

Modifications du régime hydrique et salin des étangs du système de Vaccarès (Camargue, France) liées aux perturbations anthropiques des cinquante dernières années

P. Heurteaux¹

Mots clés : Camargue, Vaccarès, écosystème lagunaire perturbé, étang salé.

Les étangs centraux de la Camargue (Vaccarès et Etangs inférieurs), couvrent une grande surface (environ 110 km²) mais sont peu profonds (un mètre en moyenne). Ils constituent une unité hydraulique à niveaux et à salinités variables dans l'espace et dans le temps. Niveaux et salinités évoluent en fonction de paramètres climatiques, de l'action de la mer et, surtout, des activités humaines.

Au cours des cinquante dernières années, le système d'étangs a connu plusieurs bouleversements aux conséquences importantes sur le plan écologique :

- avant 1950, le bilan hydrique dépend essentiellement des pluies et de l'évaporation. L'amplitude saisonnière des salinités (en moyenne élevées) et des niveaux (en moyenne bas) est très forte ;
- de 1950 à 1978, l'apport massif d'eau douce estival (riziculture) renforçant l'action d'années pluvieuses, provoque l'élevation des niveaux moyens, le dessalement du système (4 g/l à la mi-1978) et le tassement de l'amplitude des variables sel et eau ;
- de 1979 à 1985, l'apport massif d'eau de mer (vétusté de la digue littorale, « valorisation » des pêcheries en étangs) et la diminution des apports d'eau douce (années sèches, déclin de la riziculture) provoquent le maintien de hauts niveaux et une forte augmentation de la salinité du système (35 g/l à la mi-1984). L'amplitude des variables sel et eau reste faible.
- en 1986, 1987 et 1988, de fortes pluies provoquent la crue hivernale et le dessalement des étangs. Le dessalement se poursuit en 1991.

A l'échelle pluridécennale, les changements de salinité sont induits par des variations du stock de sels dissous dans le système d'étangs. Le présent travail se propose d'analyser la dynamique et de quantifier ce stock au cours des cinquante dernières années. Le stock tombe de quelque 3 millions de tonnes avant la riziculture à 600 000 tonnes en 1978, puis il s'accroît de plus de 3 millions de tonnes de 1979 à 1985, et baisse de 2 millions de tonnes de 1986 à 1991. Les variations en moins sont provoquées par les hémorragies de sels qui accompagnent la vidange à la mer du trop-plein des étangs en crue par les vannages de la digue littorale. Les variations en plus sont le fait d'apports d'eau de mer ou d'eaux souterraines salées.

Modifications of the water and saline balance of the Vaccarès lagoons (Camargue, France) in relation with the last fifty years human perturbations disturbances

Keywords : Camargue, Vaccarès, perturbed lagoon ecosystem, saline lagoon.

The central lagoons of the Camargue (Vaccarès and « Etangs inférieurs ») extend over a large area (about 110 km²) but are shallow (1 m deep on average). They constitute a hydraulic unit in which water levels and salinities vary in space and time according to climate, the action of the sea and, above all, man's activities.

During the last fifty years, the lagoon system has experienced several major perturbations which have had important ecological consequences :

- prior to 1950, water balance depended essentially upon the cycle of rainfall and evaporation. The seasonal range in salinity (high on average) and water levels (on average low) was very great ;
- from 1950-1978 there was a massive input of fresh water each summer resulting from the cultivation of rice. This intensified the effect of high rainfall by raising mean water levels, lowering the salinity of the lagoon system (4 g/l at mid-1978) and dampening fluctuations in the level of salt and water variables ;
- from 1979-1985 there was an increased input of sea water (due to a weakening of the sea dike and commercialisation of lagoon fisheries) and a decrease in the input of fresh water (due to a succession of dry years and a decline in rice cultivation). This maintained the high water levels but raised the salinity of the system (35 g/l at mid-1984). Salt and water variables fluctuated very little ;
- in 1986, 1987 and 1988, heavy rainfall raised water levels in winter and lowered the salinity of the lagoons.

Changes in salinity over several decades result from fluctuations in the lagoon system's stock of dissolved salts. This paper quantifies this variation over the past 50 years. Dissolved salts fell from three million tonnes before rice cultivation to 600,000 tonnes in 1978, increased to over three million tonnes between 1979 and 1985, and then declined again. Decreases are caused by loss of salts when lagoons overflow into the sea, increases by inflow of sea water and salt-laden groundwater.

1. Laboratoire d'Hydrobiologie, Université de Provence, 13331 Marseille Cedex 03.

1. Configuration et caractères généraux des étangs du système Vaccarès

La zone des étangs centraux est partagée dans le sens est-ouest par la presqu'île de Mornès : vestige d'un ancien cordon dunaire qui sépare l'étang du

Vaccarès au nord (environ 6 600 ha) d'une mosaïque d'étangs au sud, appelés Etangs inférieurs du Vaccarès (environ 4 500 ha) et séparés les uns des autres par des terrains bas halomorphes et amphibiés appelés « sansouires » couvrant quelque 1 800 hectares (Fig. 1).

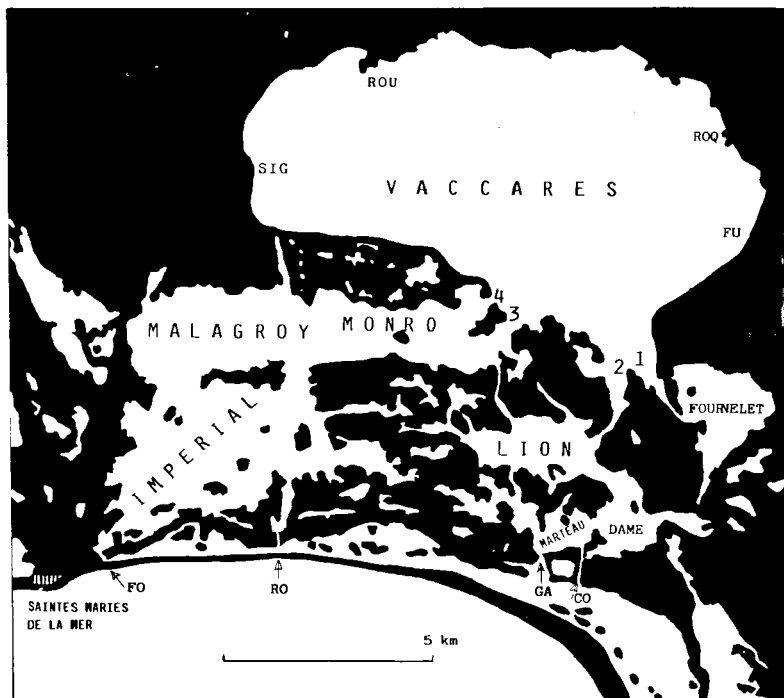


Fig. 1. Les étangs du système Vaccarès.

- Dans le Vaccarès débouchent les canaux de drainage de Fumemorte (FU), Roquemaure (ROQ), Rousty (ROU) et Sigoulette (SIG).
 - Passes entre le Vaccarès et les étangs inférieurs : Afoux du Fournelet et gaze du Renard (1), Afoux du Lion et Trou de mon Oncle (2), passe de Mirole (3), passe de Mornès (4).
 - Vannages de la Digue à la Mer : pertuis de la Comtesse (CO), du phare de la Gacholle (GA), de Rousty (RO) et de la Fourcade (FO).
- Fig. 1. The lagoons of the Vaccarès system.
- In the Vaccarès are the mouths of the drainage canals of Fumemorte (FU), Roquemaure (ROQ), Rousty (ROU) and Sigoulette (SIG).
 - Passage between Vaccarès and the lower lagoons : Afoux du Fournelet and gaze du Renard (1), Afoux du Lion and Trou de mon Oncle (2), passe de Mirole (3), passe de Mornès (4).
 - Sluices of the dikes to the sea : pertuis de la Comtesse (CO), pertuis du phare de la Gacholle (GA), pertuis de Rousty (RO) and pertuis de la Fourcade (FO).

Tous ces étangs communiquent entre eux. Le Vaccarès et les Etangs inférieurs sont reliés par quatre passes. Les étangs du compartiment sud communiquent entre eux par un réseau de chenaux naturels et de mares. A l'état naturel, ces étangs communiquaient librement avec la mer, mais depuis la construction de la digue littorale (la « Digue à la mer »), les échanges entre les étangs et la mer sont contrôlés par l'homme au niveau de vannages appelés pertuis, ils sont en principe destinés à l'évacuation en mer du trop-plein des étangs. Du fait de ces intercommunications, l'ensemble des étangs forme une unité hydraulique et l'on ne peut comprendre le fonctionnement du Vaccarès qu'à la lumière de ce qui se passe dans les Etangs inférieurs et réciproquement. Cette unité fonctionnelle est appelée ici « système Vaccarès ».

Les étangs du système Vaccarès sont très peu profonds. Au plus creux de sa cuvette, le Vaccarès ne descend pas au-dessous de la cote - 2,10 m NGF et pour l'ensemble de l'étang, la profondeur moyenne est de 1,4 m à la cote de référence zéro. Les Etangs inférieurs sont encore moins profonds,

ils ont en moyenne moins de 40 cm d'eau à la cote zéro.

Réceptacle naturel des eaux périphériques, les plans d'eau ont des niveaux et des salinités variables dans le temps et dans l'espace et ces variations sont difficilement prévisibles. Depuis l'endiguement complet de la Grande Camargue (digue littorale 1859, digues du Rhône 1869), elles restent dans leurs grandes lignes soumises à l'action antagoniste des précipitations et de l'évaporation, mais l'intervention de l'homme, au gré des mutations économiques, infléchit cette tendance naturelle et fait également dépendre niveaux et salinités de l'importance des rejets d'eau de drainage dans les étangs et du contrôle des échanges mer-étangs. A cet égard, au cours des cinquante dernières années, quatre périodes ont marqué la dynamique de l'eau et du sel des étangs. Ces quatre périodes se différencient par la tendance générale et le caractère plus ou moins euryhalin de l'étang du Vaccarès ainsi que par la cote moyenne annuelle des plans d'eau et l'ampleur du marnage saisonnier (Fig. 2, Tableau 1).

Tableau 1. Salinités en g/l minimales (S min), moyennes (S moy) et maximales (S max) de l'étang du Vaccarès au cours des quatre périodes qui ont marqué la dynamique de l'eau et du sel du système d'étangs.

Les écarts-types et les rapports % de l'écart type à la salinité moyenne (ET/S moy %) montrent l'évolution de l'euryhalinité du Vaccarès. Table 1. Minimum (S min), mean (S moy) and maximum (S max) salinities in g/l of the Vaccarès lagoon over four periods that defined the dynamics of the water and salinity of the lagoon system.

The standard deviations and the ratios for percentage standard deviation to mean salinity (ET/moy %) show the changes in the euryhalinity of the Vaccarès.

Périodes	S mini	S moy	S maxi	Ecart type	ET/S moy %
1ère période 1947-49	11,0	37,8	54	13,2	35,4
2ème période 1953-56	5,4	7,7	12,0	1,9	24,2
1968-78	3,8	7,1	12,6	1,8	25,0
3ème période 1980-85	10,0	23,0	35	6,8	29,6
4ème période 1986-91	14,0	20,3	33,5	4,2	20,5

1ère période : de 1940 à 1948 — L'influence climatique domine. Les étangs sont salés à sursalés, fortement euryhalins. Leur niveau annuel moyen est bas et leur marnage saisonnier est important (> 1 m).

2ème période : de 1949 à 1978 — Avec le développement de la riziculture et l'apport massif de colatures douces, les étangs se dessalent, leur niveau annuel moyen s'élève et leur marnage saisonnier devient moins important (< 1 m). Le Vaccarès devient moins euryhalin.

3ème période : de 1979 à 1985 — L'influence marine est prépondérante, les étangs se resalent, leur niveau annuel moyen reste élevé et leur marnage peu important. Le Vaccarès reste relativement peu euryhalin.

4ème période : de 1986 à 1991 — Les étangs se dessalent progressivement. Leur niveau annuel moyen reste élevé et leur marnage peu important. Le Vaccarès est peu euryhalin.

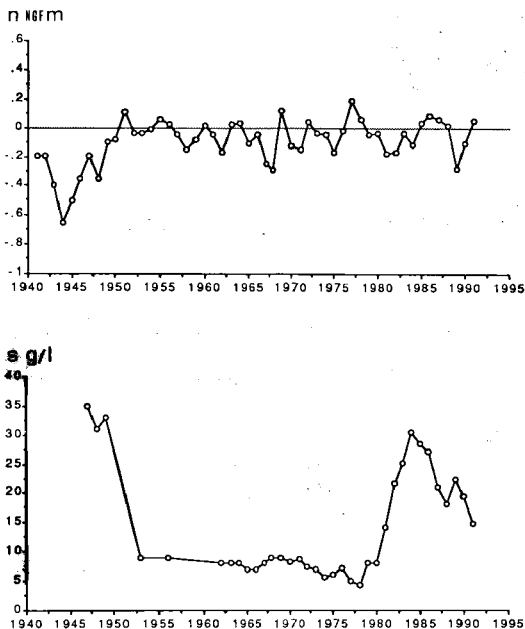


Fig. 2. Evolution du niveau NGF annuel moyen (n NGF m) et de la salinité annuelle moyenne (s g/l) de l'étang du Vaccarès de 1941 à 1991.
Fig. 2. Changes in the mean annual level (n NGF m) and mean annual salinity (s g/l) of the Vaccarès lagoon from 1941 to 1991.

A l'échelle pluridécennale, le jeu alternatif de la dilution et de la concentration ne suffit pas à expliquer l'ampleur des variations de la salinité du système d'étangs. Il apparaît clairement qu'avec le temps, le stock de sels dissous varie en plus ou en moins. Pour mieux cerner les causes de ces variations, leur importance relative et leur dynamique, il est nécessaire de quantifier ces variations de stock. C'est ce que je me propose de faire dans le présent travail pour les cinquante dernières années.

2. Données expérimentales disponibles et méthode pour une quantification du stock des sels dissous dans les étangs du système Vaccarès

Pour calculer la masse de sels dissous dans le système Vaccarès à un instant donné, il suffit de connaître à cet instant la salinité et le volume de chacun des plans d'eau composant le système, mais l'acquisition de ces deux variables n'est pas simple.

Deux difficultés majeures doivent être surmontées. La première est la rareté de l'information. La seconde est l'hétérogénéité spatiale et temporelle des salinités et de la répartition des masses d'eau entre les différents étangs du système. Il serait vain de chercher à établir des bilans salins si cette hétérogénéité n'obéissait à un schéma directeur. Ce schéma directeur est le suivant : salinités et niveaux des étangs ont tendance à se répartir suivant un gradient croissant du nord vers le sud.

2.1. L'information disponible sur la salinité et les niveaux d'eau des étangs

— Salinités

Antérieurement à 1940, les données sur la salinité sont pratiquement inexistantes. De 1941 à 1967, elles

sont très fragmentaires, notamment pour les Etangs inférieurs. Toutefois, il existe pour cette période des séries de mesures intéressantes pouvant donner lieu à des extrapolations raisonnables et complétant utilement mes propres mesures dont les premières datent de 1962 (Schachter 1949 ; Petit & Schachter 1954 ; Nisbet & Schachter 1961 ; Marazanof 1969). De 1968 à 1978, l'information est plus abondante, notamment pour l'étang du Vaccarès qui a fait l'objet d'un suivi régulier (Ministère de l'Agriculture, 1970, 1973, 1975, 1977 ; Campredon-Rouge & Vaquer 1978 ; Parc naturel régional de Camargue 1984, 1986). Depuis septembre 1980, la salinité des principaux étangs est mesurée chaque mois par la Réserve nationale de Camargue (Fig. 3, 4 ; Tableau 2).

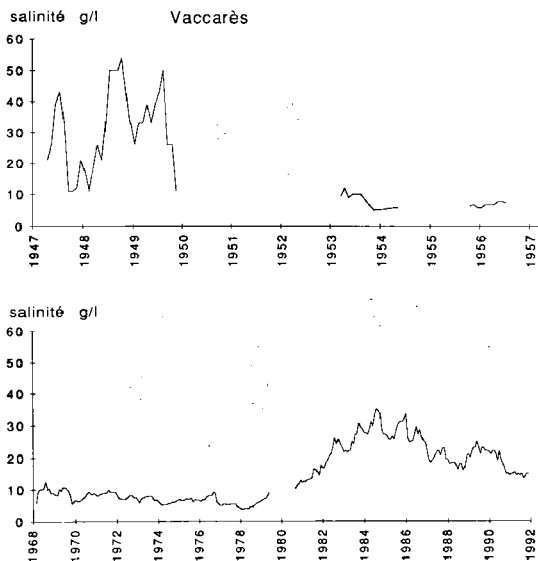


Fig. 3. Evolution de la salinité du Vaccarès de 1947 à 1957 et de 1968 à 1991.
Fig. 3. Changes in the salinity of Vaccarès from 1947 to 1957 and from 1968 to 1991.

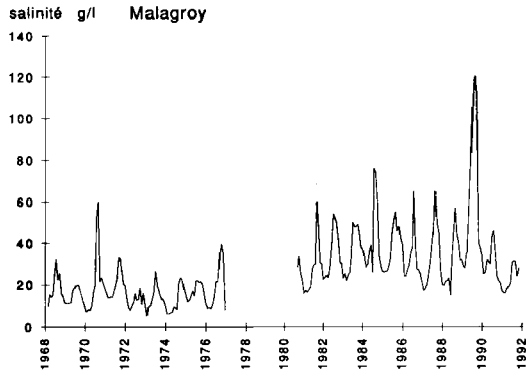


Fig. 4. Evolution de la salinité du Malagroy de 1968 à 1991.

D'une manière générale, les étangs inférieurs sont plus salés et plus euryhalins que le Vaccarès.

Fig. 4. Changes in the salinity of Malagroy from 1968 to 1991.

In general, the lower lagoons are more salty and euryhaline than Vaccarès.

Tableau 2. Quelques exemples de l'évolution saisonnière et interannuelle de la salinité des étangs du Vaccarès et du Malagroy.
Table 2. Some examples of seasonal and between-years changes in the salinity of the lagoons of Vaccarès and Malagroy.

Vaccarès

années	S mini	S moy	S maxi	Ecart type	ET/S moy %
1948	11,0	34,0	54	14,9	44,0
1949	11,0	31,0	50	11,9	38,7
1968	5,8	9,0	12,6	1,7	29,3
1969	5,5	9,0	10,7	1,7	29,3
1970	6,2	8,3	9,1	1,1	13,3
1977	4,3	5,1	5,4	0,4	6,7
1981	12,1	14,1	16,4	1,8	12,9
1984	27	30,4	35	3,1	10,2
1985	25,5	28,5	32	2,3	8,1
1990	15,0	19,5	22	2,7	13,8
1991	14,0	14,8	15,5	0,6	4,1

Malagroy

années	S mini	S moy	S maxi	Ecart type	ET/S moy %
1974	6,0	12,3	24	7,1	57,7
1975	11,7	17,3	22	3,9	22,5
1976	7,9	18,6	40	11,8	63,5
1984	29	41,8	76	17,6	42,1
1985	26	38,1	55	10,8	28,4
1986	24	33,4	65	11,5	34,4
1990	21	30,8	46	7,9	25,7
1991	16,0	23,1	31	6,0	26,0

Le mode d'expression de la salinité variant avec les auteurs (NaCl, Cl, conductivité électrique, salinité ‰, salinité g/l), pour harmoniser les résultats, j'ai converti toutes les données en grammes de sels totaux par litre (Heurteaux 1988 b).

— Niveaux d'eau

Les mesures de niveaux concernent essentiellement le Vaccarès. Avant 1951, elles sont rares et imprécises. Depuis 1951, elles sont effectuées régulièrement sur une règle limnimétrique raccordée au nivellement général de la France (NGF) installée à l'embouchure du canal du Fumemorte (Heurteaux 1988 b). En 1968-69, un réseau de douze limnigraphes a été installé sur le Vaccarès et certains étangs inférieurs pour les besoins d'une étude faite par la Compagnie du Bas-Rhône pour le compte du Ministère de l'Agriculture (Ministère de l'Agriculture, 1970). Par la suite, le nombre d'appareils a été réduit, volontairement ou non (intempéries). Actuellement, deux limnigraphes fonctionnent sur le Vaccarès (l'un à l'embouchure du canal de Fumemorte, l'autre à la pointe du Mornès) et deux autres à l'extrême sud des étangs du Marteau et de l'Impérial (Ministère de l'agriculture 1973, 1977 ; Parc naturel régional de Camargue 1986).

2.2. Schéma directeur régissant les niveaux d'eau des étangs.

Les enregistrements qui ont été faits simultanément sur plusieurs plans d'eau pendant des périodes assez longues indiquent tous la même tendance des étangs à étagé leurs niveaux suivant un gradient croissant du nord au sud sauf en période de très basses eaux. Ainsi, à l'échelle de l'année, le niveau moyen des étangs inférieurs est surcoté de 5 à 10 cm par rapport au Vaccarès. Cette surcote est surprenante en première analyse. En effet, les bilans hydriques mettent en évidence une nette surcharge hydraulique potentielle du Vaccarès par rapport aux Etangs inférieurs. Le Vaccarès qui a un vaste bassin versant terrestre (315 km² dont 115 ne sont pas poldérisés) reçoit plus d'eau de ruissellement que les étangs du sud qui ne drainent que leurs sansouïères limitrophes (18 km²). J'ai calculé qu'en année moyenne, le Vaccarès reçoit 78 millions de m³ d'eau d'origine pluvial, auxquels s'ajoutent quelque 30 millions de m³ de colatures agricoles, alors que les Etangs inférieurs ne collectent au total que 32 millions de m³ (Heurteaux 1988 d). Ces apports représentent une lame d'eau de 1,20 m sur le Vaccarès

et 0,70 m sur les étangs du sud. Les deux compartiments du système d'étangs communiquant, la différence relative des apports devrait se traduire par une surcote du Vaccarès tendant à se résorber par transfert d'eau du nord vers le sud. La question se pose donc de savoir quel phénomène agit sur les masses d'eau pour engendrer la surcote constatée des Etangs inférieurs ? Trois causes principales peuvent être invoquées : la force motrice des vents dominants, la position et la configuration des passes reliant le Vaccarès aux Etangs inférieurs et l'action indirecte de la mer (Heurteaux 1988 e).

— Action des vents

Par temps calme, la pente hydraulique dans les passes reliant les Etangs inférieurs au Vaccarès est favorable à un écoulement du sud vers le nord, mais en Camargue le temps calme est rare. Les vents ont tendance à faire basculer les plans d'eau. Le vent dominant : le mistral, qui souffle du NW repousse les masses d'eau des étangs vers le SE où le niveau s'élève. La pente hydraulique s'inverse temporairement dans les passes et un courant du nord vers le sud s'installe permettant l'épanchement du trop-plein du Vaccarès vers les Etangs inférieurs qui jouent le rôle d'étalements de crue. Lorsque le mistral cesse de souffler, par temps calme et plus encore par vents marins, la circulation des eaux s'inverse mais la situation et la configuration des passes sont nettement plus favorables au flux nord-sud qu'au reflux sud-nord. De ce fait, les Etangs inférieurs n'ont pas le temps de restituer au Vaccarès un volume d'eau équivalent à celui qu'ils en ont reçu avant qu'un régime de mistral ne s'installe à nouveau. Ainsi, le mistral impose par à-coups une circulation des eaux du nord vers le sud et, au bilan des échanges, les Etangs inférieurs reçoivent plus d'eau du Vaccarès qu'ils ne lui en rendent, la différence constitue un stock permanent qui contribue à élever les niveaux.

— Action de la mer

Les infiltrations d'eau de mer qui s'insinuent en biseau dans les couches sableuses du sous-sol camarguais au moins jusqu'à la latitude de la rive nord du Vaccarès sont d'autant plus proches de la surface du sol que la mer est proche (Ministère de l'agriculture 1970). Le biseau marin porte une nappe aquifère salée d'origine continentale présente sous les terres émergées mais également décelée par forages sous les étangs. Sous le Vaccarès, le fond argilo-limoneux très peu perméable isole l'étang de l'influence des

eaux souterraines sous-jacentes. Par contre dans la zone des étangs inférieurs, du fait de la dominante sableuse des terrains, il n'y a pas de discontinuité piézométrique entre les eaux de surface et les différents niveaux aquifères sous-jacents. L'ensemble est en équilibre hydrodynamique et la pression régnant dans le coin salé marin est transmise en s'amortissant à la nappe aquifère sus-jacente puis aux eaux de surface. De ce fait, les Etangs inférieurs, plus proches de la mer que le Vaccarès et soumis à l'influence du coin salé marin, ont tendance à être en situation perchée par rapport au Vaccarès. Pour les mêmes raisons, au sein des Etangs inférieurs, les étangs les plus méridionaux ont tendance en période de basses eaux à être surcotés par rapport aux plus septentrionaux.

2.3. Schéma directeur régissant la répartition spatiale et les variations saisonnières de la salinité des étangs

En règle générale, il s'établit un gradient croissant de salinité du nord au sud du système d'étangs, gradient qui s'explique par l'apport massif d'eau de drainages douceâtres au Vaccarès. Cet apport fait baisser la salinité du Vaccarès par dilution et, suivant le mécanisme qui vient d'être décrit, cet étang épanche son trop-plein dans ceux des Etangs inférieurs qui lui sont contigus. De ce fait, ceux-ci sont dessalés par rapport aux étangs situés plus au sud. Il s'établit ainsi le gradient naturel de salinité suivant :

Fournelet * < Lion < Dame-Boulin <
Monro < Malagroy < Imperial

(* de récents travaux modifiant le transit entre le Vaccarès et le Fournelet induisent depuis quelques années un accroissement de la salinité moyenne de ce dernier et tendent à déplacer sa position hiérarchique entre Monro et Malagroy).

Le gradient naturel est plus ou moins accusé suivant le régime hydrique saisonnier des étangs. En période de hautes eaux hivernales, le déchainement des vents active la circulation de l'eau entre le Vaccarès et les Etangs inférieurs et favorise l'homogénéisation du système, les variations spatiales de la salinité s'estompent et même s'annulent temporairement par très hautes eaux. Par contre, l'été, la salinité des Etangs inférieurs augmente plus vite que celle du Vaccarès qui reçoit les colatures rizicoles douceâtres alors que la communication entre étangs est rendue plus difficile par les bas niveaux d'eau. Les Etangs inférieurs atteignent alors des salinités élevées et très hétérogènes à l'intérieur de chacun d'eux (Fig. 5).

Ce schéma directeur permet de distinguer les ensembles de données utilisables de ceux qui ne le sont pas et pour ces derniers, il autorise à déduire des salinités mal connues ou manquantes pour certains étangs à partir de celles qui sont connues avec précision pour d'autres et de caler ces salinités dans des limites d'incertitude raisonnables qu'il faut déterminer au coup par coup en fonction de l'état hydrique du système.

2.4. Calcul du volume des étangs

2.4.1. Morphologie des étangs

L'ensemble du système Vaccarès a récemment fait l'objet d'études bathymétriques détaillées. Des mesures ont été faites de 1962 à 1964 sur l'étang du Vaccarès par F. Marazanof et moi-même par sondages à la perche (plus de 200 points répartis sur l'ensemble de l'étang et repérés par triangulation). En 1980, j'ai établi une carte bathymétrique des Etangs inférieurs par photo-interprétation étayée de vérifications sur le terrain. Le tracé des isobathes m'a permis d'établir par planimétrie l'évolution de la surface des plans d'eau en fonction de la cote NGF. De 1984 à 1986, la Réserve nationale de Camargue a repris l'étude morphologique de la cuvette du Vaccarès par échosondages et celle des Etangs inférieurs par sondages à la perche (Parc naturel régional de Camargue 1986). Cette nouvelle campagne de mesures a permis d'apporter d'appréciables améliorations dans le détail des levés antérieurs, mais elle n'a pas révélé de modification sensible de la morphologie des étangs.

2.4.2. Calcul du volume des étangs et relation entre ce volume et la cote NGF du Vaccarès (Tableau 3)

Pour calculer le volume des différents étangs du système pour les différentes cotes NGF, on applique la formule donnant le volume des troncs de pyramides à bases parallèles (Nachtergal 1958) :

$$V = H/3 (S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 \cdot S_2})$$

où S_1 et S_2 sont les surfaces de l'étang pour deux isobathes consécutives et H est la distance séparant ces deux surfaces. Les volumes ainsi obtenus sont très proches de ceux que donne la formule de Sarus applicable aux volumes à bases parallèles de forme quelconque :

$$V = H/6 (S_1 + S_2 + 4s)$$

où s est la surface de la section parallèle à S_1 et S_2 est équidistante de celles-ci.

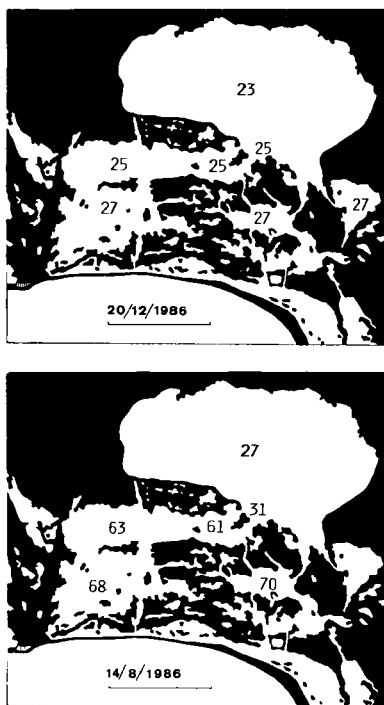


Fig. 5. Les variations saisonnières de la salinité des étangs du système Vaccarès :

— En haut, situation hivernale, exemple du 20 décembre 1986 (niveau du Vaccarès + 0,27 m NGF)

— En bas, situation estivale, exemple du 14 août 1986 (niveau du Vaccarès - 0,21 m NGF).

Fig. 5. Seasonal variations in the salinity of the lagoons of the Vaccarès system :

— Above ; situation in winter, an example from the 20 December 1986 (level of the Vaccarès + 0.27 m NGF)

— Below ; situation in summer, an example from the 14 August 1986 (level of the Vaccarès - 0.21 m NGF).

Tous les plans d'eau du système sont pris en compte pour le calcul des volumes.

Pour le Vaccarès on distingue :

— l'étang proprement dit, limité par l'isobathe - 0,50 m NGF, pour laquelle il n'y a pratiquement pas de plages découvertes (surface 6400 ha à la cote zéro) ;

— les annexes sud de l'étang comprenant les Foux du Lion et du Fournelet, la baisse du radeau Long du Terme et une bande côtière au large des radeaux de Piles-Palmes et de la Tête de Miolo au sud de l'isobathe - 0,50 m NGF. Ces annexes d'une surface de 280 ha, sont généralement plus salées que l'étang proprement dit.

Tableau 3. Evolution du volume des étangs du système Vaccarès en fonction des niveaux d'eau NGF à l'échelle limnimétrique de l'embouchure du canal de Fumemorte.

Table 3. Evolution of the volume of the Vaccarès lagoons in connection with the water levels (NGF) measured on the limnimetric scale situated at the mouth of the Fumemorte canal.

Niveaux NGF	Volume des étangs en millions de m ³		
	Vaccarès	Etangs inf.	Vacc. + E. inf
+ 0,50	126,4	52,9	179,3
+ 0,40	119,7	46,2	165,9
+ 0,30	113,0	40,3	153,3
+ 0,20	106,2	30,7	136,9
+ 0,10	99,5	26,0	125,5
0,00	92,8	21,2	114,0
- 0,10	86,0	15,8	101,8
- 0,20	77,3	11,9	89,2
- 0,30	72,6	6,0	78,6
- 0,40	66,2	1,5	67,7
- 0,50	59,6	0,8	60,4

Pour les Etangs inférieurs, le calcul des volumes concerne :

— les étangs bien individualisés : Monro (750 ha), Malagroy (870 ha), Impérial et gazes annexes (1 565 ha), Lion (435 ha), Dame (230 ha), Marteau et annexes (225 ha) et Fournelet (445 ha) ;

— les plans d'eau de moindre importance dont l'assèchement est précoce (gazes et baisses couvrant 130 ha) ;

— les sansouires inondées. La submersion par les pluies et le débordement des étangs de la mosaïque des 1 800 ha de sansouires séparant les plans d'eau est progressive. Pour les niveaux relevés sur la règle limnimétrique de Fumemorte supérieurs à + 0,20 m, étangs et sansouires ne forment plus qu'un plan d'eau unique d'où seuls émergent les pointements dunaires fossiles comme le Bois des Rièges.

2.5. Règles observées pour l'établissement des bilans salins du système Vaccarès

Les pages qui précèdent montrent les difficultés rencontrées pour obtenir la salinité moyenne et le niveau moyen des différents plans d'eau du système Vaccarès dans des limites d'incertitude acceptables. Pour calculer le stock de sels dissous à un moment donné, compte tenu de la nature de ces difficultés, je me suis fixé un certain nombre de règles concernant les salinités et les niveaux d'eau des étangs.

— Salinités

Pour tenir compte d'une éventuelle hétérogénéité spatiale, la salinité de chaque étang est insérée dans

une fourchette. Comme l'hétérogénéité spatiale croît lorsque les niveaux d'eau baissent, par prudence on élimine du calcul les situations pour lesquelles le gradient de salinité des étangs risque de sortir du schéma général, ainsi, on ne prend en compte que les dates où la cote NGF du Vaccarès est supérieure à - 0,15 m NGF.

— Niveaux

On s'assure que les indications données par les repères limnimétriques dont on dispose sont bien représentatives de plans d'eau étales. Pour le Vaccarès, l'imprécision sur la mesure des niveaux est faible, on calcule le volume de cet étang par rapport à la cote ± 1 cm. Pour les Etangs inférieurs dont nous avons vu qu'ils sont en moyenne plus hauts que le Vaccarès, lorsque leurs niveaux ne font pas l'objet de mesures, il est raisonnable d'insérer leur volume à l'intérieur d'une fourchette d'incertitude plus large. On considère que ce volume est compris entre deux valeurs extrêmes correspondant au niveau moyen du Vaccarès surcoté de 0 à 5 cm pour les étangs de Monro et du Fournelet, contigus au Vaccarès et en relation directe avec lui, et de 5 à 10 cm pour tous les autres plans d'eau.

— Imprécision relative de l'estimation des volumes

L'application de la règle ci-dessus donne pour le Vaccarès une imprécision assez faible, de $\pm 0,66$ Mm³ en valeur absolue et, compte tenu des variations du volume, de $\pm 0,6$ à $\pm 0,8$ % en valeur relative. L'imprécision relative sur le volume des Etangs

inférieurs est plus forte, de $\pm 3,5$ à $\pm 12,5$ % avec une moyenne de $\pm 5,4$ %, mais comme le volume des Etangs inférieurs ne représente en moyenne que 20 % du volume total du système Vaccarès, l'imprécision moyenne sur ce dernier reste modeste : en moyenne $\pm 1,6$ % (de $\pm 1,4$ à $\pm 2,2$).

3. Evolution temporelle du volume, du stock de sels dissous et de la salinité moyenne du système Vaccarès. Calculs et interprétation

3.1. Mode de calcul

L'application des règles ci-dessus a permis de retenir 86 dates pour lesquelles l'information sur le niveau et la salinité des étangs est suffisante pour déterminer dans des limites raisonnables d'incertitude le volume et le stock de sels dissous des différents compartiments du système Vaccarès. Ces dates sont inégalement réparties dans le temps et le manque total de données concernant la salinité des étangs inférieurs de 1956 à 1962 n'a pas permis la moindre estimation pour cette période. Pour chaque date retenue, j'ai établi une feuille de calcul informatisée. L'imprécision sur les tonnages varie en fonction de l'abondance de l'information et de sa qualité. Dans la limite des règles retenues pour les

calculs, l'imprécision relative est importante pour les Etangs inférieurs : ± 10 % en moyenne (de ± 5 à ± 20 %), elle est plus faible pour le Vaccarès : $\pm 4,5$ % en moyenne (de ± 2 à 8 %). Comme le stock des étangs inférieurs ne représente en moyenne que le quart du total (du sixième au tiers), l'imprécision relative moyenne sur celui-ci reste dans des limites acceptables : $\pm 5,7$ % en moyenne (de ± 3 à 11 %).

Pour un choix de 56 dates parmi les plus fiables pour le calcul des tonnages de sels dissous, le stock du Vaccarès est bien corrélé avec le stock total et il représente en moyenne 77 % de celui-ci (Fig. 6). En première approximation, on peut donc estimer le stock de sels dissous de l'ensemble du système à partir des seules données du Vaccarès par l'égalité :

$$\begin{aligned} \text{stock total} &= 1,23 \text{ stock Vaccarès} + 124 \\ (n &= 56 ; r_2 = 0,99) \end{aligned}$$

où les stocks sont exprimés en milliers de tonnes.

Cette méthode est intéressante par sa rapidité et parce qu'elle multiplie les possibilités d'évaluation du stock. En effet, plus facile d'accès, le Vaccarès est plus souvent visité que les Etangs inférieurs et les mesures de salinité y sont plus nombreuses, en outre, la mesure de niveaux y est plus précise.

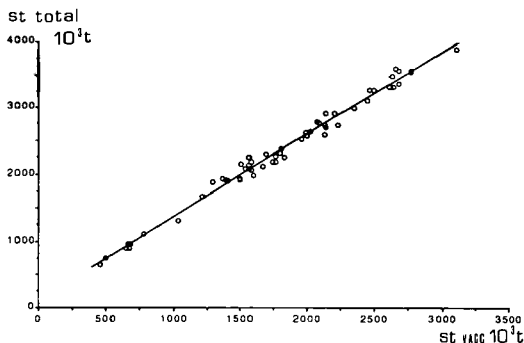


Fig. 6. Corrélation entre le stock de sels dissous (en milliers de tonnes) dans l'étang du Vaccarès (st VACC) et dans l'ensemble du système (st total).

Fig. 6. Correlation between the stock of dissolved salts (in thousands of tonnes) in the Vaccarès lagoon (st VACC) and in the whole system (st total).

3.2. Les événements ayant affecté le fonctionnement hydraulique du système Vaccarès au cours des quarante cinq dernières années.

L'évolution au cours des quarante-cinq dernières années, de la salinité des étangs (Tableau 4) et du tonnage des sels dissous calculé (Fig. 7) révèle la succession de cinq événements. Après avoir constaté les faits marquants de ces cinq événements nous essaierons d'en comprendre les mécanismes inducteurs.

3.2.1. Evolution constatée des niveaux d'eau, des salinités et du stock de sels dissous du système au cours des quarante cinq dernières années

— 1^{er} événement : dessalement du système de 1947 à 1954 en relation avec le développement de la riziculture.

Au cours de ces huit années, en même temps que le niveau moyen des étangs s'élève, la salinité du Vaccarès passe en été (juillet-août) de 40 à 10 g/l et en fin d'automne de 10 à 5 g/l. Le stock de sels dissous de l'ensemble du système baisse d'environ 2 millions de tonnes (Mt).

Antérieurement à mars 1953, les salinités et les niveaux d'eau ne sont pas suffisamment bien connus pour calculer des bilans salins précis, on peut

Tableau 4. Evolution comparée de la salinité de l'étang du Vaccarès et de l'ensemble du système de 1953 à 1991.
Table 4. Comparative changes in the salinity of the Vaccarès lagoon and the whole system from 1953 to 1991.

Périodes	Etang du Vaccarès				Tous les étangs			
	S mini	S moy.	S maxi	Ecart type	S mini	S moy.	S maxi	Ecart type
1953-75	5,4	7,3	12,0	1,7	5,5	8,1	12,8	1,9
1976-78	3,8	4,8	6,6	1,4	3,9	5,4	7,1	1,6
1979-85	7,0	21,2	33	7,9	8,7	22,2	34,2	7,8
1986-91	14,5	18,7	27	3,3	15,1	19,8	28,8	3,3
1953-91	3,8	15,2	33	7,7	3,9	16,2	34,2	7,8

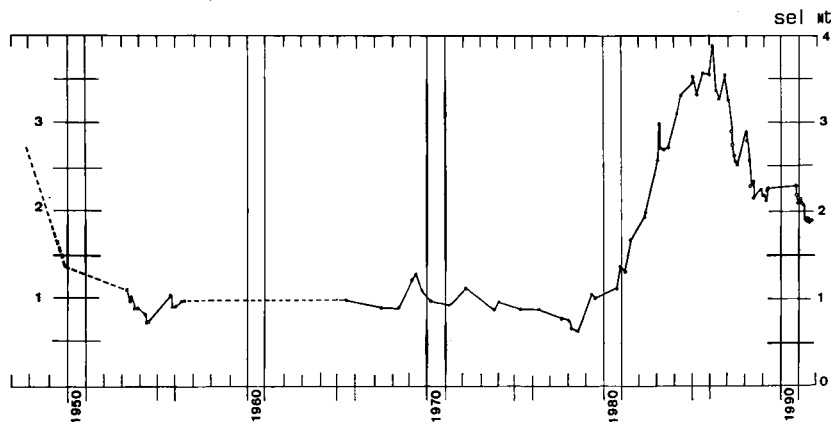


Fig. 7. Evolution du stock de sels dissous dans le système Vaccarès au cours des quarante cinq dernières années.

Stock en millions de tonnes ; trait tireté absence de données ou données imprécises.

Fig. 7. Changes in the stock of dissolved salts in the Vaccarès system over the last 45 years.

Stock in millions of tonnes ; dashed line indicates absence of data or imprecise data.

toutefois avoir une idée des stocks de sels dissous : environ 2,5 à 3 Mt en 1947, 1,2 Mt à la fin 1952. De mars 1953 à mai 1954 (15 mois), les bilans calculés font apparaître une baisse de 0,4 Mt (de 1,1 Mt à 0,7 Mt).

— **2ème événement** : stabilisation du stock de sels autour d'un million de tonnes de 1955 à 1976.

Pendant toute cette période, la salinité de l'étang du Vaccarès varie relativement peu, entre un minimum de 5 g/l (mars 1974) et un maximum de 10,7 g/l (juin-juillet 1969). La moyenne de juillet est de 8,4 g/l (écart type 1,7) et celle de décembre de 7,3 g/l (écart type 1,2). Les niveaux annuels moyens restent élevés, leur moyenne est de - 0,07 m NGF (de - 0,29 m en 1968 à + 0,12 m en 1969) avec un écart type de 0,20.

De 1956 à 1965, l'information sur les salinités est trop fragmentaire pour permettre un calcul précis des stocks de sels. On peut toutefois faire une approximation valable du stock pour la mi-1962, 1963 et 1964, dates pour lesquelles on connaît avec précision la salinité moyenne et le volume du Vaccarès. Le stock est compris entre 1 et 1,2 Mt. De la mi-1965 à la mi-1976, pour treize dates retenues, le stock oscille entre 0,85 et 1,25 Mt avec une moyenne de 1 Mt et un écart type de 0,14.

— **3ème événement** : malgré le déclin des cultures productrices d'eau de drainage (riz et submersion des vignes), accentuation du dessalement du système en 1977 et 1978 du fait d'un excédent pluviométrique.

Le calcul des bilans salins indique une baisse régulière du stock de sels dissous de l'automne 1976 (0,85 Mt) à la mi-1978 (0,63 Mt). Les niveaux annuels moyens restent élevés (+ 0,19 m NGF en 1977, + 0,01 en 1978). La salinité des étangs baisse et atteint les valeurs les plus faibles jamais atteintes (Vaccarès : 8 g/l à la mi-1976, 4 g/l en juin 1978 ; Etangs inférieurs aux mêmes dates : 20-25 g/l et 5-6 g/l).

— **4ème événement** : spectaculaire remontée de la salinité du système de 1979 à 1985.

A partir de 1979, on assiste à un revirement de situation aussi brutal qu'inattendu. Année après année, la salinité des étangs s'élève progressivement (Fig. 8). En Août 1984, pour une cote NGF de - 0,30 m, le Vaccarès atteint une valeur maximale de 35 g/l alors que l'étang de l'Impérial dépasse les 100 g/l.

Les bilans salins indiquent une rapide reconstitution du stock de sels dissous. Dès la fin 1979, le million de tonnes de sels est atteint (+ 0,4 Mt en un an et demi). Un stock de 1,3 Mt est calculé à la fin de 1980 (+ 0,3 Mt). Puis le stock passe à 2 Mt début 1982, (+ 0,7 Mt), à 3 Mt à la fin 1982 (+ 1 Mt), à 3,5 Mt à la fin 1984. Début 1986 on enregistre un maximum de 3,9 Mt.

En même temps qu'on assiste à ce resalement du système, on constate que les plans d'eau ont tendance à conserver des niveaux anormalement hauts, même à la fin d'étés secs.

— **5ème événement** : dessalement continu du système à partir de 1986.

Le début des années 1986, 1987 et 1988 est marqué par de fortes pluies et le maintien de hauts niveaux hivernaux des étangs. Au cours de ces trois années on assiste à un dessalement progressif du système qui perd 0,8 Mt de sels chaque année. A la même époque de l'année (septembre) et pour des niveaux comparables (- 0,17 à - 0,19 m NGF), la salinité du Vaccarès passe de 29 g/l en 1986 à 21 g/l en 1987 et 18 g/l en 1988.

Le régime de basses eaux qui affecte les étangs de l'été 1988 à l'automne 1990 (cote moyenne des étangs de juillet 1988 à septembre 1990 : - 0,22 m NGF) est marquée pendant toute cette période par une stabilisation du stock de sels autour de 2,2-2,3 Mt. Puis la décroissance du stock reprend. A la fin 1991, il est tombé à environ 1,8 Mt. Le Vaccarès ne titre plus que 15 g/l, les Etangs inférieurs entre 25 et 30 g/l.

3.2.2. Mécanismes inducteurs des variations du stock de sels dissous et de la salinité du système d'étangs

Ces mécanismes sont étudiés dans le détail par ailleurs (Heurteaux, 1988 c, d, e, f, g). Ils sont repris ici dans leurs grandes lignes.

Les gains et les pertes de sels par le système Vaccarès sont liés à la dynamique de l'eau sur son bassin versant.

— Les gains

L'apport pluvial et les colatures agricoles abaissent les salinités par dilution et font monter les niveaux d'eau, mais l'eau qui ruisselle sur le bassin versant terrestre dissout des sels (0,3 à 0,5 g/l de substances minérales autres que les carbonates et enrichit le stock des étangs. De même, des apports

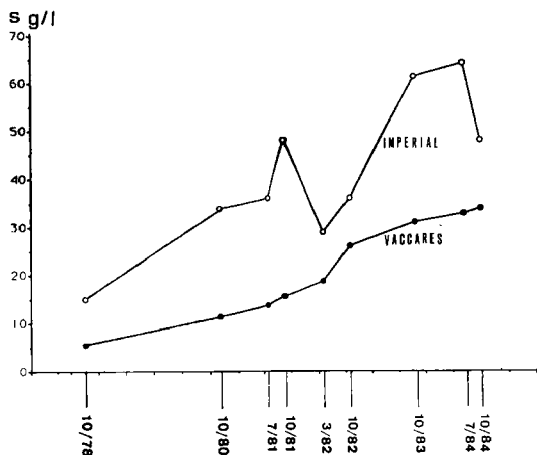


Fig. 8. Augmentation progressive de la salinité des étangs du Vaccarès et de l'Impérial d'octobre 1978 à octobre 1984 pour des niveaux voisins du système (moyenne - 0,24 m NGF, de - 0,21 à - 0,28).

Les baisses relatives de la salinité de l'Impérial sont provoquées par des entrées d'eau légèrement saumâtres provenant de la zone marécageuse à l'ouest de l'étang.

Fig. 8. Progressive increase in the salinity of the Vaccarès and Impérial lagoons from October 1978 to Octobre 1984 for similar levels of the system (mean - 0.24 m NGF, range - 0.21 to - 0.28).

The relative decline in the salinity of the Impérial was caused by the ingress of slightly, brackish water avoising from the marshy zone to the west of the lagoon.

exogènes de sels sont possibles par la mer et les eaux souterraines de la zone des Etangs inférieurs.

— Les pertes

Si les niveaux sont suffisamment hauts, le trop-plein des étangs s'épanche en mer par les vannages de la digue, mais l'eau ainsi évacuée est salée, d'où une diminution du stock. Le niveau des étangs est sous la dépendance étroite 1) du bilan des pluies et de l'évaporation, 2) de la superficie qu'occupent sur le bassin versant les cultures productrices d'eau de drainage (rizières, submersion des vignes) et 3) de l'effort d'assainissement par les stations de repompage au Rhône qui écarte du Vaccarès une partie des eaux de drainage.

La baisse du stock de sels et le dessalement des étangs dans les années 1950 est en relation avec le boom rizicole. Pour la seule Ile de Camargue,

les surfaces cultivées en riz passent de 1 400 ha en 1947 à 8 000 ha en 1950 et 13 000 ha en 1954. Les rizières consomment alors à l'hectare de 20 000 à 25 000 m³ d'eau dont 5 000 à 10 000 m³ sont exportés dans l'environnement. Toute l'hydraulique camarguaise s'en trouve bouleversée. Une partie importante des colatures rizicoles s'écoule par gravité au Vaccarès. Malgré l'entrée en fonction en 1950 d'une station de repompage d'eau de drainage au Rhône, dès cette date l'apport rizicole aux étangs dépasse les 50 millions de m³ par an auxquels s'ajoutent à l'automne quelque 10 millions de m³ provenant de la submersion des vignes. Cette eau de drainage agricole provoque le dessalement et la hausse des niveaux de tous les plans d'eau. L'élévation des niveaux est favorable à l'évacuation du trop-plein hivernal des étangs par les vannes de la Digue à la mer, évacuation qui se traduit par une hémorragie

de sels. En 1953, de très fortes pluies d'automne (0,60 m en octobre-novembre soit trois fois la normale saisonnière) ajoutent leur effet à celui des retours d'irrigation. La Camargue est alors au bord de l'inondation. D'octobre 1953 à mai 1954, les bilans salins indiquent une diminution du stock de sels dissous de 0,4 Mt. Compte tenu des apports de sels au Vaccarès par le ruissellement pluvial et agricole, estimés à quelque 50 000 tonnes et d'éventuels apports par les eaux souterraines aux Etangs inférieurs, au cours de ces huit mois, les pertes effectives de sels ont dû s'élever à près de 0,5 Mt représentant quelque 70 millions de m³ d'eau.

Pour éviter le retour à la situation critique de 1953, un réseau d'assainissement permettant de rejeter au Rhône une partie plus importante des eaux de ruissellement fonctionne dès 1955, mais les surfaces cultivées en riz s'accroissent jusqu'à atteindre 16 000 ha entre 1960 et 1965 pour la seule Ile de Camargue. D'autre part, dès 1960, de nouvelles pratiques culturales grandes consommatrices d'eau (irrigation « à la surverse ») doublent ou même triplent le volume des eaux de drainage rizicoles (Heurteaux 1988 a). Ainsi, de 1954 à 1965, malgré les repompages d'assainissement au Rhône, le système Vaccarès continue à recevoir un volume important d'eaux douces d'origine agricole (rizières et vignes) dépassant les 60 millions de m³ par an. La fin de la décennie 1960 et toute la décennie 1970 sont marquées par une forte récession rizicole (10 000 ha en 1970, 4 000 ha en 1980 entre les deux bras du Rhône), donc par une diminution du volume des colatures drainées au Vaccarès (25 millions de m³ en 1970, 15 millions en 1980). Néanmoins, l'apport répété d'eau douce au Vaccarès, couplé aux pertes de sels par la Digue à la mer, aurait dû aboutir à une forte diminution du stock de sels dissous. Vers 1975, celui-ci n'aurait dû représenter que quelque 120 000 tonnes. On constate au contraire jusqu'à la mi-1976, que le stock de sels dissous se stabilise autour du million de tonnes. Il y a donc eu compensation de pertes salines par un apport au moins égal à ces pertes et bien supérieur au seul apport par les eaux drainées sur le bassin versant des étangs. Cet apport compensateur peut avoir pour origine d'éventuelles entrées d'eau de mer par inversions occasionnelles du fonctionnement des vannes de la Digue à la mer ou une alimentation par la nappe aquifère salée qui s'étend sous toute la zone des Etangs inférieurs. Il semble que pendant plus de

vingt ans, les conditions aient été favorables à un apport important de sels par les eaux souterraines. Cet apport peut se produire lorsque la nappe aquifère a son niveau piézométrique plus élevé que le sol et suinte à la surface (effet de source diffuse). Sous les étangs, l'effet de source diffuse se manifeste à l'occasion d'une augmentation de la pression dans le coin salé marin qui pousse la nappe sus-jacente vers le haut. Sous les sansouires, cela peut se produire en période de hautes eaux lorsqu'un afflux important d'eau venant du Vaccarès provoque une élévation anormale du niveau des étangs du sud. Cette élévation par transmission des pressions, entraîne une mise en charge des eaux souterraines adjacentes dont le niveau peut dépasser celui du sol. L'effet de source diffuse peut également se faire sentir dans les terres basses bordant le flanc nord de la Digue à la mer en automne lorsque le niveau des étangs est encore bas et que des en-pleins marins provoquent une importante différence de charge de la nappe aquifère de part et d'autre de la digue.

Ainsi, pour la période 1955-74, les apports de sels ont peu ou prou compensé les pertes par évacuation à la mer. J'évalue ces pertes à 2,5 Mt. Les apports compensateurs proviennent des eaux pluviales et agricoles (0,7 Mt), peut-être d'intrusions marines directes, mais surtout des eaux souterraines de la zone des Etangs inférieurs (1,8 Mt).

L'importante baisse du stock de sels dissous constatée en 1977 et 1978 est en rapport avec d'abondantes précipitations qui maintiennent de très hauts niveaux d'eau favorables aux sorties d'eau et de sels par les vannes de la Digue à la Mer. D'octobre 1976 à mai 1978 (20 mois) il tombe 1,80 m d'eau soit 1,7 fois la moyenne pour cette période. Au cours du premier semestre de 1978, le stock de sels et la salinité des étangs atteignent les basses valeurs signalées plus haut, mais un apport compensateur des eaux souterraines a probablement eu lieu et le dessalement aurait dû être encore plus poussé.

Le resalement constaté à partir de 1979 a lieu malgré l'augmentation du volume des colatures agricoles liée à une nette reprise de la riziculture (8 500 ha en 1985). Ce resalement est trop important pour être l'œuvre du seul apport des eaux souterraines de la zone des Etangs inférieurs. Il y a tout lieu de penser que se sont produites des introductions d'eau de mer dans le système d'étangs par la Digue à la Mer. Laisés sans entretien pendant la crise rizicole de la

décennie 1970, la digue littorale et ses vannages ont perdu en étanchéité. Cette situation est favorable aux intrusions marines résultant de fuites chroniques ou provoquées par les intempéries. Tous les vannages fuient plus ou moins, celui du phare de la Gacholle n'est plus qu'une brèche dans la digue, les coursiers des vannes ayant disparu rongés par la rouille. D'après mes observations, pendant l'automne 1982, cet ouvrage ruiné a laissé pénétrer dans les étangs un volume d'eau de mer de quelque 4 millions de m³ soit environ 150 000 tonnes de sels. La tempête des 6-8 novembre 1982, qui a élevé la mer à la cote + 1,35 m sur le littoral camarguais, a ouvert des brèches dans le corps de la digue et semble responsable de l'introduction directe ou indirecte de plusieurs millions de m³ d'eau de mer et de plus de 300 000 tonnes de sels. Les dégâts causés par cette mémorable tempête ont incité les organismes responsables à réparer la digue littorale. Des colmatages de première urgence ont été faits, les vannages ruinés au phare de la Gacholle et au trabas de Rousty ont été étanchés puis condamnés, le pertuis de la Fourcade, près des Saintes-Maries-de-la-Mer, en partie détruit par les hautes eaux de 1986, a été réparé en 1987, enfin le corps de la digue a été entièrement refait en 1989-90.

En sept ans et demi, de la mi-1978 à la fin 1985, les bilans salins montrent que le stock de sels est passé de 0,6 à 3,9 Mt, soit une augmentation apparente de quelque 3,3 Mt. Pour quantifier l'apport total de sels au système, à ce tonnage, il faut ajouter la perte de sels due aux sorties d'eau salée par la Digue à la mer pendant la même période. J'estime ces sorties à 43 millions de m³ et la perte en sels à quelque 0,7 Mt. L'apport total au système a donc atteint les 4 Mt de sels soit en équivalent eau de mer, 105 millions de m³ représentant une lame d'eau sur les étangs de près d'un mètre. De telles quantités ne peuvent pas être attribuées aux seuls intrusions accidentelles d'eau de mer. Elles sont de toute évidence, pour partie, le fait d'une intervention humaine volontaire sur les vannes du pertuis de la Fourcade pour introduire eau de mer et poissons dans les étangs de l'Imperial et du Malagroy. Les appareils enregistrant les variations des niveaux à l'amont et à l'aval de l'ouvrage témoignent de cette intervention, mais l'état et le mode de fonctionnement des vannages de la Digue à la mer ne permettent malheureusement pas de chiffrer avec précision les mouvements d'eau dans un sens ou

dans l'autre à partir de ces enregistrements. J'estime à 45-50 millions de m³ les introductions volontaires d'eau de mer dans les étangs de la fin 1978 au début de 1986, soit un apport de 1,7 à 1,9 millions de tonnes de sels qui ont largement contribué au maintien des hauts niveaux et au resalement du système.

Les entrées volontaires massives d'eau de mer par le pertuis de la Fourcade cessent pratiquement en 1986 alors que des réparations d'urgence sur la Digue à la mer ont limité les intrusions accidentelles. Les fortes précipitations de janvier-février 1986 (0,29 m contre 0,11 en moyenne), de janvier-février 1987 (0,24 m) et de janvier 1988 (0,13 m ; moyenne : 0,05) provoquent la dilution de l'eau des étangs et une élévation des niveaux favorables à l'évacuation du trop-plein par le pertuis de la Fourcade et à une baisse importante du stock de sels dissous. Les bilans salins montrent qu'en 1986, 1987 et 1988, le système perd chaque année quelque 0,8 Mt de sels représentant, compte tenu de la salinité de l'Imperial, une évacuation par la Digue à la mer d'environ 30 millions de m³ d'eau les deux premières années et 40 millions en 1988.

Il a donc suffi de trois hivers pluvieux successifs pour évacuer à la mer les deux tiers du tonnage de sels introduit au cours des sept années précédentes. Le dessalement aurait été encore plus poussé sans l'apport compensateur des eaux souterraines. Comparé aux pertes par la Digue à la mer, l'état du stock entre le début de 1986 et la fin 1988 fait apparaître un excédent d'environ 500 000 tonnes. Cet excédent est à parts à peu près égales imputable aux apports par la nappe aquifère et à des entrées d'eau de mer insidieuses ou volontaires (par le pertuis de la Comtesse). Dès 1989, les intrusions involontaires sont minimisées avec la réfection de la Digue à la mer et un contrôle plus strict du fonctionnement des vannages interdit toute manipulation illicite.

Le régime de basses eaux qui affecte les étangs de l'été 1988 à l'automne 1990 est marqué pendant toute cette période par un équilibre des entrées et sorties de sels, au demeurant peu importantes. A partir de l'automne 1990, le retour à de hauts niveaux d'eau autorise à nouveau les sorties par la Digue à la mer et avec elles, le stock de sels reprend sa tendance à la baisse.

4. Conclusion

Les aménagements du territoire camarguais, comme l'endiguement du fleuve et de la mer, l'amélioration du réseau gravitaire de drainage, et les grandes options économiques, comme la riziculture, décidés dans le louable but de faciliter la vie des gens ou de valoriser l'économie du delta, n'ont pas eu à terme que des conséquences bénéfiques. Bouleversant les équilibres hydrauliques et écologiques des étangs centraux du delta, ces interventions humaines ont affecté toute la Camargue, tant il est vrai que celle-ci est toute autant tributaire de ses étangs que du Rhône.

En une cinquantaine d'années, les conditions écologiques du système Vaccarès ont changé radicalement deux fois et sont en passe de changer une troisième fois si rien n'est fait pour enrayer la tendance. Autour des années 1950, les apports massifs d'eau douce d'origine rizicole (Arrighi de Casanova 1954) ont eu pour conséquence un dessalement très fort d'étangs jusque là saumâtres ou salés et une élévation des niveaux d'eau annulant l'assèchement partiel estival du Vaccarès et réduisant la durée de l'assèchement total ou partiel des Etangs inférieurs (Duboul-Razavet 1949, Tallon 1954, Aguesse & Marazanof 1965). Dès 1979, d'importantes entrées d'eau de mer ont eu l'effet inverse, transformant en quelques années un système faiblement saumâtre en milieu marin. A chaque fois il y a eu sans transition un changement qualitatif des biocénoses. A chaque fois une biocénose « adulte », sinon riche, a été brutalement anéantie alors que la biocénose de remplacement ne s'est que progressivement installée. A chaque fois, il y a eu une période pendant laquelle la richesse écologique du milieu s'est trouvée considérablement diminuée.

Si on peut affirmer que les perturbations anthropiques poussées trop loin sont néfastes à la richesse du milieu, on ne saurait dire avec certitude quels sont les meilleurs niveaux et les meilleures salinités des étangs centraux de la Camargue pour l'économie du delta et la conservation des milieux naturels. Les deux compartiments du système Vaccarès ont une morphologie et un régime hydrique si différents que des conditions jugées bonnes pour l'un peuvent être mauvaises pour l'autre. Trop dessalé, le système Vaccarès perd beaucoup de son originalité, mais les salinités élevées entraînent l'installation de biocénoses marines appauvries. On a vu pendant la phase

de resalement des étangs, potamots et *Ruppia* céder le pas aux zostères (*Zostera noltii*) dont les herbiers se sont d'autant mieux développés que la turbidité des eaux a diminué (Vaquer & Heurteaux 1989). Dans le Vaccarès, athérines, crabes et crevettes ont remplacé les sandres, les carpes et les perches qui peuplaient l'étang dessalé par la riziculture. Par contre, les peuplements de lousps et de soles ne se sont pas développés, sans doute à cause de la trop faible profondeur des eaux incapables d'offrir un refuge aux espèces marines sensibles au froid. En été, lorsque les niveaux sont bas, le resalement du système peut se traduire pour les Etangs inférieurs par une hyperhalinité peu favorable à la vie.

D'autre part, la richesse écologique des étangs ne dépend pas seulement des valeurs moyennes des niveaux et des salinités. Les variations salines saisonnières et un minimum d'échanges avec la mer pour le recrutement des espèces marines y concourent également. Actuellement, ces conditions ne sont guère favorables. Si les Etangs inférieurs conservent une certaine euryhalinité (17-40 g/l), la salinité du Vaccarès reste dans des limites trop étroites (14-17 g/l). En ce qui concerne les échanges avec la mer, la gestion du puits de la Fourcade ne laisse guère de chance au recrutement hivernal.

Une meilleure concertation entre les différents groupes sociaux intéressés par le fonctionnement hydraulique du système Vaccarès pourrait améliorer la situation. La grande Camargue, enfermée dans ses digues est un milieu fausement naturel. L'homme y a la maîtrise de l'eau et peut intervenir pour limiter l'impact de ses propres excès et de ceux du climat. Gérer l'hydraulique de la Grande Camargue est une des missions du Parc naturel régional. Gérer l'hydraulique de la Grande Camargue, c'est d'abord fixer des règles pour le système Vaccarès qui tiennent compte des intérêts des Camarguais sans pour autant sacrifier la richesse écologique d'un milieu qui, faut-il le rappeler, constitue une des Réserves naturelles les plus prestigieuses du monde.

Travaux cités

- Aguesse P. & Marazanof F. 1965. — Les modifications des milieux aquatiques de Camargue au cours des 30 dernières années. *Annls Limnol.*, 1 (2) : 163-170.
- Arrighi de Casanova J. 1954. — Problèmes hydrauliques posés par la riziculture. *Bull. inf. rizicult. de Fr.* 33 : 19-22.
- Campredon-Rouge S. & Vaquer A. 1978. — Evolution des caractéristiques physiques, chimiques et biochimiques des étangs du Vaccarès et du Lion de septembre 1977 à septembre 1978. Centre d'écologie de Camargue CNRS. Doc. polycomp. 10 pp.

- Duboul-Razavet C. 1949. — L'évolution actuelle du Vaccarès. *C.R. Acad. Sc.*, 229 : 1244-1245.
- Heurteaux P. 1988 a. — L'eau et la riziculture en Camargue. Bilans hydriques des rizières et phénomènes souterrains induits par la riziculture, conséquences écologiques et agronomiques. 1ère partie : bilans hydriques des rizières. *Ecologia mediterranea* XIV (1/2) 17-32.
- Heurteaux P. 1988 b. — La mesure de la salinité des eaux naturelles. Essai pour une standardisation de l'expression des résultats. *Ecologia mediterranea* XIV (3/4) 150-166.
- Heurteaux P. 1988 c. — La dynamique de l'eau et du sel des étangs du système Vaccarès. 1ère partie : L'évolution du niveau du Vaccarès depuis 1951. Parc naturel régional de Camargue éd. Doc., polycop. 34 p.
- Heurteaux P. 1988 d. — La dynamique de l'eau et du sel des étangs du système Vaccarès. 2ème partie : Essai de qualification des termes du bilan hydrique des étangs du système Vaccarès. Parc naturel régional de Camargue éd. Doc. polycop. 43 p.
- Heurteaux P. 1988 e. — La dynamique de l'eau et du sel des étangs du système Vaccarès. 3ème partie : La circulation des eaux entre les différents étangs du système Vaccarès. Phénomènes inducteurs et conséquences. Parc naturel régional de Camargue éd. Doc. polycop. 47 p.
- Heurteaux P. 1988 f. — La dynamique de l'eau et du sel des étangs du système Vaccarès. 4ème partie : L'évolution du stock de sels dissous dans les étangs du système Vaccarès au cours des quarante dernières années. Parc naturel régional de Camargue éd. Doc. polycop. 34 p.
- Heurteaux P. 1988 g. — La dynamique de l'eau et du sel des étangs du système Vaccarès. 5ème partie : Les mécanismes inducteurs des pertes et des gains de sels par les étangs du système Vaccarès. Parc naturel régional de Camargue éd. Doc. polycop. 26 p.
- Marazanof F. 1969. — Contribution à l'étude écologique des mollusques des eaux douces et saumâtres de Camargue. I. milieux, espèces. *Annls limnol.*, 5 (3) : 201-323.
- Ministère de l'agriculture (éditeur) 1970. — Camargue. Etude hydrogéologique, pédologique et de salinité. 4 volumes en coffret. 372 p. + annexes + cartes.
- Ministère de l'agriculture (éditeur). Direction départementale de l'agriculture des Bouches-du-Rhône. 1973. — Camargue. Etude hydrogéologique, hydrologique et de salinité. Réseau d'observation : données récentes. Service hydraulique d'Arles. Doc. polycop. 19 p.
- Ministère de l'agriculture (éditeur). Direction départementale de l'agriculture des Bouches-du-Rhône. 1975. — Détermination du cycle annuel normal du niveau de l'étang du Vaccarès. Camargue, études hydrauliques et hydrologiques. Doc. polycop. 23 p. + annexes.
- Ministère de l'agriculture (éditeur). Direction départementale de l'agriculture des Bouches-du-Rhône. 1977. — Camargue. Etude hydrologique : données récentes. Doc. polycop. Service d'Arles, 77 p.
- Nachtergal A. & Nachtergal C. 1958. — *Notes et formules du technicien*. Desforges (éd.) Paris. Vol. 1, 762 p.
- Nisbet M. & Schachter D. 1961. — Contribution à l'étude écologique des étangs méditerranéens. Constituants chimiques des eaux de quelques étangs littoraux. *Bull. Inst. océanog. Monaco*, 1207 : 3-46.
- Parc Naturel Régional de Camargue (éditeur). 1986. — Camargue. Données hydrologiques 1977-1985. Doc. polycop. 102 p.
- Parc Naturel Régional de Camargue (éditeur). 1986. — Bathymétrie du Vaccarès et des étangs inférieurs. Doc. polycop. & cartes. Réserve naturelle & SNPN-GIS Camargue : 12 p.
- Petit G. & Schachter D. 1954. — Note sur l'évolution hydrologique et écologique de l'étang du Vaccarès. *Terre & Vie*, 101 : 121-128.
- Schachter D. 1949. — Contribution à l'étude écologique de la Camargue. Le milieu aquatique et sa faune. Thèse Doc. Etat. Fac. Sc. Paris. Doc. polycop. 354 p.
- Tallon G. 1954. — Transformation de la Camargue par la riziculture. Evolution du Vaccarès. *Terre & Vie*, 101 : 65-79.
- Vaquier A. & Heurteaux P. 1989. — Modifications récentes de la végétation aquatique de l'étang du Vaccarès (Camargue, France) liées aux perturbations anthropiques. *Annls Limnol.* 25 (1) : 25-38.