

BILAN AZOTE DES FLUX TIDAUX D'UN MARAIS SALE A VEGETATION HALOPHYTE

Céline SILVA, Marieke RAILLARD, Alain BODOY et Jérôme HUSSENOT

Centre de Recherche en Ecologie Marine et Aquaculture
BP 5 17137 L'Houmeau, France.

Mots-clés : marais salé, halophytes, azote, bilan de masse, *Halimione portulacoides*, salicornes

Résumé : Au printemps 2001, au cours d'un cycle complet de marée, les flux d'azote entre la mer et un marais salé ont été calculés. Le marais (1198 m²) était recouvert à 75% par des halophytes, avec 46% par l'obione *Halimione portulacoides*. Le bilan azoté montre que le marais salé importe de l'azote micro-particulaire (+2,09 g) par sédimentation, exporte de l'azote dissous (-4,13 g), et que la part des macro-éléments (-1,02 g en faune et déchets végétaux) dans le bilan de masse global (-3,06 g) est non négligeable. Les flux d'azote dissous sont majoritairement sous forme inorganique pour le flux entrant (principalement NO₃), et sous forme organique pour le flux sortant. La végétation halophyte de ce marais semble donc jouer un rôle prépondérant dans les échanges tidaux d'azote, par une action mécanique sur l'azote particulaire, et biologique sur l'azote dissous.

NITROGEN BALANCE OF TIDAL FLUXES IN A COASTAL SALT MARSH WITH HALOPHYTES

Keywords : salt marsh, halophytes, nitrogen, mass balance, *Halimione portulacoides*, sea purslane, sampshire

Abstract : In spring 2001, during a complete tidal cycle, nitrogen fluxes between the sea and the salt marsh were calculated. The marsh (1198 m²) covered in 75 % by halophytes, with 46 % by the sea purslane, *Halimione portulacoides*. The nitrogen balance shows that the salt marsh imports nitrogen micro-particules (2,09 g) by sedimentation, exports dissolved nitrogen (4,13 g), and that the macro-element part (-1,02 g in fauna and vegetable refuse) in the global mass balance (3,06 g) is not unimportant. Nitrogen fluxes are mainly under inorganic form for the incoming flux (mainly NO₃), and under organic form for the outgoing flux. The halophyte vegetation of this marsh seems to play thus a dominating role in the tidal nitrogen exchanges, by a mechanical action on the nitrogen particules, and a biologic action on the dissolved nitrogen.

INTRODUCTION

La côte atlantique française comporte de nombreuses zones intertidales à alluvions récentes, où les plantes halophytes se développent en abondance (Verger, 1968). Il s'agit de la partie supérieure des estrans vaseux (dénommée schorre ou marais salé), de la levée latérale des chenaux, ou d'anciens marais salés endigués, remis en liaison avec la mer par des brèches ou des ouvrages de prise d'eau détériorés. Les fourrés argentés à obione de l'*Halimionetum portulacoidis*, ou les champs de salicornes, peuvent avoir des effets sur la qualité de l'eau de mer qui les inonde régulièrement. Peu de travaux ont été réalisés sur ces aspects concernant l'obione présente essentiellement en Europe. Plus nombreux sont les travaux sur les salicornes, présentes dans le monde entier, aussi bien en zone littorale qu'en zone désertique. Certaines de ces espèces sont aujourd'hui

cultivées pour en extraire de l'huile ou pour la consommation humaine, et parfois dans le but de traiter les eaux de rejet d'aquaculture (Brown et al., 1999). Pour appréhender ces phénomènes, une première campagne de mesures a été engagée au printemps 2001, de façon à pouvoir quantifier les flux hydriques, et établir un bilan de masse des flux tidaux azotés sur un cycle de marée complet. Tous les éléments azotés transportés par l'eau ont été analysés : N-dissous, N-micro-particulaire, N-macro-particulaire. Un site d'étude a été choisi de façon à pouvoir quantifier avec précision les volumes d'eau échangés et permettre la mesure des flux de matière azotée.

MATERIELS ET METHODES

Le site d'étude

Le marais choisi est situé dans une zone de marais maritimes ostréicoles et salicoles de l'île de Ré (Charente-Maritime, France), à proximité du port

de Loix en Ré. Il s'agit d'un marais endigué, anciennement utilisé pour des activités salicoles, mais laissé à l'abandon depuis suffisamment de temps pour qu'il soit revenu à l'état de friche végétalisée de type schorre où dominant l'obione (*Halimione portulacoides*) et les salicornes pérennes (*Sarcocornia fructicosa*, *Sarcocornia perennis*) ou annuelles (*Salicornia emerici*, *Salicornia obscura* et *Salicornia ramosissima*).

L'estimation de la couverture végétale

Une estimation de la superficie de la couverture végétale du marais a été faite par une méthode non destructive. En mai 2001, une photo aérienne argentique du marais a été prise en vol à basse altitude. La photo oblique, après numérisation, a été redressée et recadrée (Adobe Illustrator) pour rentrer dans une enveloppe géoréférencée du marais fournie par un relevé de géomètre au sol (Autocad). L'image a été ensuite reprise sous Arc View 3.2, et retravaillée pour délimiter les différentes zones de végétation en s'aidant d'observations au sol.

Le régime hydrologique du marais

Le marais est alimenté en eau de mer, via un marais adjacent, par un chenal raccordé à une baie (la Fosse de Loix) par une écluse à quatre portes. Le régime hydrologique du marais a été déterminé en mesurant les variations du niveau d'eau dans le marais, en fonction des coefficients de marée, durant les mois de mai et juin 2001.

L'analyse des composés azotés

L'étude a eu lieu pendant un cycle de marée de coefficient 94, les 24 et 25 avril 2001. L'eau de mer a été prélevée à intervalles réguliers de 15 min pendant le flot et 30 min pendant le jusant ; puis une filtration sélective (tableau I) a été réalisée. Les nutriments ont été dosés avec un auto-analyseur SKALAR, et l'azote total particulaire au moyen d'un analyseur CHN Carlo Erba 1500. Les macro-éléments ont été prélevés avec un filet à plancton (500 µm) et fixés dans une solution de formol à 10%. Ils ont ensuite été triés, séchés, pesés et broyés pour permettre le dosage de l'azote total.

La mesure des flux hydriques

Outre ses caractéristiques végétales, ce marais a aussi été choisi parce qu'il est totalement endigué à l'exception d'une entrée unique. Un canal rectiligne ($L \times l \times h = 200 \times 30 \times 48$ cm) a été installé à l'ouverture, et équipé de moyens de mesure des flux hydriques entrant et sortant : un préleveur d'eau automatique (Hydrologic 1011), un capteur de niveau à ultrasons (PROBE de Milltronics) et un courantomètre électromagnétique (FLO-MATE 2000 de Cometec). Les données ont été enregistrées en continu pendant tout le cycle de

marée, par une centrale d'acquisition (LI-1000 de LI-COR) avec un pas de temps d'une minute.

Le débit au temps t a été calculé : débit ($L \cdot \text{min}^{-1}$) = section mouillée au temps t (cm^2) * vitesse du courant au temps t ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) * 60/1000. La section mouillée a été obtenue en multipliant la largeur du canal (30 cm) par la hauteur d'eau mesurée dans le canal à l'instant t . Afin de correspondre aux intervalles de temps des analyses d'eau de mer, les valeurs de débits par minute ont été cumulées sur des périodes de 15 et 30 minutes pendant le flot et le jusant respectivement ($L \dots 15 \text{min}^{-1}$ et $L \dots 30 \text{min}^{-1}$), à l'exception des périodes proches des renverses de courant, où le pas de temps de 1 minute a été conservé.

Le calcul du bilan des flux hydriques de matière azotée

Les flux de matière, calculés pour des pas de temps t_p (1, 15 ou 30 min.), sont obtenus par le produit des concentrations et des débits correspondants : flux ($\text{g} \cdot t_p^{-1}$) = concentration ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) * débit ($L \cdot t_p^{-1}$). Enfin les flux (g) entrants et sortants sont la somme de tous les flux ($\text{g} \cdot t_p^{-1}$) pendant le flot, et le jusant respectivement. Conventionnellement, en écologie littorale le flux entrant est positif et le flux sortant négatif (Dame & Gardner, 1993). Le bilan des flux a été calculé en additionnant les flux : Bilan (en quantité de matière) = flux entrant (flot) + flux sortant (jusant). Un bilan positif correspond à une entrée de matière, donc une importation du marais, et un bilan négatif correspond à une exportation de matière hors du marais.

Tableau I : Filtrations sélectives et analyses des échantillons d'eau de mer.

Table I : Types of seawater filtration for different analyses.

| Paramètres azotés | Séparation (µm) |
|--|-----------------|
| Dissous Inorganique (NIDT) NIDT = $\text{N-NH}_{3,4} + \text{N-NO}_2 + \text{N-NO}_3$ | < 0,7 |
| Dissous Organique (NODT) NODT = NOD + N-Urée | < 0,7 |
| Particulaire total (N-Partic) | 0,7 - 500 |
| Macroscopique (N-Macro) N-Macro = Macrofaune + Macroflore + Macrodétritus | > 500 |

RESULTATS

La végétation du marais

La surface totale du marais a été évaluée à 1198 m² (figure 1). En mai 2001, l'obione (*H. portulacoides*), à elle seule, occupait 46,4% de la surface totale du marais, et la végétation dans son ensemble en recouvrait 75,8%, soit 909 m².

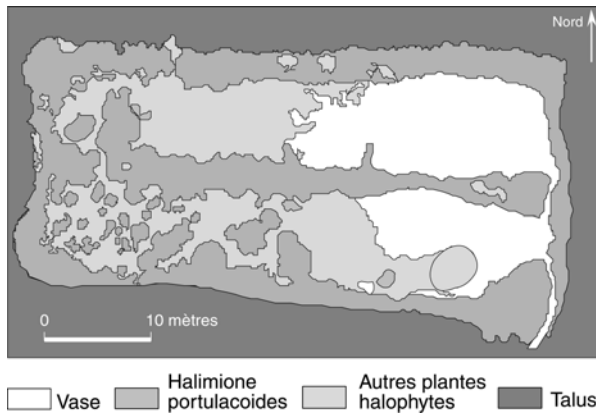


Figure 1 : Plan du marais étudié et occupation des plantes halophytes au printemps (Mai 2001).
 Figure 1 : Plan of the studied salt marsh with repartition of halophyte plants, in spring period (May, 2001).

L'hydrologie du marais

La figure 2 montre que le marais ne s'alimente en eau que pour des coefficients de marée supérieurs à 70. Par coefficient de l'ordre de 90, le marais est recouvert seulement par 20 cm d'eau environ.

Au cours du cycle étudié, les flux d'eau de mer entrant et sortant mesurés étaient respectivement de $166,8 \cdot 10^3$ L et $-186,6 \cdot 10^3$ L.

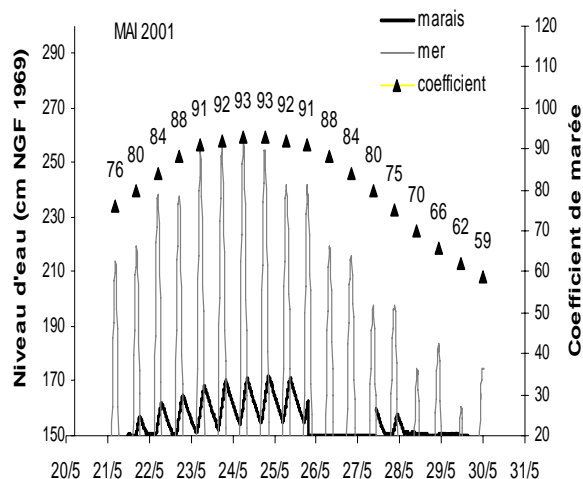


Figure 2 : Niveau de l'eau atteint dans la mer et dans le marais étudié selon les coefficients de marée.
 Figure 2 : Sea-water level in the bay and in the salt marsh according to tide amplitudes.

Les flux tidaux d'azote et le bilan de masse

le bilan de masse d'azote global est négatif (-3,06 g) (figure 3). La quantité d'azote représentée par les macro-éléments est très faible en comparaison des formes dissoutes et micro-particulaires contenues dans l'eau. Elle ne représente que 1,4% de l'azote total transitant au cours du cycle de marée. Les macro-éléments sont constitués de déchets végétaux (feuilles d'obione, macroalgues, pétales de fleurs des talus, débris indéterminés) ainsi que de certaines espèces vivantes animales (*Carcinus maenas*, *Palaemonetes varians*, *Nereis diversicolor*, *Eulalia*

viridis, *Hydrobia ulvae*) ou de cadavres d'animaux terrestres piégés probablement lors de la montée des eaux (Raillard, 2001).

Les flux d'azote micro-particulaire entrant (19,9 g) et sortant (-17,8 g) sont importants dans les deux sens, avec sur un cycle un bilan positif (+ 2,09 g) (figure 3).

L'azote dissous (NDT) est exprimé sous forme organique (NODT) et inorganique (NIDT). Ceci permet de mettre en évidence l'inégalité de répartition de ces deux composants de l'azote entre le flot et le jusant. En effet, le flux entrant est principalement composé d'azote inorganique (67,8% de $NDT_{entrant}$), alors qu'en sortie c'est l'organique qui domine largement (70,2% de $NDT_{sortant}$). Le bilan total des deux formes de l'azote dissous est négatif (-4,13 g), l'exportation par le marais étant principalement organique.

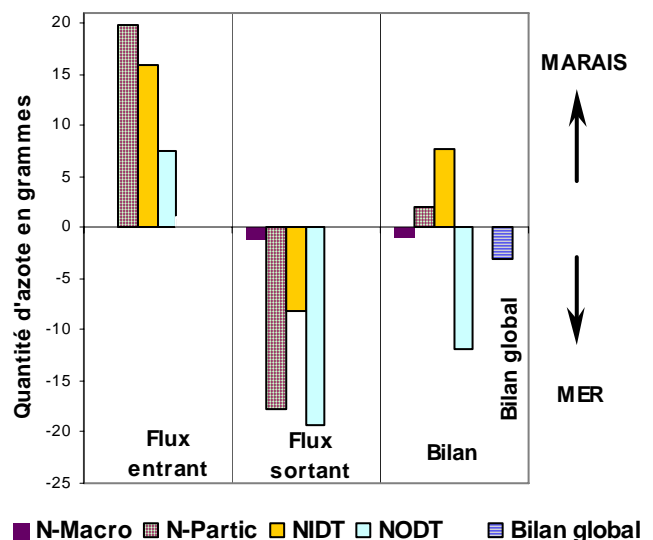


Figure 3 : Flux entrant, sortant et bilan de marée en azote macroscopique (N-Macro), micro-particulaire (N-Partic), inorganique dissous (NIDT) et organique dissous (NODT). Le bilan global est la somme de tous les flux d'azote au cours du cycle de marée.
 Figure 3 : Entering and leaving nitrogen fluxes and global tide balance.

DISCUSSION

L'eau de mer ne pénètre dans le marais à marée montante que lorsque les coefficients sont supérieurs à 70. Bridée par le réglage des écluses, l'eau ne dépasse pas 20-30 cm de hauteur aux vives eaux les plus importantes. Ceci permet toutefois le développement d'une importante couverture végétale, avec une forte biodiversité (11 espèces de plantes halophytes référencées).

Les flux hydriques d'azote macroscopique sont très faibles en comparaison des flux particulaires et dissous (figure 3). Ceci tient au fait que les macro-éléments sont faiblement chargés en azote et présents en faibles quantités. Cependant, ce bilan de l'azote macroscopique est dans le sens de l'exportation, comme l'ont déjà observé Bouchard et

Lefeuvre (1996) à propos des macro-détritus issus de marais à obione en Baie du Mont-Saint-Michel.

Le bilan d'azote particulaire est positif (figure 3). L'azote particulaire est contenu dans les matières en suspension (MES) qui sédimentent ou restent piégées dans la végétation du marais (Asjes & Dankers, 1994). En particulier, *H. portulacoides*, espèce buissonnante ligneuse persistante, dont le recouvrement atteint plus de 46% dans le marais, forme une prairie très dense dont le réseau de tiges et de racines constitue un piège efficace de la matière particulaire.

L'analyse séparée de l'azote dissous organique et inorganique (figure 3) a permis de mettre en évidence un changement de la nature de la matière dissoute transitant au flot et au jusant. Les quantités totales d'azote dissous entrant et sortant sont proches (+23,44 g au flot et -27,57 g au jusant) mais le rapport azote organique/azote inorganique s'inverse après la renverse de courant. Le marais importe majoritairement de l'azote inorganique et exporte de l'azote organique. Ceci confirme les travaux de Bel Hassen (2001) observés à une échelle plus globale sur une zone de marais de l'île de Ré, très voisine de notre site d'étude. De plus, les concentrations moyennes des composés dissous de l'azote du flot et de celui du jusant (tableau II) montrent que la forme inorganique essentiellement importée est l'azote nitrique (NO₃), alors que les eaux sortantes sont largement dominées par de l'azote organique dissous (NOD), sous des formes autres que l'urée. Les taux d'oxygène importants de l'eau stockée temporairement dans le marais nous permettent de penser que les phénomènes de dénitrification sont réduits, et que les nitrates importés sont consommés essentiellement par l'assimilation des halophytes du marais.

Tableau II : Concentrations moyenne des différentes formes de l'azote dissous dans l'eau durant le flot et le jusant (µM de N).
Table II: Mean water concentrations of various forms of dissolved nitrogen during the stream and the ebb tide (µM of N).

| | Flot | | Jusant | |
|---------------------|---------|-------------|---------|-------------|
| | Moyenne | Min-Max | Moyenne | Min-Max |
| N-NH _{3,4} | 1,35 | (0,78-1,94) | 1,32 | (0,84-2,04) |
| N-NO ₂ | 0,26 | (0,11-0,32) | 0,11 | (0,03-0,27) |
| N-NO ₃ | 4,52 | (1,10-6,04) | 1,36 | (0,10-4,53) |
| NOD | 2,81 | (0,88-7,09) | 6,74 | (2,47-8,29) |
| N-Urée | 0,91 | (0,59-1,56) | 0,82 | (0,44-1,50) |

Les plantes halophytes du marais jouent un rôle déterminant dans la régulation des flux d'azote circulant, par une double action : mécanique et chimique. Ce type d'échanges : importation de matière particulaire et relargage de matière organique dissoute, a été observé dans des marais salés européens (Lefeuvre et al., 1994 ; Boorman et al., 1994). D'après certains auteurs, ce type de marais est nommé « intermédiaire » (Dame & Gardner, 1993), c'est à dire à mi-chemin

entre les stades immature et mature décrits par Boorman et al.(1994).

Cependant, il est important de noter que ces observations ne concernent qu'un seul cycle de marée. Le même type d'observations devrait être renouvelé à plusieurs reprises sur la période printanière pour confirmer ou non cette tendance saisonnière. De plus il serait intéressant également de déterminer avec exactitude, dans quelles proportions les différentes espèces de plantes halophytes sont responsables de la transformation de l'azote minéral en azote organique par des études en microcosmes, comportant une seule espèce végétale à la fois. Ce travail en microcosmes permettrait également, dans une optique appliquée à l'aquaculture (Brown et al., 1999), de sélectionner la ou les plantes halophytes ayant le meilleur pouvoir épurateur de l'azote, sachant que l'intérêt, dans cette optique, pourrait rester limité si l'eau traversant un champ d'halophytes ne piège pas vraiment l'azote dissous mais ne fait que changer une forme dissoute (minérale) pour une autre (organique).

Remerciements

Nous tenons à remercier D. Pattier (S.B.C.O.) pour la détermination des espèces végétales, M. Bréret, F. Mornet et L. Joassard pour les analyses, M. Guillaud, G. Guillou et M. Prineau pour la logistique terrain et Y. Descatoire pour le travail de dessin sous Illustrator. Cette étude a été réalisée dans le cadre du contrat de plan IFREMER/Poitou-Charentes (2000-2006).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASJES, J. & DANKERS, N.M.J.A., 1994. *Variations in tidal exchange processes between a Dutch salt marsh, the Slufter, and the North Sea*. In : Global Wetlands : Old World and New. MITSCH, W.J., (ed.), Elsevier Science B.V.: 201-214.
- BEL HASSEN, M. & PROU, J., 2001. A GIS-based assessment of potential aquacultural nonpoint source loading in an Atlantic Bay (France). *Ecol. Appl.*, **11**: 800-814.
- BOORMAN, L.A., HAZELDEN, J., ANDREWS, R. & WELLS, J.G., 1994. *Organic and nutrient fluxes in four north-west European salt marshes*. In : Changes in Fluxes in Estuaries : Implications from Science to Management. DYER, K.R. & ORTH, R.J. (eds), Fredensborg, Olsen & Olsen : 243-248.
- BOUCHARD, V. & LEFEUVRE, J.C., 1996. Primary production and macro-detritus dynamics in a European salt marsh : carbon and nitrogen budgets. *Aquat. Bot.*, **67** : 23-42.
- BROWN, J.J., GLENN, E.P., FITZSIMMONS, K.M. & SMITH, S.E., 1999. Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent. *Aquaculture*, **175** : 255-268.
- DAME, R.F. & GARDNER, L.R., 1993. Nutrient processing and the development of tidal creek ecosystems. *Mar. Chem.*, **43**: 175-183.
- LEFEUVRE, J.C., BERTRU, G., BUREL, F., BRIENT, L., CREACH, V., GUEUNE, Y., LEVASSEUR, J., MARIOTTI, A., RADUREAU, A., RETIERE, C., SAVOURE, B. & TROCCAZ, O., 1994. *Comparative studies on salt marsh processes : Mont Saint Michel Bay, a multi-disciplinary study*. In : Global Wetlands : Old World and New. MITSCH, W.J., (ed.), Elsevier Science B.V.: 215-234.
- RAILLARD, M., 2001. Caractéristiques biotiques et abiotiques d'un marais salé naturel à plantes halophytes. Rapport DTSM-CNAM/CREMA, 45 p.+ annexes.
- VERGER, F., 1968. Marais et wadden du littoral français. Biscaye frères, Bordeaux, 541 p.