



# OBSERVATIONS ET MESURES EFFECTUÉES SUR LES COINS SALÉS DU GRAND ET DU PETIT RHONE

par **P. SAVEY**

Directeur-adjoint à la Compagnie Nationale du Rhône

**M. POMMIER**

et

**P. MARVAUD**

Chef  
du Service des Etudes  
Générales

Chef de la Division  
Hydraulique, Hydrologie,  
Statistique

à la Compagnie Nationale du Rhône

## I. — Introduction

La Compagnie Nationale du Rhône, concessionnaire de l'aménagement du Rhône de la frontière Suisse à la mer, a besoin, pour le bon accomplissement de sa mission, d'avoir une connaissance précise de l'hydrologie du bassin qu'elle aménage.

C'est pourquoi, depuis une trentaine d'années, elle a mis progressivement sur pied un vaste réseau d'observations qui, associé à de nombreuses campagnes de mesures, a permis d'acquérir une information très détaillée sur le Rhône et ses affluents.

C'est dans le cadre général de ces études que la Compagnie a été amenée à s'intéresser à la remontée d'eau salée dans le Grand et le Petit Rhône.

Le « coin salé » a été décrit par de nombreux auteurs et nous n'avons pas l'intention d'en refaire ici la théorie. Nous nous proposons plus simplement de décrire le dispositif expérimental qui a été mis en œuvre tant sur le Grand Rhône que sur le Petit Rhône et d'exposer les premiers résultats qui ont été obtenus.

## 2. — Dispositifs d'étude du coin salé dans le Grand et le Petit Rhône

Ce dispositif nécessite des moyens importants. Il comprend des installations fixes et des appareils de mesure mobiles.

### 2.1 Les installations fixes.

#### 2.1.1 LES INSTALLATIONS.

Elles comprennent (voir fig. 1) :

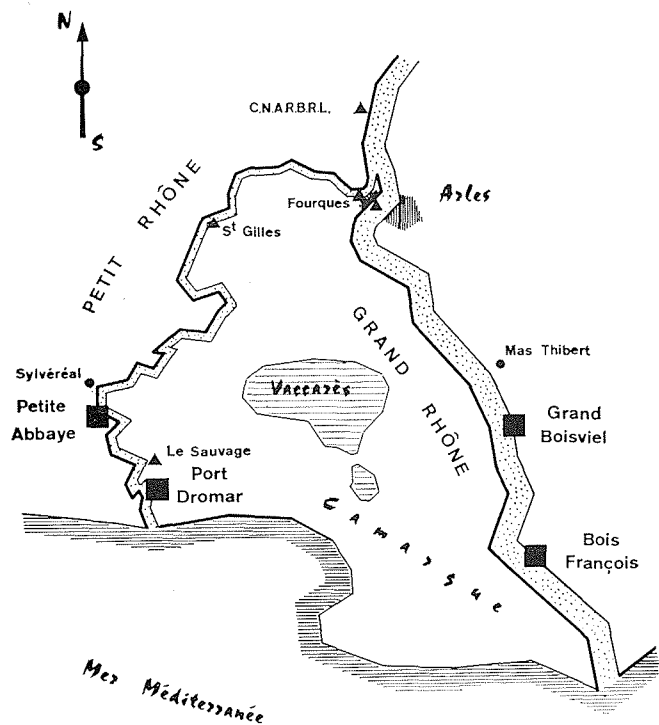
- d'une part cinq limnigraphes de surface classiques ainsi qu'une station de jaugeages sur le Petit Rhône à Fourques;
- d'autre part, quatre ensembles identiques d'étude du coin salé, deux sur le Grand Rhône à Grand-Boisviel (PK 306,5) et à Bois-François (PK 318,1) et deux sur le Petit Rhône à la Petite Abbaye (PK 323,9) et à Port-Dromar (PK 334,0) (\*).

Chacun de ces ensembles est implanté dans le lit du fleuve à une trentaine de mètres de la berge. Il comporte (voir fig. 2) une cabine reposant sur quatre pylônes protégés des corps flottants par une patte d'oie et qui abrite quatre limnigraphes enregistreurs. Un limnigraphe muni d'un flotteur classique sert à mesurer le niveau de la surface libre, les trois autres sont équipés de flotteurs spéciaux en acier, de 46 cm de diamètre et rendus indéformables par un cloisonnement intérieur (voir fig. 4). Ils sont réglés au moyen d'un lest pour se stabiliser chacun au niveau correspondant à une densité bien déterminée. Les densités choisies sont 1,004 - 1,010 et 1,016.

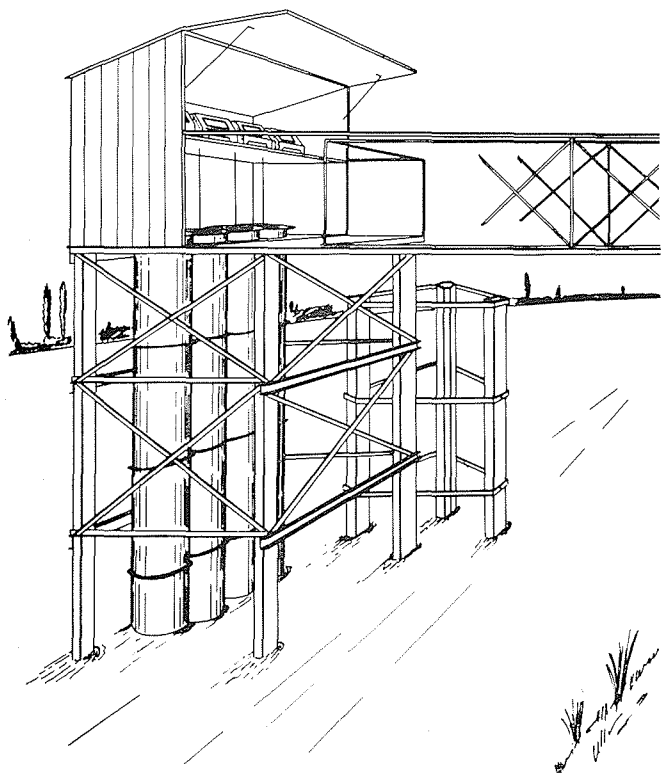
Les flotteurs sont protégés par des tubes d'acier de 60 cm de diamètre. Afin d'assurer le mieux possible l'équi-

(\*) Les points kilométriques (PK) de la mer sont respectivement sur le grand Rhône et le petit Rhône : 331 et 337.

- Station fixe d'observation du coin salé
- ▲ Limnigraphe classique



1/ Situation géographique des installations de mesure.



2/ Installation type pour l'étude du coin salé.

libre de la salinité entre l'intérieur et l'extérieur des tubes, un jeu de 20 mm est aménagé entre les diverses viroles qui les composent (voir fig. 4).

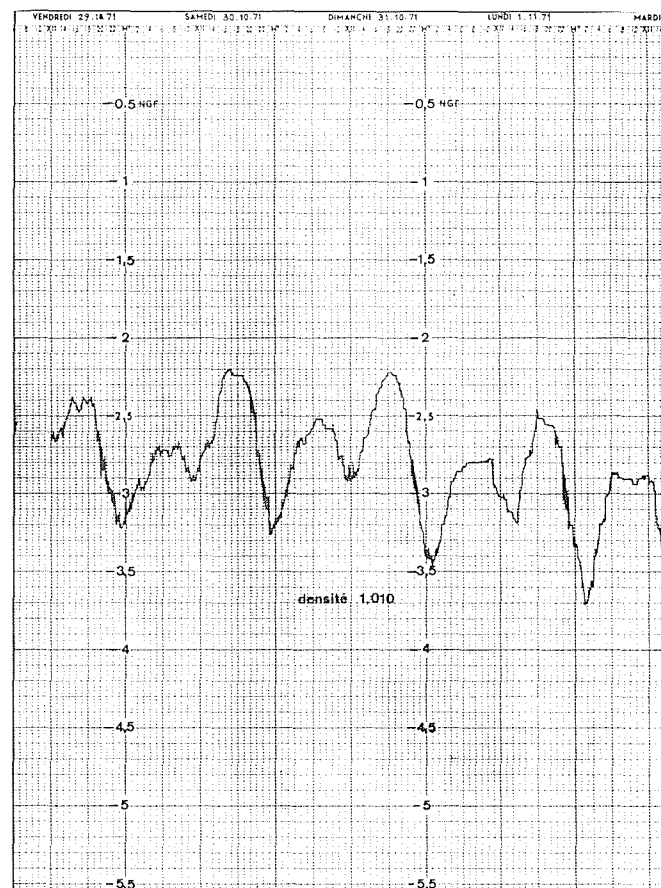
Ces appareils permettent en principe d'obtenir des enregistrements continus en fonction du temps, des niveaux correspondant à la surface libre, et à trois densités différentes.

### 2.1.2 L'EXPLOITATION DES INSTALLATIONS.

Les limnigraphes de surface indépendants ainsi que ceux associés aux installations de mesure de la salinité sont exploités de façon classique et fonctionnent en permanence. Il ne paraît pas utile d'insister à leur sujet.

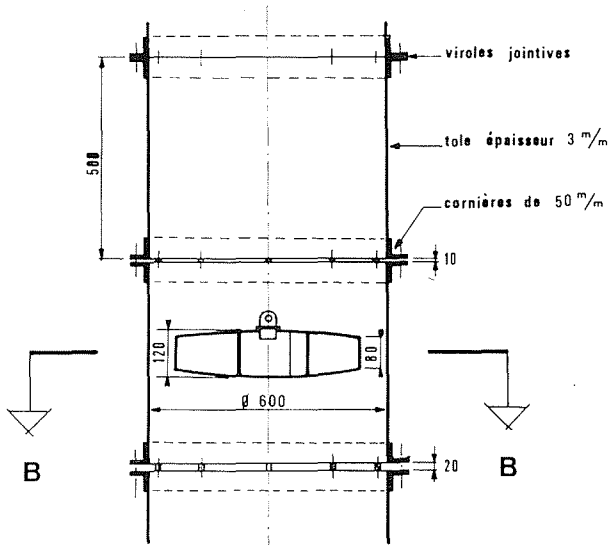
Les limnigraphes de densité sont d'un fonctionnement plus délicat. Ils ne sont mis en marche que lorsque le débit du Rhône descend en dessous de la valeur pour laquelle commence à apparaître le coin salé dans la section considérée. Les appareils sont alors remis en état : les flotteurs sont dégagés du fond de vase sur lequel ils reposent en l'absence du coin salé, nettoyés et vérifiés à l'aide de mesures directes effectuées à l'aide d'un appareil de prélèvement.

Pendant toute la période de fonctionnement de ces appareils, il est nécessaire de procéder à des vérifications fréquentes car l'expérience montre que la face supérieure des flotteurs est très rapidement recouverte d'une mince couche de dépôts limoneux ou vaseux qui peut les faire descendre de dix à quinze centimètres par jour suivant la turbidité du fleuve. Il y a donc lieu de nettoyer les

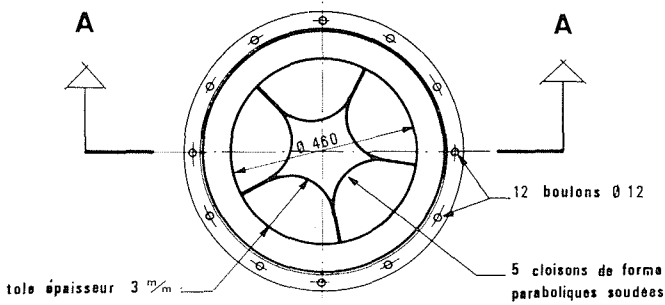


3/ Exemple d'enregistrement dans une installation fixe (Petite Abbaye).

COUPE AA



COUPE BB



4/ Un flotteur d'observation du coin salé et son tube de protection.

flotteurs très régulièrement si l'on veut obtenir des enregistrements corrects; cela se fait d'ailleurs aisément par une simple aspersion d'eau. Il a été constaté qu'une fois nettoyés, les flotteurs se replaçaient bien au niveau théorique correspondant à leur réglage et qu'ils ne se détarèrent donc pas.

A titre de vérification, un certain nombre de mesures de salinité à la bouteille ont été effectuées à l'extérieur des tubes limnigraphiques, elles ont permis de constater que l'équilibre densimétrique entre l'intérieur et l'extérieur des tubes n'était pas toujours parfait. Lors de périodes d'évolution rapide du coin salé, on a pu noter des écarts de 20 à 30 cm entre la cote correspondant à une densité donnée à l'intérieur et à l'extérieur du tube.

Cependant, il ne paraît pas possible de retirer les tubes pour éviter ces décalages, car il y aurait alors de graves difficultés dues au courant et aux corps flottants.

2.2 Les installations mobiles.

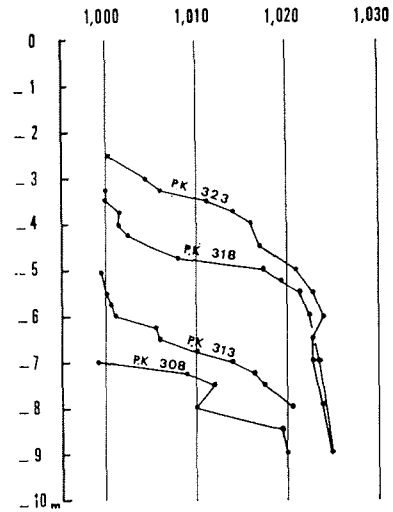
2.2.1 LE SONDEUR A ULTRA-SONS.

La célérité des ondes sonores dans l'eau dépendant de la salinité, il en résulte, pour un certain réglage du sondeur, que lors de la traversée des zones à fort gradient

GRAND RHÔNE

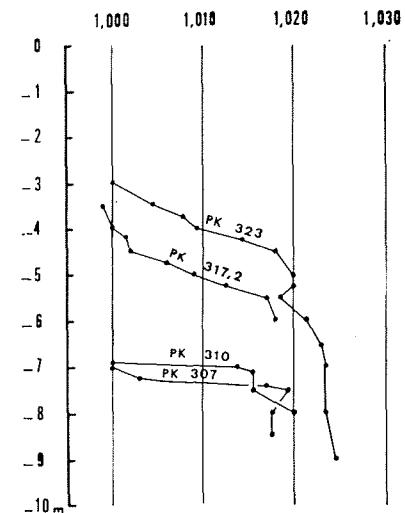
9 OCTOBRE 1967

Q = 730 m<sup>3</sup>/s



13 OCTOBRE 1967

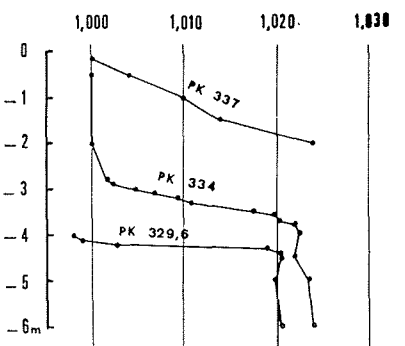
Q = 685 m<sup>3</sup>/s



PETIT RHÔNE

5 JUILLET 1968

Q = 1250 m<sup>3</sup>/s



NOTA -

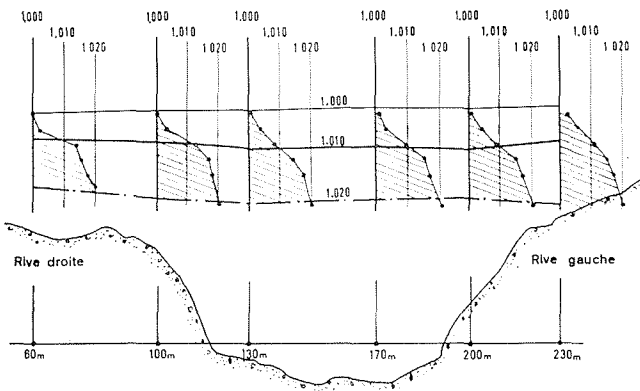
Les profondeurs sont mesurées par rapport au plan d'eau  
Le débit est celui du Rhône à Beaucaire

5/ Profils densimétriques sur des verticales.

Grand Rhône

PK 322  
le 28.9.1971  
0 - 0.00 1/2

Plan d'eau + 0,07 NGF



6/ Profils densimétriques dans une section transversale du fleuve.

de densité, une partie de l'onde se transmet avec réfraction et le reste se réfléchit.

Cette propriété permet d'enregistrer simultanément le fond de la rivière et le niveau de l'interface; il suffit pour cela d'installer sur un bateau un sondeur à ultra-son convenablement réglé.

Lors des périodes où le coin salé est établi, une vedette ou une barque de la Compagnie effectue des descentes ou des remontées du Grand ou du Petit Rhône en suivant le mieux possible le fond du thalweg tel qu'il a été déterminé d'après les profils en travers.

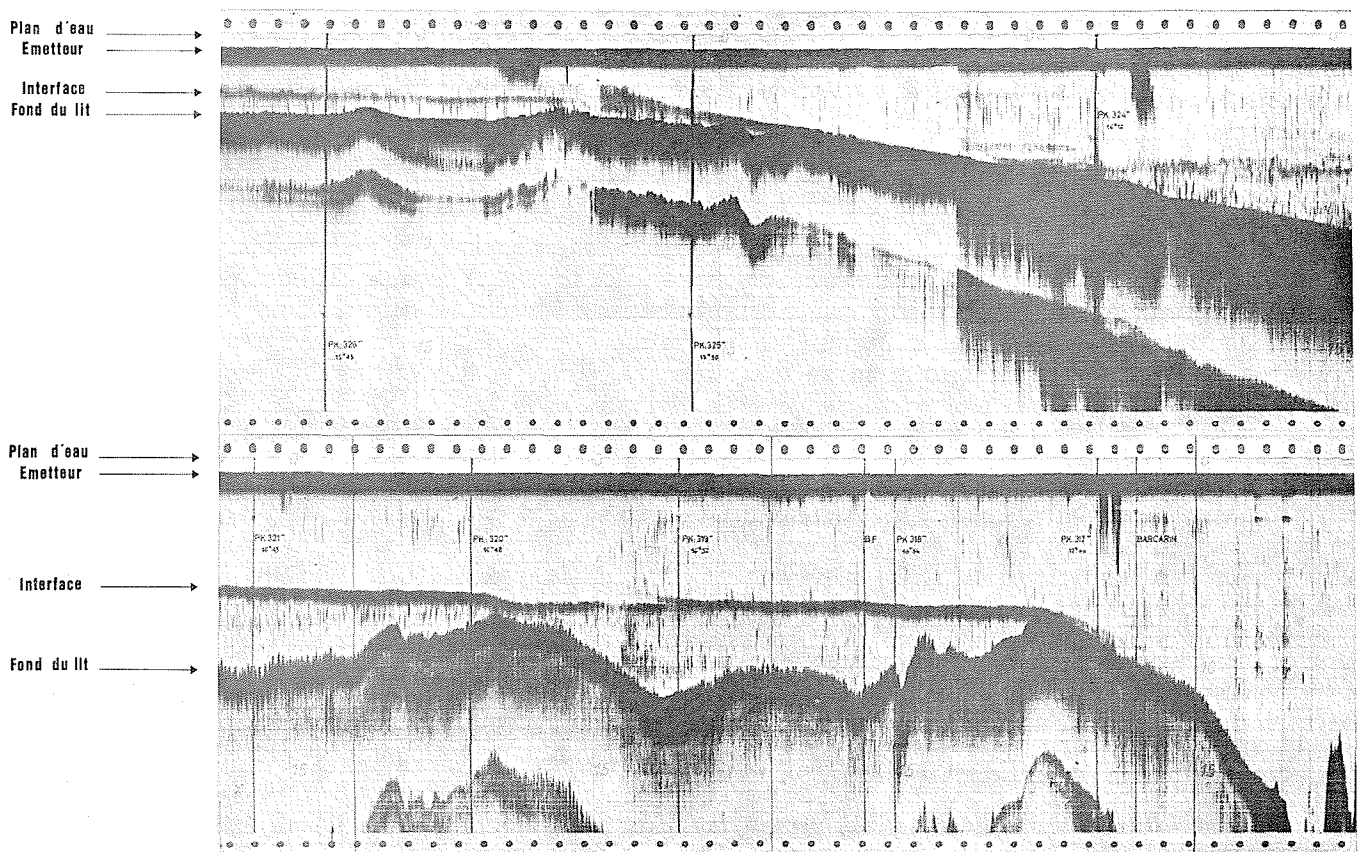
L'appareil à ultra-sons monté sur l'embarcation donne ainsi un profil en long du fond et de l'interface (voir fig. 7). Au cours du trajet, qui peut durer de 2 h à 5 h environ, des prélèvements de contrôle à la bouteille sont effectués régulièrement.

L'expérience a montré que l'écho de l'interface correspondait approximativement à la densité 1,005; parfois, on peut remarquer la présence d'échos multiples dans les zones où l'interface est mal définie.

2.2.2 LES APPAREILS DE PRÉLÈVEMENT.

Il s'agit de bouteilles munies d'un bouchon manœuvrable à distance et qui, immergées à une profondeur donnée puis remplies d'eau, permettent une fois remontées, d'effectuer une mesure au densimètre.

Pour les mesures dans les tubes limnigraphiques, un dispositif pneumatique spécial a été mis au point pour remplacer les bouteilles.



7/ Exemples d'enregistrement de l'interface obtenus par l'appareil à ultra-sons. Grand Rhône, le 27 septembre 1971.



Ces prélèvements sont effectués pour le contrôle du niveau des flotteurs, pour le tracé des profils de densité verticaux ou transversaux et la vérification des profils en long relevés à l'aide de l'appareil à ultra-sons.

### 3. — Premiers résultats des observations : morphologie du coin salé

#### 3.1 Profil densimétrique vertical.

La figure 5 donne un certain nombre d'exemples d'évolution de la densité en fonction de la profondeur pour différents points kilométriques du Grand et du Petit Rhône.

On constate que, sauf au voisinage immédiat de la mer, l'eau est parfaitement douce jusqu'à une certaine profondeur.

On trouve ensuite, l'interface. C'est une zone d'épaisseur variable où la densité varie à peu près linéairement entre 1,000 et 1,020 - 1,025, cette dernière valeur étant voisine de celle que l'on observe généralement en Méditerranée.

Enfin, sous cette interface, la densité demeure constante.

L'épaisseur de l'interface est très variable. Elle va de 20 cm à 3 m. Elle est d'autant plus grande que l'on se rapproche de la mer.

Il faut cependant signaler qu'à l'extrémité amont du coin salé, il semble y avoir généralement un fort mélange de l'eau salée et de l'eau douce, du moins lors des périodes de progression du coin salé, si bien que l'interface est souvent assez épaisse.

On constate également que lorsque les paramètres qui influent sur le coin salé tendent à se stabiliser (débit constant, vent nul, marée faible), les gradients de densité augmentent et l'épaisseur de l'interface diminue fortement.

#### 3.2 Profil densimétrique transversal.

Afin de vérifier l'hypothèse généralement admise selon laquelle les sections transversales de l'interface seraient horizontales, nous avons effectué des mesures de densité à la bouteille sur différentes verticales d'un même profil.

Les résultats obtenus (voir fig. 6) montrent que l'hypothèse est bien vérifiée et que les isohalines sont horizontales.

#### 3.3 Profil en long de l'interface.

Un exemple d'enregistrement obtenu à l'aide de l'appareil à ultra-sons est présenté sur les photographies de la figure 7; les figures 8 et 9 montrent après dépouillement quelques profils en long de l'interface du grand et du petit Rhône.

On voit qu'en gros l'allure générale de l'interface est bien conforme à ce que laisse prévoir la théorie du coin salé. En dehors de la zone du front où on observe une chute assez brutale, la forme est sensiblement linéaire avec une pente moyenne, d'autant plus faible que le débit d'eau douce est moins élevé, comprise le plus souvent entre  $10^{-4}$  et  $10^{-3}$ .

Sur le Grand Rhône, peu de profils ont pu être menés jusqu'à l'embouchure en raison des difficultés de la navigation dans ce secteur; de toutes façons l'interface y est épaisse et l'écho disparaît généralement sur les 2 à 3 km à l'amont immédiat de la mer. Il n'est donc pas possible de dire si l'interface présente dans cette zone, une forte pente conformément à la théorie.

Il est également intéressant d'observer le comportement de la couche salée sur les seuils : on note parfois de véritables déversements pendant les périodes de progression du coin salé vers l'amont.

Les profils extrêmes atteints par le front pendant la période d'observation ont été le PK 304 sur le Grand Rhône et le PK 323 sur le Petit Rhône, soit respectivement à 27 km et 14 km de la mer.

### 4. — Les différents paramètres intervenant dans la forme du coin salé

#### 4.1 Le débit du Rhône.

D'une manière générale on observe que le coin salé n'existe que si le débit du Grand Rhône est inférieur à  $900 \text{ m}^3/\text{s}$  et si le débit du Petit Rhône est inférieur à  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , soit en année moyenne 65 jours par an.

L'étude théorique du coin salé idéal montre que, toutes choses égales d'ailleurs une augmentation du débit du fleuve diminue la longueur du coin salé et fait baisser la cote de l'interface en une station donnée, une diminution du débit provoquant le phénomène inverse.

L'examen des enregistrements obtenus sur le Petit Rhône (voir fig. 13 et 14) montre que si l'on néglige les variations secondaires, il en est bien ainsi (dans un but de simplification, seule la courbe correspondant à la densité 1,010 a été représentée).

Il paraît alors possible d'établir en chaque station un réseau de courbes donnant le niveau correspondant à chaque densité en fonction du débit du Rhône, abstraction faite de la marée et du vent.

C'est ce que nous avons tenté de faire sur la figure 10 pour la densité 1,010. Il faut reconnaître que la dispersion reste grande du fait des paramètres négligés. Un essai de prise en compte de ces paramètres s'est révélé par ailleurs très décevant.

L'étude des profils en long relevés à l'ultra-sons est également instructive, elle fait apparaître que la longueur du coin salé varie en sens inverse du débit du Rhône.

Nous avons essayé sur la figure 11 de représenter, en fonction du débit du Rhône le point kilométrique correspondant au front. Là encore, la dispersion est très grande car les points considérés ne correspondent jamais à un état parfaitement permanent.

#### 4.2 Influence du niveau de la mer.

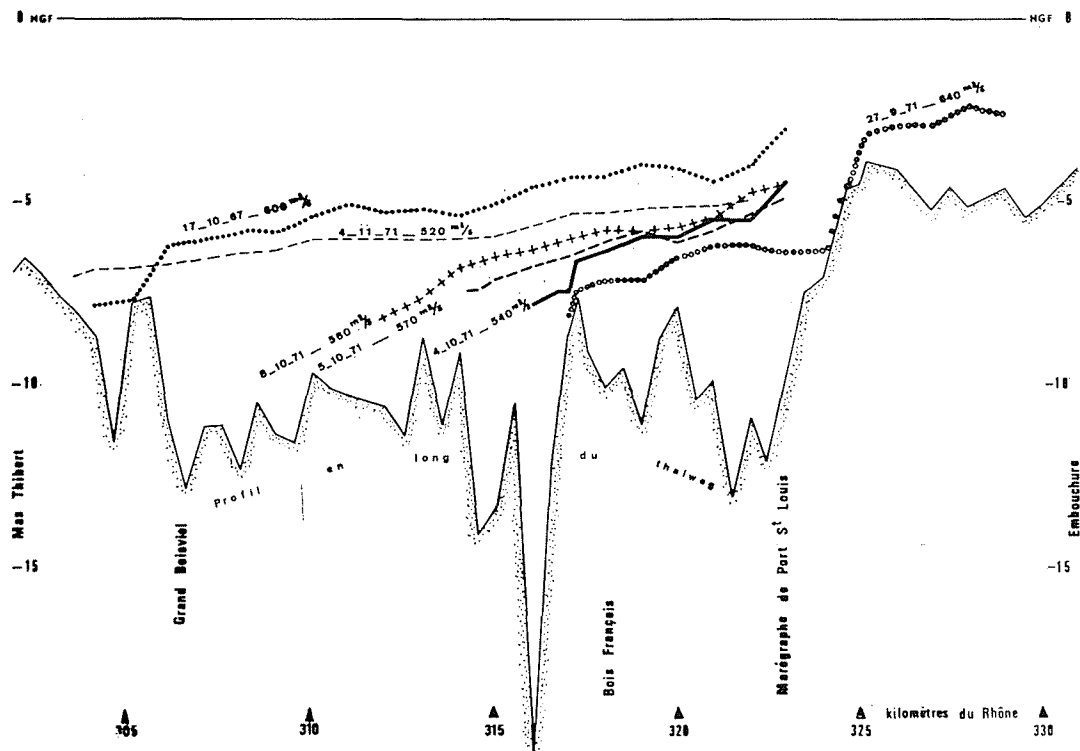
Lorsque pour un débit du Rhône constant le niveau de la mer varie sous l'effet du champ des pressions atmosphériques ou d'ondes de longue période, mais sans qu'il y ait de vent important, les enregistrements obtenus montrent que le coin salé évolue conformément à la théorie : si la mer monte, il s'enfonce vers l'intérieur des terres, si elle baisse il diminue de longueur.

Ce phénomène est cependant assez difficile à déceler sur les enregistrements car il est de faible amplitude et de plus les conditions requises pour le vent et le débit sont rarement atteintes.

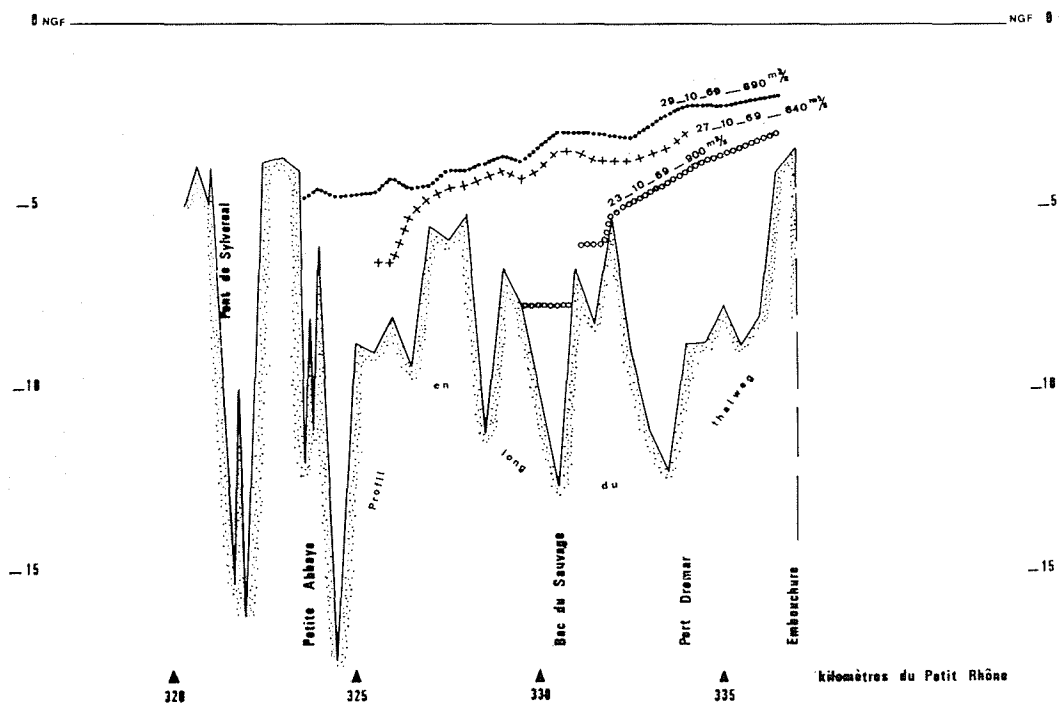
#### 4.3 La marée.

##### 4.3.1 AMPLITUDE.

Les marées dans cette zone de la Méditerranée sont de faible amplitude (20 à 30 cm) mais ont un cycle semi-diurne assez régulier comportant alternativement une marée



8/ Profils en long de l'interface dans le Grand Rhône.



9/ Profils en long de l'interface dans le Petit Rhône.

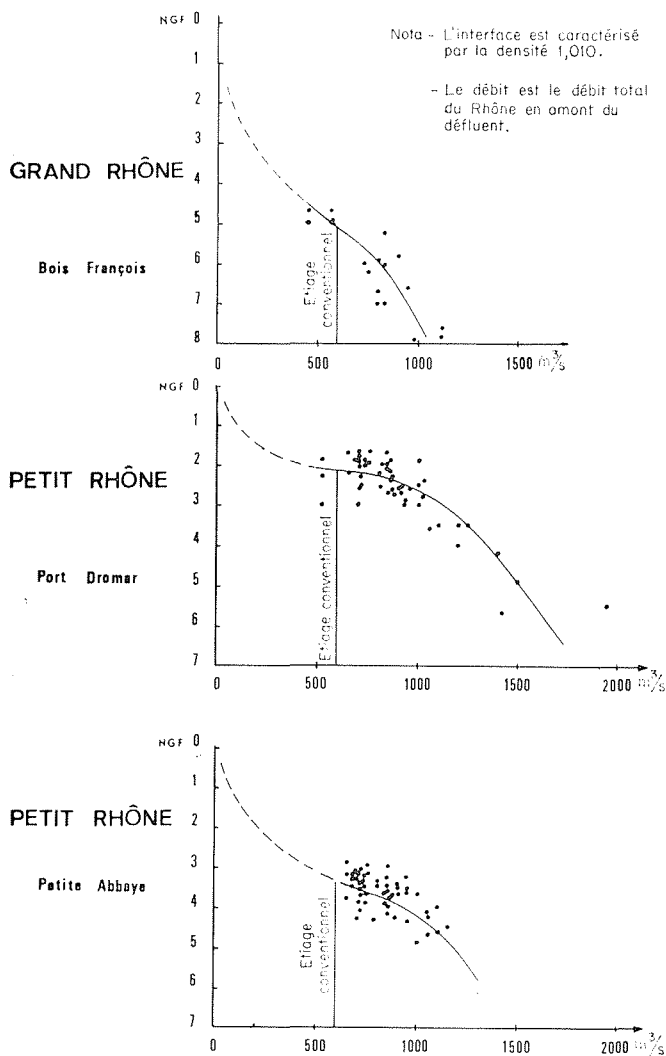
forte et une un peu moins forte. Les graphiques des figures 13 et 14 montrent qu'en surface, et pour les faibles débits du Rhône, l'effet se fait encore sentir à quelques kilomètres au sud de Beaucaire.

L'interface qui oscille dans un champ de gravité réduit a des variations de plus grande amplitude. Nous avons essayé de représenter sur le graphique de la figure 12 l'amplitude des variations du niveau correspondant à la densité 1,010 à Port-Dromar en fonction de l'amplitude de la marée de surface. La dispersion est grande car l'amplitude dépend également de la hauteur moyenne de l'interface au droit de la station, mais on peut dire qu'en gros il y a un coefficient d'amplification de 4 entre les ondes de marée de surface et d'interface.

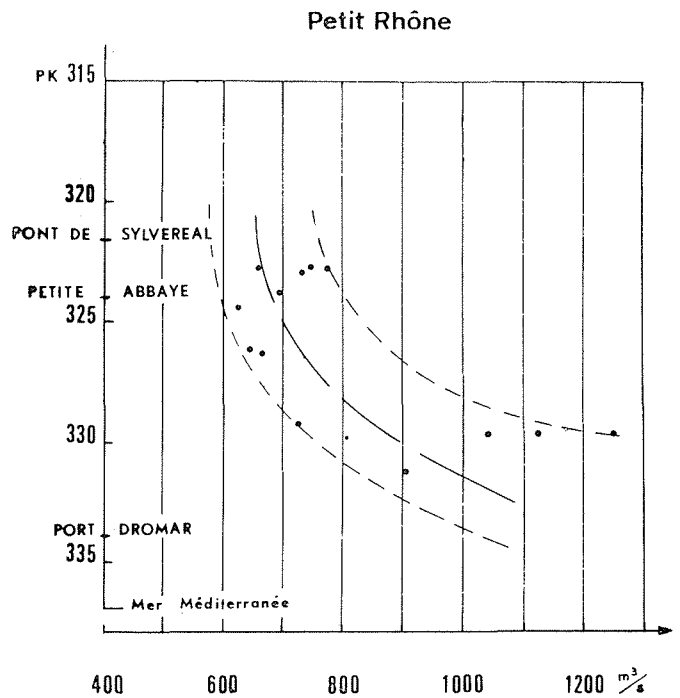
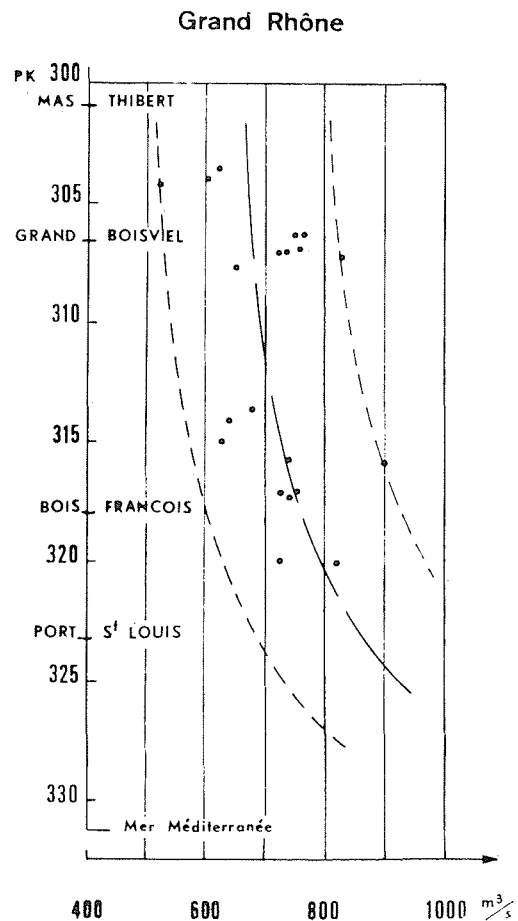
4.3.2 PHASE.

La marée de surface se propage assez rapidement dans le Grand Rhône, elle atteint Arles en 1 h 30 environ; dans le Petit Rhône elle va moins vite et on peut dire qu'à Saint-Gilles les ondes provenant des deux chemins possibles arrivent en même temps.

Pour les ondes d'interface, les difficultés sont plus gran-



10/ Variation du niveau de l'interface en fonction du débit.



11/ Position du front du coin salé sur le Grand et le Petit Rhône en fonction du débit du Rhône à Beaucaire.

salé n'a généralement pas le temps de se « remplir » complètement pour une situation donnée du débit du Rhône et du vent.

Ce phénomène est aggravé par la forme du lit qui est faite d'une succession continue de seuils et de mouilles. La progression du coin salé vers l'amont est, de ce fait, discontinue. La présence de certains seuils comme celui du Mas Thibert sur le Grand Rhône et celui de Sylveréal sur le Petit Rhône, semble interdire pratiquement l'intrusion d'eau salée plus à l'amont. Cependant, on peut imaginer des étiages exceptionnellement marqués et longs où le coin salé pourrait déborder ces seuils.

La photographie de la figure 7 et les profils des figures 8 et 9 montrent clairement le déversement des eaux saumâtres sur les seuils et le remplissage progressif des mouilles.

On peut noter, à ce propos, un point intéressant : la progression vers l'amont du coin salé se fait plus rapidement s'il n'y a que peu de temps qu'il a effectué sa marche en sens inverse. Cela peut s'expliquer par la présence des fosses qui, après une longue période de forts débits, se vident complètement de leur sel, et donc doivent être à nouveau remplies lors d'une nouvelle intrusion, alors que si le coin salé n'est resté absent que peu de temps, les fosses n'ont pas eu le temps de se dessaler et la remontée peut être plus rapide.

### 5.3 Exemples d'influences combinées du vent, du niveau de la mer et du débit du Rhône.

Sur les figures 13 et 14 nous avons sélectionné quelques enregistrements obtenus en surface en un certain nombre de stations, ainsi que les évolutions du niveau de l'interface du Petit Rhône (densité 1,010) à Port-Dromar et, pour l'un des graphiques seulement, à la Petite-Abbaye.

La station de Beaucaire n'est pratiquement pas influencée par le niveau de la mer et l'enregistrement y est représentatif des variations du débit du Rhône.

Nous avons également fait figurer sur les graphiques le vent à Marignane en adoptant les symboles utilisés par la Météorologie Nationale. Il faut noter que le vent dans le delta du Rhône n'a pas tout à fait la même direction : un vent d'est ou sud-est à Marignane est sud ou sud-est dans le delta, un vent du nord-ouest à Marignane est du nord dans le delta.

Episode du 10 au 19 novembre 1969 (fig. 13) :

- le 11 et le 12 l'interface baisse sous l'action du vent du sud et d'une légère augmentation de débit;
- le 13 le coin salé remonte grâce à la baisse du débit et à l'arrêt du vent;
- le 14 le coin salé est chassé par la crue, il revient à partir du 17.

Episode du 10 au 19 mars 1971 (fig. 14) :

- le 10 et le 11 un fort vent du Nord a fait baisser la mer, le coin salé a tendance à progresser vers l'amont;
- du 12 au 14 le débit du Rhône reste sensiblement constant, le vent passe au sud, la mer remonte mais le coin salé baisse sous l'effet du vent;
- le 15 le vent repasse au nord, la mer rebaisse, le coin salé remonte malgré une légère augmentation du débit;

- le 17 le vent passe au sud et commence à faire baisser le coin salé; le 19 une forte augmentation du débit accentue cette évolution, le coin salé disparaît.

## 6. — Confrontation des mesures in situ avec un modèle mathématique

Le Laboratoire National d'Hydraulique de Chatou a établi, il y a quelques années un modèle mathématique du coin salé dont la mise au point fut effectuée à l'aide de données relatives au Grand Rhône mais sans véritable étalonnage faute de mesures « in situ ».

Le modèle prend en compte deux couches de densités bien déterminées et un front bien précis séparant la zone d'eau douce de la zone mixte.

Il serait intéressant de le perfectionner, d'abord en reprenant son étalonnage à l'aide des récentes campagnes de mesures, puis en tenant compte de l'effet du vent.

Il faudrait également examiner s'il est possible d'introduire dans le modèle les seuils successifs pour reproduire les effets de remplissage des mouilles et de déversement sur les seuils.

On disposerait ainsi d'un modèle qui permettrait de simuler diverses perturbations apportées à l'état naturel telles que, par exemple, des modulations du débit, des prises d'eau importantes, ou le creusement de chenaux à travers les seuils, et d'évaluer leur influence sur le coin salé. Ce modèle sera sans doute très utile pour toutes les études d'équipement du cours inférieur du Rhône. La Compagnie va s'employer à le mettre au point avec le concours du Laboratoire de Chatou.

## 7. — Conclusion

La C.N.R. a entrepris depuis quatre ans l'étude des coins salés du Rhône. Cette observation a été difficile. En effet, la présence de coins salés est relativement rare et lorsqu'elle a lieu, il faut pouvoir mettre en œuvre des moyens importants, pour réaliser des mesures. En outre, la mise au point des appareillages a été longue et délicate.

Mais maintenant, grâce en particulier au long étiage de cet automne, nous disposons d'un ensemble de mesures qui permettent de bien décrire le phénomène. On a pu ainsi peser l'influence du vent, du débit d'eau douce et du niveau de la mer, qui sont les facteurs dominants de la morphologie du coin salé.

Une théorie complète et précise reste à faire. Elle est sans doute difficile en raison du caractère essentiellement transitoire du coin salé. Il se déforme très rapidement sous l'influence des facteurs dominants et n'atteint que très rarement un état d'équilibre.

En outre, l'interface n'est mince que dans des zones non perturbées. Souvent, au contraire, elle est assez épaisse, de l'ordre de plusieurs mètres, soit que les paramètres spatiaux changent (voisinage de la mer ou du front, présence de seuils ou de mouilles) soit que les paramètres temporels évoluent rapidement (écarts de vent, poussées de débit).



## Discussion

Président : M. JAMME

M. le Président remercie M. SAVEY de cette excellente étude faite en collaboration avec MM. POMMIER et MARVAUD.

L'étude du coin salé, pense-t-il, est en rapport étroit avec le problème de pollution qui nous occupe car les prises d'eau exécutées dans les régions où le coin salé risque d'apparaître peuvent fournir une alimentation en eau saumâtre impropre aux utilisations envisagées; d'où la question: des conséquences pratiques de cette étude ont-elles été tirées, notamment pour fixer l'emplacement des prises d'eau?

Actuellement, dit M. SAVEY, de nombreuses prises d'eau ont déjà été établies, empiriquement, par les riverains, dans le Petit et le Grand Rhône. Les résultats des études du coin salé pourraient être exploités par la mise au point de prises plus importantes, à des fins industrielles, par exemple.

M. GEMAEHLING donne les compléments d'information suivante:

Nombreuses sont les prises d'eau agricoles ou urbaines, sur la partie aval du Petit ou du Grand Rhône, qui ont connu dans le passé des difficultés et prélevé à certaines périodes des eaux salées dans le fond du lit du fleuve, leurs auteurs ayant eu une connaissance insuffisante des mouvements de l'interface. Pour remédier à cette invasion occasionnelle d'eau salée, les ingénieurs ont souvent fixé les crépines d'aspiration des pompes sur des flotteurs. Les études entreprises sur la langue salée dont il est rendu compte aujourd'hui, doivent donc permettre d'implanter plus judicieusement, dans l'avenir, les prises d'eau nécessaires pour faire face aux besoins futurs et d'étudier notamment les conditions dans lesquelles le complexe de Fos pourrait s'approvisionner en eau douce du Rhône, sans être obligé d'aller la chercher, loin vers l'amont, jusqu'à Arles.

M. BELLESORT s'informe sur l'appareillage utilisé et sur les corrections à apporter aux mesures brutes, compte tenu de la température et de la turbidité des eaux.

Aucune correction ne s'impose, explique M. SAVEY. Pour les périodes considérées, la turbidité est assez constante si bien que les variations de densité sont négligeables. Quant à la température, elle donnerait lieu aussi bien à des corrections négligeables. On sait que l'eau du Rhône a une température très régulière, du moins à l'échelle de la semaine; pour l'eau de mer, par contre, nous ne disposons pas de mesures systématiques.

M. BELLESORT estime que de faibles variations de densité peuvent entraîner des variations importantes de hauteur du coin salé.

M. QUETIN répond que dans les conditions du coin salé, les variations de la densité avec la salinité sont de l'ordre de  $10^{-2}$ , tandis qu'avec la température, ces variations sont de l'ordre de  $10^{-3}$ : le rôle de la salinité est donc prépondérant.

M. QUETIN souligne l'importance pour une bonne représentation du phénomène par les modèles mathématiques de savoir s'il existe dans le coin salé du Rhône des variations notables de salinité, donc de densité entre les différents paliers séparés par les seuils.

M. SAVEY ne pense pas que des mesures aient été faites permettant d'évaluer ces variations: les graphiques d'interface montrent, dans tous les cas, une densité de 1,025 avec des fluctuations entre 1,020 et 1,027.

Vous avez indiqué, rappelle M. QUETIN, que l'interface disparaît au voisinage de l'embouchure du moins sur les relevés par ultrasons. Avez-vous fait des mesures de salinité dans cette région et en mer, au-delà de l'embouchure?

M. SAVEY répond négativement à cette question.

M. de CHESSE demande si la comparaison des résultats obtenus en un même point par la méthode des flotteurs et par la méthode des ultra-sons paraît satisfaisante et peut être chiffrée.

En général, indique M. SAVEY, la couche repérée par ultra-sons correspond à la densité 1,010 et l'écart-type est assez faible.

M. TIXERONT voudrait savoir s'il y a des phénomènes de transmission d'ondes entraînant un déphasage entre les fluctuations de la marée et les fluctuations de niveau de l'interface dans le Rhône.

Les ondulations semblent être en phase avec l'oscillation; il est difficile de préciser davantage les phénomènes, répond M. SAVEY.

M. POTIÉ suggère l'utilisation de sondes de résistivité pour suivre les différents niveaux de salinité; de tels appareils ont été mis au point par le B.R.G.M. pour répondre justement à ce problème.

Ces sondes n'enregistrent les variations de salinité qu'en un point donné, fait remarquer M. SAVEY et sont donc insuffisantes.

M. QUETIN signale qu'il y a plusieurs sortes d'appareils mais que leur fidélité est difficile à maintenir compte tenu des dépôts inévitables sur les électrodes des appareils.

M. POTIÉ précise que l'appareillage S.O.I.F. mis au point par le B.R.G.M. peut enregistrer sur une même verticale plusieurs valeurs simultanées (jusqu'à 18) et fonctionne avec un système d'horlogerie suivant un programme qu'on peut choisir: l'appareil est, de ce fait, autonome, mais son coût est bien sûr plus élevé que celui d'une simple sonde.

M. POTIÉ observe que l'œil humain peut déceler plus de détails que n'importe quel appareil. Dans le cas de Port-Miou, on distingue, en plongée, plusieurs strates d'eau de densités différentes qui ne sont pas toujours très bien mises en évidence par des mesures.

M. RAMETTE intervient sur la définition peu précise de l'interface telle qu'elle résulte des enregistrements.

En effet, confirme M. SAVEY, mais la lecture du graphique ultrasonique ne doit pas faire oublier que l'interface a une certaine épaisseur; ainsi, pour une fosse d'une quinzaine de mètres de profondeur, on peut donner à l'interface une épaisseur de 3 m, au maximum.

Connaît-on la nature des fonds? demande M. RUBY.

En général, il s'agit surtout de sable fin ou de vases, répond M. SAVEY, mais il n'est pas impossible que dans le cas de fosses très profondes, on trouve des cailloutis.

M. le Président clôt la discussion en remerciant tous ceux qui ont contribué à l'animer.

Il annonce la présentation de deux films sur la résurgence d'eau douce sous la mer de Port-Miou près de Cassis.

Le premier: «Eaux douces dans les calanques de Provence», présenté par M. POTIÉ, réalisé par la Société des Eaux de Marseille et le B.R.G.M., au cours de leurs études, a pour but de montrer le site, l'exploit des plongeurs qui l'ont exploré et de poser le problème.

Connue dit-on «depuis les Romains», la résurgence de Port-Miou débitait en période de crue plus de 50 m<sup>3</sup>/s d'eau douce. Les études en cours devraient préciser le régime de la source au cours des divers mois de l'année.

A la demande du Syndicat de Recherches de Port-Miou, constitué par la Société des Eaux de Marseille et le B.R.G.M. et en vue d'étudier le captage éventuel de cette résurgence sous-marine, M. le Professeur THIRRIOT a réalisé dans son Laboratoire un modèle analogue très schématique de l'implantation d'un barrage dans la galerie souterraine naturelle qui précède la résurgence. Il présente un petit film d'une durée de cinq minutes montrant ce qui se passe lorsqu'à l'instant initial la galerie étant remplie d'eau salée (jusqu'au niveau de la mer), on fait arriver une crue d'eau douce qui tend à chasser l'eau salée (éventuellement, par réalisation d'un écoulement stratifié).

#### Compte rendu sommaire du film intitulé «Eaux douces dans les calanques de Provence».

Ce premier film est un court métrage de 16 mm en couleur, d'une durée d'une vingtaine de minutes, réalisé à l'initiative de la Société des Eaux de Marseille et du Bureau de Recherches Géologiques et Minières par le cinéaste Paul de ROUBAIX.

La première partie du film situe le problème dans son cadre géographique et géologique.

Entre Marseille et Cassis, sur cette partie de côte méditerranéenne, rendue célèbre par les calanques, constituée de massifs calcaires très karstifiés, on a constaté depuis longtemps des sorties d'eau douce en mer très constantes.

Dans le passé, des savants, comme De Marsili, Martel, ont étudié ces résurgences chantées par Rimbaud, mais il a fallu les techniques nouvelles de plongée avec scaphandre autonome pour mieux connaître le phénomène en pénétrant à l'intérieur des cavités immergées. C'est avec la collaboration des plongeurs de l'Entreprise Hippocampe et du Groupe d'Etudes et de Plongées Souterraines que le Syndicat de Recherches de Port-Miou a pu pousser plus avant l'étude de la résurgence de Port-Miou.

Le film rappelle brièvement différentes techniques qui ont été employées pour localiser les conduits karstiques, mesurer les vitesses

de salinité des courants sortants et rentrants, les variations de salinité et de température, ainsi que les variations de niveau. Il évoque également les méthodes de détection de ces résurgences d'eau douce en mer :

- infra-rouge;
- anomalies de résistivité et de température;
- étude photo-géologique;
- traceur.

Ce film d'une réelle valeur artistique montre tout au long de son déroulement les plongeurs dans ce milieu particulièrement hostile

où ils dépendent totalement de la qualité de leur matériel et de leur valeur personnelle, puisqu'ils ne sauraient survivre plus de quelques dizaines de secondes sans le secours de leur bouteille. L'exploration a été poussée par ces plongeurs sur plus d'un kilomètre, ce qui constitue un exploit. Ces plongées ont permis de mettre au point les techniques particulières et de perfectionner l'entraînement des hommes et ceci permet à cette équipe, probablement unique au monde, d'évoluer avec le minimum de risque, en effectuant un travail scientifique de qualité, dans ce milieu bien particulier que constituent les cavités immergées en pays karstiques.

## Abstract

### Observations and measurements on the salt wedges in the Rhone delta

As part of its hydrological research programme, the Compagnie Nationale du Rhône has undertaken measurements on salt-water penetration from the Mediterranean into the two branches of the Rhone delta, the so-called Petit-Rhône and Grand-Rhône.

Experimental apparatus includes fixed level-recorders used to determine levels corresponding to given densities (Fig. 1, 2, 3 and 4) and an ultrasonic probe which gives directly the lengthwise interface level variation (Fig. 7, 8 and 9). Density is also measured directly by grab sampling.

Figures 5, 6, 8 and 9 give an idea of salt-wedge configuration. It can be seen that the interfacial thickness varies within wide limits and that it is affected by holes and sills.

Results point up the factors which affect salt-wedge behaviour. These are:

- (i) river discharge—effect is as predicted by theory (Fig. 10 and 11);
- (ii) tidal effects in the Mediterranean, though weak, are sufficient to generate progressive waves, the amplitude of which is

greater at the interface than the free surface (fourfold amplification) (Fig. 12);

- (iii) wind action, which cannot be neglected, is complicated since it affects both the level of the sea and the fresh-water surface (where a shear stress is set up).

It appears that a moderate wind blowing off the sea (south wind) has a tendency to drive the salt wedge towards the sea, whereas moderate winds off the land (north winds) will drive it inland. Strong winds, however, seem to have precisely the opposite effect.

Figures 13 and 14 have been used in an endeavour to analyse the combined action of the various parameters, which of course rarely operate singly.

Difficulties encountered and lack of precision in the results would seem to be due to the fact that steady-state conditions are never really reached. This is why it is thought that future progress is more likely to come from continued study of the mathematical salt-wedge model set up a few years back by the Laboratoire d'Hydraulique at Chatou.

