

Méditerranée nord-occidentale  
Salinité côtière  
Conditions météorologiques  
Eau douce

Northwestern Mediterranean Sea  
Coastal salinity  
Meteorological conditions  
Fresh water

# L'eau douce devant Monaco

Jean-Louis RAPAIRE <sup>a</sup> et Louis PRIEUR <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Office Monégasque de l'Environnement, 16 boulevard de Suisse, 98000 Monte-Carlo, Principauté de Monaco.

<sup>b</sup> Laboratoire de physique et chimie marines, Observatoire Océanologique de Villefranche, B.P. 08, 06230 Villefranche-sur-Mer, France.

Reçu le 7/11/91, révisé le 14/04/92, accepté le 28/04/92.

## RÉSUMÉ

Les crues de la Roya, la rivière la plus proche de Monaco, sont suivies par des diminutions de salinité dans la zone côtière d'autant plus intenses et d'autant plus synchrones que l'on se rapproche du rivage, de l'embouchure, et de la surface de la mer. En comparant la salinité moyenne relevée à 6 milles de la côte aux salinités observées dans la baie de 1976 à 1983, le volume d'eau douce contenu dans le premier mètre sous la surface de la baie est trouvé équivalent au débit de la Roya cumulé pendant trois heures.

L'étude des corrélations avec décalage entre le débit de la Roya et les salinités mesurées dans la baie et plus au large montre que la zone de mélange entre l'eau douce et l'eau de mer s'étend d'autant plus vers le large et se localise d'autant plus en surface qu'elle s'observe par beau temps chaud et calme.

Mais alors que les variations de salinité observées d'une campagne de mesures à l'autre en surface près de la côte sont expliquées par les variations du débit journalier de la Roya et des torrents voisins, les variations plus au large ne peuvent être expliquées que par une influence climatique plus générale, s'appliquant à une eau douce d'origine plus lointaine.

*Oceanologica Acta*, 1992. 15, 3, 245-253.

## ABSTRACT

### The fresh water off the coast of Monaco

Rises in the water level of the Roya, the closest river to Monaco, are followed by a lowering of salinity in the coastal area that is all the more intense and synchronous as we near the shore and the river mouth, as well as at the sea surface. By comparing the mean salinity six miles offshore with that of the bay, between 1976 and 1983, it is found that the fresh water volume contained in the first metre below the surface of the bay is equivalent to the cumulative flow of the Roya in three hours.

Studies of lagged correlations between the flow of the Roya and salinity measured in the bay and further offshore indicate that during hot and calm weather the mixing area between fresh water and sea water spreads to a greater extent seawards and is more pronounced at the sea surface.

But if variations of salinity observed from one sampling cruise to another at the sea surface and near the shore are explained by fluctuations in the daily flow of the Roya and neighbouring torrents, those at a greater distance can be explained only by a more general climatic influence, applied to fresh water of more distant origin.

*Oceanologica Acta*, 1992. 15, 3, 245-253.

INTRODUCTION

L'océanographie côtière est, devant Monaco, sous l'influence du courant ligure qui passe au large. Ce courant est la branche septentrionale de la circulation en Méditerranée nord-occidentale, qui est alimentée par les eaux provenant de part et d'autre du Cap Corse, de manière permanente à l'ouest, saisonnière à l'est (Astraldi *et al.*, 1990 ; Béthoux *et al.*, 1982). Longeant la côte, le courant est influencé par les apports côtiers d'eau douce. Une desalure observée en 1981 devant Nice, vingt jours après un épisode pluvieux important, a été attribuée à une crue de l'Arno dont l'embouchure est à plus de 100 km (Bong, 1983). Déjà Gostan, en 1967, signalait une corrélation entre les variations du débit des fleuves, notamment celui du Var, le plus important de la région, et les changements des salinités de surface.

L'eau douce provenant des rivières et des précipitations est le principal vecteur des polluants en mer. L'étude de sa répartition donne donc des indications générales sur le devenir de ces polluants et, à ce titre, est intéressante pour elle-même. Dans une baie, cette eau douce peut provenir pour partie du courant ligure lui-même (influence lointaine), pour partie des apports côtiers, rivières ou lessivages des sols par les pluies (influences proches). Pour la baie de Monaco, les crues de la Roya, rivière la plus proche située en amont par rapport au sens d'écoulement du courant ligure, sont suivies d'une diminution de salinité d'autant plus intense que l'on se place plus près du rivage. L'importance et le décalage dans le temps de cette diminution sont *a priori* régis par la diffusion de l'eau douce en mer. Le sujet de cet article est précisément de rechercher le volume d'eau douce présent dans la baie de Monaco, de déterminer son taux de renouvellement et son débit.

A cette fin, les caractéristiques de la baie et de son environnement sont tout d'abord décrites. Les variations du débit de la Roya et de la salinité, tant dans la baie que plus au large, de 1976 à 1983, sont ensuite présentées et comparées. Les résultats essentiels font l'objet d'un calcul simple de l'éta-

ment de l'eau douce en mer, qui conduit à une estimation de sa répartition devant Monaco durant les deux périodes particulièrement étudiées : 1976-1978 et 1979-1983.

LA BAIE DE MONACO ET SON ENVIRONNEMENT

La baie de Monaco (fig. 1), d'une superficie de  $10^7$  m<sup>2</sup>, est largement ouverte vers le Sud et sous l'influence directe des vents de Sud-Est les plus fréquents. Elle est bordée par un amphithéâtre de  $1,6 \cdot 10^7$  m<sup>2</sup>, culminant à 1 100 m à moins de 3 km du rivage, qui la protège des vents de Nord-Nord-Ouest les plus violents.

Plus de la moitié des torrents sont canalisés dans le réseau unitaire de récupération des eaux résiduaires, dont l'étude a montré que le temps de réponse à une pluie est inférieur à l'heure (Anonyme, 1986).

Le courant parallèle à la côte et dirigé vers le Sud-Ouest régit les quantités d'eau douce arrivant dans la baie. En amont, le bassin versant le plus proche et le plus important a une superficie de  $68 \cdot 10^7$  m<sup>2</sup>. C'est celui de la Roya, dont l'embouchure se situe à 20 km de Monaco. Il est suivi par ceux, d'une superficie totale de  $7 \cdot 10^7$  m<sup>2</sup>, de l'ensemble des torrents se jetant en baie de Menton. Immédiatement en aval de Monaco, les bassins versants surplombant les baies de Cap d'Ail et de Beaulieu ont une superficie équivalente à celle de l'amphithéâtre monégasque. Encore plus en aval, à 20 km, se localise l'embouchure du Var. Il draine une superficie sept fois plus importante que celle de la Roya, mais il faut des conditions exceptionnelles de vent de Sud-Ouest pour que s'établisse un contre-courant côtier d'une manière similaire à celui observé par temps de mistral devant Toulon (Millot et Wald, 1980).

Ainsi l'eau douce rejetée en amont de Monaco puis transportée par le courant côtier constitue l'apport principal à la baie. Le débit de la Roya est considéré comme représentatif de sa quantité. Les variations de débit sont en effet en phase avec celles des pluviosités relevées aux huit stations météorologiques les plus proches de Monaco.

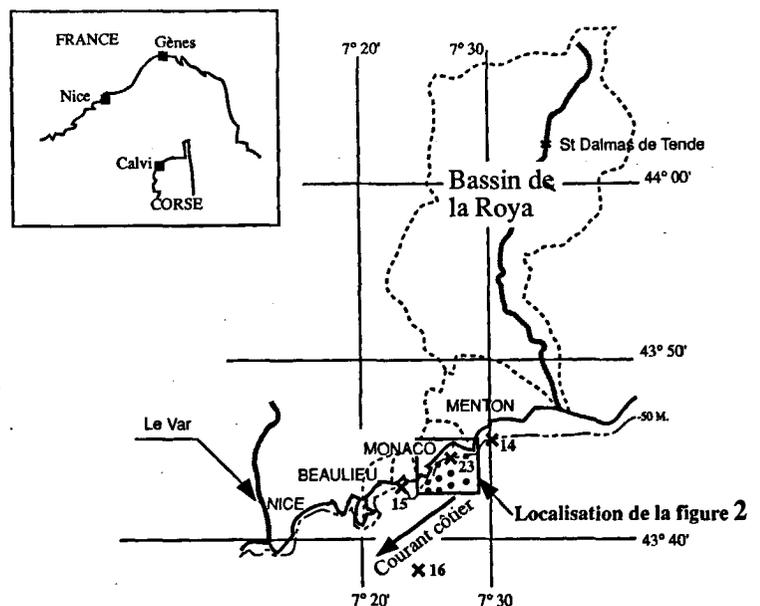


Figure 1

La baie de Monaco et son amphithéâtre, représentés avec les bassins versants de Menton et de la Roya, en pointillés. Les stations 14, 15, 16, 23, visitées de 1976 à 1983 sont représentées par une croix ; la position des autres stations de prélèvements est indiquée de manière détaillée sur la figure 2.

The bay of Monaco and its environs with the drainage basins of Menton and the Roya river represented with dashed lines. Stations 14, 15, 16, and 23, sampled from 1976 to 1983, are represented by crosses; the positions of the other sampling stations are detailed in Figure 2.

Le débit de la Roya,  $12,5 \text{ m}^3/\text{s}$  en moyenne sur vingt ans, est relevé quotidiennement à Saint-Dalmas de Tende, en amont de plusieurs captages réalisés pour l'irrigation et l'alimentation en eau des villes de la côte. Il est supposé proportionnel à celui que l'on mesurerait à l'embouchure. La seule mesure disponible à cet endroit est  $23 \text{ m}^3/\text{s}$ . Elle correspond à l'écoulement constant durant l'année d'une hauteur de pluie de 1 m, uniformément répartie sur l'ensemble du bassin versant, ce qui semble raisonnable puisque la hauteur moyenne annuelle des pluies de 1973 à 1981 est 0,883 et 1,126 m, respectivement à Monaco et à Saint-Dalmas de Tende.

Les corrélations sont calculées entre les salinités mesurées, ou les contenus halins estimés au moyen de l'intégration des salinités effectuée selon la méthode des trapèzes, et le débit de la Roya relevé le même jour ou le  $n^{\text{ème}}$  jour précédant la sortie selon le décalage choisi. A titre d'exemple, le débit journalier de la Roya relevé à Saint-Dalmas de Tende, la salinité de surface au centre de la baie de Monaco au point 16, ainsi que la pluviométrie annuelle sont représentés sur la figure 3.

Les séries présentent une différence de composition qui peut fausser leur comparaison. L'intervalle de temps de mesure du débit de la Roya est, en effet, régulièrement

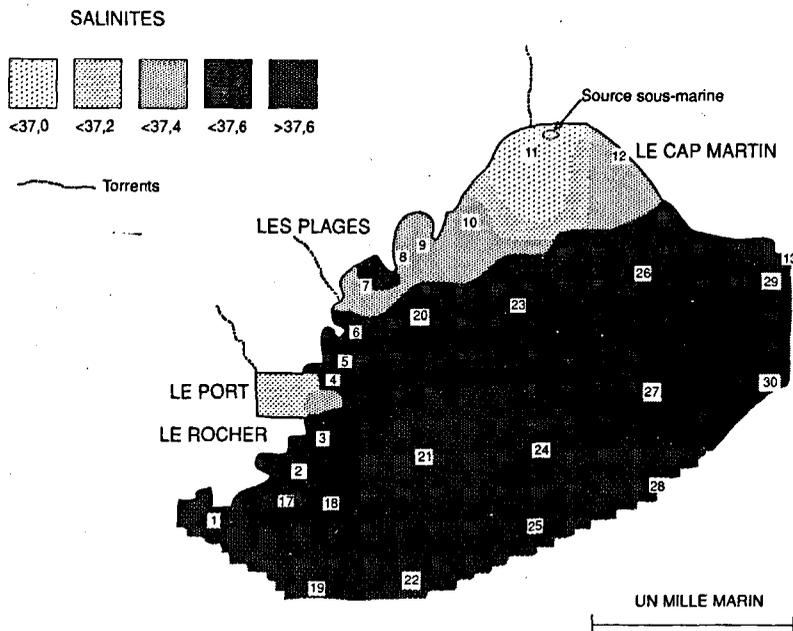


Figure 2

Localisation des points de prélèvements en baie de Monaco, repérés par leurs numéros de 1 à 30. Les emplacements des stations 14, 15, 16, situés en dehors de la baie, sont indiqués sur la figure 1. Les zones isohalines ont été déterminées à partir des moyennes des salinités observées de 1976 à 1978 en surface. La salinité de chacun des points de la carte a été calculée par interpolation entre les salinités des trois points de mesures les plus proches. Cette interpolation a été pondérée par l'inverse des carrés des distances.

*Location of the sampling stations in the bay of Monaco, numbered from 1 to 30. The positions of stations 14-15-16 outside the bay are indicated in Figure 1. The isohaline areas were determined with the average salinities observed at the sea surface from 1976 to 1978. The salinity of each pixel was calculated by an interpolation between the salinities of the three nearest sampling stations. This interpolation was weighted by the inverse of the squared distances.*

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

La salinité a été mesurée avec un salinomètre Guildline modèle Autosal 8 400 à partir de prélèvements effectués à la bouteille.

Une première étude se rapporte à la période 1976-1978, où la salinité de surface a été mesurée toutes les semaines en 27 stations réparties dans la baie (fig. 2). Des mesures complémentaires hors la baie de Monaco ont été faites en trois points repérés sur la figure 1, situés respectivement en amont en baie de Menton (14), en aval en baie de Beaulieu (15) par rapport au sens d'écoulement du courant côtier, et à 6 milles au large (16), ce dernier point, plus proche du courant ligure, servant de référence (témoin) afin de tenir compte d'éventuelles variations de salinités dues à l'influence des eaux du large. Trente séries, dont 27 dans la baie, de près d'une centaine de salinités ont été validées en éliminant les valeurs, considérées comme aberrantes, supérieures à 38,7 et inférieures à 33.

Une deuxième étude se rapporte à la période 1979-1983, durant laquelle la salinité de la colonne d'eau a été mesurée bimensuellement aux stations 18, 23, 30 de la baie (fig. 2), et à la station 16, aux immersions 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200 m selon la profondeur de la colonne d'eau à la station. Vingt sept séries de près d'une centaine de contenus halins sont ainsi disponibles.

espacé et vaut un jour. Celui séparant les observations de salinité n'est en moyenne que d'une semaine en première période (1976-1978) et que de quinze jours en deuxième période (1979-1983). De plus, cet intervalle dépend des conditions météorologiques régissant les sorties en mer. On notera que les crues de la Roya, représentées sur la figure 3 en haut par des pics dépassant  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ , trouvent généralement une contrepartie dans une baisse de salinité plus ou moins importante en baie de Monaco et au point 16 (fig. 3, en bas). Néanmoins, par simple observation visuelle, il ne semble pas y avoir de relation quantitative entre la hauteur du pic et la baisse de la salinité. Ceci est très probablement dû au fait que l'échantillonnage de salinité est beaucoup plus espacé et variable dans le temps que celui du débit de la Roya. Pour s'assurer de la validité des corrélations entre les salinités et le débit de la Roya représentées par des séries de 80 à 90 points conduisant, d'après le test de Student, à un seuil de significativité de 0,217, un contrôle a été effectué en remplaçant le débit de la Roya par des séries aléatoires. Ce contrôle montre que, sur 900 corrélations calculées, 41 seulement ont une valeur absolue supérieure à 0,217, soit un rejet de significativité de la corrélation de 97,7 % ( $1 - 1/2.41/900$ ) supérieur, conformément au test de Student, à la valeur limite de 97,5 %. On en conclut que, malgré les défauts d'échantillonnage, le seuil de significativité du test de Student est applicable aux séries (C.E.T.A.M.A., 1986).

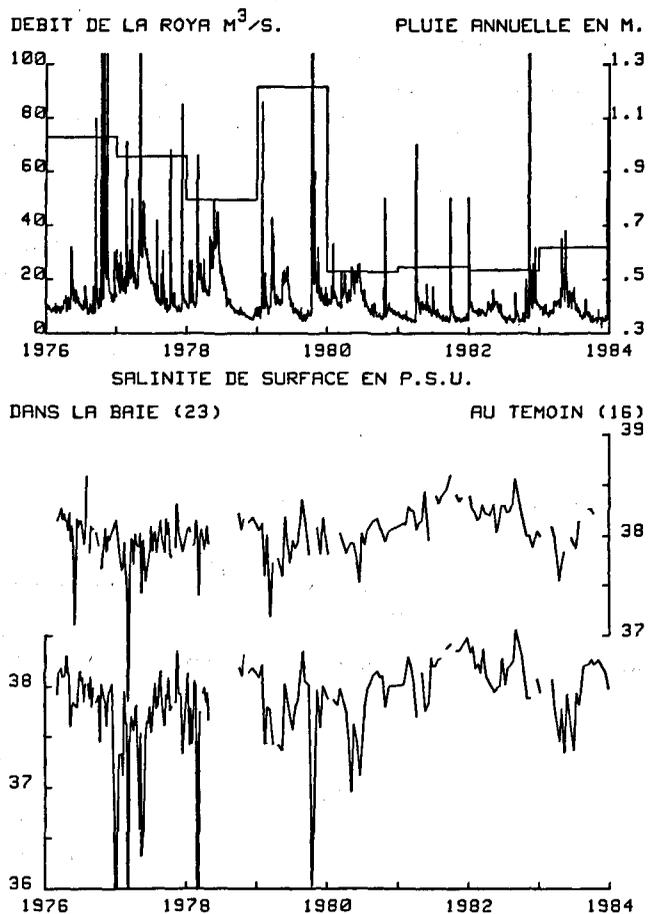


Figure 3

En haut : variations comparées du débit journalier de la Roya en m<sup>3</sup>/s, et de la pluviométrie annuelle à Monaco en m/an. En bas : salinité, observée lors des 200 sorties effectuées durant la période 1976-1983, à gauche au centre de la baie (station 23), à droite au large (station 16). Les tracés sont interrompus aux dates pour lesquelles, soit la station n'a pas été visitée, soit le prélèvement n'a pas été exploité.

Top: comparative variations in the daily flow of the Roya (m<sup>3</sup>/s) and the annual precipitation at Monaco (m/y). Bottom: salinity observed during 200 cruises made between 1976 and 1983, on the left at the centre of the bay, station (23); on the right at the offshore station (16). Lines are broken when no data are available.

RESULTATS

La salinité

La figure 2 représente la répartition des moyennes de salinité de surface obtenue à partir des 27 séries se rapportant aux prélèvements effectués durant la période 1976-1978. Elle montre que l'eau la moins salée est généralement localisée au fond de la baie, et plaquée contre la côte ouest. Cette répartition est conforme à ce que laisse prévoir la direction du vent de Sud-Est la plus fréquente (Anonyme, 1988). Elle est également conforme aux résultats des mesures de courantométrie effectuées en bordure ouest de la baie, au point 17, à - 20 et - 80 m, sur un fond de 100 m (Astraldi et al., 1988). Ces résultats montrent en effet que, si la composante principale du courant est dirigée parallèlement à la côte vers le Sud-Ouest, comme le courant ligure, la composante secondaire est perpendiculaire à la côte et, à - 20 m, dirigée vers celle-ci.

Si on ajoute à une colonne d'eau d'épaisseur H<sub>2</sub> et de salinité S<sub>2</sub> une couche d'eau d'épaisseur H<sub>1</sub> et de salinité S<sub>1</sub>, la salinité S résultante, après mélange, sur l'épaisseur totale H, s'écrit, en conservant la quantité de sel :

$$HS = H_1S_1 + H_2S_2 \text{ avec } H = H_1 + H_2$$

La salinité S s'écrit aussi, en terme de proportion x d'eau de salinité S<sub>1</sub> dans le mélange :

$$S = xS_1 + (1 - x) S_2$$

Dans le cas où S<sub>1</sub> est nul (eau douce), il vient :

$$x = (H - H_2)/H$$

d'où

$$H_1/H = (S_2 - S)/S_2 \tag{1}$$

Pour notre présent calcul, S et S<sub>2</sub> sont respectivement les salinités moyennes de surface observées dans la baie et au témoin. La relation précédente lie donc les écarts relatifs de salinité à une épaisseur relative H<sub>1</sub> d'eau douce.

En limitant arbitrairement l'épaisseur de mélange H au premier mètre sous la surface, la quantité d'eau douce présente dans la baie de 1976 à 1978 est alors représentée par l'épaisseur d'une lame virtuelle uniformément répartie de 11,3 mm. En tenant compte de la répartition moyenne des salinités, cette lame aurait en fait une épaisseur variable de 30 mm au fond de la baie à près de 8 mm au-delà de la ligne des caps la délimitant. Il en résulte un volume d'eau douce de 113.10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>. Par comparaison, une pluie de 6,8 mm uniformément répartie sur l'amphithéâtre monégasque a le même volume.

Le même calcul a été repris avec les moyennes des séries se rapportant à la période 1979-1983, caractérisée par une baisse de la pluviométrie de près de 40 %. L'épaisseur trouvée est 4,5 mm au centre de la baie et 4 mm au-delà de la ligne des caps. La comparaison des deux périodes montre que la quantité d'eau douce diminue plus que ce que l'on attend de la simple diminution de la pluviométrie.

Ce calcul ne donne qu'un ordre de grandeur qui dépend de la profondeur H choisie. Il exclut néanmoins l'influence des variations de salinité de surface propres au témoin, probablement reliées aux variations de salinité du courant ligure qui seront étudiées dans le paragraphe «Flux total». Il permet de constater que le temps de renouvellement de l'eau douce en baie de Monaco est a priori très rapide, puisque son volume correspond à une pluie de 6,8 mm sur l'amphithéâtre de Monaco, ce qui n'est pas rare dans la région, ou au débit moyen de la Roya durant un peu plus de trois heures.

Relations entre la salinité côtière et le débit de la Roya de 1976 à 1978

L'étude de la relation entre les variations de la salinité côtière et le débit de la Roya à Saint-Dalmas de Tende fournit quelques éléments de réponse sur la vitesse de déplacement de l'eau douce le long de la côte. Les séries obtenues à partir des salinités observées en surface aux trente points représentés sur les figures 1 et 2 ont été corrélées avec la série représentant le débit de la Roya le jour de la campagne de prélèvements en mer et les jours la précé-

nant. La figure 4 représente la localisation du maximum de corrélation en fonction du décalage appliqué entre les séries. A toutes les stations de la baie, le maximum de corrélation s'observe avec un décalage de deux jours. Une bonne corrélation avec un décalage nul existe aussi aux stations 2, 4, 5, 14, 15, toutes situées à proximité du rivage ou de sources d'eau douce. Le décalage du maximum de corrélation croît logiquement d'est en ouest, dans le sens d'écoulement du courant côtier. Il vaut un jour à la station 14 en baie de Menton et trois jours à la station 15 en baie de Beaulieu.

L'étude des pentes de trente droites de régression représentant les variations de la salinité de la baie en fonction du débit de la Roya a été faite pour un décalage entre les séries

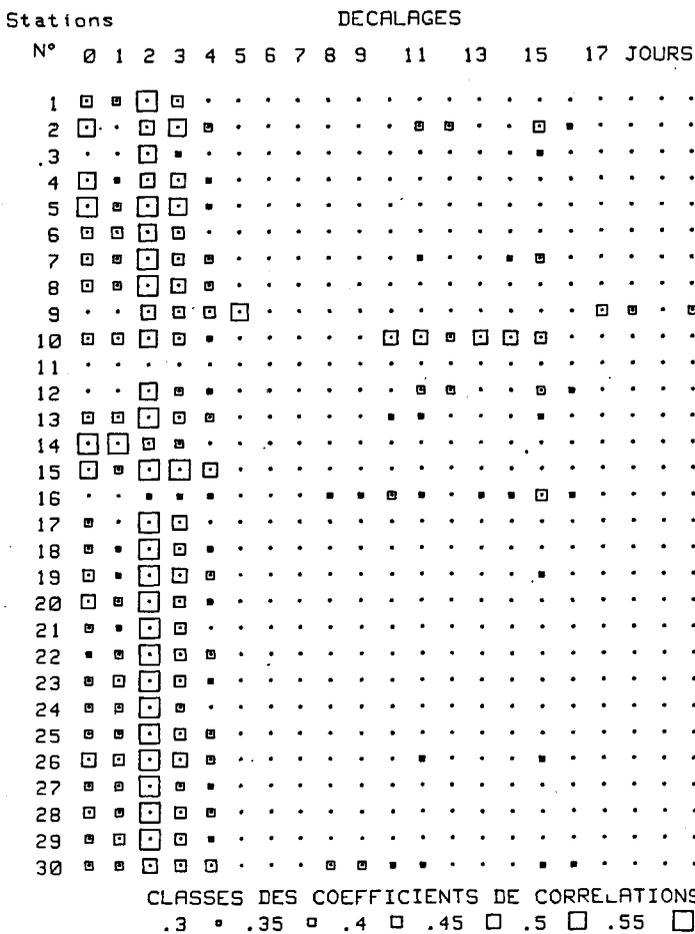


Figure 4

Tableau des classes des coefficients de corrélation calculés entre les salinités relevées aux trente stations de prélèvements (lignes) et le débit de la Roya observé les jours précédant les campagnes d'échantillonnage (colonnes de 0 à 19). Seules les corrélations de valeurs supérieures à 0,3, donc significatives, sont représentées sur le tableau ; les classes sont définies au bas du tableau. A toutes les stations de la baie le décalage conduisant au maximum de corrélation, généralement supérieur à 0,55, est de deux jours.

Table of classes of correlation coefficients calculated from the salinities observed at the 30 sampling stations (lines) and the flow of the Roya observed the day before the sampling cruises (columns from 0 to 9). Only correlation values greater than 0.3 are shown as significant on the table; definitions of classes are given in the Table. At all stations in the bay, the lag giving the best correlation, generally greater than 0.55, is two days.

PERIODE 1976-1978

PERIODE 1979-1983

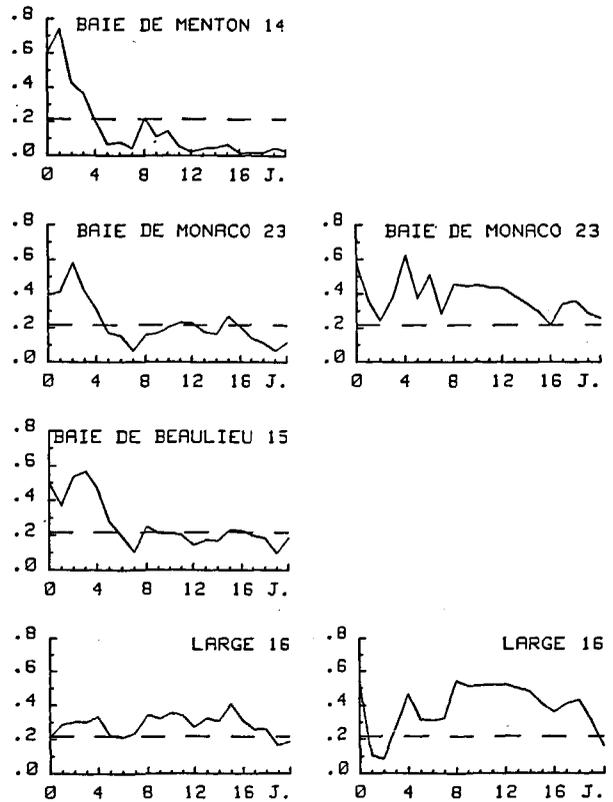


Figure 5

Variations comparées du coefficient de corrélation entre le débit de la Roya observé les jours précédant les campagnes de prélèvements et les salinités de surface, pour les stations 14-23-15-16. De 1976 à 1978, le maximum de corrélation croît d'Est en Ouest, d'un jour en baie de Menton (14) à trois jours en baie de Beaulieu (15). De 1979 à 1983, le coefficient de corrélation est plus élevé que durant la période précédente ; en baie de Monaco le décalage du maximum de corrélation est de quatre jours, au lieu de deux en première période. Pour les deux périodes, le décalage correspondant au maximum de corrélation est moins sélectif au large (station 16) qu'à la côte.

Compared variations of correlation coefficients between the flow of the Roya, observed the day before, and surface salinities measured for stations 14-23-15-16. From 1976 to 1978 the highest correlation increases from east to west: i. e. one day in the bay of Menton (14) to three days in Beaulieu bay (15). From 1979 to 1983 the correlation coefficients are greater than during the preceding three-year period; in the bay of Monaco the lag of the highest correlation is four days as compared to two days during the first period; for the two periods, the lag corresponding to the highest correlation is less selective offshore (station 16) than inshore.

de deux jours correspondant au maximum de corrélation observé dans la baie. La pente décroît de manière significative (test de Student) d'est en ouest de 0,104 ‰ m<sup>-3</sup>s à la station 14, jusqu'à 0,050 ‰ m<sup>-3</sup>s à la station 15. La pente décroît aussi de la côte vers le large de 0,144 ‰ m<sup>-3</sup>s à la station 11 à 0,054 ‰ m<sup>-3</sup>s à la station 25 en bordure de la baie, le long de la ligne des caps. Les zones proches du rivage, et plus particulièrement de l'embouchure des torrents locaux, où se trouvent les stations 4, 7 et 11 (fig. 2) sont donc, avec les pentes les plus importantes, sous l'influence prépondérante des eaux de ruissellement. Les variations de salinité dans la baie sont aussi régies par un flux d'eau douce plus important et d'origine plus lointaine. En effet ces variations pourraient provenir de celles obser-

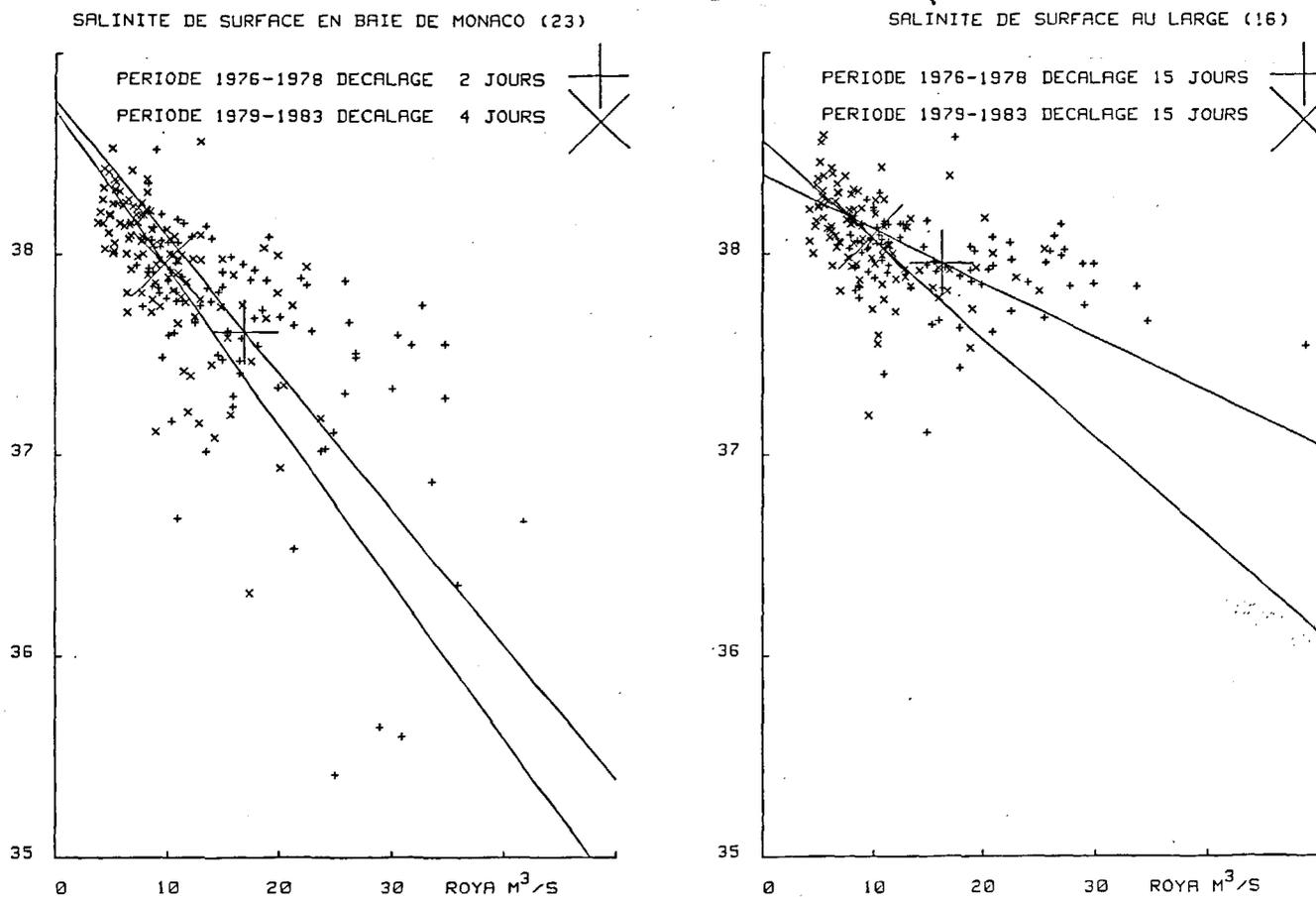


Figure 6

Comparaison des droites de régression entre le débit de la Roya et les salinités observées au centre de la baie à la station 23 : figure 6 a ; plus au large, à la station 16 : figure 6 b, pendant les périodes 1976-1978 (+) et 1979-1983 (x). La pente est plus importante à la côte qu'au large; elle est plus importante pendant la deuxième période que pendant la première. Le changement de pente entre les deux périodes est plus important au large qu'à la côte.

Comparison of regression lines between the flow of the Roya and the salinities observed at the centre of the bay, station 23 (Fig. 6 a), and further offshore at station 16 (Fig. 6 b), during the periods 1976-1978 (+) and 1979-1983 (x). The slope is greater inshore than offshore; it is also greater during the second period than during the first. The slope's difference between the two periods is greater offshore than inshore.

vées sur le débit de la Roya, compte tenu de la croissance du décalage du maximum de corrélation et de la diminution de la pente de la relation en fonction de la distance entre l'embouchure et le centre des baies considérées (stations 14, 23, 15) de Menton à Beaulieu (fig. 5).

A la station 16, à 11 km de la côte, l'influence de l'eau de la Roya est plus incertaine. Le décalage du maximum de corrélation est de quinze jours ; la relation est beaucoup moins sélective qu'à la côte (fig. 5) ; la pente est ramenée à  $0,026 \text{ ‰ m}^{-3}\text{s}$ . Les variations de salinité seraient alors régies en plus par une eau d'origine encore plus lointaine, de salinité  $S_1$  non nécessairement nulle; elles seraient représentatives de celles du courant ligure modulées par des apports tels que celui de l'Arno.

#### Relations entre la salinité côtière et le débit de la Roya de 1979 à 1983

Les observations précédentes sont complétées et confirmées par une étude semblable menée à partir des mesures effectuées entre 1979 et 1983. Pendant cette période, le débit moyen de la Roya a été de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  au lieu de  $16 \text{ m}^3/\text{s}$  de 1976 à 1978.

#### En surface : comparaison avec la période précédente

Les coefficients de corrélation et la pente de la relation entre le débit de la Roya et les séries relatives aux salinités de surface sont directement comparables à ceux se rapportant à la première période aux stations 18, 23 et 30. Dans la baie, le décalage correspondant au maximum de corrélation est de quatre jours au lieu de deux en première période (fig. 5). Au large, à la station 16, par contre, aucune différence n'est observable. La pente de la relation est, comme en première période, plus élevée à la côte qu'au large. Mais, pour un même point, elle est systématiquement plus importante en deuxième période qu'en première, la différence de pente entre les deux périodes, statistiquement significative, étant plus grande au large qu'à la côte (fig. 6).

Il en résulte que le temps de parcours de l'eau douce entre sa zone d'injection à la côte et la baie est deux fois plus grand de 1979 à 1983 que de 1976 à 1978. La même variation du débit de la Roya entraîne une variation de salinité systématiquement plus élevée en deuxième période. En outre cette variation de salinité est plus importante au large qu'à la côte.

#### Sur la colonne d'eau

Pour les quatre stations visitées - 16, 18, 23, 30 - le contenu halin est estimé de la surface jusqu'à chacune des profon-

deurs standards, 200 m au témoin, d'où la constitution de 27 séries. Le décalage correspondant au maximum du coefficient de corrélation calculé entre la série représentant le débit de la Roya et les 27 séries représentant les contenus

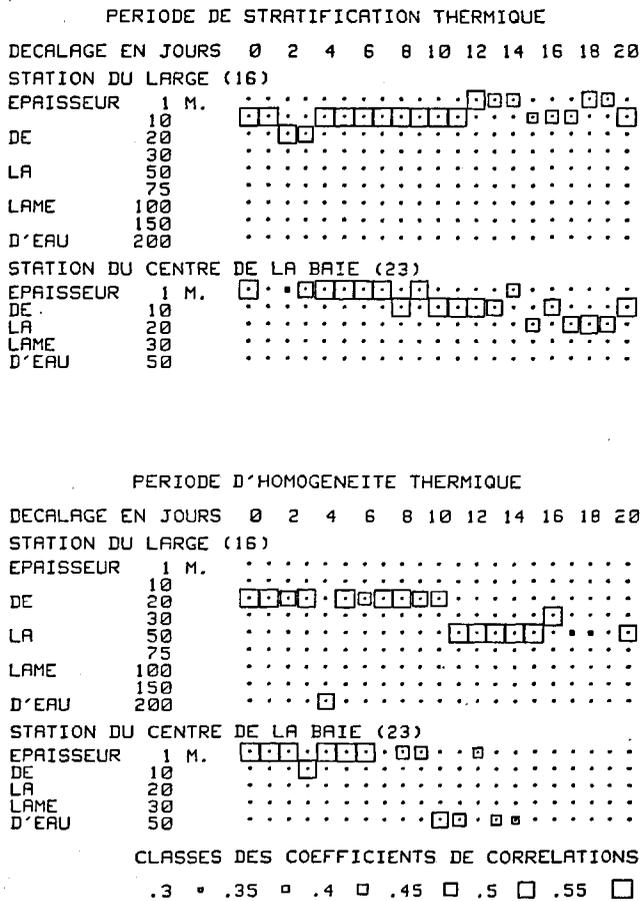


Figure 7

Tableau des variations comparées du maximum des coefficients de corrélation entre le débit de la Roya observé les jours précédant les campagnes de prélèvements (colonnes) et le contenu halin des profils à la station du large (16), au centre de la baie (23) calculé pour chacune des profondeurs standard (lignes). En haut, la comparaison se rapporte à la période de stratification thermique des eaux, caractérisée par une température de surface supérieure à 15°C. En bas, la comparaison se rapporte à la période d'homogénéité, caractérisée par une température inférieure à 15°C. Seules les corrélations de valeurs supérieures à 0,3 sont rapportées sur le tableau ; les classes sont définies en bas du tableau. A la côte, le maximum de corrélation s'observe toujours pour des épaisseurs d'eau moins importantes qu'au large. A la côte comme au large, le maximum de corrélation s'observe toujours pour des épaisseurs d'eau moins importantes en période de stratification qu'en période d'homogénéité thermique. Sur un même profil, les valeurs des coefficients de corrélation maximale sont toujours plus importants en période de stratification qu'en période d'homogénéité thermique.

*Table of compared variations of the highest correlation coefficients between the Roya flow observed on the days preceding the sampling cruises (columns) and salt content along a profile at the offshore station (16) and at the centre of the bay (23) calculated at each standard depth (lines). Top: The comparison is related to the water's thermic stratification period characterized by a surface temperature greater than 15°C. Bottom: the comparison is related to the water's thermic homogeneity period characterized by a temperature less than 15°C. Only the correlations higher than 0.3 are shown on the Table. The classes are defined beneath the table. Inshore the highest correlation is always observed for thinner water lenses than offshore. Inshore and offshore, alike, the correlation observed is always higher for thinner water lenses during the stratification period than in the well-mixed period. For the same profile the correlations are always higher during the period of stratification than during periods of thermal homogeneity.*

halins croît régulièrement en fonction de l'éloignement à la côte et de l'épaisseur d'eau considérée. Les pentes de chacune des régressions diminuent encore de la côte vers le large.

Un complément d'information est obtenu en séparant les dates des prélèvements en deux groupes. Le premier groupe se rapporte à la période estivale, caractérisée par la stratification thermique des eaux, le second en hiver à la période où la température est constante sur tout le profil (fig. 7). En période de stratification thermique, pour un décalage inférieur à dix jours, le maximum de corrélation s'observe toujours en surface dans la baie et dans les dix premiers mètres à la station 16. Au-delà de dix jours, le maximum de corrélation s'observe pour des épaisseurs d'autant plus importantes que le décalage croît, sauf hors de la baie, au large à la station 16 où les corrélations ne sont plus significatives pour les contenus halins des couches d'eau, comptées à partir de la surface, supérieures à 10 m.

En période d'homogénéité thermique, pour un décalage inférieur à dix jours, le maximum de corrélation s'observe en surface dans la baie et dans les vingt premiers mètres au large à la station 16. Au-delà de dix jours, les coefficients de corrélation ne sont plus significatifs dans la baie ; à la station du large, le décalage correspondant au maximum de corrélation croît en fonction de l'épaisseur d'eau considérée.

Ces observations mettent en évidence le rôle de barrière joué par la thermocline sur la vitesse de mélange de l'eau douce avec l'eau de mer. Cette vitesse de mélange se rapporte à une zone dont la largeur et l'épaisseur s'apprécient à partir de la distance à la côte du point d'observation et de la profondeur pour laquelle le contenu halin est calculé. La zone de mélange s'étend d'autant plus vers le large et se localise d'autant plus en surface qu'elle s'observe par temps beau (faible pluviométrie), chaud (milieu stratifié) et calme (temps de parcours plus important). On conçoit aisément qu'en période estivale l'eau douce confinée au dessus de la thermocline se répartisse plus facilement vers le large.

## INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

### Distance de propagation de l'eau douce locale devant Monaco

La comparaison des observations effectuées durant les deux périodes apporte des informations sur la distance de propagation de l'eau douce vers le large.

En effet, le débit d'eau douce passant devant Monaco est proportionnel à celui de la Roya et est égal au produit «e.b.v», avec e l'épaisseur de la lame d'eau douce, b la largeur de la bande côtière, v la vitesse de l'écoulement parallèle à la côte. Si R est le débit de la Roya, T le temps de transit entre l'embouchure de la Roya et la baie de Monaco, on constate, en comparant les deux périodes auxquelles on affecte respectivement les indices 1 et 2 :

$$(e_1 b_1 v_1) / (e_2 b_2 v_2) = R_1 / R_2$$

$$v_1 / v_2 = (T_1 + \Delta T) / T_1 \text{ avec } T_2 - T_1 = \Delta T$$

Pour ce simple calcul, on suppose ici, par idéalisation, que le coefficient de proportionnalité est le même durant les deux périodes.

Selon les observations  $e_1/e_2 = 2$ ,  $R_1/R_2 = 1,6$   $\Delta T = 2$  jours et  $T_1 = 2$  jours, d'où :

$b_1/b_2 = 1/2,5$  ;  $T_2 = 4$  jours ;  $v_1 = 9,3$  cm/s pour la période 1976-1978 et  $v_2 = 4,6$  cm/s pour la période 1979-1983. Pour ce calcul des vitesses, la distance entre l'embouchure de la Roya et la baie de Monaco a été prise égale à 16 km.

Il apparaît que, pendant la deuxième période, les eaux douces se sont étalées environ trois fois plus vers le large que pendant la première période ( $b_1/b_2 = 1/2,5$ ), alors que pendant la première période le débit de la rivière était 60 % plus fort, et la vitesse du courant deux fois plus grande. Or cette deuxième période se caractérise par une sécheresse (N. Béthoux *et al.*, 1983) qui conduit à un flux plus faible du courant ligure (Prieur *et al.*, 1983). On conclut, en admettant que la sécheresse soit une conséquence de conditions météorologiques clémentes, que l'eau douce déversée à la côte se détecte d'autant plus loin et d'autant plus longtemps que l'on se trouve en période de beau temps.

### Temps de transit

De 1976 à 1978, le décalage correspondant au maximum de corrélation entre les séries représentant le débit de la Roya et la salinité des baies de Menton, Monaco et Beaulieu est respectivement 1, 2, 3 jours pour des distances de 9, 16, 20 km. Les vitesses apparentes de déplacement de l'eau douce en mer sont 10,4 et 7,7 cm/s pour atteindre respectivement les baies de Menton et de Beaulieu ; elles sont décroissantes en fonction de l'éloignement du point d'injection, sans doute en raison de l'étalement vers le large de cette eau douce. Néanmoins, elles restent proches de la vitesse trouvée au paragraphe précédent.

Par ailleurs, les décalages de un à trois jours observés sont la somme des temps nécessaires au parcours de l'eau douce dans le lit de la Roya, de la station de mesures à l'embouchure et, en mer, entre celle-ci et les baies. Si la vitesse dans le lit de la Roya est extrêmement rapide, soit à la limite un temps de transit nul, les vitesses de déplacement calculées en mer sont alors des vitesses minimales. Ces vitesses se rapportant à la période 1976-1978 sont deux fois plus importantes que la moyenne de celles observées devant le rocher de Monaco à 20 m de profondeur entre 1981 et 1983 (Boisson *et al.*, 1985). On en conclut que l'eau douce, entraînée par les courants marins, se déplace en moyenne d'autant plus lentement le long des côtes que les conditions météorologiques sont plus clémentes.

### Flux total d'eau douce transitant devant Monaco

Lors de l'étude des corrélations entre les contenus halins de la couche de surface et le débit de la Roya, une corrélation significative a été trouvée pour la station 16 du large, bien que plus faible que pour les stations côtières (fig. 5). La question se pose de déterminer si le débit de la Roya est suffisant pour expliquer les variations de salinité à une distance si grande de la côte, soit 14 km, et, d'une manière générale, s'il explique l'ensemble des variations des contenus halins sur la section entre la station 16 et la côte. Si la

réponse est négative, d'autres apports d'eau douce doivent être invoqués, eux mêmes corrélés avec le débit de la Roya.

On cherche donc à évaluer le flux d'eau douce, équivalent aux variations de  $S$ , qui traverse la section de  $L = 14$  km de long et de profondeur  $h$ , gardée en variable. Il sera comparé au débit de la Roya. Pour faire le calcul, on a utilisé les mesures effectuées de 1979 à 1983 au point 16, au large, aux points 18 et 30, regroupés en une moyenne  $M$  pour représenter les variations observées à la limite de la baie et au point 23, au centre de la baie. Les distances respectives  $L_i$  de la côte aux points 23,  $M$  et 16 sont 1 800, 1 200 et 11 000 m. A chacun des trois points 23,  $M$  et 16 ont été calculées les variations  $(S_2 - S)_i$  qui auraient été observées pour une variation de 1 % du débit de la Roya en utilisant les trois droites de régression obtenues pour l'épaisseur  $h$  considérée.  $S_2$  est la salinité moyenne dans la couche  $h$  pour le débit moyen de la Roya, 10 m<sup>3</sup>/s, sur la période considérée et  $S$ , la salinité moyenne avec un débit augmentant de 1 %. En utilisant  $S_2$  comme salinité de référence et la relation (1), l'écart  $(S_2 - S)_i$  est converti en  $H_{1i}$ , hauteur équivalente d'eau douce sur un milieu de salinité  $S_2$  et d'épaisseur  $h$ . Le flux  $F$  au travers de la section est ensuite évalué par la relation :

$$F = v \sum L_i H_{1i}$$

avec  $\sum L_i = L$ , traduisant la somme des flux passant entre les stations. La vitesse moyenne  $v$  de l'eau est évaluée à 5 cm/s perpendiculairement à la section, d'après les mesures réalisées en un site proche (Boisson *et al.*, 1985).

Lorsque, pour le calcul, la profondeur  $h$  est prise égale à 1 m, on trouve un débit d'eau douce de 86 l/s à comparer au 1 % du débit de la Roya, soit 100 l/s. Le variation du débit de la Roya est équivalent au débit virtuel d'eau douce contenue dans la bande côtière de 14 km de large et de 1 m d'épaisseur. Ceci est conforme à ce que l'on connaît de la localisation en surface du panache des rivières (O'Donnel, 1990 ; Cruzado et Velasquez, 1989). Mais si la profondeur  $h$  de 50 m est choisie, le débit total d'eau douce est trouvé égal à 2890 l/s, soit plus de 28 fois supérieur à celui de la Roya. Ce calcul tient compte de la bathymétrie lorsqu'elle est inférieure à 50 m. En prenant des épaisseurs  $h$  plus grandes, on trouverait des valeurs encore supérieures. En effet, entre le calcul pour  $h = 1$  m et  $h = 50$  m,  $S_2$  ne change que de 37,99 à 38,05, c'est-à-dire relativement peu comparé à 38,40 qui est la valeur trouvée en profondeur à la station 16. Le calcul a été effectué pour une variation de débit de 1 %, afin de ne pas extrapoler la salinité à des valeurs trop éloignées de celles observées. On doit cependant noter que, simple hasard ou résultat significatif, les salinités trouvées, d'après les droites de régression, aux trois points, 16,  $M$  et 23 pour un débit nul de la Roya sont toutes proches de 38,60, valeur non éloignée de celle de l'eau intermédiaire observée en profondeur lors de son entrée en Mer Ligure, en provenance de la Méditerranée orientale.

On a donc trouvé que l'ensemble des variations de salinité ne peuvent être attribuées aux variations de débit de la Roya. L'ensemble des apports d'eau douce sur les 140 km de côte entre Gênes et Monaco, ne représente même en moyenne que le sixième des flux équivalents d'eau douce au travers de la section de 50 m d'épaisseur devant Monaco.

On en conclut que les variations de salinité observées devant Monaco, dans les deux cents premiers mètres, dans une bande côtière de 14 km de large, ont une origine beaucoup plus lointaine que l'eau douce injectée par la Roya, et même que celle provenant de l'ensemble des bassins versants de la mer ligurienne. Il s'agirait alors d'eau d'origine atlantique dont les variations de débit seraient corrélées, tout comme la pluviométrie du bassin versant de la Roya, aux conditions météorologiques prévalant sur l'ensemble de l'Atlantique Nord et de l'Europe. Ces variations de débit auraient une influence à long terme sur la salinité du courant ligurien, et expliqueraient les changements de corrélation (intensité et pente), également à long terme, entre les contenus halins à la côte et au large d'une part et le débit de la Roya d'autre part.

## CONCLUSION

Le temps d'arrivée de l'eau douce devant Monaco dépend de son lieu d'émission et des conditions météorologiques. Il est immédiat (quelques heures) pour celle provenant de l'amphithéâtre de la baie canalisée dans le réseau unitaire de récupération des eaux résiduaires (Anonyme, 1986) ; de quelques jours pour celle de la Roya dont l'embouchure est distante d'une vingtaine de kilomètres ; de une à deux décades pour celle de l'Arno, dont l'embouchure est distante de plus de 100 km (Bong, 1983). Le temps de parcours s'accroît lorsque les conditions climatiques, devenant plus clémentes, provoquent un ralentissement de la vitesse de mélange et de déplacement des masses d'eau. Ces ralentissements seraient la cause d'une propagation beaucoup plus importante de l'eau douce vers le large.

## RÉFÉRENCES

- Anonyme (1986). Estimation du débit de la station de pompage des eaux résiduaires de la Quarantaine. Contrat C.S.M./T.P.
- Anonyme (1988). Un siècle d'observations météorologiques à Monaco. *Bull. Cent. scient. Monaco*, 3, 79 pp.
- Astraldi M., M. Boisson, G.P. Gasparini et J.-L. Rapaire (1988). La dynamique des courants devant Monaco. *Rapp. P.-v. Réunion. Comm. int. Explor. scient. Mer médit.*, 31, 2, 198.
- Astraldi M., G.P. Gasparini, G.M.R. Manzella et T.S. Hopkins (1990). Temporal variability of currents in the Eastern Ligurian sea. *J. geophys. Res.*, 95, C2, 1515-1522
- Béthoux J.-P., L. Priour et F. Nyffeler (1982). The water circulation in the North Western Mediterranean sea, its relations with wind and atmospheric pressure, in : *Hydrodynamics of semi-enclosed seas*. J.C.J. Nihoul, éditeur. Elsevier, Amsterdam, 129-142.
- Béthoux N., M. Boisson, J.-L. Rapaire et R. Vaissière (1983). Anomalies de salinité observées en 1981-1982 dans la baie de Monaco. *Rapp. P.-v. Réunion. Comm. int. Explor. scient. Mer médit.*, 28, 2, 163-168.
- Boisson M., J.-L. Rapaire et R. Vaissière (1985). Les conditions de courant en mer de Monaco. *Rapp. P.-v. Réunion. Comm. int. Explor. scient. Mer médit.*, 29, 3, 115-118.
- Bong J.H. (1983). Contribution à l'étude du courant ligurien et de sa variabilité spatio-temporelle à moyennes échelles. *Thèse, Université Paris VI*, 83 pp.
- C.E.T.A.M.A. (1986). *Commission de l'Établissement des Méthodes d'Analyse du Commissariat à l'Énergie Atomique. Statistique appliquée à l'exploitation des mesures*. Masson Éd., 2<sup>ème</sup> édition, 596 pp.
- Cruzado A. et Z.R. Velasquez (1989). *Nutrient distributions in the gulf of Lions, winter 1989. Water pollution research report 13 E.R.O.S. 2000*. J.-M. Martin et H. Barth, éditeurs. Ministère de la Science et de la Technologie, Paris, 67-78.
- Gostan J. (1967). Remarques sur les minimums de salinités observés dans les eaux littorales du golfe de Gênes. *Cah. océanogr.*, 19, 6, 469-476.
- Millot C. et L. Wald (1980). The effect of mistral wind on the Ligurian current near Provence. *Oceanologica Acta*, 3, 4, 399-402.
- O'Donnel (1990). The formation and fate of a river plume : a numerical model. *J. phys. Oceanogr.*, 20, 4, 551-569.
- Priour L., J.-P. Béthoux, J.H. Bong et D. Taillez (1983). Particularités hydrologiques et formation d'eau profonde dans le bassin liguro-provençal. *Rapp. P.-v. Réunion. Comm. int. Explor. scient. Mer médit.*, 28, 2, 51-53.

Le volume d'eau douce virtuel contenu dans le premier mètre sous la surface de la baie est égal à celui débité par la Roya en quelques heures.

Le débit virtuel d'eau douce dans une section de bande côtière d'une quinzaine de kilomètres de large est beaucoup plus important que celui fourni par la pluie sur l'ensemble des bassins versants de la mer Ligurienne. Il s'ensuit que les fluctuations de salinité à long terme observées, de 1978 à 1983 dans cette section sont attribuées pour partie, aux variations de débit de l'eau d'origine atlantique en Méditerranée.

Il n'est alors pas nécessaire d'imaginer une relation directe expliquant les corrélations observées entre les variations du débit de la Roya et les salinités devant Monaco. Les variations de ces deux paramètres seraient régies par celles d'un troisième : les conditions météorologiques à très grande échelle.

## Remerciements

Ce travail est fondé sur l'analyse de prélèvements, de mesures et d'observations effectués par le Centre Scientifique de Monaco dans le cadre du contrat CEE/CSM Env-500- F (S.D.) : Recherche sur la dynamique des éléments polluants dans des systèmes marins caractéristiques de la Méditerranée avec application et analyse d'une méthodologie de portée générale. Nous en remercions nos collègues et l'équipage des N.O. *Winaretta-Singer* et *Ramoge*. Les recherches ici exposées ont également été effectuées dans le cadre de l'unité associée au CNRS, U.R.A. 353.

