

Étude de l'apport atmosphérique en sels nutritifs au milieu côtier méditerranéen et implications biogéochimiques

Méditerranée
Pluies
Éléments nutritifs
Production primaire
Dépôt atmosphérique
Mediterranean
Rainfall
Nutrients
Primary production
Atmospheric deposition

Christophe MIGON ^{a,b}, Gérard COPIN-MONTEGUT ^b, Lucien ÉLEGANT ^a, Jacques MORELLI ^c

^a Laboratoire de Thermodynamique Expérimentale, Université de Nice, Parc Valrose, 06034 Nice Cedex.

^b Laboratoire de Physique et Chimie Marines, UA CNRS, BP8, La Darse, 06230 Villefranche-sur-Mer.

^c Institut de Biogéochimie Marine, UA CNRS n° 386, École Normale Supérieure, 1, rue Maurice Arnoux, 92120 Montrouge.

Reçu le 2/5/88, révisé le 13/10/88, accepté le 24/10/88.

RÉSUMÉ

L'apport de nitrates, ammonium et phosphates par les précipitations a été mesuré pendant deux années à la station de prélèvements atmosphériques implantée au sémaphore du Cap Ferrat, sur la côte méditerranéenne française. Les concentrations de ces sels nutritifs dans l'eau de pluie s'avèrent extrêmement variables d'un épisode pluvieux à l'autre, les valeurs associées aux précipitations de faible durée étant généralement plus élevées que celles des pluies persistantes. La variabilité temporelle des flux de matière correspondants est cependant moins marquée, tant à l'échelle mensuelle qu'à l'échelle annuelle. Ainsi, la pluviosité a varié presque du simple au double (549 et 947 mm), et les flux d'azote inorganique des années 1986 et 1987 (nitrates + ammonium) sont assez voisins (43 600 et 51 900 mole. km⁻². an⁻¹), et proches de ceux observés dans des conditions de plus forte pluviosité par Loye-Pilot *et al.* (1988) en Corse du Sud. Les résultats conduisent à une évaluation de la retombée atmosphérique humide en azote et phosphore sur le bassin méditerranéen. Il apparaît que l'apport atmosphérique contribue de façon très significative au bilan de l'azote en Méditerranée et plus modestement à celui du phosphore. L'impact de cet apport sur la productivité primaire paraît faible dans des conditions hivernales de recyclage vertical des sels nutritifs accumulés en profondeur. Par contre, en période estivale, le dépôt atmosphérique pourrait être une source majeure d'approvisionnement des eaux superficielles alors bien isolées des eaux sous-jacentes, tout au moins dans des zones marines peu soumises à l'influence des rejets continentaux.

Oceanologica Acta, 1989. 12, 2, 187-191.

ABSTRACT

Atmospheric input of nutrients to the coastal Mediterranean area. Biogeochemical implications

The input of nitrates, ammonium and phosphates by rainfall to the Mediterranean was measured over a period of two years at the atmospheric sampling station situated at the Cap Ferrat meteorological base, on the French Mediterranean coast. The concentrations of these nutrients in precipitation events appear to be very variable and the values are generally higher in brief episodes. Nevertheless, there is little temporal variability of the associated inputs, within a month as well as within a year. Thus, the inorganic nitrogen fluxes during 1986 and 1987 are fairly similar (43,600 and 51,900 mole. km⁻². year⁻¹), while rainfall is very different (549 and 947 mm), and are comparable with the fluxes observed by Loye-Pilot *et al.* (1988) at the Bavella Pass, in Southern Corsica, where rainfall was heavier. These results enabled us to estimate wet atmospheric input of nitrogen and phosphorus into the Mediterranean basin.

It would seem that the atmospheric contribution is very significant in the nitrogen budget (and, to a lesser extent, in the phosphorus budget) for the Mediterranean. This input probably has a weak effect on primary production in winter, in contrast with the upwelling of nutrient-rich deep water. However, in summer, due to the stratified water column, the atmospheric input could constitute a major source of nitrogen and phosphorus for the Mediterranean.

Oceanologica Acta, 1989. 12, 2, 187-191.

INTRODUCTION

Dans le cadre d'une coopération entre plusieurs laboratoires, des recherches sur l'apport de matière par voie atmosphérique ont débuté en 1986 dans l'environnement côtier méditerranéen. Depuis cette époque, des prélèvements d'aérosols et de précipitations sont effectués régulièrement au sémaphore du Cap Ferrat, sur la Côte d'Azur, entre Nice et Monaco. Ce site d'échantillonnage se trouve à 130 m au-dessus du niveau de la mer, face au large, dans une zone faiblement urbanisée, au sommet d'un promontoire rocheux qui ferme à l'est la rade de Villefranche. L'objectif général des travaux entrepris est d'étudier la variabilité temporelle de l'apport atmosphérique en métaux traces et sels nutritifs, d'évaluer les flux de matière qui lui sont associés et d'apporter ainsi des données de base utiles à la mise en évidence de leur impact sur les bilans géochimiques dans le bassin méditerranéen. L'accent est mis ici sur l'interprétation de résultats relatifs au dépôt humide en nitrates, ammonium et phosphates par les précipitations.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

La collecte des précipitations, effectuée en continu sur deux ans, est réalisée grâce à un pluviomètre à ouverture automatique constitué d'un entonnoir de polyéthylène d'un diamètre de 276 mm. Les eaux de pluie sont filtrées par simple gravité sur des membranes Sartorius SM1110647 en acétate de cellulose de porosité 0,45 µm préalablement lavées sous ultrasons par une solution d'acide chlorhydrique suprapur 1 à 2 N. Les échantillons sont enfin recueillis dans des godets de polyéthylène, à l'abri de la lumière. Un tel appareillage a déjà été décrit et utilisé (Migon, 1988; Nurnberg *et al.*, 1984). Dès que l'événement pluvieux prend fin, l'échantillon est immédiatement analysé ou mis à congeler par -20°C, selon les possibilités, afin de prévenir une possible évolution des concentrations des constituants mesurés.

Les dosages sont effectués au moyen d'un analyseur automatique Technicon, suivant les protocoles décrits par exemple par Grasshoff (1976). Sans dilution, les seuils de détection sont les suivants :

NO_3^- : 0,22 µmole.l⁻¹
 NH_4^+ : 0,07 µmole.l⁻¹
 NO_2^- : 0,04 µmole.l⁻¹
 PO_4^{3-} : 0,04 µmole.l⁻¹

Au niveau de la reproductibilité des résultats, l'erreur est toujours inférieure à 10%.

RÉSULTATS

Avant d'examiner les résultats obtenus, il est utile d'indiquer les caractéristiques des précipitations dans la zone d'observation. La climatologie de la frange littorale méditerranéenne des Alpes-Maritimes est bien documentée grâce aux longues séries d'observations recueillies par les stations météorologiques locales (depuis 1892 à Nice, rue Gioffredo, station de la Compagnie Générale des Eaux; depuis 1911 au Musée Océanographique de Monaco; Tschaele-Appert, 1962; C.S.M., 1988). Le régime des pluies est typiquement méditerranéen. Les précipitations sont rares, 63 jours en moyenne par an, mais abondantes, le total annuel moyen avoisinant 760 mm. Il existe un fort déséquilibre saisonnier de ces pluies, les mois pluvieux étant sans conteste octobre et novembre qui concentrent presque un tiers des précipitations annuelles, alors que juillet et août sont particulièrement secs. Il faut noter que le nombre de jours de pluie des mois les plus arrosés demeure faible : 7 à 8 jours par mois pour octobre et novembre, la pluviosité globale de ces mois étant en partie due à l'intensité des pluies automnales. Les précipitations ont donc en toutes saisons un caractère épisodique et en dehors de l'alternance générale saison humide-saison sèche, elles sont réparties très irrégulièrement tout au long de l'année.

La variation interannuelle du régime des pluies est également très forte. L'écart-type calculé sur 75 années est de 210 mm. Autrement dit, pratiquement une année sur trois se trouve au-dessus de 970 mm ou en dessous de 550 mm, le record d'humidité étant de 1 377 mm en 1916 et celui de la sécheresse étant de 253 mm en 1921. La variabilité du bilan annuel est en grande partie conditionnée par les aléas climatiques de la saison automnale qui peut être anormalement sèche (par exemple 0 mm en novembre 1954, 1981 et 1983) ou excessivement arrosée (450,8 mm en novembre 1926).

Dans ce contexte, une exploitation fiable des données concernant les retombées des constituants atmosphériques par voie humide ne peut se faire qu'à condition de disposer de séries d'observations ininterrompues sur de longues périodes. Les mesures que nous avons effectuées tout au long des années 1986 et 1987 tendaient à répondre à cette exigence. Comme on peut le voir sur la figure 1, l'année 1986 est typiquement une année sèche avec 549 mm de pluie et 1987 une année humide

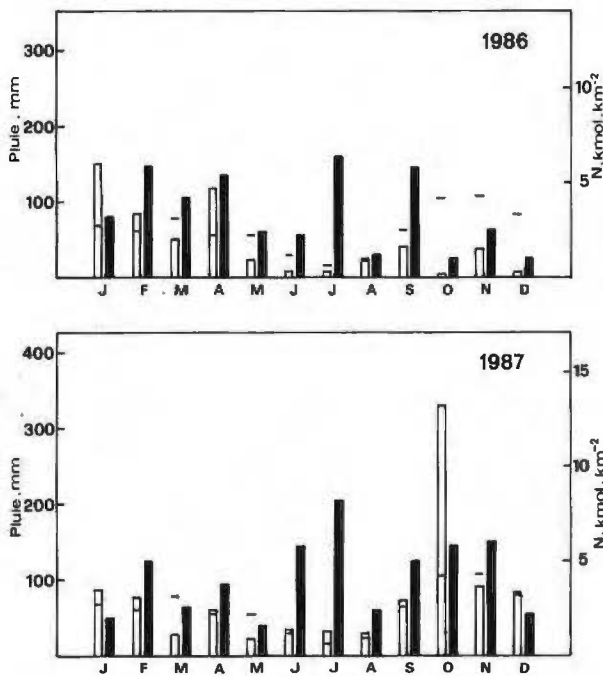


Figure 1

Histogrammes donnant la pluviométrie mensuelle et le dépôt mensuel d'azote total au cours des années 1986 et 1987. Les hauteurs de pluie (mm) sont figurées en blanc; les traits horizontaux correspondent au niveau moyen de la pluviométrie mensuelle calculé sur 75 ans. Les flux d'azote (kmole/km^2) sont figurés en noir.

Histograms showing monthly rainfall and monthly deposits of nitrates in 1986 and 1987. Rainfall (mm) is shown in white. Horizontal lines show mean monthly rainfall calculated over a period of 75 years. Nitrate fluxes (kmole/km^2) are shown in black.

avec 947 mm. On notera en particulier les différences de pluviométrie des mois d'octobre 1986 et 1987, respectivement 2,8 mm et 330,7 mm.

Les concentrations en PO_4^{3-} , NO_3^- , NO_2^- et NH_4^+ mesurées au cours des divers épisodes pluvieux sont étroitement liées à l'origine des masses d'air, notamment pour NH_4^+ et plus encore NO_3^- qui sont caractéristiques des apports d'origine anthropique (Loye-Pilot *et al.*, 1986; Migon, 1988). Les niveaux de concentration sont généralement plus élevés dans les échantillons correspondant à des pluies de faible durée que dans des échantillons de pluies persistantes car l'atmosphère se trouve en partie nettoyée au cours des premiers instants de la pluie: par exemple, 106 $\mu\text{moles NO}_3^- \cdot \text{N}/\text{l}$ dans une pluie de 0,2 mm de hauteur le 8 octobre 1987 et 2,1 $\mu\text{moles NO}_3^- \cdot \text{N}/\text{l}$ dans une pluie de 109,5 mm les 10 et 11 octobre 1987.

Calculé sur les deux années 1986 et 1987, le rapport d'abondance entre phosphore et azote dans les retombées est d'environ 1 mole de PO_4^{3-} pour 60 moles de NO_3^- et 40 moles de NH_4^+ . Dans un bilan des retombées humides d'azote, les nitrites sont négligeables car leur concentration est 100 à 1 000 fois plus faible que celle des nitrates. Sur la figure 1, les flux humides d'azote total ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$), disposés mensuellement, sont placés en regard des données pluviométriques des années 1986 et 1987. Ces flux totaux sont calculés par le cumul des apports associés aux événements pluvieux successifs: c'est la somme des produits des concentrations par les hauteurs de pluie correspondantes.

La relation entre les valeurs mensuelles de pluviométrie et les quantités de sels nutritifs déposés n'est pas flagrante. A l'évidence, une pluviométrie faible est en partie compensée, à l'échelle du mois comme à l'échelle de l'année, par des concentrations plus fortes. Ainsi, la variabilité des flux d'azote déposés paraît moins grande que celle de la pluviométrie. Le flux humide total d'azote au cours de l'année 1986 s'élève à 43 600 $\text{moles} \cdot \text{km}^{-2}$ et 51 900 $\text{moles} \cdot \text{km}^{-2}$ pour l'année 1987. Ces valeurs sont en bonne concordance avec les résultats obtenus par Loye-Pilot *et al.* (1988) dans le sud de la Corse, au col de Bavella, résultats qui sont comparés avec les nôtres dans le tableau 1.

DISCUSSION

Les rares données disponibles concernant l'apport atmosphérique humide en azote au milieu océanique font apparaître des niveaux de base de 3 500 à 7 000 $\text{moles} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ dans des zones situées à l'écart de l'influence des continents (Pacifique et sud de l'Océan Indien) et des flux d'environ 10 000 $\text{moles} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ dans des régions où celle-ci se manifeste davantage (Bermudes, Atlantique Nord; Duce, 1985). Les valeurs figurant dans le tableau 1 semblent donc assez représentatives d'une zone maritime soumise à des apports continentaux à la fois naturels et anthropiques.

L'extrapolation de ces valeurs à la partie nord occidentale du bassin méditerranéen nécessite de tenir compte du fait que les pluies au large en Mer Méditerranée sont de moitié moins abondantes que les précipitations enregistrées par les stations météorologiques côtières — environ 335 mm par an pour l'ensemble du bassin occidental (Béthoux, 1977). On peut alors effectuer une

Tableau 1

Comparaison des flux humides d'azote calculés à partir des résultats du Cap Ferrat avec ceux obtenus au Col de Bavella (Corse) par Loye-Pilot *et al.* (1988).

Comparison of wet atmospheric input of nitrogen calculated from results at Cap Ferrat with fluxes observed by Loye Pilot *et al.* at the Bavella Pass (Corsica), in 1988.

Observatoire	Année	Hauteur des pluies en $\text{mm} \cdot \text{an}^{-1}$	Flux humide d'azote total $\text{mole} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$	Concentration moyenne $\mu\text{mole}/\text{l}$
Col de Bavella	1984	1835	54 000	29,4
Corse, d'après	1985	1 146	46 000	40,1
Loye-Pilot <i>et al.</i>	1986	1815	54 700	30,1
Nos mesures	1986	549	43 600	79,4
du Cap Ferrat	1987	947	51 900	54,8

réduction des flux observés à la côte. Cependant, le facteur de réduction est très vraisemblablement inférieur à 2, compte tenu du fait, précédemment signalé, que l'efficacité du nettoyage atmosphérique n'est pas directement proportionnelle à la hauteur des précipitations. Nous retiendrons donc comme ordres de grandeurs : 30 000 moles de N total et 500 moles de phosphore annuellement déposés par km² de surface marine. Une extrapolation à l'ensemble de la Mer Méditerranée nécessite une réduction des valeurs moyennes de flux car il est probable que la composante anthropique est, en de nombreuses zones, plus faible que dans le bassin nord-occidental, notamment dans le bassin oriental. Compte tenu de l'incertitude liée à l'extrapolation au bassin méditerranéen, il nous a paru prudent de retenir une fourchette de valeurs relativement large. Les valeurs moyennes pourraient être comprises entre un maximum de 30 000 et un minimum de 10 000 moles de N total.km⁻².an⁻¹, cette borne inférieure correspondant aux valeurs de l'Atlantique Nord.

Pour le phosphore, en conservant le rapport N/P ~ 60, on se situerait dans une fourchette de 160 à 500 moles.km⁻².an⁻¹.

Ces valeurs de flux, étendues aux 2,5 10⁶ km² de la Méditerranée sont confrontées, dans le tableau 2, aux autres termes du bilan global de l'azote et du phosphore discuté par Béthoux (1981) et par Béthoux et Copin-Montegut (1986).

En ce qui concerne le phosphore, le terme correspondant aux apports atmosphériques est modeste si on le compare aux déversements continentaux. Toutefois, la prise en compte du terme atmosphérique fait apparaître un léger déséquilibre positif qui pourrait être accentué dans l'éventualité d'un apport supplémentaire de phosphore organique dissous par les eaux superficielles atlantiques entrant à Gibraltar. De toute manière, un déséquilibre positif du bilan est admissible dans la mesure où la Méditerranée n'est pas dans un état géochimique stationnaire et que les teneurs en éléments nutritifs dans les eaux croissent au cours de décennies sous l'effet d'une augmentation des rejets (Coste et Minas, 1981; Béthoux et Copin-Montegut, 1988).

En ce qui concerne l'azote, le dépôt par voie atmosphérique apparaît comme une part significative des apports à la Méditerranée, puisque la fourchette de valeurs proposées pour le dépôt humide seulement est nettement au-dessus du niveau de 130. 10⁹ moles.an⁻¹ envi-

sagé *a priori* par Béthoux et Copin-Montegut (1986) pour la retombée atmosphérique totale. On peut par ailleurs évoquer les travaux de Harrison et Allen (1988). Selon ces auteurs, et pour un environnement différent du milieu méditerranéen (il s'agit du Royaume-Uni), le dépôt sec représente, pour NO₃⁻ et NH₄⁺, au moins 50% du dépôt total. Cet ordre de grandeur se retrouve pour diverses régions marines à l'abri des influences polluantes proches (Galloway, 1985). Nous n'avons pas pour notre part mesuré l'impact de la retombée sèche dans cette étude mais, à titre indicatif, l'hypothèse d'une contribution du dépôt sec aussi importante que celle des précipitations conduirait à un bilan pour la Méditerranée variant de -85 à +10. 10⁹ moles.an⁻¹ environ.

Néanmoins, nous pensons qu'il faut envisager l'éventualité d'un bilan d'azote déficitaire et l'hypothèse d'une fixation biologique d'azote moléculaire (Béthoux et Copin-Montegut, 1986) ou la possibilité d'apports supplémentaires d'azote par les matières organiques dissoutes dans les eaux superficielles atlantiques discutée par Coste *et al.* (1988) sont des points qui restent à préciser.

A l'échelle globale, l'impact direct des retombées atmosphériques sur la productivité primaire paraît faible compte tenu de l'importance du recyclage hydrologique qui ramène en surface les sels nutritifs accumulés en profondeur. Mais en réalité, les zones de mélanges actifs sont localisées dans l'espace et dans le temps (mer d'Alboran, zone de formation hivernale des eaux profondes méditerranéennes). Durant la période estivale où la thermocline saisonnière est bien développée, les eaux superficielles se trouvent pratiquement isolées des eaux sous-jacentes. A ce moment l'atmosphère peut constituer une voie d'approvisionnement privilégiée pour les eaux de surface du large qui ne sont pas directement soumises aux effluents continentaux. A titre d'exemple, la figure 2A représente les profils de salinité et de température observés le 30 septembre 1987 à une station située à 10 milles au large du Cap Ferrat, tandis que la figure 2B représente les mêmes profils observés au même point le 22 octobre 1987, alors que dans cet intervalle de temps 245 mm de pluie ont été enregistrés au Cap Ferrat. L'effet des apports d'eau douce est marquée dans la couche mélangée de surface, dont la salinité est de 38,38, par la présence d'une halocline secondaire à 18 m de profondeur signalant la frontière d'eaux superficielles légèrement dessalées à 38,30. Ceci correspond à l'effet de dilution produit par un apport net (précipitation-évaporation) de 37 mm d'eau douce. Compte tenu d'une intense évaporation, 170 mm en moyenne au mois d'octobre (Béthoux, 1977), cette couche est bien représentative des précipitations récentes. En se basant sur le flux d'azote atmosphérique mesuré pour le mois d'octobre, environ 200 moles.km⁻².jour⁻¹, l'accumulation de cet apport pendant 21 jours dans une colonne d'eau de 18 m conduirait à une augmentation de la teneur des eaux superficielles de 0,23 µ mole N/l. Compte tenu de la faible teneur en azote des eaux superficielles pendant l'été, cette augmentation serait parfaitement détectable. Cependant, lorsque les concentrations sont faibles, les substances nutritives ne s'accumulent pas car elles sont

Tableau 2

Comparaison des flux humides atmosphériques d'azote et de phosphore avec les autres termes du bilan global de ces éléments.

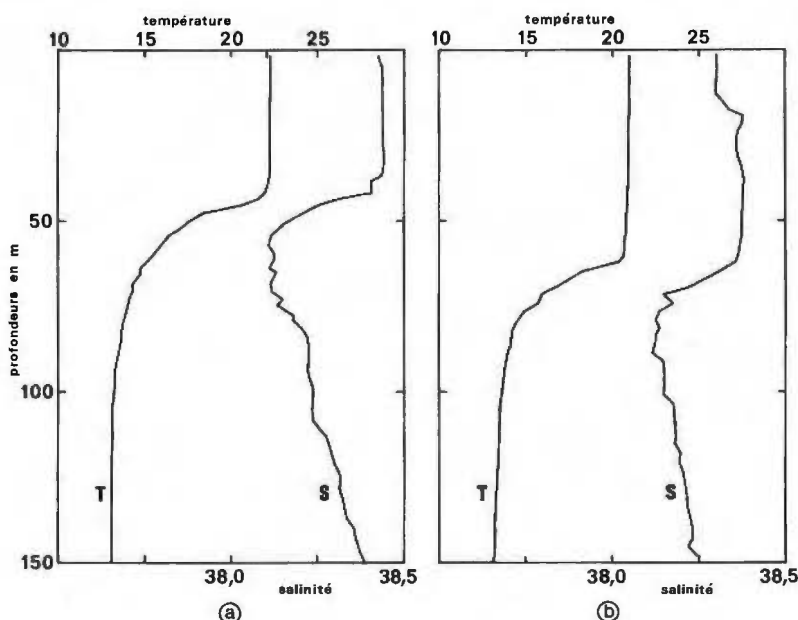
Comparison of wet atmospheric inputs of nitrogen and phosphorus with inputs from other sources.

Termes du bilan	Azote en 10 ⁹ mole.an ⁻¹	Phosphore en 10 ⁹ mole.an ⁻¹
Entrée à Gibraltar (N et P inorganique)	53	2,5
Apports continentaux (fleuves, ruissellement) (déversements urbains)	113	11,6
Retombée atmosphérique humide	25 à 75	0,4 à 1,2
Sorties à Gibraltar (N et P inorganique)	-303	-14,1
Bilan	-112 à -62	+0,4 à +1,2

Figure 2

Profils verticaux de température et de salinité observés à une station située à 10 milles au large du Cap Ferrat : a) profils observés le 30 septembre 1987; b) profils observés le 22 octobre 1987.

Vertical temperature and salinity profiles measured at a station situated 10 nautical miles off Cap Ferrat : a) profiles on 30 September 1987; b) profiles on 22 October 1987.



immédiatement consommées par la production primaire au fur et à mesure de leur mise à disposition. En ignorant le problème du phosphore, un tel apport pourrait induire une nouvelle production de $16 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{jour}^{-1}$, valeur qui est relativement importante pour une production estivale en Méditerranée.

Remerciements

Ce travail a été entrepris au sein du Groupement de Recherches Coordonnées "Interactions Continent-

Océan" du Centre National de la Recherche Scientifique (GRECO ICO). La station de prélèvements atmosphériques du Cap Ferrat a en partie été équipée grâce au support de l'Organisation Météorologique Mondiale, dans le cadre du Plan d'Action pour la Méditerranée des Nations-Unies (Programme MEDPOL). Les auteurs remercient la Marine Nationale et le personnel du sémaphore du Cap Ferrat pour leur utile coopération. Ils ont bénéficié de l'appui de la Station Zoologique de Villefranche-sur-Mer pour les analyses en sels nutritifs et tiennent à exprimer leur gratitude à Marie-Dominique Pizay pour son précieux concours.

RÉFÉRENCES

- Béthoux J.-P. (1977). Contribution à l'étude thermique de la Mer Méditerranée. *Thèse Doctorat ès Sci., Université Pierre-et-Marie-Curie, Paris*, 192 pp.
- Béthoux J.-P. (1981). Le phosphore et l'azote en Mer Méditerranée, bilans et fertilité potentielle. *Mar. Chem.*, **10**, 141-158.
- Béthoux J.-P. et G. Copin-Montegut (1986). Biological fixation of atmospheric nitrogen in the Mediterranean Sea. *Limnol. Oceanogr.*, **31**, 6, 1353-1358.
- Béthoux J.-P. et G. Copin-Montegut (1988). Phosphorus and nitrogen in the Mediterranean Sea, specificities and forecasting. In: *Océanographie pélagique méditerranéenne*, H. J. Minas et P. Nival, éditeurs, *Oceanologica Acta*, n° sp., 75-78.
- Coste B. et H. J. Minas (1981). Influence des apports continentaux sur le régime et le bilan des sels nutritifs de la Méditerranée. *Thalassia Jugosl.*, **17**, 2, 103-108.
- Coste B., P. Le Corre et H. J. Minas (1988). Re-evaluation of the nutrient exchanges in the strait of Gibraltar. *Deep-Sea Res.*, **35**, 5, 767-775.
- C.S.M. (1988). *75 ans de météorologie au Musée Océanographique de Monaco*. Publication n° 3 du Centre Scientifique de Monaco.
- Duce R. A. (1985). The impact of atmospheric nitrogen, phosphorus and iron species on marine biological productivity. *NATO Advanced Study Institute on the Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling, Bombannes, France, 16-27 septembre*, 33 pp.
- Galloway J. N. (1985). Atmospheric deposition of S and N to remote areas. In: *Atmospheric cycling of S and N in remote atmospheres*, J. Galloway, R. Charlson, M. Andreae and H. Rodhe, editors, *Report NATO Advanced Research Workshop, Reidel, Dordrecht*.
- Grasshoff K. (1976). *Methods of seawater analysis*. Verlag Chemie, Weinheim, New York.
- Harrison R. M. et A. G. Allen (1988). Sources and atmospheric chemistry of both reduced and oxidised nitrogen compounds, In: *Proceedings of the workshop on Field experiments and their interpretation, COST 611, Physico-Chemical Behaviour of Atmospheric Pollutants, Villefranche-sur-Mer, May 1988*, Angeletti G., Beilke S., Morelli J., editors, Commission of the European Communities (to be published).
- Loye-Pilot M. D., J. Morelli, J.-M. Martin, J.-M. Gros et B. Strauss (1986). Impact of Saharian dust on the rain acidity in the Mediterranean atmosphere, *Proceedings Fourth European Symposium on physico-chemical behaviour of atmospheric pollutants, Stresa, Italy*.
- Loye-Pilot M. D., J.-M. Martin et J. Morelli (1988). Atmospheric input of inorganic nitrogen to the North Western Mediterranean, *Nature* (à paraître).
- Migon C. (1988). Étude de l'apport atmosphérique en métaux-traces et sels nutritifs en milieu côtier méditerranéen; implications biogéochimiques. *Thèse Doctorat, Université Nice*, 217 pp.
- Nurnberg H. W., P. Valenta, V. D. Nguyen, M. Godde et E. Urano de Carvalho (1984). Studies on the deposition of acid and ecotoxic heavy metals with precipitates from the atmosphere, *Fresenius Z., Anal. Chem.*, **317**, 314-323.
- Tschaegle-Appert P. (1962). 1893-1962: 70 années de pluie à Nice-Gioffredo. *Bulletin Commission Météorologique des Alpes Maritimes*, 20-23.

