

# ÉTUDE SUR MODÈLE RÉDUIT DES CONSÉQUENCES DU DÉVERSEMENT DANS L'ÉTANG DE BERRE D'UN DÉBIT D'EAU DOUCE DÉTOURNÉ DE LA DURANCE

PAR  
**A. DAUBERT \* et P. BRACONNOT \***

## Introduction

L'aménagement de la basse Durance par la Région d'équipement hydraulique Alpes III d'Electricité de France comporte la construction d'une usine hydro-électrique à Saint-Chamas sur l'étang de Berre. Cette usine turbinera une partie importante des eaux de la Durance qui, détournée de son cours actuel vers le Rhône, viendra se déverser dans l'étang de Berre (fig. 1). Le débit moyen annuel de fonctionnement de l'usine sera de l'ordre de  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , il sera très inégalement réparti en cours d'année : les mois d'été, l'usine ne fonctionne pratiquement pas.

Le Laboratoire National d'Hydraulique a réalisé une étude sur modèle réduit des conséquences de cet apport d'eau douce dans l'étang de Berre.

## Possibilités d'étude sur modèle réduit

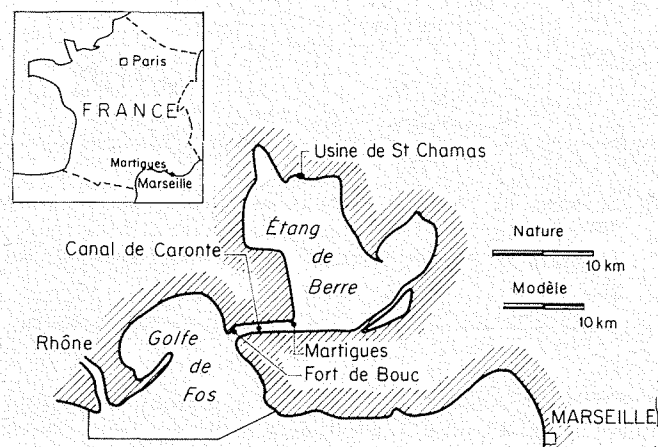
### 1° LES PHÉNOMÈNES A REPRODUIRE.

Ils sont caractérisés essentiellement par des variations de niveau de la surface libre (marée), un

régime de courants dans le canal de Caronte et des répartitions de salinité.

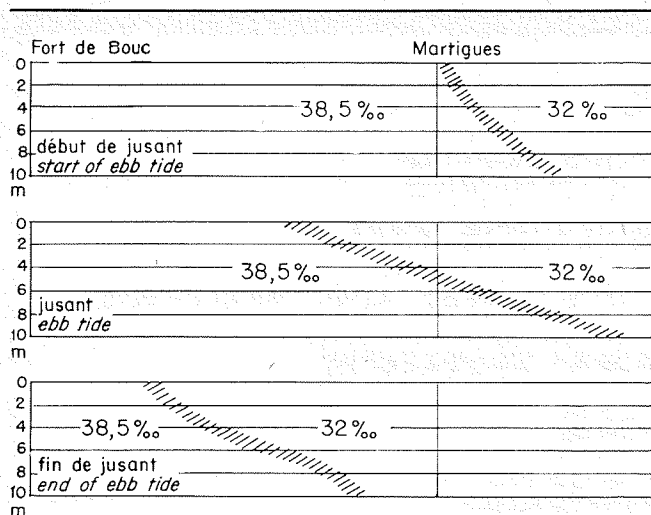
#### a) Dans l'état actuel.

La salinité de l'étang de Berre est sensiblement homogène et constante de l'ordre de 30 ‰ (les fluctuations en cours d'année sont de l'ordre de 2 à 3 ‰). La salinité de la Méditerranée dans le golfe de Fos est de 38,5 ‰. Dans l'étang s'établit un équilibre : les apports naturels d'eau douce par l'Arc, la Touloubre, les réseaux d'irrigation et les précipitations sont compensés par l'évaporation et les apports d'eau de mer par le canal de Caronte sous



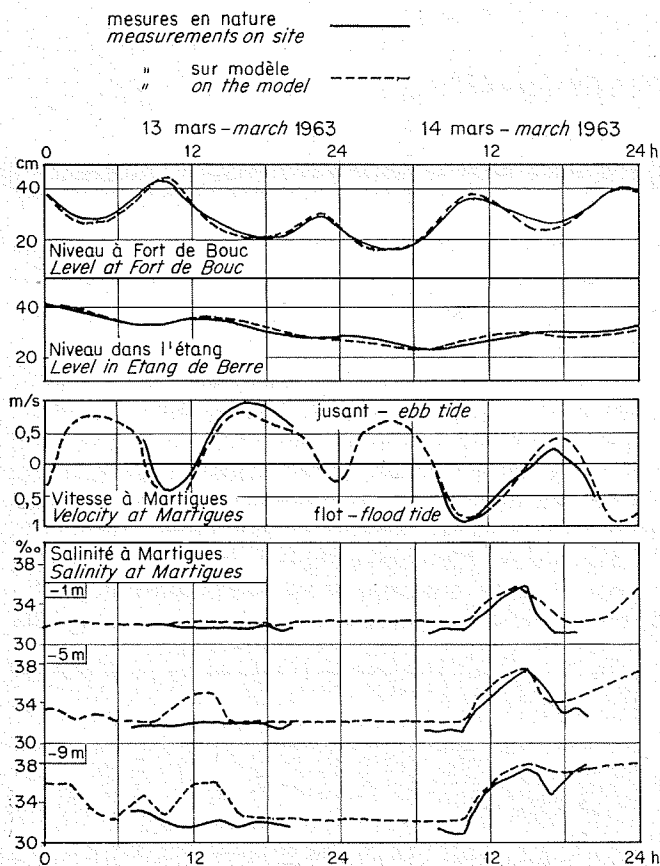
1/ Plan de situation.  
Site plan.

\* Ingénieurs à E.D.F. (C.R.E.C.), Chatou.



2/ Positions de l'interface relevées en nature à trois moments de la marée (juin 1962).

Interface positions observed on site at three different moments during the tide (June 1962).



3/ Exemple de résultats obtenus pendant l'étalonnage du modèle.

Example of results obtained during calibration of the model.

l'action de la marée. La salinité de l'étang est homogène. Il existe donc un mélange suffisant pour assurer et maintenir cette homogénéité.

Le régime de l'écoulement dans le canal de Caronte est commandé par la marée : les débits de flot et jusant peuvent atteindre 600 m<sup>3</sup>/s : ils sont

modifiés, comme la marée elle-même, par les variations importantes du niveau moyen dans le golfe de Fos et dans l'étang, dues aux conditions météorologiques.

La limite entre l'eau de mer salée à 38,5 ‰ et l'eau d'étang moins salée, constitue dans le canal de Caronte une interface (coin salé) qui, sous l'action de la marée, se déplace le long du canal avec une pente plus ou moins forte (fig. 2). Cette interface est très nette (environ 1 m d'épaisseur); il ne se produit donc pratiquement aucun mélange des eaux dans le canal.

b) Après la mise en route de l'usine de Saint-Chamas.

L'apport d'eau douce qui va en résulter modifiera l'état d'équilibre actuel.

La répartition des salinités dans l'étang dépendra essentiellement des possibilités de mélange : l'eau douce peut ou s'écouler en surface jusqu'au canal et être évacuée vers la mer, ou se mélanger à l'eau de l'étang en abaissant sa salinité, la zone de mélange étant plus ou moins grande au voisinage du rejet de l'usine.

Le régime de l'écoulement dans le canal sera modifié par la nécessité d'évacuer le débit de fonctionnement de l'usine et par l'augmentation de la différence des masses spécifiques des eaux en présence.

Les phénomènes à reproduire peuvent donc être classés en deux types différents : d'une part, des phénomènes de mélange, surtout dans l'étang, mais aussi à la limite entre l'eau de mer et l'eau de l'étang dans le canal de Caronte; d'autre part, des phénomènes de convection, essentiellement situés dans le canal de Caronte. C'est surtout sur ces derniers qu'a porté l'étude qui a été faite au Laboratoire.

2° LES CONDITIONS DE SIMILITUDE.

a) Les phénomènes de mélange.

Ils présentent de réelles difficultés de similitude. Sur le modèle, ces difficultés ont été tournées en réalisant différents essais correspondant à différentes possibilités de mélange dans l'étang : absence totale de mélange ou remplissage de l'étang à des salinités moindres correspondant à un mélange parfait.

b) Les phénomènes de convection.

L'écoulement dans le canal est caractérisé par l'existence d'une interface bien marquée entre l'eau de mer et l'eau moins salée. Il y a donc lieu de chercher à reproduire correctement un tel type d'écoulement stratifié.

De tels écoulements stratifiés font intervenir comme paramètres indépendants adimensionnels un nombre de Reynolds et un nombre de Froude en gravité réduite (où  $g$  l'accélération due à la pesanteur est remplacée par le produit  $[(\rho - \rho_0)/\rho_0] g$ ;  $\rho$  et  $\rho_0$  étant les masses spécifiques des fluides en présence). Ces écoulements seront correctement reproduits par une similitude de Froude conservant le nombre de Froude réduit, à condition que le nombre de Reynolds ne soit pas trop diminué et à condition que les phénomènes dus à l'interface ne

soient pas trop modifiés : en extrapolant les résultats obtenus par Lofquist en canal, on montre que le frottement à l'interface est correctement reproduit, à condition de distordre le modèle. Il se trouve qu'alors la reproduction des mélanges à l'interface est améliorée.

## Le modèle réduit

### 1° DESCRIPTION.

Les échelles du modèle sont : 1/750 en plan, 1/100 en hauteur, 1/1 pour les masses spécifiques. L'échelle des temps étant 1/75, la marée semi-diurne dure 10 mn; l'échelle des vitesses de courants horizontales est 1/10, celle des débits 1/750 000.

Le modèle reproduit l'étang de Berre, le canal de Caronte et le golfe de Fos, du grand Rhône à l'ouest à la Pointe de Carro à l'est; la limite au large correspond aux fonds de 50 m environ.

Il est équipé d'un générateur de marée pneumatique permettant la réalisation de faibles marnages (1,5 mm en moyenne), commandé par un lecteur de came optique permettant la reproduction de n'importe quelle loi de marée.

L'appareillage de mesure est constitué de marégraphes à pointe vibrante, de micromoulinets et de ponts de mesure de conductivité pour la détermination de la salinité.

### 2° LES CONDITIONS D'EXPLOITATION.

#### a) La salinité.

L'écoulement est influencé par les différences de masse spécifique qui en nature dépendent à la fois de la température et de la salinité. Sur le modèle, où l'on n'est pas maître de la température, il a fallu se contenter de régler les salinités de façon à reproduire correctement les masses spécifiques.

#### b) Conditions aux limites en salinité.

Le modèle fonctionnant avec une quantité limitée d'eau, il est nécessaire, lorsque l'usine de Saint-Chamas fonctionne, d'évacuer à la limite maritime du modèle le débit d'apport d'eau douce. Cette évacuation ne pouvant se faire qu'en eau salée, il faut apporter du sel au modèle, sinon la quantité totale de sel dissous dans le modèle va diminuer jusqu'à ce que l'eau évacuée soit douce. La quantité de sel à apporter est difficile à déterminer : il faut éviter que le modèle ne se dessale complètement, mais il ne faut pas non plus empêcher l'évolution de la salinité de l'étang.

La condition idéale serait évidemment la reproduction exacte des échanges qui existeront à travers la limite maritime du modèle.

Pour tourner cette difficulté, on a supposé que dans le golfe de Fos les surfaces isohalines ne sont pas tout à fait verticales (c'est-à-dire que le mélange des eaux n'est pas tout à fait parfait) ce qui permet de réaliser un soutirage de l'eau de surface légèrement moins salée avec un débit bien plus grand que le débit de l'usine à évacuer et de compenser près du fond cet excès d'aspiration par un apport d'eau de salinité égale à celle de la mer.

## Les résultats

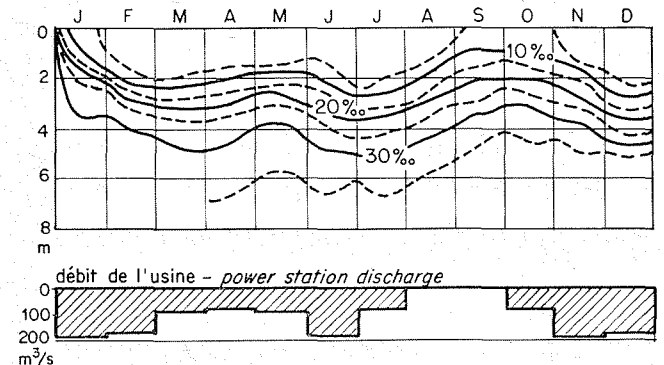
### 1° ETALONNAGE.

Les mesures en nature ont concerné essentiellement le canal de Caronte. La vérification du modèle fut faite à partir de ces mesures et un bon accord put être obtenu, ce que nous avons expliqué plus haut par l'aspect « convectif » du phénomène. Il n'y eut pas de mesures permettant l'étalonnage du phénomène de mélange dans l'étang, les rares crues de l'Arc étant difficiles à suivre, très courtes en durée et d'un débit faible devant celui qui sera rejeté à Saint-Chamas.

La figure 3 donne des exemples des résultats obtenus en niveau de marée, répartition des vitesses et des salinités.

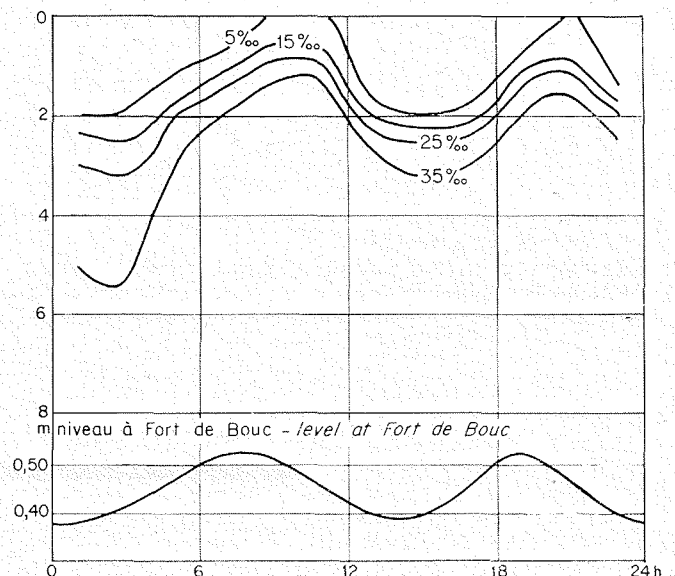
### 2° RÉSULTATS DES ESSAIS.

Partant des conditions actuelles et faisant fonctionner le rejet de l'usine de Saint-Chamas on obtient une stratification très nette de l'étang sur le modèle (fig. 4). Ce cas correspond à l'absence de mélange important dans l'étang.



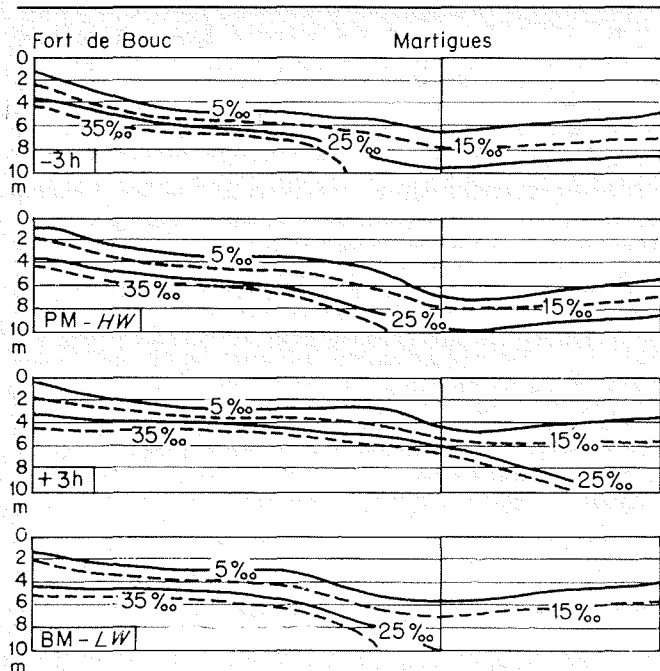
4/ Evolution de la salinité dans l'étang pour la première année de fonctionnement de l'usine de Saint-Chamas (sur le modèle).

Salinity variations in the étang de Berre during the St.-Chamas plant's first year of operation (on the model).



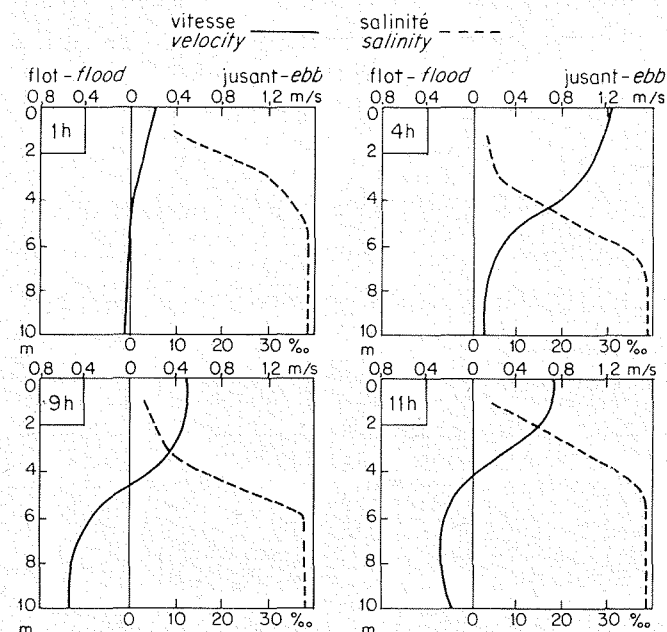
5/ Exemple de variation, sous l'influence de la marée, de la position de l'interface dans une section du canal.

Example of the variation of interface position in a canal section due to tide.



6/ Positions de l'interface dans le canal (débit de l'usine 300 m<sup>3</sup>/s).

Interface positions in the canal (power station discharge 300 cu.m/sec.).



7/ Exemples de répartition verticale de salinité et de vitesse de courant dans le canal.

Examples of vertical salinity and flow velocity distribution in the canal.

Dans le canal, l'écoulement présente une interface en forme de coin salé qui se déplace avec la marée (fig. 5 et 6). La répartition verticale des vitesses est modifiée (fig. 7); on observe à certains moments des courants en surface et au fond de sens contraire. L'existence de ce phénomène est liée à la forme de la marée.

L'écoulement dans le canal présente le même aspect lorsque l'étang, au lieu d'être stratifié, est rempli d'une eau homogène de salinité réduite à 25 ‰ ou 15 ‰. Ces cas correspondent à un mélange parfait dans l'étang.

Il semble que le rôle de ces différences de masse spécifique soit essentiellement de permettre une ségrégation des eaux et que la répartition des vitesses et les caractéristiques de l'interface soient surtout sous la dépendance du régime de courant et du débit net à évacuer.

**Conclusion**

Le modèle réduit dans une similitude de Froude avec une distorsion de 7,5 a permis d'étudier l'influence de la dérivation de la Durance sur les conditions de l'écoulement dans le canal de Caronte. L'évolution de la salinité dans l'étang a pu être étudiée dans le cas où il n'y aurait pas de mélange important : l'étang présente alors une forte stratification stable et dépendant du régime de fonctionnement de l'usine. Les conséquences qu'aurait un mélange important ont été étudiées au cours de différents essais.

La mise en route de l'usine de Saint-Chamas permettra des mesures dans l'étang de Berre; il sera très intéressant de les confronter avec le modèle conservé en état de marche dans ce but.

**Bibliographie**

LOFQUIST. — Flow and stress near an interface between stratified liquids. *The Physics of Fluids*, vol. 3, n° 2 (1960).  
 KEULEGAN. — Progress Reports, *Nat. Bureau of Standard*.  
 IPPEN et HARLEMAN. — Tech. Bull., n° 5, *Committee on tidal hydraulics, Corps of Engineers U.S. Army*.

## Discussion

Président : M. Gougenheim

M. le Président remercie M. BRACONNOT de cette intéressante communication qui révèle une nouvelle utilisation possible et très prometteuse des modèles réduits.

M. LACOMBE est surpris par la valeur élevée de la salinité dans le golf de Fos (38.5).

M. BRACONNOT indique que les mesures ont été faites au densimètre. Il ajoute que l'on n'a pas mesuré la température *in situ*, ce qui laisse par conséquent une certaine imprécision sur la détermination des masses spécifiques, surtout dans le golf de Fos par 50 m de fond. Ailleurs et, en particulier dans le canal de Caronte de 10 m de profondeur, cette imprécision est vraiment négligeable.

M. le Président pense que la précision habituelle en océanographie avait peu d'importance pour le but cherché, qui était d'obtenir des données de départ pour la similitude.

Par contre, il attire l'attention de M. LACOMBE au point de vue océanographique sur la netteté de la frontière entre les deux zones relativement salée et relativement douce, puisqu'on lui attribue une épaisseur de 1 m seulement. M. le Président demande à M. LACOMBE s'il estime possible qu'il existe des frontières aussi minces.

M. LACOMBE répond que l'épaisseur de cette zone frontière qui est de l'ordre du 1/10<sup>e</sup> de la profondeur, est à comparer avec les résultats du même ordre qu'il indiquera tout à l'heure à propos de Gibraltar.

D'autre part, en considérant la courbe de marée « nature », M. LACOMBE souligne la présence d'un point bas, au milieu de la période d'observations, dans la courbe de variation du niveau moyen de l'étang de Berre et l'impression, qu'il avait déjà eue, de l'absence de marée dans cet étang; son niveau instantané concorde avec le niveau moyen journalier à Port de Bouc. Cette concordance pourrait être utilisée pour le choix d'un emplacement pour une station d'enregistrement des niveaux moyens de la Méditerranée.

M. le Président remercie M. LACOMBE de cette intéressante remarque et pense que ce phénomène est dû à l'amortissement des ondes de périodes relativement courtes dans le canal.

M. BLANCHET indique qu'au cours d'études faites par la SO.G.R.E.A.H., il y a quelques années, il était apparu que l'eau du Rhône dessalait la surface du golf de Fos (jusqu'à environ 23 g/l) sur une assez faible épaisseur en surface et l'on avait attribué à ce phénomène une partie du fait que l'eau de l'étang est moins salée, car il reçoit par échange surtout des eaux de surface.

M. BLANCHET demande si le bilan entre évaporation, apport des petites rivières et échange permet d'expliquer la faible salinité sans prendre en compte l'influence du Rhône.

M. BRACONNOT ne pense pas que l'eau du Rhône puisse pénétrer dans l'étang, mais rappelle qu'une augmentation de salinité a été consécutive à l'approfondissement du canal de Caronte, aux alentours de 1930.

M. DAUBERT indique qu'avant les travaux d'approfondissement du canal de Caronte, l'étang de Berre était pratiquement en eau douce et la contribution des petites rivières qui coulent dans cet étang n'était pas négligeable.

M. LONGUEMARE rappelle que les mesures faites par Chevallier en 1916, indiquaient une salure moyenne de 24 %; celle-ci est passée à environ 31 %; vers 1936 à l'achèvement du canal de Caronte. Cela prouverait que l'influence des petits cours d'eau tributaires de l'étang, l'Arc et la Touloubre, reste faible.

Par contre, la dérivation de la Durance dans l'étang de Berre sera à l'échelle géographique de l'étang, car elle atteindra en moyenne 3 milliards et demi de mètres cubes, soit environ quatre fois le volume de l'étang de Berre.

M. ZAOUÏ remarque que le nombre  $F = V^2 / gRh$  est en réalité le « nombre de Boussinesq » lorsqu'on fait intervenir le rayon hydraulique, l'expression « nombre de Froude » étant réservée au cas où intervient seulement la hauteur d'eau.

M. le Président remercie les personnes qui ont pris part à la discussion.