

Article

« Bilan hydrologique d'un marais littoral à vocation agricole : Le marais de Moëze (Charente-Maritime, France) »

F. Giraud, C. Chevallier, H. Medion et R. Fleury

Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 4, n° 4, 1991, p. 521-542.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/705114ar>

DOI: 10.7202/705114ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

Bilan hydrologique d'un marais littoral à vocation agricole : Le marais de Moëze (Charente-Maritime, France)

Summer water budget for a french coastal agricultural marsh : the Moëze marsh (Charente-Maritime, France).

F. GIRAUD¹, C. CHEVALLIER², H. MEDION², R. FLEURY¹

Reçu le 12 septembre 1990, accepté pour publication le 8 juillet 1991*.

RÉSUMÉ

En France, les sécheresses consécutives des années 1985, 1986, 1989 et 1990 ont mis en lumière les problèmes relatifs à l'alimentation en eau potable, l'irrigation des terres agricoles et la préservation des écosystèmes aquatiques. Dans le cas des zones humides, continentales et littorales, caractérisées par une compartimentation hydraulique souvent complexe, le manque de connaissance se fait particulièrement sentir. Bien que de nombreux travaux aient permis d'évaluer l'évaporation des masses d'eau et l'évapotranspiration de certaines espèces d'hydrophytes et d'hélophytes, les études débouchant sur des bilans quantitatifs restent peu fréquentes. Le bilan hydrologique du marais de Moëze (2250 ha) a été calculé par décade entre le 11/06/89 et le 31/08/89. Il prend en compte le débit au droit de l'ouvrage d'alimentation, les volumes prélevés pour l'irrigation hors marais, les infiltrations et l'évapotranspiration sur les 318 km de canaux. L'estimation de la consommation d'eau des parcelles est globalisée au niveau des mesures d'infiltration.

Les pertes par infiltration sont secondaires (9,4 %) au regard des volumes prélevés pour l'irrigation (38,0 %) et évapotranspirés par les canaux (43,7 %) dont 51,1 % uniquement par les 28,6 % des plans d'eau colonisés par *Typha latifolia*.

1. Université de Rennes I, Laboratoire d'Evolution des Systèmes Naturels et Modifiés, Campus de Beaulieu, av. du Général Leclerc, 35042 Rennes Cedex, France.
2. INRA, Domaine expérimental de Saint-Laurent-de-la-Prée, 17450 Fouras.

Communication présentée au 34^e Congrès de l'Association Française de Limnologie, Metz-Nancy, 29-30 mai 1990.

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 15 septembre 1992.

L'optimisation de la gestion estivale de l'eau d'un marais littoral agricole nécessite dans un premier temps de minimiser les pertes. C'est essentiellement sur la consommation d'eau des canaux colonisés par les hélophytes que l'on peut intervenir. Nous proposons un abaque qui permet d'évaluer l'importance des économies d'eau réalisées en fonction de plusieurs scénarios d'aménagement du réseau hydraulique.

Mots clés : bilan hydrologique, marais, méthodologie, évapotranspiration, infiltration.

SUMMARY

In France, the drought that occurred during the years 1985, 1986, 1989 and 1990 have emphasized the problems of freshwater supplies for human consumption, for irrigation and for the conservation of aquatic systems. Today the water has to be economized through a rationalized management. Water balance must be evaluated in order to compare supply and demand. Hydrological functioning is particularly badly known as far as continental and coastal wetlands are concerned, probably because of a generally very complex hydrological partition. Many papers deal with the evaporation rate from a clear water surface or the evapotranspiration rate from several species of hydrophytes and helophytes. However studies of quantitative water budgets of wetlands remain few in number.

This paper reports an analysis of the budget summer water in that was a salt marsh now containing freshwater. The 25 km² marsh of Moëze is located on the french atlantic coast ; it has been progressively constituted by filling up a tidal bay since the flandrien period. The soils correspond to fluvio-marine silts, locally called « bri », accumulated over several tens of meters thick. The marsh is bounded on the North by the ancient limestone coast, on the South by the Arnoult River, and on the West by the coastline. Its drainage network includes permanently flowing main canals and also small silted-up ditches which sometimes dry up in summer and are largely colonized by aquatic plants, particularly *Typha latifolia*. The channels network is very dense (144 meters of ditches per hectare) and complex because of a close connection between all the canals and ditches. The regional oceanic climate is characterized by a surplus water balance from October to April (+ 315 mm) and quite a short one from May to September (- 338 mm).

The important terms of the water budget equation in this study were : the quantity of water pumped from the Arnoult River through the inflow sluiceway (Q_a), the precipitations (P), the irrigation out of the marsh (I_r), the evapotranspiration of water bodies (E_{po}), the seepage through canals and ditches (I_s), and the change in water soil storage (V_s). These terms are not equally susceptible to be measured. Groundwater seepage and evapotranspiration are difficult to measure and they are often determined by difference, but, they contain the residual error of all the terms. The methods to evaluate each term of water budget were carried as follows :

1. As the inflow gate functions as a siphon, the flow rate (Q_a) was calculated with the drowned orifice formula (LENCASTRE, 1984). The upstream and downstream water levels were permanently recorded by 2 limnigraphs. The upstream and downstream water velocities were measured every 2 days with a micro-currentmeter.
2. The precipitation values (P) used in the water budget equation correspond to the average of 4 rain gauges placed around the marsh.
3. The evapotranspiration of the channel network (E_{po}) was directly estimated through 4 experimental floating tanks (0.50 x 0.55 x 1.05 m size) previously used by GIRAUD (1985). One of the tanks was placed in clear water, the others was planted the typical aquatic vegetation of the marsh (*Lemna sp.*,

Ceratophyllum sp., and *Typha latifolia*). The drop the water levels in the tanks corresponded to the loss of water due to evapotranspiration. All the tanks were filled up to a fixed level, and the amount of water added, measured every 2 days.

4. The outputs for irrigation (Ir) concern 298 ha of maize out of the marsh, and 23 farmers. The water amounts taken off were estimated from an inquiry of irrigation practices associated to a field control.

5. The water losses by seepage (Is) through canals and ditches were directly measured on the field by using the closed basin method. A length of canal was closed by 2 watertight bulkheads. The fall of water level was recorded and the amount of water added to maintain a fixed level was measured. This method is considered by KRAATZ (1977) as being the most accurate specially for low seepage. The fall of water level never exceeds 10 % of the water depth in the basin. 34 canals and ditches in the marsh were sampled. According to CHEVALLIER *et al.* (1984), 3 parameters influencing the soil permeability were measured : granulometry, CaCO₃ content and sodicity. After the sampling plan we have retained 4 experimental canals (average length = 47 m, average water surface = 135 m², average depth = 0.44 m).

6. The water storage in the soil (Vs) was evaluated by analyzing the groundwater table fluctuations and moisture changes.

The water budget calculated for 10-day periods depending on the climatology calculations, from 10th June 1989 to 31th August 1989. The water losses due to seepage were secondary (9.4 %) compared to the amounts of water taken off by irrigation (38.0 %) and channel network evapotranspiration (43.7 %). The water consumption of helophytes such as *Typha latifolia* was 2 to 3 times higher than the evaporation of a clear surface water body as shown in figure 3. In the marsh of Moëze, 51.1 % of channel evapotranspiration was due to the colonization by *Typha latifolia* of the canals and ditches although they represent only 28.6 % of the channel network surface.

This study shows that is possible to quantify a water budget for a large scale wetland from field measurements associated to experimental approaches, with a satisfactory accuracy : less than 10 %. To reduce the water consumption of the marsh of Moëze, three essential recommendations may be given : the reduction of the global channel network surface, the cleaning of a part of ditches colonized by *Typha latifolia*, or the combination of both techniques. According to the different management schemes, it is possible to predict the amounts of freshwater saved (fig. 5).

Key-words : hydrologic budget, freshwater marsh, study methods, evapotranspiration, seepage losses.

INTRODUCTION

Les sécheresses consécutives des années 1985, 1986, 1989 et 1990 ont mis en lumière l'acuité des problèmes relatifs à l'utilisation des ressources en eau. Que ce soit pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation ou la préservation des écosystèmes aquatiques, la gestion rationnelle de l'eau passe aujourd'hui par une politique d'économie. Elle doit conduire à confronter, pour

chacun des usages actuels ou futurs, l'offre à la demande, c'est-à-dire à évaluer les termes du bilan hydrologique.

Dans le domaine de la production agricole, l'eau est devenu l'un des principaux facteurs limitants. L'irrigation est pratiquement indispensable dans l'ensemble des régions céréalières pour les cultures poursuivant leur cycle végétatif en juillet-août, c'est-à-dire essentiellement le maïs. Cette situation est d'autant plus délicate que les besoins en eau pour l'agriculture sont concentrés sur une courte période de 2 à 3 mois, de la fin juillet au début septembre, et qu'ils intéressent des volumes importants, du même ordre de grandeur que la demande des autres utilisateurs (industriels, populations urbaines...).

La difficulté de trouver des ressources en eau constitue actuellement le principal frein au développement de l'agriculture en Poitou-Charentes. Les possibilités de prélèvements à partir des eaux de surface sont très limitées, en raison des faibles débits d'étiage des rivières. Ainsi, une politique de stockage des eaux hivernales en vue de leur utilisation estivale est envisagée pour répondre aux besoins de la profession agricole.

Dans le cas particulier des marais charentais, on envisage la création de retenues qui stockeraient les eaux hivernales, les réseaux hydrauliques actuels permettraient alors de conduire l'eau vers les terres agricoles à irriguer. La gestion rationnelle de l'eau nécessite d'éviter le gaspillage par des pratiques correctes d'irrigation et de minimiser les pertes occasionnées lors du transport et du stockage.

En raison d'une compartimentation hydraulique souvent complexe, c'est essentiellement pour les marais côtiers que le manque de connaissance concernant la gestion estivale des eaux se fait sentir. Il apparaît dès lors indispensable d'évaluer les termes d'un bilan hydrologique. Il s'agit alors d'estimer la quantité d'eau nécessaire à l'alimentation d'une surface de marais afin d'en assurer une gestion optimale. Bien que de nombreux travaux aient permis d'évaluer l'évaporation des masses d'eau ainsi que l'évapotranspiration de plusieurs espèces d'hydrophytes et d'hélophytes (CRUNDWELL, 1986), les études débouchant sur le bilan hydrologique de zones humides restent cependant peu fréquentes. Les travaux concernant l'évaporation des masses d'eau visent généralement à comparer la fiabilité des méthodes de calcul existantes (POUVAUD, 1988), ou à rechercher de nouvelles équations tenant compte de l'inertie thermique de l'eau (McCUEN et ASMUSSEN, 1973), (WEISMAN, 1975), (SILL, 1983) ou de sa teneur en sels (SHALHOTRA *et al.*, 1987). Certains auteurs proposent des méthodes pour extrapoler des mesures climatiques (STEWART et ROUSE, 1976) ou obtenues expérimentalement à partir de bacs évaporatoires (ROHWER et FOLLANSBEE, 1934), (KUZNETSOV, 1971), au calcul de l'évaporation de plans d'eau à grande échelle.

L'évapotranspiration des végétaux aquatiques a été abordée sous l'angle physiologique (BAVEL, 1968), énergétique (SMID, 1975), (PRIBAN et ONDOK, 1980) ou dans une optique de gestion d'eau. Mis à part les résultats de EISENHLOR (1966) pour qui l'évapotranspiration de *Typha latifolia* (ETh) sous climat océanique humide ne représente que 75 % de l'évaporation d'un plan d'eau libre (ET), l'ensemble des auteurs s'accordent à conclure que le rapport ETh/ET est généralement supérieur à 1 pour la majorité des végétaux

aquatiques. Il est de 0,9 pour *Lemna minor* (BUSK *et al.*, 1983) et *Azolla pinnata* (ANDERSON et IDSO, 1987), de 1,4 pour *Typha angustifolia* en savane tropicale (BREZNY *et al.*, 1973), de 1,5 (DER WEERT et KAMERLING, 1974) à plus de 3 pour *Eichhornia crassipes* (PENFOUND et EARLE, 1948), (TIMMER et WELDON, 1967) (BENTON *et al.*, 1978), voisin de 2 pour *Sphagnum sp.* (CLYMO, 1973), (NICHOLS et BROWN, 1980).

DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

Le marais de Moëze est une unité hydraulique de 2250 ha située au sud de La Rochelle, sur la côte atlantique française (fig. 1). Comme l'ensemble des marais de l'Ouest de la France, il résulte du comblement d'anciens golfes marins lors des transgressions flandriennes. Les sédiments du substratum, appelés bri, sont des argiles fluvio-marines accumulées sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur.

Le marais de Moëze est limité au nord par l'ancienne côte calcaire (fig.2), au sud par le havre de Brouage, et à l'ouest par la ligne de rivage. Des écluses à marées sur le havre de Brouage séparent les eaux douces à l'amont, des eaux marines à l'aval. Il s'agit d'un ancien marais salant, totalement géré en eau douce depuis 1930, qui conserve la structure typique des salines du XI^e siècle avec une mosaïque de bassins entre lesquels circule un réseau complexe de canaux. Depuis l'abandon de la saliculture au XVIII^e siècle, canaux et bassins se sont fortement envasés et ont été largement colonisés par les végétaux aquatiques.

Le réseau hydraulique est particulièrement dense (144 mètres de fossés/ha) et complexe en raison de l'interconnexion de tous les canaux. Il se compose de canaux principaux d'une profondeur variant de 0,60 m à 1,20 m, et de fossés secondaires peu profonds (moins de 0,60 m) colonisés essentiellement par *Typha latifolia*, plusieurs espèces des genres *Lemna* et *Ceratophyllum*. Les fossés secondaires représentent 80,2 % du linéaire total de réseau.

Le climat de type océanique se caractérise par un bilan hydrique très excédentaire d'octobre à avril (+ 315 mm) et largement déficitaire de mai à septembre (- 338 mm). La gestion hydraulique vise à évacuer les eaux excédentaires en hiver et à alimenter le réseau en eau douce durant l'été à partir du canal de Brouage et de la rivière l'Amoult.

Depuis les années 1980, le marais de Moëze s'oriente de plus en plus vers la céréaliculture intensive au détriment de l'élevage bovin traditionnel. L'augmentation des surfaces cultivées s'accompagne d'une restructuration importante du parcellaire qui aboutit globalement à la simplification du réseau hydraulique et à la suppression des anciens bassins salicoles. Entre 1980 et 1989, les îlots de culture sont passés de 70 ha à plus de 700 ha. Simultanément, sur les terres hautes avoisinantes, les cultures irriguées de maïs connaissent une forte expansion : 37 ha en 1980, 298 ha en 1989.

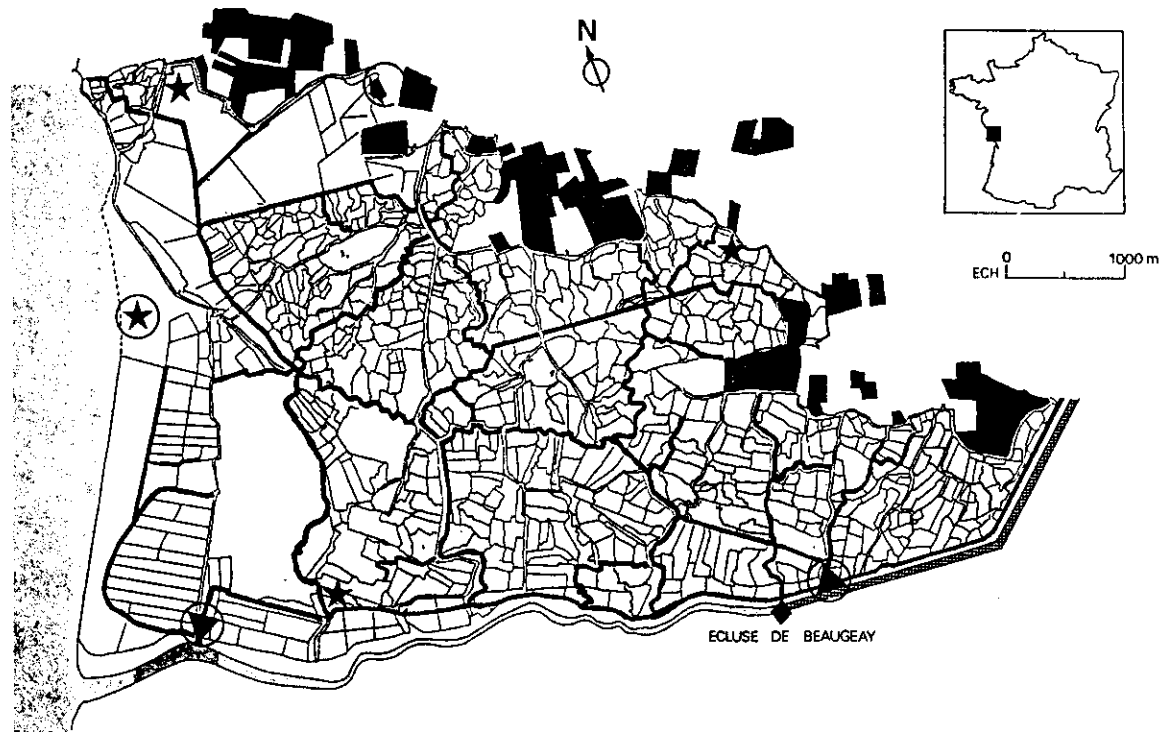













Figure 1 Le marais de Moëze.
Location of Moëze marsh.

Canaux principaux		Main canals	Ecluse à marée		Tidal gate	Postes pluviométriques provisoires		Temporary rain gauges stations
Canaux secondaire		Secondary canals	Eau douce		Fresh water	Poste pluviométrique permanent (station INRA)		Permanent rain gauge station (INRA station)
Ecluse d'alimentation		Inflow sluice gate	Eau marine		Marine water	Cultures irriguées de maïs		Irrigated cultures of maize
Ecluse de vidange		Outflow sluice gate	Sources		Sources			

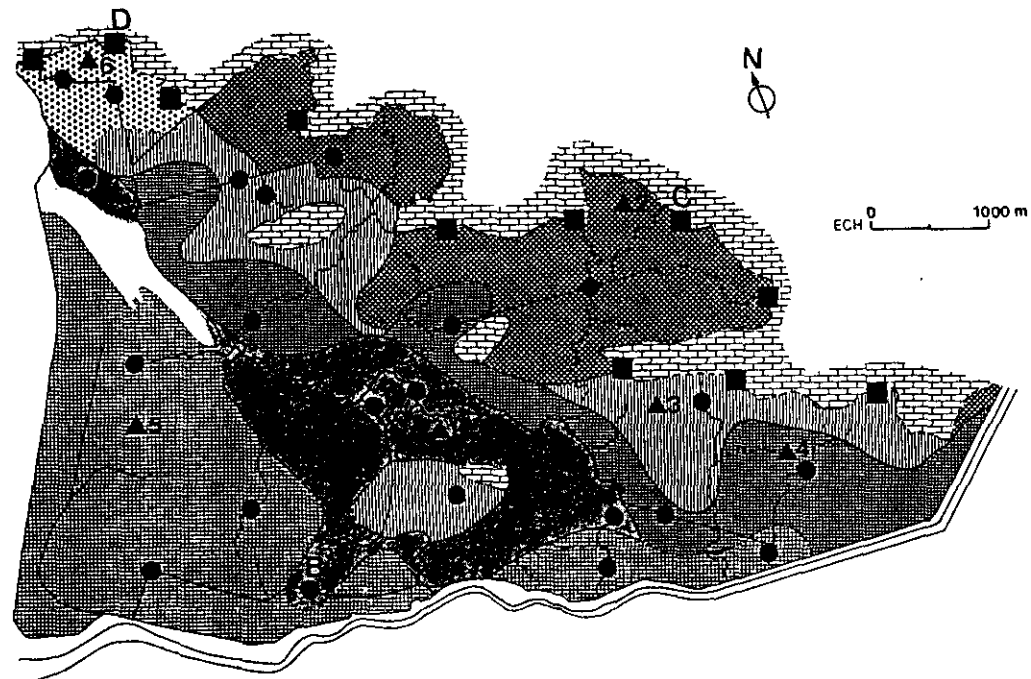


Figure 2 Carte pédologique des sols du marais de Moëze.

Pedologic map of soils Moëze marsh.

Bri récent moyennement carbonaté		Moderately carbonated recent bri	Bri intermédiaire non carbonaté		Uncarbonated middle bri	Canaux de ceinture échantillonnés		Sampled shoreline canals
Bri récent faiblement carbonaté		Little carbonated recent bri	Bri ancien non carbonaté		Uncarbonated ancient bri	Canaux de marais échantillonnés		Sampled marsh canals
Bri récent non carbonaté		Uncarbonated recent bri	Anciennes côte et îles calcaires flamandais		Flandrian limestone coast and islands	Stations de suivi piézométrique		Stations for water table level study
Bri intermédiaires faiblement carbonaté		Moderately carbonated middle bri	Ancien cordon coquiller		Ancient littoral shelly sand bar	Bassins expérimentaux d'infiltration		Experimental seepage basins

MÉTHODES DE CALCUL DU BILAN HYDROLOGIQUE

Les éléments du bilan

Comme le souligne MUSTIN (1982), le bilan hydrologique d'une zone humide devrait être calculé comme le font les hydrologues et hydrogéologues, en comptabilisant les entrées et les sorties. Dans le cas du marais de Moëze, les entrées sont représentées par le débit au droit de l'ouvrage d'alimentation (Q_a), les précipitations (P) et le débit des sources (Q_s) ; les sorties par l'évapotranspiration des plans d'eau (E_{po}) et des parcelles (E_{pa}), les pertes par infiltration souterraine (I_s), la variation du stock d'eau de sol (V_s), le débit de fuite de l'ouvrage de mer (Q_f) et les prélèvements pour l'irrigation hors marais (I_r).

$$B = Q_a + P + Q_s - (E_{po} + E_{pa} + I_s + V_s + Q_f + I_r) \pm dS \quad (1)$$

dS représente la valeur du déséquilibre du bilan et se calcule pour $B = 0$.

Débit de l'ouvrage d'alimentation

L'ouvrage d'alimentation est constitué d'une buse cylindrique de 1,20 m de diamètre intérieur, longue de 12 m et munie d'une vanne à crémaillère. Cet ouvrage fonctionne comme un siphon car le niveau de l'eau à l'aval est toujours supérieur au point le plus haut de l'orifice qui est alors dit complètement noyé. Dans ce cas, le débit est donné par la formule suivante (LENCASTRE, 1984) :

$$Q = \mu \cdot S \cdot \sqrt{2gH + (U_1^2 - U_2^2)} \quad (2)$$

μ = coefficient de débit sans dimension = 0,6

S = section de l'orifice (m^2)

g = $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

H = différence de cote d'eau amont-aval (m)

U_1 = vitesse moyenne de l'eau à l'amont ($m \cdot \text{s}^{-1}$)

U_2 = vitesse moyenne de l'eau à l'aval ($m \cdot \text{s}^{-1}$)

Q = débit de l'ouvrage ($m^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Les vitesses moyennes U_1 et U_2 étaient mesurées tous les 2 jours à l'aide d'un micro-moulinet AOTT (type C2-10-150, hélice n° 1). Chacun des termes U_1 et U_2 correspond à la moyenne de 6 mesures effectuées à 3 profondeurs différentes au centre et au bord de la buse, respectivement à l'amont et à l'aval de l'ouvrage. L'évolution des hauteurs d'eau était enregistrée en continu par 2 limnigraphes à flotteurs OTT calés sur des règles graduées au mm, fixée sur la maçonnerie de l'ouvrage.

Débit d'alimentation des sources

D'après les travaux de SQUARCIONI (1975), et les reconnaissances complémentaires de terrain, nous avons localisé une source alimentant le marais (fig. 1). Nous avons réalisé trois séries de jaugeages entre le mois de juin 1989 et le mois d'août 1989 selon la méthode du seuil jaugeur adaptée aux canaux de faible dimension (REPLOGLÉ et CLEMMENS, 1979), (KRAATZ et MAHAJAN, 1982) (HUMPHERYS, 1986). Le débit maximal a été évalué à $259 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$.

Précipitations

Les apports pluviométriques sont évalués à partir de 3 pluviomètres à lecture directe installés pour les besoins de l'étude, et à partir de la situation climatologique de l'INRA (fig. 1). Les valeurs utilisées pour le calcul correspondent à la moyenne des précipitations reçues par les 4 pluviomètres.

Evapotranspiration des plans d'eau

Nous avons utilisé la méthode des « bacs flottants » adoptée par GIRAUD (1985) pour l'étude de la consommation d'eau de 4 types de canaux de marais, et citée par ROCHE (1963) comme étant celle qui permet le mieux d'évaluer l'évaporation des masses d'eau.

Le dispositif expérimental comprend 4 bacs de plastique blanc d'une surface de $0,57 \text{ m}^2$ ($0,55 \times 1,05 \times 0,55 \text{ m}$) affleurant à 5 cm de la surface de l'eau grâce à des flotteurs en polystyrène. Un des 4 bacs était laissé en eau libre, les 3 autres sont « plantés » avec la végétation caractéristique du marais, respectivement *Lemna*, *Ceratophyllum* et *Typha*. Les mesures étaient effectuées tous les 2 jours en ajoutant un volume d'eau connu jusqu'à affleurement d'une pointe témoin.

Pertes par infiltration des canaux

Les études d'infiltration au travers des berges des canaux comportent 2 types d'approche. La première procède par calculs mathématiques à partir de la description précise des caractéristiques du sol environnant et de la position de la nappe souterraine. La seconde est basée sur des mesures de terrain relativement simples. Parmi celles-ci, nous avons utilisé la méthode du « bassin fermé » décrite par KRAATZ (1977) comme étant la plus fiable et particulièrement conseillée lorsque le débit d'infiltration est faible. Cette méthode consiste à isoler un tronçon de canal dépourvu de végétation aquatique par 2 barrages étanches et à mesurer l'abaissement du plan d'eau, en tenant compte de l'évaporation et des apports pluviométriques.

Les infiltrations sont calculées selon l'équation (3) :

$$I = \delta H + P - E \quad (3)$$

δH = variation du niveau d'eau dans le bassin (mm)

P = précipitations (mm)

E = évaporation du bac en eau libre (mm)

L'infiltration moyenne est exprimée en $\text{mm} \cdot \text{j}^{-1}$ et tient compte de la durée entre 2 mesures consécutives (87 h en moyenne). Les berges des bassins ont été faucardées, la végétation aquatique du canal a été éliminée de manière à conserver un plan d'eau libre. Les bassins étudiés avaient une longueur moyenne de 47 m (coefficient de variation = 10,8 %), une surface moyenne au niveau de l'eau de 135 m^2 (coefficient de variation = 17,5 %), une profondeur moyenne de 0,44 m (coefficient de variation = 8,4 %). La fréquence des mesures a été établie de manière à ce que l'abaissement du plan d'eau ne dépasse jamais 10 % de la profondeur du bassin de façon à maintenir une charge hydraulique aussi constante que possible. Entre le 27/07/89 et le 31/08/89 nous avons réalisé, sur chacun des 4 bassins, 10 mesures d'infiltration.

Lors d'événements pluvieux importants, supérieurs à 10 mm/5h, la surface réceptrice en eau était assimilée à la surface en gueule du bassin.

A partir de la carte analytique des sédiments du substratum du marais de Moëze (SALIN, 1980) nous avons déterminé 6 principales catégories de bri au sein desquelles nous avons retenu 3 ou 4 échantillons. Nous avons également échantillonné les fossés en périphérie de marais, au contact des calcaires jurassiques, avec un pas d'espace régulier de 3 km, soit 11 échantillons pour 33 km de linéaire. La campagne de terrain a donc permis de caractériser les berges et fonds de 34 canaux (fig. 2). Les critères retenus ont été : la teneur en carbonates et la sodicité des échantillons. CHEVALLIER *et al.* (1984) ont en effet montré que la teneur en carbonates de calcium et la sodicité conditionnaient la perméabilité des sols de marais. La teneur en CO_3^{2-} était évaluée qualitativement par un test HCL 2N après séchage à 105° C pendant 24 h. La salinité était évaluée indirectement par la mesure de la conductivité électrique (Siemens/cm) de l'extrait aqueux de sol (extrait au 1/5^{ème}). La sodicité était évaluée à partir des critères de couleurs mis au point par l'INRA de St-Laurent-de-la-Prée.

L'analyse des sédiments du substratum a permis de différencier les canaux situés en bordure de marais au contact du substrat calcaire, de ceux creusés dans le matériau argileux du marais. Les premiers se caractérisent par une forte teneur en carbonate, une granulométrie relativement grossière et une faible conductivité due à l'influence prépondérante des eaux douces des co-teaux. Les seconds présentent au contraire une granulométrie beaucoup plus fine, une faible teneur en carbonate et une conductivité élevée car ces fossés correspondent aux anciens chenaux de marée. Nous avons retenus 4 sites expérimentaux (fig. 2) : 2 en bordure de marais, 2 en centre de marais dont l'un sur le domaine expérimental de l'INRA à 15 km au nord du marais de Moëze.

Evapotranspiration des parcelles

Durant la période estivale (juin, juillet, août) la végétation des parcelles est majoritairement desséchée en raison du déficit hydrique marqué depuis le mois de mai. Le sol constitué d'argiles gonflantes se rétracte avec formation de fentes de retrait. La nappe phréatique se situe généralement entre 1,20 m et 1,50 m de profondeur, c'est-à-dire au dessous de la zone racinaire de la végétation prairiale (*Festuca sp.*). Compte tenu de la particularité des sols de marais et du couvert végétal, l'évapotranspiration réelle maximale ETRM est

probablement inférieure à l'évapotranspiration potentielle ETP. Puisqu'il est délicat de mesurer *in situ* l'évapotranspiration des parcelles (MORTON, 1983) et que les formules climatiques sont difficilement applicables, nous avons globalisé les échanges hydrauliques de la parcelle au niveau de la mesure de l'infiltration. Les limites du système ainsi défini permettent de se placer en amont de la consommation d'eau à l'échelle de la parcelle, sans rentrer dans les mécanismes de transferts eau-sol-plante.

Nous avons suivi, sur 6 sites, l'évolution du profil d'humidité en dehors de toute influence due à la proximité d'un canal en eau (fig. 2). Les mesures ont été réalisées entre le 11 juillet et le 23 août 1989 avec une périodicité de 10 jours. Les prélèvements de sol étaient effectués, à l'aide d'une tarière cylindrique, tous les 10 cm jusqu'à une profondeur de 2 m. Le niveau de la nappe était contrôlé par un piézomètre. Le poids sec de l'échantillon était déterminé après séchage à 105 °C pendant 48 h.

Prélèvements pour l'irrigation

Les volumes prélevés ont été évalués à partir d'une enquête que nous avons menée auprès des 23 irrigants du marais de Moëze et de contrôles hebdomadaires sur le terrain. Nous avons retenu les critères suivants : superficie irriguée, nombre et date des passages d'irrigation, quantités d'eau apportées à chaque passage.

Débits de fuite

Bien que maintenu fermé durant toute la durée de l'étude, l'ouvrage de vidange hivernale présente une fuite. La section de fuite (0,13 m²) représente 3,5 % de la section maximale. L'utilisation d'un réservoir rudimentaire nous a permis de mesurer un débit de fuite de 270 m³ · j⁻¹.

RÉSULTATS

Le bilan hydrologique du marais de Moëze a été calculé du 11 juin 1989 au 31 août 1989. Les résultats sont présentés par décade en accord avec le pas de temps utilisé par les climatologues. Pour l'étude de l'évaporation des nappes d'eau libre, POUVAUD (1988) précise d'ailleurs qu'il serait déraisonnable d'utiliser la méthode du bilan hydrologique pour des périodes inférieures à 5 voire 10 jours. Les résultats, présentés dans le tableau 1, appellent les remarques suivantes :

L'importance des volumes évapotranspirés par le réseau hydraulique (43,7 %)

Avec un linéaire total de 318 km, les canaux représentent une surface évaporante de 88,7 ha dont 23,8 ha correspondent aux fossés colonisés par

Tableau 1 Bilan hydrologique estival du marais de Moëze. Toutes les valeurs sont exprimées en m³. Qa = débit d'alimentation, P = précipitations, Qs = débit des sources, Epo = évapotranspiration des plans d'eau, Ir = irrigation, Is = infiltration, Qf = débit de fuite, dS = résidus. (1) : réseau hydraulique (88,7 ha), (2) : autres plans d'eau (32,5 ha).

Table 1 Summer water budget of Moëze. All values are expressed in m³. Qa = surface inflow rate, P = precipitations, Qs = groundwater inflow rate, Epo = water bodies evapotranspiration, Ir = irrigation, Is = channel network seepage, Qf = surface outflow rate, dS = residue term. (1) : channel network surface (88.7 ha), (2) others water surfaces (32.5 ha).

Périodes	ENTREES			SORTIES						dS
	Qa	P	Qs	Epo(1)	Epo(2)	Ir(1)	Ir(2)	Is	Qf	
11-20/06/89	34 019	0	2 592	86 464	12 860	45 028	10 514	2 340	2 700	-123 349
21-30/06/89	196 670	6 389	2 592	64 460	9 680	70 640	10 154	2 340	2 700	+45 137
01-10/07/89	26 436	25 098	2 592	48 557	7 250	51 745	10 514	2 340	2 700	-68 890
11-20/07/89	69 537	0	2 592	63 368	7 250	82 930	10 514	2 340	2 700	-97 243
21-31/07/89	203 621	9 583	2 851	74 236	12 120	37 130	11 565	2 574	2 970	+75 460
01-10/08/89	143 287	639	2 592	55 917	9 120	59 220	10 514	2 340	2 700	+6 707
11-20/08/89	190 059	19 987	2 592	52 921	8 880	43 740	10 514	2 340	2 700	+91 543
31-31/08/89	98 594	1 868	2 851	51 451	11 830	41 515	10 514	4 183	2 970	-19 150
Total	1 025 787	63 564	21 254	497 374	79 530	431 948	86 214	20 797	22 140	-89 605
%	91,9	6,1	2,0	43,7	7,0	38,0	7,6	1,8	1,9	7,9
	100%			100%						

Typha latifolia. Les autres plans d'eau, les anciens bassins salicoles alimentés par le réseau et une retenue artificielle, couvrent au total 32,5 ha.

Le suivi des bacs flottants depuis 1986 a montré que la consommation d'eau des bacs en eau libre, avec *Lemna sp.* ou *Ceratophyllum sp.* est très proche de l'ETP Penman, alors que le bac à *Typha latifolia* présente une consommation 3 à 4 fois supérieure (fig. 3). Ceci coïncide parfaitement avec les résultats fournis par divers auteurs pour qui le coefficient multiplicateur varie, sous climat tempéré humide, entre 1,6 (GILMAN et NEWSON, 1983) 2,0 (OTIS, 1914 in CRUNDWELL, 1988), et 3,4 (BERNATOWIECZ *et al.*, 1976) lorsque la ressource en eau n'est pas limitante. Avec seulement 26,8 % de la surface de canaux, la consommation des *Typha latifolia* représente 51,1 % de l'évaporation du réseau hydraulique.

La forte contribution des prélèvements pour l'irrigation

La demande en eau pour l'irrigation du maïs, ou du tournesol, est relativement constante durant l'été avec cependant un accroissement sensible entre le 20 juin et 20 juillet lors de l'épiaison du maïs. Les volumes exportés pour l'irrigation des 298 ha de cultures hors marais représentent 38,0 % des pertes totales du marais. Ceci démontre en outre le rôle de plus en plus important que joue le réseau hydraulique pour le transport de l'eau vers les terres irriguées en périphérie de marais (fig. 1).

Le rôle secondaire joué par les infiltrations que ce soit au niveau des canaux de marais (7,6 %) ou des anciens bassins salicoles (1,8 %)

WELLER (1987) indique que dans plusieurs types de zones humides où les pertes par infiltration ont été évaluées, elles n'excèdent jamais plus de 20 % quelle que soit la saison. Toutefois, l'auteur ne précise pas la nature des sols et sous-sols rencontrés sur les sites étudiés. Les valeurs d'infiltration moyenne (tableau 2) permettent de différencier 2 catégories de canaux : les uns (bassins A, B, C) ont une vitesse moyenne d'infiltration faible ($1,11 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$) mais très variable (coefficient moyen de variation = 65,9 %), les autres (bassin D) se caractérisent par une vitesse moyenne d'infiltration importante ($5,27 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$) et constante (coefficient de variation = 13,1 %). Les premiers, relativement imperméables, correspondent d'une part, aux canaux situés dans le marais même et d'autre part, à certains fossés périphériques isolés du calcaire jurassique par une épaisseur de bri suffisante, variable de 1 à 5 m. Les seconds, nettement plus perméables, représentent les fossés de ceinture au contact direct des calcaires jurassiques. A l'échelle du marais, ces derniers totalisent un linéaire de 1 600 m soit 0,5 % du linéaire total et participent pour 1,6 % aux volumes journaliers infiltrés sur les 2250 ha de marais.

MILLAR (1971) analyse les pertes par infiltration dans plusieurs régions marécageuses du nord Canada et mentionne des vitesses d'infiltration de $2,5 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$ pour des substrats argileux d'origine lacustre à $4,6 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$ lorsque la granulométrie devient sablo-limoneuse. Il précise également que la densité de canaux est aussi importante que la nature même du substrat, et que c'est la combinaison de ces 2 facteurs qui détermine le volume des pertes par drainage latéral.

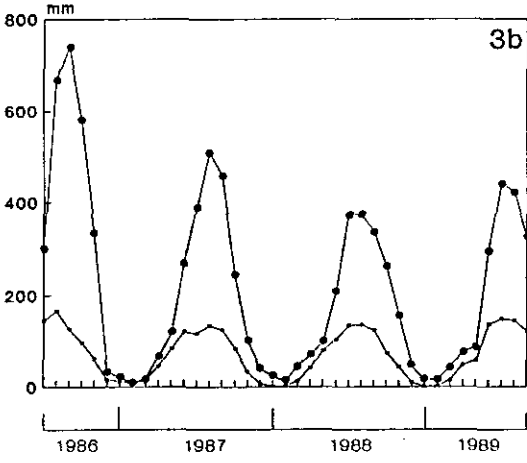
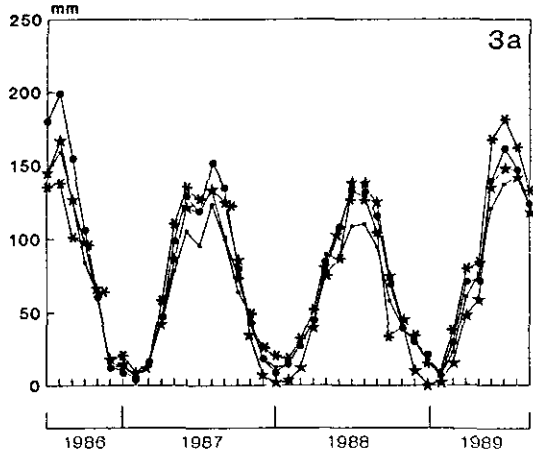


Figure 3 Consommation d'eau mensuelle des 4 bacs expérimentaux.
Monthly water consumption of 4 experimental tanks.

- | | | | |
|----------------|------------------------------|-----|------------------------|
| | Bac en eau libre | — | Clear water tank |
| Fig. 3a | Bac <i>Lemma sp.</i> | —●— | Lemma sp. tank |
| | Bac <i>Ceratophyllum sp.</i> | —■— | Ceratophyllum sp. tank |
| | ETP Penman | —▲— | ETP Penman |
| Fig. 3b | Bac <i>Typha latifolia</i> | —●— | Typha latifolia tank |
| | ETP Penman | —▲— | ETP Penman |

Tableau 2 Pertes par infiltration de 4 bassins expérimentaux. Cond = conductivité électrique du sol ($mS \cdot cm^{-1}$), Granul = granulométrie en % (* : 0,02 à 2 mm), (** : < 0,02 mm), (***) : matière organique), t = durée des mesures (h), dH = abaissement du niveau d'eau (mm), P = précipitations (mm), E = évaporation du bassin (mm), I = infiltration absolue (mm), INF = infiltration en $mm \cdot j^{-1}$ (en $mm \cdot j^{-1}$ par mètre de canal).

Table 2 Seepage losses for 4 experimental basins. Cond = soil electrical conductivity ($mS \cdot cm^{-1}$), Granul = granulometry in % (* : 0.02 to 2 mm), (** : < 0.02 mm), (***) : organic matter), t = measure duration (h), dH = fall of water level (mm), P = precipitations (mm), E = water basin evaporation (mm), I = absolute seepage (mm), INF = seepage in $mm \cdot d^{-1}$ (in $mm \cdot d^{-1}$ per meter of canal).

Site	Cond	Granul		t	dH	P	E	I	INF	
A	13.4	4,0(*)	Moy.	86.50	23.70	0.70	19.40	4.90	1.36	(4.0)
		92,3(**)	E.type	13.10	5.25	0.97	2.95	3.00	0.77	
		1,2(***)	Coef.Var.	15.1	22.2	135.7	15.2	60.8	56.6	
B	20,4	3,5(*)	Moy.	88.10	22.80	1.10	19.40	4.40	1.17	(4.6)
		93,4(**)	E.type	13.50	4.85	1.24	2.95	2.73	0.65	
		1,6(***)	Coef.Var.	15.3	21.3	117.5	15.2	62.0	55.8	
C	8,6	7,5(*)	Moy.	88.30	22.00	0.80	20.00	4.20	0.99	(2.5)
		96,2(**)	E.type	16.77	3.92	0.90	2.42	4.20	0.84	
		2,4(***)	Coef.Var.	19.3	17.8	112.9	12.1	100.4	85.5	
D	2,5	20,6(*)	Moy.	91.40	38.40	0.80	19.40	20.30	5.27	(12.1)
		73,8(**)	E.type	16.40	6.75	0.76	2.95	5.30	0.69	
		2,6(***)	Coef.Var.	18.3	17.6	92.4	15.2	26.1	13.1	

Sur les 7 sites retenus pour le suivi de la nappe, on constate une stabilité des profils d'humidité et des niveaux piézométriques (fig. 4). La nappe est à une profondeur moyenne de 112 cm, avec un maximum à 49 cm et un minimum à 201 cm (coefficient de variation = 35,7 %).

La faible part prise par les apports pluviométriques (6,1 %)

Avec un débit moyen d'alimentation de $11734 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$, la rivière canalisée représente l'essentiel des entrées du bilan en situation estivale (91,9 %).

DISCUSSION

A la suite des travaux de TALUREAU (1965), la mise en valeur des marais de l'ouest de la France visait en premier lieu à l'assainissement et au drainage des terres. Avec la loi d'orientation agricole du 4 juillet 1980, la gestion hydraulique a donc envisagé essentiellement l'évacuation des eaux hivernales excédentaires. D'autre part, les études concernant le transfert de l'eau en zones humides se sont souvent limitées à la parcelle, voire à l'îlot de drainage (INRA, 1980) mais ont rarement abordé le problème à l'échelle du réseau hydraulique. Dans ce cas elles se sont principalement intéressées à l'analyse des réseaux arborescents où se dégage une hiérarchisation nette des canaux (CEMAGREF, 1988). Des études sur le fonctionnement hydrologique estival de réseaux complexes, débouchant sur des bilans quantitatifs, restent rares.

Nous avons montré qu'à partir d'approches expérimentales (mesures d'évapotranspiration et d'infiltration) combinées à des mesures de terrain (débit d'alimentation, prélèvement pour l'irrigation, suivi de niveaux piézométriques) une évaluation quantitative du bilan hydrologique estival était réalisable avec une précision satisfaisante, supérieure à 10 %.

Dans la bibliographie, quel que soit le site étudié, l'équation du bilan hydrologique est identique. Elle prend en compte les pertes par évaporation des plans d'eau, par évapotranspiration des parcelles, par drainage souterrain ou par écoulement superficiel, par diminution du stock d'eau du sol ; et pour les entrées, les précipitations ainsi que le débit d'alimentation de surface ou souterrain. La superficie des zones étudiées varie considérablement : de quelques hectares (RUTHERFORD et BYERS, 1973), (HUFF et YOUNG, 1980), voire quelques dizaines d'hectares (KADLEC, 1983), à plus de 1 000 ha (WOLTERS *et al.*, 1989). De même les méthodes d'estimation de chacun des termes du bilan sont très variables. Aucune ne permet de mesurer directement ou in situ, la consommation d'eau des parcelles à partir des canaux ou de la nappe. Les processus de circulation de l'eau dans le sol se déroulent en effet dans des conditions de sols non saturés qui sont généralement complexes et difficiles à décrire quantitativement (HILLEL, 1988). La stabilité des profils d'humidité et des niveaux piézométriques laissent supposer l'existence d'un flux ascendant permanent de la nappe vers la surface du sol (HILLEL, 1988), (MERMOUD et

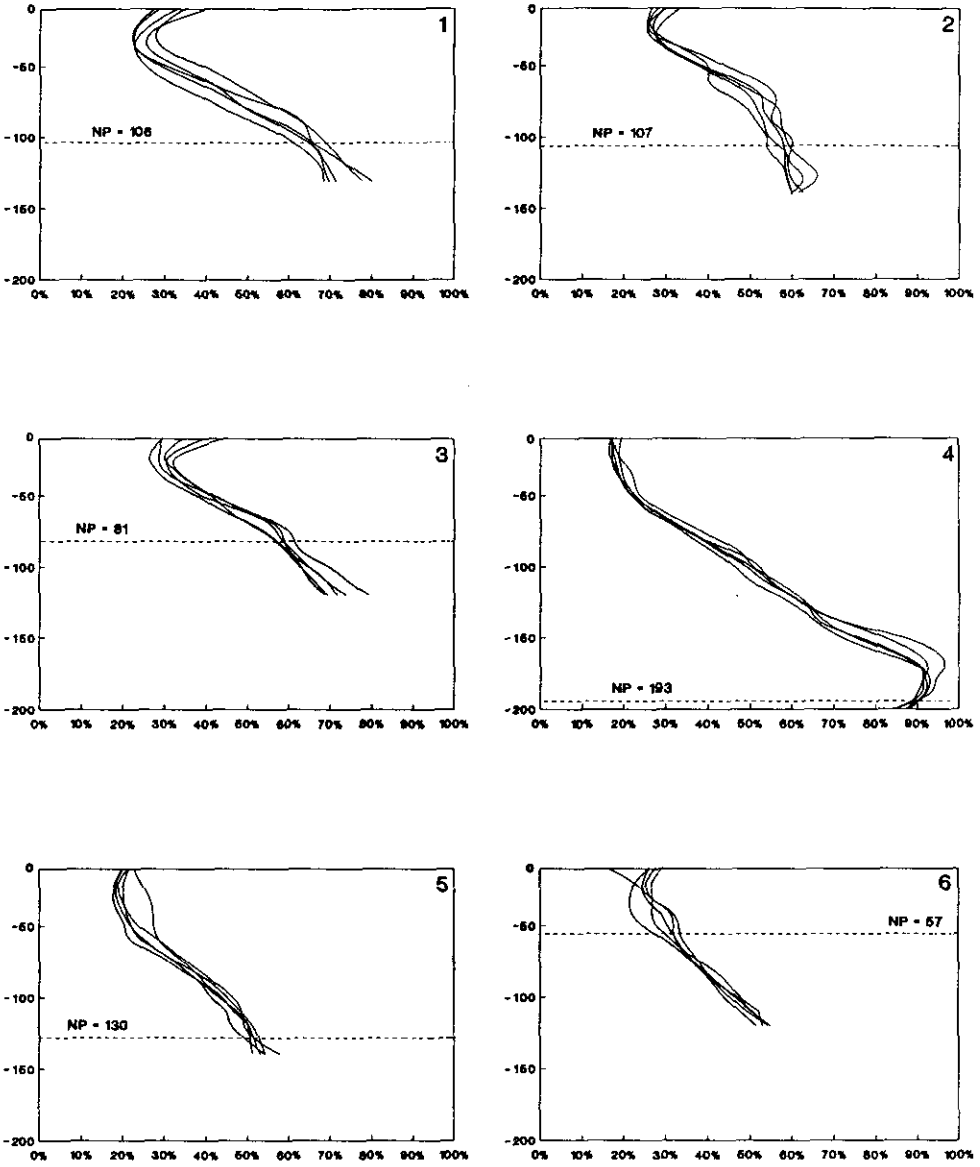


Figure 4 Evolution des profils d'humidité du 11.07.89 au 31.08.89 les sites (1 à 6) sont localisés sur la figure 2. NP : niveau piézométrique moyen.

Soil moisture evolution from the 11.07.89 to the 31.08.89 the stations (1 to 6) are localized on the figure 2. NP : mean water table level.

MOREL-SEYTOUX, 1989). Compte tenu de l'épaisseur du substrat argileux, nous supposons que les volumes infiltrés compensent presque totalement les pertes par évapotranspiration du sol ; les pertes par drainage profond sont alors négligeables. Avec une vitesse moyenne d'infiltration de $3,7 \text{ l} \cdot \text{j}^{-1}$ par mètre de canal, le débit moyen d'infiltration est de $1\,174 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ à l'échelle des 2 250 ha de marais. Rapporté à l'hectare cela correspond à $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$ ce qui équivaut à une évapotranspiration de $0,5 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$ ($1 \text{ mm} = 1 \text{ l} \cdot \text{m}^{-2} = 10 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$). Cette valeur, très nettement inférieure à l'ETP Penman moyenne journalière calculée sur la même période ($4,5 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$), correspond aux ordres de grandeur annoncés par VERRY (1988) pour l'évapotranspiration d'un sol argilo-limoneux alimenté par une nappe située à 90 cm (10 à 20 % de l'ETP). En globalisant la consommation parcellaire au niveau des mesures d'infiltration, nous sommes placés en amont du système sol-eau-plante. Nous disposons alors d'une estimation *in situ* de l'évapotranspiration du sol plus réaliste que les valeurs purement climatiques.

L'optimisation de la gestion estivale de l'eau d'un marais littoral agricole passe par une politique économique de rigueur qui consiste, dans un premier temps, à minimiser les pertes d'eau. Les deux principaux postes sur lesquels il est possible d'intervenir efficacement, sont l'évapotranspiration des plans d'eau (50,7 %) et l'irrigation (38,0 %). Face aux besoins croissants de l'irrigation, ce sera principalement sur la consommation d'eau du réseau que l'on pourra agir. De telles solutions ont déjà été décrites par RUTHERFORD et BYERS (1973) pour l'économie d'eau de zones humides canadiennes. On aboutit donc à l'idée d'un aménagement du réseau hydraulique avec comme alternative une réduction du linéaire ou du pourcentage de canaux colonisés par les héliophytes, voire une combinaison des deux solutions. Avec une contribution de 51,1 % à l'évapotranspiration totale du réseau, pour une surface colonisée de 28,6 %, les canaux à *Typha latifolia* devraient faire l'objet d'un entretien prioritaire. L'abaque (fig. 5) permet d'estimer l'économie d'eau réalisée selon différents scénarios d'aménagement du réseau hydraulique : depuis la conservation de la surface actuelle (88,7 ha) avec réduction progressive du pourcentage d'héliophytes, à la réduction progressive du linéaire avec conservation d'un pourcentage minimal d'héliophytes. Il apparaît ainsi que pour une même économie d'eau, plusieurs scénarios peuvent être envisagés. Par exemple, un débit évapotranspiré de 200 000 m³/mois peut être obtenu soit en réduisant la surface du réseau de 16 % et en conservant 50 % d'héliophytes, soit en réduisant la surface de 45 % et en conservant 100 % d'héliophytes, soit encore en conservant la surface actuelle avec seulement 34 % d'héliophytes. L'élimination totale des *Typha latifolia* permettrait une économie d'eau de 39 %.

Si dans la seule logique d'économie d'eau, la simplification à l'extrême du réseau hydraulique est satisfaisante, cette solution serait néanmoins très dommageable pour le fonctionnement écologique du marais. Le reprofilage des canaux qui en résulterait risquerait d'accroître les débits évacués en périodes pluvieuses et donc les entraînements de particules terrigènes sur lesquelles pourraient être adsorbés phosphore et résidus de traitement phytosanitaires. Il est donc essentiel de conserver des canaux colonisés par les héliophytes qui participent à l'autoépuration du milieu en piégeant ces particules. Plutôt qu'un aménagement de grande ampleur sur le réseau

hydraulique, qui s'accompagnera inévitablement de restructurations foncières importantes, il serait préférable de recourir à l'entretien des canaux. Cette alternative aurait le mérite de conserver un patrimoine hérité de l'époque du sel au XI^e siècle, et aujourd'hui reconnu d'importance internationale pour la protection des oiseaux d'eau.

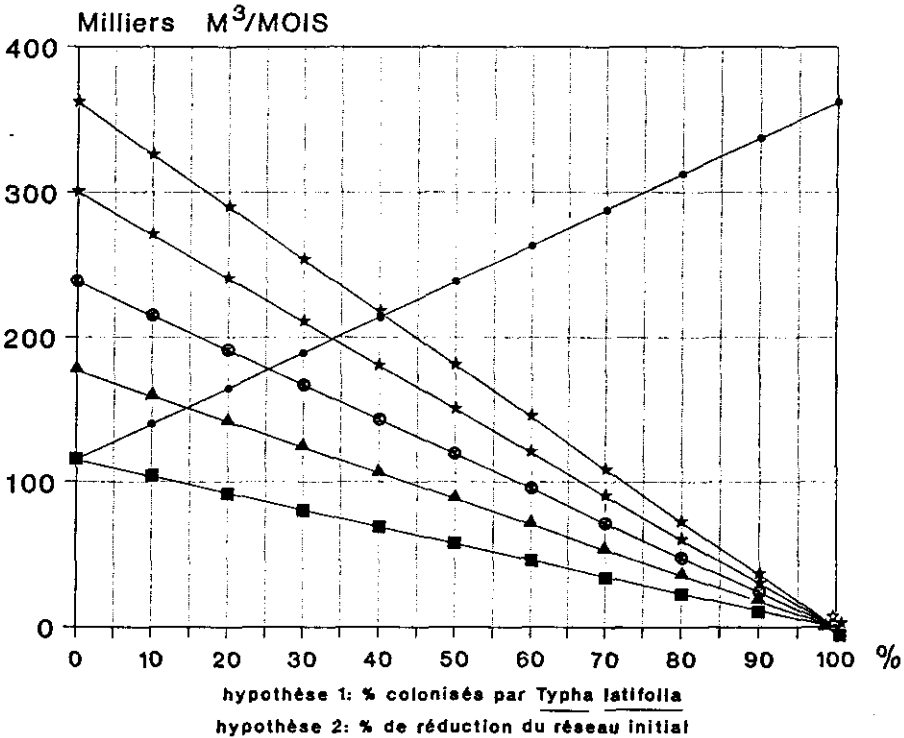


Figure 5 Prédiction des volumes d'eau évapotranspirés par le réseau hydraulique du marais de Moëze en fonction de plusieurs hypothèses d'aménagement.

Hypothèse 1 : conservation de la surface actuelle du réseau hydraulique (88,7 ha) avec un pourcentage d'occupation par *Typha latifolia* croissant (—●—).

Hypothèse 2 : réduction de la surface du réseau hydraulique, exprimée en % de la surface actuelle, en conservant un pourcentage d'occupation par *Typha latifolia* fixe de 0 % (—■—), 25 % (—▲—), 50 % (—○—), 75 % (—★—) et 100 % (—☆—).

Prediction of channel network evapotranspiration in the marsh of Moëze according to several management schemes.

Hypothesis 1 : identical channel surface (88.7 ha) with an increasing rate of *Typha latifolia* colonization (—●—).

Hypothesis 2 : decrease in channel network surface (expressed as a percentage of the initial surface) with an arbitrary fixed rate for *Typha latifolia* colonization of 0 % (—■—), 25 % (—▲—), 50 % (—○—), 75 % (—★—) et 100 % (—☆—).

D'une manière générale, toute intervention sur le réseau exige une coopération étroite entre propriétaires, exploitants agricoles et gestionnaires de l'eau. C'est en fait le choix des grandes orientations agricoles qui dictera l'aménagement des marais, et donc des réseaux hydrauliques. Les solutions techniques sont généralement imposées par les considérations économiques et les options politiques.

REMERCIEMENTS

Cette étude fait partie de l'Action Concertée de Recherche sur les Marais de l'Ouest. Elle a été financée conjointement par les ministères de la Recherche et de la Technologie, de l'Environnement, par la Communauté Economique Européenne et par la Direction départementale de l'agriculture de Charente-Maritime. Les auteurs tiennent à remercier le Domaine de l'INRA de Saint-Laurent-de-la-Prée pour les moyens techniques et le personnel qui ont été mis à leur disposition.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDERSON M.G., IDSO S.B., 1987. Surface geometry and stomatal conductance aquatic macrophytes. *Water Res. Res.*, 23(6) : 1 037-1 042.
- BAVEL VAN C.H.M., 1968. Further to the hydrologic importance of transpiration control. *Water Res. Res.*, 4 : 1 387-1 388.
- BENTON A.R., JAMES W.P., ROUSE J.W., 1978. Evapotranspiration from water hyacinth in Texas reservoirs. *Water Res. Bull.*, 14 : 919-930.
- BERNATOWIECZ S., LEZCYNKI S., TYCZNSKA S., 1976. The influence of transpiration by emergent plants on the water balance of lakes. *Aquatic Bot.*, 2 : 275-288.
- BREZNY O., METHA I., SHARMA R.K., 1973. Studies on evapotranspiration of some aquatic weeds. *Weed Sc.*, 21 : 197-204.
- BUSK DE T.A., RYTHER J.H., WILLIAMS L.D., 1983. Evapotranspiration of *Eichhornia crassipes* (Mart.) solms and *Lemna minor* L. in Central Florida : relation to canopy structure ans season. *Aquatic Bot.*, 16 : 31-39.
- CHEVALLIER C. et al., 1984. Etude pédologique du polder de Moëze-Brouage. INRA, ENSAR, 109 pp.
- CEMAGREF, 1988. Etude hydraulique des marais salés de Bourgneuf-en-Retz. CEMAGREF Bordeaux, Div. Hydr. Agr., 68 pp.
- CLYMO R.S., 1973. The growth of *Sphagnum* : some effects of environment. *Jl. Ecol.*, 61 : 849-869.
- CRUNDWELL M.E., 1986. A review of hydrophyte evapotranspiration. *Rev. Hydrobiol. Trop.*, 19(3-4) : 215-232.
- DER WEERT VAN R., KAMERLING G.E., 1974. Evapotranspiration of water hyacinth. *Jl. Hydrol.*, 22 : 201-212.
- EISENHLOR W.S., 1966. Water loss from a natural pond through transpiration of hydrophytes. *Water Res. Res.*, 2(3) : 443-453.

- GILMAN K., NEWSON M.D., 1983. The Anglesey wetland study. Publ. Inst. Hydr., Watlingford. 113 pp.
- GIRAUD F., 1985. Approche du fonctionnement hydraulique du marais agricole de Moëze. DEA Univ. Rennes, 62 pp.
- HUFF D.D., YOUNG H.L., 1980. The effect of a marsh on runoff, I: water budget model. *Jl. Environm. Qual.*, 9(4) : 633-640.
- HUMPHERYS A.S., 1986. Evaluation of drop-check structures for farm irrigation systems. *Ir. Eng.*, 29(3/4) : 505-516.
- INRA, 1980. Les marais de l'Ouest. INRA-SAD, Minist. Agricult., 219 pp.
- KADLEC J.A., 1983. Water budget for small diked marshes. *Water Res. Bull.*, 19(2) : 223-229.
- KRAATZ D.B., 1977. Revêtement des canaux d'irrigation. FAO Ed., Rome, Coll. Mise en valeur des terres, 1 : 223 pp.
- KRAATZ D.B., MAHAJAN I.K., 1982. Petits ouvrages hydrauliques. ONUAA, 224 pp.
- KUZNETSOV V.I., 1971. Experimental investigations and computation of evaporation from water surface. *AIHS Publ.*, Symposium on world water balance, 1(92) : 153-159.
- HILLEL D., 1988. L'eau et le sol : principes et processus physiques. Academia Ed., Louvain, Belgique, Coll. Pédasup n°5, 294 pp.
- LENCASTRE A., 1984. Manuel d'hydraulique générale. Eyrolles Ed., Paris, 398 pp.
- Mac CUEN R.H., ASMUSSEN L.E., 1973. Estimating the effect of heat storage on evaporation rates. *Hydrol. Sc. Bull.*, 18(2) : 191-196.
- MERMOUD A., MOREL-SEYTOUX H.J., 1989. Modélisation et observation du flux hydrique vers la surface du sol depuis une nappe peu profonde. *Hydrol. Continent.*, 4(1) : 11-23.
- MILLAR J.B., 1971. Shoreline-area as factor in rate of water loss from small sloughs. *Jl. Hydrol.*, 14 : 259-284.
- MORTON F.I., 1983. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *Jl. Hydrol.*, 66 : 1-76.
- MUSTIN M., 1982. Action concertée de recherche sur les marais de l'Ouest de la France. Rapport de synthèse, Mus. Nation. Hist. Naturelle, Minist. Env., 125 pp.
- NICHOLS D.S., BROWN J.M., 1980. Evaporation from a sphagnum moss surface. *Jl. Hydrol.*, 48 : 289-302.
- OTIS P., 1914. in CRUNDWELL M.E., 1986.
- PENFOUND W.T., EARLE T.T., 1948. The biology of water hyacinth. *Ecol. Monograph*, 18 : 447-472.
- POUVAUD B., 1988. L'évaporation des nappes d'eau libre en climat soudano-sahélien. Conf. 07-12 novembre 1988, Ouagadougou, UNESCO/IWRA/CIEH : 82-92.
- PRIBAN K., ONDOK J.P., 1980. The daily and seasonal course of evapotranspiration from central european sedge-grass marsh. *Jl. Ecol.*, 68 : 547-559.
- REPLOGLÉ J.A., CLEMMENS A.J., 1979. Broak-crosted weirs for portable flow metering. *Trans. ASAE*, 22(6) : 1 324-1 328.
- ROCHE M., 1963. Hydrologie de surface. ORSTOM, Gauthier-Villars Ed., Paris, 390 pp.
- ROHWER C., FOLLANSBEE R., 1934. Evaporation from water surfaces. *Trans. Amer. Soc. Civ. Eng.*, 99 : 673-695.
- RUTHERFORD R.J., BYERS G.L., 1973. Conserving wetland water by suppressing evaporation. *Canad. Agr. Eng.*, 15 : 9-11.
- SALIN R., 1980. Etude pédologique dans le marais de Brouage (Charente-Maritime). INRA, 155 pp.
- SHALHOTRA A.M., ADAMS E.E., HARLEMAN D.R.F., 1987. The α , β , Γ evaporation from saline water bodies. *Water Res. Res.*, 23(9) : 1 769-1 774.
- SILL B.L., 1983. Free and forced convection effects on evaporation. *Jl. Hydr. Eng.*, 109(9) : 1 216-1 231.
- SQUARCIONI P., 1975. Etude hydrogéologique des ressources aquifères de la zone de l'estuaire de la Charente. Univ. Bordeaux, Centre d'hydrogéologie, 77 pp.
- SMID P., 1975. Evaporation from a reed swamp. *Jl. Ecology*, 63 : 299-309.
- STEWART R.B., ROUSE W.R., 1976. A simple method for determining the evaporation from shallow lakes and ponds. *Water Res. Res.*, 12(4) : 623-628.
- TALUREAU R., 1965. Les marais de l'Ouest. Minist. Agricult., 180 pp.

- TIMMER C.E., WELDON L.W., 1967. Evapotranspiration and pollution of water by water hyacinth. *Hyacinth Control JI.*, 6 : 34-37.
- VERRY E.S., 1988. The hydrology of wetlands and man's influence on it. Symposium on the hydrology of wetlands in temperate and cold regions, 06-08 juin 1988, Joensuu, Finland. Publ. Academy Finland, 2 : 105 pp.
- WELLER M.W., 1987. Freshwater marshes. *Ecology and Wildlife Management Ed.*, Minneapolis, Univ. Minnesota Press., 160 pp.
- WEISMAN R.N., 1975. Comparison of warm water evaporation equations. *Jl. Hydr. Div.*, 101(HY10) : 1 303-1 313.
- WOLTERS W., GHOBRIAL N.S., VAN LEEUWEN H.M., BOS M.G., 1989. Managing the water balance of the Fayoum depression (Egypt). *Irr. Drain. Syst.*, 3(2) : 103-123.