text{Volume mis en jeu}(\text{m}^3)}{\text{Surface inondée}(\text{m}^2) \times \text{Durée du phénomène}(\text{h})}$$

$$\text{Aire pondérée temps}(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{j}^{-1}) = \int_1^{24} \text{Aire inondée}(dt) (\text{m}^2)$$

$$\text{Aire inondée pour les marées}(\text{m}^2) = \frac{123000}{1 \% 123000 \times \exp(10,61 \times h^{0,385})} \quad r^2 = 0,990 \quad s = 4924$$

$$\text{Aire inondée pour les intercycles} = 6420 \text{ m}^2 = \text{Surface en eau de ressuyage du réseau de chenaux}$$

avec h le niveau d'eau du chenal (en m).

La qualité de l'eau durant une année complète d'étude

La quantité obtenue (en mg.j^{-1}) est ensuite ramenée au volume moyen journalier (m^3), le résultat correspondant à l'enrichissement ou au déficit moyen du flux de la colonne d'eau pour chaque nutriment (en g.m^{-3}). Ainsi, si ce flux calculé est supérieur (ou inférieur) à la variation de concentration observée pour ce jour (= écart de concentration avec le jour précédent), le budget se traduit par un import (ou export) du nutriment pour le jour considéré. En conséquence, les imports au système sont exprimés avec un signe positif, les exports avec un signe négatif.

L'écart entre les flux estimés et ceux observés initialement permet donc d'estimer le budget obtenu pour la journée, ceci étant réalisé selon trois étapes : 1) calcul d'un flux moyen (F_{moy}) des concentrations observées (C_{moy}) par moyenne mobile sur 15 jours, 2) estimation de l'écart journalier ($?F$) en soustrayant ce résultat à celui de la veille, et, 3) obtention du flux réel ($F_{\text{réel}}$) en corrigeant le flux estimé par le modèle avec le résultat précédent. Soit, pour chaque nutriment, pour une date i et pour un volume moyen V_{moy} :

$$V_{\text{moy}}(i) (\text{m}^3) = \frac{[V_{\text{flot}}(i) \times D_{\text{flot}}(i)] \% [V_{\text{jusant}}(i) \times D_{\text{jusant}}(i)] \% [V_{\text{ressuyage}}(i) \times D_{\text{ressuyage}}(i)]}{D_{\text{flot}}(i) \% D_{\text{jusant}}(i) \% D_{\text{ressuyage}}(i)}$$

$$C_{\text{moy}}(i) (\text{g.m}^{-3}) = \frac{[C_{\text{flot}}(i) \times V_{\text{flot}}(i)] \% [C_{\text{jusant}}(i) \times V_{\text{jusant}}(i)] \% [C_{\text{ressuyage}}(i) \times V_{\text{ressuyage}}(i)]}{V_{\text{flot}}(i) \% V_{\text{jusant}}(i) \% V_{\text{ressuyage}}(i)}$$

$$F_{\text{moy}}(i) (\text{kg.j}^{-1}) = \frac{\sum_{j=i-7}^{i+7} C_{\text{moy}}(j)}{15} \times V_{\text{moy}}(i)$$

$$?F(i) (\text{kg.j}^{-1}) = F_{\text{moy}}(i) - F_{\text{moy}}(i-1)$$

$$F_{\text{réel}}(i) (\text{kg.j}^{-1}) = F_{\text{estimé}}(i) + ?F(i)$$

Tous ces calculs ont été réalisés en mode semi-automatique avec le logiciel Quattro Pro[®], différentes macros ayant été créées pour réaliser le travail selon un pas de temps de 12 heures. En effet, du fait de la caractéristique semi-diurne des marées (deux marées par jour), nous avons préféré travailler par demie-journée pour ne pas inhiber les effets potentiels de l'une ou de l'autre des marées. En sommant ces valeurs, nous pouvons estimer ainsi les imports ou exports de matériel au cours de l'année.

Les résultats que nous allons présenter ci-après décrivent les deux caractéristiques principales émanant des calculs des flux. Il s'agit tout d'abord des variations dynamiques des flux (en g.m^{-3}), lesquels traduisent un enrichissement ou un déficit de la colonne d'eau. Dans la mesure où ces flux sont représentatifs d'un volume d'eau unitaire, ils permettent de réaliser des comparaisons sur l'influence de certains mois dans la dynamique du nutriment considéré. Parallèlement à ces variations, nous avons mentionné les bilans réels obtenus pour chaque demie-journée (en kg), afin d'observer de quelle manière les variations précédentes se traduisent en terme de budget. Enfin, par souci de clarté, ces résultats sont représentés tous phénomènes confondus, c'est-à-dire en regroupant les cycles et intercycles de marée.

5.1.2 - Les dynamiques élémentaires de la colonne d'eau

5.1.2.1 - Les niveaux de pleine mer de l'année 1994

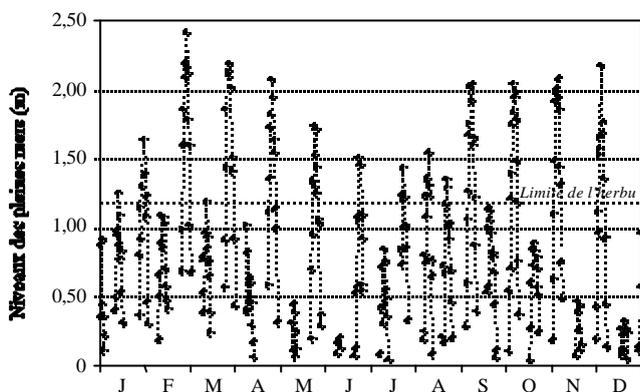


Figure 5.1 - Niveaux de pleine mer en 1994

Le graphe ci-contre résume bien l'importante variabilité des niveaux de pleine mer observable durant une année. Comme nous pouvons nous en rendre compte, les plus fortes marées interviennent à la fin de l'hiver et à la fin de l'été, ceci correspondant aux changements d'équinoxe. Le printemps se caractérise par des marées de faible amplitude. Il faut également remarquer l'alternance régulière d'un fort puis d'un plus faible cycle de marée, cette caractéristique étant particulièrement importante puisqu'elle est

à l'origine de la prolongation de l'exfiltration de la nappe, et donc du ressuyage.

5.1.2.2 - Les formes azotées

L'évolution de la dynamique de $N-NH_4^+$ révèle un déficit prononcé des flux puisqu'ils sont toujours inférieurs à $-0,7 \text{ g.m}^{-3}$. Cependant, celui-ci apparaît nettement plus marqué entre avril et juin.

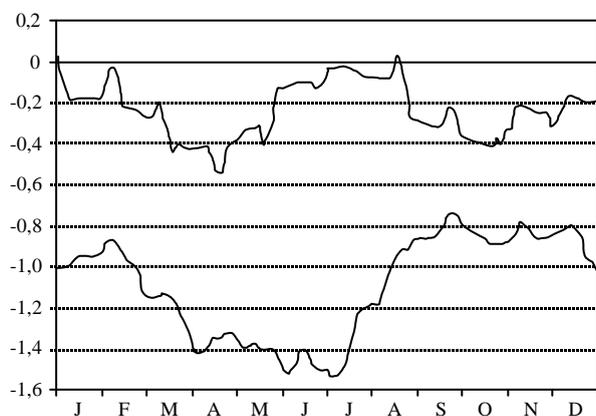


Figure 5.2 - Dynamique de $N-NH_4^+$
(---, flux en g.m^{-3} ; —, budget en kg)

En effet, cette période a déjà été reconnue comme caractéristique de la reprise de la croissance des végétaux, avec une consommation accrue de cet élément (Whiting *et al.*, 1989), notamment par la salicorne (Page, 1995). Dès juillet jusqu'à mi-septembre, les flux deviennent de moins en moins déficitaires, ceci pouvant être mis en parallèle avec la maturité et la sénescence de la végétation en place (Valiela et Teal, 1979; Georges, 1982). Bien que nous ayons intégré cycles et intercycles de marée dans ces résultats, l'impact des marées en terme de budget reste relativement bien identifiable par la

présence de pics intervenant à intervalles réguliers et espacés par les périodes d'intercycle. Le budget suit relativement bien les fluctuations des flux durant les quatre premiers mois de l'année, mais, à compter de mai jusqu'à mi-juillet, il devient de moins en moins exportateur. Comme nous pouvons nous en rendre compte d'après le graphe, cette baisse est essentiellement imputable aux phénomènes de ressuyage, ceux-ci étant prépondérants durant cette période du fait des faibles niveaux de pleine mer des marées. Plus précisément, nous pouvons éventuellement rattacher ce phénomène à l'apparition des blooms

bactériens, lesquels assimilent NH_4^+ comme source azotée ou l'oxyde en NO_3^- et NO_2^- par nitrification (Haines *et al.*, 1977; Sumi et Koike, 1990; Dickson et Wheeler, 1995a; Thompson *et al.*, 1995), l'activité étant alors maximale du fait des températures élevées (Berounsky et Nixon, 1993; Boyer *et al.*, 1994).

A la fin du printemps et au début de l'été, aucune marée n'a inondé réellement l'herbu, d'où une recharge très limitée de la nappe. Ceci se traduit par des volumes de ressuyage de plus en plus faible, ce qui explique pourquoi la hausse importante des flux en juillet et août n'apparaît pas dans les bilans. A l'inverse, les premières marées de forte amplitude de fin août entraînent une nette et rapide augmentation des exports en NH_4^+ . Celle-ci peut être rattachée à la remise en suspension du sédiment, lequel se caractérise par des concentrations importantes adsorbées aux particules solides (Simon, 1989; Bowden *et al.*, 1991).

De manière assez similaire, les flux de N-NO_3^- sont déficitaires tout au long de l'année, mais, à la différence de N-NH_4^+ , nous pouvons observer une forte augmentation de ce déficit qui passe de -0,2

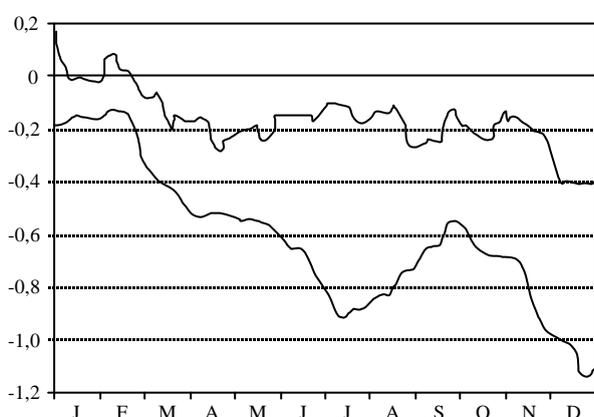


Figure 5.3 - Dynamique de N-NO_3^-
(—, flux en g.m^{-3} ; —, budget en kg)

à -1,1 g.m^{-3} . La relative stabilité des flux et le bilan positif du début de l'hiver sont à rattacher aux faibles activités bactériennes et aux moyennes amplitudes de marée n'entraînant pas d'échange spécifique. Effectivement, nous pouvons observer que, dès fin février, le premier cycle de fortes marées s'accompagne d'une nette augmentation des exports, ceux-ci restant purement advectifs (Aurand et Daiber, 1973; Valiela et Teal, 1979; Whiting *et al.*, 1987; Schultz, 1989; Thong *et al.*, 1993; Yin *et al.*, 1995). Comme pour NH_4^+ , de mai jusqu'à mi-juillet, les flux sont de plus en plus déficitaires et les

exports diminuent sensiblement, du fait de la reprise des activités biologiques (Haines *et al.*, 1977; Brüsch et Nilsson, 1993; Dickson et Wheeler, 1995b), et notamment de l'activité dénitrifiante de certaines bactéries (Foch, 1974; Jones, 1974; Kaplan *et al.*, 1979; Seitzinger, 1994; Zimmerman et Benner, 1994; Nielsen *et al.*, 1995; Thompson *et al.*, 1995). Toutefois, à l'inverse des zones humides continentales où cette activité précède la consommation par la végétation (Pinay *et al.*, 1995), il semble qu'il y ait ici dualité entre les deux processus. La diminution du déficit des flux observable entre mi-juillet et septembre est à associer au relargage simultané d' NH_4^+ , celui-ci inhibant directement la consommation du NO_3^- (Parker, 1993).

Enfin, la nouvelle augmentation du déficit intervenant à partir d'octobre est là encore imputable aux fortes amplitudes de marée, comme pour le début de l'année.

Ainsi, il ressort que, bien que la dynamique de NO_3^- est fortement influencée par les cycles biogéochimiques, les bilans obtenus restent essentiellement sous la dépendance des volumes d'eau mis en jeu. Cependant, alors que le budget est positif en début d'année, il apparaît fortement négatif en décembre, ceci pouvant être rattaché aux très fortes amplitudes de marée observées en décembre, comparativement à celles plus modérées de janvier.

La qualité de l'eau durant une année complète d'étude

Comme pour les formes minérales, l'azote organique dissous (DON) présente des flux fortement déficitaires pour tous les mois de l'année. En réalité, dans les systèmes marins, les variations des flux de

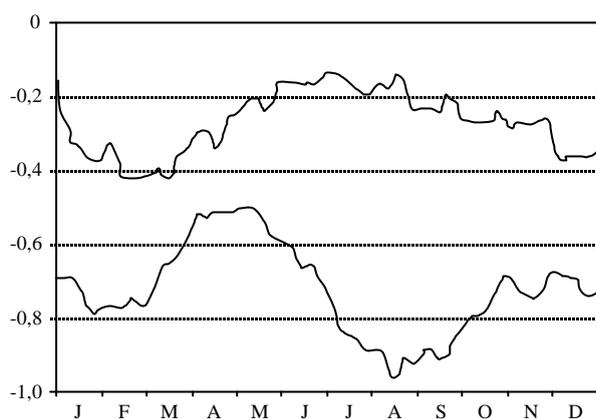


Figure 5.4 - Dynamique de l'azote organique dissous (DON)
(—, flux en g.m^{-3} ; —, budget en kg)

nous pouvons observer. En effet, les flux apparaissent de moins en moins déficitaires aux marées de grandes amplitudes pour lesquelles les déplacements de matériel particulaire sont importants. Comme pour la fraction minérale, de mai à août, les flux diminuent, ceci traduisant la consommation du DON. De manière similaire, les budgets apparaissent fortement liés aux variations de niveaux de pleine mer, dans le sens où nous pouvons observer des exports maximums pour les marées de forte amplitude.

Ainsi, quelque soit la fraction azotée dissoute concernée, il apparait que les flux sont toujours très nettement déficitaires, ceci confirmant l'importante activité biologique du système, même en plein hiver où elle n'est que simplement ralentie. Ces potentialités sont à l'origine d'un bilan net exportateur de ces nutriments.

A l'inverse, l'azote particulaire (PN) présente des flux et des bilans généralement excédentaires, ceci s'accroissant durant le printemps. Ceci peut être mis en relation avec la morphologie du système.

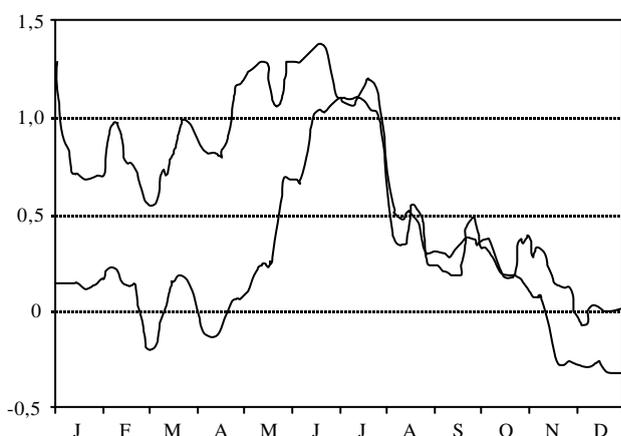


Figure 5.5 - Dynamique de l'azote particulaire (PN)
(—, flux en g.m^{-3} ; —, budget en kg)

DON sont directement associées à celles du matériel particulaire (Schultz, 1989, Thong *et al.*, 1993). Cependant, il ressort qu'une fraction plus ou moins importante du DON peut être utilisée par les communautés planctoniques comme source azotée (Bronk et Glibert, 1993). Enfin, les flux de DON sont relativement bien corrélés à ceux de l'azote minéral puisqu'il a été estimé que 75% de la consommation d'azote inorganique peut être excrétée sous forme organique (Collos, 1992). Ces différents processus sont en accord avec les variations que

En effet, comme nous l'avons déjà précisé dans la description du site, avant de parvenir au chenal, les marées traversent une zone importante de vase humide (l'estran) colonisée par de nombreuses algues et bactéries. Du fait de l'absence totale de végétation, ces organismes sont facilement détachés du substrat par le passage de la marée. Ceci semble se justifier au printemps du fait de la reprise des proliférations, les baisses de l'été pouvant être rattachées aux volumes d'eau plus importants (Keefe, 1994).

5.1.2.3 - Les formes phosphorées

Bien que les flux soient nettement plus faibles que ceux étudiés précédemment, le PO_4 présente également un net déficit annuel. Celui-ci se caractérise par des oscillations saisonnières, avec une baisse

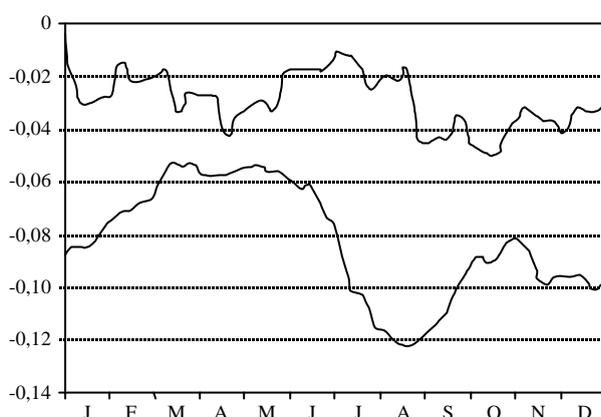


Figure 5.6 - Dynamique de P-PO_4^{2-}
(—, flux en g.m^{-3} ; —, budget en kg)

au printemps et un maximum durant l'été. Les températures augmentant au printemps, nous assistons à la reprise de la minéralisation de la matière organique à la surface du marais (Chambers *et al.*, 1992; Herrera-Silveira et Comín, 1995), d'où une diminution du déficit des flux. Cette période coïncidant avec des cycles de marée aux fortes amplitudes, il y a alors relargage de PO_4 du substrat (Hinga, 1989), ceci étant d'autant plus accentué que les marais salés présentent une faible capacité de rétention pour cet élément (Gehrels et Mulamootil, 1989). Nous pouvons ainsi effectivement observer des budgets sensiblement plus déficitaires lors des marées de vives eaux. L'importante progression du déficit au cours de l'été est à mettre en rapport avec la croissance des végétaux, et donc avec la consommation de cet élément (Chambers, 1992). Aussi, la diminution des flux au cours de l'automne s'explique par la maturité et la sénescence de la végétation (Pakulski, 1992).

La dynamique du phosphore organique dissous (DOP) est très proche de celle de PO_4 , les flux et débits restant continuellement déficitaires durant l'année. Toutefois, nous pouvons remarquer que les variations de flux du DOP apparaissent avec une sensible anticipation comparativement à celles du PO_4 . Cet écart témoigne en réalité des processus de minéralisation, ceux-ci se révélant donc comme un facteur premier dans la dynamique du phosphore.

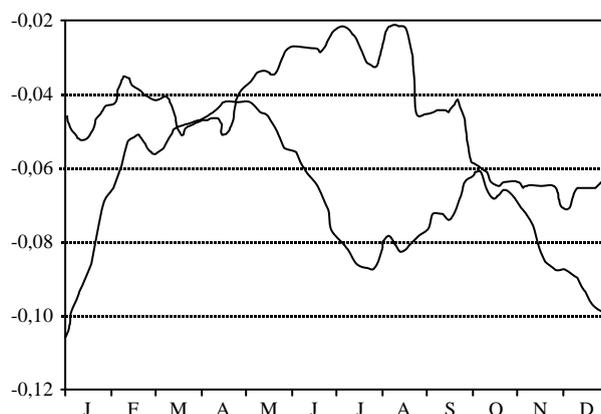


Figure 5.7 - Dynamique du phosphore organique dissous (DOP)
(—, flux en g.m^{-3} ; —, budget en kg)

La rétention du PO_4 dans le sédiment est strictement imputable à des processus chimiques liés aux conditions anoxiques du substrat (Zwolsman, 1994). Cependant, celle-ci est partiellement augmentée par l'activité des bactéries du sédiment qui recyclent et retiennent le DOP dans le substrat (Kairesalo *et al.*, 1995), lequel, autrement, est rapidement entraîné vers la colonne d'eau. Ceci reste facilement observable durant les périodes d'inondation, surtout à la fin de l'hiver où l'activité des bactéries est alors ralentie.

Alors que le budget du phosphore particulaire (PP) apparaît relativement stable et excédentaire tout au long de l'année, les flux présentent un fort déficit à la fin du printemps/début de l'été. Ces tendances dérivent directement des remarques établies précédemment. En effet, l'utilisation des formes phosphorées dissoutes conduit à l'élaboration de formes particulaires, essentiellement sous forme organique à cette période (Keefe, 1994). A l'inverse de l'élément azote, le phosphore s'adsorbe très facilement au sédiment (Pejrup *et al.*, 1993; Eyre, 1994), ceci étant d'autant plus évident que les perturbations physiques dues aux marées sont limitées durant cette période. Ainsi, la production effective de formes particulaires se trouve en réalité

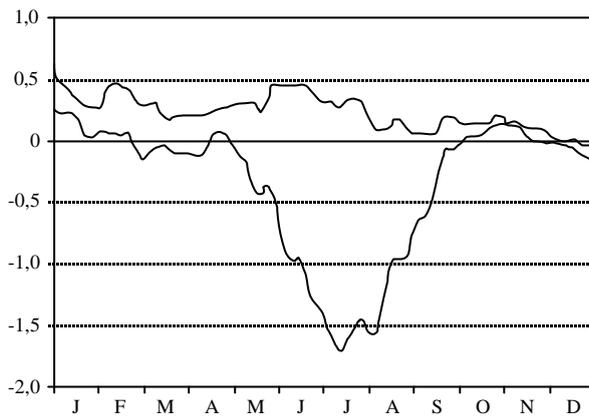


Figure 5.8 - Dynamique du phosphore particulaire (PP)
(—, flux en $g.m^{-3}$; —, budget en kg)

bloquée dans le substrat, d'où un flux déficitaire en progression constante. Les fortes marées de fin d'été entraînent ensuite une remise en suspension du sédiment, ceci conduisant à la libération du PP, comme en témoigne l'évolution des flux en août.

5.1.2.4 - Les formes carbonées

Le carbone inorganique dissous (DIC) est la forme soluble la plus représentée dans tout le système, et donc celle présentant les budgets les plus importants. Comme nous pouvons le constater,

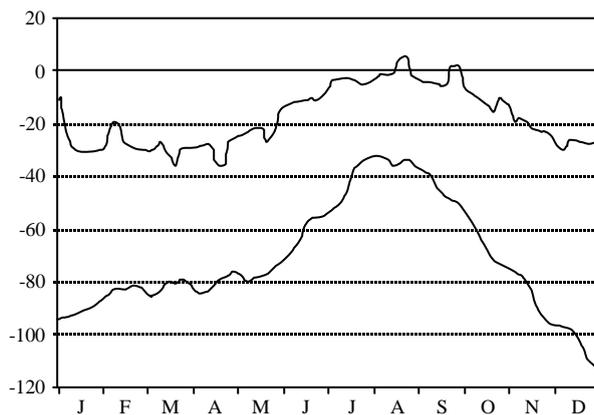


Figure 5.9 - Dynamique du carbone inorganique dissous (DIC)
(—, flux en $g.m^{-3}$; — budget en kg)

les flux sont très nettement déficitaires, les budgets et les flux présentant par ailleurs des variations saisonnières fortement similaires. La dynamique du DIC dépend de trois sources potentielles (Dollar *et al.*, 1991), l'oxydation aérobie, la dénitrification et la réduction des sulfates, et de consommateurs obligatoires, les algues et les végétaux (Hwang et Morris, 1992). Cet élément se révèle donc être notamment un bon indicateur des activités microbiennes en anaérobie (Koch-Rose *et al.*, 1994). Nous pouvons ainsi constater que, d'après les variations de flux observées, ces diverses sources d'alimentation deviennent particulièrement efficaces dès mai, et maximales en août. Ceci est bien évidemment à mettre en relation avec l'augmentation des températures, laquelle influe directement sur l'activité des microorganismes à l'origine des processus de respiration et

de dénitrification.

Comme pour $N-NH_4^+$, il apparaît clairement que ce sont principalement les phénomènes de ressuyage qui influencent les termes du budget. Même si les végétaux sont des consommateurs obligatoires de carbone pour la photosynthèse, la fixation de DIC par les racines ne représentent qu'une faible proportion de l'alimentation carbonée, celle-ci étant essentiellement assurée par fixation atmosphérique (Hwang et Morris, 1992). En réalité, le budget observé pour le DIC est principalement sous la dépendance des proliférations algales et bactériennes caractéristiques des fonds de chenaux. Ainsi, il apparaît que, même si l'exportation de DIC est réelle toute l'année, au printemps, et surtout en été, le budget tend vers un équilibre. Ceci signifie donc que les consommations carbonées sont effectives tout au long de l'année, et que l'écart observé en été provient surtout d'un enrichissement en carbone du fait des activités bactériennes décrites ci-avant.

La dynamique du carbone organique dissous (DOC) révèle là encore des flux et des budgets fortement négatifs. Bien que la période hivernale présente une diminution certaine du déficit des flux, le

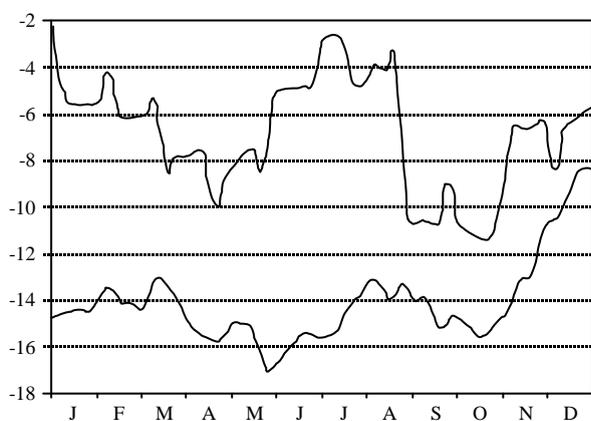


Figure 5.10 - Dynamique du carbone organique dissous (DOC)
(—, flux en $g.m^{-3}$; —, budget en kg)

reste de l'année se caractérise par des oscillations plus nuancées. Ces résultats concordent avec ceux d'autres études (Wolaver et Spurrier, 1988; Williams *et al.*, 1992; Childers *et al.*, 1993), cette augmentation de DOC pouvant être reliée aux lessivats de la végétation sénescente (Turner, 1993). Ceci est par ailleurs accentué du fait des fortes précipitations caractéristiques de cette saison, et donc des infiltrations et ruissellement engendrés, lesquels favorisent les exports de DOC (Agosta, 1985; Jordan et Correll, 1985; Wolaver et Spurrier, 1988). La sensible diminution du déficit du printemps est à

associer à la reprise de la dénitrification consommatrice de DOC, mais aussi à la dynamique de la nappe. En effet, l'amplitude des cycles de marées devenant de plus en plus faible, la recharge en eau de la nappe s'en trouve d'autant diminuée. Or, il s'avère que les écoulements de ressuyage constituent une source certaine de DOC (Williams *et al.*, 1992), d'où un déficit plus marqué. Cependant, celui-ci est très vite contre-balançé durant l'été par les excréments des populations algales alors en plein développement (Chrzanowski *et al.*, 1983). L'importante consommation de DOC observable tout au long de l'année est également à rattacher aux processus de fermentation, lesquels sont à l'origine d'un apport de CO_2 .

D'une manière générale, il ressort que le budget en DOC est directement lié aux amplitudes des cycles de marées. En effet, nous pouvons constater que le bilan est fortement exportateur au printemps et à l'automne, un seul cycle ayant par ailleurs suffit à tripler pratiquement les exports à la fin du mois d'août. En réalité, il s'agit du premier cycle à recouvrir de nouveau le marais depuis trois mois environ. Par ailleurs, cette période coïncide avec celle de la disparition complète de la salicorne, dont les parois s'éclatent, les contenus cellulaires étant ainsi libérés directement dans le milieu. Bien qu'aucune expérience pratique n'ait été développée pour le prouver, nous pouvons supposer que ces deux

phénomènes sont étroitement liés.

5.1.2.5 - La silice

La silice est le deuxième élément après le carbone à présenter des termes de budget les plus élevés. Comme nous pouvons le constater, les flux et budgets sont toujours négatifs durant l'année.

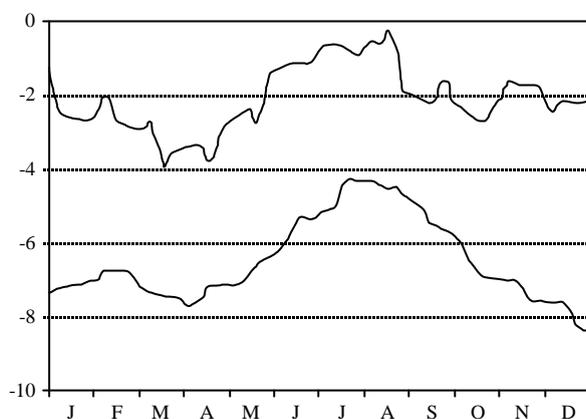


Figure 5.11 - Dynamique de la silice
(—, flux en g.m³; —, budget en kg)

L'important déficit des flux est imputable à la consommation de silice par les diatomées pour l'élaboration de leur test, celles-ci étant relativement bien adaptées à l'utilisation de cet élément (Conley *et al.*, 1989). Elles colonisent très rapidement les fonds de chenaux, notamment durant les périodes d'intercycles de marée. Une étude récente du site a révélé que sur les 40 espèces recensées sur le sédiment du chenal, toutes appartiennent à la classe des diatomées (Brosse, 1996). Comme nous pouvons le constater d'après le graphe ci-contre, cette consommation présente cependant un ralentissement dès avril,

celle-ci devenant ensuite minimale au milieu de l'été. Elle augmente ensuite constamment jusqu'à l'hiver. Même si elle apparaît moins bien marquée, il y a également une augmentation de la consommation vers le début du printemps. Ces deux événements de consommation accrue sont liés à l'impact de deux blooms de ces algues que de nombreux auteurs ont également pu observer (Conley et Malone, 1992; Asmus et Bauerfeind, 1994; Ragueneau *et al.*, 1994).

Bien que cela puisse paraître contradictoire avec les variations observées, il ressort de certaines études que ce sont les périodes présentant des faibles amplitudes de marée, et donc un ressuyage modéré, qui sont les plus favorables à la prolifération des diatomées (Lau et Liu, 1993; Madariaga, 1995). Ceci signifie que le ralentissement de la consommation observé n'implique pas l'absence d'activité de ces algues (les flux étant d'ailleurs toujours négatifs), mais qu'il y a en réalité disparition d'une partie de la population. L'explication de ce phénomène correspond aux activités de grazing d'organismes du niveau trophique supérieur, tels que les nématodes, copépodes, vers de vase, crevettes, crabes, poissons,... (Admiraal, 1984; Jonge et Beusekom, 1992; Newell *et al.*, 1995). Pour certains organismes, sur la base d'une année complète, ce microphytobenthos peut en effet représenter jusqu'à plus de la moitié de la nourriture disponible pour les organismes filtreurs. Enfin, bien que présentant une biomasse assurément inférieure à celle des végétaux supérieurs, ces organismes présentent une productivité nettement plus importante du fait d'un turn-over plus rapide, d'où leur rôle important dans les cycles de nutriments (Adam, 1990).

Pour l'ensemble des raisons invoquées, les populations de diatomées sont un des élément-clés du fonctionnement général du marais, tant sur le plan des nutriments, que sur celui des réseaux trophiques.

Le budget en silice recoupe bien les variations observées pour les flux avec une nette diminution des exports entre avril et août. Ici encore, le premier cycle de marées de forte amplitude de la fin de l'été s'accompagne d'une importante augmentation des exports. Ceci peut être rattaché au fait que ces marées

occasionnent une forte remise en suspension des populations de diatomées qui ont pu rester maintenu au sédiment durant l'été.

5.1.2.6 - La chlorophylle-a

La dynamique de la chlorophylle-a révèle un flux excédentaire, les variations étant cependant très oscillantes, car, apparemment, fortement liées aux marées. En effet, il ressort que ce sont les marées

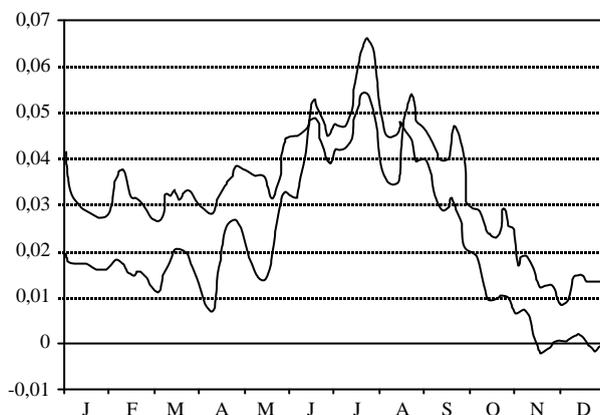


Figure 5.12 - Dynamique de la chlorophylle-a
(—, flux en g.m⁻³; —, budget en kg)

de forte amplitude du printemps et celles de faible amplitude d'été qui présentent un impact positif quant aux variations observées, ces tendances étant cependant contradictoires avec celles observées par Roden (1994). Par ailleurs, il apparaît que durant le printemps, et surtout l'été, des blooms importants apparaissent. Dans un premier temps, ceci peut paraître incompatible avec les résultats présentés précédemment pour la silice. Cependant, comme nous pouvons le constater, ces dynamiques sont sous la dépendance essentielle des flots de marée (budgets positifs), ceci signifiant que ce sont les

populations algales de l'estran et de la mer qui sont donc invoquées. Or, même si nous supposons que celles de l'estran présentent une dynamique globalement similaire à celles des fonds de chenaux, en revanche, il a été observé que, dans le cas d'estuaires turbides, les blooms algaux en mer apparaissent durant le printemps et l'été (Fichez *et al.*, 1992; Herrera-Silveira, 1994). Nous pouvons également émettre l'hypothèse que le grazing mentionné précédemment n'est peut-être pas complet. En effet, il est possible qu'une fraction plus ou moins importante de chlorophylle-a des diatomées ne soit pas forcément dégradée après la lyse des cellules, ce qui pourrait alors expliquer une partie des augmentations de flux observées. Cette hypothèse est partiellement confortée par la relative stabilité de la chlorophylle-a (Gillan et Johns, 1980), et par la présence de cette molécule dans le sédiment jusqu'à plusieurs centimètres de profondeur, celle-ci pouvant apparemment ne pas être associée à des cellules intactes (Cariou-Le-Gall et Blanchard, 1995).

Par ailleurs, nous remarquons que les flux d'hiver du début d'année sont excédentaires (+ 0,15 g.m⁻³ environ), alors que ceux observés pour la même saison à la fin de l'année sont équilibrés. Ne pouvant rattacher cet écart avec des différences d'ordre climatique, il se peut que, là encore, ce soient les amplitudes de marée qui interviennent. En effet, la seule différence notable entre ces deux périodes provient du fait que le début de l'année est caractérisé par des cycles de marées d'amplitude moyenne, alors que la fin de l'année présente une alternance successive de cycles de forte et de faible amplitude. Cependant, nous pouvons également attribuer cette tendance à une modification structurelle du système (terrestrialisation), laquelle sera détaillée ultérieurement.

Enfin, les budgets apparaissent importateurs tout au long de l'année, ceux-ci restant néanmoins très fortement inféodés aux variations des flux. Cette étroite dépendance témoigne de nouveau de l'importante influence des marées dans la dynamique de la chlorophylle-a. Ceci s'explique par le fait que la présence de cet élément dans la colonne d'eau dépend directement de la remise en suspension du matériel particulaire. Par le caractère flot dominant du système (débit du flot supérieur à celui du jusant)

et considérant l'importante surface de vaseuse que la mer recouvre avant d'arriver au système, c'est donc le flot qui ressort comme l'élément-clé de cette dynamique.

5.1.2.7 - Les matières en suspension

Comme nous venons de le mentionner, les matières en suspension (MES) sont sous l'influence première du flot des marées. En toute logique, nous devrions donc nous attendre

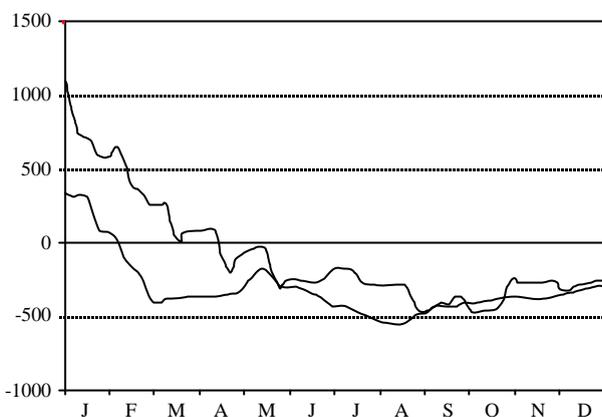


Figure 5.13 - Dynamique des matières en suspension (MES)
(—, flux en g.m⁻³; —, budget en kg)

à des excédents prononcés du flux et du budget de ces particules, mais il s'avère que, globalement sur l'année, ils apparaissent déficitaires. A ce stade de l'étude, même si l'ordre des différentes parties a été choisi le plus judicieusement possible, il est nécessaire d'anticiper sur certains des résultats de la troisième partie. En effet, les budgets annuels de MES calculés entre 1991 et 1994 ont été de +1149, +694, +502 et -50 tonnes respectivement. Il ressort ainsi un net changement des bilans qui, fortement

importateurs la première année d'étude, deviennent exportateurs en 1994. Même si nous ne l'avons pas mentionné dans les paragraphes des dynamiques de PN et PP, ces éléments, directement associés au MES, présentent également une baisse importante des imports entre janvier et décembre 1994. Entre autre explication, ces tendances peuvent être imputées au phénomène de terrestrialisation, c'est-à-dire, au vieillissement du marais. Ceci n'intégrant pas le cadre d'étude de cette partie, nous ne nous attarderons pas sur cette évolution potentielle du système, laquelle sera étudiée en détail ultérieurement. Il était cependant nécessaire de l'évoquer dans la mesure où la dynamique que nous observons pour les MES s'en trouve par conséquent biaisée, et que nous n'en ferons donc aucune étude. Nous voulons cependant insisté sur le fait que, même si cela affecte également les nutriments dissous dont nous avons présenté les dynamiques ci-avant, l'impact reste toutefois fortement limité, voire nul, comme nous pourrions le constater dans la troisième partie.

5.1.3 - Approche synthétique de la dynamique générale

Comme nous avons pu le constater au travers de l'étude de ces différents éléments, bien que les marais se présentent au premier abord comme des systèmes relativement bien définis (chenaux, herbu, inondation cyclique), il n'en demeure pas moins que les interactions entre les sous-systèmes sont nombreuses et complexes. Aussi, il ressort que ce sont des milieux extrêmement productifs où les différentes formes de vie présentes contribuent très activement au fonctionnement et à l'évolution générales de l'ensemble.

Dans cette optique, il nous est apparu intéressant de réaliser un graphe synoptique de ces dynamiques élémentaires, afin d'afficher plus clairement par quels mécanismes elles sont en réalité toutes plus ou moins interdépendantes. Nous avons décidé de reprendre les différents éléments étudiés non plus d'après les flux obtenus, mais d'après les pools respectifs de la colonne d'eau au cours de l'année. Cette représentation permet effectivement de mieux visualiser les variations.

Figure 5.14 - Dynamique des pools de nutriments de la colonne d'eau

5.2 - La nappe d'eau souterraine

Comme pour le chenal de marée, les résultats que nous allons présenter pour la nappe d'eau souterraine couvrent toute l'année 1994, à raison de deux prélèvements par semaine pour les cinq profondeurs retenues sur chacun des sites. Bien qu'il eût été souhaitable d'appliquer la même méthode d'estimation des flux développée pour les cycles et intercycles de marée, nous n'avons pu l'adapter dans le contexte de la nappe pour plusieurs raisons: 1) les deux points de contrôle dont nous disposons permettent difficilement d'extrapoler les variations hydrauliques observées à l'ensemble du bassin versant, 2) par conséquent, la surface contributive de la nappe n'est absolument pas maîtrisée, et, 3) les écoulements préférentiels restent donc inconnus. Ainsi, il apparaît que ce compartiment, dont le rôle est fondamental dans l'étude générale du système marais salé, nécessiterait une étude approfondie à part entière, par des approches spatiales et temporelles sur l'ensemble du bassin versant.

Aussi, nous aborderons donc cette partie selon deux volets essentiels, chacun se limitant donc à une description statique des échanges. Dans un premier temps, nous exposerons les variations qualitatives observées durant l'année, pour les deux zones de prélèvements, aux différentes profondeurs. Même si aucune relation directe n'a été mise en évidence entre ces deux points, nous verrons que la chronologie de l'évolution des teneurs de certains éléments permettent d'anticiper sur les écoulements de la nappe.

Nous détaillerons ensuite les budgets que nous avons estimé pour chacune des zones, ceux-ci ayant été obtenus après avoir estimé les volumes de nappe mis en jeu pour des variations de niveaux observées.

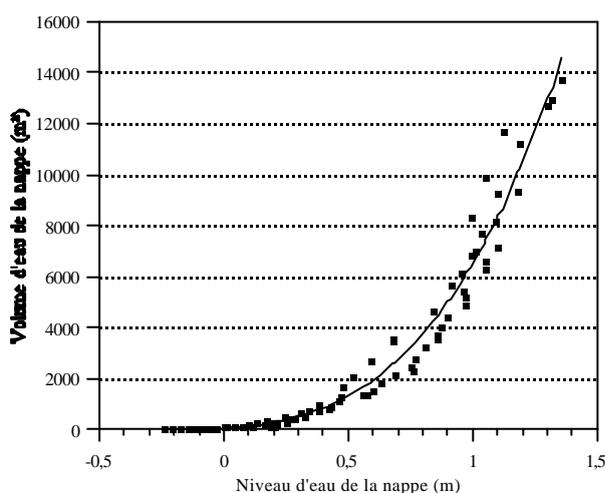


Figure 5.15 - Relation entre niveau et volume d'eau de la nappe

En effet, même si nous pouvons considérer que les volumes d'eau calculés à l'exutoire durant les périodes d'intercycles sont directement liés à l'exfiltration de la nappe, et donc aux variations de volumes internes, ils ne rendent cependant absolument pas compte des volumes infiltrés lors des événements de submersion du marais, lors des épisodes pluvieux, ni de ceux liés à l'évapotranspiration, ces derniers pouvant s'avérer aussi important que ceux liés au drainage (Nuttle, 1988).

Dans la mesure où il s'agit de calculer des budgets, il est indispensable de

pouvoir décrire quels sont les imports au système nappe parallèlement à ce qu'elle peut exporter. Aussi, nous avons donc considéré différentes séquences de vidange de la nappe au travers des baisses de niveau enregistrées. Naturellement, nous avons retenu des périodes exemptes de précipitations et nous avons corrigé les valeurs par les données ETP. Cette procédure nous a permis d'établir une relation entre niveau de nappe et volume d'eau interne, dont l'allure générale est présentée en figure 5.15, et pouvant être approchée par:

$$Vol_{nap} = 2742 \times ((H_{nap} \% 0,30)^{3,30}) \quad r^2 = 0,967 \quad s = 676 \quad n = 83$$

Aussi, pour le calcul des budgets, pour chacun des points de contrôle, nous avons calculé la moyenne des concentrations obtenues pour les cinq piézomètres, de manière à obtenir une valeur globale journalière de la qualité d'eau de la nappe aux deux sites. Nous avons ensuite considéré les variations de niveau quotidiennes, lesquelles nous ont permis d'en déduire les volumes d'eau concernés. Ceux-ci, considérant l'existence des deux points, ont été attribués pour moitié à chacun, en supposant donc que les variations internes sont spatialement homogènes. Enfin, pour chaque jour i , le budget est estimé d'après les informations obtenues pour ce jour et celles du jour précédent $i-1$, simplement en calculant la différence de charge entre les deux jours ($C_i V_i - C_{i-1} V_{i-1}$). Comme pour la colonne d'eau du chenal, les apports au système nappe, sous-entendu les infiltrations, sont représentées avec un signe positif, les exports, autrement dit l'exfiltration par les berges de chenaux, sont négatives.

Naturellement, l'approche du budget de la nappe peut paraître très approximative, dans la mesure où elle implique que les variations qualitatives de la nappe de la totalité du bassin versant sont en tout point homogènes à celles que nous avons enregistrées à proximité de l'exutoire. Même si cela reste très abusif, c'est la seule méthode dont nous disposons pour rendre compte des flux moyens de nutriments du compartiment nappe. Comme nous le verrons par la suite, les résultats obtenus par cette approche, comparativement à ceux obtenus pour les intercycles, apparaissent tout à fait réalistes.

Dans la mesure où elles concernent chacune des deux parties que nous allons développer, les variations des niveaux de nappe sont exposées en préface ci-dessous, d'après des valeurs journalières moyennes.

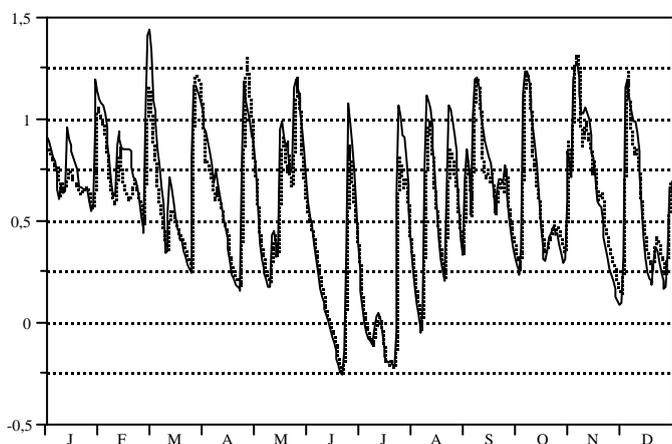


Figure 5.16 - Variations des niveaux de la nappe en 1994 (en m)
(—, limite du bassin versant; ppp, proximité du chenal)

Comme nous l'avons déjà mentionné, il ressort nettement que ces niveaux dépendent principalement des marées inondant l'herbu. Toutefois, il est nécessaire de nuancer ce fait. En effet, bien que l'impact des marées restant dans les chenaux soit fortement limité comparativement à celui des fortes marées, il n'empêche qu'il s'accompagne très souvent d'une légère remontée du niveau de nappe. Naturellement, ceci s'opère par infiltration latérale, et, comme nous pourrions le constater ultérieurement, cette entrée d'eau n'est pas sans conséquence dans les processus

fonctionnels de certains nutriments tels que la silice ou le carbone. Il apparaît par ailleurs que, à la fin du printemps/début de l'été, nous avons observé des niveaux de nappe négatifs, c'est-à-dire localisés en-deçà du fond du chenal. Rappelons cependant que dans ce cas, l'exfiltration de la nappe par les berges est négligeable (Cf figure 4.3). Enfin, bien que présentant quelques légères différences, il ressort que les enregistrements des niveaux aux deux points de contrôle restent très similaires durant toute l'année, l'inversion de pente mentionnée au chapitre 4 demeurant, à cette échelle, assez nuancée.

5.2.1 - L'évolution qualitative de la nappe

Par souci de clarté, pour chacun des éléments étudiés, nous avons représenté les variations observées selon des échelles adaptées aux points de mesure, ceci se traduisant souvent par des échelles différentes. Bien que cela ne facilite pas les comparaisons entre les deux zones, ceci s'est néanmoins avéré indispensable pour certaines formes pouvant présenter des rapports jusqu'à cinq fois plus importants (ou plus faibles) entre les sites. Dans la mesure où la végétation ainsi que les variations de niveau de nappe sont identiques entre les deux points, l'origine des différences observées est à rapprocher des caractéristiques topographiques des sites de mesure. Principalement, la proximité directe du chenal est assurément à l'origine d'une meilleure oxygénation de la nappe près des berges, ceci ayant des conséquences directes sur la qualité d'eau.

Les suivis concernant $N-NH_4^+$ révèlent ainsi des concentrations maximales environ 1,5 fois plus importantes à proximité du chenal qu'à la limite du bassin versant. Par ailleurs, les deux points de

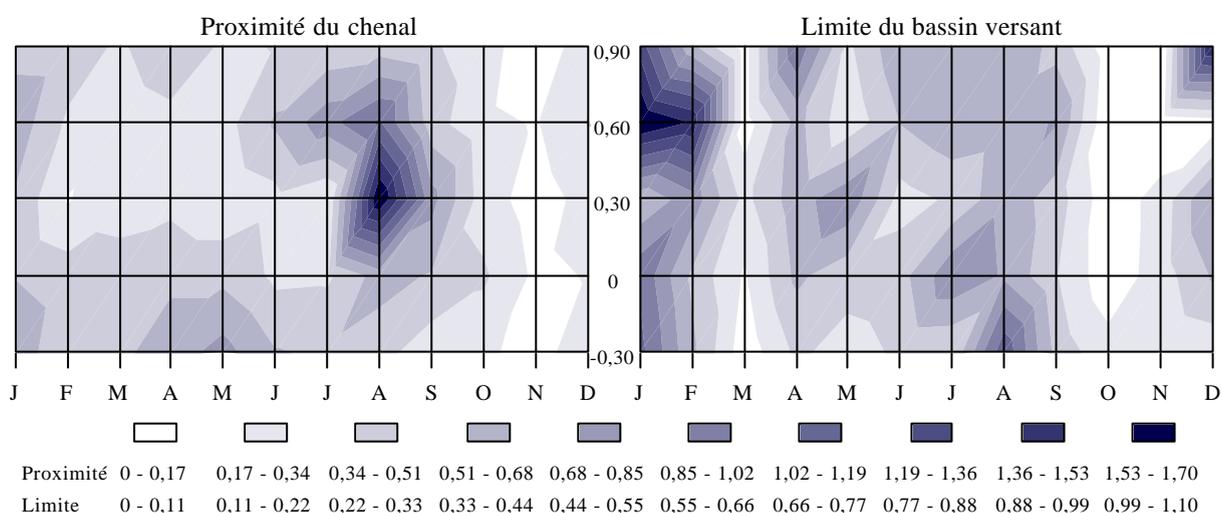


Figure 5.17 - Evolution des teneurs en $N-NH_4^+$ de la nappe d'eau ($g.m^{-3}$)

prélèvements présentent des évolutions spatiales et temporelles fortement distinctes. L'allure générale du graphe du site à proximité du chenal apparaît très caractéristique, et nous la retrouverons fréquemment pour les autres nutriments étudiés par la suite. Elle se distingue par un pic de concentration au mois d'août. En effet, cette période est particulièrement propice à l'ammonification (Neill, 1995; Sarda et Burton, 1995) du fait de la charge organique plus importante (Sloth *et al.*, 1995), et à la fixation azotée (Joye et Paerl, 1994), celle-ci pouvant s'avérer très importante (White et Howes, 1994a, b et c). Par ailleurs, il apparaît que ce pic présente un gradient d'intensité de la surface jusqu'à 0,30 m de profondeur, c'est-à-dire environ à l'horizontale du point de rupture de la berge avec le fond du chenal. Ceci explique l'absence de cet élément en deçà de cette profondeur du fait de l'écoulement de la nappe. Le fait que les concentrations augmentent avec la profondeur a déjà été observé dans des systèmes similaires (Caffrey, 1995). Ceci est à relier avec la consommation de cet élément en surface par la végétation (Bowden, 1986), avec le fait que la matière organique devient plus réfractaire en profondeur (Barbanti *et al.*, 1992), et avec les excréments des macroinvertébrés benthiques (Gardner *et al.*, 1993), particulièrement abondants aux points de cassure des berges. Les faibles teneurs observées durant le reste de l'année sont imputables aux processus d'assimilation par les végétaux et de nitrification, grâce à la diffusion de l'oxygène sur tout le profil par les berges des chenaux.

A la limite du bassin versant, les concentrations en $N-NH_4^+$ présentent des variations nettement différentes avec un pic marqué en hiver vers 0,60 m de profondeur, et des teneurs sensiblement plus importantes entre avril et août sur tout le profil. Comme nous pouvons le remarquer sur la figure 5.15, durant la période hivernale, les niveaux de nappe restent relativement élevés, ceci augmentant donc les conditions anoxiques du point de mesure. Par ailleurs, du fait des faibles températures caractéristiques de cette saison, le potentiel d'oxydoréduction s'en trouve d'autant réduit. Ainsi, il apparaît que le système présente alors les conditions optimales pour la réduction des nitrates en ammoniacque (Howard-Williams et Downes, 1993), cette hypothèse se trouvant par ailleurs confortée par les fortes concentrations en nitrates alors observables. Par ailleurs, les fortes teneurs des marées inondant l'herbu à cette saison doivent également être prises en compte dans l'explication de ce phénomène. Entre avril et août, la présence d'ammoniacque peut se justifier, comme pour l'autre point, par les processus d'ammonification et de fixation azotée (Carpenter, 1978). Par contre, à la différence du site à proximité du chenal, les teneurs demeurent plus élevées du fait que seule l'assimilation par les végétaux intervient dans la dissimulation de cet élément. En effet, la nitrification est impossible car le milieu est dépourvu d'oxygène, d'où une certaine accumulation de l'ammoniacque, notamment en profondeur.

Comme précédemment, $N-NO_3^-$ présente d'importantes différences entre les deux points de mesure mais aussi au long de l'année. Il ressort ainsi que les teneurs maximales sont environ trois fois plus

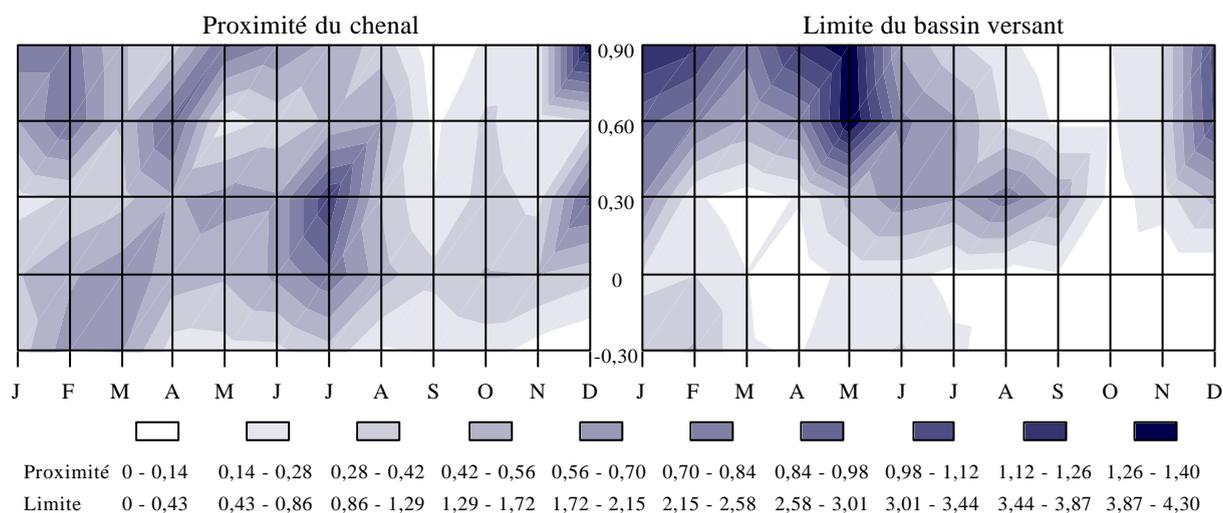


Figure 5.18 - Evolution des teneurs en $N-NO_3^-$ de la nappe d'eau ($g.m^{-3}$)

élevées à la limite du bassin versant. A proximité du chenal, l'évolution des teneurs apparaît relativement diffuse, malgré une légère augmentation au milieu de l'été vers 0,30 m. Cette évolution générale est à rapprocher de la diffusion de l'oxygène en ce point. En effet, celle-ci rend possible la nitrification, comme nous l'avons mentionné ci-avant, et bloque tous les autres processus de dissimulation des nitrates, aussi bien la dénitrification (Tomaszek, 1995) que leur réduction en ammoniacque.

Contrairement à ce que l'on aurait pu imaginer, le point à la limite du bassin versant se caractérise par de fortes teneurs alors que, considérant les conditions anoxiques qui le caractérise, il semblait tout indiqué pour les processus de dénitrification (Christian *et al.* 1975; Bailey, 1976). En réalité, il faut nuancer la disponibilité en oxygène de cette zone avec les variations du niveau de nappe (Brosemer *et al.*, 1987; Harvey et Odum, 1990). Ainsi, il apparaît nettement qu'en-deçà du niveau du fond du chenal, il n'y a plus de nitrates, sauf en hiver du fait de l'absence d'activité dénitrifiante (Yoon et Benner, 1992;

Kliewer et Gilliam, 1995), et au milieu de l'été du fait de la baisse importante du niveau de la nappe. Les fortes concentrations des horizons supérieurs observées entre janvier et mai, malgré des niveaux de nappe souvent élevés, sont à rapprocher des marées et des précipitations, ces dernières ayant été particulièrement fortes durant cette période (Cf figure 1.6). A l'inverse, l'absence totale de nitrates à la fin de l'été/début de l'automne provient de l'engorgement régulier du sol du fait des marées de forte amplitude, et de l'activité dénitrifiante maximale durant cette saison (Johnson *et al.*, 1994; Thompson *et al.*, 1995).

Concernant l'azote organique dissous (DON), les variations observées à proximité du chenal coïncident naturellement avec celles obtenues précédemment. Ainsi, il ressort un pic des teneurs au mois

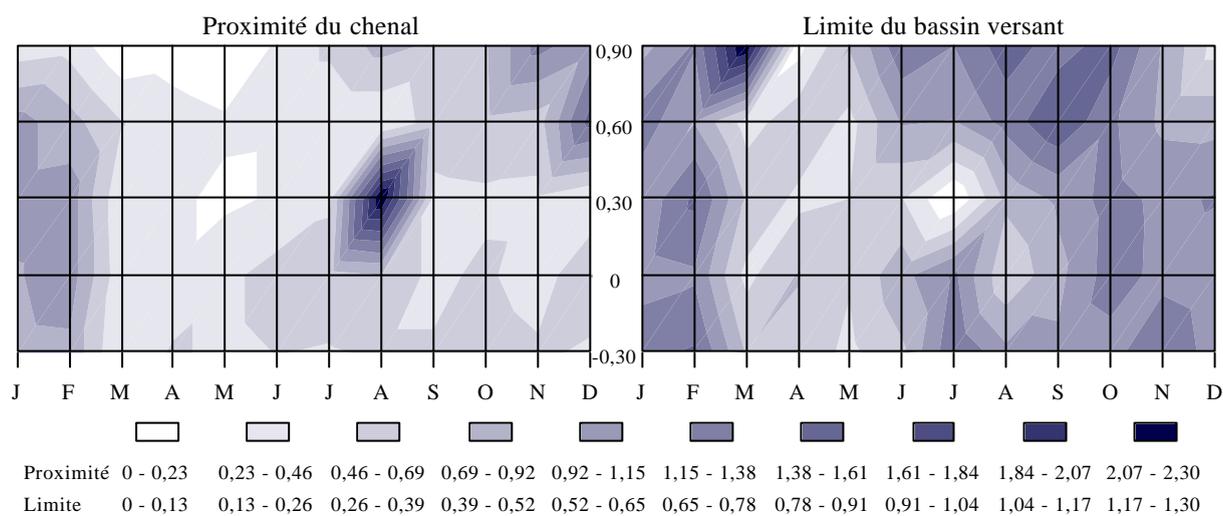


Figure 5.19 - Evolution des teneurs en azote organique dissous (DON) de la nappe d'eau (g.m^{-3})

d'août à 0,30 m, celui-ci restant cependant très localisé. Il est à rattacher aux processus d'ammonification, mais également aux successifs cycles de marées de ce mois qui ont inondé l'herbu (Cf figure 5.1) et donc entraîné dans le sol une partie de la litière de surface. Ces deux phénomènes, couplés au fait que les vitesses des réactions de minéralisation décroissent avec la profondeur (Burdige, 1991), justifient de la précision dans le temps et dans l'espace du pic, ceci sous-entendant des vitesses de turnover rapides. Par ailleurs, les teneurs sensiblement plus fortes du début de l'année proviennent de l'impact des précipitations et de l'absence d'activité bactérienne, ceci expliquant la régularité des concentrations sur tout le profil.

De la même façon, à la limite du bassin versant, l'évolution des teneurs en DON reflètent bien les processus de fonctionnement décrits pour les éléments précédents. En effet, bien que les teneurs moyennes du début de l'année soient imputables aux mêmes facteurs que ci-avant, le pic de surface de mars est directement lié, initialement à la réduction des nitrates en ammoniacque, puis à l'assimilation de ce dernier du fait de la reprise de croissance des végétaux. La baisse des teneurs entre avril et juin est imputable aux processus d'ammonification, comme nous l'avons déjà mentionné dans l'étude des teneurs en N-NH_4^+ . Par la suite, les concentrations augmentent de nouveau, ceci intervenant suite à la maturation et sénescence de la végétation, et à l'impact des cycles de marées recouvrant l'herbu.

Même s'il semble que le point externe présente des teneurs plus fortes que celui à proximité (zones plus sombres), il faut néanmoins considérer la différence d'échelle entre les deux graphes. Nous nous apercevons ainsi que les teneurs après juin sont semblables et voisines de 1 g.m^{-3} .

Comme nous pouvons le constater d'après la figure ci-dessous, les phosphates sont nettement plus abondants à la limite du bassin versant qu'à proximité du chenal. Ici encore, ce dernier point de

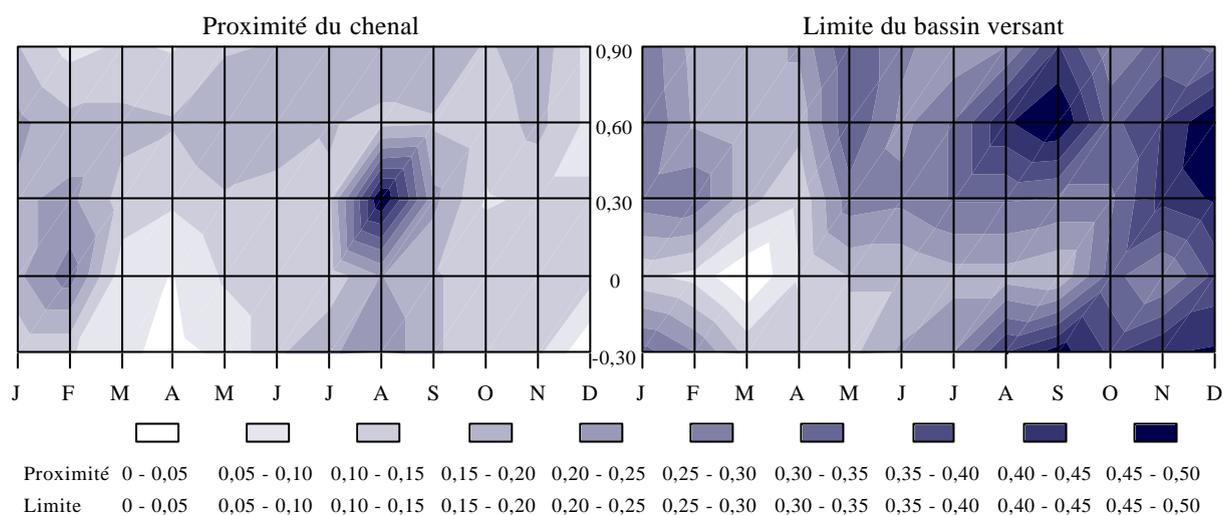


Figure 5.20 - Evolution des teneurs en $P-PO_4^-$ de la nappe d'eau ($g.m^{-3}$)

mesure présente une évolution des teneurs semblable à celle observée pour les éléments précédemment étudiés avec un pic au mois d'août vers 0,30 m. Comme nous l'avons déjà mentionné, ceci est à rapprocher à l'activité bactérienne importante à cette période et donc aux processus de minéralisation des formes organiques (Raaphorst et Kloosterhuis, 1994), et aux successives marées ayant alors inondé l'herbu. Par ailleurs, le reste de l'année ne présente pas de tendance particulière, exceptée une sensible accumulation de l'élément en février au même niveau que le fond du chenal. Celle-ci doit être rapprochée des impacts des infiltrations consécutives aux marées et fortes précipitations, auxquelles le phosphore est intimement lié (Eyre, 1993).

L'autre point de mesure présente le même phénomène de stockage au début de l'hiver, les raisons demeurant identiques à celles mentionnées ci-avant. Du fait de la reprise de la croissance des végétaux et des micro-organismes, les concentrations diminuent sensiblement par la suite. A l'inverse de l'autre point, dès mai jusqu'en décembre, nous constatons une très forte accumulation de cet élément, maximale en fin d'été, jusqu'à une profondeur approximativement équivalente à celle du fond du chenal (jusqu'en septembre). Le début de ce processus est à mettre en relation avec les très fortes précipitations de mai (108 mm) ayant entraîné une dissolution des phosphates adsorbés au sédiment superficiel. Le pic estival de concentrations est de nouveau lié aux activités minéralisatrices, même s'il présente un léger retard en temps par rapport à l'autre site. Enfin, les fortes marées de décembre, mais surtout l'absence d'assimilation par les végétaux, sont à l'origine des fortes teneurs du début de l'hiver.

Ainsi, il apparaît que des nuances complémentaires à celles mentionnées au début de cette partie de l'étude, peuvent être avancées quant aux processus fonctionnels de ces deux points de mesure. En effet, les flux de phosphates n'étant pas liés aux activités de respiration benthique aérobie (Reay *et al.*, 1995), mais principalement aux processus hydrologiques (Eyre, 1993), l'écart printanier, que nous avons pu observer entre les deux points suite aux fortes précipitations, ne peut être rattaché qu'à des différences physiques des caractéristiques pédologiques. Ainsi, reprenant les résultats de la partie 2.1.4 et de la figure 2.5, il ressort que les horizons supérieurs de la limite du bassin versant présentent des pertes en eau plus importantes que ceux à proximité du chenal. Par conséquent, ils sont assurément plus sensibles aux phénomènes d'infiltration, d'où une remise en solution de formes adsorbées au sédiment suite à des épisodes pluvieux.

La qualité de l'eau durant une année complète d'étude

Les résultats obtenus pour le phosphore organique dissous (DOP) révèlent des concentrations et une évolution générale très proches entre les deux points de mesure. De plus, ces variations sont en

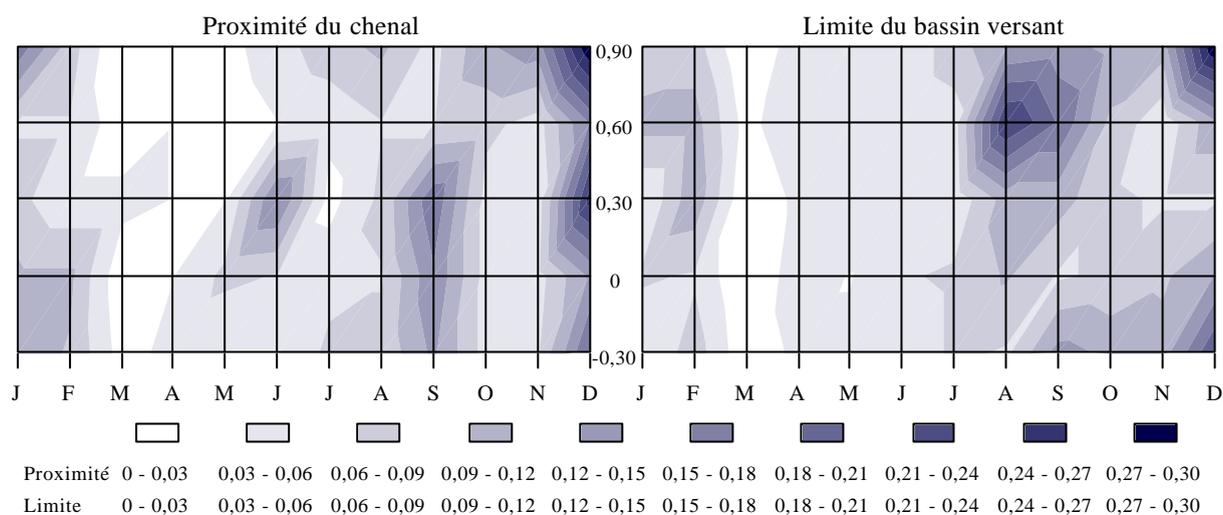


Figure 5.21 - Evolution des teneurs en phosphore organique dissous (DOP) de la nappe d'eau (g.m⁻³)

accord avec les processus que nous avons décrits pour les phosphates. En effet, pour les deux sites, nous observons une sensible augmentation des teneurs en début et fin d'année, celle-ci intervenant à la suite des inondations par les marées et des précipitations qui entraînent des reliquats de composés de la litière accumulée durant l'automne. Similairement, ils présentent également un pic de concentration durant la période estivale, ceci devant être rattaché des activités bactériennes alors très intensives. Enfin, l'absence de cet élément en mai à la limite du bassin versant confirme bien les mécanismes hydrologiques préférentiels que nous avons avancés précédemment pour l'apparition du pic de phosphates. En effet, si ce phénomène avait eu une origine biologique particulière, il y aurait forcément eu une apparition de DOP pour cette période dans le profil.

Par analogie avec les résultats obtenus pour la colonne d'eau du chenal, il ressort que les teneurs en carbone inorganique dissous (DIC) de la nappe sont largement supérieures à celles des autres

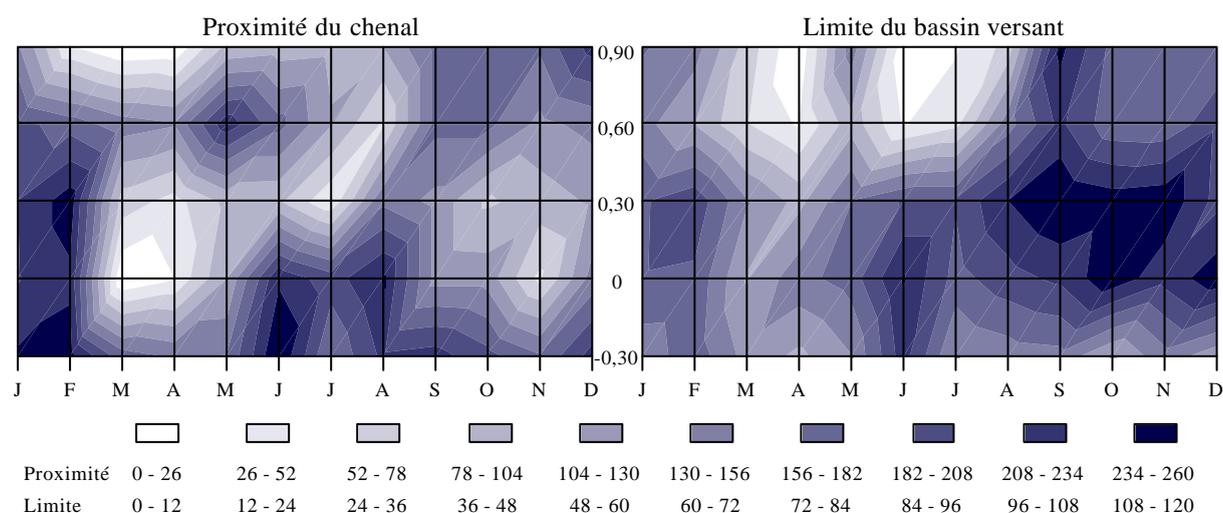


Figure 5.22 - Evolution des teneurs en carbone inorganique dissous (DIC) de la nappe d'eau (g.m⁻³)

éléments étudiés. De plus, le point de mesure à proximité du chenal révèle des teneurs environ doubles de celles de l'autre point. L'évolution des variations étant sensiblement différentes, notamment à compter du mois de juillet, nous les étudierons donc séparément.

A proximité du chenal, le début de l'année se caractérise par une accumulation en DIC en deçà de 0,60 m, celle-ci étant à rattacher de nouveau aux processus d'infiltrations consécutifs aux fortes marées et précipitations. En effet, les horizons supérieurs se distinguent par un gradient croissant de concentrations avec la profondeur, de manière similaire aux phosphates. Ces deux éléments présentant la caractéristique commune d'être liés aux processus d'écoulements, nous pouvons imaginer que c'est de nouveau la capacité d'infiltration limitée de ces horizons qui est à l'origine de ce phénomène. Par la suite, dès mars, les concentrations diminuent nettement sur tout le profil en raison des écoulements importants de nappe de février ayant entraînés les formes présentes en janvier, et en raison de la carence en DIC de la colonne d'eau à cette époque de l'année. Par contre, entre mai et août, nous pouvons remarquer un net enrichissement de DIC en profondeur, dont l'origine est double. La baisse significative du niveau de la nappe entraîne une bonne diffusion de l'oxygène à l'interface eau-air, où les activités respiratoires aérobies s'intensifient durant cette période. Par ailleurs, même si cela reste très limité, la sensible remontée du niveau de nappe par infiltration latérale, du fait du grazing des diatomées de cette saison, intervient alors dans la diffusion de DIC des berges vers l'intérieur du système nappe. Cette accumulation disparaît ensuite brutalement du fait des marées ayant inondé l'herbu et rechargé rapidement la nappe, d'où une intensification des écoulements. L'importante augmentation des teneurs en surface durant l'automne est de nouveau liée aux activités de respiration aérobie alors très intenses du fait de la sénescence de la végétation. Ainsi, il ressort que l'évolution des teneurs en DIC de ce point sont sous la dépendance des conditions aérobies caractéristiques liées à la proximité du chenal et aux variations de niveau, donc aux écoulements de nappe.

A la limite du bassin versant, même si la première moitié de l'année révèle une évolution similaire à celle décrite ci-avant, la deuxième partie s'en distingue fortement. Aussi, nous limiterons la description entre janvier et juin à une seule remarque: les gradients de concentration avec la profondeur sont quasi-inexistants en ce point. Ceci corrobore les propriétés pédologiques mentionnées pour les horizons superficiels, à savoir une plus grande sensibilité aux mécanismes d'infiltration. Par contre, dès le mois de juillet, nous observons une augmentation très marquée des teneurs en DIC, et ce quelle que soit la profondeur concernée. Bien entendu, ces fortes concentrations sont à rapprocher des conditions anaérobies de ce point d'étude, et des diverses activités réductrices qui y sont liées. Ainsi, comme nous l'avons déjà mentionné dans l'étude des nitrates, à la fin de l'été/début de l'automne, les bactéries dénitrifiantes sont alors très efficaces, ceci expliquant en majorité cette accumulation de DIC. Le schéma général du cycle se décompose en différentes étapes. Initialement, nous trouvons des organismes fermenteurs qui oxydent partiellement le carbone en CO_2 , ces réactions s'accompagnant de la production de divers composés réduits (Chapelle, 1992). Ces derniers sont ensuite complètement oxydés grâce à la présence d'accepteurs terminaux d'électrons, dont: Fe(III), jouant cependant un rôle mineur dans les marais salés (Jacobson, 1994), les sulfates (sulfato-réduction) (Casey et Lasaga, 1987), les nitrates (dénitrification) et le carbone (méthanogénèse). Ces différentes réactions conduisent ainsi à une forte production de CO_2 , lequel, du fait des conditions anaérobies soutenues, tend à s'accumuler en profondeur sous sa forme initiale ou sous forme de dérivés carbonatés, ceci pouvant représenter jusqu'à 50% de la quantité totale de carbone apportée au sédiment (Middelburg, 1995). Ce schéma d'ensemble correspond bien aux variations observées à la limite du bassin versant, lesquelles présentent ainsi une zone d'accumulation préférentielle située entre 0 et 0,30 m, entre août et mi-novembre, soit durant plus des 2/3 de l'année.

Même si elles apparaissent relativement très différentes, les teneurs en carbone organique dissous des deux points de mesure sont assez voisines. Le graphe obtenu à proximité du chenal est en

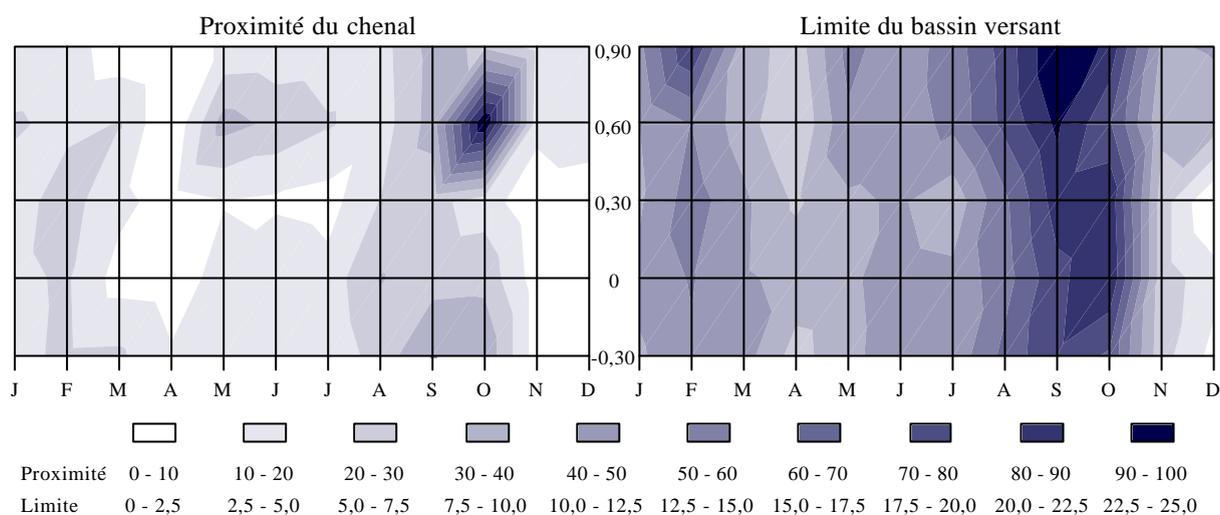


Figure 5.23 - Evolution des teneurs en carbone organique dissous (DOC) de la nappe d'eau (g.m^{-3})

réalité quelque peu faussé du fait d'un fort pic de concentration en octobre qui écrase ainsi les variations du reste de l'année. Quoiqu'il en soit, l'allure générale de l'évolution des teneurs en ce point reste très comparable à d'autres déjà observées auparavant. Ainsi, le début de l'année se caractérise par une sensible augmentation des teneurs imputable de nouveau aux marées et épisodes pluvieux, celle-ci disparaissant nettement en mars à la suite des écoulements importants de nappe. La seule originalité réellement spécifique réside dans la période de l'année où l'activité des bactéries en rapport avec l'attaque du matériel particulaire en surface intervient. En effet, alors que pour les autres éléments étudiés, nous pouvions aisément observer un pic des teneurs situé en été vers 0,60 m de profondeur, pour les formes carbonées, et notamment pour DOC, cette activité apparaît tardivement puisque durant l'automne et localisée plus vers la surface. Ceci est d'autant plus étrange que des études similaires situent l'activité maximale durant l'été (Yelverton et Hackney, 1986; Chittleborough *et al.*, 1992; Howes et Goehringer, 1994). Toutefois, nous pouvons émettre l'hypothèse que l'écart temporel est directement lié à la spécificité et donc à la nature des bactéries invoquées dans la dégradation des substrats carbonés de la végétation concernée. L'écart spatial se justifie alors du fait des niveaux moyens de nappe pour ces périodes.

Le point situé à la limite du bassin versant présente des variations très marquées sur toute la hauteur du profil, ceci témoignant de la bonne diffusion en profondeur, mais aussi de la faible consommation de cet élément. Nous observons les mêmes variations de début d'année entre les deux points jusqu'au mois de mai, les raisons demeurant identiques. Comme mentionné précédemment pour certains des éléments étudiés, l'impact des précipitations est nettement plus marqué pour ce point du fait des caractéristiques spécifiques des horizons supérieurs. Dès juillet, les concentrations augmentent uniformément pour atteindre un maximum aux alentours du mois de septembre. Cette hausse est imputable d'une part aux processus de minéralisation, mais également à certaines activités de bactéries réductrices (sulfato-réduction) libératrices de composés organiques. Toutefois, intervenant simultanément, les activités de dénitrification et fermentation sont quant à elles consommatrices de DOC (Adam, 1990). Aussi, les teneurs alors observables émanent directement de la prédominance de l'une ou de l'autre de ces activités, et il devient alors difficile de statuer sur les raisons précises de l'évolution de l'élément à cette période. La baisse de fin d'année est de nouveau liée aux marées et écoulements de la nappe.

Bien que partiellement distinctes dans le temps et dans l'espace, les évolutions des teneurs en silice aux deux points de mesure révèlent des teneurs moyennes relativement comparables. Dans le

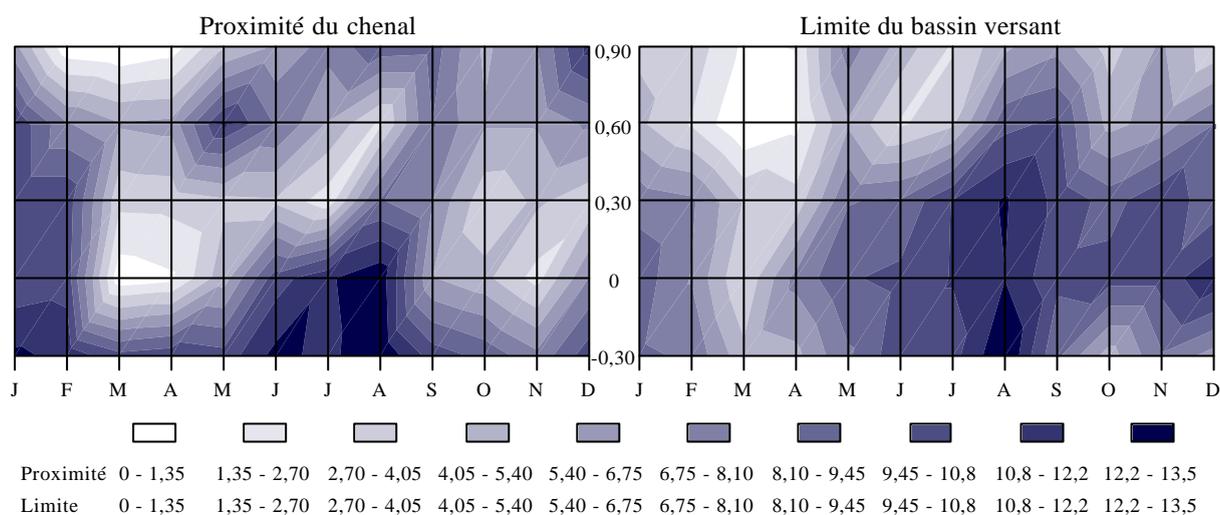


Figure 5.24 - Evolution des teneurs en silice de la nappe (g.m^{-3})

sédiment, la silice provient de la dissolution des silicates (Gardner, 1975), mais également de l'activité des diatomées et d'animaux fouisseurs tels que les polychètes (Marinelli, 1992). Les variations observables sont donc notamment dépendantes des processus hydrologiques relatifs aux mouvements de nappe. Ainsi, les gradients du début de l'année interviennent de nouveau consécutivement aux fortes marées et précipitations, la seule différence entre les deux sites résidant dans la barrière de diffusion créée par les horizons supérieurs (facilement observable vers 0,60 m). Malgré le premier bloom de diatomées au début du printemps, l'écoulement important de la nappe de cette période prédomine, et nous observons donc une forte diminution des teneurs de mars à avril. Les fortes précipitations de mai s'accompagnent d'un lessivage accentué de la surface du marais, d'où une réapparition de la silice.

A proximité du chenal, entre juin et août, les horizons superficiels témoignent de teneurs relativement élevées, celles-ci pouvant être rapprochées du grazing des diatomées, et donc de la libération de silice dans le milieu. Durant la même période, nous pouvons observer une forte progression des concentrations à un niveau situé en-deçà de la limite du fond du chenal. L'impact du grazing des diatomées est ici complété par l'activité des polychètes particulièrement importants dans les berges de chenaux au point de rupture avec le lit, du fait de la richesse nutritive de ce point stratégique. Ces animaux, du fait de leurs activités fouisseuses et donc de l'élaboration de tunnels, accentuent nettement le transport de silice. Aussi, selon les mêmes raisons évoquées pour DIC, ce processus participe assurément à l'alimentation de la nappe en profondeur. Les fortes marées de septembre et l'apparition du deuxième bloom annuel des diatomées conduit ensuite à une diminution des teneurs jusqu'à la fin de l'année.

Pour le point situé à la limite du bassin versant, nous constatons une très forte élévation des teneurs entre juillet et août. Celle-ci est à rattacher également au grazing des diatomées libérateur de silice. En effet, l'existence de quelques marées de moyenne amplitude à cette période, va intervenir dans l'enrichissement de la nappe par mélange des eaux côtières et souterraines, ceci se traduisant concrètement par un pic des teneurs en août. Les fortes marées suivantes s'accompagnent d'une sensible dilution de cet élément, notamment pour les horizons superficiels. En effet, il apparaît que les horizons profonds restent relativement chargés en silice, ceci étant dû au ralentissement rapide de la consommation de l'élément.

Nous avons abordé dans cette partie les différences caractéristiques émanant du suivi qualitatif

spatial et temporel de deux points de contrôle de la nappe d'eau souterraine. Séparés d'environ 70 m, nous ne pouvons évidemment pas établir de lien spécifique entre les variations observées pour ces deux points. Néanmoins, nous avons pu mettre en évidence des fonctionnements individuels très spécifiques, qu'il faut relier aux différences structurelles des deux sites d'étude. En effet, il s'avère que leurs horizons supérieurs ne présentent apparemment pas les mêmes propriétés de capacité d'infiltration, ceci ayant des conséquences indéniables pour tout le profil, étant donné les fréquentes immersions du marais. Par ailleurs, la proximité immédiate du chenal pour l'un des points entraîne ainsi des conditions nettement plus oxygénées de la colonne d'eau interne au sol comparativement à l'autre point. Là encore, du fait de l'importance des activités des micro-organismes, cette différence conduit à une colonisation du milieu par des populations distinctes, ce qui se répercute directement sur la qualité d'eau des deux points. Considérant les tendances observées, nous pouvons toutefois résumer les modalités fonctionnelles essentielles, à l'échelle de l'année pour les deux points, de la manière suivante:

T de janvier à avril, impacts des fortes marées induisant un écoulement rapide de la nappe,
T d'avril à juin, reprise des activités biologiques et événements hydrologiques ponctuels,
T de juin à août, intensification des activités biologiques alors seule responsable de l'état des sites,
T d'août à septembre, seconde période de fortes marées entraînant un lessivage des horizons,
T de septembre à décembre, arrêt progressif des activités conduisant à une baisse des teneurs.

Bien entendu, ce schéma reste très général et il est donc à nuancer en fonction des points de contrôle et des nutriments concernés. Il finalise cependant bien les mécanismes déterminants du fonctionnement du compartiment nappe.

5.2.2 - Le budget estimé de la nappe

Comme nous l'avons déjà précisé dans l'introduction de l'étude du compartiment nappe, les budgets que nous allons présenter sont estimés à partir des variations de volume calculés avec l'évolution des niveaux. Même si cette procédure demeure très approximative, nous ne pouvons adopter de démarche plus fiable dans l'estimation de ces flux. A titre d'objectif futur, l'étude précise de la contribution de la nappe au fonctionnement général d'un tel bassin versant nécessiterait la mise en place d'une batterie de piézomètres, pas nécessairement étagés, sur toute la superficie concernée. Ainsi, le relevé ponctuel ou l'enregistrement continu des niveaux d'eau permet d'apprécier finement quelle est la surface contributive de la nappe impliquée. Par des méthodes de traçage classique, il devient alors possible de mettre en évidence les écoulements préférentiels qui s'y rattachent. Enfin, le suivi régulier des variations qualitatives des différents points de contrôle aboutit sur une bonne cartographie spatial des processus internes, et surtout, de nuancer les écarts potentiels observables d'amont en aval et perpendiculairement au bassin versant. L'intégration de ces différentes approches permet alors d'obtenir une vue d'ensemble suffisamment fine du compartiment nappe, mais, comme nous pouvons aisément l'imaginer, cela nécessite de ce fait une étude à part entière.

Aussi, nous limiterons cette étude de budget à une simple description graphique des résultats obtenus aux deux points de mesure. L'intérêt de cette présentation réside dans le fait que les évolutions des teneurs précédemment détaillées sont alors couplées indirectement aux fluctuations des niveaux de nappe, ceci permettant de relativiser l'impact des écarts observés.

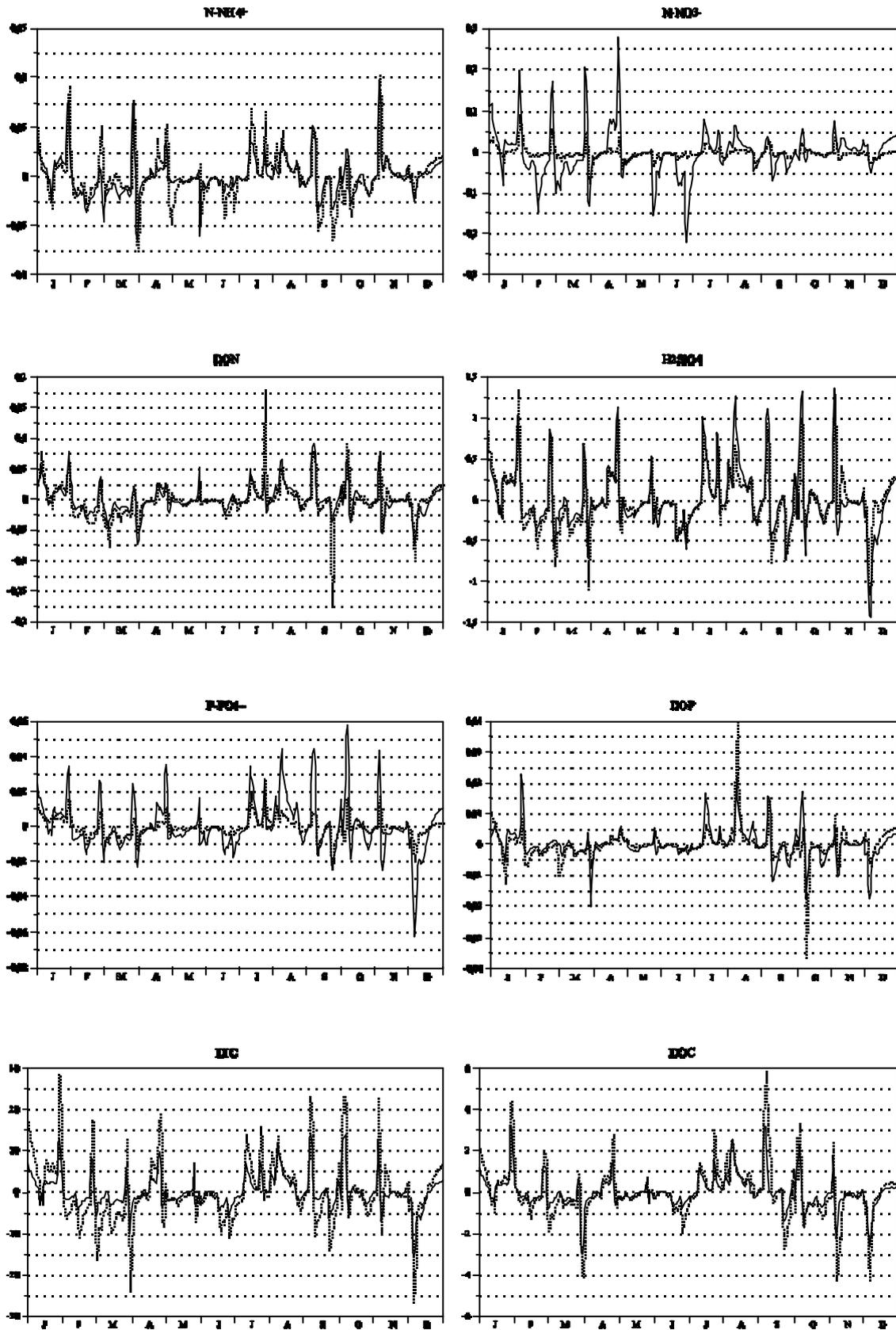


Figure 5.25 - Evolution des budgets des nutriments de la nappe (kg)
 (—, limite du bassin versant; ····, proximité du chenal)

Par souci de clarté, nous avons représenté les résultats obtenus pour les deux points selon des moyennes mobiles établies sur un intervalle de temps d'une semaine. Nous ne ferons aucun commentaire complémentaire quant à ces résultats dans la mesure où ne nous ferions que reprendre les divers mécanismes décrits dans la partie précédente. Simplement, nous insisterons sur le fait que, excepté pour $N-NO_3^-$ qui présente une forte disproportion des flux estimés, surtout durant la première moitié de l'année, les autres budgets fluctuent très généralement de manière similaire avec parfois une accentuation du phénomène pour l'un ou l'autre des sites. Il est également intéressant de remarquer les budgets du matériel organique à proximité du chenal, avec une infiltration importante en juillet et un export aussi caractéristique en septembre. A l'inverse des nitrates, la variabilité des flux de ces éléments est surtout caractéristique à partir de juillet.

Nous détaillerons plus spécifiquement ces tendances dans le chapitre suivant, où nous détaillerons notamment les capacités des éléments à diffuser d'un site à l'autre.

5.3 - Les précipitations

Comme nous avons pu le constater dans l'étude des processus internes à la nappe d'eau souterraine, les précipitations ont un impact indéniable pour la majorité des éléments. Cependant, nous n'avons observé que l'effet hydraulique des épisodes pluvieux, sous-entendu l'importance quantitative des pluies, qui, selon le degré, peuvent avoir des répercussions d'ordre mécanique ou physique. Néanmoins, il s'avère que celles-ci sont également une source potentiellement importante d'éléments divers, comme nous allons pouvoir le constater ci-après.

En préambule à cette partie, et à titre de support d'étude, le graphe ci-dessous résume quel a été l'impact des précipitations en 1994, qui, comme nous l'avons déjà mentionné, se sont avérées

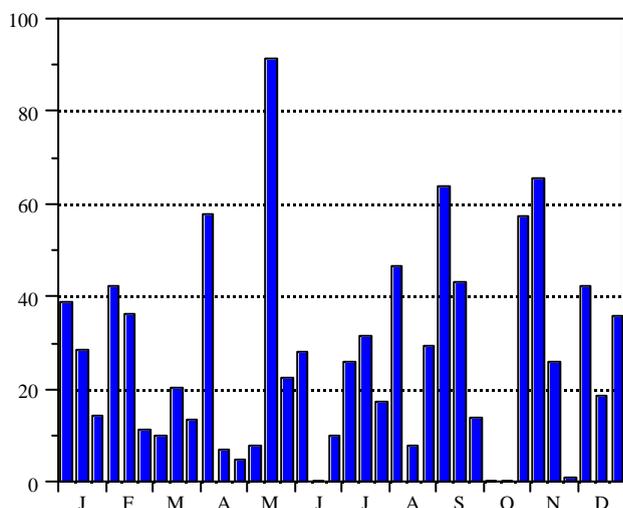


Figure 5.26 - Impact décadaire des précipitations en 1994

particulièrement importantes comparativement aux autres années. Nous pouvons ainsi remarquer les fortes pluies du mois de mai (jusqu'à 90 mm en 10 jours), lesquelles ont eu un effet non négligeable sur la dynamique de nombreux éléments de la nappe.

Comme nous l'avons déjà mentionné, les précipitations sont à entrevoir comme une source d'éléments externe au système. Aussi, nous ne ferons aucune étude des évolutions de teneurs observables avec les graphes présentés ci-après. Simplement, ils permettent de

constater que les variations enregistrées ne sont apparemment pas totalement aléatoires, et qu'elles répondent à des facteurs de contrôle d'ordre atmosphérique ou climatique. Ainsi, il apparaît que les fins d'hiver et d'été se révèlent être particulièrement propices à la présence de certains éléments dans les eaux de pluie. Enfin, considérant les évolutions de budget mentionnées, il ressort que les précipitations sont une composante essentielle de l'étude intersystème d'un marais salé. Comme nous le verrons dans le chapitre suivant, elles représentent une part importante du budget global.

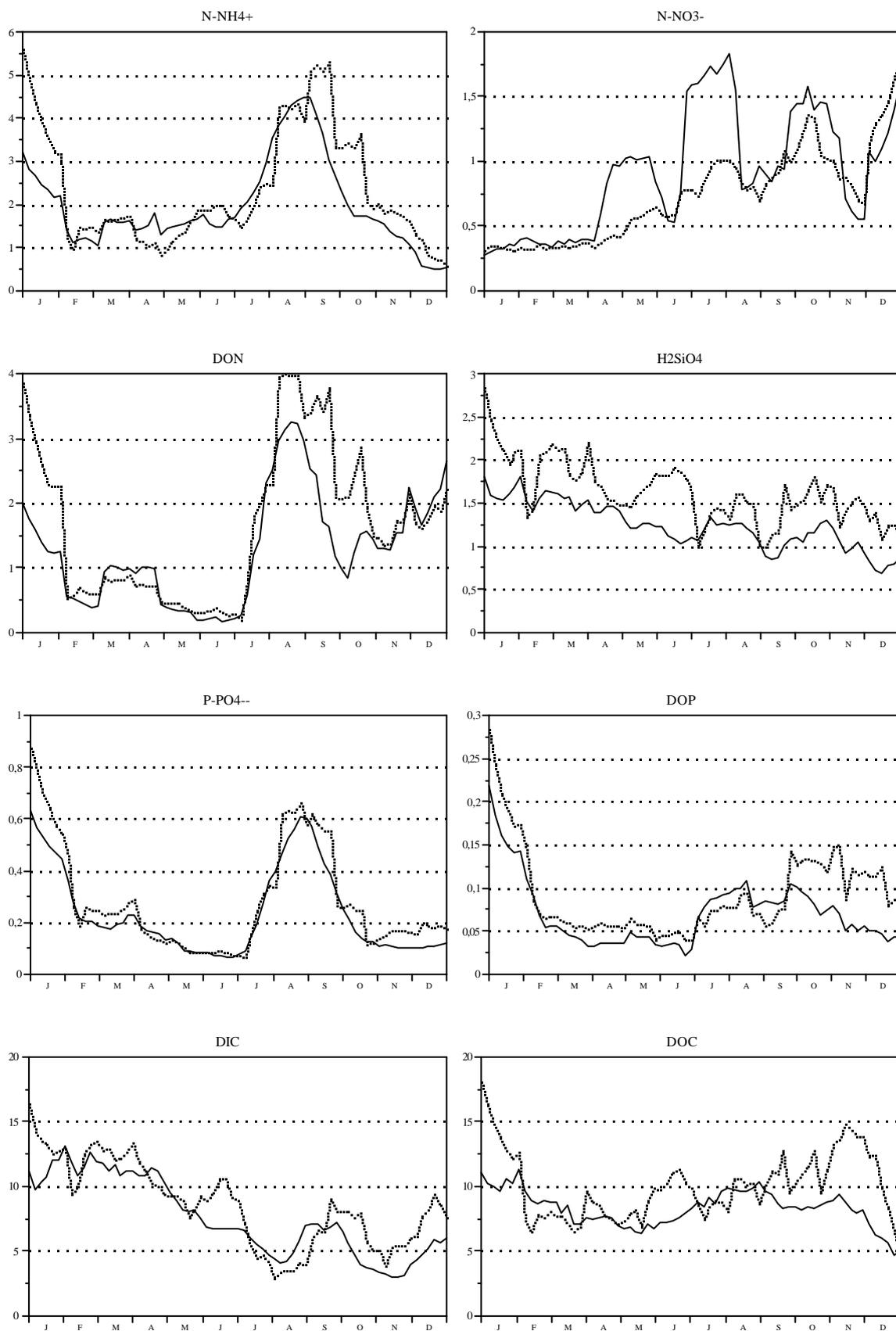


Figure 5.27 - Evolution des teneurs (—, $g \cdot m^{-3}$) et budgets (⋯, kg) des nutriments des précipitations

CHAPITRE 6 - LE BILAN INTERSYSTÈME

6.1 - Les composantes du bilan

Au cours du chapitre précédent, même si nous avons mentionné les budgets calculés pour chacun des compartiments étudiés, nous avons essentiellement axé la discussion sur les évolutions annuelles des teneurs, afin d'en décrire les processus caractéristiques afférents. Dans cette partie, nous allons au contraire focaliser l'étude sur les termes des budgets, d'une part pour relativiser les impacts respectifs des sous-systèmes concernés, et, d'autre part, pour tenter d'entrevoir comment ces mêmes sous-systèmes peuvent être liés.

A titre introductif, le tableau ci-après résume les budgets mensuels obtenus pour chacun des éléments étudiés et pour chacun des compartiments retenus. En accord avec la terminologie utilisée jusqu'à présent, les imports au marais salé sont représentés avec un signe positif, les exports avec un signe négatif. Par ailleurs, le dernier rang de chaque mois correspond au bilan du budget obtenu pour ce mois, à savoir la somme des flux observés pour les marées, les intercycles et, éventuellement, les précipitations. En effet, bien qu'il était préférable de présenter les budgets des différentes composantes simultanément, ceux du système nappe, correspondant à une étape parallèle du budget final, seront abordés ultérieurement dans ce chapitre.

Enfin, les graphes inclus après le tableau se réfèrent directement à ce dernier puisqu'ils représentent les termes mensuels des budgets des marées, des intercycles et des précipitations, ainsi que le budget total obtenu. Cette figure permet de mieux apprécier l'importance relative de chacune des composantes, mais également de rapprocher certains des éléments d'après l'évolution temporelle des budgets observée. Les commentaires relatifs à ces résultats suivent immédiatement la présentation des graphes.

Le bilan intersystème

	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	DON	PN	P-PO ₄ ²⁻	DOP	PP	H ₂ SiO ₄	DIC	DOC	Chla	MES
JANVIER												
marées	7,5	-2,3	-7,4	38	-0,9	-4,7	16	-77	-714	-100	1,7	41857
intercycles	-14	-4,5	-6,0	-7,9	-0,8	-0,7	-4,5	-84	-1151	-154	-0,3	-3092
nappe limite	1,3	5,6	-0,1	-	0,7	-0,2	-	21	238	54	-	-
nappe proximité	1,2	1,5	0,1	-	0,6	0,2	-	25	531	88	-	-
précipitations	32	2,9	21	-	5,2	1,5	-	18	113	115	-	-
<i>Total</i>	<i>26</i>	<i>-3,9</i>	<i>7,6</i>	<i>30</i>	<i>3,5</i>	<i>-3,9</i>	<i>12</i>	<i>-143</i>	<i>-1752</i>	<i>-139</i>	<i>1,4</i>	<i>38765</i>
FEVRIER												
marées	24	29	1,6	135	2,0	0,1	71	78	1654	140	3,7	93854
intercycles	-17	-4,0	-8,6	-13	-1,1	-0,7	-6,1	-86	-1200	-197	-0,3	-3765
nappe limite	2,2	2,9	3,5	-	0,5	1,0	-	19	310	119	-	-
nappe proximité	2,5	3,6	1,5	-	0,2	-0,2	-	23	635	138	-	-
précipitations	10	2,1	5,1	-	1,7	0,5	-	16	92	51	-	-
<i>Total</i>	<i>17</i>	<i>27</i>	<i>-1,9</i>	<i>122</i>	<i>2,6</i>	<i>-0,1</i>	<i>65</i>	<i>8,0</i>	<i>546</i>	<i>-6,0</i>	<i>3,4</i>	<i>90089</i>
MARS												
marées	-16	-18	-34	-19	-2,4	-3,3	-9,8	-221	-2546	-463	0,6	-37219
intercycles	-11	-3,1	-6,6	-6,8	-0,9	-0,5	-1,4	-79	-1020	-139	-0,2	-2502
nappe limite	-4,0	-6,9	-4,3	-	-1,4	-1,1	-	-43	-553	-153	-	-
nappe proximité	-2,9	-3,8	-3,3	-	-0,7	-0,4	-	-58	-1376	-224	-	-
précipitations	7,0	2,0	4,0	-	1,0	0,1	-	6,1	51	34	-	-
<i>Total</i>	<i>-20</i>	<i>-19</i>	<i>-3,7</i>	<i>-26</i>	<i>-2,3</i>	<i>-3,7</i>	<i>-11</i>	<i>-294</i>	<i>-3515</i>	<i>-568</i>	<i>0,4</i>	<i>-39721</i>
AVRIL												
marées	-23	-12	-19	84	-2,2	-2,8	9,2	-203	-1364	-519	2,6	9552
intercycles	-20	-6,3	-4,4	-10	-0,7	-0,5	-1,0	-88	-1106	-191	-0,3	-3172
nappe limite	0,1	-1,3	-0,2	-	-0,1	0	-	0,1	-50	-25	-	-
nappe proximité	-1,6	-0,8	0,1	-	-0,1	0	-	-5,6	-115	-27	-	-
précipitations	5,0	2,7	2,7	-	0,5	0,4	-	10	58	48	-	-
<i>Total</i>	<i>-38</i>	<i>-16</i>	<i>-2,1</i>	<i>74</i>	<i>-2,4</i>	<i>-2,9</i>	<i>8,2</i>	<i>-28,1</i>	<i>-2412</i>	<i>-662</i>	<i>2,3</i>	<i>6380</i>
MAI												
marées	-4,2	-8,8	-7,3	63	-1,1	-1,4	26	-50	-563	-298	2,5	-20079
intercycles	-9,8	-4,0	-3,8	-6,9	-0,5	-0,3	-2,9	-52	-617	-117	-0,4	-1784
nappe limite	-0,3	0,4	0,3	-	0,1	0,1	-	1,5	41	13	-	-
nappe proximité	-0,4	-0,2	0,6	-	0,1	0,1	-	7,8	221	29	-	-
précipitations	16	4,7	2,8	-	0,7	0,4	-	16	76	85	-	-
<i>Total</i>	<i>2,0</i>	<i>-8,1</i>	<i>-8,3</i>	<i>56</i>	<i>-0,9</i>	<i>-1,3</i>	<i>2,3</i>	<i>-8,6</i>	<i>-1104</i>	<i>-330</i>	<i>2,1</i>	<i>-21863</i>
JUIN												
marées	3,1	-3,5	-6,8	97	-0,4	-1,4	37	-42	-220	-164	3,2	-7064
intercycles	-5,6	-2,2	-1,7	-2,3	-0,2	-0,2	-6,7	-20	-225	-40	-0,1	-515
nappe limite	-0,2	-3,2	-0,5	-	-0,5	-0,1	-	-13	-138	-21	-	-
nappe proximité	-0,3	-0,3	-0,7	-	-0,2	-0,1	-	-11	-294	-32	-	-
précipitations	4,4	3,0	0,7	-	0,2	0,1	-	2,0	25	23	-	-
<i>Total</i>	<i>1,9</i>	<i>-2,7</i>	<i>-7,8</i>	<i>95</i>	<i>-0,4</i>	<i>-1,5</i>	<i>30</i>	<i>-6,0</i>	<i>-420</i>	<i>-18,1</i>	<i>3,1</i>	<i>-7579</i>
JUILLET												
marées	4,0	-3,2	-5,4	38	-0,2	-0,9	15	0,6	230	-69	2,1	-11939
intercycles	-6,3	-3,4	-2,4	-3,2	-0,5	-0,3	-11	-17	-190	-45	-0,2	-606
nappe limite	0,1	-0,4	0,1	-	0	0	-	0,9	7,6	2,5	-	-
nappe proximité	0,2	0	0,1	-	0,1	0	-	0	-2,3	0	-	-
précipitations	13	5,5	16	-	2,0	0,6	-	10	15	51	-	-
<i>Total</i>	<i>11</i>	<i>-1,1</i>	<i>8,2</i>	<i>35</i>	<i>1,3</i>	<i>-0,6</i>	<i>4,0</i>	<i>-6,4</i>	<i>55</i>	<i>-63</i>	<i>0,9</i>	<i>-12545</i>
AOÛT												
marées	-0,5	-4,8	-7,0	11	-0,9	-1,0	11	-18	159	-288	2,4	-20431
intercycles	-7,6	-5,2	-5,7	-5,2	-0,9	-0,5	-7,3	-38	-383	-80	-0,2	-893
nappe limite	-0,4	-0,5	-0,2	-	-0,2	0	-	-6,4	-38	-3,2	-	-
nappe proximité	-0,1	-0,5	-0,3	-	0	0	-	-6,0	-81	0	-	-
précipitations	30	4,5	21	-	4,4	0,4	-	5,7	31	58	-	-
<i>Total</i>	<i>22</i>	<i>-5,5</i>	<i>8,3</i>	<i>5,8</i>	<i>2,6</i>	<i>-1,1</i>	<i>3,7</i>	<i>-50</i>	<i>-193</i>	<i>-310</i>	<i>2,2</i>	<i>-21324</i>
SEPTEMBRE												
marées	-19	-12	-7,6	25	-2,4	-3,3	4,2	-139	309	-730	2,8	-25826
intercycles	-11	-7,7	-9,2	-7,7	-1,1	-0,6	-0,9	-72	-844	-182	-0,4	-1911
nappe limite	0	0	0,1	-	0	0	-	-0,6	-4,9	-0,2	-	-
nappe proximité	-0,2	0	0,1	-	0	0	-	0	3,2	0	-	-
précipitations	27	9,9	18	-	1,9	1,0	-	13	59	87	-	-
<i>Total</i>	<i>-3,0</i>	<i>-9,8</i>	<i>1,2</i>	<i>17</i>	<i>-1,6</i>	<i>-2,9</i>	<i>3,3</i>	<i>-198</i>	<i>-476</i>	<i>-825</i>	<i>2,4</i>	<i>-27737</i>
OCTOBRE												
marées	-5,5	0,2	-8,8	13	-1,4	-3,2	12	-32	-207	-284	0,5	-22481
intercycles	-15	-11	-6,9	-8,3	-1,2	-0,6	-0,9	-96	-1179	-180	-0,3	-2699
nappe limite	0,5	0,3	1,1	-	1,0	0,3	-	20	189	35	-	-
nappe proximité	0,9	0,4	1,2	-	0,2	0,1	-	17	411	64	-	-
précipitations	11	3,3	8,9	-	0,7	0,6	-	8,2	17	64	-	-
<i>Total</i>	<i>-9,5</i>	<i>-7,5</i>	<i>-6,8</i>	<i>4,7</i>	<i>-1,9</i>	<i>-3,2</i>	<i>11</i>	<i>-120</i>	<i>-1369</i>	<i>-400</i>	<i>0,2</i>	<i>-25180</i>
NOVEMBRE												
marées	-0,4	-4,3	-6,7	17	-0,5	-3,0	1,6	-7,7	-281	-192	1,5	-3513
intercycles	-8,2	-12	-10	-5,6	-1,2	-1,0	-2,5	-83	-1197	-78	-0,2	-2363
nappe limite	-0,6	-0,5	-1,3	-	-1,1	-0,3	-	-22	-212	-41	-	-
nappe proximité	-1,0	-0,4	-1,4	-	-0,3	-0,1	-	-20	-479	-78	-	-
précipitations	4,6	2,9	6,5	-	0,8	0,5	-	6,1	32	61	-	-
<i>Total</i>	<i>-4,0</i>	<i>-13</i>	<i>-10</i>	<i>11</i>	<i>-0,9</i>	<i>-3,5</i>	<i>-0,9</i>	<i>-85</i>	<i>-1446</i>	<i>-209</i>	<i>1,3</i>	<i>-5876</i>
DECEMBRE												
marées	-2,0	-23	-21	-5,2	-1,3	-3,1	-0,9	-90	-657	-325	0,5	-21851
intercycles	-8,7	-6,3	-3,8	-2,9	-0,5	-0,5	-1,4	-57	-825	-54	-0,1	-1565
nappe limite	0,5	1,4	0,6	-	0,3	0,1	-	8,9	79	7,0	-	-
nappe proximité	0,7	0,2	0,8	-	0,1	0,2	-	11	206	16	-	-
précipitations	2,0	8,0	7,6	-	0,7	0,3	-	2,6	34	18	-	-
<i>Total</i>	<i>-8,7</i>	<i>-21</i>	<i>-17</i>	<i>-8,1</i>	<i>-1,1</i>	<i>-3,3</i>	<i>-2,3</i>	<i>-144</i>	<i>-1448</i>	<i>-361</i>	<i>0,4</i>	<i>-23416</i>
TOTAL 1994	-3,3	-81	-85	416	-1,5	-28	146	-1459	-	-4054	20	-50007
									13534			

Tableau 6.1 - Termes mensuels des budgets des sous-systèmes en 1994 (kg)

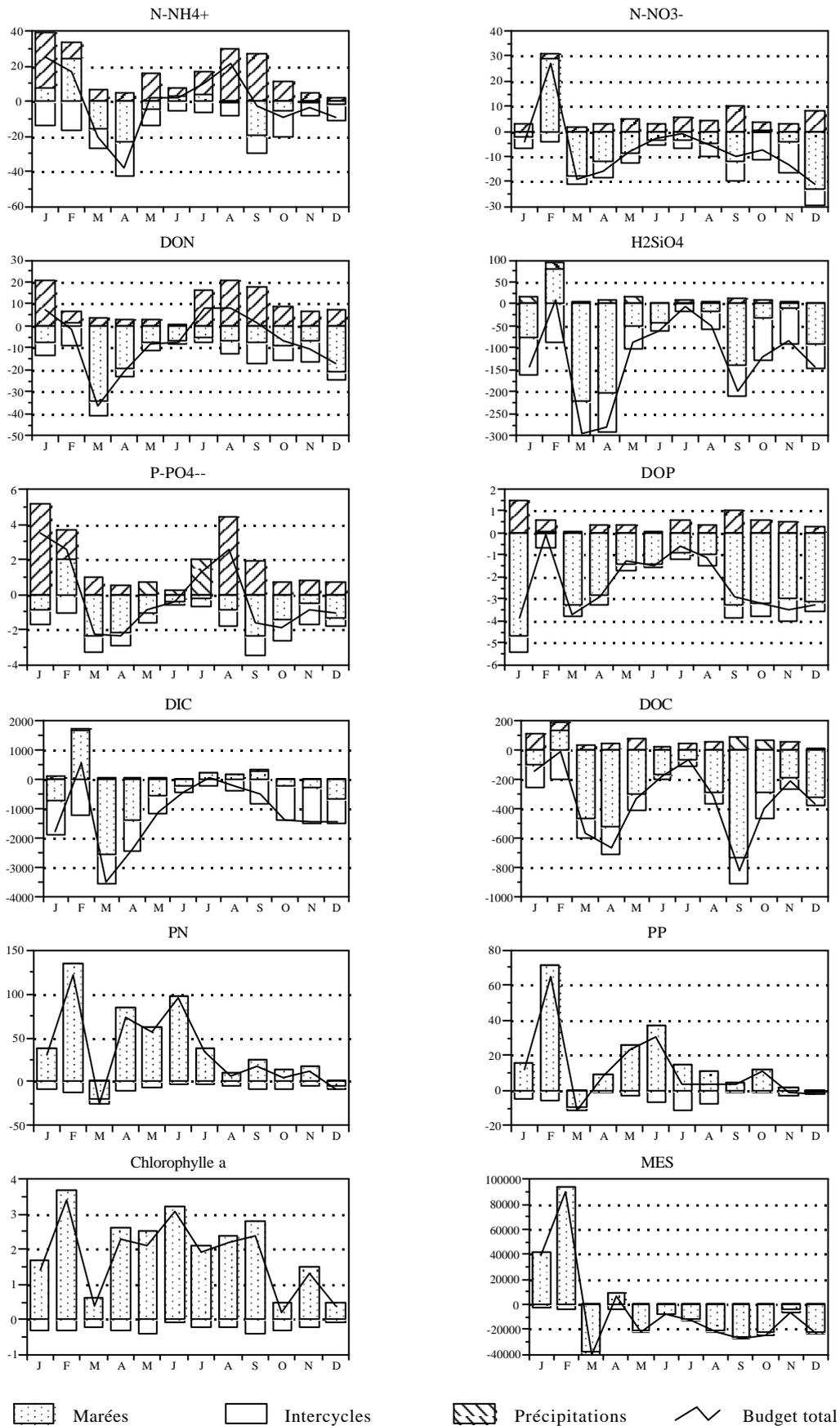


Figure 6.1 - Evolution mensuelle détaillée des budgets (kg) pour 1994

Nous traiterons séparément les huit graphes du haut de la page qui représentent les évolutions obtenues pour les éléments liés au matériel dissous, et les quatre du bas dépendant du matériel particulaire.

Lorsque nous examinons les tendances des nutriments dissous d'après la courbe obtenue pour le budget total, nous nous apercevons que nous pouvons distinguer deux groupes: un premier qui présente des bilans régulièrement exportateurs avec cependant une forte baisse en février et durant l'été (N-NO_3^- , H_2SiO_4 , DOP, DIC et DOC), et un second dont le budget annuel est beaucoup plus variable puisque exportateur au printemps et à l'automne, et importateur en hiver et en été (N-NH_4^+ , DON et P-PO_4^{2-}). Si nous étudions les composantes internes à ce bilan net, il s'avère que cette différence s'explique principalement par l'impact des apports pluvieux en nutriments, celui-ci étant cependant couplé à une tendance générale aux imports en février. Ainsi, le seul effet précipitation peut suffire à inverser le budget général du système, pour certains nutriments et pour certains mois tout du moins. Les apports de matériel dissous en février, parfois assez importants, s'expliquent par le fait que cette période coïncide avec celle des premières fortes marées à atteindre le système depuis la mise en repos des diverses activités biologiques. Le caractère flot dominant du système et les vitesses de courant élevées entraînent ainsi une remise en suspension efficace d'éléments plus ou moins adsorbés au sédiment de l'estran, lesquels parviennent alors directement sur le marais où ils sont de nouveau piégés.

Comme nous l'avons mentionné ci-avant, le système reste nettement exportateur au printemps et à l'automne, et ce, quel que soit l'élément considéré. Ceci recoupe naturellement les modalités fonctionnelles essentielles que nous avons avancées à l'issue du chapitre 5, à savoir, l'importance des activités biologiques du marais. Ainsi, pour le printemps, les exports sont bien évidemment liés à la reprise des activités biologiques, et, au contraire, pour l'automne, c'est le ralentissement progressif de ces mêmes activités qui les favorise. Toutefois, l'intermédiaire commun obligatoire de ces transferts reste naturellement les marées, lesquelles présentent des amplitudes assez élevées durant ces saisons. En réalité, au travers du fonctionnement du marais, les marées doivent être entrevues d'après leur propriété de support d'échange (cas des apports d'éléments en février nécessaires à la reprise des activités des mars), mais également comme une force physique à l'origine de nombreux processus (désorption, éclatement des cellules, infiltration,...). Le facteur premier de ces potentialités réside dans l'amplitude et la périodicité des cycles, lesquels peuvent influencer les budgets intra et interannuels, comme nous le verrons dans la dernière partie.

Indirectement liées aux marées, les intercycles, et donc la dynamique de la nappe d'eau souterraine, correspondent à des périodes parfois très propices aux exports de nutriments, notamment N-NH_4^+ , H_2SiO_4 et DIC. La saisonnalité de l'importance de ces processus reste la même que celle décrite précédemment pour le budget général, les raisons demeurant inchangées.

Nous étudierons ci-après les contributions saisonnières respectives de ces compartiments.

Inversement, les périodes d'intercycles n'ont absolument aucune influence sur les termes des budgets du matériel particulaire, si ce n'est qu'elles contribuent modiquement à en diminuer les imports. En effet, à l'opposé des éléments liés au dissous, ceux du particulaire présentent des bilans régulièrement excédentaires, excepté les MES. Nous ne reviendrons pas sur ce cas, bien que les raisons d'inversement de tendance aient également fortement contribué à diminuer les imports de PN et PP durant la deuxième moitié de l'année. Comme ci-avant, nous constatons une progression significative des imports en février, ceci s'expliquant par la forte dépendance des éléments particuliers aux forces motrices des marées. Toutefois, celle-ci est suivie d'une nette baisse des budgets, certains devenant même déficitaires, les amplitudes des marées restant cependant élevées. Ceci s'explique par l'effet du mois précédent, toute la surface de l'estran ayant été décapée, et par le fait que les activités biologiques commencent alors tout juste à reprendre.

La figure ci-dessous reprend les termes saisonniers généraux des éléments dissous étudiés sous leurs

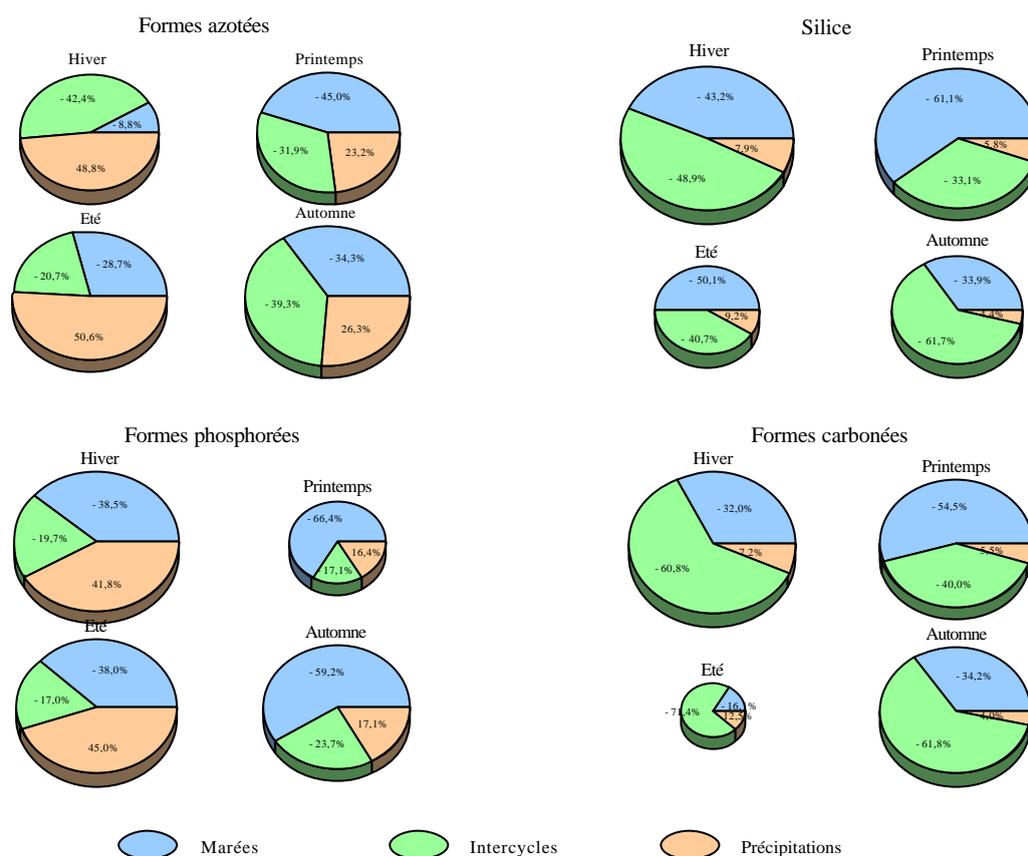


Figure 6.2 - Contributions relatives saisonnières des sous-systèmes aux échanges du marais en 1994

formes générales (N, Si, P et C), les termes intermédiaires ayant donc été sommés.

Naturellement, tous ne sont pas de même signe, et nous les avons donc intégrés en valeur absolue afin d'en comparer les contributions relatives. Enfin, au sein de chacune de ces formes, les surfaces des graphes individuels sont proportionnelles entre elles, et donc représentatives des budgets élémentaires obtenus pour une saison comparativement aux autres.

Pour les formes azotées, nous constatons que l'impact saisonnier général reste très limité, mais que les sous-systèmes se caractérisent par des contributions assez variables. Ainsi, les précipitations jouent un rôle considérable puisqu'elles représentent entre 25 et 50% des échanges généraux, tandis que les intercycles prédominent sur les marées, excepté en été. Enfin, il faut noter la très faible contribution des marées en hiver, ceci étant à rapprocher des imports significatifs de février qui ont contrebalancés les exports de janvier et mars.

La silice témoigne d'une dominance certaine des périodes hivernales et printanières. Par ailleurs, l'apport des précipitations reste très limité durant toute l'année, alors que les impacts des marées et intercycles demeurent relativement proches.

Le printemps présente des échanges plus faibles pour les formes phosphorées, et nous pouvons observer une forte analogie des contributions avec l'automne (prédominance des marées), tout comme celles de l'hiver avec l'été (apports limités des intercycles).

Comme pour la silice, les précipitations n'influent pas les échanges des formes carbonées. A l'inverse, le rôle des intercycles apparaît très significatif, même durant l'été où l'impact du budget ressort très limité à l'échelle de l'année.

Comme nous pouvons le constater, le rôle des sous-systèmes étudiés reste très dépendant de l'élément et de la saison concernés. Néanmoins, considérant les volumes mis en jeu, il s'avère que les intercycles, comme les précipitations, qui, à priori, pouvaient être considérés comme intervenants mineurs dans ces échanges, jouent un rôle parfois nettement supérieur à celui des marées. Ainsi, comme pour des slogans publicitaires, il apparaît que ce n'est pas tant la quantité qui importe, mais la qualité. Plus sérieusement, nous pouvons considérer que ces deux critères sont en réalité directement liés. Effectivement, comme nous pourrons l'observer au cours de la troisième partie, les marées les plus efficaces en termes d'échanges ne sont pas celles aux plus fortes amplitudes. En effet, pour ces dernières, c'est avant tout leur force motrice qui intervient, laissant ainsi pour compte tous les autres processus. A l'inverse, les marées d'amplitude moyenne, tout comme les précipitations ou les intercycles, ont un impact beaucoup plus nuancé. Non seulement ils présentent un effet physique réel dans la mesure où ils s'accompagnent d'une perturbation certaine du marais, mais, parallèlement, ils sont suffisamment subtils pour ne pas transformer complètement le système d'un état à un autre. Ainsi, les modalités fonctionnelles de base sont maintenues, permettant au marais de progresser dans son évolution avec des potentialités complémentaires. Ce sont ces propriétés qui confèrent aux intercycles et précipitations toute l'importance qui en découle, ces deux processus apparaissant, rappelons-le, comme primordiaux dans l'étude intersystème d'un marais salé.

6.2 - Un cas d'étude: la nappe d'eau souterraine

Directement dépendante des caractéristiques des écoulements d'intercycles, la nappe d'eau souterraine devient donc, à son tour, élément capital dans le fonctionnement général du marais salé. Effectivement, comme nous avons pu le constater précédemment, non seulement elle semble offrir des potentialités qualitatives certaines, mais, en plus, elle conditionne l'un des processus fondamentaux à l'origine des échanges du système avec le milieu côtier. Aussi, considérant les données dont nous disposons avec les suivis des deux points de contrôle, nous avons établi un rapprochement entre l'évolution des budgets exportateurs de ces sites (nous n'avons donc pris en compte que les termes négatifs), avec ceux observés parallèlement pour les écoulements d'intercycles. La comparaison reste certainement très discutable du fait de l'estimation des budgets de la nappe, mais, même si ces résultats s'en trouvent sur- ou sous-estimés, les tendances générales demeurent réelles, et, la mise en parallèle avec les périodes de ressuyage justifiée.

Les graphes présentés ci-après ne doivent absolument pas être interprétés d'après leur aspect premier. En effet, pour éviter des extrapolations abusives, nous avons représenté à la même échelle les évolutions mensuelles des budgets des deux points de contrôle de la nappe distants de 70 m, et celles des écoulements d'intercycles du chenal situé à environ 5 m du plus proche des points. Ces tracés doivent donc plutôt être entrevus comme des tendances aux échanges d'eau souterrains, lesquels, nous le verrons après, présentent des propriétés tout à fait réalistes. Ceci conforte donc l'idée première de cette comparaison, à savoir, les potentialités internes de la nappe, son cheminement et son devenir après exfiltration des berges des chenaux. Aussi, dans la mesure où nous en avons déjà fait état précédemment, nous ne reviendrons pas sur les processus à l'origine des évolutions des bilans de chacun des éléments, mais insisterons sur les transferts théoriques internes de ce sous-système.

A titre explicatif, les budgets du point situé à la limite du chenal sont représentés au plus haut des graphes, ceux du point à proximité au milieu, et ceux des intercycles en bas. L'écoulement de la nappe doit donc être imaginé du haut vers le bas.

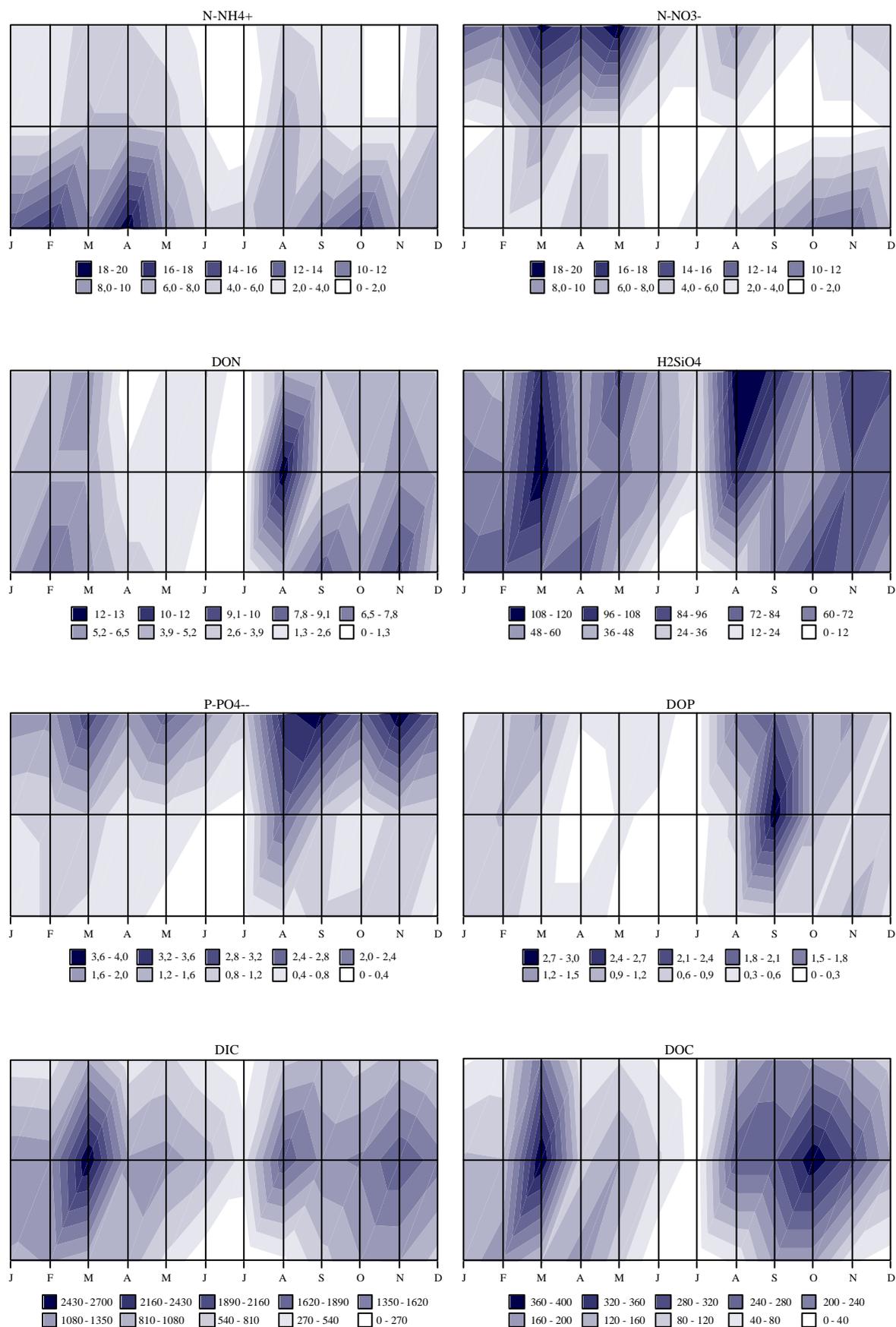


Figure 6.3 - Variabilité et évolution des nutriments de la nappe d'eau souterraine (kg) en 1994

En considérant l'allure générale des tracés obtenus pour chacun des graphes, nous constatons qu'il y a effectivement bien des écoulements de nappe perpendiculairement au chenal. En effet, la présence régulière de zones verticales assombries, couvrant la hauteur des graphes, témoigne ainsi des échanges entre les trois points de mesure. Toutefois, il apparaît nettement que, pour certains éléments, ces transferts tendent à perdre de leur intensité au niveau du chenal. Naturellement, ceci est caractéristique d'une diminution progressive des teneurs, imputable à une consommation et/ou à une modification structurelle des éléments (oxydoréduction, complexation, adsorption,...).

A l'inverse des autres éléments, $N-NH_4^+$ présente de fortes concentrations près du chenal de janvier à mai et en automne. Comme nous pouvons le constater, ceci ne semble pas imputable à un enrichissement par la nappe, et il faut donc rattacher ce phénomène aux activités biologiques du ressuyage des intercycles.

Les nitrates se distinguent par des tendances beaucoup plus limitées puisqu'ils ne sont réellement observables qu'à la limite du bassin versant en hiver et au printemps. Ceci témoigne de l'accumulation de cet élément, à relier aux propriétés structurelles spécifiques du sol en ce point et aux capacités d'écoulement différentes (voir ci-après).

L'azote organique dissous, comme les autres formes organiques, présente de fortes teneurs en août à proximité du chenal, ceci intervenant brutalement sans liaison apparente avec les autres points. En hiver et en automne, il est présent avec des flux croissants de la limite du bassin versant vers le chenal. Nous pouvons alors considérer que les processus à l'origine du DON ainsi que la diffusion interne de cet élément sont relativement homogènes.

En raison de la présence de diatomées à proximité directe du chenal, les forts budgets en silice ne sont réellement observables qu'à la limite du bassin versant et aux intercycles. Ceci se confirme d'ailleurs au début de l'année, du fait de l'absence d'activité des algues, où nous pouvons observer une diffusion réelle de l'élément sur tout le transect.

Pour les formes phosphorées, et plus spécifiquement pour les phosphates que pour le phosphore organique dissous, la diffusion interne des éléments est nettement freinée du fait de leur adsorption au sédiment. Comme pour l'azote, la forme organique présente le même pic d'accumulation caractéristique du mois d'août.

Enfin, les formes carbonées présentent une évolution des budgets assez particulière puisque c'est la nappe à proximité du chenal qui révèle les plus fortes valeurs. Cependant, ces éléments se caractérisent par un étalement vertical des zones d'accumulation, révélateur, ici encore, de leur pouvoir diffusant, notamment pour la forme organique.

Ainsi, si nous écartons le cas des nitrates et de l'ammoniaque aux dynamiques très fortement influencées par les conditions d'oxygénation du milieu, l'ensemble des autres éléments mentionnés présente une capacité de diffusion réelle liée aux écoulements de nappe. Excepté pour le carbone dont la présence est notamment dépendante des phénomènes de respiration, ceux-ci entraînant une dynamique particulière de cet élément, le schéma général tend à prouver que c'est la zone située à la limite du bassin versant qui alimente le reste de la nappe. A cela, deux explications peuvent être formulées: 1) la proximité directe du chenal, et donc la diffusion de l'oxygène, engendre des activités biologiques au recyclage plus rapide, d'où une disparition accrue des éléments dissous en ce point, et, 2) la situation géographique des points de contrôle de la nappe est à l'origine de modalités hydrauliques distinctes. En effet, le site à la limite du bassin versant n'est alimenté que par les précipitations et marées, alors que l'autre bénéficie en plus des écoulements internes de la nappe. Nous pouvons de ce fait supposer que les vitesses de renouvellement de l'eau y sont plus rapides.

Le bilan intersystème

Dans l'étude précédente, afin d'apprécier la contribution de la nappe vis-à-vis des écoulements d'intercycles, nous n'avons pris en compte que les budgets de circulation interne. Cependant, nous devons considérer qu'ils sont directement dépendants de ceux liés aux infiltrations, et nous allons commenter brièvement le bilan interne de la nappe d'eau souterraine. A ce titre, en considérant les deux points de contrôle comme sous-entités réelles du compartiment nappe, les infiltrations doivent alors être exprimées positivement, les écoulements négativement. Nous obtenons le bilan suivant:

	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	DON	P-PO ₄ ²⁻	DOP	H ₂ SiO ₄	DIC	DOC
INFILTRATION A LA LIMITE								
Hiver	12	43	14	7,4	2,3	218	2245	420
Printemps	11	37	8,0	6,4	1,4	198	1617	228
Eté	11	17	12	9,0	3,6	256	2138	433
Automne	13	15	17	10	2,9	267	2778	488
<i>Total</i>	<i>47</i>	<i>112</i>	<i>51</i>	<i>33</i>	<i>10</i>	<i>939</i>	<i>8778</i>	<i>1569</i>
ECOULEMENT A LA LIMITE								
Hiver	-13	-42	-15	-7,5	-2,5	-222	-2250	-399
Printemps	-11	-42	-8,4	-6,8	-1,4	-210	-1764	-260
Eté	-11	-18	-12	-9,1	-3,6	-262	-2173	-434
Automne	-12	-14	-17	-10	-2,8	-260	-2723	-488
<i>Total</i>	<i>-47</i>	<i>-116</i>	<i>-52</i>	<i>-33</i>	<i>-10</i>	<i>-954</i>	<i>-8910</i>	<i>-1581</i>
INFILTRATION A PROXIMITE								
Hiver	16	13	15	3,5	1,7	253	5237	657
Printemps	13	7,9	9,2	1,8	0,9	189	3402	380
Eté	15	5,7	19	4,5	3,6	207	3761	590
Automne	13	6,8	19	3,0	2,6	242	5082	823
<i>Total</i>	<i>57</i>	<i>33</i>	<i>62</i>	<i>13</i>	<i>8,8</i>	<i>891</i>	<i>17482</i>	<i>2450</i>
ECOULEMENT A PROXIMITE								
Hiver	-15	-12	-17	-3,5	-2,2	-263	-5446	-655
Printemps	-16	-9,2	-9,3	-2,0	-0,8	-198	-3590	-411
Eté	-15	-6,1	-19	-4,5	-3,6	-213	-3841	-589
Automne	-12	-6,6	-18	-2,9	-2,4	-234	-4943	-821
<i>Total</i>	<i>-58</i>	<i>-34</i>	<i>-63</i>	<i>-13</i>	<i>-9,0</i>	<i>-908</i>	<i>-17820</i>	<i>-2476</i>
BILAN A LA LIMITE								
Hiver	-0,5	1,6	-1,0	-0,2	-0,3	-3,7	-5,1	20
Printemps	-0,4	-4,2	-0,3	-0,4	0	-12	-147	-33
Eté	-0,3	-0,8	0,1	-0,2	0	-6,0	-35	-0,9
Automne	0,4	1,2	0,3	0,2	0,1	6,5	55	0,9
<i>Total</i>	<i>-0,8</i>	<i>-2,2</i>	<i>-0,9</i>	<i>-0,6</i>	<i>-0,2</i>	<i>-15</i>	<i>-132</i>	<i>-13</i>
BILAN A PROXIMITE								
Hiver	0,7	1,3	-1,7	0,1	-0,5	-11	-209	2,4
Printemps	-2,4	-1,3	0	-0,2	0,1	-8,7	-188	-31
Eté	-0,1	-0,4	-0,1	0,1	0	-6,0	-79	1,0
Automne	0,6	0,1	0,5	-0,1	0,2	7,7	139	1,5
<i>Total</i>	<i>-1,2</i>	<i>-0,3</i>	<i>-1,3</i>	<i>-0,1</i>	<i>-0,2</i>	<i>-18</i>	<i>-337</i>	<i>-26</i>

Tableau 6.2 - Détail des budgets saisonniers des points de contrôle de la nappe d'eau souterraine (kg)

Ainsi, il apparaît que ces bilans sont tous négatifs au terme de l'année, ce qui implique que lors des écoulements dans le sol, certains processus internes participent à enrichir la qualité d'eau de la nappe. Comme nous pouvons le constater par comparaison avec les termes des processus infiltration, ces enrichissements restent cependant très limités. Ceci nous permet donc de conclure que c'est durant les épisodes d'infiltration que la charge de la nappe augmente, soit du fait des teneurs déjà présentes dans l'eau hors du sol, soit par lessivage des horizons superficiels.

Ces écoulements potentiels mériteraient naturellement d'être étudiés plus en détail, avec notamment un maillage plus serré des points de contrôle. Aussi, dans la mesure où nous avons tenté de décrire une

diffusion sur un parcours de 70 m avec seulement deux points d'observation, les descriptions précédemment présentées doivent être considérées avec certaines réserves. Quoi qu'il en soit, les tendances générales ne semblent pas totalement aberrantes, et confortent l'hypothèse d'une alimentation qualitative de la nappe par la zone à la limite du bassin versant.

6.3 - Approche synthétique globale du bilan intersystème

Comme toute étude de bilan intersystème, nous allons présenter dans cette partie une vue générale des sous-systèmes du marais et des échanges qui les rendent interdépendants. Cette étape doit être considérée comme l'une des conclusions finales de cette étude, dans la mesure où elle répond à l'une des premières questions que nous nous étions posées: quels sont les échanges intersystèmes annuels d'un marais salé ?

La figure suivante reprend les composantes marées, intercycles et précipitations du bilan du tableau 6.1, selon des termes annuels. Pour la nappe d'eau souterraine, nous avons fait la distinction entre les

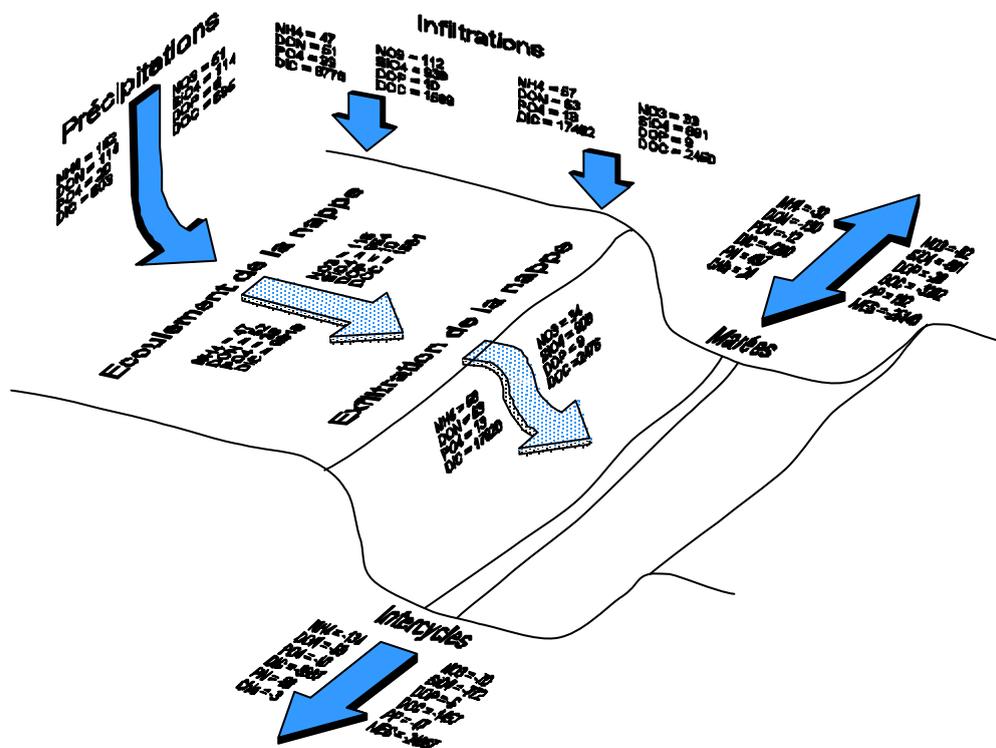


Figure 6.4 - Bilan intersystème du marais salé en 1994

infiltrations et les circulations internes. Naturellement, ces deux mécanismes sont représentés ici positivement puisqu'ils correspondent à des apports ou à des transferts internes du marais. Très généralement, il ressort que la plupart des nutriments présentent des budgets aux proportions relativement homogènes entre les différents sous-systèmes étudiés, excepté les précipitations. Toutefois, cela concerne exclusivement la silice et les formes carbonées.

Le bilan intersystème

Considérant le fait que ces éléments sont sous la dominance quasi-exclusive de processus biologiques ou liés au biologique, et le caractère physique des épisodes atmosphériques, leur faible contribution devient alors évidente. A l'opposé, toujours pour les précipitations, nous constatons que les formes azotées et phosphorées présentent des apports certains. En effet, ceci est lié aux charges électriques atmosphériques des épisodes pluvieux, lesquelles entraînent des transformations physiques de ces éléments, les libérant ainsi avec l'eau de pluie.

Le tableau ci-après reprend ces résultats selon une échelle saisonnière afin d'en discerner les évolutions temporelles (Total 1994 = somme des budgets marées, intercycles et précipitations).

	N- NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	DON	PN	P- PO ₄ ²⁻	DOP	PP	H ₂ SiO ₄	DIC	DOC	Chla	MES
MAREES												
Hiver	16	8,7	-40	154	-1,3	-7,9	77	-220	-1606	-423	6,0	98492
Printemps	-24	-24	-33	244	-3,7	-5,6	72	-295	-2147	-981	8,3	- 17591
Eté	-16	-20	-20	74	-3,5	-5,2	30	-156	698	-1087	7,3	- 58196
Automne	-7,9	-27	-37	25	-3,2	-9,3	13	-130	-1145	-801	2,5	- 47845
<i>Total</i>	<i>-32</i>	<i>-62</i>	<i>-130</i>	<i>497</i>	<i>-12</i>	<i>-28</i>	<i>192</i>	<i>-801</i>	<i>-4200</i>	<i>-3292</i>	<i>24</i>	<i>-2514 0</i>
INTERCYCLES												
Hiver	-42	-12	-21	-28	-2,8	-1,9	-12	-249	-3371	-490	-0,8	-9359
Printemps	-35	-13	-10	-19	-1,4	-1,0	-11	-160	-1948	-348	-0,8	-5471
Eté	-25	-16	-17	-16	-2,5	-1,4	-19	-127	-1417	-307	-0,8	-3410
Automne	-32	-29	-21	-17	-2,9	-2,1	-4,8	-236	-3201	-312	-0,6	-6627
<i>Total</i>	<i>-134</i>	<i>-70</i>	<i>-69</i>	<i>-80</i>	<i>-10</i>	<i>-6,4</i>	<i>-47</i>	<i>-772</i>	<i>-9937</i>	<i>-1457</i>	<i>-3</i>	<i>-2486 7</i>
ECOULEMENT A LA LIMITE												
Hiver	13	42	15	-	7,5	2,5	-	222	2250	399	-	-
Printemps	11	42	8,4	-	6,8	1,4	-	210	1764	260	-	-
Eté	11	18	12	-	9,1	3,6	-	262	2173	434	-	-
Automne	12	14	17	-	10	2,8	-	260	2723	488	-	-
<i>Total</i>	<i>47</i>	<i>116</i>	<i>52</i>	<i>-</i>	<i>33</i>	<i>10</i>	<i>-</i>	<i>954</i>	<i>8910</i>	<i>1581</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
ECOULEMENT A PROXIMITE												
Hiver	15	12	17	-	3,5	2,2	-	263	5446	655	-	-
Printemps	16	9,2	9,3	-	2,0	0,8	-	198	3590	411	-	-
Eté	15	6,1	19	-	4,5	3,6	-	213	3841	589	-	-
Automne	12	6,6	18	-	2,9	2,4	-	234	4943	821	-	-
<i>Total</i>	<i>58</i>	<i>34</i>	<i>63</i>	<i>-</i>	<i>13</i>	<i>9,0</i>	<i>-</i>	<i>908</i>	<i>17820</i>	<i>2476</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
PRECIPITATIONS												
Hiver	49	7,0	30	-	7,9	2,1	-	40	256	200	-	-
Printemps	25	10	6,2	-	1,4	0,9	-	28	159	156	-	-
Eté	70	20	55	-	8,3	2,0	-	29	105	196	-	-
Automne	18	14	23	-	2,2	1,4	-	17	83	143	-	-
<i>Total</i>	<i>162</i>	<i>51</i>	<i>114</i>	<i>-</i>	<i>20</i>	<i>6,4</i>	<i>-</i>	<i>114</i>	<i>603</i>	<i>695</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
TOTAL 1994	-3,3	-81	-85	417	-1,5	-28	145	-1459	-13534	-4054	20	-5000 7

Tableau 6.3 - Impact saisonnier des sous-systèmes sur les échanges du marais salé en 1994 (kg)

Bien que ce tableau puisse paraître redondant avec celui du début de chapitre, il était néanmoins nécessaire de l'intégrer en complément de la figure 6.4. Lorsque nous observons les résultats obtenus pour l'année entière, il ressort que le marais salé exporte du matériel dissous et importe du particulaire, même si les MES font exception. Comme nous l'avons déjà évoqué à plusieurs reprises dans cette deuxième partie, les bilans du matériel en suspension sont fortement corrélés aux processus de maturité du système, et nous les étudierons plus spécifiquement dans la troisième partie. Aussi, nous n'en ferons pas cas dans cette discussion.

Considérant les formes azotées dissoutes, il apparaît que le budget en N-NH_4^+ reste très faible comparativement aux autres éléments. En effet, alors que les intercycles accentuent largement les exports limités des marées, les imports dûs aux précipitations équilibrent complètement le bilan. Il ressort ainsi que c'est en hiver et en été que les charges atmosphériques sont les plus importantes, cette tendance étant par ailleurs également validée pour tous les autres nutriments. Avec une proportion moindre compte tenu des exports des marées et des intercycles, nous observons sensiblement le même phénomène pour P-PO_4^{2-} , le bilan final pour 1994 étant quasiment nul.

Concernant la silice et les formes carbonées, même si les apports pluvieux demeurent sans véritable influence sur les exports liés aux marées et intercycles, il ressort qu'ils sont cependant considérables vu leur origine.

Nous ne reviendrons pas sur la saisonnalité des transferts déjà commentée ci-avant, mais il était nécessaire de la mentionner dans ce tableau concluant les termes des budgets.

Comme pressenti lors des études du chapitre 5, il s'avère que le marais salé est soumis à des échanges de nutriments dont l'importance des budgets est variable. Par ordre de bilan net décroissant, nous obtenons en effet le carbone, la silice, l'azote et le phosphore. Cette combinaison témoigne notamment de l'importance de la colonisation du milieu par les diatomées, lesquelles ont un rôle clé dans la dynamique des échanges du fait de leurs activités lors des intercycles. A ce titre et en tant que maillon intermédiaire de chaînes trophiques, elles font actuellement l'objet d'une étude à long terme afin d'en décrire plus précisément les potentialités et influences.

CONCLUSIONS DE LA DEUXIÈME PARTIE

Le marais salé étudié se révèle donc être à caractère flot dominant, c'est-à-dire que les débits de la marée montante sont nettement supérieurs à ceux du jusant, ceci entraînant également une forte asymétrie des durées de chacun de ces phénomènes. En raison de l'importante variabilité des amplitudes de marées, le site est régulièrement plus ou moins inondé. Aussi, la nappe d'eau souterraine est donc fréquemment remise en charge, ce qui est à l'origine des écoulements d'intercycles, dont le ressuyage des lits de chenaux du marais présente un impact notable quant aux échanges avec le milieu côtier.

Etant donné le fonctionnement hydraulique très spécifique d'un marais salé, il est nécessaire d'adopter une méthodologie aussi fiable que possible dans l'étude des échanges intersystèmes. A ce titre, nous avons appliqué un modèle développé récemment, celui-ci présentant l'intérêt indéniable d'être beaucoup plus proche de la réalité des transferts entre compartiments constitutifs du système. En effet, la structure de base sur laquelle il repose, consiste à ne pas considérer le marais comme un écosystème statique, mais, au contraire, à intégrer les variabilités internes et externes qui le caractérise d'après une étude dynamique des échanges journaliers.

Nous avons ainsi observé les processus à l'origine des échanges de la colonne d'eau du chenal de marée, celle-ci devant être considérée comme l'interface obligatoire entre le marais et le milieu côtier. Les différents éléments analysés durant toute l'année 1994, nous ont donc permis non seulement d'appréhender les modalités fonctionnelles à l'origine des transferts, mais également d'en estimer les budgets. Trois mots suffisent à en résumer les règles principales : productivité, activité biologique.

Que ce soit la nappe d'eau souterraine comme étape intermédiaire, ou les précipitations en tant qu'élément externe, l'étude des transferts se doit de considérer ces sous-systèmes comme liés au fonctionnement du marais salé. Le suivi réalisé parallèlement à l'étude du chenal a ainsi confirmé l'importance véritable de ces compartiments, dans la mesure où ils peuvent modifier nettement la nature des échanges de certains nutriments.

Lorsque nous intégrons l'ensemble de ces approches dans l'étude du bilan intersystème, il ressort que ce ne sont pas les phénomènes les plus importants par leur intensité qui conditionnent les échanges généraux du marais. En effet, ces systèmes apparaissent subtils dans la mesure où ils réagissent préférentiellement aux perturbations d'ordre moyen mais de qualité certaine.

Au stade actuelle de l'étude, le marais salé présente des échanges avec le milieu côtier dont les caractéristiques sont liées au type de matériel. En effet, nous observons des exports d'éléments dissous, notamment le carbone et la silice, ceci confirmant l'importance des activités biologiques, dont celle des diatomées. A l'inverse, les formes particulières sont importées, excepté les matières en suspension. Comme nous le verrons dans la troisième partie, ce dernier résultat témoigne directement de l'évolution générale du marais.

- TROISIÈME PARTIE -
L'ÉVOLUTION DU MARAIS



CHAPITRE 7 - LE PARAMÉTRAGE HYDRAULIQUE

CHAPITRE 8 - LA CONVERSION DES FLUX DE
NUTRIMENTS

CHAPITRE 9 - L'ÉVOLUTION DES DYNAMIQUES

CHAPITRE 7 - LE PARAMÉTRAGE HYDRAULIQUE

Dans la mesure où, dans cette partie, nous allons étudier comment le système a évolué durant la période d'étude (1991-1994), et, considérant que les marées constituent un des moteurs fonctionnels essentiels du marais, il apparaît fondamental d'observer en premier lieu quelles ont été les caractéristiques des marées durant cette période. A ce titre, la figure et le tableau suivants renseignent sur les statistiques principales observées.

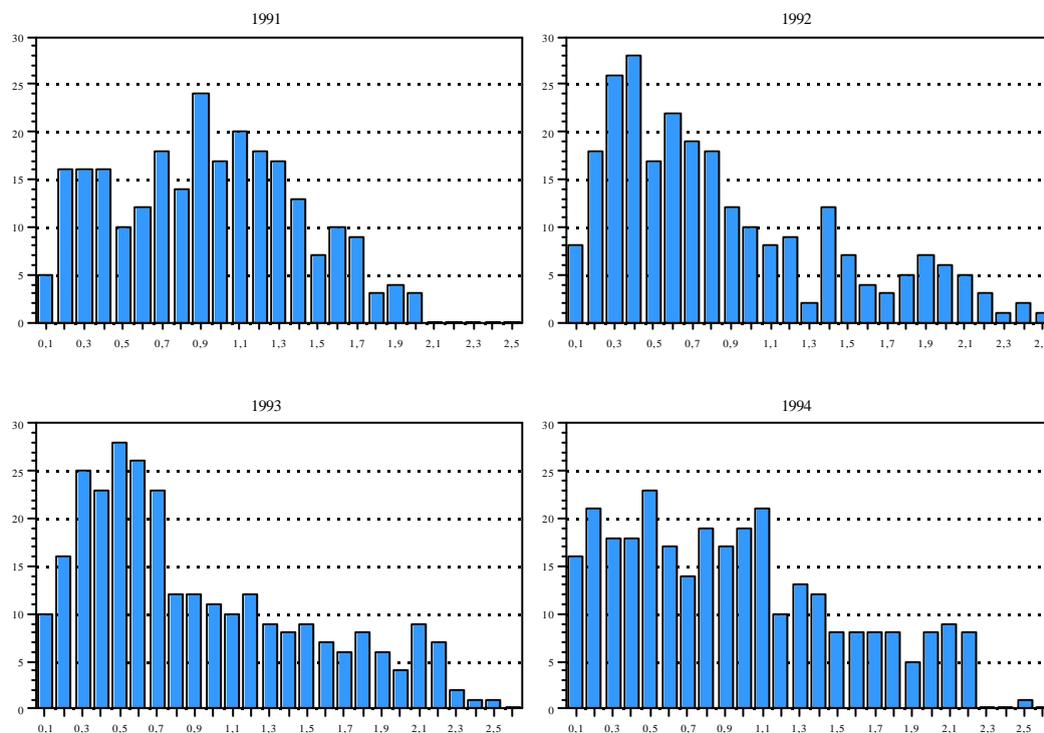


Figure 7.1 - Fréquence des marées rapportée aux classes de hauteur de pleine mer

Le paramétrage hydraulique

	1991	1992	1993	1994
marées ayant atteint le site	252	253	285	301
marées ayant inondé le marais	66	58	77	88
hauteur moyenne (m)	0,88	0,81	0,86	0,90
écart-type (m)	0,47	0,58	0,60	0,59
hauteur médiane (m)	0,86	0,64	0,67	0,85
hauteur modale (m)	1,02	0,38	0,64	0,39
coefficient d'asymétrie	0,05	0,87	0,85	-0,19
indice de Kurtosis	-1,33	-0,21	-0,11	-1,01

Tableau 7.1 - Statistiques des marées de la période d'étude

D'une manière très générale, nous nous apercevons que le nombre de marées ayant atteint le site, ainsi que celles ayant submergé le marais, augmente durant les quatre années. Aussi, la répartition des classes de marées est relativement différente d'une année sur l'autre, alors que les hauteurs moyennes restent très proches. Sans entrer dans le détail pour autant, ces tendances peuvent influencer le fonctionnement général de l'écosystème. En effet, d'après les valeurs médianes calculées, celles-ci correspondant aux valeurs centrales de la distribution, il apparaît des similitudes entre 1991 et 1994, et, 1992 et 1993, avec une différence d'environ 0,20 m entre ces deux groupes. D'autre part, les valeurs modales représentant la plus forte tendance des distributions, il se dégage une analogie certaine entre 1992 et 1994 avec une faible valeur modale, puis 1993, et enfin 1994. Les coefficients d'asymétrie et les indices de Kurtosis renseignent sur la distribution des marées. Pour 1991 et 1994, l'asymétrie étant quasiment nulle, cela suggère une répartition symétrique autour de la moyenne (la moyenne et la médiane sont sensiblement identiques), et relativement aplatie du fait de l'indice K négatif. Il s'agit donc de deux années dont les marées ont présenté toutes les classes d'amplitude de manière assez homogène sur chacune des périodes (surtout 1994). Pour 1992 et 1993, l'asymétrie positive traduit un étalement de la distribution à droite (la médiane est inférieure à la moyenne), celle-ci présentant un pic assez prononcé (indice K sensiblement nul). Ceci révèle qu'il s'agit là de deux années ayant été essentiellement influencées par des marées de faible amplitude. Ainsi, il apparaît que les quatre années d'étude présentent des distributions de marée sensiblement différentes, ceci pouvant avoir des répercussions sur l'évolution générale du système. La poursuite de l'étude du marais nous permettra de répondre au caractère cyclique ou non de ces tendances.

Dans la mesure où l'un des objectifs premiers de cette partie est d'étendre la méthodologie adoptée pour l'étude des échanges intersystèmes en 1994 à l'ensemble de la période d'étude, il s'avère indispensable de pouvoir maîtriser à tout instant des amplitudes des marées. De plus, cette connaissance nous permet d'entrevoir des perspectives à plus long terme, sous-entendu, en l'état actuel du marais, d'envisager son évolution future dans les années à venir. Naturellement, les amplitudes des marées ne constituent qu'un maillon élémentaire à l'origine de la maturation du système, mais leur évolution n'en demeure pas moins capitale.

La connaissance des niveaux de différentes marées qui ont atteint le système depuis janvier 1991 nous a permis, grâce à l'ouvrage édité par le SHOM en 1984, de caractériser les constantes harmoniques des 20 premières ondes astronomiques qui sont à l'origine du phénomène des marées.

Onde	Amplitude (mm)	Situation (°)	Argument astronomique (°) (<i>t</i> est l'heure décimale)
Sa	84	244	<i>h</i>
K1	102	149	15 <i>t</i> + <i>h</i> + 90
O1	56	280	15 <i>t</i> - 2 <i>s</i> + <i>h</i> - 90
Q1	14	264	15 <i>t</i> - 3 <i>s</i> + <i>h</i> + <i>p</i> - 90
P1	-102/3	149	15 <i>t</i> - <i>h</i> + 90
o1	56/5.3	280	15 <i>t</i> - 2 <i>s</i> + <i>h</i> - <i>N'</i> - 90
k1	102/7.4	149	15 <i>t</i> + <i>h</i> + <i>N'</i> + 90
M2	4157	204	30 <i>t</i> - 2 <i>s</i> + 2 <i>h</i>
N2	731	184	30 <i>t</i> - 3 <i>s</i> + 2 <i>h</i> + <i>p</i>
S2	1535	256	30 <i>t</i>
2N2	731/7.6	184	30 <i>t</i> - 4 <i>s</i> + 2 <i>h</i> + 2 <i>p</i>
μ2	731/6.3	184	30 <i>t</i> - 4 <i>s</i> + 4 <i>h</i>
v2	731/5.3	184	30 <i>t</i> - 3 <i>s</i> + 4 <i>h</i> - <i>p</i>
L2	-4157/35	204	30 <i>t</i> - <i>s</i> + 2 <i>h</i> - <i>p</i>
K2	1535/3.7	256	30 <i>t</i> + 2 <i>h</i>
T2	1535/17	333	30 <i>t</i> - <i>h</i>
m2	-4157/27	204	30 <i>t</i> - 2 <i>s</i> + 2 <i>h</i> - <i>N'</i>
k2	1535/12	256	30 <i>t</i> + 2 <i>h</i> + <i>N'</i>
MN4	118	163	60 <i>t</i> - 5 <i>s</i> + 4 <i>h</i> + <i>p</i>
M4	509	191	60 <i>t</i> - 4 <i>s</i> + 4 <i>h</i>
MS4	213	250	60 <i>t</i> - 2 <i>s</i> + 2 <i>h</i>

Tableau 7.2 - Paramètres astronomiques de la station expérimentale

A un instant *t* quelconque, la hauteur potentielle (car toutes les marées n'atteignent pas la station) de la marée dans le chenal peut être déterminée à partir de ces ondes selon:

$$T = E[30.6001(1 + M + 12.E[\frac{I}{M + 1} + 0.7])] + E[365.25 (a - E[\frac{I}{M + 1} + 0.7])] + J + \frac{t}{24} - 723258$$

avec: $E[]$ signifiant "partie entière de ...", *a* = l'année (ex: 1981), *M* = le mois de l'année (de 1 à 12), *J* = le jour dans le mois (de 1 à 31), *t* = l'heure décimale (ex: 12.57 pour 12 h 34 mn).

Remarque: cette formule a été calibrée à partir d'une date référence fixée arbitrairement au 1^{er} Janvier 1980 à 00 h 00 (UT), et n'est valable que pour des dates comprises entre le 1^{er} Mars 1900 et le 28 Février 2100.

$$s = 78.16^\circ + 13.17639673 T \quad h = 279.82^\circ + 0.98564734 T \quad p = 349.50^\circ + 0.11140408 T$$

$$N' = 208.10^\circ + 0.05295392 T \quad (p_i = 282.60^\circ + 0.000047069 T)$$

Et enfin:
$$h(t) = Z_0 + \sum_i A_i \cos(V_i - G_i)$$

avec: $h(t)$ = la hauteur d'eau en mm, $Z_0 = -4214$ mm, A_i = amplitude de l'onde *i*, V_i = argument astronomique de l'onde *i*, G_i = situation de l'onde *i*.

Nous avons appliqué cet ensemble de formules pour retrouver les hauteurs de pleines mers observées depuis janvier 1991, sans corriger les valeurs obtenues des effets atmosphériques intervenant sur

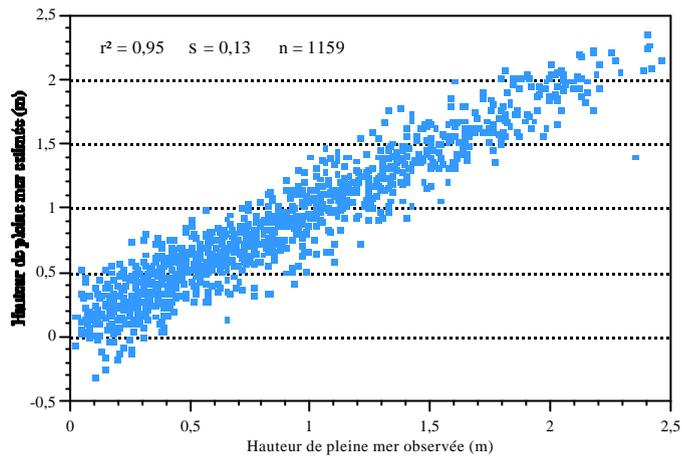


Figure 7.2 - Hauteurs de pleine mer observées et estimées

l'amplitude des marées, tels que la pression et le vent. La figure suivante illustre bien la validité et la précision de ce modèle, puisque nous avons pu estimer les hauteurs d'étal avec un intervalle de confiance de $\pm 6,5$ cm.

Entre autres avantages, la connaissance de ces différents paramètres astronomiques nous permet désormais de retrouver, pour n'importe quelle date et heure de la période d'étude, la hauteur d'eau éventuelle de la marée dans le chenal. En effet, durant plus des deux premières années du suivi, nous ne disposions que d'un limnigraphe

mécanique, réglé sur un pas de temps d'une semaine. Bien que les enregistrements papiers collectés nous aient permis de calibrer en partie ces formules, ils restent toutefois très limités pour retrouver précisément des niveaux de marée. De plus, nous disposons désormais d'un outil capable de nous fournir, en théorie, les caractéristiques des marées à venir, et donc d'entrevoir une approche potentielle sur l'évolution du marais, compte tenu naturellement d'un ensemble d'autres paramètres (accrétion, élévation du niveau de la mer,...).

Complémentaires au paramétrage hydraulique, les surfaces inondées et volumes d'eau concernés sont directement établis à partir des hauteurs d'eau des marées. Nous avons déjà mentionné les différentes formules de calibration au début de la deuxième partie, nous ne les rappellerons donc pas.

CHAPITRE 8 - LA CONVERSION DES FLUX DE NUTRIMENTS

8.1 - Les bases de calcul

Nous avons déjà discuté de l'intérêt de la méthodologie adoptée pour l'étude dynamique de la colonne d'eau du chenal en 1994. Aussi, l'un des objectifs premiers de cette partie étant d'adapter la même procédure à l'échelle des quatre années d'étude, nous devons en préciser les modalités d'application, lesquelles s'avèrent légèrement différentes.

En effet, bien que notre objectif initial était de réaliser des suivis qualitatifs quotidiens des marées et des écoulements intercycles, nous n'avons pas pu mettre en place une telle problématique dès le début de l'étude. Ainsi, durant les deux premières années, nous avons dû nous limiter à des suivis ponctuels de marées, de cycles et/ou d'intercycles, plus ou moins espacés dans le temps. Par contre, les deux années suivantes, nous avons pu étudier toutes les marées et intercycles, selon le pas de temps qui a été précisé dans le chapitre 3. Dans le contexte des deux premières années, c'est-à-dire avec la connaissance de la qualité de l'eau de quelques marées pour une année complète, de nombreuses études se limitent à une simple règle de trois pour estimer le budget annuel. Cette estimation reste très abusive, mais surtout très peu sûre lorsque le nombre de marées réellement étudiées est faible, ou réparti de façon non homogène tout au long de l'année. Dans notre cas, bien que le nombre de marées que nous avons suivi aurait été suffisant pour l'emploi d'une telle approximation, nous avons préféré utiliser des modèles de régression pour chacun des nutriments, pour l'ensemble de la période d'étude, selon la méthodologie développée par Williams et al. (1992). Très schématiquement, elle consiste à considérer un ensemble de différentes covariables susceptibles d'expliquer la variabilité de qualité des nutriments au cours du temps. En utilisant une technique de régression pas à pas, il s'agit de trouver quelle est la combinaison des covariables qui transcrit au mieux les variations des éléments, chaque covariable ou combinaison étant testée sur la signification qu'elle apporte au modèle général. Bien sûr, ceci ne rend absolument pas compte d'explications écologiquement raisonnées, mais cette méthode permet d'estimer des flux annuels avec un écart type plus faible que lorsqu'on se limite aux règles de trois.

Les covariables que nous avons retenues sont les suivantes:

Variables	Description
Tmin	Température minimale quotidienne
Tmax	Température maximale quotidienne
Tmoy	Température moyenne quotidienne
DTemp	Ecart de température quotidien (maxi - mini)
Temp8	Température moyenne sur 8 jours
SqTemp8	Valeur carrée de la température moyenne sur 8 jours
Rg	Rayonnement global quotidien
SqRg	Valeur carrée du rayonnement global quotidien
Rg1	Rayonnement global de la veille
Rg2	Rayonnement global de l'avant veille
Rg8	Rayonnement global moyen sur 8 jours
SqRg8	Valeur carrée du rayonnement global moyen sur 8 jours
Etp	Evapotranspiration quotidienne
SqEtp	Valeur carrée de l'évapotranspiration quotidienne
Etp1	Evapotranspiration de la veille
Etp2	Evapotranspiration de l'avant veille
Etp8	Evapotranspiration moyenne sur 8 jours
SqEtp8	Valeur carrée de l'évapotranspiration moyenne sur 8 jours
Pluie	Précipitations quotidiennes
SqPluie	Valeur carrée des précipitations quotidiennes
Pluie1	Précipitations de la veille
Pluie2	Précipitations de l'avant veille
Pluie8	Précipitations totales sur 8 jours
SqPluie8	Valeur carrée des précipitations totales sur 8 jours
Biom	Estimation quotidienne de la biomasse d' <i>H. portulacoides</i>
SqBiom	Valeur carrée de l'estimation quotidienne de la biomasse d' <i>H. portulacoides</i>
OrdreC	Ordre des marées (1 ^{ère} marée du cycle = 1, 2 ^{ème} marée du cycle = 2,..., n)
OrdreIC	Ordre des intercycles (1 ^{er} jour d'intercycle = 1, 2 ^{ème} jour d'intercycle = 2,..., n)
Durjour	Durée du jour
SqDurjour	Valeur carrée de la durée du jour
DurF	Durée du flot
DurJ	Durée du jusant
Durmar	Portion de la marée exposée au jour
Hpm	Hauteur de la pleine mer
SqHpm	Valeur carrée de la hauteur de la pleine mer
Hpm1	Hauteur de la pleine mer de la marée précédente
SqHpm1	Valeur carrée de la hauteur de la pleine mer de la marée précédente
Hpm2	Hauteur de la pleine mer de la deuxième marée précédente
SqHpm2	Valeur carrée de la hauteur de la pleine mer de la deuxième marée précédente
Code	Nombre de demi-journées à compter du 1 ^{er} Janvier 1991
SqCode	Valeur carrée du nombre de demi-journées à compter du 1 ^{er} janvier 1991

Tableau 8.1 - Covariables des modèles de régression

Comme nous pouvons le constater, certaines de ces covariables peuvent présenter des valeurs bi-quotidiennes (Hpm,...), d'autres pas, du fait d'un manque de précision des données de base (Tmin,...) ou simplement du fait de leur unicité (Durjour,...). Dans ce cas, la valeur quotidienne observée est donc doublée pour chaque demi-journée. Les modèles de régression ont été développés grâce au logiciel Minitab®, selon une procédure de recherche dite pas à pas avec exclusion des variables non significatives. L'équation mentionnée est établie pour la racine carrée des concentrations, et il faut donc porter le résultat à la puissance 2 pour obtenir la valeur réelle.

8.2 - Les modèles de régression

Les modèles de régression obtenus sont les suivants:

T Le flot:

$$\begin{aligned}
 \text{N-NH}_4^+ &= 17,3 + \text{Durjour} (0,00034 \text{ Code} + 0,90 \text{ Hpm} - 1,60 \text{ DurF} - 1,08) + \text{Etp8} (0,0104 \text{ Pluie8} - 0,0217 \text{ Temp8} + 1,71) - 1,06 \text{ SqHpm2} \\
 &+ \text{Biom} (-0,00000312 \text{ Code} - 0,0044 \text{ DurF} + 0,00000469 \text{ Biom}) + \text{Code} (0,0063 \text{ DurF} - 0,0032 \text{ Hpm}) + 0,125 \text{ OrdreC} - 0,170 \text{ Rg8} \\
 &- 0,12 \text{ Pluie1} - 0,087 \text{ Tmax} - 0,46 \text{ SqHpm1} \\
 \text{N-NO}_3^- &= 21,4 + \text{Durjour} (0,00049 \text{ Code} + 0,00031 \text{ Biom} + 0,095 \text{ Durjour} - 3,42) + \text{Hpm1} (0,55 \text{ Hpm1} - 1,65) + 5,5 \text{ DurF} - 0,00117 \text{ Hpm.Code} \\
 &+ \text{Etp8} (-0,36 \text{ Hpm} + 0,50 \text{ DurF} - 0,00017 \text{ Code}) + \text{Biom} (-0,00014 \text{ Pluie} - 0,00000194 \text{ Code} + 0,00013 \text{ DurJ}) + 0,181 \text{ Rg1} - 1,16 \text{ Etp1} \\
 &- 0,179 \text{ Temp8,Etp8} + 0,329 \text{ Rg} + 0,0204 \text{ SqPluie} + 0,05 \text{ Rg8} \\
 \text{DON} &= 14,1 + \text{Code} (-0,00032 \text{ Temp8} + 0,00000333 \text{ Biom} - 0,00068 \text{ Etp} + 0,00090 \text{ Hpm} - 0,00006 \text{ Pluie8} - 0,00302) - 7,8 \text{ SqDurF} \\
 &+ \text{Temp8} (0,41 \text{ Hpm} + 0,0214 \text{ Pluie8} - 0,53 \text{ DurF} + 0,68) + \text{Pluie8} (0,0041 \text{ Pluie8} - 0,25) - 0,61 \text{ SqHpm2} - 0,0000037 \text{ SqBiom} \\
 \text{PN} &= 9,59 + \text{Code} (0,00061 \text{ Etp8} - 0,00027 \text{ Pluie8} + 0,00259 \text{ Hpm} - 0,00029 \text{ Temp8} - 0,00033 \text{ DurJ}) + \text{Pluie8} (-0,0089 \text{ Pluie8} + 1,46) \\
 &+ \text{Durjour} (-0,033 \text{ Pluie8} - 0,0542 \text{ Etp8}) + \text{DurJ} (0,00067 \text{ Biom} - 0,084 \text{ Etp8}) + \text{Etp} (2,04 \text{ Hpm} - 0,246 \text{ Pluie}) - 1,75 \text{ SqHpm2} \\
 &- 0,212 \text{ Pluie2} - 0,367 \text{ Pluie1} \\
 \text{P-PO}_4^- &= 0,598 + \text{Durjour} (0,00002 \text{ Code} - 0,01295 \text{ Durjour} + 0,199) + \text{Temp8} (-0,0645 \text{ DurF} + 0,0035 \text{ Temp8}) + 0,0094 \text{ OrdreC} \\
 \text{DOP} &= 2,55 + \text{Temp8} (0,00028 \text{ Biom} - 0,047 \text{ DurF} + 0,0029 \text{ Pluie8} - 0,0053 \text{ Temp8} - 0,14) + \text{DurJ} (-0,00004 \text{ Biom} + 0,0083 \text{ Etp} + 0,0055 \text{ DurJ}) \\
 &+ \text{Pluie8} (-0,00351 \text{ DurJ} - 0,0217 \text{ Etp} - 0,00005 \text{ Biom} + 0,00171 \text{ Pluie8}) - 0,00002 \text{ Durjour,Code} - 0,028 \text{ Tmoy} - 0,076 \text{ SqHpm} \\
 &+ 0,022 \text{ Pluie2} - 0,00000113 \text{ SqBiom} + 0,028 \text{ Pluie1} + 0,18 \text{ Hpm} \\
 \text{PP} &= 5,98 + \text{Code} (0,00031 \text{ Etp8} + 0,0145 \text{ DurF} - 0,0003 \text{ Temp8}) + \text{DurJ} (-0,0142 \text{ Pluie8} + 0,65 \text{ Etp} - 0,095 \text{ Etp8}) - 0,922 \text{ SqHpm2} + 0,139 \text{ Tmin} \\
 &+ \text{Pluie8} (0,084 \text{ Hpm} - 0,0108 \text{ Etp8} + 0,075) + \text{Etp} (0,251 \text{ Temp8} - 0,00259 \text{ Biom} - 0,08 \text{ Pluie} - 1,99 \text{ DurF}) + 0,00372 \text{ Biom} \\
 &- 0,112 \text{ Rg8} + 0,237 \text{ Etp8,Hpm} \\
 \text{H}_2\text{SiO}_4 &= 17,3 + \text{Temp8} (0,00018 \text{ Code} - 0,0457 \text{ Durjour} + 0,216 \text{ Hpm}) + \text{Pluie8} (-0,208 \text{ DurF} + 0,0046 \text{ Pluie8} + 0,073 \text{ Etp}) - 0,00194 \text{ Hpm.Code} \\
 &+ \text{Durjour} (0,49 \text{ Hpm} - 0,95 \text{ DurF}) - 0,65 \text{ SqHpm1} + 0,215 \text{ OrdreC} - 0,67 \text{ SqHpm2} + 2,86 \text{ Etp2} - 0,24 \text{ Rg2} \\
 \text{DIC} &= 3,03 + \text{Durjour} (-0,204 \text{ DurF} + 0,00002 \text{ Code}) + \text{Etp8} (-0,00484 \text{ Temp8} + 0,142 \text{ DurF}) + \text{Hpm1} (-0,249 \text{ Hpm1} + 0,29) + 0,177 \text{ SqHpm} \\
 &+ 0,0065 \text{ Etp.Pluie8} - 0,0204 \text{ Pluie1} + 0,13 \text{ Etp2} \\
 \text{DOC} &= 1,97 + \text{Temp8} (-0,00162 \text{ Pluie8} + 0,0241 \text{ Hpm} - 0,00111 \text{ Temp8}) + \text{Biom} (0,00000083 \text{ Biom} - 0,00151) - 0,0112 \text{ Tmax} - 0,0128 \text{ Pluie1} \\
 &+ \text{Pluie8} (0,022 \text{ DurF} + 0,0048 \text{ Etp}) - 0,101 \text{ Hpm1} + 0,00007 \text{ Code} - 0,073 \text{ Durjour.DurF} + 0,114 \text{ Etp8} - 0,0143 \text{ Rg8} \\
 \text{Chla} &= 4,81 + \text{Etp8} (0,253 \text{ Hpm} - 0,064 \text{ DurJ} - 0,0142 \text{ Pluie8}) + \text{Pluie8} (0,186 \text{ DurF} - 0,0215 \text{ DurJ} + 0,0039 \text{ Pluie8}) + \text{Etp} (-0,218 \text{ Pluie} + 0,96) \\
 &+ 0,00014 \text{ Biom.Durjour} - 0,165 \text{ OrdreC} - 1,46 \text{ SqHpm2} + 3,31 \text{ Hpm} \\
 \text{MES} &= 23,6 + \text{Code} (-0,00373 \text{ Temp8} + 0,00194 \text{ Etp8} + 0,0015 \text{ Durjour}) + \text{Temp8} (-0,148 \text{ Durjour} + 7,1) + \text{Hpm2} (-9,8 \text{ Hpm2} + 9,1) \\
 &+ \text{Etp} (-0,88 \text{ Pluie} + 3,8 \text{ Hpm}) + 0,533 \text{ Pluie8} - 0,97 \text{ Pluie1} - 0,9 \text{ Pluie2} + 0,0111 \text{ Biom} + 40,5 \text{ SqDurF} - 0,366 \text{ SqDurjour} - 0,34 \text{ Rg8}
 \end{aligned}$$

T Le jusant:

$$\begin{aligned}
 \text{N-NH}_4^+ &= 17,1 + \text{Code} (0,00038 \text{ Durjour} - 0,00232 \text{ DurF} - 0,00000395 \text{ Biom} + 0,00283) + \text{Durjour} (0,126 \text{ Hpm} - 1,7) - 0,6 \text{ SqHpm2} - 0,114 \text{ Rg8} \\
 &+ \text{Etp8} (-0,0211 \text{ Temp8} + 0,0095 \text{ Pluie8} + 1,52) + \text{Biom} (-0,0024 \text{ DurF} + 0,0000053 \text{ Biom}) - 0,116 \text{ Pluie2} - 0,084 \text{ Tmax} \\
 \text{N-NO}_3^- &= 9,05 + \text{Etp8} (0,0137 \text{ Pluie8} - 0,066 \text{ Hpm} + 0,14 \text{ Durjour} - 0,1093 \text{ Temp8} + 0,00055 \text{ Biom} - 1,25) + \text{Pluie8} (0,168 \text{ DurF} - 0,195) \\
 &+ \text{Code} (-0,00529 \text{ DurF} + 0,00012 \text{ Durjour} + 0,00356) + \text{Biom} (-0,00091 \text{ Temp8} + 0,00000263 \text{ Biom}) + 9,7 \text{ DurF} - 0,75 \text{ Hpm1} \\
 &- 0,99 \text{ Durjour} + 0,073 \text{ SqTemp8} \\
 \text{DON} &= 16,2 + \text{Code} (-0,0039 \text{ DurF} - 0,0002 \text{ Durjour} + 0,00334 \text{ Hpm} - 0,00004 \text{ Pluie8}) + \text{Pluie8} (0,0242 \text{ Durjour} + 0,0075 \text{ DurJ} - 0,24) \\
 &+ \text{DurF} (0,387 \text{ Etp8} - 4,98 \text{ Hpm} - 0,24 \text{ Durjour}) - 0,00064 \text{ Etp.Biom} - 0,057 \text{ OrdreC} \\
 \text{PN} &= 2,68 + \text{Temp8} (-0,0335 \text{ Pluie8} + 0,097 \text{ Etp8} + 0,131 \text{ Hpm} - 0,0418 \text{ Temp8} + 0,36) + \text{Etp8} (-0,203 \text{ Durjour} - 0,44 \text{ DurF} + 1,7) - 0,191 \text{ Pluie2} \\
 &+ \text{Pluie8} (0,0644 \text{ Etp8} - 0,105 \text{ Durjour} + 0,119 \text{ Etp} + 1,31) + \text{Biom} (0,00525 \text{ DurF} + 0,00095 \text{ Durjour} - 0,0000071 \text{ Biom}) \\
 &- 0,028 \text{ Durjour.DurJ} - 0,161 \text{ Pluie1} - 0,28 \text{ SqHpm2} \\
 \text{P-PO}_4^- &= 2,38 + \text{Temp8} (-0,0004 \text{ Code} - 0,095 \text{ DurF} + 0,00002 \text{ Biom} + 0,00746 \text{ Temp8}) + \text{Durjour} (0,00004 \text{ Code} - 0,00805 \text{ Durjour}) \\
 &- 0,0201 \text{ Tmax} + 0,0299 \text{ Etp8,Hpm} \\
 \text{DOP} &= 7,49 + \text{Pluie8} (-0,00252 \text{ DurJ} - 0,00001 \text{ Code} - 0,0057 \text{ Durjour} - 0,00051 \text{ Pluie8} + 0,116) + \text{Temp8} (0,00035 \text{ Biom} - 0,377) + 0,45 \text{ Etp2} \\
 &+ \text{Etp8} (0,0141 \text{ DurJ} - 0,00039 \text{ Biom} - 0,158 \text{ DurF} + 0,68) + \text{Code} (-0,00002 \text{ DurJ} - 0,0002) + \text{Etp} (0,33 \text{ Hpm} - 0,086 \text{ Etp}) \\
 &+ \text{Hpm2} (-0,235 \text{ Hpm2} + 0,48) + \text{Durjour} (0,0250 \text{ Durjour} - 0,72) - 0,00000074 \text{ SqBiom} - 0,0272 \text{ Rg8} - 0,045 \text{ OrdreC} - 0,048 \text{ Rg2} \\
 \text{PP} &= 14,92 + \text{Code} (0,00006 \text{ Pluie8} + 0,00026 \text{ Etp8} - 0,00021 \text{ Temp8}) + \text{Pluie8} (0,049 \text{ Etp} - 0,00444 \text{ Pluie8}) + \text{DurJ} (0,0281 \text{ DurJ} - 0,51) \\
 &+ \text{Durjour} (0,094 \text{ Temp8} - 0,117 \text{ Etp8} - 0,00071 \text{ Biom} + 0,0746 \text{ Durjour} - 2,42) + 0,8 \text{ Etp1} + 1,76 \text{ Etp8} - 0,166 \text{ Rg1} - 0,059 \text{ Rg8} \\
 &- 0,0369 \text{ SqTemp8} - 0,075 \text{ Pluie2} + 0,00916 \text{ Biom} - 0,097 \text{ OrdreC} - 0,31 \text{ SqHpm2} + 4,11 \text{ DurF} \\
 \text{H}_2\text{SiO}_4 &= 25,8 + \text{Etp8} (0,638 \text{ Hpm} + 0,00011 \text{ Code} - 0,0252 \text{ Temp8}) + \text{DurJ} (-0,00066 \text{ Code} + 0,056 \text{ Temp8} + 0,68) + \text{DurF} (-1,29 \text{ Durjour} - 1,2) \\
 &+ \text{Pluie8} (0,112 \text{ Etp} - 0,091) - 0,0162 \text{ SqDurjour} + 3,01 \text{ Etp2} - 0,12 \text{ Tmax} - 0,38 \text{ Rg2}
 \end{aligned}$$

$$\text{DIC} = 4,06 + \text{Etp8} (0,104 \text{ Hpm} - 0,0048 \text{ DurJ} + 0,117) + \text{Pluie8} (0,0129 \text{ Etp} + 0,0087 \text{ Hpm} - 0,00061 \text{ Pluie8}) - 0,0055 \text{ SqHpm2} - 0,0169 \text{ Pluie2} + \text{DurF} (-0,209 \text{ Durjour} - 0,00021 \text{ Biom}) - 0,00301 \text{ SqTemp8} + 0,00001 \text{ Durjour,Code} - 0,0243 \text{ Rg8}$$

$$\text{DOC} = 1,78 + \text{Temp8} (-0,00003 \text{ Code}) - 0,00064 \text{ Pluie8} + 0,082 \text{ DurF} + \text{Durjour} (0,00002 \text{ Code} + 0,0125 \text{ Hpm} - 0,146 \text{ DurF}) - 0,0109 \text{ Rg1} + \text{Pluie8} (0,0132 \text{ Hpm} - 0,00141 \text{ DurJ}) + \text{Biom} (0,0000059 \text{ Biom} - 0,00102) + 0,00002 \text{ Etp8.Code}$$

$$\text{Chla} = 0,327 + \text{Pluie8} (-0,0143 \text{ Temp8} + 0,212) + \text{Biom} (0,00022 \text{ Temp8} - 0,00019 \text{ DurJ}) + 0,00005 \text{ Code} + 5,4 \text{ DurF} - 0,68 \text{ SqHpm2} - 0,1 \text{ Pluie2}$$

$$\text{MES} = 3,58 + \text{Pluie8} (-0,099 \text{ Temp8} + 0,174 \text{ Etp} - 0,208 \text{ Durjour} + 0,144 \text{ Etp8} + 0,129 \text{ Hpm} + 2,75) + 40,9 \text{ DurF} - 2,51 \text{ SqHpm2} - 0,418 \text{ Rg8} + \text{Etp8} (-0,111 \text{ Durjour} + 0,00011 \text{ Code} + 2,65) + \text{Durjour} (-0,09 \text{ DurJ} - 1,81 \text{ DurF} + 0,087 \text{ Durjour}) + 2,9 \text{ Hpm1} - 0,37 \text{ Pluie2} + 0,51 \text{ Etp.DurJ} + 0,179 \text{ Tmin}$$

T L'intercycle:

$$\text{N-NH}_4^+ = 25,2 + \text{Pluie8} (-0,00058 \text{ Biom} + 0,0944 \text{ Durjour} - 0,0287 \text{ Etp8} - 0,0085 \text{ Pluie8}) + \text{Temp8} (-0,00183 \text{ Biom} - 0,297 \text{ Etp} + 0,082 \text{ Temp8}) + \text{Durjour} (0,322 \text{ Etp} - 2,45) + 1,25 \text{ Etp8} + 0,0000129 \text{ SqBiom} + 0,077 \text{ OrdreIC} - 0,128 \text{ Pluie1} - 0,0059 \text{ SqPluie}$$

$$\text{N-NO}_3^- = -2,88 + \text{Temp8} (-0,284 \text{ Durjour} - 0,00093 \text{ Biom} - 0,0139 \text{ Pluie8} + 0,0931 \text{ Temp8} + 2,74) + \text{Etp8} (0,227 \text{ Durjour} - 0,044 \text{ Etp8} - 1,73) + \text{Pluie8} (-0,00034 \text{ Biom} + 0,0512 \text{ Durjour} - 0,059 \text{ Etp}) + 0,087 \text{ OrdreIC} + 0,0000071 \text{ SqBiom} - 0,098 \text{ Rg2} + 0,144 \text{ Tmoy} + 0,196 \text{ Rg}$$

$$\text{DON} = 2,29 + \text{Biom} (0,00198 \text{ Temp8} - 0,0009 \text{ Etp8} + 0,00042 \text{ Pluie8} - 0,00371 \text{ Etp} - 0,0000088 \text{ Biom}) + \text{Temp8} (0,104 \text{ Etp} - 1,92) + 0,048 \text{ Rg8} + \text{Pluie8} (-0,0537 \text{ Durjour} + 0,0149 \text{ Etp8} + 0,042 \text{ Etp}) + 0,073 \text{ OrdreIC} + 1,61 \text{ Durjour} + 0,82 \text{ SqEtp} - 0,71 \text{ Etp1} + 0,045 \text{ DTemp}$$

$$\text{PN} = -67,8 + \text{Durjour} (0,112 \text{ Pluie8} - 0,00084 \text{ Biom} + 0,034 \text{ Temp8} + 0,29 \text{ Etp} + 0,61 \text{ Etp8} - 0,81 \text{ Durjour} + 15) + \text{Pluie} (-0,33 \text{ Etp} - 0,0145 \text{ Pluie}) + \text{Pluie8} (-0,07 \text{ Etp8} + 0,0096 \text{ Temp8} - 0,0055 \text{ Pluie8} - 0,85) + \text{Etp8} (0,192 \text{ Temp8} - 0,239 \text{ Etp8} - 5,1) + 0,16 \text{ Rg2} - 0,033 \text{ OrdreIC} + \text{Temp8} (-0,26 \text{ Etp} - 0,077 \text{ Temp8}) + \text{Biom} (0,00044 \text{ Pluie} - 0,0000036 \text{ Biom} + 0,0183) + 0,119 \text{ Pluie1} - 0,095 \text{ Rg8} - 1,47 \text{ Etp2}$$

$$\text{P-PO}_4^{3-} = -3,23 + \text{Durjour} (0,00021 \text{ Biom} + 0,0061 \text{ Temp8} - 0,0585 \text{ Durjour} + 0,94) + \text{Etp8} (0,0038 \text{ Temp8} - 0,161) + 0,026 \text{ Tmax} + 0,0238 \text{ Rg8} + 0,00021 \text{ SqPluie8} - 0,00000128 \text{ SqBiom} + 0,0075 \text{ OrdreIC}$$

$$\text{DOP} = 0,548 + \text{Temp8} (0,026 \text{ Durjour} + 0,00039 \text{ Biom} - 0,0361 \text{ Etp8} + 0,01 \text{ Pluie} + 0,0087 \text{ Temp8} - 0,7) + \text{Pluie8} (0,0094 \text{ Etp} - 0,00052 \text{ Pluie8}) + \text{Durjour} (0,066 \text{ Etp8} - 0,0067 \text{ Pluie} - 0,064 \text{ Durjour} + 0,98) + \text{Biom} (-0,0001 \text{ Etp8} + 0,00033 \text{ Etp} - 0,00000201 \text{ Biom}) + \text{Pluie} (0,0079 \text{ Etp8} - 0,097 \text{ Etp} + 0,003 \text{ Pluie}) - 0,0253 \text{ Rg8} - 0,27 \text{ Etp8} - 0,847 \text{ Etp} + 0,054 \text{ Rg} + 0,023 \text{ Tmoy}$$

$$\text{PP} = -10,3 + \text{Pluie8} (0,0316 \text{ Durjour} - 0,00005 \text{ Biom} - 0,0145 \text{ Etp8} - 0,043 \text{ Etp} - 0,0058 \text{ Temp8} - 0,00301 \text{ Pluie8}) + 0,266 \text{ Etp} + 0,02 \text{ OrdreIC} + \text{Durjour} (-0,127 \text{ Durjour} + 2,4) + \text{Temp8} (-0,00015 \text{ Biom} + 0,0405 \text{ Durjour} - 0,0232 \text{ Etp8} - 0,0234 \text{ Temp8}) + 0,044 \text{ Pluie1} + \text{Pluie} (-0,114 \text{ Etp} - 0,0086 \text{ Pluie} + 0,28) + \text{Biom} (-0,00015 \text{ Etp8} + 0,00000164 \text{ Biom}) - 0,06 \text{ DTemp} - 0,055 \text{ Rg2}$$

$$\text{H}_2\text{SiO}_4 = 19,7 + \text{Etp8} (-0,00043 \text{ Biom} + 0,0225 \text{ Pluie8} - 0,0241 \text{ Etp8} + 1,35) + \text{Durjour} (-0,0262 \text{ Temp8} - 0,3 \text{ Etp} - 0,0214 \text{ Pluie8}) - 0,129 \text{ Pluie} + 0,101 \text{ OrdreIC} + 0,00000192 \text{ SqBiom} + 2,03 \text{ SqEtp} - 0,158 \text{ Pluie1} - 0,078 \text{ Rg8} + 0,0109 \text{ Temp8.Plue8}$$

$$\text{DIC} = 4,32 + \text{Durjour} (-0,0001 \text{ Biom} + 0,00543 \text{ Pluie8} + 0,0087 \text{ Etp8} - 0,13) + \text{Pluie8} (-0,0049 \text{ Etp} - 0,00056 \text{ Pluie8} - 0,0473) - 0,0171 \text{ Tmax} + \text{Temp8} (0,00004 \text{ Biom} - 0,013 \text{ Etp} - 0,0089 \text{ Etp8}) + 0,0199 \text{ OrdreIC} - 0,0206 \text{ Pluie} + 0,0009 \text{ Biom} + 0,0121 \text{ Rg8}$$

$$\text{DOC} = -0,085 + \text{Temp8} (-0,0066 \text{ Etp8} + 0,00006 \text{ Biom} + 0,0409 \text{ Durjour} - 0,00215 \text{ Pluie8} - 0,0074 \text{ Etp} - 0,00698 \text{ Temp8} - 0,39) + 0,0028 \text{ Rg8} + \text{Biom} (-0,00008 \text{ Etp8} + 0,00002 \text{ Pluie8} + 0,00000011 \text{ Biom} - 0,00022) + \text{Durjour} (-0,0446 \text{ Durjour} + 0,539) + 0,22 \text{ Etp8} + 0,0046 \text{ Etp.Plue} + 0,0065 \text{ OrdreIC} + 0,0192 \text{ Rg}$$

$$\text{Chla} = -15,9 + \text{Durjour} (-0,00092 \text{ Biom} + 0,34 \text{ Etp} + 0,167 \text{ Temp8} - 0,179 \text{ Durjour} + 3,96) + \text{Biom} (0,00048 \text{ Pluie} + 0,00029 \text{ Temp8} + 0,0094) + \text{Pluie} (-0,0176 \text{ Pluie} - 0,394 \text{ Etp}) + \text{Temp8} (-0,044 \text{ Temp8} - 1,41) - 0,184 \text{ DTemp} + 0,13 \text{ Pluie1} - 0,122 \text{ Rg8} + 0,1 \text{ Rg1} + 0,47 \text{ Etp8} - 0,42 \text{ Etp2} - 4,3 \text{ Etp}$$

$$\text{MES} = -3,62 + \text{Biom} (-0,00048 \text{ Pluie8} - 0,00138 \text{ Etp8} + 0,0018 \text{ Etp} + 0,0000098 \text{ Biom} - 0,008) + \text{Pluie8} (-0,027 \text{ Temp8} + 0,037 \text{ Durjour} + 0,53) + \text{Pluie} (-1,36 \text{ Etp} + 0,055 \text{ Etp8} - 0,058 \text{ Pluie} + 1,73) + \text{Durjour} (-0,17 \text{ Durjour} + 3,8) + \text{Temp8} (0,115 \text{ Etp8} - 0,036 \text{ Temp8}) + 0,272 \text{ Pluie1} + 1,02 \text{ SqEtp} - 0,42 \text{ Rg} - 0,28 \text{ Rg2} + 0,22 \text{ Rg1} - 0,157 \text{ DTemp} - 0,068 \text{ OrdreIC}$$

Rappelons-le, le but de ces équations n'est pas de modéliser les dynamiques des nutriments, mais simplement d'en transcrire au mieux les variations temporelles. Aussi, ces différentes relations sont plus ou moins bien ajustées à la réalité, mais restent dans l'ensemble suffisamment pertinentes pour être utilisées avec la méthodologie retenue, comme l'illustre le tableau suivant.

		N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	DON	PN	P-PO ₄ ²⁻	DOP	PP	H ₂ SiO ₄	DIC	DOC	Chla	MES
Flot	r ²	67,4	43,7	49,9	43,0	40,3	30,1	52,6	47,2	51,8	45,1	48,8	51,7
	s	2,20	2,00	2,39	4,07	0,338	0,509	1,74	2,78	0,370	0,228	2,92	13,0
Jusant	r ²	65,7	44,2	50,4	45,5	48,7	34,5	48,6	61,3	63,0	43,0	41,3	52,1
	s	2,08	1,89	2,29	2,59	0,300	0,573	1,39	2,44	0,353	0,218	2,07	6,23
Intercycles	r ²	44,6	65,0	34,6	23,3	55,6	32,3	38,0	41,6	47,0	55,1	30,8	30,2
	s	3,01	1,88	2,91	3,29	0,327	0,530	1,27	2,31	0,31	0,198	2,49	5,43

Tableau 8.2 - Statistiques des modèles de régression

CHAPITRE 9 - L'ÉVOLUTION DES DYNAMIQUES

9.1 - Les termes généraux des budgets

Le tableau 9.1 résume, pour chaque saison entre 1991 et 1994, quels ont été les échanges du marais avec le système côtier, de manière générale, puis détaillée en différenciant les marées des intercycles. Tous les résultats sont exprimés en kg, exceptés le DIC, le DOC et les MES qui sont en tonnes.

D'après l'ensemble de ces résultats, il ressort très nettement que le système étudié est importateur de matériel particulaire et exportateur de dissous. Cependant, quelques nuances méritent d'être apportées. En effet, nous constatons que pour la majorité des éléments, le caractère exporté ou importé tend à diminuer au cours des années, voire même à s'inverser dans les cas des matières en suspension (bilan 1994 négatif). Deux propositions générales peuvent être faites: soit le fonctionnement du marais présente un caractère cyclique, et ce n'est qu'au bout de plusieurs années d'étude que nous pourrions réellement le décrire. Dans ce cas, notre période d'étude est trop courte pour conclure à des tendances réellement prononcées. Soit, et ceci semble à priori le plus probable, le marais subit une terrestrialisation, et, comme les prélèvements sont toujours réalisés à une même position géographique, nous ne faisons que démontrer que le marais vieillit et présente des processus d'échanges dont les tendances générales se modifient (Troccaz et Giraud, 1996). Ceci a particulièrement bien été démontré par Dame et Gardner (1993) avec le suivi des échanges d'un même marais, à des positions géographiques différentes. Il est ressorti de cette étude qu'en fonction du stade de développement du marais, autrement dit immature à mûre, celui-ci passe d'un état-système piège à source de nutriments. Il semble que ce soit cette transition que nous avons observé durant la période d'étude.

Afin d'argumenter l'une ou l'autre des hypothèses, nous allons donc approfondir l'évolution générale de ces tendances. En effet, dans la perspective de statuer sur l'un des processus, voire de dévoiler des tendances synergiques, la suite de l'étude consiste en une inter-comparaison des dynamiques observées pour les quatre années.

L'évolution des dynamiques

GENERAL		N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	DON	PN	P-PO ₄ ²⁻	DOP	PP	H ₂ SiO ₄	DIC	DOC	Chla	MES
91	Hiver	-44	-131	15	-11	-8,8	-14	-63	-951	-7,7	-1,2	5	236
	Printemps	-29	-17	-15	38	-2,6	-4,3	11	-183	-2,5	-0,3	4	-2,8
	Eté	-224	-20	-35	75	-25	-23	39	-1229	-4,2	-3,1	8	495
	Automne	-139	-29	-78	376	-9,4	-25	93	-596	-6,2	-1,9	4	421
	Total	-435	-197	-113	477	-46	-66	80	-2959	-21	-6,5	21	1149
92	Hiver	-53	-86	-47	2	-8,8	-3,3	14	-762	-6,1	-1,1	3	157
	Printemps	-28	-7	-33	35	-2,2	-2,2	7	-176	-2,2	-0,3	2	-11
	Eté	-153	-18	4	320	-20	-28	55	-1296	-2,2	-2,4	5	396
	Automne	-93	-40	-45	188	-8,1	-13	128	-529	-5,2	-1,6	6	152
	Total	-327	-151	-121	545	-39	-47	204	-2762	-16	-5,4	16	694
93	Hiver	-45	-48	-75	87	-9,7	-8,1	109	-537	-6,5	-1,3	4	179
	Printemps	-14	-12	-38	133	-2,4	-4,5	27	-247	-2,2	-0,6	4	-1
	Eté	-164	-9	-42	328	-13	-7,5	132	-564	-0,9	-2,3	10	166
	Automne	-91	-12	-48	244	-8,5	-16	105	-516	-1,0	-1,9	6	158
	Total	-314	-80	-203	791	-34	-36	373	-1864	-14	-6,1	25	502
94	Hiver	-27	-3	-61	127	-4,2	-9,8	65	-469	-5,0	-0,9	5	89
	Printemps	-59	-36	-43	224	-5,2	-6,6	62	-457	-4,1	-1,3	8	-23
	Eté	-40	-36	-37	57	-6,0	-6,4	11	-282	-0,7	-1,4	7	-62
	Automne	-40	-57	-57	7	-6,2	-11	8	-266	-4,4	-1,1	2	-55
	Total	-166	-132	-198	415	-22	-34	146	-1573	-14	-4,8	21	-50
TOTAL		-1243	-560	-635	2227	-140	-183	804	-9158	-64	-22,8	83	2295

MAREES		N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	DON	PN	P-PO ₄ ²⁻	DOP	PP	H ₂ SiO ₄	DIC	DOC	Chla	MES
91	Hiver	-19	-126	42	8	-7	-12	-57	-736	-4,8	-0,8	6	241
	Printemps	-4	-9	1	55	-1	-3	19	-49	-0,7	-0,1	5	1
	Eté	-192	-3	-16	94	-23	-22	54	-1071	-2,5	-2,7	9	501
	Automne	-64	-3	-49	408	-6	-23	107	-240	-1,4	-1,2	5	433
	Total	-279	-140	-22	564	-37	-60	124	-2096	-9,4	-4,7	24	1177
92	Hiver	-6	-79	-4	25	-6	-1	21	-445	-1,9	-0,5	3	165
	Printemps	-3	1	-18	47	-1	-1	18	-55	-0,5	-0,1	3	-8
	Eté	-124	-1	23	336	-18	-27	70	-1145	-0,7	-2,1	6	400
	Automne	-36	-12	-22	217	-5	-11	140	-200	-1,0	-1,0	7	164
	Total	-169	-87	-20	625	-29	-40	249	-1845	-4,0	-3,7	19	722
93	Hiver	-8	-38	-38	105	-7	-5	114	-257	-2,9	-0,8	5	185
	Printemps	4	-5	-16	148	-1	-3	34	-112	-0,5	-0,4	5	4
	Eté	-117	15	-29	344	-12	-7	143	-405	0,9	-1,8	11	173
	Automne	-28	10	-25	270	-6	-15	117	-214	-0,4	-1,3	7	168
	Total	-151	-19	-107	867	-26	-31	409	-988	-2,7	-4,3	28	530
94	Hiver	15	9	-40	154	-1	-8	77	-220	-1,6	-0,4	6	98
	Printemps	-24	-24	-33	244	-4	-6	72	-296	-2,2	-1,0	8	-18
	Eté	-16	-20	-20	74	-4	-5	30	-156	-0,7	-1,1	7	-58
	Automne	-8	-27	-36	24	-3	-9	13	-130	-1,2	-0,8	3	-48
	Total	-32	-62	-129	496	-12	-28	193	-801	-4,2	-3,3	24	-25
TOTAL		-630	-308	-278	2551	-103	-158	975	-5730	-20	-16	95	2403

INTERCYCLES		N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	DON	PN	P-PO ₄ ²⁻	DOP	PP	H ₂ SiO ₄	DIC	DOC	Chla	MES
91	Hiver	-25	-5	-28	-19	-2	-2	-7	-215	-2,9	-0,4	-1	-6
	Printemps	-25	-8	-16	-17	-1	-1	-8	-134	-1,8	-0,3	-1	-4
	Eté	-32	-17	-19	-19	-2	-1	-15	-158	-1,8	-0,5	-1	-6
	Automne	-75	-26	-30	-33	-4	-2	-14	-357	-4,7	-0,7	-1	-1
	Total	-156	-57	-92	-87	-9	-6	-45	-863	-11	-1,8	-4	-17
92	Hiver	-47	-10	-43	-22	-3	-3	-8	-317	-4,2	-0,5	-1	-8
	Printemps	-25	-8	-15	-12	-1	-1	-11	-121	-1,7	-0,2	0	-3
	Eté	-29	-18	-19	-16	-2	-1	-15	-151	-1,5	-0,4	-1	-5
	Automne	-57	-29	-23	-30	-4	-2	-11	-328	-4,2	-0,6	-1	-1
	Total	-158	-64	-100	-80	-10	-7	-45	-917	-12	-1,8	-3	-17
93	Hiver	-37	-10	-38	-18	-3	-3	-5	-280	-3,6	-0,5	-1	-6
	Printemps	-18	-7	-22	-16	-1	-1	-7	-135	-1,8	-0,2	-1	-5
	Eté	-47	-24	-14	-16	-2	-1	-11	-159	-1,9	-0,5	-1	-7
	Automne	-63	-21	-23	-26	-3	-1	-12	-302	-3,7	-0,7	-1	-1
	Total	-164	-61	-96	-76	-9	-6	-35	-876	-11	-1,9	-4	-19
94	Hiver	-42	-12	-21	-28	-3	-2	-12	-249	-3,4	-0,5	-1	-9
	Printemps	-36	-13	-10	-20	-1	-1	-11	-160	-2,0	-0,4	-1	-6
	Eté	-25	-16	-17	-16	-3	-1	-19	-126	-1,4	-0,3	-1	-3
	Automne	-32	-29	-20	-17	-3	-2	-5	-236	-3,2	-0,3	-1	-7
	Total	-134	-70	-69	-80	-10	-6	-46	-771	-9,9	-1,5	-4	-25
TOTAL		-613	-252	-356	-324	-38	-25	-171	-3428	-44	-6,9	-15	-78

Tableau 9 - Bilan saisonnier des échanges

9.2 - Etude de la variabilité saisonnière

Une des premières approches envisageable pour tester l'évolution des dynamiques observées est d'étudier leurs variabilités intra- et inter-annuelles à la période d'étude. Pour cela, nous avons réalisé des comparaisons saisonnières des budgets obtenus au cours des quatre années, selon leurs contributions relatives exprimées en pourcentage du budget final estimé.

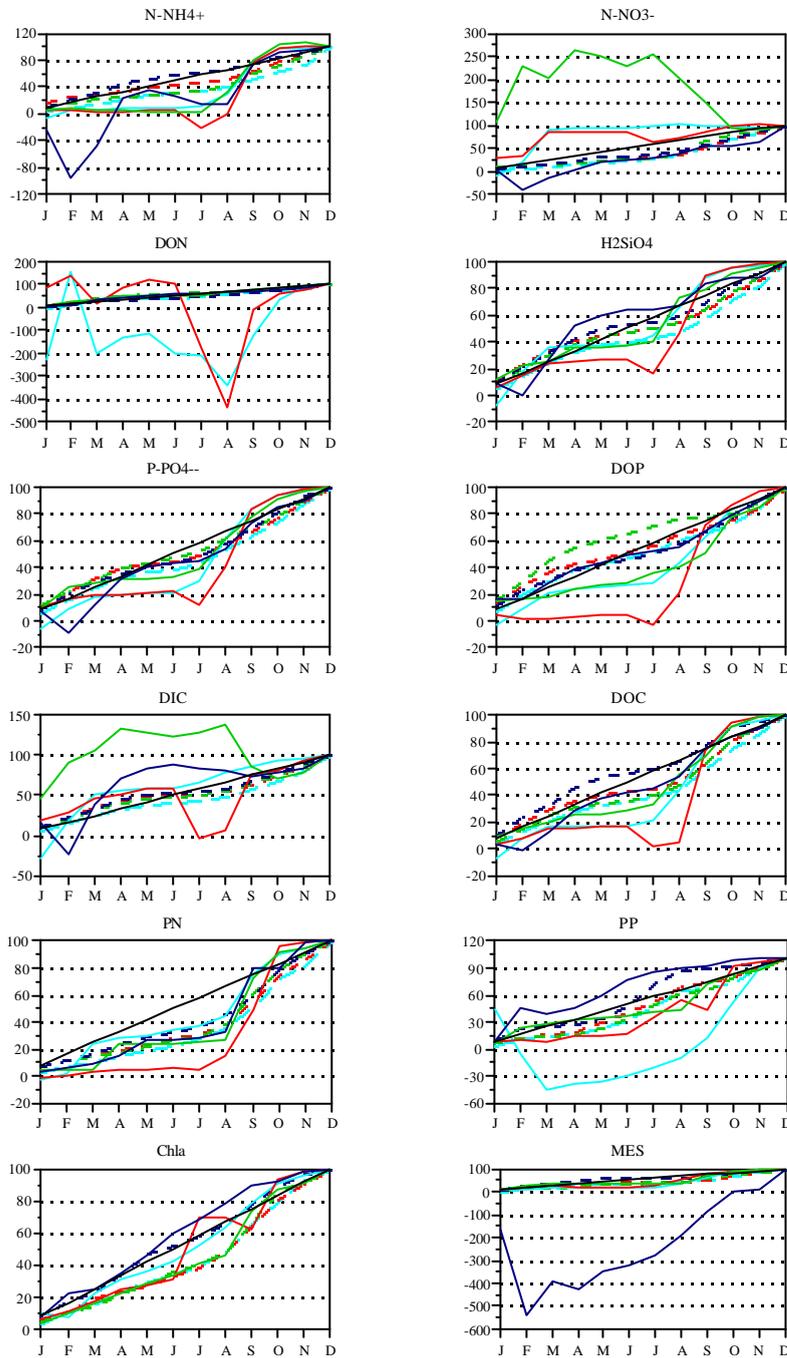


Figure 9.1 - Influence des saisons sur les budgets (---, intercycles; —, marées)
(—, 1991; —, 1992; —, 1993; —, 1994)

Pour chacun des graphes, la première bissectrice est représentée par une ligne diagonale continue noire. Celle-ci doit être entendue comme un repère de l'évolution des budgets cumulés. En effet, dans l'alternative où les saisons n'auraient aucune influence, toutes les courbes mentionnées devraient être confondues avec cette droite. Comme nous pouvons le constater, il n'en est rien, certains nutriments présentant d'ailleurs des écarts parfois très importants. Ainsi, il ressort que ce sont les marées qui s'écartent le plus de cette courbe d'évolution linéaire théorique. Très schématiquement, les intercycles présentent en fait trois types de réponse caractéristiques:

T des sigmoïdes positives (N-NH_4^+ , DON, H_2SiO_4 , P-PO_4^{2-} , DOP, DIC, DOC, MES), lesquelles traduisent des termes de budgets plus importants en début et fin d'année, ceux de la période intermédiaires progressant faiblement (pente quasiment nulle),

T des sigmoïdes négatives (PP, Chla), dont les tendances sont inverses des précédentes, à savoir, des échanges marqués essentiellement en milieu d'année (pente > 1),

T des courbes concaves (N-NO_3^- , PN), témoignant de budgets plus importants uniquement en fin d'année.

Naturellement, ces tendances demeurent très générales, et nous pouvons constater que plusieurs allures de courbe peuvent être rencontrées pour un même nutriment pour des années différentes, ceci révélant donc une évolution certaine des budgets. Par ailleurs, il apparaît que, pour la plupart des nutriments, l'ordre de succession vertical des courbes de budgets annuels reste le même, à savoir: 1994, 1992, 1993 puis 1991. Cette chronologie typique a déjà été observée pour les hauteurs modales des marées dans l'étude des statistiques, ces deux caractéristiques étant en fait très liées. En effet, la hauteur modale représente l'amplitude de marée ayant la plus forte tendance, et, par ordre croissant d'importance, nous avons obtenu la série mentionnée ci-dessus. Ceci signifie que globalement sur l'année 1994, le chenal de marée a été sensiblement moins perturbé qu'en 1992 (idem entre 1992 et 1993, ...), d'où des effets plus amplifiés des périodes de ressuyage en 1994 qu'en 1992 (en 1992 qu'en 1993, ...).

Même si les marées présentent des évolutions annuelles nettement plus marquées que celles des intercycles, il apparaît que, souvent, leurs allures générales restent similaires. Bien qu'il soit délicat de dégager des tendances des évolutions observées, il semble que certaines années se distinguent nettement, tout du moins pour certains nutriments. Ainsi, 1991 et 1992 apparaissent régulièrement très proches, leurs budgets se caractérisant par une contribution très faibles, voire nulle, des termes mensuels entre mars et juillet, puis augmentant considérablement. Aussi, l'importance des budgets entre janvier et mars influe directement sur l'évolution du reste de l'année, ceci étant à l'origine des différences observées pour l'évolution générale de certains nutriments. En effet, alors que les nitrates présentent une courbe convexe, tous les autres éléments se caractérisent par une progression concave. Bien que l'année 1993 offre certaines similitudes avec les années précédentes, les variations apparaissent cependant souvent moins marquées, exception faite des nitrates et du carbone minéral lesquels révèlent des budgets très importants au cours des trois premiers mois de l'année. A l'inverse, le mois de février pour l'année 1994 révèle une influence négative par rapport aux autres mois, ceci se traduisant par un décrochement plus ou moins important de la courbe, particulièrement net pour les MES.

Ainsi, dans la mesure où les courbes présentées apparaissent souvent comparables entre nutriments d'une même année, il ressort qu'effectivement les saisons ont une influence générale sur les budgets, celle-ci restant cependant très spécifique à chacune des années étudiées. Aussi, dans la partie suivante, nous allons étudier la variabilité des budgets au travers de celle des hauteurs d'eau des marées de chaque année.

9.3 - Etude de l'influence annuelle des marées

Afin d'apporter d'éventuels compléments aux tendances précédemment observées, les graphes suivants ont été établis selon les mêmes bases. En effet, ils représentent les évolutions des budgets cumulés calculés pour chacun des nutriments d'après les classes de hauteurs de marées pour lesquelles ils ont été obtenus.

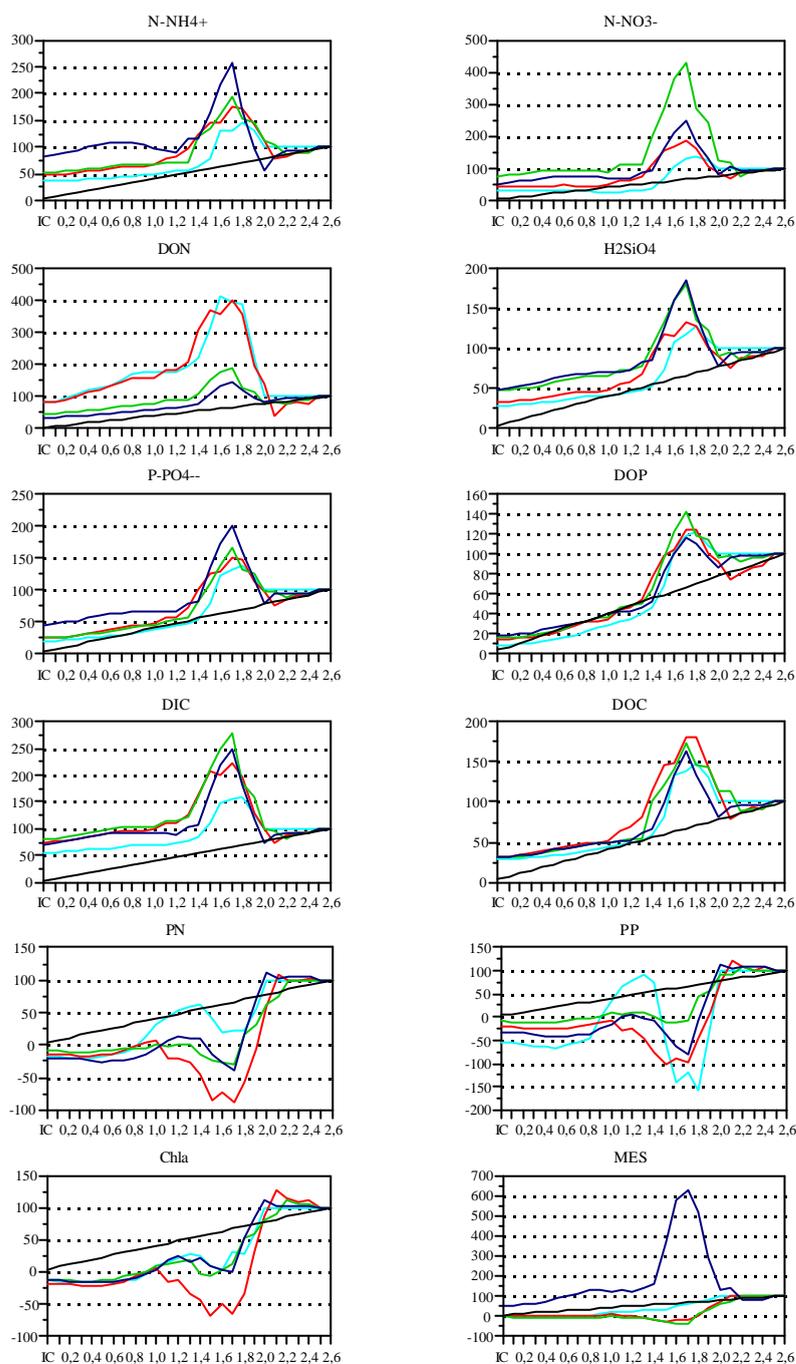


Figure 9.2 - Influence des marées sur les budgets
 (—, 1991; —, 1992; —, 1993; —, 1994)

Comme pour la figure 9.1, la première bissectrice est représentée par une ligne diagonale continue noire. Il s'avère inutile de préciser que l'évolution des contributions s'en écarte fortement, tout du moins pour certaines classes de hauteurs de marées. Effectivement, nous pouvons constater que simplement le premier point représenté entraîne un décalage plus ou moins important de la courbe. Celui-ci correspondant aux contributions des intercycles, ceci signifie que ces processus peuvent représenter jusqu'à plus de 70% du budget final (cas de N-NH₄⁺). Ensuite, les contributions progressent plus ou moins linéairement jusqu'à des amplitudes de marée de l'ordre de 1,30 m. Pour la plupart des nutriments, cette progression se caractérise par une pente inférieure à 1, ce qui témoigne de la faible influence de ces marées sur les budgets. Considérant l'amplitude seuil qui limite l'impact de ces échanges, il s'avère que ces marées correspondent en fait à celles qui restent localisées dans le chenal. Lorsque l'herbu est inondé, les budgets présentent des contributions nettement plus prononcées, mais, là encore, nous pouvons remarquer l'existence d'une amplitude caractéristique aux environs de 1,70 m. En effet, en-deçà de cette valeur, quels que soient l'année et le nutriment considérés, les échanges présentent une très forte influence, laquelle peut se traduire par un cumul des budgets atteignant jusqu'à 400% du total obtenu. A l'inverse, entre 1,70 et 2,00 m environ, les courbes présentent une tendance opposée qui les ramène approximativement au niveau de la première bissectrice. Ainsi, au-delà de 2,00m, la progression apparaît souvent avec une pente nulle, ce qui traduit une absence totale d'influence de ces marées.

9.4 - Approche synthétique de l'influence des saisons et des marées sur les budgets

Afin de résumer les impacts des influences précédemment décrites, la figure suivante reprend les contributions élémentaires du matériel particulaire et du dissous, d'après les moyennes des termes obtenus pour les nutriments dépendants de chacun de ces groupes.

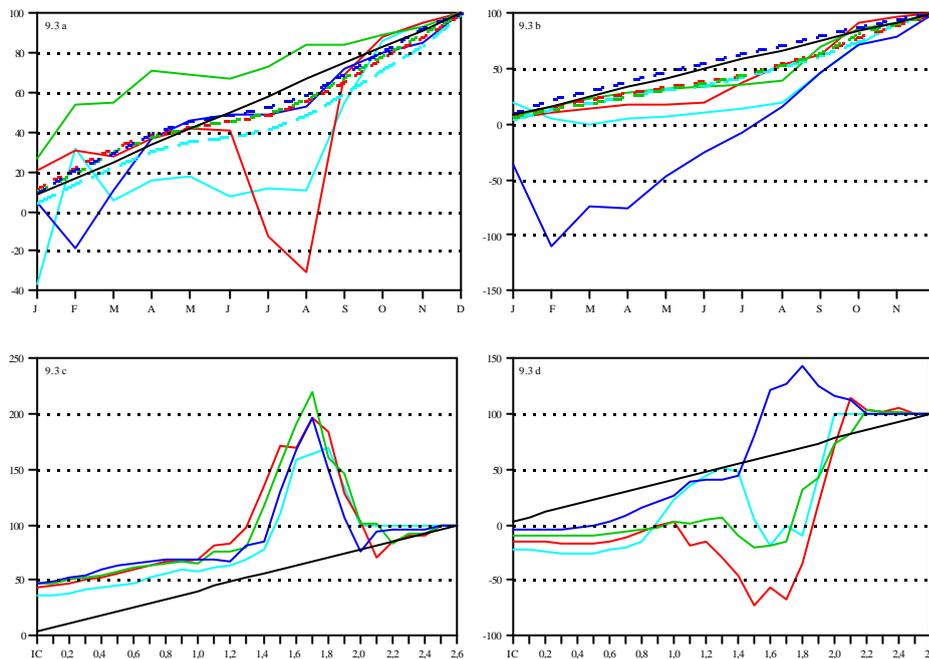


Figure 9.3 - Influence générale des saisons (9.3 a et 9.3 b) et des marées (9.3c et 9.3 d) sur les budgets du matériel dissous (9.3 a et 9.3 c) et particulaire (9.3 b et 9.3 d) (- - -, intercycles; —, marées; —, 1991; —, 1992; —, 1993; —, 1994)

Sans pour autant répéter les observations précédemment décrites, certaines caractéristiques principales méritent d'être de nouveau énoncées à la vue de ces graphes et comme support de conclusion à cette étude.

Alors que les intercycles présentent des réactions sigmoïdales positives pour les éléments liés au dissous, les réponses sont de type convexe (1994) ou concave (1991 à 1993) pour ceux du particulaire. Les marées se caractérisent par des courbes aux allures beaucoup plus aléatoires, essentiellement liées à des phénomènes ponctuels. Ainsi, pour les éléments dissous, les deux premiers mois de l'année influencent plus ou moins fortement les budgets annuels. En effet, nous constatons que janvier est fortement déficitaire pour 1991, de même que février pour 1994, alors qu'il est excédentaire pour 1992 et 1993. Par la suite, 1993 et 1994 révèlent une progression relativement constante des budgets (en se référant à la première bissectrice), alors que ceux de 1991 apparaissent nuls jusqu'au mois d'août, et ceux de 1992 fortement déficitaires durant l'été.

Pour 1991 et 1992, le mois d'août témoigne d'une très forte progression des budgets, laquelle n'apparaît absolument pas pour les deux autres années. Pour le matériel particulaire, les tendances sont beaucoup plus régulières, excepté 1994 qui se distingue à nouveau par un important déficit des échanges en février.

Lorsque nous étudions l'influence des classes d'amplitude de marées sur les budgets du matériel dissous, nous constatons que, quelle que soit l'année considérée, les intercycles présentent sensiblement la même contribution (environ 50% du budget global). De manière similaire, pour le reste de l'année, aucune différence réelle n'apparaît dans l'évolution des courbes annuelles. Toutes présentent la même succession:

- T en-deçà de 1,30 m, progression linéaire et constante des budgets (pente < 1),
- T entre 1,30 et 1,70 m, augmentation linéaire considérable des budgets (pente $\gg 1$),
- T entre 1,70 et 2,00 m, chute brutale (pente $\ll -1$) et obtention des budgets finaux,
- T au-delà de 2,00 m, influence quasiment nulle des budgets (pente ≈ 0).

Pour les nutriments liés au matériel particulaire, dans la mesure où les intercycles sont exportateurs, ils entraînent une inversion symétrique des courbes de ces éléments comparativement aux précédents. D'autre part, nous constatons que les contributions de ces processus de ressuyage tendent à décroître entre 1991 et 1994. Par analogie au matériel dissous, nous observons que la succession des amplitudes de marées influence les budgets de manière similaire, ceci apparaissant naturellement inversé du fait du caractère exportateur des années 1991 à 1993. En effet, entre 1,30 et 1,70 m, les échanges estimés tendent nettement à diminuer les imports, alors que, entre 1,70 et 2,00 m, les imports augmentent considérablement puisqu'ils atteignent leur valeur finale. Par contre, l'année 1994 révèle une courbe d'allure similaire à celle du matériel dissous (augmentation puis chute des contributions). Enfin, au delà de 2,00 m, quelle que soit l'année, les marées présentent une influence très limitée.

Nous retiendrons donc:

- T la tendance limitée de la saisonnalité pour les budgets des intercycles,
- T l'influence du début de l'année sur les échanges des marées,
- T l'importance de la période fin d'été - début d'automne sur les transferts liés aux marées,
- T la forte contribution des intercycles au budget final,
- T le rôle exportateur des marées dont l'amplitude est comprise entre 1,30 et 1,70m, et importateur de celles entre 1,70 et 2,00 m.

La figure suivante révèle quels ont pu être les impacts saisonniers potentiels des marées sur les budgets que nous venons de décrire. Ainsi, il apparaît qu'au cours de la période d'étude, la

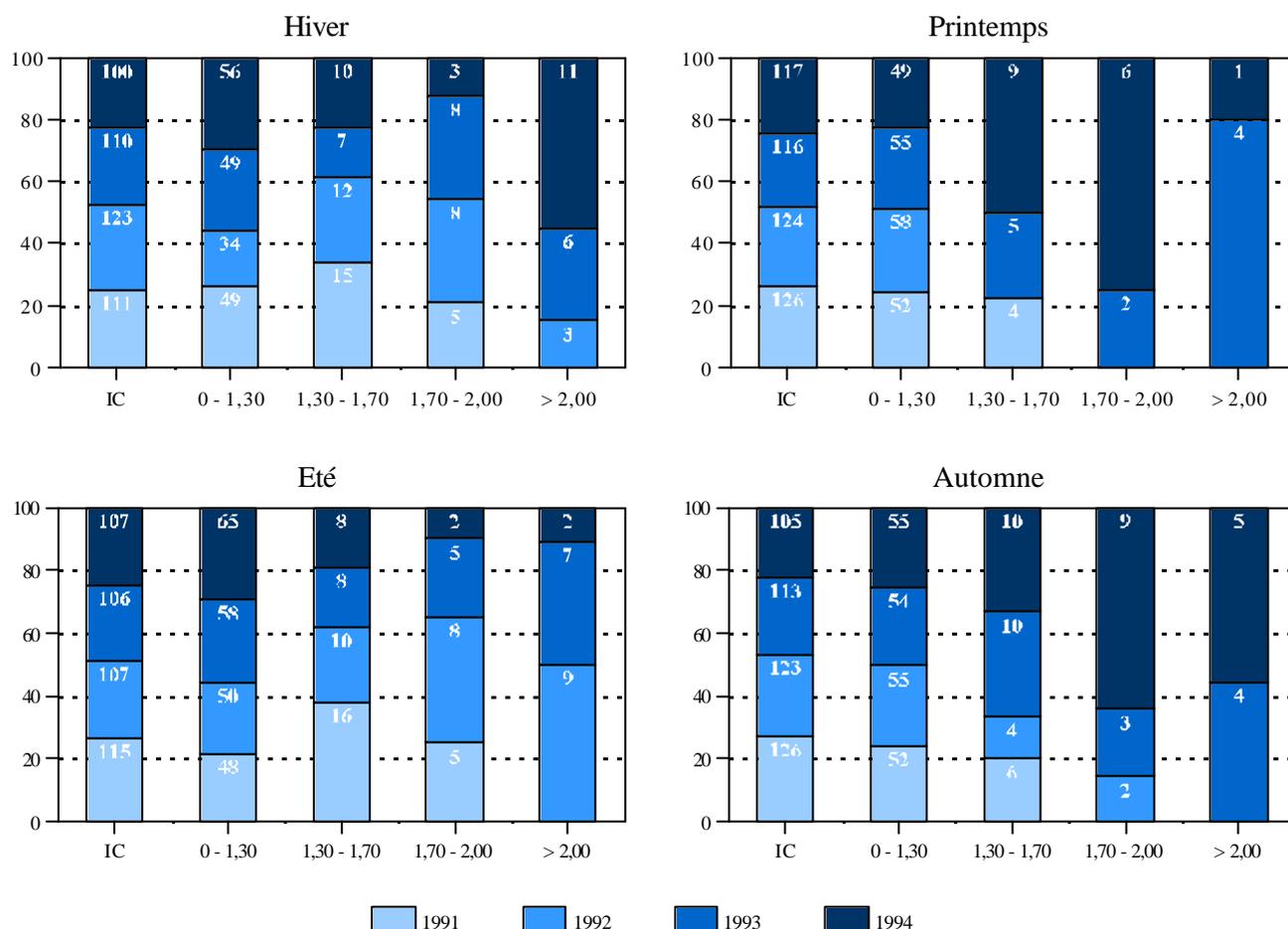


Figure 9.4 - Comparaison saisonnière inter-annuelle des principales classes d'amplitude de marées

proportion des marées d'amplitudes supérieures à 2,00 m n'a cessé d'augmenter durant l'hiver. Bien que nous n'ayons observé aucune influence significative de celles-ci avec les figures 9.3c et 9.3d (ceci pouvant être attribué au faible nombre de marées de cette classe comparativement au total), elles sont assurément partiellement responsables des fortes variations hivernales révélées ci-avant pour le matériel dissous. L'inversion de tendance apparue (exports croissants entre 1992 et 1993, puis imports en 1994) peut s'expliquer par le fait que les proportions de ces marées ont triplé en l'espace d'un an (1994 par rapport à 1993), ce qui a entraîné une perturbation très forte du système, lequel a alors réagi négativement. En effet, à cette saison, comme nous l'avons déjà évoqué au cours de l'étude du fait des activités biologiques ralenties, le fonctionnement du marais est essentiellement gouverné par des processus d'ordre physique. Par ailleurs, le système s'en trouve globalement beaucoup plus sensibilisé, par le fait même de l'absence de rôle tampon que joue le matériel biologique le reste de l'année, notamment durant l'automne où la proportion de marées de cette classe est équivalente. Aussi, nous pouvons imaginer l'existence d'un seuil limite de tolérance quant aux impacts de ces marées en cette saison. En-deçà du seuil, le système réagit normalement et les exports de matériel restent toujours supérieurs aux imports. Au-delà, le marais ne peut dominer ces perturbations, lesquelles entraînent alors une déstructuration plus ou moins importante du système, qui se traduit alors par une nette prédominance des imports par rapport aux exports. L'évolution des budgets en 1994 observée en figure 9.3b conforte cette hypothèse. Effectivement, les exports importants de matériel particulière implique l'idée d'une modification profonde de l'état du marais, laquelle doit être entrevue au travers une déstructuration mécanique réelle des éléments constitutifs du système (végétation, sédiment,...). Ainsi,

ce dernier évolue vers un état tel qu'il ne présente plus qu'une ébauche de base structurelle, laquelle n'offre alors plus de propriétés concrètes en termes d'échanges, laissant libre cours aux imports. Ces systèmes présentant cependant d'effectives capacités d'adaptation, la fin de la saison s'accompagne d'une reprise accrue des activités biologiques, celle-ci ne laissant quasiment rien entrevoir des perturbations passées.

Parallèlement à ce schéma, nous devons également considérer que, sous des conditions équivalentes de productivité de l'estran, même si elles s'avèrent limitées, plus le nombre de fortes marées sera important, plus la vasière sera régulièrement nettoyée de ses productions et plus la recolonisation sera sollicitée, et donc, plus les imports seront importants.

Naturellement, les contributions observées en début d'année influent directement sur l'allure générale des courbes des graphes 9.3a et 9.3b, plus précisément sur leurs positions respectives comparativement à l'axe des ordonnées. Aussi, pour les saisons suivantes, il est important de ne pas les comparer par rapport à cette position, mais d'après leurs variations de pente. Ainsi, nous constatons qu'au printemps, 1994 révèle une forte progression des budgets, alors que 1992 et 1993 apparaissent similaires avec des contributions sensiblement comparables à celle de la première bissectrice, et que 1991 n'évolue plus à partir de mars. Là encore, nous pouvons rattacher ces différences à celles de la figure 9.4. En effet, comme nous l'avons déjà remarqué ci-avant, il s'avère que ce sont essentiellement les marées dont l'amplitude est comprise entre 1,30 et 2,00 m qui interviennent sur les termes des budgets. Aussi, lorsque nous observons les distributions de ces marées au printemps, il ressort que, globalement, elles augmentent entre 1991 et 1994. De plus, pour chaque année, le nombre de marées influençant les exports (1,30 - 1,70 m) reste supérieur à celles importatrices (1,70 - 2,00 m), d'où une prédominance supposée des exports, ceci expliquant l'évolution croissante des pentes des contributions budgétaires mentionnée ci-dessus.

Durant l'été, nous n'observons pas de différences réellement significatives comparativement au printemps pour 1991, 1993 et 1994. Par contre, 1992 présente une brutale augmentation des imports. Ceci doit être rattaché au fait que, durant cette saison, les marées dont les influences sont inverses en terme d'échange, ont été sensiblement aussi nombreuses, ceci laissant alors supposer une tendance aux imports. De la même façon, comme au printemps, pour 1993 et 1994, nous observons plus de marées au caractère exportateur qu'importateur, d'où la progression régulière des exports. Cependant, il apparaît que le nombre de marées de la classe 1,30 - 1,70 m est environ trois fois supérieur à celles de la classe 1,70 - 2,00 m, ce qui, selon la même logique, aurait dû entraîné une forte augmentation des exports. Il s'avère qu'il n'en est rien, ce qui laisse entrevoir l'existence d'autres modalités des processus influençant les contributions budgétaires.

Enfin, au cours de la saison automnale, les années 1991 et 1992 témoignent d'une très forte progression des exports, laquelle peut être reliée de nouveau aux écarts observés dans les distributions des marées des classes déjà spécifiées. Toutefois, alors que pour 1993 nous observons plus de marées de la première classe, et que, pour 1994 les proportions sont semblables, il ressort que les exports sont sensiblement plus importants pour 1994. Aussi, la logique du schéma conceptuel, que nous avons appliquée durant cette discussion, apparaît une nouvelle fois contradictoire avec les résultats observés.

Bien que le principe de l'existence d'amplitudes de marées influençant les budgets apparaisse réel à la vue des graphes 9.3c et 9.3d, nous devons admettre qu'il répond à des modalités dont nous ignorons actuellement l'expression. Toutefois, les observations précédemment discutées nous permettent de favoriser l'une des hypothèses formulée en début de ce chapitre. En effet, il s'avère qu'au cours de cette période d'étude, aucun processus fonctionnel cyclique n'a pu être mis en évidence. Même si la durée de notre étude peut paraître trop courte comparativement à la période de développement d'un marais salé, la mise en évidence d'une logique continue de l'évolution des échanges du système aurait dû être dévoilée. Comme nous avons pu le constater, aucune tendance semblable n'a pu être démontrée, la plus évidente qui apparaissait ayant été contredite à plusieurs reprises. Ceci sous-entend que le marais évolue selon un rythme assurément plus rapide que l'échelle annuelle, bloquant ainsi tout processus de retour en arrière. Il ressort ainsi que le système que nous avons étudié a subi une maturation

extrêmement rapide, limitant donc toute comparaison significative d'une année à l'autre. A titre comparatif, nous pouvons émettre un parallèle entre le développement d'un marais salé et celui d'organismes vivants. Comme pour ces derniers, le marais présente 3 périodes essentielles dans son évolution, chacune se caractérisant par des cinétiques très variables:

Organismes	état latent	±	croissance	±	état stationnaire
Marais salé	état jeune	±	maturation	±	état mûre
<i>cinétique:</i>	<i>lente</i>	±	<i>exponentielle</i>	±	<i>lente</i>

Compte tenu de la nature des échanges observés durant la première année (imports de particulaire et exports de dissous), et de ceux de la fin d'étude (exports de particulaire et de dissous), nous pouvons considérer que le système est passé d'un état de maturation à un état mûre jeune (du fait des exports de particulaire encore limités) en l'espace de 4 années, sans qu'aucune modalité évolutive n'ait pu être effectivement révélée.

CONCLUSIONS DE LA TROISIÈME PARTIE

Du fait de la mise en place, dès le début de l'étude, de limnigraphes enregistreurs, et donc, grâce aux niveaux d'eau du chenal enregistrés entre 1991 et 1994, nous avons pu déterminer quelles sont les constantes harmoniques des 20 principales ondes astronomiques à l'origine du mouvement des marées au point géographique matérialisé par la station expérimentale. Cette connaissance est particulièrement intéressante dans la poursuite de l'étude, dans la mesure où, pour n'importe quel instant passé ou futur, nous pouvons retrouver quelle était/sera la hauteur d'eau potentielle de la marée dans le chenal.

En continuité avec la méthodologie détaillée dans l'étude intersystème du marais, nous avons adopté les mêmes bases de calcul de flux de nutriments à l'échelle de la période d'étude complète. Cependant, dans la mesure où nous ne disposons pas en continu des caractéristiques qualitatives de toutes les marées ayant atteint le marais, notamment en début d'étude, nous avons eu recours à des modèles de régression descriptifs de la variabilité des teneurs de chaque nutriment. Bien que le principe simpliste de la règle de trois aurait pu être appliqué dans le contexte des suivis pour estimer les bilans annuels, la démarche adoptée présente l'avantage d'en limiter la marge d'incertitude. Très schématiquement, elle consiste à considérer un ensemble de covariables susceptibles de retranscrire, selon certaines combinaisons testées d'après leur significativité, la variabilité des nutriments au cours du temps. Naturellement, cette approche ne rend absolument pas compte des processus écologiques caractéristiques du système.

L'intégration de ces modèles descriptifs aux suivis réalisés durant la période 1991-1994 nous a ainsi permis d'approcher l'évolution des diverses composantes des échanges généraux du marais avec le milieu côtier. Ceux-ci se révèlent particulièrement considérables, confirmant assurément le rôle nourricier de ces systèmes pour la zone littorale adjacente. Toutefois, nous avons pu constater une nette évolution des tendances de ces transferts au cours du temps. En effet, bien que les éléments liés au matériel dissous aient toujours été régulièrement exportés sans modification réelle des termes budgétaires, ceux du particulaire sont passés d'un stade importateur à un état exportateur. Malgré le fait que nous ayons pu corrélés certaines des modalités des transferts à des caractéristiques saisonnières (importance de l'automne,...) ou liées aux amplitudes de marées (tendance exportatrice pour celles entre 1,30 et 1,70 m, importatrices pour celles entre 1,70 et 2,00 m), il s'avère qu'aucune logique d'évolution cyclique n'a pu être dévoilée. Nous devons donc considérer que ces transformations, extrêmement rapides, apparaissent donc irréversibles, ces deux principes nous amenant à conclure que le marais est passé d'un état en cours de maturation à un état mûre jeune.

- CONCLUSION GÉNÉRALE -



CONCLUSION GÉNÉRALE

Avant toute intervention sur les objectifs atteints durant cette étude, nous devons reconnaître que, sans le développement initial de la station expérimentale et sans les divers accessoires indispensables qui ont accru ses potentialités, nous n'aurions jamais pu développer aussi précisément l'étude des échanges intersystèmes du marais salé. Nous voulons ainsi insister sur le fait qu'il ne suffit pas d'un laboratoire bien équipé pour mener à terme une telle étude, même si elle est principalement axée sur des analyses qualitatives d'échantillons d'eau, encore faut-il être sûr de la signification des prélèvements effectués, et surtout, être capable de pouvoir les replacer dans leur contexte originel.

Ce n'est que récemment que les recherches se sont intéressées aux marais salés, puisque les premiers travaux américains datent de 1962. L'étude de ces systèmes en Europe est encore plus récente puisque publiée pour la première fois en 1979. Alors que celles des Etats-Unis avaient conclu au concept univoque général d'outwelling, celles de l'ancien continent ont eu l'audace d'en nuancer les modalités fonctionnelles selon le stade de développement du site étudié. C'est dans ce contexte que la Baie du Mont Saint Michel a été retenue comme l'un des sites pilotes européens dans l'étude comparée des processus relatifs aux marais salés.

En raison de la dualité continue entre terre et mer, les marais salés apparaissent comme des systèmes complexes, dont le fonctionnement général est sous l'influence première des régimes hydrauliques auxquels ils sont soumis. Afin d'en maîtriser au mieux les variations d'état, nous l'avons compartimenté en sous-unités fonctionnelles, dont nous avons étudié précisément les termes généraux des budgets en 1994. Nous avons ainsi mis en évidence le rôle effectivement exportateur du système quant au matériel dissous, les apports par les précipitations en limitant cependant parfois nettement l'impact. Ainsi, pour les formes azotées, elles ont fortement contribué au budget global, leur participation s'étant avérée du même ordre de grandeur que les marées ou intercycles. A titre démonstratif et toutes formes confondues, nous avons obtenu des budgets respectifs pour cet élément de 327, -224 et -273 kg pour l'année. Même si les contributions pour les autres formes se sont avérées moins significatives, cet exemple souligne bien l'importance d'avoir une approche précise et détaillée des sous-systèmes pour ce genre d'étude. A ce titre, il est apparu que les intercycles, pourtant souvent négligés ou sous-estimés dans des recherches similaires, participent effectivement aux échanges, même si les volumes mis en jeu peuvent paraître dérisoires comparativement à ceux des marées. Au travers de ces processus de ressuyage, il faut en réalité entrevoir une action concertée entre l'exfiltration de la nappe et l'utilisation qui en est faite ensuite dans le lit des chenaux. Même si l'activité biologique de ces derniers est apparue évidente, elle ne peut réellement se mettre en place que grâce aux apports importants de la nappe. Il apparaît ainsi que c'est essentiellement dans les horizons superficiels que les activités internes du sol se déroulent, les écoulements en profondeur n'entraînant pas de modification notable de la qualité de l'eau souterraine.

Par ordre décroissant d'importance des budgets estimés pour les éléments dissous, nous avons obtenu d'abord ceux du carbone (-17588 kg), puis la silice (-1459 kg), l'azote (-170 kg), et enfin le phosphore (-30 kg). Cette combinaison témoigne bien des activités biologiques auxquelles le marais est soumis, notamment celles des diatomées dont le rôle se révèle être un processus clé des échanges du fait de leur dynamique des périodes d'intercycles.

Conclusion générale

A l'inverse des éléments dissous, ceux liés au matériel particulaire ont présenté des tendances à l'import (417 kg pour PN et 145 kg pour PP), exceptées les matières en suspension qui ont été exportées (-50000 kg), les intercycles ayant participé pour moitié à ce bilan. Comme nous le préciserons ci-après, ce phénomène témoigne directement d'une transformation générale du système.

L'étude de l'évolution du marais durant la période 1991-1994 nous a permis de mettre en évidence différents processus fondamentaux dans la transformation régulière du système. Ceux-ci sont d'ordre saisonnier (importance de l'automne), hydraulique (influence de certaines classes d'amplitudes de marées aux budgets nets: 0 - 1,30 m, contribution standard; 1,30 - 1,70 m, exports; 1,70 - 2,00 m, imports; > 2,00 m, contribution nulle),... Effectivement, au cours de ces quatre années d'étude, le marais a subi une évolution certaine, celle-ci s'étant surtout matérialisée au travers des échanges de matériel particulaire (1149 tonnes en 1991, 694 en 1992, 502 en 1993 et -50 en 1994), les effets sur le matériel dissous restant plus nuancés malgré une baisse certaine des exports.

Cette transformation générale est imputable au vieillissement du système, aucune des modalités fonctionnelles précédemment mentionnées n'ayant cependant pu être corrélées à ce changement d'état. Aucune logique d'évolution cyclique n'ayant pu être dévoilée, nous devons donc considérer qu'il s'agit là de processus extrêmement rapides, aux conséquences irréversibles du fait des perturbations réelles qu'elles entraînent. Par ailleurs, elles ne doivent pas être entrevues comme un événement accidentel, mais comme une évolution naturelle du marais, qui, comme nous l'avons déjà mentionné, est passé d'un stade de maturation à un stade mûre jeune. Néanmoins, il est nécessaire de relativiser cette transformation en rapport avec la situation géographique de nos suivis. En effet, dans la mesure où ils ont toujours été réalisés en un même endroit, c'est en fait la partie amont à la station qui a subi réellement cette évolution. Il faut garder présent à l'esprit que le marais ne cesse de progresser vers l'estran (30 à 35 ha par an), alors que notre station expérimentale est statique. Il y a donc eu un décalage d'échelle spatial et temporel, lequel est à l'origine des observations mentionnées.

Au stade actuel de notre travail, il s'avérerait nécessaire d'envisager une étude modélisatrice, compte tenu de la quantité importante de données dont nous disposons. Nous avons ainsi tenté d'appliquer le modèle Drainmod aux variations du niveau de la nappe d'eau souterraine, mais les résultats, bien que prometteurs, restent encore trop éloignés de la réalité pour pouvoir être développés dans une telle étude. Quoi qu'il en soit, les connaissances actuelles du fonctionnement du marais salé que nous avons développées, nous permettent d'entrevoir de telles perspectives, les modèles propres aux mécanismes généraux de ces systèmes étant particulièrement nombreux.

- RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES -



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adam P. 1990. Saltmarsh Ecology. Cambridge University Press, 461 pp.
- Admiraal W. 1984. The ecology of estuarine sediment-inhabiting diatoms. *Progress of Phycological Research*, 3: 269-322.
- Agosta K.A. 1985. The effect of tidally induced changes in the creek bank water table on pore water chemistry. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21: 381-400.
- Asmus R.M. et E. Bauerfeind. 1994. The microphytobenthos of Konigshafen - Spatial and seasonal distribution on a sandy tidal flat. *Helgolander Meeresunters*, 48, 2-3: 257-276.
- Asmus H., R.M. Asmus et G.F. Zubillaga. 1995. Do mussel beds intensify the phosphorus exchange between sediment and tidal waters?. *Ophelia*, 41: 37-55.
- Aurand D. et F.C. Daiber. 1973. Nitrate and nitrite in the surface waters of two Delaware salt marshes. *Chesapeake Science*, 14, 2: 105-111.
- Bailey L.D. 1976. Effect of temperature and roots on denitrification in a soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 56: 79-87.
- Barbanti A., V.U. Cecchrelli, F. Frascari, G. Reggiani et G. Rosso. 1992. Nutrient regeneration processes in bottom sediments in a Po Delta lagoon (Italy) and the role of bioturbation in determining the fluxes at the sediment water interface. *Hydrobiologia*, 228, 1: 1-21.
- Berounsky V.M. et S.W. Nixon. 1993. Rates of nitrification along an estuarine gradient in Narragansett Bay. *Estuaries*, 16, 4: 718-730.
- Brosemer K.M., W.K. Nuttle, E.L. Winstead, J.S. Levine et W.R. Cofer. 1987. Denitrifier activity and biogenic emission of N₂O from wetlands: the effect of tidal action. *Eos Trans, AGU* 68: 12-24.
- Bouchard V. 1996. Production et devenir de la matière organique des halophytes dans un marais salé européen en système macrotidal (Baie du Mont Saint Michel). Thèse de l'Université de Rennes I, UMR CNRS Ecobio 6553, Laboratoire d'Evolution des Systèmes Naturels et Modifiés (France), 209 pp.
- Bowden W.B. 1986. Nitrification, nitrate reduction, and nitrogen immobilization in a tidal freshwater marsh sediment. *Ecology*, 67, 1: 88-99.
- Bowden W.B., C.J. Vorosmarty, J.T. Morris, B.J. Peterson, J.E. Hobbie, P.A. Steudler et B. Moore. 1991. Transport and processing of nitrogen in a tidal freshwater wetland. *Water Resources Research*, 27, 3: 389-408.
- Boyer J.N., D.W. Stanley et R.R. Christian. 1994. Dynamics of NH₄⁺ and NO₃⁻ uptake in the water column of the Neuse River estuary, North Carolina. *Estuaries*, 17, 2: 361-371.
- Boyer E.W., G.M. Hornberger, K.E. Bencala et D. McKnight. 1996. Overview of a simple model describing variation of dissolved organic carbon in an upland catchment. *Ecological Modeling*, 86, 2-3: 183-188.
- Bronk D.A. et P.M. Glibert. 1993. Application of a ¹⁵N tracer method to the study of dissolved organic nitrogen uptake during spring and summer in Chesapeake Bay. *Marine Biology*, 115, 3: 501-508.
- Brosse S. 1996. Dynamique du peuplement microphytobenthique dans un chenal de marée de la Baie du Mont Saint Michel: rôle dans les processus de rétention de nutriments. Rapport de D.E.A. "Biologie des Populations, Génétique, Eco-Ethologie", Université de Rennes I, URA CNRS 1853 Ecobio, Laboratoire d'Evolution des Systèmes Naturels et Modifiés (France), 46 pp.
- Brusch W. et B. Nilsson. 1993. Nitrate transformation and water movement in a wetland area. *Hydrobiologia*, 251, 1-3: 103-111.
- Burdige D.J. 1991. The kinetics of organic matter mineralization in anoxic marine sediments. *Journal of Marine Research*, 49, 4: 727-761.
- Caffrey J.M. 1995. Spatial and seasonal patterns in sediment nitrogen remineralization and ammonium concentrations in San Francisco Bay, California. *Estuaries*, 18, 1B: 219-233.
- Cariou-Le-Gall V. et G.F. Blanchard. 1995. Monthly HPLC measurements of pigment concentration from an intertidal muddy sediment of Marennes-Oleron Bay, France. *Marine Ecology-Progress Series*, 121: 171-179.
- Carpenter E.J., C.D. Van Raalte et I. Valiela. 1978. Nitrogen fixation by Igae in a Massachusetts salt marsh. *Limnology and Oceanography*, 23, 2: 318-327.

Références bibliographiques

- Casey W.H. et A.C. Lasaga. 1987. Modeling solute transport and sulfate reduction in marsh sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51: 1109-1120.
- Chambers R.M. 1992. A fluctuating water-level chamber for biogeochemical experiments in tidal marshes. *Estuaries*, 15, 1: 53-58.
- Chambers R.M., J.W. Harvey et W.E. Odum. 1992. Ammonium and phosphate dynamics in a Virginia salt marsh. *Estuaries*, 15, 3: 349-359.
- Chapelle F.A. 1992. Ground-water microbiology and geochemistry. John Wiley and Sons, Inc. 424 pp.
- Childers D.L., H.N. McKellar, R.F. Dame, F.H. Sklar et E.R. Blood. 1993. A dynamic nutrient budget of subsystem interactions in a salt marsh estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 36: 105-131.
- Chittleborough D.J., K.R.J. Smettem, E. Cotsaris et F.W. Leaney. 1992. Seasonal change in pathways of dissolved organic carbon through a hillslope soil (xeralf) with contrasting texture. *Australian Journal of Soil Research*, 30: 465-476
- Christian R.R., K. Bancroft et W.J. Wiebe. 1975. Distribution of microbial adenosine triphosphate in salt marsh sediments of Sapelo Island, Georgia. *Soil Science*, 119: 89-97.
- Chrzanowski T.H., L.H. Stevenson et J.D. Spurrier. 1983. Transport of dissolved organic carbon through a major creek of the North Inlet ecosystem. *Marine Ecology-Progress Series*, 13: 167-174.
- Collos Y. 1992. Nitrogen budgets and dissolved organic matter cycling. *Marine Ecology-Progress Series*, 90, 2: 201-206.
- Conley D.J., S.S. Kilham et E. Theriot. 1989. Differences in silica content between marine and freshwater diatoms. *Limnology and Oceanography*, 34, 1: 205-213.
- Conley D.J. et T.C. Malone. 1992. Annual cycle of dissolved silica in Chesapeake Bay: implications for the production and fate of phytoplankton biomass. *Marine Ecology-Progress Series*, 81: 121-128.
- Creach V. 1995. Origines et transferts de la matière organique dans un marais littoral: utilisation des compositions isotopiques naturelles du carbone et de l'azote. Thèse de l'Université de Rennes I, URA CNRS Ecobio 1853, Laboratoire d'Evolution des Systèmes Naturels et Modifiés (France), 209 pp.
- Currin C.A., S.B. Joye et H.W. Paerl. 1996. Diel rates of N²-fixation and denitrification in a transplanted *Spartina alterniflora* marsh: Implications for N-flux dynamics. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 42, 5: 597-616.
- Daly M.A. et A.C. Mathieson. 1981. Nutrient fluxes within a small north temperate salt marsh. *Marine Biology*, 61: 337-344.
- Dame R.F., T. Chrzanowski, K. Bildstein, B. Kjerfve, H. McKellar, D. Nelson, J. Spurrier, S. Stancyk, H. Stevenson, J. Vernberg et R. Zingmark, 1986. The outwelling hypothesis and North Inlet, South Carolina. *Marine Ecology Progress Series*, 33: 217-229.
- Dame R.F. et L.R. Gardner. 1993. Nutrient processing and the development of tidal creek ecosystems. *Marine Chemistry*, 43: 175-183.
- De Jonge V.N. et J.E.E. Van Beusekom. 1992. Contribution of resuspended microphytobenthos to total phytoplankton in the Ems estuary and its possible role for grazers. *Netherlands Journal of Sea Research*, 30: 91-105.
- D'Elia C.F., P.A. Steudler et N. Corwin. 1977. Determination of total nitrogen in aqueous samples using persulfate digestion, *Limnology and Oceanography*, 22: 760-764.
- Demadariaga I. 1995. Photosynthetic characteristics of phytoplankton during the development of a summer bloom in the Urdaibai Estuary, Bay of Biscay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 40, 5: 559-575.
- Dickson M.L., et P.A. Wheeler 1995a. Nitrate uptake rates in a coastal upwelling regime: A comparison of P_N-specific, absolute, and Chl a-specific rates. *Limnology and Oceanography*, 40, 3: 533-543.
- Dickson M.L. et P.A. Wheeler. 1995b. Ammonium uptake and regeneration rates in a coastal upwelling regime. *Marine Ecology-Progress Series*, 121, 1-3: 239-248.
- Diconne M.A. 1972. Les jaugeages des débits des cours d'eau au moulinet hygrométrique par la méthode d'intégration. *Houille Blanc he*, 1, 72: 35-44.
- Dollar S.J., S.V. Smith, S.M. Vink, S. Obrebski et J.T. Hollibaugh. 1991. Annual cycle of benthic nutrient fluxes in Tomales Bay, California, and contribution of the benthos to total ecosystem metabolism. *Marine Ecology Progress Series*, 79, 1-2: 115-125.
- Dorst J. et L'Hommer A. 1989. Face au comblement de la Baie du Mont Saint Michel: recommandations en vue de son aménagement. *La Vie des Sciences, Comptes Rendus*, 6: 387-401.
- Eyre, B. 1993. Nutrients in the sediments of a tropical North-Eastern Australian estuary, catchment and nearshore coastal zone. *Australian Journal of Marine Freshwater Research*, 44, 6: 845-866.
- Eyre, B. 1994. Nutrient biogeochemistry in the tropical Moresby river estuary system North Queensland, Australia. *Estuarine, Coastal Shelf Science*, 39, 1: 15-31.

Références bibliographiques

- Fichez R., T.D. Jickells et H.M. Edmunds. 1992. Algal blooms in high turbidity, a result of the conflicting consequences of turbulence on nutrient cycling in a shallow water estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 35: 577-592.
- Focht D.D. 1974. The effect of temperature, pH and aeration on the production of nitrous oxide and gaseous oxygen. *Soil Science*, 118: 173-179.
- Gardner L.R. 1975. Runoff from an intertidal marsh during tidal exposure: regression curves and chemical characteristics. *Limnology and Oceanography*, 20: 81-89.
- Gardner L.R. 1976. Exchange of nutrients and trace metals between marsh sediments and estuarine waters - a field study. Report N°63. Water Resources Research Institute, Clemson University, Clemson, South Carolina.
- Gardner W.S., E.E. Briones, E.C. Kaegi et G.T. Rowe. 1993. Ammonium excretion by benthic invertebrates and sediment-water nitrogen flux in the Gulf of Mexico near the Mississippi river outflow. *Estuaries*, 16, 4: 799-808.
- Gehrels J. et G. Mulamoottil. 1989. The transformation and export of phosphorus from wetlands. *Hydrological Processes*, 3: 365-370.
- Georges U.S. et A.D. Antoine. 1982. Denitrification potential of a salt marsh soil: effect of temperature, pH and substrate concentration. *Soil Biology and Biochemistry*, 14: 117-125.
- Gillan F.T. et R.B. Johns. 1980. Input and early diagenesis of chlorophylls in a temperate intertidal sediment. *Marine Chemistry*, 9: 423-453
- Giraud F. et Troccaz O. 1990. Etude hydraulique du projet d'irrigation des polders de l'ouest du Couesnon. Laboratoire d'Evolution des Systèmes Naturels et Modifiés, 97 pp.
- Glibert P.M., C.F. D'Elia et Z. Mlodlinska. 1977. A semiautomated persulfate oxidation technique for simultaneous total nitrogen and total phosphorus determination in natural water samples. Woods Hole Oceanographic Institution Contribution N°3954 (Unpublished manuscript).
- Golterman H.L., R.S. Clymo et M.A.M. Ohnstad. 1978. Methods for physiscal and chemical analysis of fresh waters. *Blackwell Scientific Publications*, Oxford, 2nd edition, 213 pp.
- Grare S. 1996. Echanges intersystèmes: le lindane comme marqueur d'échange entre marais salés poldérisés et zone conchylicole (Baie du Mont Saint Michel). Thèse de l'Université de Rennes I, UMR CNRS Ecobio 6553, Laboratoire d'Evolution des Systèmes Naturels et Modifiés (France), 136 pp.
- Haines E., A. Chalmers, R. Hanson et B. Sherr. 1977. Nitrogen pools and fluxes in a Georgia salt marsh. *Estuarine Perspectives*, 2: 241-254.
- Harvey J.W., P.F. Germann et W.E. Odum. 1987. Geomorphological control of subsurface hydrology in the creekbank zone of tidal marshes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 25: 677-691.
- Harvey J.W. et W.E. Odum. 1990. The influence of tidal marshes on upland groundwater discharge to estuaries. *Biogeochemistry*, 10: 217-236.
- Hemond H.F. et J.L. Fifield. 1981. Subsurface flow in salt marsh peat: a model and field study. *Limnology and Oceanography*, 26: 795-800.
- Hemond H.F. et R.W. Burke. 1981. A device for the measurement of infiltration in intermittently flooded wetlands. *Limnology and Oceanography*, 26: 795-800.
- Hemond H.F., W.K. Nuttle, R.W. Burke et K.D. Stolzenbach. 1984. Surface infiltration in salt marshes: theory, measurement and biogeochemical implications. *Water Resources Research*, 20: 591-600.
- Herrera-Silveira J.A. 1994. Phytoplankton productivity and submerged macrophyte biomass variation in a tropical coastal lagoon with groundwater discharge. *Vie Milieu*, 44, 3/4: 257-266.
- Herrera-Silveira J.A. et F.A. Comin. 1995. Nutrient fluxes in a tropical coastal lagoon. *Ophelia*, 42, : 127-146.
- Hinga K.R. 1989. Alteration of phosphorus dynamics during experimental eutrophication of enclosed marine ecosystems. *Marine Pollution Bulletin*, 20, 12: 624-628.
- Howard-Williams C. et M.T. Downes. 1993. Nitrogen cycling in wetlands. In: T.P. Burt, A.L. Heathwaite et S.T. Trudgill (Eds), *Nitrate: Processes, Patterns and Management*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 141-167.
- Howes B.L. et D.D. Goehringer. 1994. Porewater drainage and dissolved organic carbon and nutrient losses through the intertidal creekbanks of a New England salt marsh. *Marine Ecology-Progress Series*, 114, 3: 289-301.
- Hwang Y.H. et J.T. Morris. 1992. Fixation of inorganic carbon from different sources and its translocation in *Spartina alterniflora* Loisel. *Aquatic Botany*, 43, 2: 137-147.
- Jacovson M.E. 1994. Chemical and biological mobilization of Fe(III) in marsh sediments. *Biogeochemistry*, 25, 1: 41-60.
- Jigorel A. 1995. Etude de la sédimentation dans le marais salé du Mont Saint Michel. *Comparative Studies on Salt Marsh Processes*. Rapport final du Laboratoire d'Evolution des Systèmes Naturels et Modifiés, 2: 1-30.

Références bibliographiques

- John P.H., F.A. Johnson et P. Sutcliffe. 1976. Float calibration in integrated float techniques. *Journal of the Hydraulics Division*, 102, HY8: 1071-1082.
- Johnson R., M. Lamontagne et I. Valiela. 1994. Rate of denitrification in submerged salt marsh sediments. *Biology Bulletin*, 187, 2: 289-290.
- Jones K. 1974. Nitrogen fixation in a salt marsh. *Journal of Ecology*, 62: 553-565.
- Jordan T.E., D.L. Correll et D.F. Whigham. 1983. Nutrient flux in the Rhodes River: tidal exchange of nutrients by brackish marshes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 17: 651-667.
- Jordan T.E. et D.L. Correll. 1985. Nutrient chemistry and hydrology of interstitial water in brackish tidal marshes of Chesapeake Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21: 45-55.
- Jordan T.E. et D.L. Correll. 1991. Continuous automated sampling of tidal exchanges of nutrients by brackish marshes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 32: 527-545.
- Joye S.B. et H.W. Paerl. 1994. Nitrogen cycling in microbial mats: rates and patterns of denitrification and nitrogen fixation. *Marine Biology*, 119, 2: 285-295.
- Kairesalo T., L. Tuominen, H. Hartikainen et K. Rankinen. 1995. The role of bacteria in the nutrient exchange between sediment and water in a flow-through system. *Microbial Ecology*, 29, 2: 129-144.
- Kaplan W., I. Valiela et J.M. Teal. 1979. Denitrification in a salt marsh ecosystem. *Limnology and Oceanography*, 24, 4: 726-734.
- Keefe C.W. 1994. The contribution of inorganic compounds to the particulate carbon, nitrogen, and phosphorus in suspended matter and surface sediments of Chesapeake Bay. *Estuaries*, 17, 1B: 122-130.
- Kliewer B.A. et J.W. Gilliam. 1995. Water table management effects on denitrification and nitrous oxide evolution. *Soil Science Society of American Journal*, 59, 6: 1694-1701.
- Koch M.S., E. Maltby, G.A. Oliver et S.A. Bakker. 1992. Factors controlling denitrification rates of tidal mudflats and fringing salt marshes in south-west England. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 34: 471-485.
- Kochrose M.S., K.R. Reddy et J.P. Chanton. 1994. Factors controlling seasonal nutrient profiles in a subtropical peatland of the Florida Everglades. *Journal of Environmental Quality*, 23, 3: 526-533.
- Koroleff F. 1972. Determination of total nitrogen in natural waters by means of persulfate oxydation. In: S.R. Carlberg (Ed), *New Baltic Manual with Methods for Sampling and Analysis of Physical, Chemical and Biological Parameters*, International Council for Exploration of the Sea, Charlottenlung: 73-78.
- Koroleff F. 1977. Simultaneous persulfate oxidation of phosphorus and nitrogen compounds in water. In: K. Grasshoff (Ed.), *Report of the Baltic Intercalibration Workshop*, Annex Interim Commission for the Protection of the Environment of the Baltic Sea.
- Laffaille P. 1996. Echanges intersystèmes: participation de l'ichtyofaune aux transferts intersystèmes de matière organique entre les marais salés et les eaux marines côtières de la baie du mont saint michel. Résultats préliminaires et mise en place des méthodes. Rapport de D.E.A. "Biologie des Populations, Génétique, Eco-Ethologie", Université de Rennes I, URA CNRS 1853 Ecobio, Laboratoire d'Evolution des Systèmes Naturels et Modifiés (France), 23 pp.
- Lau Y.L. et D. Liu. 1993. Effect of flow rate on biofilm accumulation in open channels. *Water Research*, 27, 3: 355-360.
- Lefevre J.-C., G. Bertru, F. Burel, L. Brient, V. Creach, Y. Gueuné, J.E. Levasseur, A. Mariotti, A. Radureau, C. Retière, B. Savouré et O. Troccaz. 1994. Comparative studies on salt marsh processes: Mont Saint Michel Bay, a multi-disciplinary study. In: W.J. Mitsch (Ed), *Global Wetlands: Old World and New*, Elsevier Science B.V., 215-234.
- Levasseur J.E, O. Troccaz, F. Giraud, G. Bertru et L. Brient. 1993. *Comparative Studies on Salt Marsh Processes*. Rapport final du Laboratoire d'Evolution des Systèmes Naturels et Modifiés, 1: 110-182.
- Levasseur J.E, M.J. Le Garrec, M.C. Guenegou et A. Guillemot. 1996. Approche multiscalaire de la dynamique des schorres du centre-sud de la Baie du Mont Saint Michel - Evolution de la ligne de rivage et de la végétation entre 1980 et 1995. *Comparative Studies on Salt Marsh Processes*. Rapport final du Laboratoire d'Evolution des Systèmes Naturels et Modifiés, 2: 33-54.
- Lucas F. 1997. Impact de *Nereis diversicolor* sur l'activité et la structure de la communauté bactérienne du sédiment - le marais salé de la Baie du Mont Saint Michel. Thèse de l'Université de Rennes I, UMR CNRS Ecobio 6553, Laboratoire d'Evolution des Systèmes Naturels et Modifiés (France), In press.
- Marinelli R.L. 1992. Effects of polychaetes on silicate dynamics and fluxes in sediments - Importance of species, animal activity and polychaete effects on benthic diatoms. *Journal of Marine Research*, 50, 4: 745-779.
- Meziane T. 1997. Réseaux trophiques benthiques d'un estran intertidal en Baie du Mont Saint Michel: rôle de la communauté à *Macoma balthica*. Thèse de l'Université de Rennes I, UMR CNRS Ecobio 6553, Laboratoire d'Evolution des Systèmes Naturels et Modifiés (France), In press.

Références bibliographiques

- Middelburg J.J., G. Klaver, J. Nieuwenhuize et T. Vlug. 1995. Carbon and nitrogen cycling in intertidal sediments near Doel, Scheldt Estuary. *Hydrobiologia*, 311, 1-3: 57-69.
- Morzadec Kerfoun M.T. 1974. Variations de la ligne de rivage armoricaine au quaternaire. *Mémoires de la Société Géologique et Minéralogique de Bretagne*, 17, Rennes, 208 pp.
- Murphy J. et J.P. Riley. 1962. A modified single-solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27: 31-6.
- Neill C. 1995. Seasonal flooding, nitrogen mineralization and nitrogen utilization in a prairie marsh. *Biogeochemistry*, 30, 3: 171-189.
- Nestler J.A. 1977. A preliminary study of the sediment hydrology of a Georgia salt marsh using Rhodamine Wt as a tracer. *Southeastern Geology*, 18: 265-271.
- Newell R.I.E., N. Marshall, A. Sasekumar et V.C Chong. 1995. Relative importance of benthic microalgae, phytoplankton, and mangroves as sources of nutrition for penaeid prawns and other coastal invertebrates from Malaysia. *Marine Biology*, 123, 3: 595-606.
- Nielsen K., L.P. Nielsen et P. Rasmussen. 1995. Estuarine nitrogen retention independently estimated by the denitrification rate and mass balance methods: A study of Norsminde Fjord, Denmark. *Marine Ecology Progress Series*, 119, 1-3: 275-283.
- Nixon S.W. 1980. Between coastal marshes and coastalwaters - A review of twenty years of speculation and research on the role of salt marshes in estuarine productivity and water chemistry. In: R. Hamilton and K.B. ~~McDonald~~ (Eds), *Estuarine and Wetlands Processes*. Plenum Press, New York: 437-525.
- Nuttle W.K. 1986. Elements of salt marsh hydrology, Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, M.I.T. Cambridge, MA.
- Nuttle W.K. 1988. The extent of lateral water movement in the sediments of a New England salt marsh. *Water Resources Research*, 24: 2077-2085.
- Odum E.P. et A.A. de la Cruz. 1967. Particulate organic detritus in a Georgia salt marsh estuarine ecosystem. In: G.H. Lauff (Ed), *Estuaries*. American Association for the Advancement of Science, Washington, DC: 383-388.
- Odum E.P. 1968. Energy flow in ecosystems: a historical review. *American Zoology*, 8: 11-18.
- Odum E.P. 1980. The status of three ecosystem-level hypothesis regarding salt marshes estuaries: tidal subsidy, outwelling and detritus-based food chains. In: V. Kennedy (Ed), *Estuarine Perspectives*. Academic Press, New York: 485-495.
- Page H.M. 1995. Variation in the natural abundance of N-15 in the halophyte, *Salicornia virginica*, associated with groundwater subsidies of nitrogen in a southern California salt-marsh. *Oecologia*, 104, 2: 181-188.
- Page H.M., R.L. Petty et D.E. Meade. 1995. Influence of watershed runoff on nutrient dynamics in a southern California salt marsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 41, 2: 163-180.
- Pakulski J.D. 1992. Foliar release of soluble reactive phosphorus from *Spartina alterniflora* in a Georgia (USA) salt marsh. *Marine Ecology-Progress Series*, 90, 1: 53-60.
- Parker R.A. 1993. Dynamic models for ammonium inhibition of nitrate uptake by phytoplankton. *Ecological Modeling*, 66, 1-2: 113-120.
- Pejrup M., J. Bartholdy et A. Jensen. 1993. Supply and exchange of water and nutrients in the Gradyb Tidal Area, Denmark. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 36, 3: 221-234.
- Pinay G., C. Ruffinoni et A. Fabre. 1995. Nitrogen cycling in two riparian forest soils under different geomorphic conditions. *Biogeochemistry*, 30: 9-29.
- Pomeroy L.R. et R.G. Wiegert. 1981. The Ecology of a Salt Marsh. Ecological Studies 38, Springer-Verlag, New York, 271 pp.
- Ragueneau O., E.D. Varela, P. Treguer, B. Queguiner et Y. Delamo. 1994. Phytoplankton dynamics in relation to the biogeochemical cycle of silicon in a coastal ecosystem of Western Europe. *Marine Ecology-Progress Series*, 106, 1-2: 157-172.
- Reay W.G., D.L. Gallagher et G.M. Simmons. 1992. Groundwater discharge and its impact on surface water quality in a Chesapeake Bay inlet. *Water Resources Bulletin* 28(6): 1121-1134.
- Reay W.G., D.L. Gallagher et G.M. Simmons Jr. 1995. Sediment-water column oxygen and nutrient fluxes in nearshore environments of the lower Delmarva Peninsula, USA. *Marine Ecology-Progress Series*, 118: 215-227.
- Roche M., 1963. Hydrologie de surface. In: O.R.S.T.O.M. Edité par Gauthier-Villars, Paris. 430 pp.
- Roden C.M. 1994. Chlorophyll blooms and the spring/neap tidal cycle - Observations at two stations on the Coast of Connemara, Ireland. *Marine Biology*, 118, 2: 209-213.
- Roden E.E., J.H. Tuttle, W.R. Boynton et W.M. Kemp. 1995. Carbon cycling in mesohaline Chesapeake Bay sediments 1: POC deposition rates and mineralization pathways. *Journal of Marine Research*, 53, 5: 799-819.

Références bibliographiques

- Sarda N. et G.A. Burton. 1995. Ammonia variation in sediments: Spatial, temporal and method-related effects. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 14, 9: 1499-1506.
- Scor-Unesco. 1966. Determination of photosynthetic pigments - Report of Scor-Unesco working group 17, *Monography of Oceanography*, 1: 9-15.
- Seitzinger S.P. 1994. Linkages between organic matter mineralization and denitrification in 8 riparian wetlands. *Biogeochemistry*, 25, 1: 19-39.
- SHOM(Ed). 1984. Table des marées des grands ports du monde - Paris, 186 pp.
- Shultz D.J. 1989. Nitrogen dynamics in the tidal freshwater Potomac river, Maryland and Virginia, water years 1979-81. A water-quality study of the tidal Potomac river and estuary. *United States Geological Survey Water-Supply*, paper 2234-J, 40 pp.
- Simon N.S. 1989. Nitrogen cycling between sediment and the shallow-water column in the transition zone of the Potomac river and estuary. II. The role of wind-driven resuspension and adsorbed ammonium. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 28: 531-547.
- Skaggs R.W. 1975. A water management model for high water table soils. In: ASAE (Eds), paper N°75-2524, St- Joseph, Mi.
- Sloth N.P., H. Blackburn, L.S. Hansen, N. Risgaardpetersen et B.A. Lomstein. 1995. Nitrogen cycling in sediments with different organic loading. *Marine Ecology-Progress Series*, 166, 1-3: 163-170.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 1980. 15th edition. American Public Health Association, New York, 1134 pp.
- Stephens K. 1963. Determination of low phosphate concentrations in lake and marine waters. *Limnology and Oceanography*, 8: 361-362.
- Strickland J.D.H. et T.R. Parsons. 1968. A practical handbook of sea-water analyses. *Bulletin of Fisheries Research Board Canada*, 167 pp.
- Sumi T. et Koike I. 1990. Estimation of ammonification and ammonium assimilation in surficial coastal and estuarine sediments. *Limnology and Oceanography*, 35, 2: 270-286.
- Teal J.M. 1962. Energy flow in the salt marsh ecosystem of Georgia. *Ecology*, 43: 614-624.
- Thompson S.P., H.W. Paerl et M.C. Go. 1995. Seasonal patterns of nitrification and denitrification in a natural and a restored salt marsh. *Estuaries*, 18, 2: 399-408.
- Thong K.L., A. Sasekumar et N. Marshall. 1993. Nitrogen concentrations in a mangrove creek with a large tidal range, Peninsular Malaysia. *Hydrobiologia*, 254, 2: 125-132.
- Tomaszek J.A. 1995. Relationship between denitrification and redox potential in two sediment-water systems. *Marine and Freshwater Research*, 46, 1: 27-31.
- Troccaz O., F. Giraud, G. Bertru et J.-C. Lefeuvre. 1994. Methodology for studying exchanges between salt marshes a coastal marine waters. *Wetlands Ecology and Management*, 3, 1: 37-48.
- Troccaz O. 1996. Etude des échanges entre marais salés et eaux marines côtières - les marais naturels. *Comparative Studies on Salt Marsh Processes*. Rapport final du Laboratoire d'Evolution des Systèmes Naturels et Modifiés, 2: 105-136.
- Troccaz O. et Giraud F. 1996. A nutrient budget methodology in the Mont Saint Michel Bay salt marsh, France. In: INRA (Ed), *Hydrologie dans les pays celtiques*, Rennes (France), 8-11 Juillet 1996, Paris 1996 (Les Colloques, n°79), 369 - 376.
- Turner R.E. 1993. Carbon, nitrogen, and phosphorus leaching rates from *Spartina alterniflora* salt marshes. *Marine Ecology-Progress Series*, 92, 1-2: 135-140.
- Valiela I., J.M. Teal, S.B. Volkman, D. Shafer et E.J. Carpenter. 1978. Nutrient and particulate fluxes in a salt marsh ecosystem: tidal exchanges and inputs by precipitation and groundwater. *Limnology and Oceanography*, 23: 798-812.
- Valiela I. et J.M. Teal. 1979. The nitrogen budget of a salt marsh ecosystem. *Nature*, 280: 652-656.
- Vanraaphorst W. et H.T. Kloosterhuis. 1994. Phosphate sorption in superficial intertidal sediments. *Marine Chemistry*, 48, 1: 1-16.
- Vivier J.P. 1997. Influence du pâturage sur la disponibilité de l'azote pour l'exportation dans un marais salé. Thèse de l'Université de Rennes I, UMR CNRS Ecobio 6553, Laboratoire d'Evolution des Systèmes Naturels et Modifiés (France), 150 pp.
- Vivier J.P. et Troccaz O. 1996. The outwelling hypothesis: relationship between saltmarsh groundwater and marine ecosystem. In: INRA (Ed), *Hydrologie dans les pays celtiques*, Rennes (France), 8-11 Juillet 1996, Paris 1996 (Les Colloques, n°79), 377 - 384.
- White D.S. et B.L. Howes. 1994a. Nitrogen incorporation into decomposing litter of *Spartina alterniflora*. *Limnology and Oceanography*, 39, 1: 133-140.

Références bibliographiques

- White D.S. et B.L. Howes. 1994b. Long-term N-15-nitrogen retention in the vegetated sediments of a New England salt marsh. *Limnology and Oceanography*, 39, 8: 1878-1892.
- White D.S. et B.L. Howes. 1994c. Translocation, remineralization, and turnover of nitrogen in the roots and rhizomes of *Spartina alterniflora* (Gramineae). *American Journal of Botany*, 81, 10: 1225-1234.
- Whiting G.J., H.N. McKellar Jr, B. Kjervfe et J.D. Spurrier. 1987. Nitrogen exchange between a southeastern USA salt marsh ecosystem and the coastal ocean. *Marine Biology*, 95: 173-182.
- Whiting G.J., H.N. McKellar Jr, J.D. Spurrier et T.G. Wolaver. 1989. Nitrogen exchange between a portion of vegetated salt marsh and the adjoining creek. *Limnology and Oceanography*, 34: 463-473.
- Williams T.M., T.G. Wolaver, R.F. Dame et J.D. Spurrier. 1992. The Bly Creek ecosystem study - organic carbon transport within a euhaline salt marsh basin, North Inlet, South-Carolina. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 163, 1: 125-139.
- Wolaver T.G., J. Zieman, R. Wetzel et K.L. Webb. 1983. Tidal exchange of nitrogen and phosphorus between a mesohaline vegetated marsh and the surrounding estuary in the lower Chesapeake Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 16: 321-332.
- Wolaver T.G. et J.D. Spurrier. 1988. Carbon transport between a euhaline vegetated marsh in South Carolina and the adjacent tidal creek: contributions via tidal inundation, runoff and seepage. *Marine Ecology - Progress Series*, 42: 53-62.
- Wolf W.J., M.J. Eeden et E. Lammens. 1979. Primary production and import of particulate organic matter on a salt marsh in the Netherlands. *Netherlands Journal of Sea Research*, 13: 244-255.
- Woodwell G.M., D.E. Whitney, C.A.S. Hall et R.A. Houghton. 1977. The Flax Pond ecosystem study: exchanges of carbon in water between a salt marsh and Long Island Sound. *Limnology and Oceanography*, 22: 833-838.
- Yelverton G.F. et C.T. Hackney. 1986. Flux of dissolved organic carbon and pore water through the substrate of a *Spartina alterniflora* marsh in North Carolina. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 22: 255-267.
- Yin K.D., P.J. Harrison, S. Pond et R.J. Beamish. 1995. Entrainment of nitrate in the Fraser River Estuary and its biological implications .1. Effects of the salt wedge. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 40, 5: 505-528.
- Yoon W.B. et R. Benner. 1992. Denitrification and oxygen consumption in sediments of two south Texas estuaries. *Marine Ecology-Progress Series*, 90: 157-167.
- Zimmerman A.R. et R. Benner. 1994. Denitrification, nutrient regeneration and carbon mineralization in sediments of Galveston Bay, Texas, USA. *Marine Ecology-Progress Series*, 114, 3: 275-288.
- Zwolsman J.J.G. 1994. Seasonal variability and biogeochemistry of phosphorus in the Scheldt Estuary, South-West Netherlands. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 39, 3: 227-248.

