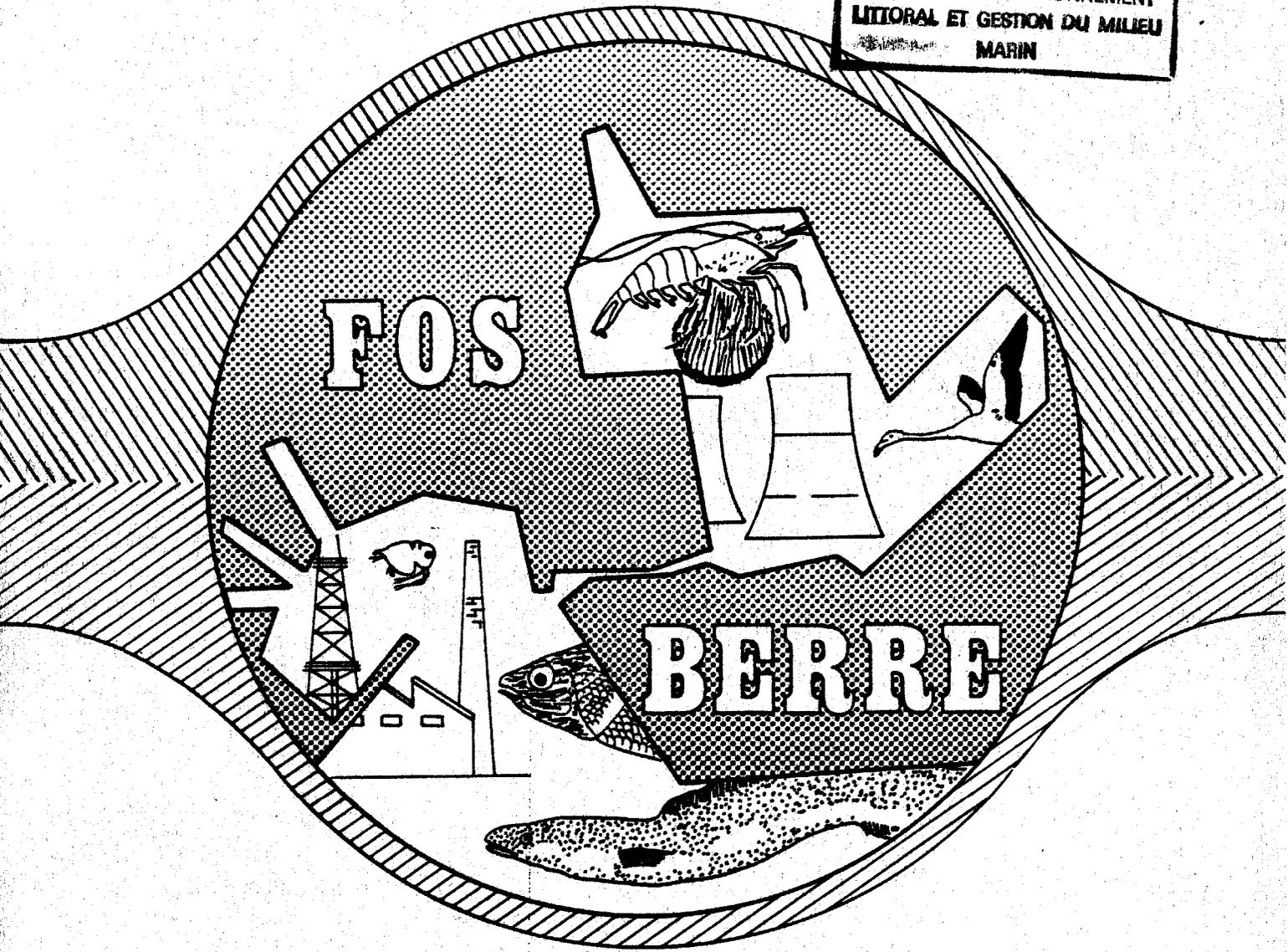


ETUDE REGIONALE INTEGREE

Etang de Berre

Bilan des Connaissances écologiques

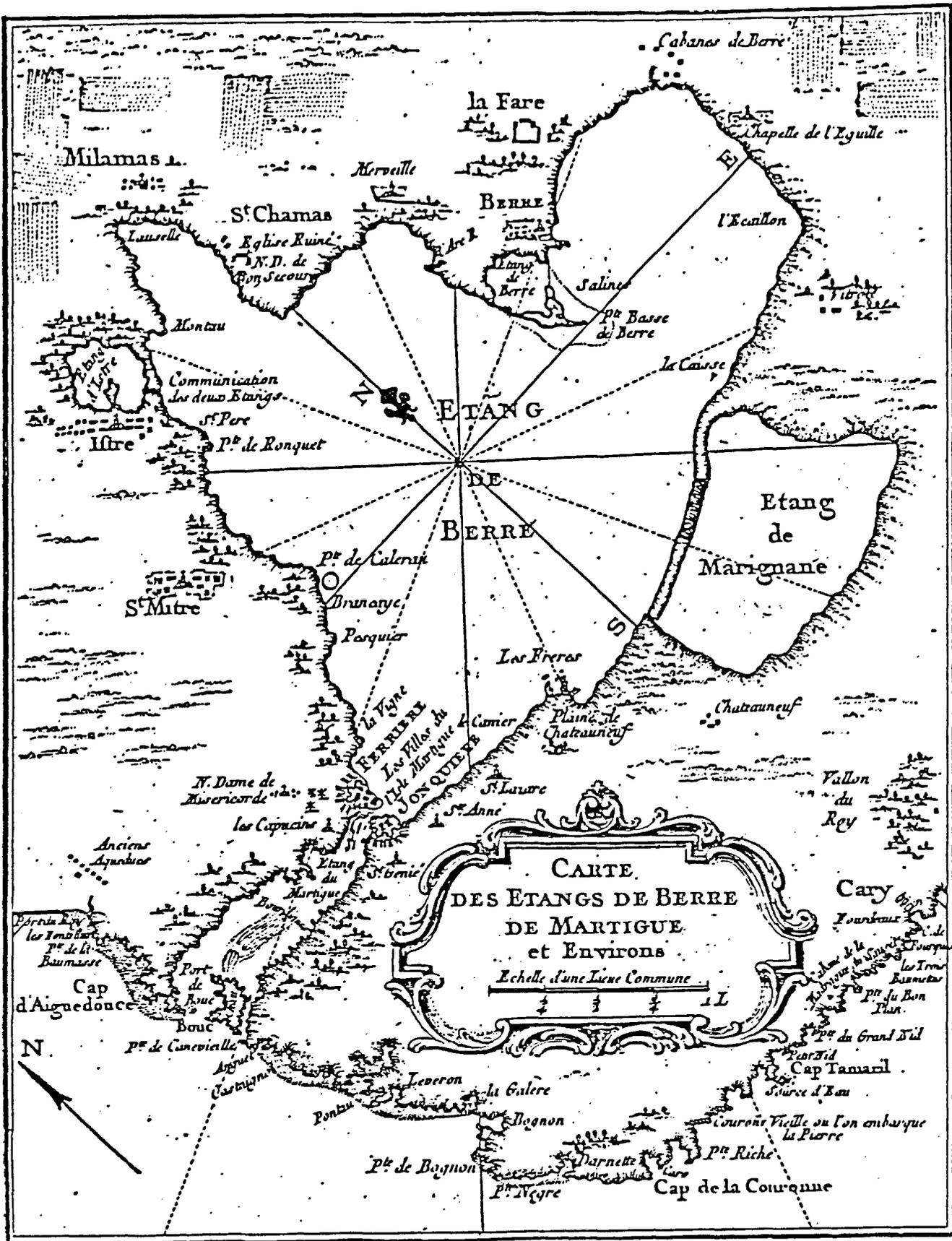
DÉPARTEMENT ENVIRONNEMENT
LITTORAL ET GESTION DU MILIEU
MARIN



STATION MARINE D'ENDOUME · CENTRE OcéANOLOGIQUE DE MARSEILLE
LABORATOIRE DE GÉOLOGIE MARINE ET SEDIMENTOLOGIE APPLIQUÉE
FACULTE DES SCIENCES DE LUMINY

IFREMER **JUILLET 1985**

Direction de l'Environnement et des Recherches Océaniques
Département Environnement Littoral · Centre de Toulon



L'ETANG de BERRE selon une carte du début du XVIII^e siècle

SOMMAIRE

	pages
INTRODUCTION	1
. Caractéristiques géographiques.....	2
. Cadre géologique.....	2
. Evolution géomorphologique au IVe.....	3
. Evolution historique.....	4
I - PREMIERE PARTIE : ORIGINES DES MATERIAUX ET VITESSE DE COMPLEMENT ..	8
<u>I.1. ORIGINE DES MATERIAUX</u>	9
I.1.1. L'érosion littorale.....	9
I.1.2. Les développements biogènes.....	10
I.1.3. Les apports de l'Arc.....	11
I.1.4. Les apports de la Touloubre.....	15
I.1.5. Conclusion.....	17
<u>I.2. VITESSE DE COMPLEMENT</u>	17
I.2.1. Bathymétrie actuelle.....	17
I.2.2. Variations bathymétriques.....	18
I.2.3. Volumes des exhaussements.....	21
I.2.4. Origines des matériaux.....	21
II - DEUXIEME PARTIE : ETAT DES FONDS EN 1962	23
<u>II.1. LES ETUDES ANTERIEURES</u>	24
II.1.1. Au siècle dernier.....	24
II.1.2. Au début du siècle.....	24
II.1.3. Au cours des années 1950-1960.....	26
<u>II.2. LES FONDS DE L'ETANG EN 1962</u>	26
II.2.1. Répartitions des principaux types de sédiments.....	26
II.2.2. Minéralogie des sédiments.....	27
<u>II.3. CONCLUSION</u>	30

III -	TROISIEME PARTIE : LES APPORTS SOLIDES DU CANAL E.D.F.	
	DE SAINT CHAMAS	32
	<u>III.1. LES APPORTS SOLIDES</u>	33
	III.1.1. Historique.....	33
	III.1.2. Granulométrie des Limons.....	37
	III.1.3. Minéralogie des Limons.....	37
	III.1.4. Tonnages et volumes des apports limoneux.....	39
	<u>III.2. LE BASSIN DE DELIMONAGE SOUS-MARIN DE ST CHAMAS</u>	40
	III.2.1. Modalités de fonctionnement hydrodynamique.....	41
	III.2.2. Les dépôts du bassin de délimonage.....	41
	III.2.3. Estimations du rendement du bassin.....	42
	<u>III.3. CONCLUSION</u>	43
IV -	QUATRIEME PARTIE : LES FONDS DE L'ETANG DE BERRE EN 1976	44
	<u>IV.1. PRINCIPAUX CARACTERES DU SEDIMENT GLOBAL</u>	45
	IV. 1.1. Malacofaunes.....	45
	IV. 1.2. Teintes des sédiments.....	47
	IV. 1.3. Conclusions.....	48
	<u>IV.2. SEDIMENTOLOGIE DES DEPOTS SUPERFICIELS</u>	50
	IV. 2.1. Les lutites et les sablons.....	51
	IV. 2.2. La fraction pélitique.....	52
	IV. 2.3. La fraction 20 μ -2 μ	52
	IV. 2.4. La fraction inférieure à 2 μ	52
	IV. 2.5. La fraction inférieure à 31.5 μ	54
	<u>IV.3. MINERALOGIE</u>	55
	IV. 3.1. Calcimétrie.....	55
	IV. 3.2. Les minéraux argileux.....	56
	<u>IV.4. CONCLUSIONS. BILAN DES PERTURBATIONS ANTHROPIQUES</u>	59
	IV. 4.1. Les facteurs de la sédimentogenèse.....	59
	IV. 4.2. Les sédiments.....	60
	IV. 4.3. La sédimentation.....	61

V -

CINQUIEME PARTIE : HYDROBIOLOGIE ET QUALITE DES EAUX DE**L'ETANG DE BERRE**

	.....	65
<u>V.1 CLASSIFICATION DES ETUDES</u>	.....	66
V.1.1 Recensement des travaux	.....	66
V.1.2 Stratégies d'échantillonnage utilisées	.....	66
Paramètres	.....	66
Stations	.....	69
Périodes	.....	70
<u>V.2 EVOLUTION DU MILIEU</u>	.....	71
V.2.1 Paramètres hydrologiques	.....	74
Température	.....	74
pH	.....	74
Alcalinité	.....	75
Salinité	.....	75
V.2.2 Paramètres hydrobiologiques	.....	77
Oxygène dissous et saturation	.....	77
Sels nutritifs	.....	78
Matériel particulaire	.....	79
V.2.3 Communauté phytoplanctonique	.....	80
1) structure	.....	80
2) fonctionnement	.....	81
V.2.4 Communauté zooplanctonique	.....	82
V.2.5 Analyse bactériologique	.....	83
V.2.6 Conclusions	.....	83
<u>V.3 PERSPECTIVES</u>	.....	85
V.3.1 Axes de recherches	.....	85
Courantologie	.....	85
Rôle de la stratification et processus de mélanges verticaux	.....	85
Cycle de l'azote	.....	85
Echanges Berre-Fos	.....	86
Biomasse et production primaire	.....	86
Importance du zooplancton	.....	86
Pollution	.....	87

VI -

SIXIEME PARTIE : LE BENTHOS

	.....	88
<u>VI.1 INTRODUCTION</u>	.....	89
<u>VI.2 ETUDES ANTERIEURES A 1966</u>	.....	89

<u>VI.3</u>	<u>ETUDES POSTERIEURES A 1966</u>	
VI.3.1	Benthos du substrat meuble	90
VI.3.2	Etudes faunistiques	91
VI.3.3	Modification et destruction de la flore	92
VI.3.4	Contamination, fixation, concentration des polluants dans les organismes	92
<u>VI.4</u>	<u>LE CANAL DE CARONTE</u>	93
<u>VI.5</u>	<u>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</u>	94
VII -	<u>SEPTIEME PARTIE : PEUPEMENTS ICHTYOLOGIQUES ET</u>	
	<u>LEUR EXPLOITATION</u>	96
<u>VII.1</u>	<u>HISTORIQUE</u>	97
<u>VII.2</u>	<u>LES PECHEURS</u>	98
<u>VII.3</u>	<u>LES ENGINS DE PECHE</u>	98
<u>VII.4</u>	<u>LES ESPECES PECHEES</u>	98
VII.4.1	L'anguille	99
VII.4.2	Autres espèces	100
<u>VII.5</u>	<u>CONCLUSION</u>	100

AVANT-PROPOS

— La zone de Fos - Berre a subi de profondes transformations au cours des 20 dernières années : implantation d'un vaste complexe portuaire et industriel, augmentation de la population, modifications consécutives à l'aménagement du Bas-Rhône et de la Durance. —

Dès 1971, la création du S.P.P.P.I. a permis pour la première fois en France, de mettre en place une action coordonnée entre les administrations, les scientifiques, les élus et les usagers, destinée à préserver le milieu naturel des différents types de pollution engendrée par ce développement.

De ce fait, un grand nombre de travaux scientifiques ont été réalisés depuis, la plupart du temps en vue d'estimer et si possible, quantifier, l'impact des activités humaines sur le milieu.

Ce rapport fait le point de l'ensemble des connaissances scientifiques acquises à ce jour sur l'étang de Berre, et pour les différents domaines qui concernent l'écosystème : la physique, la sédimentologie, l'hydrobiologie, le plancton, le benthos et la pêche.

Il a été élaboré en collaboration avec les organismes scientifiques suivants :

- Laboratoire de Géologie Marine et Sédimentologie Appliquée, Faculté des Sciences de Luminy (L.G.M.S.A.)
- Centre Océanologique de Marseille, division Delagros (D.P.) et Benthos (D.B.)
- Station IFREMER de Sète (IFREMER)

Ont participé aux rédactions des différents chapitres :

- . R.M. ROUX, maître de conférences (L.G.M.S.A.)
- . C. NODOT, chercheur (D.P.)
- . M. RODIER, chercheur (D.P.)
- . M.G. STORA, maître de recherches (D.B.)
- . D. BELLAN, directeur de recherches (D.B.)
- . B. LIORZOU, chercheur (IFREMER)

sous la coordination scientifique de L.A. ROMANA (IFREMER)

INTRODUCTION

L'ETANG DE BERRE

Connu des géographes de l'Antiquité sous le nom de "Stagnum Mastrome-la", l'Etang de Berre occupe l'extrémité occidentale du bassin d'Aix-en-Provence, au Sud de la plaine de la Crau, à mi-chemin entre le port de Marseille et le delta du Rhône (figure 1).

Diverses annexes : Golfe de Saint-Chamas au Nord, Etang de Vaïne à l'Est ou de Bolmon au Sud, s'ajoutent au Grand Etang pour former le plus vaste plan d'eau du littoral méditerranéen français. Sa superficie atteint, d'après A. Delebecque, 15 567ha, chiffre que A. Chevallier ramène à 15 550ha. La profondeur maximum de la cuvette, au Nord de la Mède, n'excède pas 10 mètres. Sa plus grande longueur, entre ce dernier hameau et Miramas, est de 20km, et sa largeur maximum, des Martigues à Rognac, de 16.5km. Le développement de ses côtes serait voisin de 72km. Il communique avec le Golfe de Fos par l'étang naturel de Caronte qui, en l'absence du canal artificiel reliant Martigues à Port-de-Bouc, ne serait qu'une lagune de 6km de long sur 1.5km de large.

Outre quelques petits ruisseaux, l'étang reçoit deux affluents principaux : l'Arc et la Touloubre. Tous deux débouchent dans la moitié nord du plan d'eau. Chacun édifie un delta d'importance très inégale en raison de la disparité des surfaces de leur bassin versant respectif et des différences d'altitudes de leurs reliefs limitrophes. Depuis le XVII^e siècle, le surplus des eaux d'irrigation est rejeté à l'étang par le canal de Craonne (1554), puis ultérieurement, des Alpilles (1784). Enfin, depuis 1966, l'étang reçoit les eaux prélevées en Durance par le canal usinier alimentant la chaîne de centrales hydroélectriques de la Basse-Provence. Cet apport, voisin de 3.6 milliards de m³ par an, correspond à près de 4 fois la capacité de la cuvette estimée à 980 millions de m³.

Les côtes sont rocheuses à l'Ouest du méridien de La Mède-St Chamas, où les hauteurs qui ceinturent l'étang (Mont Calaraou, chaîne de la Nerthe) sont nettement marquées et culminent à plus de cent mètres. A l'Est, au contraire, des rives basses limitent les deltas de l'Arc et de la Touloubre ou divers corps sédimentaires en voie d'évolution: flèche sableuse de Berre qui progressait jadis vers le Sud et cordon littoral sub-fossile du Jaï. Ces formations sont respectivement parallèle et perpendiculaire à la résultante annuelle des vents, orientée NW-SE (figure 2).

CADRE GEOLOGIQUE

La dépression occupée par l'étang est creusée pour l'essentiel dans des terrains datant de la fin de l'ère secondaire. Ces niveaux, détritiques dans l'ensemble, se sont accumulés dans un lac qui s'étendit

sur l'emplacement du bassin d'Aix-en-Provence à partir de la fin du Crétacé supérieur.

Sur la rive occidentale, entre Martigues et l'extrémité du Mont Calaraou, affleurent des bancs de poudingues alternant avec des grès et des marnes grises, rouges ou bariolées du Bégudien (Maestrichtien local). La rive orientale, entre Saint-Victoret et la Fare, montre des faciès de même âge mais moins grossiers : calcaires lacustres et marnes grises surmontés par les argilites rouges et les calcaires à concrétionnements algaïres pisolithiques du Rognacien. Enfin, au Nord, entre St Chamas et la Fare, et au Sud, entre la Mède et Martigues, apparaissent les calcaires gréseux à débris de madrépores ou les grès roux du Crétacé (Cénomaniens, Turonien).

Ainsi, en coupe Nord-Sud, les terrains d'âge Crétacé dessinent une structure en gouttière, dite synclinale, dont l'axe Est-Ouest se situe approximativement sur le parallèle Saint Mître-Vitrolles et s'ennoie vers l'Est.

Au Nord-Ouest, entre St Chamas et Istres, les rives de l'étang entaillent des terrains datant de la fin de l'ère tertiaire. Ces niveaux ont été déposés par la mer miocène qui s'avança jusqu'au coeur du bassin d'Aix actuel. De nos jours, les Provençaux appellent "Molasse", les bancs de calcaires gréseux très coquilliers et "Saffres" les horizons plus tendres de grès argileux micacés jaunes ou gris. Ces couches, faiblement inclinées vers le Nord-Ouest, ne participent point à la structure synclinale : elles sont discordantes.

Enfin, au Nord-Est et au Sud-Est de l'étang, s'étaient les apports caillouteux, datant de la fin du Quaternaire, du delta de l'Arc, ou les alluvions et colluvions plus récentes de la plaine de Marignane.

EVOLUTION GEOMORPHOLOGIQUE DE L'ETANG DU QUATERNAIRE

Contrairement aux autres étangs de notre littoral méditerranéen qui sont tous des portions de mer isolées par des cordons sableux, la cuvette de Berre est séparée du golfe de Fos par de hautes collines et doit l'essentiel de son origine à l'érosion fluviale.

En effet, le tréfonds de l'étang offre une topographie variée mise en évidence par sondage sismique continu (figure 3). Le manteau vaseux dissimule deux dépressions creusées au Nord et au Sud dans un substratum bégudien ou miocène, et séparées par une zone médiane peu profonde. Les épaisseurs des divers niveaux quaternaires décelés, dont l'âge ne remonte pas au delà du Würm, varient ainsi de 1 à 20 mètres en fonction du modelé sous-jacent.

Le tracé d'un paléothalweg a pu être reconstitué dans ses grandes lignes. Largement étalé au Nord de la Mède, le chenal de ravinement se dirige vers Martigues. Il se rétrécit à l'approche de cette ville, où il s'encaisse pour passer vers -18 sous l'ilôt de Ferrières. La datation 14C de fragments de troncs d'arbres prélevés à la base des dépôts qui colmatent le thalweg donne $31\ 500 \pm 2\ 700$ ans B.P.(1) et montre que la phase de ravinement est nécessairement antérieure. Reconnu sous l'étang de Caronte par de nombreux sondages, il rejoint le golfe de Fos par l'ancienne passe de Canal-Vieil aux environs de la cote -30 (Denizot, 1960).

A l'Est de la Mède, le thalweg décrit une large courbe pour aller passer sous la pointe de Berre et se diriger ensuite au Nord. Divers sondages le recourent sous le delta de l'Arc.

Ainsi, les résultats de l'ensemble des études concordent et mettent en évidence une paléovallée surcreusée par l'Arc lors d'une des dernières régressions würmiennes puis colmatée par des sédiments liés, à partir du Préboréal, à la transgression versilienne. On peut penser que ce schéma simple ne traduit que les dernières étapes de l'acquisition de la morphologie locale. En effet, ces paysages, modelés en milieu aérien, peuvent procéder d'une évolution polygénique : surcreusements successifs au Quaternaire moyen et supérieur lors de diverses régressions eustatiques, surimposition du cours de l'Arc à une topographie complexe de dépressions closes analogues à celles observables entre Istres et St Chamas.

La lente fusion des glaciers amenant une remontée générale du plan d'eau, la mer finit par s'établir, au Subboréal, aux environs de son niveau actuel. Elle ennoya alors les portions terminales avals des réseaux hydrographiques en donnant naissance à la morphologie actuelle. Depuis plus de 6 000 ans, les sédiments s'accumulent ainsi dans la dépression et masquent toute trace de ce relief.

EVOLUTION HISTORIQUE DE L'ETANG

Selon divers auteurs anciens, vers l'an 104 avant notre ère, à l'époque de l'invasion romaine, "l'étang de Berre et ses dépendances formaient un lac sans écoulement net,... dont l'embouchure était obstruée aux Martigues et à Bouc par des marais. Le surplus des eaux de l'étang s'écoulait à travers ces fondrières et se rendait à la mer par deux passes qui entourent encore de nos jours l'île où est bâtie la tour de Bouc" (Villeneuve, 1821).

Le général romain Marius dut ainsi faire creuser un canal pour permettre à sa flotte de pénétrer dans l'étang. Ces travaux facilitèrent l'écoulement des eaux douces qui, en baissant de deux mètres, furent ainsi ramenées au niveau de la mer. C'est alors que serait apparu un

haut fond dont l'émergence expliquerait la légende attribuant aux soldats romains la "construction" du cordon du Jaï.

Ce premier canal fut rapidement colmaté. Dès le Haut Moyen-Âge, seules des barques à fonds plats pouvaient transiter dans le mince chenal entretenu par leur va-et-vient. L'étang de Berre retourna donc pour de nombreux siècles à son isolement lacustre.*

Il fallut attendre le XIX^e siècle pour que la région sorte de son enclavement. En effet, c'est seulement entre 1855 et 1863 que fut creusé, dans une première étape à la profondeur de 3 mètres, le canal maritime joignant les Martigues à Port-de-Bouc. Il fut successivement approfondi à 6 mètres en 1874, puis à 9 mètres à partir de 1925. Depuis lors il n'a cessé d'être entretenu, localement surcreusé ou prolongé dans le Grand Etang.

Enfin, réalisé dès 1926, un second canal, bien que moins important, relia le sud de la cuvette (région des Martigues) à la rade de Marseille (Estaque) afin d'améliorer le trafic maritime des petits caboteurs. Accidentellement obstrué en 1963, il facilita grandement pendant près de 37 ans les échanges d'eau entre l'étang et la Méditerranée.

On trouve dans les travaux de Delesse (1866), Marion (1886, 1887), Pruvost (1897), Gouret (1897-1907), Chevalier (1916) et Mars (1960) de nombreuses indications permettant de préciser les étapes de l'évolution écologique par lesquelles passèrent la faune et la flore de l'étang. On peut ainsi déceler la pénétration progressive des masses d'eau marine et l'extension vers le Nord de la cuvette de leur influence, plus nettement marquée à chaque approfondissement du chenal.

Ainsi, en 1962-1964, quelques années avant la mise en service de la centrale EDF de Saint Chamas, l'étang de Berre était un étang à salinité variable (figure 4). Les apports majeurs en eaux douces confinés dans la moitié nord du plan d'eau, et les venues d'eaux marines liées aux marées remontant le canal de Caronte étaient miscibles (figure 4b). On observait le plus souvent un gradient géographique de salinité caractéristique de conditions moyennes pérennes, auquel s'ajoutaient des variations saisonnières cantonnées dans une étroite gamme. Diverses biocoenoses marines tolérantes ou saumâtres, adaptées à ces paramètres écologiques stables, se développaient dans l'étang. En particulier, les formes benthiques, principales pourvoyeuses en fraction sédimentaire organogène, montraient une pluralité de peuplements nettement établis, décrits et bien étudiés par P. Mars (thèse, 1960).

La mise en service progressive, à partir de 1966, de la centrale de St Chamas a bouleversé, par le volume considérable d'eau annuellement

★

Certaines chroniques rapportent que, au XII^e siècle, Charles 1^o d'Anjou fit approfondir le chenal.

déversé, l'hydrologie et l'écologie de l'étang, actuellement comparable à un estuaire de type fortement stratifié. Dans les conditions moyennes (figure 5) pérennes, les eaux douces turbinées par l'usine s'écoulent en surface vers le Sud et longent la côte ouest de l'étang. Ces eaux turbides glissent sans se mélanger, en raison de leur faible densité, au dessus d'une lentille d'eau salée (30 à 20‰) liée aux marées. Le "coin salé" est limité par les isobathes -7 ou -8 mètres ; il occupe en quasi-permanence les aires centrale et sud de la cuvette. La stratification des eaux empêche tout renouvellement d'oxygène dissous dans le coin salé : les biocoenoses benthiques sont détruites en raison de l'anoxie et les sédiments présentent un faciès euxinique noir à très noir. Seules les plus violentes tempêtes de Mistral sont capables de réaliser le mélange des strates et d'assurer pour de courtes périodes l'homogénéisation des eaux de l'étang (figure 4a).

Ainsi, selon les biologistes, aucune faune marine ou euryhaline ne peut vivre sur ce type de fond, exception faite pour certaines aires limitées soit au débouché même du canal de Caronte soit dans les petits fonds sableux des ceintures littorales à Cardium. Par contre, on observe depuis quelques années une extension rapide de l'espèce Mercierella enigmatica qui secrète des tubes protecteurs calcaires. Cet Annélide Polychète construit ainsi de véritables tapis au débouché d'effluents riches en matière organique et vecteurs de pollutions.

En schématisant à l'extrême, on peut donc distinguer quatre phases majeures dans l'évolution de l'étang.

Au cours de la première période liée aux étapes de la remontée versilienne du plan d'eau marin, les influences halynes s'atténuent lentement au fil des millénaires. L'envasement de l'étang de Caronte s'oppose en fin de cycle à la pénétration des ondes de marées.

Lors de la période historique, mis à part le court intermède romain, l'isolement du plan d'eau est maximum. L'étang, pratiquement dessalé, présente des conditions de vie très voisines de celles d'un milieu lacustre. Des influences marines atténuées demeurent toutefois perceptibles dans la passe de Caronte et les environs de Martigues.

La troisième phase débute au milieu du siècle dernier. Le creusement du chenal maritime met fin au confinement car les ondes de marées pénètrent facilement dans l'étang. En une centaine d'années, les influences marines s'affirment par des variations progressives de salinité qui atteignent leur paroxysme dans la décennie 1950-1960. Selon les biologistes, cette lente évolution est bénéfique pour l'étang. En particulier, c'est au cours de cette période que la diversité des faunes benthiques atteint son apogée. En outre, le chenal autorise les échanges de matériel particulaire entre la cuvette et le golfe de Fos.

Enfin, la période encore actuelle se traduit, depuis 1966, par un bouleversement complet de l'équilibre lentement réalisé au cours du siècle précédent. Il est manifeste que les rejets EDF d'eau douce sont trop importants pour pouvoir être assimilés par l'étang. Les biologistes déplorent en outre l'irrégularité des débits plus que le volume global des apports liquides. Les fluctuations saisonnières ou mensuelles sont génératrices d'une instabilité permanente des conditions de milieu qui s'oppose à l'installation et à la survivance des faunes benthiques. De plus, les apports solides accroissent la turbidité moyenne du plan d'eau et augmentent, dans le Nord de la cuvette, les teneurs en fraction péloïdique des sédiments. Bien évidemment, EDF ne saurait être considérée comme l'unique responsable de la dégradation des conditions de vie de l'étang. En effet, cette détérioration résulte en grande partie de l'aggravation brutale de la pollution industrielle et urbaine liée à l'expansion économique de la région toute entière (figures 6, 7). D'abord lente, insidieuse et presque imperceptible en ses débuts vers les années 1930, elle devint intolérable quelques décennies plus tard. En 1972, M. Péres pouvait écrire : "l'étang de Berre est malade, et il est promis, de par le caractère cumulatif des agressions dont il est l'objet, à une altération définitive et irréversible si l'on n'intervient pas". Les autorités responsables s'émurent et des mesures de sauvegarde furent prises qui commencent à porter leurs fruits.

Ainsi résumés, les grands traits de l'évolution de l'étang guideront notre enquête.

Dans la première partie, après avoir précisé l'origine des matériaux traditionnels qui participent à la sédimentogenèse locale, nous tenterons d'estimer les vitesses de comblement de la cuvette.

Le second chapitre décrira l'état des fonds de l'étang en 1962-1964, tels qu'ils se présentaient à l'issue d'une évolution centenaire et à la veille de la mise en service de la chaîne de la Basse-Provence.

La troisième partie fera le point sur la question des apports solides allochtones du canal usinier et décrira leur modalité de dépôt dans la zone de "sédimentation organisée" du bassin de délimonage sous-marin de Saint-Chamas.

Enfin, dans un quatrième chapitre, nous mettrons en évidence, grâce aux données d'une étude pluridisciplinaire réalisée en 1976, les modifications apportées par les rejets EDF aux répartitions sédimentaires observées en 1964. En particulier, nous tenterons de cerner les domaines inféodés aux limons duranciens.

PREMIERE PARTIE

ORIGINE DES MATERIAUX ET VITESSE DE COMPLEMENT DE L'ETANG DE BERRE

PREMIERE PARTIE

ORIGINE DES MATERIAUX ET VITESSE DE COMPLEMENT DE L'ETANG DE BERRE

I.1. ORIGINES DES MATERIAUX

Trois types de matériaux concourent à la genèse des sédiments de l'étang. Aux alluvions originaires des bassins versants traditionnels s'ajoutent pour une part non négligeable les développements biogènes in situ ainsi que, à un degré moindre, les produits de l'érosion des rives.

I.1.1. L'EROSION LITTORALE

Cette érosion est perceptible sur les rivages occidentaux où de très forts talus entaillent les marnes et les grès du Mont Calaraou. Plus au Nord, les saffres et molasses sont le plus souvent découpés en custas abruptes. En fait, la part imputable aux eaux de ruissellement paraît prépondérante par rapport à l'action des eaux même de l'étang.

Localement l'attaque des vagues de tempêtes est plus nette. Ainsi, l'extrémité sud du Jaï a du être protégée par quelques épis perpendiculaires à la côte. D'autres traces d'érosion sont visibles au Nord du moulin de Merveille.

Toutes ces manifestations semblent mineures comparées à l'érosion subie par le littoral du delta de l'Arc depuis le début du siècle. Mis en évidence grâce à la comparaison de plans directeurs levés en 1909 (révisés 1936) et de photographies aériennes IGN prises en 1972, ce phénomène pourrait devenir préoccupant dans les prochaines décennies.

La figure 8 montre deux cours successivement empruntés par l'Arc. Le plus ancien est probablement antérieur à la fin du Moyen-Age. Les premières "cartes" dont on dispose semblent plutôt indiquer un tracé voisin de la situation actuelle (B). Plusieurs embouchures sont associées à chacun des lits majeurs. On décèle en outre une migration constante des deux ensembles vers le Nord. De nos jours, l'Arc s'écoule presque orthogonalement aux génératrices NE-SW de son delta quaternaire. Cette tendance, constante depuis au moins un millénaire et géomorphologiquement paradoxale, est soulignée ici afin d'attirer l'attention des Pouvoirs Publics. En effet, la prochaine divagation, imprévisible quant à sa date, s'établira très probablement selon le dessin de la flèche 9.

Privés de leurs sources d'apports qui s'éloignent vers le Nord, les rivages méridionaux régressent. L'érosion est manifeste au niveau de la ferme du BOUQUET. Plus au Sud, à la hauteur des anciennes salines, on observe un recul analogue malgré la présence des digues des parténements qui fonctionnent comme des épis de protection. Dans ces deux secteurs, les plus atteints, les taux d'ablation seraient voisins de 1 mètre par an.

Seule une faible partie du matériel de démantèlement semble être transportée vers le Sud par les dérives littorales. En effet, le volume des matériaux bloqués par la jetée de protection du port de la Pointe, bien que résultant d'une éluviation, paraît faible comparé à la masse des alluvions soustraites aux rives septentrionales. Le reste des éléments contribuerait à l'enrichissement du prodelta de sables fins décelables au large du BOUQUET.

En outre, en interrompant les transferts littoraux, la jetée apparaît comme la principale responsable de la quasi-disparition, sur les clichés IGN 1972, de la flèche sableuse de Berre qui isolait en partie l'étang de Vaïne. Poursuivi au rythme actuel, ce phénomène risque de mettre en péril les installations industrielles locales d'ici la fin du siècle.

Ainsi, l'instabilité générale des rives du delta de l'Arc résulte de causes naturelles accentuées par diverses actions anthropiques et favorisées par une diminution probable (?) de la turbidité moyenne des eaux de cet affluent. Sans être imminents les risques sont préoccupants. Seules des études plus approfondies suscitées par les autorités responsables permettraient de mieux définir les problèmes rapidement évoqués ici.

En résumé, malgré certains aspects spectaculaires à la côte, le volume de matériaux globalement libéré dans l'étang par ces mécanismes est faible. On peut considérer la contribution d'un tel flux comme négligeable.

I.1.2. LES DEVELOPPEMENTS BIOGENES

La part prise par les tests de Mollusques Gastropodes ou Pélécy-podes dans l'élaboration des sédiments de l'étang a depuis longtemps été soulignée. Certaines biocoenoses benthiques, liées à un type particulier de substrat ou à une profondeur déterminée, étaient inféodées à diverses zones bien circonscrites de l'étang. D'autres formes, au contraire, proliféraient sur les fonds de façon apparemment anarchique : les variations des paramètres écologiques s'avéraient trop faibles pour exercer une influence sélective et reléguer certaines espèces tolérantes, huîtres et moules en particulier, en des lieux bien précis d'habitat.

La carte de Delesse, bien que schématique, fait déjà ressortir en 1866 ces aires, en des positions géographiques différentes que celles notées en 1916 par Chevallier (figures 18, 21). Plus récemment, la comparaison de la situation des principaux bancs d'huîtres et de moules observés par Korringa (1945) et Mars (1960) met en évidence la disparition ou la migration de ces formations (figure 22). Diverses carottes dans des sédiments plus anciens montrent que ces phénomènes concernent d'autres associations benthiques : des niveaux très coquilliers alternent avec des passées de vase quasiment azoïque.

L'ensemble des observations de divers auteurs concordent et mettent en évidence une zonation des fonds retrouvée plusieurs fois en un siècle de recherche. A de vastes zones à densité coquillière faible et assez uniforme se juxtaposaient brusquement deux principaux types de dépôts bioclastiques :

- ★ faciès à grosses coquilles entières d'individus vivants ou morts masquant le substratum de vase,
- ★ faciès à tests brisés en fragments centimétriques passant sans transition nette à des débris organogènes dont la taille n'excédait pas quelques millimètres.

Ainsi, par le jeu des proliférations successives d'espèces benthiques en des aires distinctes, la majeure partie des fonds de l'étang passa en une centaine d'années par un stade coquillier. Les tests, enfouis sur place ou remaniés vers d'autres secteurs, contribuèrent puissamment à la genèse des sédiments. En 1916, selon Chevallier, les bioclastes de taille supérieure à 2.8mm représentaient en général moins de 5% du sédiment superficiel total. Par contre, cette proportion s'élevait à 25% dans les aires à coquilles brisées. Dans les aires à coquilles entières, les éléments organogènes représentaient plus de la moitié du poids total des matériaux superficiels ! (figure 19).

En résumé, les éléments biogènes libérés par ce type de productivité sont plus abondants que les éléments terrigènes dans certains fonds très localisés. Ailleurs, dans le reste de l'étang, ces proportions s'inversent. On sait qu'il est possible, à partir de résultats ponctuels, d'estimer le flux annuel de carbonate de calcium organique livré par les biocoenoses à un étang : dans le cas présent, ce difficile travail reste à faire.

I.1.3. LES APPORTS SOLIDES ET LIQUIDES DE L'ARC (figures 9 à 11)

L'Arc prend sa source dans le département du Var, au pied du Mont Olympe, à l'altitude 437 mètres. Sa longueur est de 85km et son bassin versant présente une superficie de 780km².

a. Les apports liquides

Sen régime est approximativement connu grâce aux indications de deux principales stations de jaugeage.

A la première station de Saint-Pons, située en aval d'Aix non loin de la RN 543 et à 31km de son embouchure, le bassin versant a alors une superficie de 650km². La plupart des auteurs s'accordent pour admettre un débit moyen annuel en ce point de l'ordre de 5m³/s (module). Cela

correspond à un volume total annuel voisin de 160Hm³. Les étiages, de débit moyen journalier de l'ordre de 1m³/s, peuvent atteindre moins 0.4m³/s en débit instantané. Les crues peuvent durer deux ou trois jours. Le débordement du lit ordinaire se produit vers 110m³/s. Selon SOGREAH, une estimation faite à partir de petits bassins versants de France, permet d'attribuer des débits de 100m³/s aux crues annuelles, 250m³/s aux crues décennales et 380m³/s aux crues centennales.

Ces valeurs s'accordent avec les données des cinquante dernières années. La crue de 1935 a été estimée à 400m³/s, puis viennent les crues de 1960 (débit estimé 280m³/s), octobre 1973 (200m³/s), octobre 1976 (100m³/s) et février 1972 (100m³/s). Le débit à 700m³/s cité par Chevallier pour la crue de 1907 ne peut être que très exceptionnel.

A la seconde station de Pont de Mauran, 2km en amont de l'embouchure, les débits sont généralement inférieurs à ceux mesurés à la station précédente. De nombreux canaux d'irrigation ou industriels prélèvent en effet des volumes non négligeables. En 1977, les adductions se répartissaient comme suit :

Canal de la Fare (prise moulin du Pont).....	350 l/s
Canal de Bosque (prise RN 113).....	130 l/s
Canal de Gordes (prise RN 113).....	564 l/s
Canal dit "de 24 heures".....	50 l/s

A ces utilisations connues s'ajoutent des pompages non recensés destinés à l'irrigation, ainsi qu'un prélèvement Shell vers la Guyenne.

b. Les apports solides

Le volume des apports solides en suspension n'est pas connu. On peut tenter une estimation à partir de données issues de prélèvements effectués une fois par mois par le SRAE d'Aix. Selon cet organisme, de janvier 1971 à décembre 1975, la turbidité moyenne annuelle s'établit à 0.051g/l. Près de 10% des concentrations observées sont inférieures à 7mg/l et 5% seulement supérieures à 190mg/l. Ces moyennes annuelles peuvent varier du simple au double : 22.4mg/l en 1973 et 52.4mg/l en 1974. Des variations journalières surprenantes sont observables sans fluctuation corrélative de débit. Ainsi, à Mauran, en 4 heures d'intervalle, on a noté 37mg/l puis 590mg/l pour un débit de 11.8m³/s le 12 mars 1974. L'activité de vastes gravières exploitées en amont expliquerait le phénomène. En crues, des valeurs supérieures au g/l peuvent apparaître. Ainsi, en 1963, on notait 1.065g/l au débouché de l'Arc en surface et 66mg/l dans l'étang à 300 mètres du rivage.

Sur les bases d'une turbidité moyenne de 0.051g/l et d'un débit

VECTEURS	CANAL E.D.F. de SAINT-CHAMAS	TOULOUSE		ARC	
NATURE DES ECHANTILLONS NATURE DES MINERAUX	LIMONS GRIS EN SUSPENSION 30.10.76 concent. 0.25g/l	SEDIMENT DU LIT VASES NOIRES DE L'EMBOUCHURE Mai 1968	LIMONS OCRE EN SUSPENSION PONT FLAVIEN crue du 10.12.76	SEDIMENT DU LIT VASES NOIRES PUTRIDES DE L'EMBOUCHURE juillet 1969	LIMONS ROUGEATRES EN SUSPENSION PONT N. 113 crue du 30.10.76
SMECTITE	0	1*	9***	4*	8***
ILLITE	8***	6***	1**	4**	1**
CHLORITE	2**	2**	traces	2**	0.5
KAOLINITE	traces (?)	1	traces	traces	0.5
QUARTZ	assez abondant	rare	assez rare	rare	abondant

*** très bien cristallisé
 ** moyennement cristallisé
 * mal cristallisé

TABLEAU 1 : Nature, proportions et degré de cristallinité des minéraux argileux des principaux affluents de l'Etang de Berre.

annuel de 160 millions de m³, les apports solides en suspension s'élèvent à 8 000 tonnes par an seulement ! On peut penser que l'action des crues n'apparaît pas dans les données SRAE. On sait que, en région méditerranéenne, la moitié de la charge alluvionnaire des cours d'eau transite en quelques jours lors des crues. Si l'on admet la validité d'un tel phénomène dans le cas de l'Arc, le total annuel libéré serait ainsi de l'ordre de 16 000 tonnes. Cette valeur correspond à une érosion spécifique de 20.5T/km²/an. Ces masses peuvent paraître trop faibles. Dans cette éventualité, les données SRAE ne seraient pas représentatives de la charge réelle de l'Arc et conduiraient à en sous-estimer les apports.

On peut pallier cette lacune en utilisant les données du Laboratoire Central d'Hydraulique de France (1978). Selon cet organisme, dans les bassins versants de type méditerranéens, l'érosion spécifique annuelle est en moyenne de 150 à 200T/km²/an. Dans seulement 10% des cas elle est inférieure à 10T/km²/an. Cette dernière indication montre que notre estimation précédente pourrait effectivement correspondre à la réalité.

Par contre, si on utilise les paramètres moyens les plus fréquents, le flux solide libéré annuellement par l'Arc atteindrait 109 000 à 146 000 tonnes. De telles valeurs sont, dans le cas présent, inacceptables. En effet, elles conduisent, pour un débit liquide probable de 160 Hm³, à admettre des turbidités de 0.7 et 0.9 g/l, supérieures à celles de la Durance.

En résumé, effectuées à partir de voies différentes, les estimations du flux solide annuel varient du simple au décuple. Ces divergences peuvent aussi bien résulter d'une sous estimation du débit de l'Arc que d'une méconnaissance de la charge moyenne des eaux. En l'absence d'étude valable ou d'indications sûres on peut penser que les apports solides annuels de l'Arc restent très probablement compris dans une "fourchette" allant de 10 000 à 100 000 tonnes.

c. Minéralogie

Le tableau 1 groupe les données concernant les associations de minéraux argileux libérés dans l'étang par ses principaux affluents et, en particulier, par l'Arc.

On voit ainsi que les sédiments vaseux de l'embouchure associent dans une parité banale la smectite à l'illite, de faibles quantités de chlorite complétant l'éventail. Dans les sédiments du cours supérieur et moyen, ces proportions évoluent nettement en faveur de la smectite qui domine dans les paysages sédimentaires environnants.

En crue, les éléments en suspension dans l'Arc présentent une

phase précolloïdale à smectite largement dominante et très bien cristallisée, un peu d'illite et très peu de chlorite et/ou kaolinite complètent l'éventail. En régime normal ou étiage, ce schéma doit être nuancé : la dominance de la smectite s'estompe et les proportions respectives des minéraux présents se rapprochent de celles caractéristiques des sédiments.

Néanmoins, on peut affirmer que l'Arc est le pourvoyeur essentiel en smectite des sédiments de l'étang de Berre.

I.1.4. LES APPORTS LIQUIDES ET SOLIDES DE LA TOULOUBRE

La Touloubre, petite rivière de 65km de long, prend sa source à 335m d'altitude sur les contreforts nords de la Montagne Sainte-Victoire dans la Commune de Venelles et draine un bassin versant de 382km².

a. Les apports liquides

Chevallier, reprenant les estimations de J. Répelin, admet un débit moyen de 2m³/s, avec 0.6m³/s comme caractéristique des étiages et 80m³/s pour les crues ordinaires. Ce module semble toujours valabe à de nombreux auteurs et le volume moyen annuellement rejeté dans l'étang se situe ainsi aux environs de 62 millions de m³.

Pendant longtemps, les seules indications précises concernèrent les débits maximum possibles estimés à 108m³/s pour la crue de 1886 et 86m³/s pour celle de 1907. Plus récemment, des valeurs de 55m³/s et 29m³/s ont été enregistrées en 1951 et 1953 (figure 12).

En 1966, un limnigraphe a été installé à la Barben ; il enregistre les apports d'un bassin versant de 214km². Malheureusement les données peuvent être perturbées par des vidanges intempestives du canal de Marseille. En outre, en aval de Salon, la Touloubre est alimentée par le surplus d'eaux d'irrigation issues de la Crau, soit indirectement par l'intermédiaire de nombreux petits canaux privés, soit directement par une branche maîtresse du canal de Crau. En aval de Grans, la rivière reçoit également les eaux de résurgence de la Fontaine Marie-Rose. Enfin, une part non négligeable de son cours était dérivée vers Saint-Chamas pour alimenter la ville et, jusqu'à ces dernières années, la poudrerie. Il est bien évident que dans ces conditions les résultats enregistrés à la station de la Barben ne correspondent que partiellement aux volumes réels déversés dans l'étang. C'est la raison pour laquelle les données citées ici concernent uniquement les valeurs notées soit au Pont Flavien soit à l'embouchure même.

Les modalités complexes d'alimentation expliquent les particularités de son régime. Les débits moyens d'été, tributaires des eaux d'irrigation, sont supérieurs aux débits d'hiver ou de printemps liés aux précipitations.

naturelles. Les étiages apparaissent avant les pluies d'automne, alors que les arrosages ont été interrompus. Etablis sur la période 1972-1974, les variations des débits moyens journaliers se répartissent comme suit

	ETE	HIVER
Q moyen	2.5 m ³ /s	1.1 m ³ /s
Q minimum	1.2 "	0.25 "
Q maximum	4.2 "	4.4 "

b. Les apports solides

Ce phénomène se traduit par des turbidités nettement différentes suivant l'origine dominante des eaux. Ainsi, en 1973, selon les données SRAE, la concentration moyenne en MES des 6 mois les plus froids (J, F, M, O, N, D), période où les irrigations sont nulles et les eaux issues du bassin versant naturel, s'établit à 9mg/l. Au contraire, en période estivale (A, M, J, J, A, S) à arrosage intensif avec de l'eau d'origine durancienne, la turbidité moyenne s'élève à 113mg/l.

Le volume moyen de matériaux transportés en suspension est mal connu. Selon les données SRAE, en 1972, la concentration en MES a été de 47.2mg/l pour un module de 1.8m³/s ; en 1973, de 61mg/l pour 1.68m³/s. Enfin, en 1974, l'apport moyen en limons serait de 9T/jour, soit un flux solide annuel de 3 285 tonnes. Sur les bases d'un débit annuel de 62Hm³ et d'une turbidité moyenne de 0.05g/l on retrouve un nombre voisin : 3 100 tonnes.

Comme pour l'Arc, l'utilisation des valeurs les plus fréquentes de l'érosion spécifique, telles qu'elles sont préconisées par le LNH, conduit à des résultats inadéquats de l'ordre de 57 000 à 76 000 tonnes par an. Ces valeurs correspondent, pour un apport liquide de 62Hm³, à des turbidités de 0.9 et 1.2g/l, qui représentent trois et quatre fois la concentration moyenne actuelle de la Durance. Seul, le paramètre minimum de 10T/km²/an s'accorde bien avec les estimations avancées d'après les données SRAE.

c. Minéralogie

Les associations de minéraux argileux libérés dans l'étang sont connues (tableau 1).

En régime normal, les cortèges décelés miment la dualité d'origine des eaux de la rivière. Dans le bassin supérieur et moyen, en amont de Salon, les sédiments du lit et les troubles transportés renferment en

abondance de la smectite, alors que illite et chlorite sont des constituants mineurs. Dans le bassin inférieur, en aval de Salon, les proportions s'inversent. L'illite et la chlorite, d'origine durancienne, apparaissent comme les constituants essentiels des vases et du matériel particulaire des eaux.

En crue, la phase précolloïdale des limons en suspension prélevés à proximité de l'embouchure (pont Flavien) montre une association à smectite quasi-exclusive. Par effet de chasse hydraulique, les sédiments du cours supérieur, remis en mouvement, se joignent aux alluvions du bassin inférieur. L'ensemble peut ainsi parvenir jusqu'à l'étang pour y livrer épisodiquement de la smectite.

I.1.5. CONCLUSION

L'état actuel des connaissances sur les matériaux de la sédimentogenèse est insuffisant. Les données qualitatives dont on dispose ne définissent pas les taux de participation des faunes malacologiques à l'élaboration des sédiments ; les estimations des tonnages livrés par les affluents majeurs sont trop imprécises en raison de l'incertitude des données primaires.

La quantification des flux annuels d'éléments terrigènes et biogènes nécessite de nouvelles recherches.

I.2. VITESSE DE COMPLEMENT DE L'ETANG

Elle peut être estimée par la comparaison de cartes marines. Les recommandations des Instructions Nautiques et les travaux de divers auteurs complètent les données.

I.2.1. BATHYMETRIE ACTUELLE

L'édition 1962 de la carte 1172 du Service Hydrographique de la Marine (figure 16) montre que les isobathes 3, 4, 5 et à un degré moindre, 6, s'écartent les unes des autres et parallèlement à la côte avec une assez grande régularité. Cette disposition apparaît plus nettement dans les fonds septentrionaux et résulterait d'une dispersion vaste et homogène des alluvions. L'isobathe 8 englobe toute la moitié méridionale de l'étang. La courbe -9 ne cerne que des fonds situés au sud d'une ligne Martigues-Berre, à l'opposé des sources d'apports terrigènes. Dans ce secteur, aucune sonde n'est supérieure à 10 mètres.

Les fonds dépassant 6m couvrent à peu près 8 860 hectares ; ceux de plus de 8m près de 5 100ha, soit 39% de la superficie du Grand Etang (13 140ha). Enfin, la surface des fonds supérieurs à 9m n'excède pas 1 160ha.

Les profondeurs augmentent rapidement sur les côtes ouest et sud. A la pointe du Calaraou, la courbe -8 n'est qu'à 200m du littoral et les fonds accusent ainsi une pente de 4% ; il en est quasiment de même au Nord de la Mède. Sur la rive est, là où les côtes sont basses, la pente reste encore voisine de 1.1% jusqu'à -8m, profondeur atteinte à 800 mètres seulement du rivage du delta de l'Arc.

Si l'on définit le creux d'un étang comme le rapport de sa profondeur maximum à la racine carré de sa surface, l'étang de Berre est le moins creux des lacs français, ce qui est un indice de comblement rapide. Pratiquement le fond de l'étang est plat : sur le méridien de la Mède, la dénivellation est inférieure à 2.5m sur près de 12km. Chevallier, travaillant sur la carte de 1894, où des fonds de 9m à 9.3m s'étendaient sur plus de 7km, signale même une légère convexité possible, car la flèche d'un arc de méridien terrestre sous-tendu par une corde de 7km est de 0.33m.

I.2.2. VARIATIONS BATHYMETRIQUES

Elles sont mises en évidence par la position respective des isobathes 10, 9, 8 et 6 des éditions 1844, 1894, 1935 et 1962 de la carte 1172 (figures 13 à 16).

La compétence du Service Hydrographique de la Marine est légendaire. Néanmoins on peut douter de l'entière validité de l'amplitude des variations mises en évidence dans un étang aussi plat, et dont les sédiments superficiels sont particulièrement fluides. Plus que d'un exhaussement réel, ces fluctuations pourraient résulter en partie d'un accroissement de la précision des sondages liée aux progrès techniques des méthodes utilisées de 1844 à 1962. En particulier, on comprend mal la disparition totale de l'isobathe 10 de 1844 à 1894. Certes, des fonds de -10.1m peuvent tout naturellement se trouver à -9.9m cinquante ans après. L'analyse des sondes ne révèle pas un tel type d'évolution. Plus généralement, les observations de détail trahissent des impossibilités flagrantes. En outre, la première édition, communiquée par le Service Historique de la Marine, ne précise pas le 0 des sondes. L'avis des spécialistes du C.O.B. sur ces problèmes serait précieux.

Ces réserves émises, il n'en reste pas moins vrai que la réalité des phénomènes de comblement est indéniable. A l'évidence, l'isobathe 9 de 1935 s'est substituée à la courbe -10 de 1844, et depuis, la surface correspondante n'a cessé de se rétrécir. Si l'on compare les deux dernières éditions, on trouve, sur une ligne Martigues-Berre, une diminution moyenne de profondeur de 0.7m en 50 ans. Cette valeur est plausible car, dans ce secteur, au large de la Mède, la "Statistique des Bouches-du-Rhône" donne un exhaussement des fonds de 0.9m entre 1720 (-11.5) et 1824 (-10.6). Pour la moitié nord de l'étang, l'évolution est tout

FONDS > à	CARTES A 1894	B 1935	C 1962	A,B 41 ans	B,C 27 ans	A,C 68 ans	VARIATIONS RELATIVES
-9m	4220ha	2712ha	1162ha	diminution 1508ha	diminution 1550ha	diminution 3058ha 72.5%	1248ha
-8m	6910ha	5700ha	5100ha	diminution 1210ha	diminution 600ha	diminution 1810ha 26%	1257ha
-6m	9415ha	9125ha	8862ha	diminution 290ha	diminution 263ha	diminution 553ha 5.8%	

Tableau 2 : Régression de la superficie des fonds dépassant 9m, 8m, 6m.

FONDS COMPRIS	A 1894	B 1935	C 1962	A,B 41 ans	B,C 27 ans	A,C 68 ans	
-8 à -9m	2690ha	2988ha	3938ha	augment. 298ha	augment. 950ha	augment. 1248ha 46.4%	
-6 à -8m	2505ha	3425ha	3762ha	augment. 920ha	augment. 337ha	augment. 1257ha 50%	

NB. SUPERFICIE GRAND ETANG : 13 137ha

Tableau 3 : Augmentation de la superficie des fonds compris entre (-9 et -8m) et (-8 et -6m).

aussi manifeste à un rythme comparable : les "Instructions Nautiques" y signalent des différences de 0.8m en un peu plus d'un demi-siècle, de 1785 à 1840.

Plus récemment, les états 1894, 1935 et 1962 font ressortir des taux de sédimentation sensiblement voisins. Une légère accélération locale de l'envasement semble même affecter les fonds de 9m qui auraient régressé de 1508ha en 41 ans, puis de 1550ha en 27 ans seulement. Il est bien évident que l'on ne peut commenter dans le détail toutes les variations notées. Les tableaux 2 et 3 groupent les données relatives à ces phénomènes qui suggèrent les remarques suivantes :

a. Depuis 1894, les fonds de plus de 9m ont régressé de 3 058ha, ceux de plus de 8m ont diminué de 1 810ha, les fonds supérieurs à 6m étant amputés de 553ha seulement.

b. De 1894 à 1962, la superficie des aires comprises entre -9 et -8 s'est accrue de 1 248ha, au détriment des fonds supérieurs à 9m. De même, les surfaces de la cuvette situées entre les isobathes 6 et 8 ont augmenté 1257ha, au préjudice des fonds supérieurs à 8m. Ces deux domaines, les plus profonds parmi les plus vastes, se dilatent donc, en dépit de disparités épisodiques, à des vitesses voisines tout en restant sensiblement équivalents.

c. Dans l'ensemble, de 1894 à 1962, les isobathes 3, 6, 8 et leurs intermédiaires, progressent vers le large en se maintenant parallèles entre elles et simulent une "transformation affine" du tracé littoral.

d. De 1894 à 1935, seules les portions des isobathes 8 et 9 situées au nord d'une ligne St Mitre-Berre se sont largement déplacées vers le Sud : le comblement, dans un premier stade, affectait donc principalement les fonds septentrionaux plus particulièrement tributaires à priori des apports alluviaux. L'état 1962 conduit à penser que cette hypothèse est trop restrictive car la migration de la courbe -9 s'est accentuée en deça de la ligne repère. En effet, cette isobathe s'est décalée, de 1935 à 1962, de près de 3km vers le Sud, progressant ainsi deux fois plus vite que la courbe -8 dont le déplacement n'atteint au maximum que 1.5km. La conclusion est évidente : le colmatage progresse du Nord vers le Sud et semble d'autant plus intense que les fonds sont plus profonds.

En fait, les étapes distinguées grâce aux états successifs visualisés par les cartes découpent en séquences probablement artificielles un phénomène continu. Chevallier, comparant les sondes 1844 et 1912, montrait déjà que l'envasement, faible ou modéré au voisinage des deltas de la Touloubre et de l'Arc, devenait nul plus au large et n'acquerrait une importance certaine, voisine de 0.7m, que dans la moitié méridionale

de la cuvette. Devant une telle constatation, l'auteur ajoute : "On peut s'étonner que le maximum de sédimentation n'ait pas lieu dans les parages des embouchures : c'est tout simplement parce que la majeure partie de ces alluvions, dès leurs arrivées dans l'étang, sont entraînées vers le Sud". Encore faut-il que le volume des apports terrigènes corresponde au volume des dépôts responsables de l'exhaussement des fonds.

I.2.3. VOLUME DES EXHAUSSEMENTS CONSTATES

Le volume des sédiments qui induisent la surélévation des fonds est très mal connu et ne peut qu'être estimé. Néanmoins, en utilisant les hypothèses simplificatrices les plus vraisemblables, on peut arriver à une assez bonne approximation.

Dans l'étang de Vaïne, la profondeur maximum, de 6.3 m en 1844, est passée à 5.4m en 1977 (figure 17). L'évolution des courbes 3, 4 et 5 montre que dans l'ensemble, les fonds ont été recouverts en 133 ans par une couche sablo-vaseuse de 1m d'épaisseur. En admettant une vitesse de sédimentation constante, cela représente un colmatage de 12 millions de m³ en 68 ans, de 1894 à 1962.

Dans le Grand Etang, au cours de la même période, le déplacement des isobathes 6, 8 et 9 concerne au total près de 5 420ha (tableau 2, colonne A,C). Bien que la pente du fond de la cuvette soit excessivement faible, un exhaussement de 20cm en 68 ans semble au maximum nécessaire pour provoquer une migration aussi nette des courbes les plus inférieures. Cela représente au moins un colmatage de près de 11 millions de m³.

Ainsi, un total de 23 millions de m³ sont nécessaires pour expliquer, dans une hypothèse basse, les variations bathymétriques observées en 68 ans dans l'étang de Vaïne et le Grand Etang. Cela représente un volume annuel de l'ordre de 340 000m³ !

Comparant les sondes de 1844 et 1912, Chevallier arrive à des valeurs analogues. Selon cet auteur, près de 7 000ha s'étaient alors accrus, en 68 ans, d'une épaisseur de 0.3m de vase. Dans ce cas, le colmatage du seul Grand Etang était de 21 millions de m³, soit un volume annuel de 300 000m³ !

En résumé, estimés par des méthodes différentes pour des époques distinctes, les volumes annuels de la sédimentogenèse ne sauraient être inférieurs à 300 000m³. Les taux moyens d'exhaussement seraient ainsi compris dans une fourchette allant de 0.3 à 0.4 cm par an. Selon certains documents dignes de foi (Instructions Nautiques, Encyclopédie Départementale, etc...) ces taux peuvent être épisodiquement multipliés par 2 en certaines aires localisées principalement dans le sud de l'étang. Il est manifeste que de telles valeurs ne peuvent caractériser l'ensemble des fonds de la cuvette car l'on aboutirait alors à des volumes corrélatifs de sédiments dont il serait bien difficile de déterminer l'origine.

I.2.4. SOURCES DES MATERIAUX

En effet, il est bien évident que le volume des alluvions rejetées annuellement dans l'étang ne correspond pas au volume des atterrissements constatés. Les apports terrigènes de l'Arc et de la Touloubre ne dépassent pas respectivement 8 000 et 3 500 T/an selon les données SRAE. En admettant même un doublement des valeurs en raison de l'éventuel effet des crues, le total reste voisin de 23 000 T/an. Avec une masse spécifique de 1.5, seulement 15 000m³ arrivent ainsi annuellement à l'étang, soit 20 fois moins que le volume du comblement corrélatif. Mais, objectera le lecteur, les matériaux du colmatage de l'étang de Vaïne sont très probablement issus en majorité de l'érosion du littoral du delta de l'Arc et de la fraction sablo-graveuleuse des alluvions de cet affluent. Ils ne doivent donc pas être pris en compte. Certes, mais même en ne considérant que l'évolution du Grand Etang, près de 160 000m³ de sédiments, soit 10 fois le volume des apports, sont nécessaires pour en expliquer les variations bathymétriques. Si l'on conserve cette dernière évaluation minimum comme la plus vraisemblable, la contradiction n'en demeure pas moins. Deux hypothèses s'offrent pour lever l'impossibilité :

La première est évidente. Les apports fluviatiles, tels qu'ils ressortent des données ponctuelles SRAE, ne reflèteraient pas la charge solide réelle. Mais les valeurs LNH ne sont pas plus satisfaisantes et conduisent à des concentrations en MES inadéquates, plusieurs fois supérieures à celle de la Durance. Ainsi, l'érosion spécifique semble bien se situer aux environs de 10 à 20T/km²/an.★

De même, une diminution de la charge solide depuis la fin du siècle dernier devrait atteindre des valeurs inacceptables pour expliquer le phénomène. Certes, au cours de cette période la turbidité moyenne de la Durance a été divisée par trois. Mais dans le cas des affluents de l'étang, des concentrations de 1g/l, 20 fois supérieures aux données actuelles, seraient nécessaires. En outre, le colmatage de la cuvette ne semble pas s'être ralenti de 1935 à 1962, bien au contraire.

La seconde hypothèse explicative attribue à la phase biogène une contribution élevée, plus importante que la part traditionnellement impartie à ces phénomènes dans l'élaboration des sédiments. Les vitesses de sédimentations décelées sont dans la plupart des cas compatibles avec les taux moyens de productivité biologique. De plus, certaines données sédimentologiques militent en faveur de cette éventualité.

En résumé, la solution des problèmes que nous venons d'évoquer passe par la définition précise des nombreux facteurs qui déterminent les flux d'éléments terrigènes ou biogènes de l'étang.

★ Les résultats d'une étude préliminaire du flux solide libéré par l'Arc et la Touloubre en 1983/84 confirment la validité de cette dernière estimation.

DEUXIEME PARTIE

ETAT DES FONDS DE L'ETANG EN 1962

Après un bref aperçu des études sédimentologiques antérieures, seuls seront développés dans ce chapitre les aspects les plus caractéristiques de la répartition des sédiments et les lignes de force de leur dynamique. Une analyse complémentaire plus fine de certains phénomènes sera présentée en quatrième partie, afin de faciliter les comparaisons avec les nouvelles distributions observées en 1976.

II.1. LES ETUDES ANTERIEURES

Elles apportent des informations précieuses quant à la continuité de l'évolution des fonds dont les aspects de 1962 ne sont que l'aboutissement.

II.1.1. AU SIECLE DERNIER

Les observations des chercheurs du siècle dernier reposent sur de simples impressions qualitatives, qui traduisent avec une bonne approximation les caractères dominants de la sédimentation. Delesse (1866) signale "que la vase forme presque exclusivement le fond de Berre ; sa couleur est généralement grise ou noire, accidentellement jaunâtre". Cet auteur rapporte en outre que les sables "se montrent en lignes minces, mais seulement le long des rives" et qu'on "les observe particulièrement sur le bord sud de l'étang". Bien que les transitions entre ces deux types extrêmes de sédiments ne soient pas précisées, ce chercheur a perçu l'originalité et l'importance des aires à fortes concentrations coquillières qui sont circonscrites sur le schéma de la figure 18. Les travaux ultérieurs de Marion, Pruvost, Gouret, portent uniquement sur la flore et la faune de l'étang et se bornent à confirmer ou à reprendre les indications de Delesse.

II.1.2. AU DEBUT DU SIECLE

En 1916, Chevallier publie la première étude sédimentologique, au sens moderne du terme, des fonds de l'étang de Berre. Les résultats sont fondés sur les proportions de sédiments retenus ou passant au travers des tamis n°10 et n°200. Il obtient ainsi 3 fractions : les éléments grossiers sont supérieurs à 2.8mm ; les vases correspondent aux particules inférieures à 113 microns et la fraction sableuse est intermédiaire entre ces dimensions.

La figure 19b montre la répartition géographique des pourcentages de la fraction grossière par rapport à la somme des fractions sableuse et vaseuse. Observant que cette zonation ne fait que reproduire les aires à forte densité coquillière de la figure 19a, Chevallier en déduit que les bioclastes constituent l'essentiel de la fraction grossière ou sableuse. Cette constatation est toujours valable actuellement ; exceptés les sables, graviers et galets détritiques présents le long du delta de l'Arc, dans le cordon littoral du Jaï ou à la pointe de

de Berre, ces classes granulométriques sont partout ailleurs représentées exclusivement par des éléments d'origine biologique.

La carte de la figure 20, établie d'après les données de Chevallier, indique la nature des fonds selon la richesse en vases des sédiments inférieurs à 2.8mm. On peut ainsi distinguer quatre types de fonds.

Les vases pures renferment plus de 90% de fraction fine. Elles recouvrent la majeure partie de la cuvette, s'avancent dans les régions septentrionales jusqu'en bordure du rivage et se retrouvent dans les étangs de Vaïne, Caronte et Bolmon. On notera l'aire à plus de 99% de vases située dans l'axe de l'étang, dans le lit des déformations les plus probables du panache turbide de crue de l'Arc débouchant alors de son delta en position latérale.

Les vases sableuses contiennent de 25% à 90% d'éléments fins et s'étendent selon une longue bande qui va s'élargissant de l'embouchure de l'Arc aux fonds méridonaux. Il est évident que cette répartition est sous contrôle alluvial dans sa moitié nord, alors que sa dilatation sud est conditionnée par les fonds biogènes mis en évidence par la figure 21.

Les sables vaseux ne recèlent que 5 à 25% de fraction fine. Deux faciès sont distingués. Dans la tache du centre de l'étang, les bioclastes sont responsables de la fraction médiane qui est représentée par des éléments strictement détritiques à la pointe de Berre.

Dans les sables la proportion de vases s'abaisse à moins de 5%. Ces faciès sont biogènes au large du Mont Calaraou et évidemment détritiques dans le cordon du Jaï. Curieusement, Chevallier, ne signale pas de sables en bordure du delta de l'Arc. Or, le sérieux de l'étude ne peut être mis en doute : l'auteur cerne avec soin divers affleurements rocheux actuellement disparus.

En résumé, les observations précisent les caractères dominants de la sédimentation :

- ★ la fraction limoneuse des apports fluviaux est à l'origine des faciès vaseux largement représentés,
- ★ des dépôts d'origine biologique se superposent à ce type de sédiment et troublent de façon anarchique la zonation des fonds,
- ★ l'influence des eaux marines, maximum dans le sud du plan de l'étang, est déjà nettement perceptible : l'injection des flux de marées semble conditionner l'abondance et la disposition du "fer à cheval" de faunes benthiques qui ceignent la moitié méridionale de la cuvette.

II.1.3. AU COURS DES ANNEES 1950-1960

Mars P. (1960) dans le cadre d'une étude des faunes benthiques de l'étang constate que "la carte de Chevallier correspond toujours à la réalité bien que sur quelques points elle en soit différente" : disparition des fonds rocheux, présence d'une bande de sable le long du delta de l'Arc. Celle ci pourrait résulter d'une érosion littorale déjà signalée (cf. §I.1.1.) et accompagnée d'une destruction localisée des herbiers de Zostères.

La comparaison des figures 21 et 22 apporte de nombreuses précisions. Ainsi, de 1914 à 1961, on note une nette régression des herbiers dans le Nord de la cuvette en raison d'une augmentation probable de la turbidité du plan d'eau. Ces Phanérogames sont plus particulièrement dégradées dans l'étang de Vaïne sous l'influence de la pollution déjà perceptible. De vastes moulières se développent aux embouchures de la Touloubre et de l'égout de Miramas, alors que des bancs d'huitres s'étalent sous les rejets de l'Arc. Primitivement cantonnées, en 1914, au débouché du canal maritime de Caronte, ces faunes ont pu migrer en position septentrionale à la suite de l'approfondissement du chenal et de l'augmentation de la salinité.

II.2. LES FONDS DE L'ETANG EN 1962

Dans une étude réalisée de 1962 à 1964, R. M. Roux s'efforce de définir l'état des fonds de l'étang à la veille des perturbations liées aux rejets, à l'époque imminente, du canal E.D.F. de Saint-Chamas. Les prélèvements des 5 centimètres superficiels de sédiments sont alors effectués à l'aide d'une benne de type "Orange-Peel". Les limites granulométriques majeures utilisées répondent aux normes BRGM. Afin d'inclure la fraction des bioclastes les plus sensibles aux effets hydrodynamiques, une coupure à $5\sqrt{2} = 7.07\text{mm}$ est en outre introduite.

II.2.1. REPARTITION DES PRINCIPAUX TYPES DE SEDIMENTS

La figure 23 traduit la richesse en lutites (\varnothing des particules inférieur à 63 microns) de la seule fraction sédimentaire inférieure à 7mm. Les bioclastes éventuellement remaniés sont ainsi pris en compte sans que la phase organogène développée sur place ne "pèse" d'un poids trop lourd sur les répartitions.

Les vases pures renferment plus de 90% de lutites. Elles se développent dans la moitié septentrionale de l'étang. Sitôt franchies les limites de l'herbier (figure 22) les teneurs augmentent régulièrement en auréoles concentriques pour atteindre des taux supérieurs à 99% dans un domaine central traversé par l'isobathe 8. Ces faciès de couleur gris-sombre s'étendent dans la moitié sud en longeant les rivages occidentaux et

viennent disparaître au large des Martigues. Il est bien évident que seul le calme hydrodynamique relatif engendré par les collines du Mont Calaraou autorise l'extension méridionale de cette bande de dépôts ultra-fins. Ce type de sédiment occupe le centre de l'étang de Vaïne pour la même raison.

Les vases bioclastiques contiennent de 75 à 90% de lutites. Elles sont principalement développées en deux zones de la moitié orientale de l'étang, formant ainsi transition, au Nord et au Sud, entre les vases pures et les faciès mixtes plus littoraux. Les éléments biogènes représentent la totalité de la fraction grossière dans les herbiers ; cette proportion s'abaisse à 60% dans les stations les plus proches du delta de l'Arc ou dans l'étang de Vaïne.

Les vases bioclastiques et sableuses recèlent encore de 50 à 75% de lutites. Elles ne sont bien représentées qu'à l'approche des rivages méridionaux où elles sont liées aux aires à fortes densités de coquilles brisées (figure 21). Les taches isolées sont inféodées à des bancs d'huitres ou de faunes benthiques diverses responsables, dans le centre de l'étang, d'une élévation des fonds cernés par l'isobathe 8 (figures 23 et 16). Ici encore la fraction supérieure à 2mm est essentiellement biogène, sauf dans l'étang de Vaïne et à proximité des embouchures où les éléments détritiques arrivent en parité.

Les sables vaseux à 25-50% de lutites caractérisent les petits fonds de l'étang. Cantonnés dans d'étroites bandes tributaires des apports terrigènes le long du delta de l'Arc, ils s'étalent à la pointe de Berre, l'étang de Vaïne et au Nord des Martigues où la fraction biogène domine.

Enfin, les sables et les graviers n'apparaissent que dans les prismes littoraux soumis aux actions hydrodynamiques intenses : delta de l'Arc, pointe de Berre, cordon du Jaï. Généralement biogènes, hétérométriques et fortement calcaires, ces faciès sont détritiques et plus siliceux aux embouchures des affluents, remarquablement fins et isométriques au niveau du Jaï. Les galets de ce cordon proviennent des éléments du cailloutis cryoclastique qui tapisse le flanc nord de la chaîne de la Nerthe. On observe de nombreux gravillons de variolites, roches vertes et quartzites issus de la nappe de menus galets duranciens (cf. carte géologique 1/50 000° Istres).

La carte 24 utilise des limites granulométriques plus classiques et met en évidence la répartition des sablons et lutites dans le sédiment inférieur à 2mm. Exception faite des dépôts littoraux, les fonds de la cuvette passent presque en totalité dans le domaine des vases pures, correspondant mieux ainsi aux descriptions rencontrées le plus souvent dans les études scientifiques. Par rapport à la figure 23 la perte d'information est évidente, bien que les distributions ne soient pas modifiées

de façon significative par la baisse du pouvoir séparateur. En particulier, les enveloppes 99 et 99.9 sont homologues des courbes 90 et 99 antérieures et montrent des contours sensiblement voisins. De même, la nature bioclastique de la fraction 2mm-0.125mm est toujours décelable car les teneurs maximum apparaissent dans les aires à forte concentration de faunes benthiques.

En résumé, la parenté des cartes de Chevallier et Mars avec les distributions notées en 1962 est évidente. Au delà de divergences mineures liées à l'affinement des méthodes d'études ou résultant d'une évolution localisée normale, la similitude des grands ensembles masque les différences de détails.

Aux vases fines occidentales et leur ombilic de lutites pures assujetties aux limites des herbiers, font pendant les faciès mixtes orientaux et leurs dépôts bioclastiques plus ou moins remaniés et classés en bandes parallèles au littoral du Jaï. La continuité des phénomènes sédimentaires majeurs responsables de la mise en place des sédiments de l'étang est ainsi manifeste.

En 1962, comme au début du siècle, la sédimentation se caractérisait par une bipolarité marquée. Aux faciès de type vaseux tributaires des apports terrigènes, s'ajoutaient des formations biogènes développées in situ, qui enfouies sur place ou remaniées vers d'autres zones, contribuaient puissamment par leur production continue à la genèse de sédiments mixtes originaux.

II.2..2. MINERALOGIE DES SEDIMENTS

a. Les teneurs en Carbonates totaux de la fraction fine ont été déterminées au calcimètre Bernard (figure 25). Les domaines nord et sud les plus riches en lutites montrent des pourcentages comparables et relativement homogènes variant de 35 à 40%. En outre, les aires à bioclastes plus particulièrement abondants s'individualisent nettement sur cette carte. Ce fait est très important car il montre que l'influence des débris organogènes ne se limite pas aux classes sédimentaires les plus grossières, mais concerne également la fraction pélitique des dépôts. Ainsi, les lutites de l'étang procèdent très vraisemblablement d'une origine mixte, terrigène et biogène, sans que l'on puisse en préciser les parts respectives. Ici encore de nouvelles recherches s'avèrent nécessaires.

b. La nature, les proportions et le degré de cristallinité des minéraux argileux présents dans la phase précolloïdale (2 microns) décalcifiée des sédiments superficiels ont été déterminés par diffraction aux rayons X sur lames d'agrégats orientés.

Nous avons montré que le cortège minéralogique libéré par l'Arc dans les conditions moyennes associe l'illite en parité avec la smectite qui devient largement dominante lors des crues de l'affluent. La Touloubre n'amène ce dernier minéral à l'étang qu'à la faveur de crues. En eaux moyennes, cet affluent rejette une phase argileuse à illite et chlorite d'origine durancienne. Cette association se retrouve aux débouchés des canaux de Craponne et des Alpilles. Les entrées d'eaux marines par le canal de Caronte conduisent dans l'étang un cortège à smectite légèrement dominante sur l'ensemble illite, chlorite et kaolinite.

La carte 26 traduit les proportions respectives de smectite et d'illite dans les sédiments. Les autres minéraux présents, chlorite et kaolinite, sont pratiquement constants à 2/10 sur l'ensemble des fonds. La carte 27 met en évidence les variations du rapport de la hauteur des pics caractéristiques de la smectite et de l'illite mesurés au dessus du fond continu sur les diffractogrammes des échantillons glycolés.

Les domaines de large ou nette dominance de la smectite correspondent à l'évidence aux aires d'épandages atteintes par les panaches limoneux des crues des affluents. Cette influence est perçue ainsi dans toute la moitié nord de la cuvette. En outre, la tache à rapport smectite/illite supérieur à 1 résulterait de l'action des herbiers de Zostères. Ceux-ci retiendraient les particules d'illite, proportionnellement moins fines, et ne laisseraient filtrer que les cristallites plus ténus de smectite.

Les domaines où la smectite est légèrement dominante s'observent dans le centre du Grand Etang et dans Vaïne alors que les aires à égalité de pourcentages se situent au NW et surtout au Sud du plan d'eau. Dans le secteur nord, ces proportions résultent des apports exclusifs en illite et chlorite des canaux des Alpilles qui abaissent les taux relatifs en smectite. Dans la zone sud, l'éloignement des sources, l'homogénéisation de la phase précolloïdale, l'influence des minéraux rhodaniens transitant par Caronte, semblent être les facteurs de la parité. Dans ce secteur, la tache à smectite dominante résulte vraisemblablement d'un phénomène de sédimentation différentielle des particules abandonnées par l'amortissement hydrodynamique progressif du flux injecté dans l'étang lors des marées.

Enfin, la bande à illite dominante qui occupe le fond du golfe de Saint Chamas et les rives du delta de la Touloubre résulte des apports de ce fleuve en régime normal et des eaux industrielles de la poudrerie. Dans les zones très littorales, l'éluatriation liée à la turbulence maximum permet aux seules grosses particules d'illite et chlorite de se maintenir.

En résumé, la minéralogie des fractions les plus fines apporte des informations utiles.

Les calcimètries montrent que les tests des faunes benthiques, par leur destruction ultime, participent à l'élaboration des lutites dans une proportion mal connue et vraisemblablement plus importante dans la moitié sud de l'étang.

Les minéraux argileux permettent de circonscrire des aires directement soumises aux apports terrigènes de l'Arc, de la Touloubre, des canaux d'irrigation ou du chenal maritime. Chacun des domaines ainsi distingués est tributaire d'un minéral bien discriminant. Les phénomènes de concentration et de rétention sélective dominent plus particulièrement dans la moitié nord de l'étang, où la phase précolloïdale est en outre plus abondante.

II.3. CONCLUSION

Grâce aux observations résumées dans ce chapitre et en faisant appel aux connaissances qualitatives partielles du déplacement des masses d'eau de l'étang, on peut tenter d'esquisser une description des lignes de forces majeures des modalités de mise en place des dépôts identifiés en 1962.

En schématisant un faisceau de phénomènes multiples et complexes, il apparaît que la distribution du matériel particulaire, bioclastique et alluvionnaire, est sous l'étroite dépendance des vents de secteur Nord-Ouest qui commandent en fait l'économie sédimentaire de l'étang tout entier.

Dans cette optique, les fonds de la cuvette peuvent être divisés en deux demi-bassins relevant chacun d'un mode de sédimentation dominant et bien différent.

★ a. Dans le premier demi-bassin septentrional, au Nord d'une ligne St-Mitre-Berre, la turbulence du plan d'eau est minimum en raison de l'abri ménagé par le chaînon de St Chamas-la Fare.

La vaste extension des vases pures, dont l'uniformité et l'homogénéité n'ont pas varié au cours d'une lente évolution séculaire, s'oppose à la faible étendue des faciès mixtes, organogènes ponctuels ou détritiques littoraux.

La ségrégation des sédiments les plus fins résulte à l'évidence de la concentration des apports limoneux dans un secteur d'amortissement hydrodynamique éminemment propice au dépôt des éléments pélitiques. Ces phénomènes de décantation sont favorisés par la présence de larges ceintures d'herbiers de Zostères qui, filtrant sables et sablons, accentuent ce type de sédimentation de mode calme.

L'abondance de la smectite, héritée des paysages sédimentaires du bassin de l'Arc ou, à un degré moindre, de la Touloubre, achève de définir les contours de ce domaine d'hypersédimentation pratiquement colmaté, le moins profond de l'étang.

★ b. Dans le second demi-bassin méridional, au Sud d'une ligne St-Mitre-Berre, la turbulence du plan d'eau est maximum sous l'effet de vagues de Mistral forcées par un fetch de 10 km.

La vaste extension des vases bioclastiques et des biocoenoses benthiques, dont la position et la productivité n'ont pas varié depuis le début du siècle, s'oppose à la faible étendue des dépôts pélitiques induits par l'abri relatif des rivages occidentaux.

La ségrégation de divers faciès mixtes dans les auréoles du secteur sub-littoral méridional résulte à l'évidence de l'intensité des remaniements et classements des bioclastes sous l'effet de la forte agitation hydrodynamique responsable de la nette zonation observée. Ces phénomènes de triaux sélectifs sont alimentés par l'abondance des faunes benthiques et favorisés par l'absence d'herbier de Zostères qui autorise ce mode de sédimentation de haute énergie.

La banale parité de la smectite et de l'illite achève de définir les contours de ce domaine en cours de colmatage, le plus profond de l'étang.

★ S'il fallait d'une phrase caractériser la sédimentation de l'étang, on pourrait dire :

"L'étang de Berre fonctionne comme un piège à sédiments, qui accumule tous les types de matériaux qui s'y déversent ou s'y développent, grâce à des phénomènes de rétention et de concentration sélectives dans sa moitié nord, de classement et de rejet à la côte dans sa moitié sud".

TROISIEME PARTIE

LES APPORTS SOLIDES DU CANAL E.D.F.

Le rejet des eaux turbides duranciennes dans l'étang de Berre constitue l'aspect le plus controversé de l'aménagement de la chaîne de centrales hydroélectriques de la Basse-Durance. Les eaux douces bouleversent l'écologie du plan d'eau, alors que les limons participent à l'envasement traditionnel de la moitié nord de la cuvette et en accentuent la turbidité moyenne.

Le lecteur trouvera quelques précisions sur les modalités de cet aménagement dans les figures 28 et 29. Les valeurs des débits liquides enregistrés annuellement sont groupées dans le tableau 4 et les figures 30 et 31.

III.1. LES APPORTS SOLIDES

Le volume des apports en suspension (MES) rejetés dans l'étang est bien connu car la charge solide transitant par le canal usinier est mesurée en continu avec la plus grande précision possible par les soins des services E.D.F.. Pour ce faire, un dispositif à prélèvement d'eau turbide proportionnel au débit des turbines a été installé en 1966 à l'usine de Saint-Chamas. Un turbidimètre à cellule photoélectrique examine en permanence l'eau utilisée et donne en temps réel la concentration des MES. Un détecteur identique équipe l'usine de Jouques, en tête du canal d'alimentation. Récemment ces dispositifs ont été remplacés par des densimètres à diapason, plus performants. Les indications de ces appareils sont vérifiées grâce aux données pondérales des prélèvements continus. Ces valeurs sont seules prises en compte dans le calcul des tonnages amenés à l'étang (tableaux 4, 6).

III.1.1. HISTORIQUE

A l'établissement du projet initial (1950), "les services du Port Autonome de Marseille, soucieux de maintenir la navigation dans l'étang et craignant un envasement accéléré et anarchique, s'étaient opposés au rejet d'eau limoneuse" et avaient demandé que "la prise en Durance à Cadarache et la prise de Mallemort comportent des bassins de délimonage très importants" (Baldy, 1973), afin de limiter autant que faire se pouvait les apports solides.

C'est la raison pour laquelle "le dossier de demande de concession des chutes de la Basse-Provence (1951) prévoyait un bassin de délimonage d'une superficie de 250ha, à Mallemort, au point où le canal industriel quitte la vallée de la Durance pour se diriger vers l'étang de Berre" (Fauroux, 1981). Ce projet comportait en outre un bassin d'éclusées à Cadarache afin d'améliorer le rendement du complexe.

Lors de la mise en enquête publique (1952), les syndicats d'exploitants agricoles riverains de la Basse-Durance s'opposèrent au délimonage des

ANNEES	APPORTS LIQUIDES 10 M ³	APPORTS SOLIDES tonnes	APPORTS SOLIDES M ³	CONCENTRATION g/l
9 mois 1966*	1905.0	519 000	346 000	0.272
1967	1430.4	71 449	47 633	0.049
1968	2661.18	790 000	526 600	0.296 MAX
1969	3921.58	559 000	372 700	0.142
1970	3283.07	541 387	360 924	0.165
1971	3938.94	794 769	530 000	0.202
1972	3780.44	854 843	569 895	0.226
1973	2443.97 MIN	622 490	414 993	0.255
1974	2766.29	578 776	385 850	0.209
1975	2853.91	830 568	553 712	0.291
1976	2934.89	825 654	550 436	0.281
1977	6630.21 MAX	1 641 134 MAX	1 094 089 MAX	0.247
1978	5737.51	651 051	434 034	0.113
1979	4157.13	440 486 MIN	293 657 MIN	0.106 MIN
1980**	3930.93	454 060	302 706	0.115
1981	2551.46	489 155	326 000	0.192
1982	3060.0	330 000	220 000	0.108

* Mise en service Centrale 21 mars 1966

** Mise en service Décanteur de CADARACHE 14 novembre 1980.

Tableau 4 : Apports annuels liquides et solides
du Canal E.D.F. de Saint Chamas
(selon GRPH Méditerranée).

eaux. A l'époque, plus de 75 000ha de cultures maraichères et fruitières étaient irrigués par 14 canaux (figure 32) totalisant un prélèvement de près de 100m³/s, canal d'alimentation de Marseille non compris (figure 33). Le rôle bienfaisant des limons qui colmatent, améliorent et fertilisent chaque année les terrains graveleux cultivés était bien connu. Ainsi, depuis la mise en service au XVIIe siècle, du canal de Craponne, l'épaisseur de limons déposés en trois cents ans atteint 50cm en certaines parcelles de Crau.

En outre, craignant que la charge solide des eaux de la Durance ne soit trop diminuée par l'action des retenues en amont, certains syndicats demandèrent même à E.D.F. de prévoir un "relimonage" épisodique des eaux d'irrigation à partir des vases emmagasinées lors des crues par le réservoir de Mallemort (A. Schuhl, 1974).

Devant de telles difficultés d'exploitation, E.D.F. différa la construction d'un bassin implanté dans le lit même de la rivière. Comme il n'était pas envisageable de réaliser un second canal réservé à l'irrigation, le rejet des eaux turbides duranciennes dans l'étang était inéluctable.

Toutefois, placée dans l'obligation d'assurer le maintien de la navigabilité du plan d'eau et de limiter le volume des apports solides, E.D.F., après études complémentaires, proposa deux types de mesures.

a. Selon les termes d'une convention signée le 19 août 1966 entre le Ministre de l'Equipement et Electricité de France, les eaux turbides du canal usinier sont restituées en Durance par l'intermédiaire de la prise complémentaire de Mallemort dès que la charge solide atteint 5g/l. Les centrales de Salon et de St Chamas sont ainsi arrêtées et aucun apport ne parvient alors à l'étang.

b. La limitation de la dispersion des limons dans l'étang est obtenue, selon E.D.F., grâce à une zone de sédimentation organisée située au débouché même du canal usinier de la centrale de St Chamas. Ce système, "adopté après étude sur modèle réduit, consiste à favoriser les dépôts dans une zone de 800ha, en bordure de l'étang (Fauroux, 1981).

Appliquées dès la mise en service de la centrale de St Chamas (21.03.1966), ces dispositions réalisaient apparemment un compromis entre les préoccupations divergentes des syndicats d'agriculteurs et les autorités du Port Autonome, tout en préservant les intérêts énergétiques de E.D.F..

Mais la nécessité de nettoyer le bassin de St Chamas apparut par la suite. Ce travail s'avérant impossible à réaliser en raison de l'absence de terrains idoines suffisamment proches pour permettre le stockage

NATURE DE DE L'ECHANTILLON		diamètre des particules en microns			
		SEDIMENTS SUPERFICIELS LIT DURANCE	CANAL USINIER E.D.F. MATERIAUX EN SUSPENSION		SEDIMENTS SUPERFICIELS ETANG DE BERRE
LOCALISATION		CADARACHE	JOUQUES	SAINT CHAMAS	BASSIN DECANTATION
DATE		1961	1961	1977	1975
ORGANISME		LCH FRANCE	LCH FRANCE	CEMETRE (AIX)	CEMEREX CEBTR
POURCENTAGES CUMULES	10%	1.2 μ	0.15 μ	0.2 μ	1.6 μ
	Q1 25%	<u>6.4</u> μ	0.5 μ	1.5 μ	3.0 μ
	Md 50%	31.0 μ	1.85 μ	<u>6.5</u> μ	<u>6.0</u> μ
	Q3 75%	54.0 μ	<u>6.0</u> μ	<u>25.0</u> μ	15.0 μ
	90%	80.0 μ	12.0 μ	55.0 μ	40.0 μ
PROPORTIONS < à 40 μ		61%	100%	85%	90%

Tableau 5 : Granulométries des matériaux en suspension dans canal usinier et des sédiments superficiels de la Durance et de l'Etang de Berre.

des déblais vaseux, E.D.F. proposa de transformer le réservoir d'éclusées de Cadarache en délimoneur. Pour ce faire les dimensions initialement prévues pour la retenue furent augmentées. Diverses études - analyses des éléments en suspension, comparaisons avec les phénomènes de sédimentation observés dans le bassin de St Christol alimentant le canal de Marseille - permettent à E.D.F. de penser que près de 65% des troubles duranciens sédimenteront dans la retenue. La mise en eau du réservoir a débuté le 14 novembre 1980 ; sa durée de vie, estimée à 24 ans, pourra être prolongée par un éventuel curage par pompe suceuse.

III.1.2. GRANULOMETRIE DES LIMONS

Le tableau 5 groupe les données de diverses études effectuées pour le compte de E.D.F.. On ne retiendra que les ordres de grandeurs des paramètres car les protocoles d'analyses ne sont pas précisés.

Les sédiments vaseux du lit de la Durance à Cadarache, hétérométriques sont moins riches en fraction pélimitiques (61% < 40 μ) et plus pauvres en éléments précolloïdaux (25% < 6 μ) que tous les autres échantillons étudiés.

Les MES du canal usinier et les sédiments les plus fins du bassin de St Chamas sont essentiellement pélimitiques (80% à 100% < 40 μ), alors que 50 à 75% des particules ont un diamètre inférieur à 6 microns.

A l'évidence, la prise d'eau de Cadarache provoque un tri granulométrique et favorise le dépôt des éléments les plus grossiers des limons duranciens. Corrélativement, les teneurs en éléments pélimitiques et précolloïdaux du canal usinier augmentent. Le déplacement de l'éventail particulaire vers les petites dimensions en facilite la dispersion dans l'étang.

III.1.3. MINERALOGIE DES LIMONS

Les teneurs en carbonate de calcium des MES du canal usinier seraient voisines, selon Baldy (1973), de 35% alors que ces proportions s'abaisseraient à 20% dans les sédiments du lit de la Durance à Cadarache.

Les associations de minéraux argileux de la phase précolloïdale en suspension dans les eaux turbinées sont analogues à celles de la Durance. L'illite bien cristallisée est le constituant dominant (7 à 8/10), accompagnée par la chlorite (2 à 3/10) et des traces de kaolinite. Ce cortège hautement caractéristique est hérité des "Terres Noires" jurassiques du bassin versant moyen et, à un degré moindre, des roches endogènes du bassin supérieur alpin. Certaines crues duranciennes, rares, résultent de précipitations qui affectent plus particulièrement la partie inférieure du bassin moyen, dans la région des "poudingues de Valensole". Les eaux limoneuses, traditionnellement grises, présentent ainsi une

PERIODES	APPORTS TOTAUX	APPORTS ANNUELS			APPORTS MENSUELS			CONCENTRATIONS
		MIN.	MOYEN	MAX.	MIN.	MOYEN	MAX.	
du 21.03.1966 au 31.12.1980	10 176 299 T	71 500 (1967) T	689 918 T	1 641 134 (1977) T	62 (9/79) T	57 493 T	437 917 (6.77)	0.194g/l
14 ans 9 mois 177 mois	6 784 199 m ³	47 666 (1967) m ³	459 945 m ³	1 094 089 (1977) m ³	41 (9/79) m ³	38 328 m ³	291 944 m ³	Apports Liquides : 52 375 550 x 10 ³ m ³
du 01.01.1970 au 31.12.1980	8 235 218 T	440 486 (1979) T	748 656 T	1 641 134 (1977) T	62 (9/79) T	62 288 T	437 917 (6/77)	0.194g/l
14 ans 132 mois.	5 490 145 m ³	293 657 (1979) m ³	499 104 m ³	1 094 089 (1977) m ³	41 (9/79) m ³	41 592 m ³	291 941 (6/77) m ³	Apports liquides : 42 457 290 x 10 ³ m ³
du 21.03.1966 au 31.12.1976	6 989 568 T	71 500 (1967) T	650 192 T	854 843 (1972) T	0 (8/74) T	54 182 T	410 114 (10/76) m ³	0.219g/l
10 ans 9 mois 129 mois	4 660 330 m ³	47 666 (1967) m ³	433 461 m ³	569 895 (1972) m ³	0 (8/74)	36 121 m ³	273 409 (10/76) m ³	Apports liquides : 31 919 770 x 10 ³ m ³
du 21.03.1966 au 31.12.1982	10 995 500 T		656 447 T			54 703 T		0.189g/l
16 ans 9 mois 201 mois	7 330 333 m ³		437 631 m ³			36 469 m ³		Apports liquides : 57 987 000 x 10 ³ m ³

Tableau 6 : Apports solides du canal E.D.F. de Saint-Chamas

teinte rougeâtre et la smectite s'ajoute alors aux minéraux cardinaux usuels et bien connus. Il s'agit là d'un phénomène exceptionnel qui ne saurait affecter la composition minéralogique globale des rejets E.D.F. dans l'étang.

III.1.4. TONNAGES ET VOLUMES DES APPORTS LIMONEUX

Le tableau 4 groupe les données annuelles publiées par les services E.D.F.. Le tableau 6 fournit les valeurs des apports solides totaux au cours de diverses périodes pour lesquelles les moyennes annuelles et mensuelles sont indiquées ainsi que les écarts extrêmes. Les volumes sont déduits des masses en adoptant une densité de 1.5..

De la mise en service de la centrale de St Chamas (21.03.1966) à la fin de l'année 1980 (mise en eau du décanteur de Cadarache : 14.11.80) en 14 ans et 9 mois (177 mois) le tonnage TOTAL des apports s'élève à 10 176 299 tonnes (6 784 199 m³), ce qui correspond à une moyenne annuelle de 689 918 tonnes (459 945 m³) pour un apport mensuel moyen de 57 493 tonnes (38 328 m³). Comme au cours de cette période les apports liquides ont été de 52 375.55 Hm³, la concentration moyenne globale s'établit à 0.194 g/l, alors que la moyenne arithmétique des concentrations annuelles est de 0.200 g/l.

Depuis la mise en eau du délimoneur de Cadarache les apports solides ont été de 489 155 tonnes en 1981 et 196 900 tonnes au cours des 10 premiers mois de l'année 1982. Les concentrations moyennes sont respectivement de 0.192g/l et 0.095g/l : le bassin de décantation a donc justifié les estimations E.D.F. dès sa seconde année de fonctionnement.

Au total, 16 ans et 9 mois après la mise en service de la centrale de St Chamas, ce sont 10 995 500 tonnes (7 330 333m³) qui ont été rejetés dans l'étang de Berre au rythme moyen annuel de 656 447 tonnes (437 631 m³), et à une moyenne mensuelle de 54 703 tonnes (36 469m³). Comme les apports liquides correspondant se montent à 57 987 Hm³, la concentration moyenne globale s'établit à 0.189g/l.

Si l'on excepte les 4 premières années de fonctionnement de la centrale de St Chamas (apports cumulés 1 941 081 tonnes), les apports totaux de cette décennie, du 01.01.1970 au 31.12.1980, s'élèvent à 8 235 218 tonnes (5 490 145 m³), soit une moyenne annuelle de 748 656 tonnes (499 104 m³). Les valeurs extrêmes enregistrées varient de 440 486 tonnes (293 657 m³, minimum 1979) à 1 641 134 tonnes (1 094 089 m³, maximum 1977). Pour la même période, la moyenne des apports mensuels s'établit à 62 388 tonnes (41 592 m³) alors que les valeurs extrêmes fluctuent de 62 tonnes (41 m³, minimum, septembre 1979) à 437 917 tonnes (291 944 m³, maximum, juin 1977).

Cette augmentation des valeurs par rapport à la période totale de fonctionnement résulte surtout des fortes teneurs en MES enregistrées en 1975 et 1976, ainsi que de la conjonction, en 1977, d'une hydraulicité élevée (6 630 Hm³) et d'une turbidité importante (0.247g/l). En outre,

les deux premières années d'activité de la centrale ne sont pas représentatives du régime moyen de production en raison de sa mise en route progressive en 1966 et d'une sécheresse quasi-centenaire en 1967.

Les minimum mensuels, de l'ordre de quelques centaines de tonnes, apparaissent en août-septembre. Les teneurs en MES de la Durance sont alors faibles, et les volumes turbinés fortement diminués par les prélèvements des canaux agricoles prioritaires en période de "pénurie". *

Les maximum mensuels, de l'ordre de deux ou trois centaines de milliers de tonnes, sont liés aux crues de la Durance qui induisent de fortes turbidités dans les eaux du canal usinier. Les concentrations peuvent ainsi rester supérieures à 1g/l pendant 3 ou 4 jours consécutifs. Il n'est ainsi pas rare que les débits solides enregistrés en quelques journées correspondent à 70 ou 80% des apports limoneux mensuels, alors que les débits liquides corrélatifs ne représentent que 10 à 15% du volume turbiné dans le mois.

En résumé, deux constatations majeures se dégagent de cette aride succession de données :

* au cours des 14 premières années de fonctionnement, les apports limoneux annuels s'élèvent en moyenne à 700 000 tonnes, ce qui correspond à un volume de l'ordre de 500 000m³ rejeté chaque année dans l'étang,

* les volumes réels peuvent, selon les années, varier du simple au double, alors que les volumes mensuels fluctuent du simple au décuple.

Il est bien évident que ces conclusions sont caduques depuis la mise en service du délimonneur de Cadarache. Pour un débit liquide moyen de 3 550Hm³/an, le flux solide s'établira probablement aux environs de 300 000 à 350 000 tonnes/an, soit près de 250 000m³/an. En outre, les écarts extrêmes mensuels ou annuels seront atténués.

III.2. LE BASSIN DE DELIMONAGE SOUS MARIN DE ST CHAMAS

Rappelons que E.D.F. ne construisit pas le bassin de décantation de Mallemort pour diverses raisons techniques, auxquelles s'ajoutait l'opposition des syndicats d'agriculteurs. Cet organisme national proposa de favoriser le dépôt des limons dans un bassin sous-marin situé dans l'étang, en tête des rejets de la centrale de St Chamas. Selon E.D.F., la décantation des MES a été obtenue à l'aide d'ouvrages dont les caractéristiques furent mises au point au Laboratoire des Milles sur modèle réduit au 1/500° (Longuemare, 1965).

* En outre, la demande en électricité est minimum en cette période de l'année

III.2.1. MODALITES DE FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE

Le bassin de délimonage sous-marin, d'une superficie de 800ha et d'une profondeur maximum initiale de 5m, est délimité par deux digues en enrochements. L'une, de 250m de long, située en rive gauche de la restitution de l'usine, dévie les écoulements vers l'Ouest le long de la rive de l'étang. La seconde, longue de 575m et implantée en rive gauche de la Touloubre, renvoie le courant vers l'Est.

Sur modèle réduit un vaste tourbillon dans lequel les vitesses se ralentissent progressivement apparaît alors. Toujours selon E.D.F., "le trajet ainsi parcouru par l'écoulement, environ 6km, le long de la rive nord de l'étang permet une bonne décantation des limons grâce au freinage efficace des vitesses de 1.5m/s à 0.5m/s"...."dans le gigantesque vortex en coquille d'escargot créé par les digues défectives".

Les photographies aériennes dont on dispose et les observations in situ ne confirment pas ce déplacement annulaire des eaux à l'intérieur du bassin de délimonage, tel qu'il est décrit dans les rapports E.D.F. et mis en évidence à partir de clichés du modèle réduit (figure 35).

Dans les conditions moyennes de fonctionnement en vraie grandeur, le courant défecté par la première digue se dirige initialement vers l'Ouest, puis il oblique rapidement pour aller buter contre l'extrémité de la seconde jetée. En ce point, lorsque les débits le permettent, il s'infléchit franchement au Sud par temps calme et rejoint la rive du mont Calaraou. Par Mistral, l'écoulement a tendance à s'étirer dans le lit du vent, vers le Sud-Est, alors que par temps de pluie ces eaux sont déviées au Nord-Ouest par dérive superficielle.

Par fort débit, voisin de $200\text{m}^3/\text{s}$, l'allure du panache turbide est encore plus caractéristique par son ampleur et sa netteté, comme le montrent les figures 36 et 37 obtenues à l'aide de documents IGN. Par contre, pour de faibles débits, de l'ordre de quelques dizaines de m^3/s , le cheminement des rejets est mal visible et semble se rapprocher du modèle proposé par E.D.F. (figure 62).

III.2.2. LES DEPOTS DU BASSIN DE DELIMONAGE

Afin d'être à même d'en apprécier le fonctionnement, E.D.F. a confié au Service Hydrographique de la Marine le soin de suivre l'évolution des fonds du bassin grâce à des relevés effectués en 1962, 1966, 1972 et 1980. La comparaison des bathymétries successives ainsi obtenues permet de cerner les aires d'égales épaisseurs de dépôts. Les figures 38 et 39 fournissent les isopaques en leurs états de 1972 et 1980.

Dans les deux cartes proposées, les courbes délimitent des surfaces

allongées selon le lit des écoulements turbides et en matérialisant le cours le plus fréquemment observable pour des débits moyens ou forts. Ainsi, 14 années après le début des apports, un exhaussement supérieur à 50cm intéresse près de 400ha de fonds s'étendant jusqu'à 2.5 du rivage alors que 50ha se sont surélevés de 2m, au coeur d'une zone née de la rencontre de l'axe du panache turbide avec l'extrémité de la seconde jetée de déflexion.

Ces cartes, trop schématiques, ne permettent pas d'établir avec certitude une atténuation de la vitesse de croissance verticale des dépôts corrélativement à la diminution des profondeurs moyennes. Néanmoins, l'efficacité globale du bassin de délimonage peut être estimée à partir d'autres données E.D.F..

III.2.3. ESTIMATION DU RENDEMENT DU BASSIN

Selon G. Fauroux (1981), depuis la mise en service, "le volume total déposé en décembre 1980 est de l'ordre de 3.7 millions de m³". La compétence de E.D.F. étant bien connue, on peut admettre cet ordre de grandeur". Néanmoins, cette estimation, établie à partir de données cartographiques, ne correspond pas automatiquement à un volume égal de matériaux libérés par la centrale de St Chamas. En effet, les volumes des MES rejetées sont déduits des données pondérales en adoptant une densité de 1.5. Or, on ne peut attribuer uniformément une telle masse spécifique moyenne à tous les niveaux des dépôts. En raison de la compaction naturelle des sédiments superficiels, leur densité augmente comme le logarithme du temps de dépôt ; par suite du tassement sous le poids des matériaux surincombants, la concentration des particules s'accroît selon un gradient lié au logarithme de la profondeur d'enfouissement. On peut ainsi penser que les niveaux inférieurs des limons de St Chamas ont une densité plus proche de 2 que de 1.5. La prise en compte de ces phénomènes conduit à majorer les estimations E.D.F. de 10 à 15%, et à admettre que le volume actuel des atterrissements correspond à au moins 4 millions de m³ de MES rejetées par le canal usinier.

On notera que ces résultats sont très approximatifs car les variations bathymétriques d'amplitudes inférieures à 50cm ne sont pas mises en évidence. Compte tenu de la précision des sondages cette détermination aurait été possible. Une telle analyse montrerait sans doute que le domaine réel de dépôt des limons duranciens déborde largement de l'aire qui leur était impartie. On peut admettre en première approximation qu'une auréole, dont l'épaisseur diminue régulièrement et tend vers zéro, cerne selon une bande affine l'isopaque 50 de la figure 39. Nous montrerons dans le chapitre suivant que le contact entre matériaux allochtones et sédiments naturels est difficile à établir de manière précise. En outre, les études de courtes carottes prélevées en 1981 par Bernat et al., fournissent des résultats qui s'intègrent mal dans le schéma

d'évolution des fonds proposé par le S.H.O.M. ou E.D.F. et ne peuvent contribuer à résoudre le problème.

Ainsi, comme au cours des 14 premières années de fonctionnement les apports solides ont été de l'ordre de 6.8 millions de m³, on voit que, selon les valeurs admises pour le volume des atterrissements, 2.5 à 3 millions de m³, soit 37 à 45% des matériaux rejetés, se sont "échappés" de la zone de sédimentation organisée telle qu'elle est décrite dans les études E.D.F. et ont diffusé dans le reste du plan d'eau.

III.3. CONCLUSION

Au terme de ce chapitre, on peut affirmer que les caractéristiques majeures des apports limoneux du canal usinier sont connues grâce aux études de l'organisme qui en est responsable.

a. Le flux solide moyen, parfaitement quantifié, apparaît ainsi, avec 500 000m³/an dans les années passées et 250 000m³/an dans l'avenir, comme la principale source de matériel terrigène, comparé aux 100 000m³/an (maximum probable ?) d'alluvions livrées par les affluents naturels. Il est manifeste qu'en raison même de cette disparité, l'influence d'un tel flux sur l'évolution sédimentaire des fonds de l'étang ne peut qu'être considérable.

b. Par contre, les limites du domaine principal de sédimentation des matériaux allochtones ne sont qu'approximativement définies dans leurs grandes lignes. Une incertitude demeure quant à la destinée ultime de plus du tiers des apports. Les études E.D.F. ne permettent pas de cerner l'extension maximum possible des dépôts dans la moitié nord de la cuvette. En outre, les secteurs éventuels de dispersion extrême dans le reste du plan d'eau du Grand Etang ne sont pas précisés et les sorties de matériel particulaire dans le golfe de Fos ne sont pas estimées.

QUATRIEME PARTIE

LES FONDS DE L'ETANG DE BERRE EN 1976

Au cours du mois de juin 1976, une étude sédimentologique, minéralogique et physico-chimique des dépôts superficiels de l'étang a été effectuée en collaboration avec le Laboratoire de Molysmologie de la Faculté de Pharmacie de Marseille. Les prélèvements de 100 échantillons ont été réalisés manuellement en plongée par les petits fonds inférieurs à 5m, et à la benne de type "orange-peel" dans le reste de l'étang. On s'est efforcé de recueillir les 5cm superficiels des dépôts.

Après avoir décrit les principaux caractères du sédiment TOTAL, l'étude des répartitions des diverses phases particulières sera conduite à l'aide de comparaisons* avec les distributions observées en 1962.

Les variations des états successivement notés antérieurement aux rejets du canal E.D.F., puis 10 ans après la mise en service de la centrale de St Chamas, permettront de résumer les grands traits de la sédimentogenèse de mettre en évidence les perturbations apportées par les limons duranciens et de définir les lignes de forces de la dynamique sédimentaire récente.

IV.1. PRINCIPAUX CARACTERES DU SEDIMENT GLOBAL

Ce sont les paramètres les plus évidents qui intéressent le non-spécialiste : couleur, richesse en débris coquilliers, aspects qualitatifs du sédiment au premier examen de détermination sommaire (vases, vases organogènes ou sableuses, sables vaseux).

IV.1.1. MALACOFAUNES DE L'ETANG

En raison de l'anoxie ou de la dessalure des eaux (cf. § introduction) les seules faunes benthiques vivantes se rencontraient en 1976 au débouché du canal de Caronte vecteur d'eau marine oxygénée, et dans les petits fonds sableux agités des ceintures littorales à Cardium (Bellan et Stora).

a. Par contre, l'Annelide Mercierella enigmatica était en pleine expansion. Ces polychètes secrètent des tubes protecteurs calcaires et construisent soit de véritables tapis continus ou discontinus d'épaisseur décimétrique, soit des masses ovoïdes métriques s'élevant au dessus des fonds en biolithosores monostéiques (sens G. Lucas, 1970). Ces animaux prolifèrent au débouché d'affluents riches en matières organiques. La figure 40 montre la corrélation remarquable entre les effluents polluants et les tapis de Mercierelles : Arc, Touloubre, égouts de St Chamas, Istres et Miramas, Martigues, la Mède, Aéroport et usines de Marignane, Berre.

En 1976, les débris de ces organismes étaient les seuls à participer activement par leur production continue à la constitution d'une part

* les cartes des répartitions de 1962 sont inédites.

appréciable des sédiments organogènes de l'étang.

b. Divers témoins de formes benthiques ayant vécu dans l'étang antérieurement aux rejets E.D.F. se retrouvent dans les sédiments superficiels (figure 40).

Le sud de la cuvette se caractérise par une relative abondance de la fraction organogène. Certains secteurs, au large de la flèche de Berre, ne montrent que de rares débris dispersés de faunes allochtones. D'autres zones, sur le parallèle des Martigues et au Nord du Jaï, recèlent une fraction biogène complexe où voisinent débris remaniés et espèces développées jadis in situ. Dans ces aires, des sédiments "anciens" semblent affleurer et les taux de sédimentation actuels sont donc nécessairement très faibles sinon nuls. Ces phénomènes ne résultent pas de la pose, dans les années 1950, de diverses canalisations de gros diamètres (Shell, Geostock, Pechyney) qui traversent les fonds de l'étang, entre la Mède et la Pointe de Berre. L'étude de 1962 aurait décelé de telles perturbations.

Le Nord de la cuvette s'individualise par des sédiments superficiels ne renfermant que de très rares débris organogènes. Cette absence généralisée semble résulter d'une hypersédimentation qui enfouit les thanatocoenoses sous des dépôts centimétriques.

Les deux domaines précédents sont séparés par une large bande de sédiments peu modifiés semble-t-il. Corbula gibba y abonde car sa biocoenose* se développait dans ce secteur jusqu'en 1966.

Enfin, de part et d'autre de l'isobathe 8, apparaît une "structure sédimentaire" singulière, que nous retrouverons fréquemment au cours de cet exposé. Il s'agit d'une bande transverse, à teneur en fraction pélitique anormalement faible, au milieu de faciès riches en lutites. Elle se singularise en outre par la présence de tests nécessairement remaniés d'Abra ovata, alliés à de nombreux autres bioclastes. Une telle structure semble liée à la frange de fluctuations Nord-Sud du front du coin salé. On sait que par suite du déplacement des masses d'eau résultant des marées, divers mécanismes de transfert de particules sont observés dans les estuaires de type fortement stratifié. En particulier, les fragments organogènes sont peu à peu repoussés et s'accumulent sur le front d'extension maximum du coin salé, car les débris apportés par le flot sont plus difficilement remis en mouvement par le jusant. Ce mécanisme expliquerait bien les dispositions observées dans l'étang. En outre, la récente mise en place (1973) de deux conduites de gros diamètre (20" Schell et Géostock), quelques années avant l'étude de 1976, a favorisé l'évolution rapide du secteur : le sédiment superficiel a pu être perturbé, lors du creusement de la tranchée fouille, par des dépôts de sub-surface ultérieurement remaniés, accentuant ainsi l'enrichissement local en bioclastes.

La figure 41 affine les descriptions précédentes trop qualitatives. On voit ainsi l'étendue des fonds dont 95% du matériel particulaire

* Corbula gibba n'est pas une espèce caractéristique d'une biocoenose, mais une forme indicatrice d'instabilité et de début de dégradation des conditions de vie du milieu.

est inférieur au dixième de millimètre. Pratiquement dépourvus de test de formes benthiques, ils s'opposent nettement aux aires à "gros" éléments supérieurs au centimètre. L'allure uniforme de ces dernières n'est qu'apparente. En fait, les bioclastes livrés par les tapis de Mercierelles sont artificiellement juxtaposés aux thanatocoenoses de la cuvette sud et aux fractions graveleuses détritiques littorales.

L'analyse des répartitions de taille moyenne des échantillons permet de lever l'indétermination. Les aires majeures (lutites, sables, graviers) de la figure 42 montrent des contours sensiblement analogues à ceux de la carte précédente. Pourtant, grâce au paramètre utilisé, le gain d'information est manifeste : les tapis de Mercierelles du delta de l'Arc et les débris coquilliers de la cuvette sud sont dissociés des éléments détritiques littoraux.

En outre, le vaste domaine vaseux central est subdivisé en quatre sous-ensembles de dépôts dont les tailles moyennes, bien que remarquablement petites, augmentent régulièrement, du NW vers le SE, de 5 à 50 microns. Cette disposition étagée est à l'évidence conditionnée par les vents dominants de Mistral et par l'éloignement des sources de matériaux terrigènes.

IV.1.2. TEINTES DES SEDIMENTS

La couleur de chaque échantillon a été définie grâce aux références du code MUNSELL utilisé par les pédologues, autorisant ainsi les comparaisons futures.

Les sédiments humides sont noirs, fortement réduits (faciès euxinique) et souvent putrides (figure 43). Les teintes très noires (2.5 Y 2/0) sont cantonnées dans le nord de l'étang, avec des "tâches" plus particulièrement noires (2.5 Y 2/0⁺) aux débouchés de l'Arc, de la Touloabre, et dans le golfe de St Chamas. Les teintes noires (5 Y 2/1) occupent le reste des fonds, à l'exception d'aires limitées de couleur presque gris-foncé (5 Y 4/1) localisées en tête des rejets E.D.F., dans la zone de fluctuations du coin salé et dans les dépôts remaniés de la cuvette sud. L'étang de Vaïne montre une simple distribution en auréoles. Il ne semble pas exister de corrélation systématique entre ces teintes et les teneurs en matière organique ou le degré d'altération des minéraux argileux. De même, les observations de Delesse, Chevallier, Mars et Roux ne permettent pas de déceler d'évolution nette ou une accentuation des teintes noires. Seules des variations saisonnières de nuances, moins sombres en période hivernale, semblent susceptibles d'apparaître.

Les sédiments secs et oxydés montrent des distributions nouvelles réparties en trois ensembles (figure 44). Les teintes marrons du débouché de l'Arc sont liées aux alluvions ocres issues de l'érosion de formations

géologiques rubéfiées du bassin versant de cet affluent. Les teintes gris-sombre (5 Y 6/1) concordent avec l'aire méridionale de stationnement permanent du coin salé. Enfin, les faciès les plus clairs (5 Y 7/1) correspondent au domaine occidental d'écoulement des eaux duranciennes E.D.F..

IV.1.3. CONCLUSION

En résumé, trois constatations majeures se dégagent de cette rapide description des fonds de l'étang en 1976.

Le caractère dominant de la sédimentation est toujours présent : la vaste extension du domaine vaseux s'oppose toujours aux faciès mixtes du delta de l'Arc ou bioclastiques méridionaux. Curieusement, ces derniers ont migré et se retrouvent au maximum du creux de la cuvette sud. Privés de leurs sources d'alimentation, les fragments organogènes des auréoles de 1962 ont été éliminés par la turbulence maximum de ce secteur du plan d'eau.

La destruction des faunes benthiques jadis florissantes se répercute sur la fraction organogène dont les proportions se trouvent fortement diminuées dans l'ensemble des sédiments. Les remaniements actuels des Mercierelles ne compense donc pas la productivité des formes traditionnelles disparues, principales pourvoyeuses, en 1962, en fragments de grandes tailles.

La disparition des vastes herbiers de Zostères doit être soulignée (figure 22 A et B). Selon les biologistes, les apports massifs d'eaux douces E.D.F. en sont la cause déterminante. On notera qu'en dépit d'un débit moyen de 300 Hm³ par mois (2 fois le débit annuel de l'Arc) d'une eau "propre" et oxygénée, les sédiments du nord de la cuvette présentent toujours leur teinte noire bien connue. Le renouvellement des eaux ne modifie donc pas une évolution chimique constante depuis au moins un siècle, et dont le résultat final confère aux sédiments un caractère essentiellement réducteur.

Le lecteur aura certainement remarqué les positions respectives paradoxales des sous-domaines riches en lutites : les plus fins, septentrionaux, se situent au droit de la source majeure d'apport limoneux, alors que les plus grossiers, méridionaux, en sont les plus éloignés. D'habitude les embouchures des affluents présentent une zonation opposée. Dans le cas présent, ce phénomène montre que la moitié nord de la cuvette correspond, comme en 1962, à une zone de décantation. De même, la moitié sud du plan d'eau apparaît toujours, en 1976, comme un domaine de sédimentation de haute énergie.

POURCENTAGE PAR RAPPORT AU TOTAL				NOMBRE d'ECHANTILLONS
TYPE	20 microns	2 microns		
I	4 à 18%	47 à 60%	31 à 40%	27
II	19 à 28%	41 à 50%	26 à 37%	16
III	33 à 40%	34 à 42%	22 à 32%	11
IV	44 à 56%	27 à 37%	12 à 25%	10
V	63 à 68%	17 à 21%	12 à 15%	7
VI	72 à 80%	16 à 21%	2 à 7%	5
VII	100%	-	-	7

NB. 13 échantillons ne rentrent pas dans cette classification.

Tableau 7 : Types majeurs de sédiments.

IV.2. SEDIMENTOLOGIE DES DEPOTS SUPERFICIELS

Les divers types de sédiments distingués dans ce travail ont été déterminés d'après le groupement des paramètres de chaque échantillon en des aires bien précises du diagramme triangulaire de la figure 45. Les coupures granulométriques utilisées, spécifiques des lutites, sont particulièrement discriminantes. Sept types majeurs s'individualisent selon les proportions relatives des stocks supérieurs à 20 microns, compris entre 20 et 2 microns ou inférieurs à cette dimension (tableau 7).

Les échantillons de type I, les plus riches en fraction $20\mu-2\mu$ sont les plus nombreux : 27, plus du quart des prélèvements. Les autres types sédimentaires sont de plus en plus riches en fraction supérieure à 20μ et s'appauvrissent en fractions intermédiaire et inférieure à 2μ . Le terme ultime de l'évolution est atteint avec les faciès VII correspondant à des sables "propres".

Cette évolution des proportions respectives des diverses fractions se double d'une évolution remarquable et concomitante de la répartition géographique Nord-Sud des différents faciès.

La figure 46 montre que les faciès les plus vaseux (type I) occupent toute la partie nord de l'étang, où sont concentrés les apports alluvionnaires, et se prolongent le long du Mont Calaraou jusqu'au nord des Martigues. Le type II, un peu moins riche en lutites, recouvre toute la partie médiane et remonte devant l'Arc, la Touloubre et le débouché des canaux E.D.F. et des Alpilles. Dans la moitié sud, apparaissent les faciès III et IV disposés en auréoles régulières autour d'une tache de faciès V liée aux thanatocoenoses locales. Enfin, à l'approche du Jaï, on passe sans transition nette aux types VI et VII en raison de l'éluviation des matériaux littoraux. Dans l'étang de Vaïne, les sédiments sablo-organogènes des rives sud-est passent progressivement vers le Nord-Ouest à des dépôts plus vaseux, dans une cellule de décantation née de l'abri de la flèche de Berre.

Certains secteurs limités, à sédiments complexes, s'intègrent difficilement dans ce schéma de répartition. Il s'agit d'aires dont l'évolution est perturbée soit par les proliférations des Mercierelles, soit par les remaniements de fractions bioclastiques plus abondantes dans la zone de fluctuation du front du coin salé ou au large du delta de l'Arc et à la pointe de Berre. Dans ces cas, le sédiment montre une bipolarité marquée. A la fraction grossière organogène fait suite un hiatus dans les répartitions granulométriques, dont les stocks n'augmentent qu'à l'approche des lutites.

En résumé, la prise en compte de la totalité du sédiment met une

nouvelle fois en relief la nette zonation des fonds selon une direction Nord-Ouest/Sud-Est, traduisant ainsi la permanence des phénomènes qui en sont responsables. En dépit de l'absence des herbiers de Zostères, la sédimentation de mode calme est toujours l'apanage de la moitié nord de la cuvette, plus particulièrement tributaire des apports terrigènes duranciens. De même, les particules les plus ténues sont toujours exclues des matériaux de comblement de la cuvette sud par les mécanismes de triage hydrodynamiques qui caractérisent ce secteur du plan d'eau.

Les paragraphes suivants apportent diverses précisions quant aux récentes modifications de la répartition géographique des trois grandes classes de matériel particulaire qui confèrent leur originalité aux types majeurs de sédiments.

IV.2.1. LES LUTITES ET LES SABLONS

Par rapport à leur distribution de 1962 (figure 23), les répartitions des proportions de lutites dans le sédiment inférieur à 7mm (figure 47) ne montrent pas, en 1976, des variations importantes. Trois différences apparaissent cependant :

Le domaine à 90% s'est largement étendu vers l'Est et le Sud-Est. Ce fait ne dénote pas automatiquement un envasement accéléré. Il peut résulter de la diminution relative de la fraction complémentaire plus grossière. De fait, la tache médiane de dépôts coquilliers connue depuis Chevallier et les bancs d'huitres notés par Mars au débouché de l'Arc ont disparu. Une nouvelle zone riche en bioclastes, probablement liée à l'influence du front du coin salé, leur a succédé.

L'ensemble des teneurs supérieures à 99% a migré tout naturellement vers le Nord-Ouest, au droit des rejets limoneux E.D.F.. Ce déplacement, facilité par l'absence d'herbier, ne se double pas d'une augmentation de superficie. Ce secteur constitue une annexe de la zone de "sédimentation organisée" : l'épaisseur des dépôts compense leur étendu relativement modeste.

Enfin, la cellule de décantation de l'étang de Vaïne s'est déplacée elle aussi vers le Nord, sans doute en raison de modifications des circulations hydrodynamiques apparues lors de la prolongation de la piste d'envol de Marignance (figure 63).

Les figures 24 et 48, relatives aux proportions de sablons et lutites (0.125mm) dans le sédiment inférieur à 2mm ne font que conforter les constatations précédentes. En 1976, l'aire à 99.9% est tout particulièrement inféodée aux apports solides duranciens. La "structure sédimentaire" transverse apparaît mieux car étroitement liée au stock sablonneux du sédiment total.

IV.2.2. LA FRACTION PELITIQUE

Les figures 49A, B et 50A, B concernent les concentrations en fraction inférieure à 20μ des sédiments inférieurs à 2mm ou 0.125mm. Elles ne montrent que des différences mineures entre les états 1962 et 1976.

L'enveloppe 80% régresse dans la moitié sud de l'étang. Une fuite du matériel particulaire fin par le canal de Caronte lors des violentes tempêtes de Mistral pourrait expliquer ce phénomène.

L'enveloppe 90% montre une contraction plus modeste, et limitée à son contour méridional. Celui-ci jouxte la "structure sédimentaire" transverse dont l'influence est ainsi manifeste.

Enfin, l'aire à 95% est amputée, en 1976, de son expansion nord-est primitivement liée à l'extension des alluvions pélitiques de l'Arc. Par Mistral, le panache turbide des eaux E.D.F. recoupe ce secteur selon les flèches. On peut penser que ces eaux limoneuses seraient vectrices d'une phase particulaire riche en éléments supérieurs à 20μ .

IV.2.3. LA FRACTION 20μ - 2μ

Ce stock, fondamental dans les sédiments de l'étang, montre un véritable bouleversement de ses répartitions successives, comme le mettent en relief les figures 51A, B.

En 1962, cette classe représentait 50 à 55% des dépôts dans deux vastes aires nord et sud. Elles étaient séparées par une bande médiane à teneur voisine de 45% et probablement héritée des matériaux bioclastiques présents depuis le début du siècle. Seuls dans le Nord de la cuvette, deux petits secteurs alimentés par les alluvions de l'Arc ou la Touloùbre montraient des teneurs supérieures à 55%.

En 1976, il est évident que cette fraction a été chassée en partie des zones orientales et méridionales de l'étang, là où la turbulence est maximum. Dans tous ces secteurs les concentrations ne dépassent pas 50%, à l'exception d'une tache isolée dans l'étang de Vaïne au niveau d'un ombilic d'amortissement hydrodynamique.

Par contre, l'enveloppe 55% englobe la quasi totalité des fonds de la cuvette nord. La courbe dessine ainsi une figure quadrilobée centrée sur un secteur à très fortes teneurs : 60 puis 70%. Ce dernier correspond à l'évidence aux atterrissements d'une grande partie des limons duranciens "échappés" du bassin de décantation sous-marin E.D.F.. Les perturbations liées aux apports du canal usinier sont ainsi décelées clairement.

IV.2.4. LA FRACTION INFÉRIEURE A 2μ

Les modifications de répartition des teneurs sont là encore particulièrement nettes (figures 52A, B).

Avant les rejets E.D.F. on observait des distributions relativement simples. En particulier, les concentrations maximum supérieures à 40% se cantonnaient dans la moitié nord de l'étang. Cette aire était probablement alimentée pour l'essentiel par les apports de l'Arc, en raison de l'orientation NE-SW de son grand-axe.

En 1976, les sédiments de ce secteur présentent des proportions notablement amoindries, à l'exception de deux pôles dont les teneurs sont à peine égales à 40%, et d'un échantillon situé sous les rejets de l'Arc. Les ombilics fins se localisent en position distale, dans les "ailes" d'une figure quadrilobée dessinée par la courbe d'isoteneur 35%. Ils sont en outre systématiquement décalés par rapport aux extensions cardinales de la gamme $20\mu-2\mu$ (figure 51B).

Ainsi, les limons amenés par le canal usinier semblent moins riches en phase précolloïdale que ne l'étaient les sédiments naturels de l'étang. On peut tout aussi bien penser que ce type de matériel particulière ne peut sédimenter dans la moitié nord de la cuvette en raison de l'importance du flux liquide qui la traverse régulièrement : près de 10 Hm^3 par jour dans les conditions moyennes de fonctionnement de l'usine de St Chamas.

Cette hypothèse, la plus vraisemblable, est confirmée par diverses thermographies et photographies aériennes (figures 36, 37). Selon ces documents, dès que les débits atteignent $100 \text{ m}^3/\text{s}$, le panache turbide s'allonge par temps calme jusqu'au niveau du Mont Calaraou. Pour des débits de l'ordre de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ les troubles duranciens s'étendent largement vers le Sud. Ils progressent jusqu'aux Martigues en 24 heures et recouvrent la totalité du plan d'eau en 48 heures. Il est bien évident que seules les particules les plus ténues sont ainsi transportées sur près de 20km. Il en résulte une nette diminution de leurs proportions dans les sédiments septentrionaux.

Ces particules ne se déposent qu'en partie dans la cuvette sud dont les matériaux ne renferment que 25 à 30% d'éléments précolloïdaux (figure 52B). On peut ainsi penser qu'une part non négligeable de ces cristallites rejoint finalement le golfe de Fos par l'intermédiaire du canal de Caronte.

Le lecteur remarquera que les distributions des valeurs numériques du rapport $\% (20\mu-2\mu) / (2\mu)$ confortent les conclusions précédentes (figure 53A, B).

IV.2.5. DONNEES DES ANALYSES GRANULOMETRIQUES DE LA FRACTION INFERIEURE A 31.5 μ

En 1962, l'étude des lutites a été effectuée par analyse granulométrique en milieu aqueux selon la méthode Mériaux. Il en fut donc de même en 1976. Dans tous les cas, les expériences furent conduites par l'auteur de ce rapport selon des protocoles rigoureusement identiques. Le point à 50 μ , trop perturbé, a été supprimé ; la fraction inférieure à 31.5 μ représente donc 100% du matériel étudié. On sait qu'à défaut de détermination précise des paramètres, ce procédé autorise la comparaison des résultats obtenus permettant ainsi de déceler les tendances évolutives des sédiments.

Les cartes 54AB, 55AB et 56AB mettent en évidence les répartitions géographiques de la taille des particules correspondant aux rangs 84, 50 et 16 du matériel inférieur à 31.5 μ .

En 1962, les distributions étaient particulièrement simples et logiques. Trois constatations s'en dégagent.

Les particules de rang 84 définissaient 2 domaines qui s'opposaient par la taille moyenne des éléments : 7.2 μ dans la moitié nord, 11 μ dans la moitié sud. Les particules de rang 16 des sédiments sablo-organogènes des petits fonds agités les plus orientaux de la cuvette (delta de l'Arc, flèche de Berre) s'individualisent nettement par rapport aux vastes aires centrales et occidentales, les plus profondes ou les plus calmes de l'étang. Les particules de rang 50 confirmaient cette dualité.

En 1976, les "paysages sédimentaires" des rangs extrêmes sont tout aussi différents, alors que les valeurs médianes font transition.

Les particules de rang 84 (figure 54B) révèlent l'influence des rejets solides E.D.F., grâce à leur distribution qui n'est pas sans rappeler la courbe d'isoteneur 90% de la figure 50B. On y observe le même enrichissement relatif en particules plus grosses selon la direction d'écoulement vers le S-E du panache turbide sous l'effet des vents dominants du Nord-Ouest (Mistral). Conservés plus longtemps en suspension, les éléments 10-11 μ vont s'accumuler de façon sélective suivant l'axe majeur de déformation du jet flottant. A l'opposé, par tempêtes de Sud-Est, les eaux limoneuses sont rabattues vers le Nord-Ouest par dérive superficielle, sur une aire de dépôt différente, plus limitée et moins agitée, où le matériel en suspension sédimente par excès de charge. Ces dernières conditions sont analogues à celles de 1962 et dans les deux cas les tailles sont les mêmes.

Les particules de rang 16, les plus sensibles aux écoulements des masses d'eau, décèlent de façon spectaculaire les perturbations

hydrodynamiques engendrées par les apports liquides de la centrale de St Chamas. Paradoxalement, dans la zone d'influence directe de l'usine, le diamètre des particules a augmenté. Avant les rejets E.D.F., les cristallites étaient les plus fins de l'étang (0.9μ). En 1976, ces éléments sont refoulés à l'Est ou au Sud. A leur place s'étend une digitation à forte polarité, dont le gradient particulaire s'étire du Nord au Sud sur le méridien du canal usinier. On notera que ce domaine à 1.2μ épouse avec une coïncidence remarquable le tracé des écoulements par temps calme des eaux duranciennes (figure 37). En outre, au droit des apports maximum, le matériel particulaire le moins ténu (1.4μ) se concentre dans un secteur dont les contours évoquent les répartitions de la figure 51B.

Les particules de rang médian présentent des distributions qui intègrent les diverses modalités de dépôt : on ne distingue plus de direction privilégiée dans le champ des dispersions. Les auréoles du bassin de délimonage sous marin restent subcirculaires, et les tailles moyennes de la zone d'hypersédimentation varient peu (2.5 à 3μ). Seules persistent des "taches fines" d'enrichissement en précolloïdales situées à la corne du golfe de St Chamas, sous les rejets de l'Arc ou dans l'étang de Vaïne.

IV.3. MINERALOGIE DE SEDIMENTS

Seuls sont résumés ici les résultats relatifs aux phases carbonatée et argileuse des dépôts. Outre leur intérêt propre, ces études précisent certains aspects de la dynamique sédimentaire.

IV.3.1. CALCIMETRIE DES LUTITES

Les teneurs en carbonates de calcium ont été déterminées au calcimètre Bernard, dont la précision est médiocre. Le choix de la fraction granulométrique pallie une éventuelle dispersion des résultats liée aux erreurs systématiques d'échantillonnage.

a. La fraction inférieure à 31.5μ (figure 57) se caractérise par des valeurs variant de 35 à 40% dans les faciès vaseux, traduisant ainsi l'homogénéité de la phase carbonatée des sédiments fins. On peut toutefois distinguer deux ensembles majeurs.

Dans le centre et le sud de l'étang, les structures à paléobiocoenose, ou plus littorale à Mercierelles, montrent des concentrations élevées supérieures à 45%. L'importance de la contribution des éléments organogènes à l'élaboration des gammes extrêmes des sédiments est ainsi manifeste.

Dans le nord de l'étang, les aires à Mercierelles, en principe éminemment calcaires, apparaissent peu ou pas. Par contre, on observe

une vaste aire à plus de 40% qui mime les déformations et les extensions du panache turbide E.D.F.. Dans ce secteur, les carbonates sont probablement d'origine détritique durancienne.

b. la fraction comprise entre 63 et 31.5 microns (figure 58), présente des concentrations en carbonate qui se répartissent en deux ensembles.

Le premier domaine, septentrional, possède des pôles à 55-60% qui coïncident avec les tapis de Mercierelles des embouchures de l'Arc, de la Touloubre et du canal des Alpilles. Les apports détritiques s'individualisent mal dans ce type de matériel.

Le second domaine, méridional, est centré sur l'aire des thanatocoenoses à teneurs supérieures à 45%, et dont les auréoles regroupent des échantillons à phase carbonatée inférieure à 45%. Ici encore, les tapis de Mercierelles s'individualisent mal, à l'exception de celui de la Mède. On peut penser que la forte turbulence locale est responsable d'une évolution plus poussée du matériel bioclastique, dont les particules ultimes enrichissent surtout la gamme sédimentaire inférieure à 31 microns. Un phénomène opposé affecte les faunes benthiques septentrionales en raison du calme relatif du plan d'eau, peu favorable à une fragmentation poussée du matériel bioclastique qui reste cantonné dans le stock 31-63 microns.

IV.3.2. LES MINÉRAUX ARGILEUX

Les analyses et déterminations de cette fraction ont été effectuées en 1976 par H. Chamley. Nous résumons ici les principales conclusions du rapport de cet auteur ; le lecteur intéressé trouvera dans ce document de nombreux autres renseignements.

a. Abondance globale par rapport au sédiment brut

Les sédiments superficiels présentent des teneurs en argile qui, bien que variant considérablement selon le lieu, restent abondante ou assez abondante dans la plupart des fonds. Néanmoins, un gradient général de décroissance de la teneur en argile s'observe depuis le Nord jusqu'au Sud de l'étang.

Dans la moitié nord, les teneurs généralement fortes sont le fait des apports terrigènes traditionnels et surtout des rejets solides E.D.F.. Ces secteurs sont les plus abrités de l'étang.

Dans la moitié sud, les sédiments témoignent d'un appauvrissement marqué en minéraux argileux, très prononcé contre la plage du Jaï et la bordure méridionale de l'étang de Vaïne, où les gradients négatifs évoluent rapidement. Ces secteurs du plan d'eau sont particulièrement agités par tempêtes de Mistral.

b. Les minéraux argileux de la phase précolloïdale

Les sédiments superficiels se caractérisent par une association de quatre minéraux argileux principaux, auxquels s'ajoutent localement divers interstratifiés irréguliers de dégradation. Dans l'ensemble, l'illite et la smectite, les plus abondants, représentent à eux seuls près de 8/10 de la phase précolloïdale décalcifiée. Les autres minéraux cardinaux présents : chlorite et kaolinite, montrent des proportions bien plus faibles voisines de 2/10 dans la plupart des faciès vaseux. On notera que la chlorite est toujours associée à l'illite dont elle partage les origines alpines et le comportement hydrodynamique. De même la kaolinite est systématiquement alliée à la smectite. Ces derniers minéraux sont hérités, par l'intermédiaire des bassins versants naturels, des roches sédimentaires de la Provence calcaire.

En schématisant à l'extrême les distributions des proportions relatives de ces couples de minéraux, on s'aperçoit que leurs répartitions sont antithétiques ou complémentaires.

Illite et chlorite présentent leurs teneurs les plus fortes au droit de sources d'apports ou dans les secteurs à hydrodynamisme élevé. Il en est plus particulièrement ainsi dans le Nord et le Nord-Ouest de la cuvette où les rejets conjugués du canal E.D.F., du bassin aval de la Touloubre et du canal de Craponne-Alpilles provoquent un net enrichissement en ces minéraux. Dans le sud du plan d'eau, la turbulence favorise les minéraux les plus gros ou les plus denses. Ce phénomène sélectionne dans la fraction argileuse les éléments dont la taille relative est statistiquement la plus grande (micas-illite et chlorite) et élimine les cristallites les plus ténus de smectite et kaolinite.

Smectite et kaolinite présentent leurs teneurs les plus élevées au niveau des autres affluents et dans les secteurs d'amortissement hydrodynamique. Il en est ainsi dans le Nord-Est de l'étang, en un petit domaine d'alluvionnement au débouché de l'Arc, ou dans le centre de la cuvette, selon la bande d'affleurements influencés par les fluctuations du front du coin salé. Dans le Sud du plan d'eau, les fortes concentrations coïncident avec le centre de l'étang de Vaïne, ou avec le domaine le plus profond du Grand Etang, au niveau de l'étalement du flux de marée vecteur de matériel particulaire rhodanien (Bouchon vaseux ?).

c. Comparaison des répartitions de 1962 et 1976

La comparaison des distributions observées en 1962 (R.M. Roux) et en 1976 (H. Chamley) met bien en évidence la rapide évolution de la nature minéralogique dominante des fonds septentrionaux de l'étang.

En 1962, la moitié nord de la cuvette se caractérisait par sa richesse en smectite, plus particulièrement abondante au débouché même de l'Arc ou, à un degré moindre, dans les aires centrales et orientales

des fonds (figures 26, 27). L'illite dominait dans le golfe de St Chamas et dans une étroite bande cantonnée le long du delta de la Touloubre. Cette dualité de répartition des minéraux était conditionnée par les régimes hydrologiques des affluents qui libéraient des cortèges argileux variant selon les débits (cf. §I.1.3. et I.1.4).

En 1976 (figures 59A,B et 60), l'association à illite et chlorite, caractéristique des limons duranciens d'origine alpine, a remplacé la smectite héritée des paysages sédimentaires du bassin de l'Arc. Exception faite pour l'embouchure de cet affluent et les aires de fluctuations du coin salé, la substitution est évidente au droit des rejets du canal de St Chamas et demeure perceptible dans toute la zone médiane de l'étang, là où la smectite dominait jadis encore nettement.

Ainsi, les minéraux argileux cardinaux, smectite et illite, se comportent comme de véritables traceurs dont le cheminement révèle les modalités de sédimentation des apports solides E.D.F.. On peut grâce à eux délimiter approximativement les domaines soumis aux influences terrigènes de l'Arc, et des vecteurs d'eau durancienne ou rhôdaniennne (figure 61).

d. Les interstratifiés irréguliers

Ces minéraux représentent diverses étapes de la dégradation d'espèces minérales plus simples : smectite, kaolinite et illite. Ils sont généralement peu abondants, parfois à l'état de traces, et limités aux termes illite-smectite et chlorite-smectite. Il s'agit de formes d'altération pédologique fréquentes sous nos climats et latitudes, et donc héritées des sols des bassins versants.

Par contre, ces interstratifiés sont plus abondants et accompagnés par le type illite-vermiculite lorsque les minéraux à grande capacité d'échange (smectite et complexes gonflants en général) sont plus particulièrement dégradés et mal cristallisés. L'illite "ouverte", les interstratifiés détritiques et, à un certain degré, la chlorite, peuvent également être affectés par le phénomène.

Ces faits permettent de suspecter une altération in situ de la matrice minérale des sédiments, plus nettement probable dans le Centre Sud et le Nord-Ouest de l'étang (figure 61). On notera qu'il n'y a pas parallélisme strict entre l'intensité de la dégradation et la couleur ou la teneur en carbone organique des échantillons. Cela suggère l'existence de relations complexes entre agents naturels ou molysmologiques et sujets minéraux.

En outre, l'intensité réelle de la dégradation décelée est très difficile à percevoir à partir d'une seule étude minéralogique des sédiments

de surface. Il est possible que certaines dégradations jugées mineures ou improbables soient en fait bien marquées, compte tenu des caractères de l'assemblage minéral originel. De même, l'altération suspectée en quelques stations pourrait être plus générale que la comparaison des dépôts superficiels ne le laisse entrevoir.

Ainsi, les conséquences d'une dégradation marquée de la matrice argileuse des sédiments de l'étang sous l'effet de pollutions industrielles ou domestiques, ou plus simplement d'un environnement très réduit car confiné, sont encore incertaines. Leur mise en évidence nécessite une connaissance plus précise de la sédimentation argileuse sub-actuelle au moyen de carottages systématiques.

IV.4. CONCLUSION

Au terme de ce chapitre, on peut tenter de hiérarchiser les observations concordantes qui mettent en lumière les phénomènes fondamentaux responsables de l'état des fonds de l'étang de Berre en 1976.

IV.4.1. LES FACTEURS

Il est bien évident que les trois principaux facteurs qui contrôlent le bilan sédimentaire de l'étang : circulations hydrodynamiques, apports alluvionnaires et développements malacologiques benthiques, ont été bouleversés à des degrés divers par les perturbations anthropiques.

★ a. Aux intenses circulations hydrodynamiques à fortes compétences déclanchées par les tempêtes de Mistral ou de Sud-Est s'ajoutent depuis 1966 les écoulements superficiels des eaux douces E.D.F. et les déplacements des eaux marines au sein du "coin salé", qui compensent leur faible intensité par leur permanence. Les paramètres fondamentaux de ces vecteurs de matériel particulaire ne sont pas définis.

★ b. Les apports terrigènes traditionnels, dont seul l'ordre de grandeur est approximativement connu, peuvent être désormais considérés comme négligeables par rapport aux rejets solides E.D.F.. Les volumes considérables ainsi amenés sont responsables d'une accélération de l'envasement de l'étang. En outre, la disparition des herbiers de zostères porte très probablement atteinte aux mécanismes de rétention sélective des alluvions, sans que l'on puisse en apprécier tout l'impact. Enfin, les volumes de matériel particulaire en suspension échangés entre l'étang de Berre et le golfe de Fos ne sont pas quantifiés.

★ c. L'absence quasi-générale de faunes benthiques vivantes entraîne un non-renouvellement du stock organogène des sédiments, que ne compense pas la productivité des tapis de Mercierelles. Ce phénomène se répercute sur la fraction bioclastique la plus grossière des dépôts qui est actuelle-

ment représentée pour l'essentiel par les vestiges des tests des anciennes biocoenoses. Leur disparition progressive inéluctable contribuera, à terme, à accroître l'envasement apparent de l'étang.

IV.4.2. LES SEDIMENTS

L'interaction de ces trois facteurs conditionne la nature des dépôts. L'étude des aires de répartitions des principaux types de faciès conduit à distinguer, comme en 1962, deux domaines majeurs nord et sud dont la sédimentation est sous l'étroite dépendance des vents de secteur Nord-Ouest. Ces deux domaines sont séparés par une bande médiane de sédiments mixtes probablement induite par les fluctuations du front du "coin salé" et les déplacements d'eaux marines connexes.

★ a. Dans le domaine septentrional, au Nord du parallèle Berre-Mont Calaraou, les faciès les plus vaseux dominant et occupent la majeure partie des fonds. Les tailles moyennes inférieures à 10 microns de ces matériaux, la vaste extension des sédiments à plus de 98% de lutites riches en illite permettent de délimiter les contours d'une aire d'hypersédimentation qui concentre tous les apports limoneux dans le domaine le plus abrité de l'étang.

Par rapport à l'état 1962, ce secteur s'est considérablement enrichi en matériel particulaire 20 μ -2 μ qui apparaît ainsi comme la fraction granulométrique essentielle de ce type de sédiment. A l'opposé, la phase précolloïdale inférieure à 2 microns, bien que présentant toujours les teneurs les plus élevées de l'étang, est proportionnellement moins importante qu'en 1962, sans doute en raison du flux d'eau douce considérable qui assure la dispersion des cristallites.

L'analyse des ségrégations géographiques des diverses fractions pélitiques permet de distinguer plusieurs directions privilégiées dans le champ de distribution des matériaux limoneux. Les pôles riches en précolloïdes sont systématiquement décalés par rapport aux extensions cardinales d'une figure quadrilobée riche en fraction 20 μ -2 μ . Cette structure est centrée sur un ombilic plus grossier résultant du dépôt par excès de charge des alluvions duranciennes E.D.F.. Divers autres gradients granulométriques dessinent sur la limite sud de l'aire d'hypersédimentation une figure en croissant dont les bras longent le Mont Calaraou ou le delta de l'Arc. Ces répartitions épousent avec une coïncidence remarquable les extensions et déformations du panache turbide des rejets E.D.F., ainsi que la position la plus fréquente du front du coin salé.

★ b. Dans le domaine méridional, au Sud d'une ligne Martigues-Berre, apparaissent des sédiments hétérogènes : vases bioclastiques et vases sableuses dont les teneurs en fraction inférieure à 20 microns diminuent rapidement selon un gradient Nord-Ouest/Sud-Est. Ces faciès mixtes sont

disposés en auréoles régulières autour d'une tache centrale particulièrement riche en amas coquilliers et située au débouché du canal de Garonte.

La permanence à l'affleurement de témoins des anciennes biocoenoses locales plus ou moins remaniées ne peut que résulter d'une diminution très nette des taux de sédimentation, dans un domaine exposé aux tempêtes de secteur Nord-Ouest.

Outre l'éloignement des sources d'apports terrigènes et la disparition des sources d'apports biogènes, plusieurs phénomènes hydrodynamiques peuvent expliquer ce déficit de matériaux. La présence permanente du ménisque d'eau salée sur lequel glissent par temps calme les eaux douces vectrices de matériel particulaire précolloïdal, s'opposerait passivement à la sédimentation. La turbulence des eaux engendrée par les vagues forcées de Mistral remet en suspension la fraction péltique des sédiments. Ce matériel pourrait ainsi s'échapper vers le golfe de Fos en étant entraîné lors de la vidange de l'étang consécutive au basculement du plan d'eau, ou plus simplement lors des jusants journaliers.

★ c. La bande médiane comprise entre les deux domaines précédents montre des sédiments intermédiaires, à taille moyenne 10-20 microns, et dont les divers paramètres traduisent un double gradient Nord-Sud.

La phase bio-clastique prend une importance croissante au fur et à mesure que l'on se rapproche des thanatocoenoses du domaine méridional.

Les taux de sédimentation et les proportions en fraction fine diminuent progressivement lorsque l'on s'éloigne de la zone septentrionale d'hypersédimentation.

Ce secteur se singularise, sur sa limite nord, par une structure sédimentaire soulignant aux environs de l'isobathe 8, la position moyenne la plus fréquente du front du coin salé. Les mécanismes de mise en place d'une telle structure ne sont pas nettement établis.

IV.4.3. LA SEDIMENTATION

En schématisant un faisceau de phénomènes multiples et complexes, on s'aperçoit que les traits dominants de la sédimentogenèse, tels qu'ils apparaissent depuis le début du siècle, demeurent inchangés. En 1976 l'opposition Nord-Sud des paramètres des sédiments est aussi nette qu'en 1962 ou 1914 et les dépôts sont toujours fortement réducteurs et présentent la même teinte noire. Cette permanence est normale car le cadre morphologique de la cuvette et les agents météorologiques, tous deux responsables du déplacement principal des masses d'eau, n'ont pas varié.

A cette dualité fondamentale se superposent dans chacun des domaines

distingués, des différences d'ordre secondaire, qui sont perçues comme des épiphénomènes modulés par les perturbations anthropiques. La transformation de l'étang de Berre en estuaire de type stratifié et les apports corrélatifs de matériel durancien sont bien évidemment responsables de ces disparités annexes.

On notera que les modifications apparues se rangent dans des séquences d'enchaînement logique. Ainsi, à partir du moment où 500 000m³ de limons sont rejetés chaque année dans le secteur le plus abrité de la cuvette, il est normal que près de 3/4 de ces matériaux s'y déposent et qu'une nouvelle association à illite et à chlorite apparaisse. De même, il est normal que le panache turbide assure à lui seul la dispersion de la plupart des éléments fins, appauvrissant ainsi les sédiments locaux en phase précolloïdale, conformément aux phénomènes observés généralement aux embouches.

Le lecteur aura certainement remarqué que les limites de la zone d'influence des limons E.D.F., telles qu'elles ressortent des données de la sédimentologie, de la minéralogie et de la molysmologie, ne sont pas superposables. Une telle diversité ne saurait surprendre : les phénomènes mis en cause, nombreux et fluctuant au gré de conditions hydrologiques et météorologiques variées, interfèrent avec la multiplicité des sources d'apports dont les caractères sont parfois très voisins. Il est bien évident que les rejets parasites des affluents locaux masquent les limites d'extension probable des apports E.D.F. et ne permettent pas de cerner avec précision le domaine réel de sédimentation des limons duranciens. Seules les lignes de forces majeures de la sédimentogenèse sont décelables selon la dominance plus ou moins nette d'un type donné de matériel particulière dans les dépôts superficiels. Les bordures des prodeltas sous-lacustres se chevauchent et s'intriquent très probablement au fil des années et la tranche des 5cm superficiels de sédiments intègre des matériaux disparates.

En l'absence de données précises sur les apports alluvionnaires traditionnels et les échanges de matériaux avec le golfe de Fos, toute estimation du flux particulaire transitant par l'étang de Berre semble prématurée. On peut toutefois penser que les taux de sédimentation seront sensiblement modifiés : le volume annuel des limons duranciens correspond approximativement à lui seul au volume annuel moyen des exhaussements constatés au cours de la période 1894-1962.

Cette parité met ainsi en relief la différence fondamentale des pourvoyeurs respectifs des sédimentogenèses successivement décrites dans ce rapport :

★ Actuellement, les apports solides duranciens apparaissent comme

la cause essentielle du colmatage de la cuvette, les autres matériaux terrigènes, cantonnés aux embouchures des affluents naturels, n'arrivant qu'en second rang, et très probablement fort "loin derrière";

★ Antérieurement aux rejets E.D.F., les biocoenoses benthiques jadis florissantes peuvent très probablement être considérées, par leur développement in situ et leur remaniement ultérieur, comme les principales responsables de la sédimentogenèse caractéristique de certains secteurs du plan d'eau.

Des recherches complémentaires poussées permettraient d'apprécier tout l'impact de cette contribution sur le comblement des fonds attribué jusqu'à ce jour aux seuls apports solides des affluents de l'étang de Berre.

De la lecture des chapitres précédents se dégage une constatation évidente : seuls les grands traits de la sédimentogenèse séculaire et les aspects dominants des perturbations anthropiques récentes apparaissent nettement connus. Les résultats globaux de l'évolution des fonds sont mis en évidence grâce à des "photographies" successives qui visualisent les modifications pluridécennales. Mais la dynamique des mécanismes intimes de transport, de classement et de dépôt, d'altération et de remaniement des particules placées dans le champ de force des vecteurs hydrodynamiques du plan d'eau, les relations de causes à effet, restent à préciser. En outre, l'origine première du comblement de l'étang, les contributions respectives des éléments détritiques ou bioclastiques à ce phénomène capital ne sont pas définies.

Une telle lacune, fondamentale, s'explique tout d'abord par l'absence quasi-totale d'étude de la dynamique des masses d'eau de l'étang ainsi que de la charge solide minérale susceptible d'être alors dispersée.

L'aspect statique résulte bien évidemment ensuite de la relative ancienneté des études géologiques conduites pour la plupart de 1960 à 1970, certaines, il y a près de 20 ans. Plus récentes, les recherches se limitent soit à préciser l'impact de divers aménagements, soit à définir l'état de pollution des fonds. Elles abordent les problèmes à résoudre de façon ponctuelle dans l'optique des organismes commensaux. Elles ne s'intéressent d'ailleurs guère à la sédimentologie locale.

Enfin, les techniques de prélèvement et d'analyse couramment employées il y a encore une dizaine d'années manquent à l'évidence de pouvoir de discrimination et ne répondent plus aux exigences actuelles de l'appréciation des modalités "fines" de sédimentation. L'utilisation de méthodes pratiquement surannées dans l'étude des sédiments de l'étang entraîne une distorsion des résultats. Les échantillons intègrent dans leurs 5cm superficiels des matériaux d'origines différentes déposés au cours

de périodes de temps non comparables. Les paramètres sédimentologiques ainsi déterminés, outre les erreurs systématiques inhérentes aux techniques mêmes, ne traduisent que les caractères globaux des dépôts. Les conclusions émises, très partielles, ne mettent en évidence que les tendances évolutives moyennes des fonds.

En résumé, les études passées sont parvenues à quantifier approximativement la résultante des nombreux phénomènes d'une sédimentation complexe. Les recherches futures devraient permettre d'en déterminer sans ambiguïté chacune des composantes.

CINQUIEME PARTIE

HYDROBIOLOGIE ET QUALITE DES EAUX DE L'ETANG DE BERRE

V.1 - CLASSIFICATION DES ETUDES

V.1.1 - RECENSEMENT DES TRAVAUX

Les études concernant les paramètres hydrologiques et hydrobiologiques sont répertoriées dans l'ordre chronologique sur le Tableau I . Les dates figurant en ordonnées sont celles où ont eu lieu les prélèvements et les numéros renvoient à la liste bibliographique (Tableau II) .

T°C	: Température	S.N.	: Sels nutritifs
S°/‰	: Salinité	Bm ϕ	: Biomasse phytoplanctonique
σ	: Densité	P. I	: Production Primaire
Turb	: Turbidité	ϕ	: Comptage et/ou détermination du Phytoplancton
Sest	: Seston	Z	: Comptage et/ou détermination du Zooplancton
O ₂	: Oxygène dissous	Bact	: Bactériologie
pH	: pH		
Alc	: Alcalinité		

V.1.2 - STRATEGIES D'ECHANTILLONNAGE UTILISEES :

PARAMETRES

L'étang de Berre constituant un milieu de transition entre les eaux douces et les eaux marines, les paramètres auxquels se sont intéressés les scientifiques sont en premier lieu la salinité, et en second la température des eaux . Ainsi, jusqu'à la moitié du XX^e siècle les seules données concernant la qualité des eaux sont de nature physico-chimique .

Au cours des années 50 paraissent des données hydrobiologiques avec les premières mesures en sels nutritifs .

L'intérêt croissant des chercheurs pour l'aspect biologique de l'étang est illustré en 1965 par les travaux de BLANC et al.(1967) sur la biomasse phyto et zooplanctonique et la production primaire, puis de 1965 à 1970 par ceux de MINAS (1973) sur la biomasse phytoplanctonique et la production primaire .

Plus récemment, KIM KI-TAI (1981) et BECKER et al. (1981) insistent plus particulièrement sur l'aspect biologique par l'étude des populations phytoplanctoniques . De même, certains paramètres n'ont été étudiés que fort

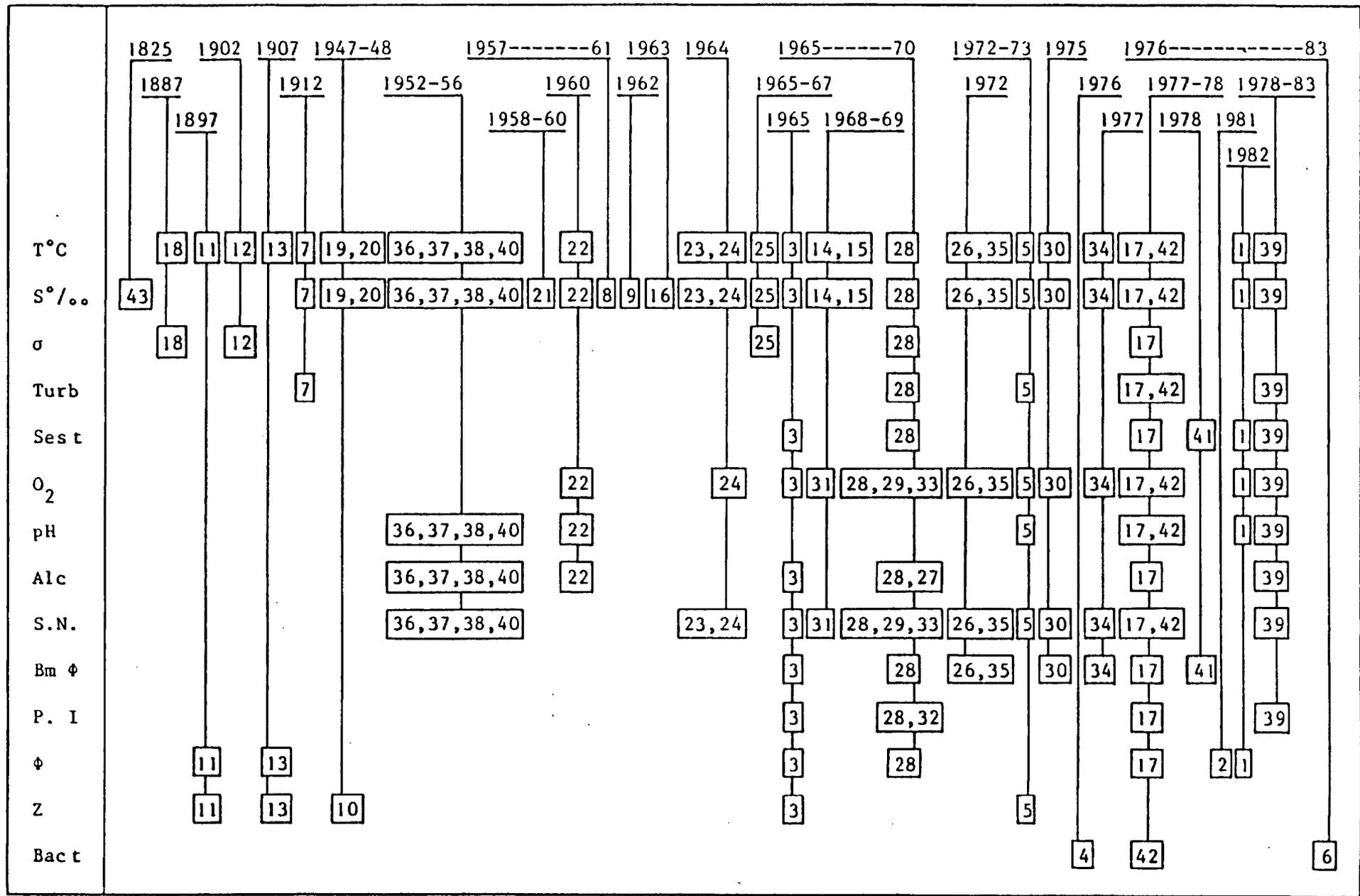


TABLEAU I : Recensement des travaux hydrologiques et hydrobiologiques réalisés dans l'étang de Berre :
 années de prélèvement / paramètres étudiés / références bibliographiques (Tableau II).

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| 1 : ARFI et al., 1983 | 23 : MINAS, 1965 |
| 2 : BEKER et al., 1981 | 24 : MINAS, 1968 |
| 3 : BLANC et al., 1967 | 25 : MINAS, 1970 |
| 4 : BOUCHARD, 1981 | 26 : MINAS, 1972a |
| 5 : C.E.A., 1972 | 27 : MINAS, 1972b |
| 6 : C.E.L.C.O.P. et D.D.A.S.S., 1982 | 28 : MINAS, 1973 |
| 7 : CHEVALLIER, 1917 | 29 : MINAS, 1974a |
| 8 : E.D.F., 1963a | 30 : MINAS, 1975a |
| 9 : E.D.F., 1963b | 31 : MINAS, 1975b |
| 10 : FURNESTIN, 1948 | 32 : MINAS, 1976a |
| 11 : GOURRET, 1897 | 33 : MINAS, 1976b |
| 12 : GOURRET, 1902 | 34 : MINAS, 1977a |
| 13 : GOURRET, 1907 | 35 : MINAS et al., 1976 |
| 14 : KERAMBRUN, 1970 | 36 : NISBET et al., 1958 |
| 15 : KERAMBRUN et SZEKIELDA, 1969 | 37 : NISBET et SCHACHTER, 1961 |
| 16 : KIENER et LONGUEMARE, 1968 | 38 : PETIT et SCHACHTER, 1959 |
| 17 : KIM KI-TAI, 1981 | 39 : R.N.O., 1978 |
| 18 : MARION, 1887 | 40 : SCHACHTER, 1954 |
| 19 : MARS, 1948 | 41 : SOUZA LIMA, 1979 |
| 20 : MARS, 1949a | 42 : S.P.P.P.I., 1979 |
| 21 : MARS, 1961 | 43 : VILLENEUVE, 1825 |
| 22 : MINAS, 1961 | |

TABLEAU II : Références bibliographiques du Tableau I.

tardivement soit en raison de l'acuité récente de leur rôle dans ce milieu (apparition de phénomènes inhérents aux nouvelles conditions hydrologiques, accroissement du niveau de pollution ... etc), soit en raison de l'évolution des connaissances sur le fonctionnement de l'écosystème . Dans ce domaine, il faut citer les travaux de MINAS (1975a) sur la répartition des teneurs en ammoniacque et ceux du S.P.P.P.I. (1979), BOUCHARD (1981), C.E.L.C.O.P. et D.D.A.S.S. (1981 et 1982) sur la qualité des eaux .

STATIONS

Deux remarques préliminaires peuvent conditionner l'étendue géographique de l'étude :

1. Il apparaît que l'analyse des apports doit être effectuée en parallèle à toute étude concernant l'étang :

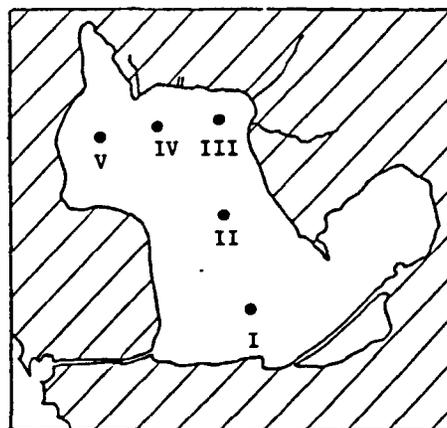
- apports par les eaux douces (surtout canal de la Durance)
- apports par la mer (canal de Caronte et golfe de Fos) .

En ce qui concerne ce dernier point, l'échantillonnage doit permettre de préciser également l'aspect qualitatif et quantitatif des sorties qu'entraîne l'excédent d'eau dans l'étang . Ce type de travaux intégrant la notion de bilan a été introduit par MINAS (1973) et largement développé par KIM KI-TAI (1981) en ce qui concerne les apports .

2. Une distinction est communément faite entre l'étang de Berre proprement dit et l'étang de Vaïne dans la mesure où ce dernier constitue une unité hydrologique particulière, moins dépendante des influences duranciennes et marines .

Dans l'étang de Berre, le type de réseau choisi dépend de l'objectif fixé :

1 . Une stratégie permet de fournir une vue d'ensemble en échantillonnant un faible nombre de stations représentatives des différents secteurs qui se sont dessinés au fur et à mesure des études antérieures (MINAS, 1961 ; MINAS, 1973 ; KIM KI-TAI, 1981) : fig.



- I : Zone directement influencée par l'entrée d'eaux marines en provenance du golfe de Fos (à proximité de l'extrémité du chenal dragué en continuation de celui de Caronte) : cuvette formée par l'isobathe de 9m ;
- II : Zone centrale, intermédiaire entre les zones Nord et Sud dont elle subit les influences conjuguées ;
- III : Zone de dilution de l'Arc ;
- IV : Zone soumise à l'influence de la Durance (de la Touloubre avant 1966) ;
- V : Zone face à la baie de St Chamas, bénéficiant des caractéristiques hydrologiques de cette dernière et de l'influence des canaux de dérivation .

La maille très large de ce type de stratégie ne permet pas la mise en évidence de certains aspects spécifiques, particuliers à l'écosystème dans un ensemble aussi complexe.

2 . Le deuxième type de réseau est un quadrillage à mailles plus serrées . Il permet une meilleure interprétation de la répartition des paramètres dans la mesure où l'ensemble des prélèvements est réalisé dans un laps de temps très court, 2 à 4 jours selon la stabilité météorologique (MINAS, 1972a , 1975a ; BLANC et al., 1967 ; S.P.P.P.I., 1979) .

Pour ces deux stratégies d'échantillonnage, il importe de prélever à plusieurs niveaux de profondeur :

- Couche ultrasuperficielle, représentant l'interface eau-air (niveau d'étude des teneurs en hydrocarbures) (SOUZA LIMA, 1979 ; S.P.P.P.I., 1979) ;
- Surface (-0,50m à -0,80m), représentant un niveau étudié par l'ensemble des auteurs ;
- Niveau -3m à -4m, représentant la limite inférieure de la couche euphotique (le niveau -4m semble être, selon KIM KI-TAI, 1981, d'avantage caractéristique) ;
- Fond (0,10m à 0,20m au dessus du sédiment), représentant l'interface eau-sédiment .

PERIODES

De nombreux travaux ont été réalisés à partir de prélèvements ponctuels donnant ainsi une image instantanée des structures de répartition des paramètres sur l'ensemble de l'étang (MINAS, 1961 ; BLANC et al., 1967) . Etant donné la grande dépendance de ces structures vis-à-vis des

conditions météorologiques et du débit du canal E.D.F., une telle analyse ne vaut que pour une situation donnée qu'il convient de préciser soigneusement .

Par ailleurs, nous avons vu que l'évolution annuelle du milieu passe par des états successifs très largement différents et que l'interprétation des multiples influences intervenant ici ne peut se faire que par un examen répété dans le temps . C'est pourquoi, une stratégie couramment employée consiste à réaliser des prélèvements saisonniers (C.E.A., 1972 ; S.P.P.P.I., 1979) ou bien, comme MINAS (1975a), à localiser temporellement des situations types vis-à-vis d'une part du cycle saisonnier de la production et, d'autre part du degré de dilution de l'étang . On peut ainsi distinguer :

- une situation pré-estivale (juin) : fin de la période des forts apports en eau douce, début de la période de forte production estivale ;
- une situation estivale tardive (septembre) : fin de la période d'étiage du canal, mois à fréquence élevée de "vent nul" ;
- une situation hivernale (février) : période de basses salinités, de mélanges fréquents et de production faible .

Un tel protocole n'a pu être élaboré que grâce à la synthèse de travaux ayant pour base un échantillonnage de fréquence plus élevée, mensuelle à bimensuelle, étalés sur deux à quatre années (MINAS, 1973 ; KIM KI-TAI, 1981) . Pour des raisons pratiques évidentes de tels programmes ne peuvent concerner qu'un nombre limité de stations et impliquent un choix judicieux de leur localisation (voir "stations", échantillonnage de cinq zones types) .

Le suivi sur plusieurs années n'a été que partiellement entrepris lors de ces derniers travaux et à l'occasion de rapports synthétiques (MINAS, 1972b ; C.E.R.B.O.M., 1974b ; S.P.P.P.I., 1979 ; BAELE, 1982) ainsi que dans le cadre du R.N.O. . Il permet de montrer l'évolution à long terme de certains paramètres, liée au rejet des eaux de la Durance et à la pollution .

V.2 - EVOLUTION DU MILIEU

Malgré quelques modifications lentes et progressives, constituées par l'aménagement de communications avec le golfe de Fos, l'étang de Berre présentait une évolution modérée avant le début du XX ème siècle, où l'urbanisation et l'industrialisation de ses rives ont marqué l'amorçage d'une dégradation de la qualité des eaux .

PARAMETRES	AVANT 1966	APRES 1966
Température	suit la température atmosphérique	peu modifiée (légère baisse hivernale au Nord)
Ph	homogénéité des valeurs	diminution dans la zone Sud au niveau du fond
Alcalinité		augmentation due aux apports de carbonates duranciens mais compensation par l'activité photosynthétique
Salinité	homogénéité ; faibles variations spatiales et temporelles	chute brutale ; fortes variations saisonnières ; établissement d'une halocline marquée dans la zone Sud formant un système hydrologique à deux couches
Matériel particulaire	valeurs élevées de la fraction minérale dans le Sud en raison des dragages	augmentation générale de la turbidité et modification de la nature et de la répartition du matériel particulaire : matières minérales importantes au Nord et matières organiques au Sud
Oxygène dissous	saturation permanente de la masse d'eau ; variations dues à l'activité biologique	peu de modification dans le Nord et dans les couches superficielles ; apparition de conditions anoxiques dans le centre et le Sud de l'étang au niveau du fond (conséquence de la stratification)
Sels nutritifs	eutrophisation modérée ; nitrates-facteur limitant d'où un excédent de phosphates	apports en nitrates et utilisation complète des phosphates en surface ; variations saisonnières importantes du rapport N/P ; augmentation de l'eutrophisation ; modification du cycle des sels nutritifs : accumulation sous la pycnocline des éléments reminéralisés qui ne peuvent qu'exceptionnellement être réutilisés ; processus de dénitrification dans les zones sous-saturées en oxygène

PARAMETRES	AVANT 1966	APRES 1966
Phytoplancton	<p>densités fortes</p> <p>"production nouvelle" faible et "production régénérée" importante</p>	<p>augmentation des densités (phénomène atténué depuis 1980) ; successions de blooms au cours de l'année ; augmentation relative des espèces de petite taille ; augmentation de la diversité spécifique ; phénomènes "d'eaux rouges"</p> <p>augmentation de la production primaire globale mais modérée par rapport aux potentialités existantes ; diminution de la part imputable à la "production régénérée"</p>
Zooplancton	<p>richesse quantitative et faible diversité spécifique</p>	<p>pas de données</p>
Bactériologie		<p>analyse des germes tests mettant en évidence des contaminations locales</p>

TABLEAU III : Evolution des paramètres hydrologiques et hydrobiologiques avant et après 1966 .

Cependant, malgré cette altération, un état d'équilibre semble avoir été atteint à cette époque, et remis en cause ultérieurement par l'apport massif d'eaux douces provenant de l'usine hydroélectrique de St Chamas .

Ce chapitre s'appliquera donc à faire une description de l'évolution hydrologique et hydrobiologique en insistant sur l'impact de ce rejet d'eau douce . Le tableau III schématise cette évolution (avant et après 1966) paramètre par paramètre .

V.2.1 - PARAMETRES HYDROLOGIQUES

Température

En raison du faible rapport Volume/Surface, les fluctuations thermiques suivent de très près les variations saisonnières de la température atmosphérique (RIOUAL, 1972 ; MINAS, 1973 ; KIM KI-TAI, 1981). Elles sont sensibles aux coups de vent (KERAMBRUN, 1970), à l'apport d'eaux douces et d'eaux marines et aux particularités topographiques . Leur amplitude est supérieure à celle enregistrée en mer .

L'évolution annuelle des températures, compte tenu des influences saisonnières et des phénomènes de stratification thermique, présente trois périodes distinctes (MINAS, 1973 ; KIM KI-TAI, 1981) :

- période estivale : réchauffement et établissement d'une faible stratification thermique, eaux marines en profondeur plus froides que les eaux douces de surface ;
- période hivernale : refroidissement en surface, stratification thermique, eaux marines en profondeur plus chaudes ;
- période printanière et automnale : homothermie verticale favorisée par le brassage dû aux vents .

Le régime thermique a été peu modifié par l'arrivée d'eaux douces duranciennes ; il faut cependant remarquer une légère baisse des températures minimales hivernales (de 1 à 3°C, selon RIOUAL, 1972) .

pH

Les variations de pH s'effectuent dans d'étroites limites, de 7,55 à 8,65 (S.P.P.P.I., 1979) .

Répartition verticale :

- homogénéité des valeurs entre la surface et -0,80 m ;
- diminution du pH à proximité du fond assez fréquente qui traduit logiquement les phénomènes de dégradation en milieu appauvri en oxygène ; elle est surtout marquée en novembre et reste cantonnée dans la région Sud en mars et mai .

Répartition horizontale :

- le gradient positif entre le Nord et le Sud (C.E.A., 1972) s'est estompé par rapport aux premières années qui ont suivi la mise en eau du canal E.D.F. et a fait place à une homogénéité dans toute la masse du Grand Etang (S.P.P.P.I., 1979 ; KIM KI-TAI, 1981) ;
- l'étang de Vaïne témoigne de son indépendance vis-à-vis de cette homogénéité (pH voisin de 8,7) .

Alcalinité

Liée aux apports d'eau douce, l'alcalinité présente une corrélation négative avec la salinité . Les cycles annuels sont en étroite relation avec les débits . L'apport de carbonates par la Durance est sensible depuis juin 1966 ; les valeurs d'alcalinité ont augmenté progressivement pour atteindre 2,5 à plus de 3 mEq/l (MINAS, 1973 ; KIM KI-TAI, 1981).

L'élévation d'alcalinité due au débit important de la dérivation de la Durance est en fait bien compensée par l'effet de l'activité photosynthétique (KIM KI-TAI, 1981) .

Salinité

Avant 1966, tous les résultats soulignent une relative constance de la salinité, la valeur moyenne se situant autour de 32‰. (SCHACHTER, 1954 ; MARS, 1949 et 1961 ; MINAS, 1961 ; E.D.F., 1963 ; MINAS, 1964, 1965 et 1973 ; BLANC et al., 1967) .

Malgré cette homogénéité, des variations spatiales (dilution dans la zone des cours d'eau et gradient positif vers le fond au débouché du canal de Caronte), et temporelles saisonnières et pluriannuelles (liées aux variations pluviométriques), peuvent être enregistrées .

Après 1966, la mise en service de l'usine E.D.F. a profondément et brutalement modifié les valeurs de ce paramètre (30‰ début mars et 11‰ fin mai en surface ; MINAS, 1973), ainsi que son homogénéité.

Evolution temporelle : A l'échelle pluriannuelle, la salinité décroît régulièrement depuis 1966 (KIM KI-TAI, 1981) . A l'échelle annuelle, l'évolution des salinités est beaucoup plus sensible que par le passé aux conditions météorologiques dans la mesure où le débit du canal joue un rôle d'amplificateur du régime pluviométrique (bassins versants) . Le schéma général des variations saisonnières, susceptible de modifications notables dues au débit du canal E.D.F., est le suivant (MINAS, 1972b et 1975a ; S.P.P.P.I., 1979) :

- les valeurs s'élèvent en été pour atteindre un maximum en automne, de l'ordre de 21‰ (étiage du canal) ;
- valeurs minima en hiver et au printemps, environ 4‰ en surface .

Evolution spatiale :

Distribution horizontale : les isohalines de surface montrent un écoulement de la nappe déssalée le long de la rive Ouest ; les salinités de la moitié est sont relativement peu modifiées, notamment dans l'étang de Vaïne, où les valeurs homogènes atteignent 5,6‰ . (S.P.P.P.I., 1979) . Ces données diffèrent notablement des prévisions faites par le laboratoire E.D.F. de Chatou à partir d'une simulation en modèle réduit et des mesures postérieures à 1966 mentionnées par LEFEBVRE et al. (1976) .

Distribution verticale : avec le dessalement prononcé de la couche superficielle, l'installation d'une pycnocline à caractère halin se développe pratiquement en permanence dans la région Sud et de façon plus discrète dans la région centrale . Cette pycnocline, habituellement située au-dessous de 6 m de profondeur, constitue une véritable barrière vis-à-vis des éléments gazeux et dissous . La différence de densité entre l'eau marine en provenance du golfe et l'eau de l'étang interdit les échanges énergétiques entre les deux couches . Les mélanges verticaux ne concernent plus que la couche supérieure, le niveau inférieur (coin salé) n'étant affecté que lors de très forts coups de vent (coups de Mistral printanniers) (MINAS, 1972b et 1975a) .

Des variations saisonnières peuvent modifier la position de ce coin salé en fonction du débit du canal E.D.F., de l'action des vents et du refroidissement hivernal (progression vers le Nord de l'étang ou recul) (MINAS, 1975a ; S.P.P.P.I., 1979) .

L'halocline s'atténue par brassage et diffusion verticale au fur et à mesure que l'on progresse vers le Nord (faible profondeur) .

La présence d'une halocline marquée a des conséquences très

importantes sur la répartition des paramètres biologiques et la dynamique de l'écosystème en favorisant les échanges horizontaux et s'opposant à la diffusion verticale .

V.2.2 - PARAMETRES HYDROBIOLOGIQUES

Oxygène dissous et saturation

Avant 1966, les fréquents mélanges turbulents dûs aux vents sur une faible épaisseur d'eau assurent une excellente oxygénation jusque dans les couches profondes . Les maxima et les minima sont déterminés principalement par les variations de l'activité biologique à travers ses processus majeurs : photosynthèse, respiration et minéralisation de la matière organique (MINAS, 1976b) .

Après 1966, dans la région Nord et dans l'ensemble des niveaux superficiels de l'étang, l'évolution et la distribution de l'oxygène dissous n'ont subi que peu de modifications . Les eaux demeurent largement oxygénées pendant la majeure partie de l'année et les périodes de maxima et de minima ont été pratiquement conservées (MINAS, 1973 et 1976b) .

- maxima en janvier-février et en avril-mai ;
- minima en juillet-août et en novembre-décembre .

Par contre, dans les eaux de fond de la zone Sud et de façon moins nette dans la région centrale, l'installation d'une oxycline (parallèlement à la pycnocline) de type quasi-permanent entraîne l'apparition d'une zone sous-saturée à gradient négatif très marqué . Ce dernier, induit des conditions anoxiques plus ou moins durables lorsque la période est favorable (période de forte stabilité verticale) (KIM KI-TAI, 1981) .

L'amenuisement de la quantité d'oxygène disponible sur le fond traduit d'une part l'augmentation depuis 1966 d'une "pluie organique" sédimentant à travers la pycnocline et d'autre part, l'efficacité de la barrière vis-à-vis des échanges gazeux . Ainsi, malgré l'apport constant par les eaux marines à saturation les processus de minéralisation, consommateurs d'oxygène, restent largement excédentaires . Cette consommation accrue au niveau du fond ne trouve plus qu'une faible compensation par mélange vertical (rupture peu fréquente de l'halocline) et par phénomène photosynthétique (activité réduite ou nulle à ce niveau due à l'augmentation de turbidité) .

Ce gradient d'oxygénation peut être atténué par rupture partielle

de la pycnocline (forts coups de vent ou augmentation de la salinité superficielle due à une diminution des apports d'eau douce) . Une meilleure oxygénation se fait également durant la période hivernale lorsque l'activité de minéralisation diminue (action des basses températures) .

Sels nutritifs

Les sels nutritifs présentent des concentrations très faibles dans les milieux naturels non perturbés ; dans l'étang de Berre, ces éléments sont abondants . Ils sont d'origine urbaine, industrielle et surtout agricole et sont véhiculés par les cours d'eau (Arc, Touloubre, canal de la Durance), les canaux d'irrigation et les émissaires .

Compte tenu de son débit important, le canal de la durance constitue la principale source d'enrichissement : les apports totaux en phosphore minéral sont passés de 20/30 tonnes avant 1966 à 100/340 tonnes après 1966 et les apports en azote de 200 à 4.540 tonnes (MINAS, 1973 ; KIM KI-TAI, 1981) .

Le devenir de ces éléments dans l'étang de Berre constitue un aspect particulier de l'écosystème puisqu'il conduit au phénomène d'eutrophisation et ses conséquences sur la production de matière vivante (MINAS, 1974a et 1974b) .

Avant 1966, un équilibre semblant bien établi conduit à une eutrophisation modérée où les nitrates peuvent être considérés comme facteur limitant vis-à-vis de la production phytoplanctonique . L'absence d'halocline marquée permet le mélange des eaux (brassage mécanique) favorisant le cycle synthèse/régénération , fig.68.

Après 1966, l'apport massif d'eaux présente un rapport direct avec une baisse notable des teneurs en phosphates au Nord dans toute la tranche d'eau et au Sud dans la couche supérieure à 6 m . Cette modification est due à un apport massif en nitrate qui permet une utilisation presque complète des phosphates . Par contre, dans les eaux de fond de la région Sud, les teneurs en composés azotés et en phosphates sont élevées et augmentent chaque année en automne . Ces accumulations sont directement liées à la présence de la pycnocline à fort gradient . En effet, le matériel organique produit dans les couches superficielles sédimente et constitue des réserves nutritives par minéralisation qui se

trouvent piégées au niveau du fond , fig. 69a.

Ces réserves ne peuvent qu'exceptionnellement diffuser vers la couche superficielle à l'occasion de forts coups de vent susceptibles de destabiliser la stratification, fig. 69b . Une partie de ces éléments est bien entendu réutilisée in situ, mais en raison de la proximité du canal de Caronte, on peut se demander quelle est la part de matériel exportée vers le golfe de Fos .

Au niveau de cette couche d'eau de fond, l'analyse des composés azotés met en évidence l'existence de processus de dénitrification, phénomène caractéristique des zones soumises à des conditions de fortes sous-saturation en oxygène (MINAS, 1973, 1974a, 1975a ; DELMAS, 1979) .

Les schémas de répartition des teneurs en azote et en phosphore minéraux dans les eaux superficielles permettent d'établir le degré d'évolution du rapport $N-NO_3/P-PO_4$, qui est un bon élément d'appréciation des potentialités productives des eaux . Selon MINAS (1974a) les modifications importantes du rapport N/P, dont les conséquences majeures retiennent sur le développement planctonique en général et également sur le développement préférentiel de certaines espèces, permettent de distinguer deux périodes dans l'année :

- période hivernale et printanière avec des rapports fréquemment supérieurs à 100 (valeurs de nitrate élevée en raison d'une consommation minimale) ;
- période estivale et automnale avec des rapports voisins de 1 (consommation maximale des nitrates) .

Matériel particulaire

Avant 1966, les travaux de BLANC et al. (1967) font état d'une relative homogénéité de la charge organique et minérale ; ils constatent toutefois une augmentation de la turbidité dans la zone Sud de l'étang en relation avec les travaux de dragage effectués dans le prolongement du canal de Caronte et l'action de courants .

Après 1966, on observe, essentiellement dans la zone Sud, une diminution du poids de matériel particulaire malgré une augmentation de la turbidité (MINAS, 1973 et 1975b) . Ceci est imputable à une modification de la nature et de la répartition des particules en suspension. En effet, l'arrivée des eaux duranciennes a refoulé vers le Sud la charge

organique et contenu vers les zones littorales Nord les apports en matériel minéral (BOUCHARD, 1981) . Cette concentration de bioeston dans la zone méridionale est accentuée par l'augmentation, postérieure à 1966, de l'eutrophisation .

Au Nord, les teneurs en particules en suspension sont directement fonction de la concentration des eaux du canal et de ses fluctuations saisonnières (S.P.P.P.I., 1979 ; R.N.O., 1978 et suivantes) .

La dispersion et la projection vers le Sud et l'Ouest des eaux turbides, parvenant à l'étang malgré les installations de délimonage, peuvent être mises en évidence par photographies aériennes (KERAMBRUM, 1970 ; BONNEFOY et CLAUDET, 1974 ; BOUCHARD, 1981) .

V.2.3 - COMMUNAUTE PHYTOPLANCTONIQUE

Structure

- aspect quantitatif :

L'étang de Berre constitue un milieu eutrophe induisant le développement d'une communauté algale très importante . Les densités ont considérablement augmenté depuis la mise en eau du canal de la Durance . BLANC et al. (1967) trouvait 23.10^6 cellules/l et KIM KI-TAI (1981) trouve 126.10^6 cellules/l pour la moyenne annuelle (500.10^6 cellules/l au cours des blooms) .

Il faut cependant remarquer, au cours des dernières années, que la diminution du débit des eaux duranciennes et la mise en place d'un bassin de délimonage ont permis la réduction de l'eutrophisation diminuant les effectifs phytoplanctoniques . Ainsi, après 1980, BEKER et al. (1981) trouve une moyenne annuelle de 50.10^6 cellules/l .

La répartition spatiale des phytoplanctontes est relativement homogène ; toutefois l'étang de Vaïne est en moyenne deux fois plus riche que le Grand Etang et joue le rôle d'un "bassin de culture" (KIM KI-TAI, 1981 ; BEKER et al., 1981) . Sur le plan vertical on observe des densités plus faibles au-delà de 7 m de profondeur (KIM KI-TAI, 1981) .

La répartition temporelle suit le cycle bimodal classique de prolifération des organismes autotrophes dans l'ensemble de la zone (poussées printanière et automnale) . A ce schéma se superposent des phénomènes typiquement locaux : eutrophisation primaire (apports directs fluviaux) et secondaire (régénération) sous la dépendance des conditions météorologiques (vents, saisons) et des débits . Ces conditions déterminent

les périodes de développement suivantes :

- courte période de pauvreté hivernale de décembre à février;
- poussée printannière de mars à juin, la plus forte et la plus durable de l'année;
- plusieurs poussées estivales et automnales moins amples mais pouvant atteindre localement des densités égales à celles du bloom printanier.

- Aspect qualitatif :

Depuis 1966, les observations montrent différentes modifications de la composition des peuplements :

- la plupart des espèces actuelles présentent une taille réduite et une croissance rapide (intérêt de compléter le dénombrement par une estimation volumétrique ; KIM KI-TAI, 1981);
- augmentation de la diversité;
- les formes dulçaquicoles adaptées à des eaux oligohalines dominant largement (Chlorophycées, Cyanophycées, quelques Diatomées et des Cryptophycées).

Néanmoins, depuis la réduction des débits du canal E.D.F. (1980), on constate une raréfaction ou un remplacement des espèces dulçaquicoles au profit d'espèces d'eaux saumâtres (par exemples, les Chlorophycées ont un rôle moins important que précédemment; BEKER et al., 1981).

La fréquence plus élevée des périodes de forte production constatée depuis 1966 rend compte de la prolifération successive d'espèces différentes.

Outre ces modifications spécifiques, des caractéristiques physico-chimiques momentanées (rapport N/P faible en été) sont à l'origine de la prolifération d'espèces particulières conduisant à des phénomènes "d'eaux rouges" (ou "d'eaux décolorées") à Dinoflagellés (MINAS, 1973; BEKER et al., 1981).

Fonctionnement

Avant 1966, l'étang de Berre pouvait être classé parmi les milieux modérément eutrophes avec un taux moyen de production annuelle de 150 gC/m^2 (MINAS, 1973).

L'eutrophisation primaire peu importante (apports fluviatiles directs réduits) entraîne une "production nouvelle" faible (7 à 8% de la production totale). Elle est relayée par une eutrophisation secondaire (recyclage) aboutissant à une "production régénérée" représentant les

quelques 90% restant.

La production relative et le contenu chlorophyllien restent médiocres malgré l'abondance des populations phytoplanctoniques (BLANC et al., 1967; MINAS, 1976a). Outre l'action des divers autres facteurs limitants (azote), La prolifération cellulaire serait à l'origine de l'inhibition de l'activité photosynthétique et de l'accroissement de la quantité de matière organique (MINAS, 1973).

Après 1966, la production primaire présente des valeurs plus élevées atteignant $300 \text{ gC/m}^2/\text{an}$ (MINAS, 1973; KIM KI-TAI, 1981). Au sein de ce bilan global, la part imputable au recyclage (production régénérée) à diminué en raison de la réduction des échanges verticaux alors que celle imputable aux apports directs a augmenté (MINAS, 1976a).

les apports massifs d'eau douce, bien qu'ils provoquent un accroissement de l'eutrophisation, ont également pour conséquence de limiter l'enrichissement excessif du milieu en cellules autotrophes (rôle inhibiteur de la dilution sur l'activité biologique des microorganismes). Malgré l'abondance des éléments nutritifs (nitrates), les potentialités de production ne sont donc pas réalisées, particulièrement les années de forte dessalure (MINAS, 1976a et 1977a) et d'une manière générale à proximité du point de rejet d'eau douce (SOUZA LIMA, 1979).

Compte tenu de l'importance du tripton apporté par les cours d'eau (diminution de la transparence), la production primaire n'est relativement forte que dans les eaux superficielles; la chlorophylle a abondante dans le phytoplancton des eaux sous-jacentes est beaucoup moins productive (KIM KI-TAI, 1981). Ce phénomène s'ajoute à l'effet inhibiteur de la dilution et aux pertes de phytoplancton par le canal de Caronte pour expliquer la faiblesse du rendement de la biomasse de l'étang.

Vis-à-vis des aires marines voisines (golfe de Fos), l'étang de Berre joue le rôle de transformation et d'enrichissement en matière vivante (MINAS, 1976a; BEKER et al., 1981).

V.2.4- COMMUNAUTE ZOOPLANCTONIQUE

Les données les plus récentes (BLANC et al., 1967) concernent la période précédant la mise en eau du canal et font état d'une richesse quantitative et d'une faible diversité spécifique.

V.2.5--ANALYSE BACTERIOLOGIQUE

Aucune étude microbiologique complète n'a été réalisée; seules quelques études récentes, menées dans le but d'apprécier le degré de pollution de l'étang, prennent en compte le niveau de contamination bactérienne des eaux (S.P.P.I., et D.A.S.S., 1981 et 1982).

Les numération des coliformes totaux, d'Escherichia coli, des Streptocoques fécaux et des Salmonelles, mettent en évidence les secteurs les plus soumis à la contamination, soit à cause de la proximité des effluents qui la véhiculent, soit en raison de l'existence dans le milieu récepteur de conditions favorables à leur maintien (valeur du potentiel d'oxydo-réduction en particulier) :

- secteur Nord-Ouest (St Chamas et débouché de la Touloubre);
- secteur Sud (Martigues, La Mède);
- étang de Vaïne (surtout sur sa rive Nord).

Les fonds occupés par les eaux à forte minéralisation du secteur Sud sont particulièrement riches en Streptocoques et Clostridies sulfato-réductrices en raison des conditions anaérobies qui y règnent.

Par contre les conditions créées par un renouvellement des eaux littorales, au Nord de Martigues et du Jaï, assurent une meilleure qualité bactériologique.

V.2.6- CONCLUSIONS

Les conditions hydrologiques et hydrobiologiques de l'étang de Berre ont été brutalement modifiées par le rejet du canal de dérivation de la Durance et leur évolution actuelle reste profondément liée à l'antagonisme entre les eaux douces et les eaux marines en provenance du golfe de Fos.

1°) - L'apport massif d'eaux douces a transformé l'étang en bassin de dilution stricte .

2°) - Les arrivées d'eaux marines au Sud provoquent, au contact des eaux diluées de l'étang, l'installation quasi permanente d'une picnocline à caractère halin formant un système hydrologique à deux couches .

3°) - La présence de cette stratification entraîne, dans la zone méridionale de l'étang, l'apparition de conditions anoxiques dont la pérénité est de nature à provoquer un déséquilibre de l'écosystème.

- La zone profonde de l'étang fonctionne en bassin d'accumulation de matières organiques et minérales issues, par sédimentation, des couches superficielles. Ce phénomène tend à conférer à la cuvette méridionale les caractéristiques d'un système pollué par dystrophie organique.

- L'eutrophisation permanente relativement modérée due aux apports d'eau douce peut être momentanément multipliée du fait d'injections nutritives importantes provenant des réserves accumulées.

- Le fonctionnement de l'écosystème est fonction de l'homogénéisation des masses d'eaux sous la dépendance de deux facteurs:

- action des vents
- débits et périodes des déversements d'eau douce.

V.3 - PERSPECTIVES

V.3.1 - AXES DE RECHERCHES

L'ensemble des résultats issus des travaux réalisés dans l'étang de Berre amène à formuler deux grandes questions :

- 1 - L'étang a-t-il atteint un état d'équilibre ou bien existe-t-il encore une évolution liée à la dérivation des eaux de la Durance ?
- 2 - Quel est le rôle des apports de l'étang de Berre dans le golfe de Fos ?

Ces questions suggèrent l'étude d'un certain nombre de points particuliers.

Courantologie

En raison de l'évolution hydrodynamique rapide du plan d'eau, l'interprétation des résultats hydrologiques et biologiques nécessiterait une étude courantologique systématique. De plus, l'étude des échanges entre l'étang et le golfe de Fos ne peut se faire sans une analyse du déplacement des masses d'eau dans le canal de Caronte.

Rôle de la stratification et processus de mélanges verticaux

a - Suivre l'évolution saisonnière et surtout annuelle de la couche d'eau de fond anoxique (actuellement quasi-permanente dans la cuvette Sud) et son extension.

b - Etablir un bilan global des teneurs en oxygène.

c - Estimer l'importance du stock minéral accumulé sous la pycnocline à la fois dans les eaux et les sédiments.

d - Mieux définir le cycle des éléments nutritifs (sédimentation et régénération de la matière organique) en relation avec la présence ou l'absence de la pycnocline.

e - Evaluer, à partir de ce qui précède, l'évolution du degré d'eutrophisation de l'étang.

Cycle de l'azote

a - Des mesures en continu des teneurs en composés azotés issus de la décomposition de la matière organique, sur des périodes déterminées, permettraient de mieux cerner les mécanismes de formation des eaux anoxiques.

b - Poursuivre, en particulier, l'étude des processus de dénitrification mis en évidence dans la couche d'eau profonde, leur origine et leur rôle, par des analyses isotopiques (N^{15}), des mesures d'azote moléculaire, d'ammoniaque et des comptages concomittants du spectre bactérien.

c - Dans le domaine microbiologique, il serait également souhaitable d'analyser les processus de chimiosynthèse liés à la production d'hydrogène sulfuré dans ce milieu fortement réducteur.

4°) Echanges Berre-Fos

a - Etablir un bilan d'entrée et de sortie de l'azote et du phosphore sous forme minérale et organique, bilan annuel ou correspondant à chaque période type (§ I - B - 3°) ; définir notamment l'importance des éléments exportés vers le golfe de Fos à la suite des processus de brassages verticaux.

b - Sur un plan écologique plus général, il serait intéressant d'évaluer la contribution de l'étang de Berre à l'enrichissement des aires marines avoisinante (exportation de matière minérale et de matière organique sous forme détritique ou vivante).

5°) Biomasse et production primaire

a - La charge importante en matériel particulaire organique d'origine détritique est la cause d'une surestimation de la biomasse planctonique (prise en compte de débris organiques d'origine fluviatile lors des analyses). Il est donc important de mesurer et de comparer les différents indicateurs de biomasse (chlorophylle, phéopigments, carbone et azote particuliers, carbonates du seston, ATP, glucides, protéines, comptages ...).

b - Définir le taux de production annuelle à partir de mesures répétées au cours de l'année. Renouvelées chaque année, ces mesures sont susceptibles de mettre en évidence la présence ou l'absence d'une évolution à plus grande échelle.

6°) Importance du zooplancton

Il est regrettable qu'aucune étude concernant les communautés zooplanctoniques n'ait été effectuées depuis 1966.

L'analyse quantitative et qualitative des populations se développant dans un milieu perturbé présente en elle-même un intérêt fondamental. De plus nous savons que ces herbivores peuvent trouver une nour-

riture abondante dans l'étang de Berre, mais les modalités et le rendement du transfert d'énergie vers ce deuxième maillon de la chaîne alimentaire et les échelons supérieurs demeurent totalement inconnus.

C'est sur la base de telles études prenant en compte les différents échelons de la chaîne trophique que pourra être réellement défini l'état d'équilibre du milieu.

7°) Pollution

Nous avons vu que les répercussions de l'eutrophisation excessive (dystrophie), sur l'ensemble du fonctionnement de l'écosystème, doivent être surveillées très attentivement. La portée de ce phénomène concerne en effet à la fois les domaines pélagique et benthique. Dans le domaine pélagique, l'existence de phénomènes d'eaux rouges pourrait faire l'objet d'une attention particulière.

Les autres formes de pollution qui contribuent à altérer le milieu (rejets urbains et industriels) doivent également être prises en compte dans une étude globale de la qualité des eaux.

SIXIEME PARTIE

LE BENTHOS

VI.1 - INTRODUCTION

L'ensemble du benthos de l'Etang de Berre est conditionné par deux facteurs essentiels :

1) A l'exclusion des constructions humaines, digues, enrochements et de quelques pointements rocheux naturels, il n'existe pratiquement que des substrats meubles et le plus souvent à cause même de l'histoire de l'Etang, des sédiments fins.

2) L'Etang est soumis à un régime hydrologique qui a totalement bouleversé son écologie à partir de Mars 1966, date de mise en route de l'usine hydroélectrique de Saint Chamas.

Du point de vue des études benthiques menées dans l'Etang, les travaux antérieurs à la mise en service de l'usine hydroélectrique de St Chamas, à cause de l'impact capital qu'elle a eu sur la salinité des eaux et sur la sédimentation, ne peuvent servir que de référence dans l'étude de processus d'évolution de l'Etang, mais ne peuvent en aucun cas servir de base pour des études ultérieures sur ce site.

VI.2 - ETUDES ANTERIEURES A 1966

L'Etang de Berre a fait l'objet de travaux de type monographique (5, 7, 8, 11, 12, 20, 21). Certains groupes systématiques ont été étudiés soit par comparaison avec d'autres étangs, soit avec la mer ouverte : algues (11, 13, 14), mollusques (19, 22, 23, 24), phoronidiens (6), crustacés (10) poissons (18, 26).

C'est grâce à ces travaux qu'il a été possible de suivre par la suite l'évolution des biocénoses de l'étang et de certaines populations animales ou végétales.

Une importante étude quantitative de l'ensemble du macrozoobenthos avait été conduite de 1963 à 1965 (8) alors que l'étang avait une salinité oscillant entre 31 et 33 ‰ et que le peuplement de base était un SVMC *. Sur la bordure Ouest et Nord Est existait un riche herbier de Phanérogames à Zostera, mais jamais de Posidonies comme cela a été signalé par erreur dans certain Rapport Officiel.

Sur la côte Est et au Sud Ouest se développait une moulière à M. galloprovincialis exploitée.

La plage du Jaï était composée de sables fins extraordinairement riches en Lentidium méditerranéum.

L'étang était marin, et les espèces indicatrices de pollution étaient pratiquement inexistantes.

VI.3. ETUDES POSTERIEURES A 1966

VI.3.1. Benthos de substrat meuble

Au fur et à mesure que l'impact des rejets de l'usine hydroélectrique s'accroissait, une succession d'études a permis d'analyser les différentes étapes

- Deuxième semestre 1966 : disparition d'espèces euryhalines au Jaï (25)
- 1970 (1 bis), appauvrissement du peuplement de l'ensemble de l'étang, vie absente au-delà de 5 m. Dégradation des moulières et herbiers - développement d'indicatrices de pollution.
- 1972 - 1977 : transformation totale du peuplement dominant qui devient du LEE ** (30, 31), absence de macrobenthos dans le centre de l'étang, maintien d'un coin salé peuplé. Développement excessif d'espèces de dessalure telle Mercierella enigmatica qui est susceptible de modifier la nature du substrat.

* SVMC : Sables Vaseux de Mode Calme.

** LEE : Biocénose Lagunaire Euryhaline et Eurytherme.

De nombreux travaux attestent (1, 2, 30, 31, 32, 33, 34) que cette phase se poursuit actuellement.

Dans l'état actuel des peuplements de l'Etang de Berre on connaît :

la composition qualitative et quantitative des différents aspects du peuplement LEE de la bordure côtière, du gradient d'appauvrissement S/N.

VI.3.2 - Etudes faunistiques

Les modifications sur les populations spécifiques ont fait l'objet d'études plus ponctuelles que celles qui concernaient les peuplements dans leur ensemble, bien que non simultanées elles concordent toutes avec les différents processus de modification subits par l'étang.

- On a assisté à un remplacement progressif des Sphaeroma serratum par S. hookeri, ce qui, compte tenu des caractéristiques de développement et de reproduction de ces deux espèces ne peut qu'aboutir à la disparition de S. serratum.

- La disparition totale de certains groupes tels les échinodermes a été observée (17 bis).

- Du point de vue ichthyologique (15), les espèces à affinité marine restent localisées dans le Sud (coin salé) de l'étang, il est partout possible de rencontrer des espèces euryhalines qui constituent la majorité de la pêche (muges, anguilles, loups, athérines) Dans la zone Nord sont apparues des espèces dulçaquicoles. Malgré la dessalure on n'assiste pas au développement important des espèces d'eau douce ; la raison évoquée est que le milieu n'est pas favorable à l'éclosion et au développement des oeufs plus sensibles que les jeunes à la présence même faible, de sel. Il semble donc, selon cette étude que la pêche dans l'étang restera dans les conditions actuelles composée d'espèces euryhalines et migratrices (y compris l'anguille).

VI.3.3 - Modification et destruction de la flore (27, 28, 29)

On a assisté après 1966 à :

- un appauvrissement progressif des associations biocénologiques des hauts niveaux
- un profond remaniement des peuplements algaux de l'étage infralittoral
- une régression des herbiers de Phanérogames avec disparition totale entre - 3 et - 6 m et à une modification floristique de ceux-ci: Zostera noltii dominant par rapport à Z. marina et appauvrissement de Ruppia maritima.

La diversité de la flore a considérablement diminuée :

- 19 % de Rhodophycées
- 5 % de Pheophycées mais une espèce "Cystoseira barbata" avait une très large distribution,
- 24 % de Chlorophycées

VI.3.4 - Contamination, fixation, concentration des polluants dans les organismes (4)

Les organismes benthiques subissent des fluctuations de contamination dont l'importance est liée à la qualité et à la quantité des rejets mais également aux caractères propres de l'espèce et du substrat où elles vivent.

Quatre métaux ont été analysés dans 12 espèces appartenant aux grands groupes végétaux et animaux.

Les vitesses de variation des teneurs et du rapport des concentrations entre prélèvements successifs ont été calculées.

Une tentative de corrélation des modifications a été établie avec les fluctuations des apports liquides et solides du Canal de la centrale hydroélectrique.

VI.4 - CANAL DE CARONTE

Le Canal de Caronte constitue la communication principale de l'Etang de Berre avec le Golfe de Fos; il est creusé à 9 m de profondeur sur plus de 6 km de longueur.

Un double courant circule : eau de mer vers l'Etang de Berre en profondeur, et eau douce en sens inverse et en surface.

Les indices de pollution relative obtenus de Port de Bouc à Martigues sont extrêmement variables.

L'évolution du chenal de navigation avant et après 1966 a suivi d'assez près celle de l'Etang de Berre, puisqu'on est passé d'un peuplement SVMC à un LEE. Par contre le Canal de Caronte possède toujours un peuplement SVMC. Un double gradient d'appauvrissement est enregistré du centre du canal vers Port de Bouc et vers Martigues :

- La pollution à Port de Bouc est telle qu'elle entraîne une zone azoïque du point de vue macrobenthos ; au fur et à mesure que l'on s'éloigne de cette région on assiste à un enrichissement progressif.
- Le facteur salinité prépondérant aux autres altérogènes entraîne le passage du peuplement SVMC à un peuplement LEE dégradé.

Dans le Canal de Caronte, face à deux gradients de perturbation différents dans le chenal et le canal, la dégradation des peuplements benthiques se manifeste par un appauvrissement spécifique et numérique similaire.

L'étude du Canal de Caronte doit être calquée sur celle du Golfe de Fos et de l'Etang de Berre suivant que l'on mettra l'accent sur l'aspect bilan pollution - dépollution ou connaissance et modélisation d'un système dont la dynamique d'évolution à grande échelle n'est qu'une hypothèse.

VI.5 - CONCLUSIONS ET POSSIBILITES DE DEVELOPPEMENT DANS LE CADRE DE L'ETUDE D'UN MODELE DE L'ETANG DE BERRE

Il est évident que la distribution des peuplements benthiques de l'Etang de Berre est strictement conditionnée au déversement d'eau douce par l'usine hydroélectrique de St Chamas et ainsi tant que cet état de fait subsistera. Avec un régime de rejet irrégulier aucun état d'équilibre permanent ne s'établira.

Les études poursuivies sur les fluctuations des communautés benthiques ont permis d'avoir un excellent bilan qualitatif et quantitatif des états successifs de l'évolution de l'étang qu'il serait souhaitable de continuer si le bilan hydrologique de la région devait évoluer.

La pollution chimique en général ne semble pas avoir un impact primordial sur la faune et la flore bien que de forts taux de métaux aient été enregistrés dans les maillons élevés de la chaîne trophique.

Le peuplement algal est très dégradé et les herbiers ont considérablement régressé.

PERSPECTIVE DES TRAVAUX A EFFECTUER

Ainsi que l'a été dit précédemment l'évolution des communautés macrobenthiques devrait être suivie avec précision si le bilan hydrologique de l'étang devait évoluer.

Les méio et microbenthos sont totalement inconnus.

Deux bilans manquent d'après mes investigations bibliographiques :

- l'état réel des herbiers
- le bilan ichtyologique qui pour une grande part de la faune sédimentaire est directement lié aux peuplements végétaux herbier et algues.

En ce qui concerne la contamination et la concentration des polluants par les organismes, les seuls travaux que l'on possède correspondent aux années 1978-1979, et les métaux ont seuls été pris en compte. Il serait souhaitable de réunir plus de données actuelles ainsi que sur les polluants organiques.

SEPTIEME PARTIE

PEUPEMENTS ICHTYOLOGIQUES ET LEUR EXPLOITATION

VII.1 - HISTORIQUE

La succession des espèces ichthyologiques et l'historique de la pêche dans l'étang de Berre sont étroitement liées à l'évolution des conditions de milieu au sein de cet étang.

A l'origine la liaison étang-mer ne s'effectuait que par de multiples canaux avec pour conséquence des eaux de faible salinité à l'intérieur du complexe lagunaire.

Le creusement du chenal de Caronte long de 6km et d'une profondeur actuelle de 9 m a eu pour conséquence une entrée massive d'eau à forte salinité entraînant un profond remaniement des populations benthiques et ichthyologiques.

Depuis l'installation des raffineries de pétrole en 1929, la situation de la pêche dans l'étang n'a cessé de se dégrader. Les plaintes répétées des pêcheurs à l'égard des raffineries aboutirent à l'acceptation par ces derniers d'un principe de dédommagement définitif avec en contrepartie la cessation de toute activité de pêche dans l'étang. Ces décisions firent l'objet de la loi 57897 du 7 août 1957 portant interdiction de pêche dans Berre et Vaine. Une tolérance de pêche pour les dix années suivant l'arrêt était admise pour les pêcheurs qui ne désiraient pas bénéficier des indemnités.

Le déversement des eaux de la Durance par St Chamas depuis mars 1966 a considérablement augmenté l'apport d'eau douce dans l'étang puisque le débit de ce déversoir peut atteindre annuellement $3.6.10^6$ m³, soit 4 fois le volume de l'Etang. L'irrégularité des apports de la Durance (maxi 300 m³/s, mini \approx nul) joue pour une très grande part dans l'équilibre des peuplements benthiques et dans la dynamique de répartition des différentes espèces de poisson.

En 1969, le Préfet de Région accordait aux pêcheurs une dérogation de pêche dans l'étang de Berre, pour la seule pêche de l'anguille dont la commercialisation trouvait de nouveaux débouchés. Cette espèce avait en outre la faculté de ne pas garder de goût très prononcé d'hydrocarbures contrairement aux muges, loups et daurades.

Un plan de dépollution de l'étang mené de front avec un schéma d'assainissement du Bassin versant permet depuis 1963 une diminution de la charge eutrophisante.

Dès 1978, on assiste à un peuplement progressif de l'étang. Cet état de fait motive les pêcheurs à demander début 1982 l'abrogation de la loi de 1957. Le rétablissement dudit de pêche permettrait en outre de gérer plus efficacement la pêcherie par des mesures réglementaires adaptées.

VII.2 - LES PECHEURS

Le quartier de Martigues regroupe plusieurs activités de pêches. On distingue le chalutage, les thoniers, les lamparos et les petits métiers.

Sur les 230 bateaux recensés dans le quartier, une centaine travaillent actuellement sur l'Etang et sont basés à Istre, Martigues, St Chamas, Berre et Marignan*. Chaque patron pêcheur travaille seul ou assisté d'un homme d'équipage.

VII.3 - LES ENGINES DE PECHE

Les engins de pêche utilisés sont essentiellement les trabacs et capéchades dont les postes aux nombres respectifs de 200 et 500 sont attribués aux pêcheurs de la prud'homie par tirage au sort. Quelques bordigues sont installées sur les passages entre le Grand étang et celui de Bolmon. La pêche aux poissons blancs s'effectue également à l'aide de trémails et de filets maillants.

VII.4 - LES ESPECES PECHEES

Les espèces exploitées dans l'étang de Berre sont nombreuses. Toutefois cinq d'entre elles prédominent de par la quantité des apports aussi bien que pour leur intérêt économique. Ce sont les anguilles, les muges, les loups, les daurades et les athérines ou joëls.

Le tableau ci-après résume les quantités débarquées dans le quartier de Martigues. Ces chiffres prennent en compte, anguilles et athérines exceptées, des captures effectuées hors Etang.

* Plus de 200 licences sont délivrées pour la pêche à l'anguille durant les mois de septembre à décembre.

Année	Anguille	Muge	Loup	Daurade	Attherine
1970	1500	130	100	46	
1971	2041	77	80	102	
1972	941	55	46	32	
1973	800	115	55	59	
1974	209	148	83	55	
1975	339	261	97	72	
1976	359	207	89	74	
1977	256	291	107	73	
1978	864	781	205	69	66
1979	276	1419	180	61	160
1980	309	1092	180	36	131
1981	271	1725	199	56	275
1982	337	2045	297	64	218

VII.4.1 - L'anguille

Bien que les chiffres officiels des débarquements soient faibles depuis 1974, l'anguille est l'espèce dominante dans les captures où elle se présente sous deux formes, l'anguille verte et l'anguille argentée. Rappelons brièvement le cycle biologique de cette espèce.

Lorsque les anguilles entrent sous forme de civelles à la fin de l'hiver dans l'étang de Berre par le chenal de Caronte, elles ont effectué un long voyage depuis les Sargasses jusqu'au rebord du plateau continental où, après métamorphose, elles ont gagné par Gibraltar les côtes méditerranéennes. Quelques temps après leur entrée en étang les civelles prennent une teinte noire puis jaune. La croissance de l'anguille verte s'effectue dans les eaux saumâtres ou douces. 8 à 14 ans pour les mâles et 10 à 18 ans pour les femelles sont nécessaires pour que s'effectue la maturation sexuelle. Un certain nombre de caractères morphologiques changent et les anguilles ainsi parées d'une livrée noire et argentée quittent l'étang en automne pour repartir vers les lieux de reproduction.

Avant 1960, on pêchait l'anguille argentée uniquement. Depuis cette date de nouvelles possibilités de commercialisation de l'anguille verte ont eu pour conséquence une augmentation progressive des tonnages débarqués (2041 T en 1971). Un déclin passager a semblé marquer les années 75 à 77. Les débarquements de 1982, composés pour 96 % d'anguille verte s'élèveraient à 1700-1800 T, chiffres nettement supérieurs aux données officielles Affaires Maritimes.

La consommation totale française d'anguille est faible (500 T) Cette espèce est essentiellement exportée vers l'Italie (60 %), les Pays Bas et la Belgique.

Bien qu'interdite en Méditerranée, une pêche frauduleuse de civelle s'exerce et le produit est acheminé vers l'Espagne et le Mexique.

VII.4.2 - Autres espèces

On assiste actuellement à une recrudescence dans l'abondance des loups, muges , entrant dans l'étang mais l'augmentation des apports pour ces espèces est surtout due aux chalutiers basés à Port de Bouc, Port St Louis et Carro.

En ce qui concerne les Daurades et les Atherines, les captures ne semblent pas avoir subi de profondes modifications au cours des 10 dernières années.

VII.5 - CONCLUSION

Bien qu'une loi interdise la pêche dans l'étang de Berre, une centaine de pêcheurs y calent leurs filets. L'anguille est l'espèce la plus pêchée, suivie du Muge, du Bar, de l'Atherine et de la Daurade.

Le principe du rétablissement du droit de pêche est subordonné à une étude visant à une meilleure connaissance de la pêcherie et permettant d'aboutir à une estimation des ressources halieutiques en vue d'envisager des propositions d'aménagement.

BIBLIOGRAPHIE

BENEVENT E. 1926.- Le climat des Alpes françaises. Thèse Lettres Grenoble, Memorial de l'O.N.M. de France, 1 vol. in-8°, 435 p.

" 1926.- Documents sur le climat des Alpes françaises; études critiques. Rev. Géogr. Alpine, Grenoble, XIV, p. 621-764.

CORONAT L., 1928.- Le climat des Hautes-Alpes. Bull. Soc. Etudes Hautes-Alpes, Gap, XXXVII, p. 157-163.

OLLIER L. & TASSON A., 1965.- Climatologie de l'aéroport de Marseille-Marignane. Monographies de la Météorologie Nationale, N° 41.

GARNIER M., 1967.- Climatologie de la France. Sélections de données statistiques. Mémorial de la Météorologie Nationale, N° 50.

BORDREUIL C. & FRASSE M., 1980.- Y a-t-il une diminution du Mistral? Comm. Météo., Ann. Météorologiques, p. 16-21.

ANONYME, 1980.- Météorologie 1980. Comm. Météo., Ann. Météorologie, 119 p.

C) ETANG DE BERRE: CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE.

DENIZOT G., 1938.- La Crau, la Camargue et l'étang de Berre. Ann. Fac. Sc. Marseille, (2), XI, fasc. 1, p. 3-159.

GOVERNAT C., 1960.- Evolution géologique des relations Bas-Rhône/Basse-Durance pendant les temps pliocènes et quaternaires. Ann. Fac. Sc. Marseille, XXIX, p. 273-279.

CORNET C., 1966.- L'évolution tectonique et morphologique de la Provence depuis l'Oligocène. Thèse Sciences Paris, Mém. Soc. Géol. Fr., Nlle Ser., XLIV, fasc. 2, N° 103, 252 p., 8 pl. phot., 4 cartes.

LEENHARDT O. & ROUX R-M., 1967.- Morphologie du substratum de l'étang de Berre. B.S.G.F., 7, IX, p. 88-92.

CATZIGRAS F., COLOMB E., GOVERNAT C. & ROUX R-M., 1968.- Le Miocène de Provence. L'étang de Berre, la Crau et les étangs. Guide d'excursion géologique en basse Provence occidentale, in Trav. Lab. Géol. Fac. Sc. Marseille, I, p. 43-55.

AMBERT P., 1973.- Géomorphologie de l'étang de Berre et de ses bordures. Thèse 3° Cycle, Univ. Aix-Marseille, 465 p.

COLOMB E. & ROUX R-M., 1978.- La Crau. Données nouvelles et interprétations. Géologie Méditerranéenne, V, N°3, P; 303-324.

CARTE GEOLOGIQUE DE LA FRANCE A 1/50 000°, BRGM édit.,
Eyguières, XXX-43, N° 993,
Istres, XXX-44-45, N° 1019,
Martigues- Marseille, XXXI-44-45, N° 1020-1043.

AMENAGEMENT REGIONAL.

MOREL G., 1959.- La région de l'étang de Berre, réussite sociale et économique ? Rev. Chambre de Commerce Marseille. N° spécial, 200p.

CULTIAUX D., 1975.- L'aménagement de la région Fos-Etang de Berre. Notes et études documentaires, N° 4 164-4 165-4 166, 129 p.

ANONYME, 1975.- Fresque du développement économique et démographique dans la région de Fos et de l'étang de Berre, 1975-1985. MIAFEB, Rapport et cartes.

ETAT ANTERIEUR AUX REJETS EDF 1966

- GOURET P., 1907.- Topographie zoologique des étangs de Caronte, de Labillon, de Berre et de Bolmon. Ann. Mus. Hist. Nat. Marseille, 27,II,XI, 166 p.
- CHEVALLIER A., 1916.- L'étang de Berre. Ann. Inst. Océanogr., VII, fasc. 4, 91 p., 1 carte.
- MOLINIER R., 1948.- La végétation des rives de l'étang de Berre. Bull. Soc. Linéenne Provence, XVI, p. 19-42.
- MARS P., 1961.- Recherches sur quelques étangs du littoral méditerranéen français et sur leurs faunes malacologiques. Thèse Sciences Paris, C.R.D.P. Aix-en-Provence, 270 p. et Vie et Milieu, sup. N° 20, 1 vol. in-8° Masson édit., 369 p. (paru 1966).
- BONNEFILLE R. & BRACONNOT P., 1963.- Modèle hydraulique de l'étang de Berre. Lab. National Hydraulique Chatou, Rapport T264: 9 p., 33 fig., Rapport T285: 29 p., 89 fig., Rapport T319: 4 p., 52 fig., Rapport T353: 23 p. 87 fig.
- BRACONNOT P. & DAUBERT A., 1965.- Etude sur modèle réduit des conséquences du déversement dans l'étang de Berre d'un débit d'eau douce détourné de la Durance. La Houille Blanche, N° 1, p. 33-38.
- FEBVRE J., 1966.- Etude bionomique des substrats meubles de l'étang de Berre. Thèse 3° Cycle, Univ. Aix-Marseille, 113 p. et Rec. Trav. St. Mar. Endoume, 1968, Bull. 44, fasc. 60, p. 297-355.
- FEBVRE J. & MARS P., 1966.- Données nouvelles sur l'hydrologie de l'étang de Berre. Ibid., Bull. 41, fasc. 57, p. 7-23.
- BOURGOIN J., 1966.- Etang de Berre. Oscillations du plan d'eau et variations du Niveau moyen. - Cahiers Océanogr., 18, (2), p. 95-122 ; et: Mission hydrographique dans l'étang de Berre, Annales Hydrographiques, 1967, T. 13.

ETAT POSTERIEUR AUX REJETS EDF 1966.

- KIENER A. & LONGUEMARE R., 1967.- Evolution de l'étang de Berre en fonction des grands travaux d'équipements de l'Electricité de France sur la Durance. La Houille Blanche, N° 5, p. 507-513.
- BLANC F., COSTE B., MINAS H.J., & SZEKIELDA K.H., 1967.- Distribution des principaux facteurs hydrobiologiques dans un milieu de forte production organique: l'étang de Berre. Marine Biology, 1, (1), p. 43-55.
- KIENER A. & LONGUEMARE R., 1968.- Une année très particulière pour l'évolution de l'étang de Berre: 1967. La Houille Blanche, N° 8, p. 725-735.
- KIENER A., 1969.- Premières données relatives à l'évolution hydrobiologique de l'étang de Berre avec la mise en service du nouveau canal de la Durance: branche Mallemort-St Chamas. Rapp. Comm. Int. Médit., 19, N° 5, p. 859 et sq.
- MINAS M., 1970.- Résultats d'observations hydrologiques sur l'étang de Berre (années 1965, 1966, 1967). Modification du régime hydrologique par suite du déversement des eaux apportées par le canal de dérivation de la Durance. Cahiers Océanogr., 22, (1), p. 73-88.

- PERES J.M., 1972.- Réflexions de synthèse sur le devenir de l'étang de Berre. In: SITUATION DITE DU POINT ZERO DE L'ETANG DE BERRE, Station Marine d'Endoume et SPPPI, Marseille, 3 p.
- LEUNG-TACK K.D., 1972.- Bibliographie et état des connaissances sur les peuplements benthiques de l'étang de Berre. Ibid., 36 p.
- MINAS M., 1972.- Situation présente et évolution hydrologique de l'étang de Berre depuis la fin du XIX^e siècle. Ibid., 36 p.
- ROUX R-M., 1972.- Etude géologique et sédimentologique des fonds de l'étang de Berre. Ibid., 17 p.
- GRAUBY A., FOULQUIER L., & PICAT P., 1972.- Etude bibliographique et interprétation des rapports relatifs à l'étang de Berre. Nature et incidence des apports d'eau douce dans l'étang sur le niveau de pollution. CEN Cadarache, Labo. de Radio-écologie continentale, Ibid., 53 p.
- RIOUALL R., 1972.- Contribution à l'étude de la Flore des étangs de Vaine et de Berre. Thèse 3^e Cycle, Univ. Aix-Marseille II, 528 p., 59 pl.
- BOULOT F., 1973.- Hydraulique de l'étang de Berre. Lab. National Hydraulique Chatou, Rapport C/40/73/43, 31 p., 11 fig.
- ANONYME, 1973.- Conséquences de la dérivation des eaux de la Durance dans l'étang de Berre. EDF, GRFH-Méditerranée, Rapport De 11-Sb 15, 27 p., 2 pl. phot.
- MINAS M., 1973.- Sur la synthèse et la dégradation de la matière organique dans l'écosystème de l'étang de Berre. Dynamique et bilan. Rapports avec le régime hydrologique. Thèse Sciences Marseille, Univ. Aix-Marseille II, 339 p.
- HUVE H., KIENER A. & RIOUALL R., 1973.- Modifications de la flore et des populations ichtyologiques des étangs de Berre et de Vaine en fonction des conditions hydrologiques créées par le déversement de la Durance. Bull. Mus. Hist. Nat. Marseille, XXXIII, p. 123-134.
- LEPETIT J.P. & MOREAU S., 1974.- Hydraulique du Canal de Caronte. Lab. National Hydraulique Chatou, Rapport C/42/74/41, 18 p. 13 fig.
- ANONYME, 1974.- Rapport bibliographique sur les conséquences écologiques du rejet des eaux de la Durance dans l'étang de Berre par l'usine hydroélectrique de St Chamas. CERBOM, mission N° 251, Rapport 24 p.
- MINAS M., 1974.- Distribution, circulation et évolution des sels nutritifs, en particulier du Phosphore minéral, dans l'étang de Berre. Influences des eaux duranciennes. Inter. Rev. Ges. Hydrobio., 59, 4, p. 509-542.
- SCHUHL A., 1974.- Rapport d'expertise pour la délibération du Conseil Général des Bouches-du-Rhône sur le déversement dans l'étang de Berre des eaux dérivées de la Durance et sur le bassin de délimonage de St Chamas. Conseil Général des BDR, Rapport 11p. et annexes 3 p.
- ANONYME, 1974.- Schéma d'assainissement des bassins versants de l'étang de Berre et du golfe de Fos. Bureau SETUDE-DARAGON, Rapport de synthèse N° E 72-69/30b, 79 p. + 3 annexes et 2 cartes.
- RAMADE F., 1974.- Etang de Vaine, étude du milieu et vocation des zones littorales. MIAFEB, Rapport 62 p.
- STORA G., 1974.- Etude de l'évolution des peuplements benthiques de l'étang de Berre. Première Partie. Station Mar. Endoume, Rapport 16 p.

- FOULQUIER L. & GRAUBY A., 1974.- Enquête sur l'importance économique de la pêche des anguilles dans l'étang de Berre. CEN Cadarache, Lab. Radioécologie continentale, Rapport 21 p.
- LEPETIT J.P. & MOREAU S., 1975.- Hydraulique du système Etang de Berre/ Canal de Caronte/ Golfe de Fos. Lab. National Hydraulique Chatou, Rapport C/42/75/45, 18 p., 1 fig., 3 pl.
- RAMADE F., 1975.- Etang de Berre: état du milieu, recueil de cartes. MIAFEB, Rapport N° 26/75.
- ANONYME, 1975.- Carte des pollutions: rejets dans l'étang de Berre et le golfe de Fos. IGN, Service Télé-Interprétation, 2 cartes.
- STORA G., 1975.- Etude de l'évolution des peuplements benthiques de l'étang de Berre. Deuxième Partie. Station Mar. Endoume, Rapport 14 p.
- MINAS M., BONIN MC., COSTE B., DAVID P. & MINAS H-J., 1976.- Caractère particulier du mécanisme de l'eutrophisation dans l'étang de Berre. Ann. Inst. Océanogr. Paris, 52, (2), p. 153-164.
- STORA G., 1976.- Evolution des peuplements benthiques d'un étang marin soumis à un effluent d'eaux douces. Bull. Ecol., 7, (3), p. 275-281.
- ARNOUX A., AIRAUDO C.B., MONOD J.P., & BOUCHARD P., 1976.- Etude Physico-chimique et bactériologique des sédiments superficiels de l'étang de Berre. SPPPI, et Lab. Molysmologie Fac. Pharmacie, Marseille, Rapport 27 p., 23 fig.
- CHAMLEY H., 1976.- Etude minéralogique des sédiments superficiels de l'étang de Berre. SPPPI, et Lab. Geol. Mar. et Sedim. Av., Fac. Sc. Luminy, Marseille, Rapport 18 p., 7 fig., 100 fiches.
- ROUX R-M. & WEYDERT P., 1976.- Etude sédimentologique des sédiments superficiels de l'étang de Berre. Ibid., Rapport 41 p., 35 fig.
- RIOUALL R., 1977.- Evolution de la flore benthique des étangs de Berre et de Vaïne, de 1971 à 1975. Bull. Mus. Hist. Nat. Marseille, XXXVII, p. 141-147.
- PICARD J., 1978.- Impact sur le benthos marin de quelques grands types de nuisances liées à l'évolution des complexes urbains et industriels de la Provence occidentale. Oceanis, 4, (3), p. 214-251.
- ARNOUX A., 1979.- Etude de l'état des eaux de l'étang de Berre et du golfe de Fos. SPPPI, et Lab. Molysmologie Fac. Pharmacie, Marseille, Rapport 77 p., 5 annexes.
- ANONYME, 1979.- Etude écologique de l'étang de Bolmon, annexe de l'étang de Berre. SPPPI, et ECOPOL, Rapport U9/2/0, 2vol., 90 p.+ 70 p., 1 pl.
- RAMADE F., 1979.- Bassin versant de la Touloubre (état 1979). Schéma assainissement des eaux superficielles et de protection des milieux aquatiques- Pollution urbaine. Bureau Etude GERIM, Rapport 38 p.
- " , 1980.- Bassin versant de l'Arc (état 1980). Schéma assainissement des eaux superficielles et de protection des milieux aquatiques-Pollution urbaine. Ibid., Rapport 20 p.
- DELMAS D., 1980.- Minéralisation de la matière organique des sédiments de l'étang de Berre. Oceanologica Acta, 3, (3), p. 347-356.

- CATSIKI Av., 1980.- Contribution à l'étude de la contamination des peuplements benthiques de l'étang de Berre par les métaux (Hg, Cu, Zn, Pb). Thèse 3° Cycle Univ. Aix-Marseille II, 181 p.
- ARNOUX A., MONOD J.L., BOUCHARD P. & AIRAUDO Cb., 1980.- Evolution et bilan de la pollution des sédiments de l'étang de Berre. C.R. V° Journées Etude Pollution, Cagliari, CIESM, p. 433-446.
- FAUROUX G., 1981.- Le délimonage des eaux de la Durance dans le bassin de Cadarache. La gestion régionale des sédiments, Séminaire National, Propriano, 27-29 Mai, Document du BRGM N°30, p. 125-136.
- BOUCHARD P., 1981.- Etude de l'état de pollution des sédiments (1976) de l'étang de Berre; I- La pollution Organique. Thèse Doctorat Pharmacie, Univ. Aix-Marseille II, 184 p.
- GIORGETTI C., 1981.- Etude de l'état de pollution des sédiments (1976) de l'étang de Berre; II- La pollution inorganique. Ibid., 149 p.
- BERNAT M., CHASSEFIERE B., MONACO A., & THOMMERET J., 1981.- Etude du rôle des prodeltas dans le transit continent-oceans à l'aide du comportement de certains radioisotopes et des particules supports: le prodelta artificiel de la Durance dans l'étang de Berre. Groupe Recherches Sédimentologiques, Univ. de Nice, Rapport état avancement travaux ATP 048, 7 p., 21 fig.
- PERES J.M., LEVEAU M. & Coll., 1981.- Cartographie dynamique des milieux littoraux soumis à des pollutions telluriques et à des aménagements par l'homme. CNRS (PIREN), ASP N° 3: Gestion Ecologique des ressources en eaux, 2 vol. in-8°, fasc. I: 118 p. (cf. Etang de Berre p. 64-74), fasc. II: 208 p. (fig. et tbx).
- KIM K.T., 1981.- Le phytoplancton de l'étang de Berre: composition spécifique, biomasse et production. Relations avec les facteurs hydrologiques, les cours d'eau afférents et le milieu marin voisin. Thèse Sciences Marseille, Univ. Aix-Marseille II, 2 vol. in-8°, 243 p.+ 229 p. (pl. et fig.).
- STORA G., 1982.- Recherches de bionomie descriptive et expérimentale (in vivo et in vitro) dans quelques biotopes littoraux soumis à des variations naturelles (golfe de Fos) ou artificielles (étang de Berre) des conditions de milieux. Thèse Sciences Marseille, Univ. Aix-Marseille II, 2 vol. in-8°, 197 p.+ 197 p. (fig. et tbx.).
- BAELDE P., 1982.- Bilan de l'état actuel (1982) de l'étang de Berre. Etude bibliographique. Ministère de la Mer, Délégation régionale à l'aquaculture, Rapport 111p.
- ARNOUX A. & STORA G., 1983.- Effects of large freshwater diversions on benthos of a mediterranean lagoon (Etang de Berre). Estuaries, 6, (2), p. 115-125.
- ROUX R-M., 1983.- Etang de Berre: sédiments et dynamique sédimentaire. CNEXO, COB BREST, Rapport N° 82/6990, 2 vol., 64 p.+ 44 fig.
- GABRIE C., 1984.- Etude sédimentologique des sédiments de l'étang de Berre-Etat 1983. Rapport IFREMER (CNEXO), 16 p.
- MOSSE R-A., 1984.- Etude cartographique et quantitative d'une plante aquatique (Potamogeton pectinatus) dans l'étang de Berre. Lab. Ecologie du Benthos, Faculté de Luminy, Marseille, Rapport 18 p.

STORA G., 1984.- Les peuplements macrobenthiques de l'étang de Berre-Etat 1983. Rapport IFREMER (CNEXO), 16 p.

VITIELLO P., 1984.- Evaluation quantitative du meiobenthos de l'étang de Berre. Rapport IFREMER (CNEXO), 15 p.

REFERENCES

- ANTONI A., GILBERT P., 1974. Mesure de l'oxygène dissous dans l'eau de l'étang de Berre. Rapport E.D.F., non publié, 12 pp.
- ARFI R., BEKER B., CARLES D., 1983. Sur un phénomène de dystrophie observé dans l'étang de Berre. Rapp. P.v. Comm. int. Mer Médit., Comité des étangs salés et lagunes (sous presse).
- BAELDE P., 1982. Bilan de l'état actuel de l'étang de Berre, étude bibliographique. Rapport Minitère de la Mer, Délégation Régionale à l'Aquaculture, 111 pp.
- BEKER B., ARFI R., BLANC F., 1981. Evolution des populations phytoplanctoniques dans le golfe de Fos et l'étang de Berre en 1981 (données R.N.O.). Rapport LA 41, 38 pp.
- BLANC F., COSTE B., MINAS H.J., SZEKIELDA K.H., 1967. Distribution et corrélations des principaux facteurs hydrobiologiques dans un milieu de forte production organique (étang de Berre). Mar. Biol., 1 (1): 43-55.
- BONNEFOY F., CLAUDET , 1974. Direction des pollutions dans l'étang de Berre et le golfe de Fos par la photo aérienne. Rapport C.E.A. n° 259.
- BOUCHARD P., 1981. Etude de l'état de pollution des sédiments de l'étang de Berre. 1. La pollution organique. Doctorat d'Université, Univ. Aix-Marseille I, 184 pp.
- BOURGOIN J., 1966. Etang de Berre, oscillations du plan d'eau et variations du niveau moyen. Cah. océanogr., 18 (2): 95-122.
- C.E.A., 1972. (Commissariat à l'Energie Atomique) Etude bibliographique et interprétation des rapports relatifs à l'étang de Berre. Rapport C.E.A./S.P.P.P.I., 54 pp.
- C.E.L.C.O.P. et D.D.A.S.S., 1981. (Cellule de Lutte Contre les Pollutions et Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales). Contrôle de la qualité des eaux. Rapport annuel de synthèse, département des Bouches-du-Rhône
- C.E.L.C.O.P. et D.D.A.S.S., 1982. Contrôle sanitaire de la qualité des eaux de baignade en mer. Bilan des résultats obtenus de 1976 à 1982. Département des Bouches-du-Rhône, 15 pp.
- C.E.R.B.O.M., 1974a. (Centre d'Etudes et de Recherches de Biologie et d'Océanographie Médicale). Etude des conséquences écologiques du rejet d'eaux douces de la Durance dans l'étang de Berre par l'usine hydroélectrique E.D.F. de St Chamas - Protocole et devis. (non publié), 4 pp.

- C.E.R.B.O.M., 1974b. Rapport bibliographique sur les conséquences écologiques du rejet des eaux de la Durance dans l'étang de Berre par l'usine hydro-électrique E.D.F. de St Chamas. Mission n° 251.
- CHEVALLIER A., 1917. L'étang de Berre. Ann. Inst. océanogr., 7 (4): 1-91.
- DELMAS D., 1979. La matière organique des sédiments de l'étang de Berre: étude de la minéralisation et des échanges ioniques à l'interface eau-sédiment Rapp. P.v. Comm. int. Mer Médit., 25/26 (6): 13-14.
- E.D.F., 1963a (Electricité De France) Rapport n° 2: description du modèle - étude des données naturelles - première phase d'étalonnage. Centre de Recherches et d'Essais de Chatou.
- E.D.F., 1963b. Rapport n° 3: complément de l'étalonnage. Ibid.
- E.D.F., 1964. Rapport n° 4: résultats des essais de Chatou. Ibid.
- E.P.A.R.E.B., 1981. (Etablissement Public d'Aménagement des Rives de l'Etang de Berre). Etude d'impact sur le milieu naturel du rejet des effluents de la station d'épuration intercommunale de Miramas - St Chamas.
- FAUROUX G., 1981. Le délimonage des eaux de la Durance dans le bassin de Cadarache. Service Etudes et travaux E.D.F. - G.R.P.H. Méditerranée, Marseille, 12 pp.
- FEBVRE J., 1968. Etude bionomique des substrats meubles de l'étang de Berre. Rec. Trav. Sta. mar. Endoume, 44: 297-355.
- FEBVRE J., MARS P., 1965. Données nouvelles sur l'hydrologie de l'étang de Berre Rec. Trav. Sta. mar. Endoume, 41: 17-21.
- FURNESTIN J., 1948. Observations sur le sprat (Clupeus sprattus L.) des côtes méridionales de France. Rev. Trav. Off. sci. Pêches maritimes, 16 (1-4): n° 53-56 : 38-39.
- GOURRET P., 1897. Les étangs saumâtres du midi de la France et leurs pêcheries. Ann. Mus. Hist. nat. marseille, 5: 1-383.
- GOURRET P., 1902. Topographie et flore de l'étang de Berre et de ses dépendances, courants, densité, végétation, profondeur, distribution et rôle des algues et des Nayadacées. C.R. Ass. franç. Av. Sci., 30 (2): 993-1013.
- GOURRET P., 1907. Topographie zoologique des étangs de Caronte, de Labillon, de Berre et de Bolmon. Flore, faune, migrations, etc. Ann. Mus. Hist. nat. Marseille, 11: 8-166.
- HEUZEL M., 1974. Courantologie Fos-Berre, campagne de mesures in situ. Rapport E.D.F., 59 pp.
- KERAMBRUN P., 1970. Remplacement de Sphaeroma serratum par S. hookeri dans l'étang de Berre par suite de la dessalure. Mar. Biol., 6 (2): 128-134.

- KERAMBRUN P., SZEKIELDA K.H., 1969. Dosage simultané du carbone, de l'hydrogène et de l'azote dans le matériel en suspension dans l'eau de mer. Note technique. *Téthys*, 1 (3): 581-584.
- KIENER A., 1969. Premières données relatives à l'évolution hydrobiologique de l'étang de Berre avec la mise en service du nouveau canal de la Durance: branche de Mallemort-St Chamas. *Rapp. Comm. int. Mer Médit.*, 19 (5): 859.
- KIENER A., LONGUEMARE R., 1967. Evolution de l'étang de Berre en fonction des grands travaux d'équipement de l'Electricité De France sur la Durance. *La Houille Blanche*, 5: 507-513
- KIENER A., LONGUEMARE R., 1968. 1967, une année très particulière pour l'évolution de l'étang de Berre. *Ibid.*, 8: 725-735.
- KIM KI-TAI, 1981. Le phytoplancton de l'étang de Berre. Composition spécifique, biomasse et production; relation avec les facteurs hydrologiques, les cours d'eau afférents et le milieu marin voisin (Méditerranée Nord-occidentale). Doctorat ès Sciences, Univ. Aix-Marseille II, 2 tomes.
- LEFEBVRE J., BESLIN M., de CARMANTRAND B., AVRARD M., HUYNH P., 1976. La qualité de l'eau en tant que facteur d'environnement. Effets sur la conception et la disposition de quelques ouvrages. XIIe Congrès des Grands Barrages, Mexico : 877-898.
- LEPETIT J.P., MOREAU S., 1977. Hydraulique du système étang de Berre - canal de Caronte - golfe de Fos. Rapport E.D.F./ S.P.P.P.I, 22 pp.
- MARION A.F., 1887. Etude des étangs saumâtres de Berre (Bouches du Rhône), faune ichthyologique. *C.R. Acad. Sci.*, 104: 1306-1308.
- MARS P., 1948. Contribution à l'étude de l'évolution d'un étang méditerranéen. Malacologie de l'étang de Berre. *Ann. Biol.*, 5: 48.
- MARS P., 1949a. Contribution à l'étude biologique des étangs méditerranéens. Quelques aspects de l'évolution de l'étang de Berre. *Bull. Soc. Linn. Provence*, 17: 8-16.
- MARS P., 1949b. Contribution à l'étude biologique des étangs méditerranéens. Faune malacologique de l'étang de Berre. *Bull. Mus. Hist. nat. Marseille*, 9: 65-116.
- MARS P., 1961. Recherches sur quelques étangs du littoral méditerranéen français et sur leur faune malacologique. Doctorat ès Sciences, Univ. Paris, 270 pp.
- M.I.A.F.E.B., 1974. (Mission Interministérielle d'Aménagement de la zone Fos - Etang de Berre). Etang de Vaïne, étude du milieu, vocation des zones littorales. Rapport non publié
- M.I.A.F.E.B., 1975. Etang de Berre - Etat du milieu, recueil de cartes. Rapport n° 26/75, 17 pp (non publié)

La M.I.A.F.E.B. a été dissoute en 1975, la M.I.D.A.M. a été déchargée de l'étude de Berre. Ces documents ont été archivés par la Cellule Antipollution du Service Maritime des Ponts et Chaussées des Bouches du Rhône.

- M.I.D.A.M., 1977 (Mission Interministérielle d'Aménagement). Etang de Berre - plan de sauvetage. Rapport n° 7/77, 31 pp (non publié).
- MINAS H.J., 1961. Quelques données hydrologiques sur l'étang de Berre. Rec. Trav. Sta. mar. Endoume, 23 (37): 5-17.
- MINAS M., 1964. Etude de la répartition de quelques facteurs géochimiques dans les sédiments de l'étang de Berre. Rec. Trav. Sta. mar. Endoume, 32 (48): 5-57.
- MINAS M., 1965. Aperçu hydrologique préliminaire sur l'étang de Berre. Rec. Trav. Sta. mar. Endoume, 37 (53): 3-9.
- MINAS M., 1968. Quelques données hydrobiologiques sur l'étang de Berre durant la période post-estivale. Rec. Trav. Sta. mar. Endoume, 44 (60): 5-12.
- MINAS M., 1970. Résultats d'observations hydrologiques sur l'étang de Berre, années 1965, 1966, 1967. Modification du régime hydrologique par suite du déversement des eaux apportées par le canal de la Durance. Cah. océanogr. 22 (1): 73-88.
- MINAS M., 1972a. Analyse de l'évolution des conditions hydrobiologiques de l'étang de Berre au cours de cinq missions échelonnées entre le 26 septembre et le 4 novembre 1972. Rapport non publié, 27 pp.
- MINAS M., 1972b. Situation présente et évolution hydrologique et hydrobiologique de l'étang de Berre depuis la fin du XIXe siècle. rapport non publié, 55 pp.
- MINAS M., 1973. Sur la synthèse et la dégradation de la matière organique dans l'écosystème de l'étang de Berre - Dynamique et bilans - Rapports avec le régime hydrologique. Doctorat ès Sciences, Univ. Aix-Marseille II, 339 pp.
- MINAS M., 1974a. Distribution, circulation et évolution des éléments nutritifs en particulier du phosphore minéral, dans l'étang de Berre. Int. Revue ges. Hydrobiol., 59 (4): 509-542.
- MINAS M., 1974b. Eutrophisation et apparition de conditions anoxiques dans un étang saumâtre méditerranéen (étang de Berre) en relation avec un déversement massif d'eau douce (dérivation des eaux de la Durance). Rapp. Comm. int. Mer Médit., 22 (6): 45-46.
- MINAS M., 1975a. Suivi de l'étude sur les eaux de l'étang de Berre au cours de l'année 1975. Aspects hydrochimiques et hydrobiologiques. Relations avec les phénomènes météorologiques (vents). Rapport non publié, 37 pp.
- MINAS M., 1975b. Relations entre la production photosynthétique et la pénétration de la lumière dans les eaux de l'étang de Berre, Téthys, 7 (2-3): 131-136 (paru en 1976).
- MINAS M., 1976a. Production organique primaire dans un milieu saumâtre eutrophe (étang de Berre). Effets d'une forte dilution (dérivation des eaux de la Durance). Mar. Biol., 35: 13-29.

- MINAS M., 1976b. Oxygène dissous et saturation dans un milieu de forte production organique (étang de Berre). Rôle d'une halocline sur leur distribution et sur les rapports oxygène-phosphate. Notion de bilan. *Hydrobiologia*, 51 (2): 149-162.
- MINAS M., 1977a. Suivi de l'étude sur les eaux de l'étang de Berre, septembre 1977. Rapport non publié, 7 pp.
- MINAS M., 1977b. Aspect particulier de l'eutrophisation liée à l'action des vents dans l'étang de Berre. *Rapp. Comm. int. Mer Médit.*, 24 (6): 73-74.
- MINAS M., BONIN M.C., COSTE B., DAVID P., MINAS H.J., 1976. Caractère particulier du mécanisme de l'eutrophisation dans l'étang de Berre. *Ann. Inst. océanogr.* 52 (2): 153-164.
- NISBET M., PETIT G., SCHACHTER D., 1958. Caractères chimiques de quelques étangs méditerranéens. Considérations sur la classification des eaux saumâtres (note préliminaire). *Verh. internat. Ver. Limnol.*, 13: 672-675.
- NISBET M., SCHACHTER D., 1961. Contribution à l'étude écologique des étangs méditerranéens. Constituants chimiques des eaux de quelques étangs littoraux. *Bull. Inst. océanogr.*, 1207: 45 pp.
- PERES J.M. et al., 1981. Cartographie dynamique de milieux marins littoraux soumis à des pollutions telluriques et à des aménagements par l'homme. Rapport non publié, LA 41
- PETIT G., SCHACHTER D., 1959. Les étangs et lagunes du littoral méditerranéen français et le problème de la classification des eaux saumâtres. *Arch. océanogr. Limnol.*, 11 (suppl.): 75-92.
- RIOUALL R., 1972. Contribution à l'étude de la flore des étangs de Berre et de Vaïne (Bouches du Rhône). Doctorat ès Sciences, Univ. Aix-Marseille II, 528 pp.
- R.N.O., 1978 (Réseau National d'Observation) Etang de Berre, point d'appui n° 13. Bulletin trimestriel R.N.O./C.N.E.X.O.
- SCHACHTER D., 1954. Contribution à l'étude hydrographique et hydrologique de l'étang de Berre (Bouches du Rhône). *Bull. Inst. océanogr. Monaco*, 51 (1048): 1-20.
- SCHULL A., 1974. Déversement dans l'étang de Berre des eaux dérivées de la Durance par E.D.F. - Bassin de délimonage de St Chamas. Rapport non publié, E.D.F./ Conseil Régional des Bouches du Rhône, 14 pp.
- SOUZA LIMA Y., 1979. Influence des rejets d'eau douce sur la couche ultrasupérieure de l'étang de Berre. *Rapp. Comm. int. Mer Médit.*, 25-26 (6): 15-16.
- S.P.P.P.I., 1977 (Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles). Bulletin d'information n° 3

S.P.P.P.I., 1979. Etude de l'état de pollution des eaux de l'étang de Berre
et du golfe de Fos. Rapport Faculté de Pharmacie, Univ. Aix-Marseille II
77 pp et 3 annexes.

VILLENEUVE C., 1825. Statistique du département des Bouches du Rhône.

Bibliographie de l'Etang de Berre

1. ARNOUX A, STORA G, 1979. Distribution de quelques altéragènes présents dans l'étang de Berre : leur influence sur la répartition de la macrofaune benthique. Rapp. Com. Int. Mer Medit. 25/26 : 149-150.
- 1 Bis. BELLAN G, 1972. Effects of an artificial stream on marine communities. Mar. Poll. Bull. 3 (5) : 74-77.
2. BELLAN G et STORA G, 1976. Effets et conséquences d'un apport artificiel d'eaux douces sur les peuplements benthiques d'un étang marin. III° Journées d'Etude Pollutions : 147-152. Split CIESM.
3. BRAUD J.P., 1972. Etude de la fixation et de la concentration des insecticides organochlorés par les algues pluricellulaires de l'étang de Berre. Téthys 4 (1) : 41-50.
4. CATSIKI A, 1980. Contribution à l'étude de la contamination des peuplements benthiques de l'étang de Berre par les métaux (Mercure, Cuivre, Zinc, Plomb). Thèse 3ème Cycle Univ. Aix-Marseille II, 181 p.
5. CHEVALIER M A, 1916. L'étang de Berre. Ann. Inst. Oceano. Paris 7 (4) : 1-85.
6. EMIG C, 1966. Anatomie et écologie de Phoronis psammophila Cori. Golfe de Marseille et environs, étang de Berre. Rec. Trav. Sta. mar. Endoume, 56(Bull 40): 161-248.
7. FEBVRE J, 1966. Aperçu sur les peuplements benthiques de l'étang de Berre. Rec. Trav. Sta. mar. Endoume, 57(Bull 41): 123-133.
8. FEBVRE J, 1968. Etude Bionomique des substrats meubles de l'étang de Berre. Rec. Trav. Sta. mar. Endoume, 60 (Bull.44) : pp. 298-355.
9. FEBVRE J, 1969. Observations écologiques et morphologiques sur les Glycères de l'étang de Berre. Rec. Trav. Sta. mar. Endoume 61 (Bull. 45) : 317-320.
10. GOURRET P, 1901. Sur la faune carcinologique de l'étang de Berre. C.R. Ass. franç. Avanc. Sci. 29 (2) : 735-740.
11. GOURRET P, 1902. Topographie et flore de l'étang de Berre et ses dépendances, courants, densités, végétations, profondeur, distribution et rôle des algues et des Naiadacées. C.R. Assoc. franç. Avanc. Sci. 30 (2) : 993-1013.

12. GOURRET P, 1907. Topographie zoologique des étangs de Caronte, de Labillon, de Berre et de Bolmon. Flore, Faune, migrations, etc ... Ann. Mus. Hist. Nat. Marseille, 11 : 1-166.
13. HUVE H, 1960. Sur l'envahissement récent d'une portion de l'étang de Berre (étang de Vaïne) par une espèce du genre Spermotherisma. Rapp. Comm. int. Expl. Mer Médit. 15 (2) : 141-145.
14. HUVE P, HUVE H, 1954. Zonation superficielle des côtes rocheuses de l'étang de Berre et comparaison avec celles des côtes du golfe de Marseille (de Carry à Sausset). Vie et Milieu, 5 (3) : 330-351.
15. HUVE P, KIENER A, RIOUALL R, 1973. Modifications de la flore et des populations ichthyologiques des étangs de Berre et de Vaïne (BdR) en fonction des conditions hydrologiques créées par le déversement de la Durance. Bull. Mus. Hist. Nat. Marseille, 33 : 123-134.
16. KERAMBRUN P, 1970. Remplacement de Sphaeroma serratum par S. hookeri dans l'étang de Berre, par suite de sa dessalure. Mar. Biol., 6 (2) : 128-134.
17. KERAMBRUN P, SZEKIELDA K, 1969. Influence des modifications hydrologiques sur le peuplement de Sphaeroma dans l'étang de Berre. Cah. Biol. mar. 10 : 301-308.
- 17 b. KIENER A, LONGUEMARE R, 1967. Evolution de l'étang de Berre en fonction des grands travaux d'équipement de l'électricité de France sur la Durance. La Houille Blanche, 5 : 507-513.
18. MARION A.F., 1887. Etude des étangs saumâtres de Berre (BdR). Faune ichthyologique. C.R. Acad. Sci. Paris, 104 : 1306-1308.
19. MARION A.F., 1887. Faune malacologique de l'étang de Berre. C.R. Acad. Sci. Paris, 105 : 71-73.
20. MARION A.F., 1897. Port de Bouc, étangs de Caronte, de Berre et de Bolmon. Ann. Mus. Hist. Nat. Marseille, 5 (1) : 209-215.
21. MARS P, 1949. Quelques aspects de l'évolution de l'étang de Berre. Bull. Soc. Linn. Provence, 12 : 8-16.
22. MARS P, 1950. Note sur les sédiments quaternaires de l'étang de Berre et leur faune malacologique. Bull. Mus. Hist. Nat. Marseille, 1948, 8 (2-3): 94-100.
23. MARS P, 1960. Modifications récentes de la faune malacologique de l'étang de Berre (Pélécy-podes, Prosob, Opisthobranches). Rapp. P.V. Comm. int. Expl. sci. Médit, 15 (3) : 151-152.

24. MARS P, 1966. Recherches sur quelques étangs du littoral méditerranéen français et sur leurs faunes malacologiques. Vie et Milieu, suppl. 20 : 1-359.
25. MASSE H, 1971. Etude quantitative d'un peuplement de sables fins infra-littoraux de l'étang de Berre. Evaluation de la production de quelques espèces. Vie et Milieu, suppl. 22 : 329-346.
26. PETIT G, SCHACHTER, D, 1955. Notes sur l'étang de Berre et sa faune ichthyologique. Bull. Inst. Oceano. Monaco, 1053 : 1-9.
27. RIOUALL R, 1971. Inventaire floristique des étangs de Berre et Vaïne (années 1970-71). Ann. Soc. Sci. nat. Archéol. Toulon & Var, 23 : 153-160.
28. RIOUALL R, 1972. A propos des Entéromorphes des étangs de Berre et de Vaïne. Bull. Mus. Hist. Nat. Marseille, 32 : 153-160.
29. RIOUALL R, 1972. Contribution à l'étude de la flore de l'étang de Berre et de Vaïne (Bouches-du-Rhône). Thèse 3ème Cycle Univ. Aix-Marseille II. 528 pp.
30. STORA G, 1976. Etude des peuplements benthiques de substrats meubles de l'étang de Berre. Acta ecologica iranica, 1 : 51-67, fig. 13.
31. STORA G, 1976. Evolution des peuplements benthiques d'un étang marin soumis à un effluent d'eaux douces. Bull. Ecol. 7 (3) : 275-281.
32. STORA G, et ARNOUX A, 1983. Influence of several alteragenous factors on the assesment and composition of the benthic communities of a brackish mediterranean lagoon. Estuaries, 6 (2) : 115-125.
33. STORA G, 1982. Recherches de bionomie descriptive et expérimentale (in vivo et in vitro) dans quelques biotopes littoraux soumis à des variations naturelles ou artificielles des conditions du milieu (notamment dans l'étang de Berre et le golfe de Fos). Thèse Doctorat d'Etat, Univ. Aix-Marseille II, Tomes I et II : 197 pp.

ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES (DÉZÈVE)

- CHEVALLIER A. 1916 L'étang de Berre. Ann. Inst. Oceanog., 7 (4) : 1-91
- Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A.) FOULQUIER L., GRAUBY A. 1972 Enquête sur l'importance économique de la pêche des anguilles dans l'étang de Berre.
- DUCLERC J. 1977 Etang de Berre et son exploitation . Equipe d'étude prospective des milieux littoraux et lagunaires. I.S.T.P.M. Sète.
- FAUCHER C., BERNARD A. 1975 La pêche, le commerce et l'élevage de l'anguille en France. Mémoire. Salle de gestion. Fac. Droit, Montpellier.
- GOURRET P. 1897 Les étangs saumâtres du Midi de la France et leurs pêcheries. Ann. Mus. Hist. Nat. Marseille, 5 : 1-383.
- HAON J.Louis 1979 L'exploitation de l'anguille en Bas Languedoc. Thèse Univ. Paul Valéry, Montpellier : 263 p.
- LAMARQUE 1972 Nature des problèmes biologiques posés par l'exploitation rationnelle des anguilles et des loups des régions "Languedoc-Roussillon" et "Provence-Côte d'Azur". I.N.R.A. Station Biologique de Biarritz.
- LECOMTE-FININGER R. 1978 Contribution à l'étude biologique et écologique des civelles (*A. anguilla*) entrant dans un étang méditerranéen. Thèse 3ème cycle, Univ.Paris VI : 66 p.
- LECOMTE-FININGER R., RAZOULS C. 1981 Influence des facteurs hydrologiques et météorologiques sur la migration anadrome des civelles dans le Golfe du Lion. Cahiers du laboratoire de Montereau, 12 : 13-16.
- MARFIN J.P. 1981 Biologie de l'atherine : *Atherina boyeri* dans trois milieux saumâtres du Roussillon. Thèse 3ème cycle, Univ. de Perpignan, Lab. Biologie Marine.
- MARION A.F. 1887 Etude des étangs saumâtres de Berre. Faune ichthyologique. C.R. Acad. Sci. 104 : 1306-1308.
- SPPPI 1977 Evolution de la pêche dans l'étang de Berre et le Golfe de Fos. CAMPIANO D. (Prud'homme pêcheur de l'étang de Berre).
- SPPPI 1980 Evolution de la pêche dans l'étang de Berre et le golfe de Fos. CAMPIANO D. (Prud'homme pêcheur de l'étang de Berre).