Influence des travaux récents et des périodicités astronomiques sur l'« *acqua alta* » à Venise : la réponse des marégraphes

Lagune
Inondations
Marégraphes
Aménagements
Mer Adriatique

Lagoon
Flooding
Tide gauges
Management
Adriatic Sea

P. A. Pirazzoli
Laboratoire de Géomorphologie de l'École Pratique des Hautes Études, Équipe de Recherche Associée au CNRS n° 867, 1, rue M.-Arnoux, 92120 Montrouge, France.

RÉSUMÉ

A Venise, où l'altitude moyenne est de quelques décimètres seulement, on appelle *acqua alta* (« eau haute ») toute submersion temporaire de certaines parties de la ville par l'eau de mer. Autrefois exceptionnel, ce phénomène d'origine météorologique est devenu récemment très fréquent, surtout au cours des deux dernières décennies.

Cette étude présente des résultats nouveaux obtenus après dépouillement des enregistrements du marégraphe de Venise (San Stefano, puis Punta della Salute) de 1887 à 1908 et de 1972 à 1979. Nous disposons donc de séries continues de valeurs de la marée couvrant plus d'un siècle.

Il devient alors possible de séparer les effets des perturbations du régime hydrologique de la lagune, provoquées par les divers travaux d'aménagement, des effets de certaines périodicités d'origine astronomique.

Mis à part la montée locale du niveau moyen de la mer (27 cm depuis 1872, dont au moins 14 cm résultent d'affaissements provoqués par des pompages excessifs d'eaux souterraines), il apparaît que les travaux portuaires récents sont à l'origine d'une montée supplémentaire du niveau de l'*acqua alta* d'environ 12 cm. A cette tendance croissante se superpose une oscillation de 20 à 30 cm, pour la première fois mise en évidence, avec une périodicité de 18,61 ans liée à la déclinaison lunaire.

Ainsi, la phase de relative accalmie à laquelle on assiste depuis 1970 correspond à une période astronomiquement favorable, qui est en train de se terminer. Au cours des prochaines années, la fréquence de l'*acqua alta* connaîtra une aggravation, culminant autour de 1987. Ensuite le phénomène s'atténuera de nouveau et passera par un nouveau minimum vers 1996.

Oceanol. Acta, **1982.** Actes Symposium International sur les lagunes côtières, SCOR/IABO/UNESCO, Bordeaux, 8-14 septembre 1981, 177-184.

ABSTRACT

Influence of man's recent interventions and of astronomical periodicities on « *acqua alta* » in Venice (Italy) : the answer of tide gauges.

In Venice, where average altitude is only a few decimetres, the term *acqua alta* (« high water ») covers any temporary submergence of parts of the town by sea water. This phenomenon, directly related to meteorologic events, was formerly exceptional but has become very frequent, especially during the last two decades.
This investigation presents new results achieved after analysis of the Venice tide gauge record (S. Stefano, then Punta della Salute), from 1887 to 1908 and from 1972 to 1979, filling gaps in previously published data. Continuous series of significant tide values covering more than a century are now available. This makes it possible to separate the effects of hydrological

Contribution au projet « Sea-level correlations and applications ».

changes in the lagoon related to man's interventions from the influence of astronomical periodicities.
The local rise in mean sea level since 1872 amounts to 27 cm, of which at least 14 cm are related to excessive pumping of water from underground sources. Another rise of about 12 cm in the average level of *acqua alta* can be ascribed to recent artificial morphological changes. In addition to this increasing trend, there is a 20 to 30 cm-wide oscillation, shown for the first time, over a period of 18.6 years related to the lunar declination cycle. A favourable period, begun around 1970, is now at end. During the next few years, the frequency and severity of flooding will increase until 1987. Then the situation will slowly improve again, until 1996.

Oceanol. Acta, **1982.** Proceedings International Symposium on coastal lagoons, SCOR/IABO/UNESCO, Bordeaux, France, 8-14 September, 1981, 177-184.

INTRODUCTION

On appelle à Venise *acqua alta* (« eau haute ») une montée du niveau de la mer suffisante pour submerger temporairement certaines parties de la ville. Le niveau à partir duquel l'eau peut être considérée comme « haute » est donc essentiellement relatif et varie d'un quartier à l'autre de la ville. Depuis une vingtaine d'années, le Bureau hydrographique du Magistrat des Eaux a défini comme *acqua alta* les cas où la hauteur de la marée dépasse d'au moins 1,10 m le niveau moyen de la mer de l'année 1897. Autrefois, en effet, lorsque le niveau + 1,10 m était atteint, les parties les plus basses de la ville étaient couvertes par 10 à 20 cm d'eau. Aujourd'hui, par contre, c'est à partir du niveau + 0,67 m que l'eau fait son apparition Place Saint-Marc (Sbavaglia, 1977) et, à + 1,30 m, la presque totalité de la ville est submergée (Dorigo, 1968). De par sa position altimétrique, Venise est donc extrêmement vulnérable et une variation même très faible du niveau relatif de la mer suffit pour paralyser la ville et provoquer une perte économique et des dégâts importants.
Dans des publications antérieures, nous avons étudié les variations du niveau moyen de la mer à Venise, d'après les marégraphes (1970 *a*) et d'après certaines données historiques (1974), les variations des niveaux extrêmes de la marée (1970 *b*) et les variations de son amplitude (1975). Les principaux résultats ont été repris dans des synthèses (1973 ; 1977). Cependant, les données marégraphiques disponibles lors de ces études étaient limitées aux périodes 1872-1886 (Rossi, 1887), 1909-1953 (Ufficio Idrogr. Magistrato Acque, périodique) et 1954-1971 (dépouillement effectué par nos soins). Depuis, nous avons pu dépouiller les valeurs de marée relatives aux périodes 1887-1908 et 1972-1979 (marégraphes de S. Stefano, puis Punta della Salute).
Si, pour certaines années les enregistrements sont incomplets (pour 1922, en particulier, il manque le second semestre ; pour 1891, 1912 et 1923 les lacunes sont comprises entre un et deux mois ; pour 1893, 1894, 1896, 1899 et 1909, enfin, les durées d'interruption des enregistrements sont comprises entre 6 et 30 jours), dans l'ensemble, cependant, les lacunes n'affectent pas les tendances à moyen et à long terme et il a été possible de constituer sur plus d'un siècle des séries continues de valeurs significatives de la marée.
Au cours de cette étude, après avoir souligné la fragilité des équilibres hydrologiques lagunaires, nous rappelons les principaux aménagements opérés dans la lagune depuis un peu plus d'un siècle et essayons, enfin, de chiffrer leur impact sur l'*acqua alta,* compte tenu de l'influence des périodicités astronomiques sur la marée.

UNE FRÉQUENCE ACCRUE DE L'*ACQUA ALTA*

La figure 1 résume le nombre de fois, par périodes de dix ans, où la marée a atteint un niveau supérieur ou égal à + 1,10 m. Six cas d'*acqua alta* qui ne figuraient pas dans les compilations antérieures (Dorigo, 1961 ; 1968), apparais-

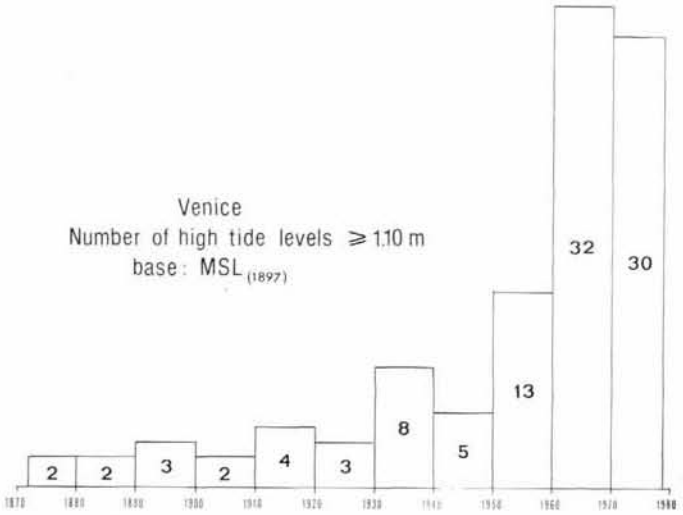


Figure 1
Fréquence des niveaux de marée ≥ 1,10 m à Venise, par périodes de 10 ans. Base de référence : le niveau moyen de la mer de l'année 1897.
Frequency of tide levels ≥ 1.10 m in Venice, per decade. Reference basis : mean sea level of the year 1897.

sent ainsi dans la période comprise entre 1887 et 1913. Ces cas se sont produits aux dates suivantes : 15-X-1896 (+ 1,15 m), 20-X-1896 (+ 1,14 m), 17-XI-1896 (+ 1,15 m), 6-XII-1903 (+ 1,30 m), 1-XI-1906 (+ 1,18 m) et 15-XI-1910 (+ 1,15 m).
L'*acqua alta* est devenue plus fréquente à partir de 1930 et, surtout, au cours des deux dernières décennies.
Ce phénomène a plusieurs causes, dont certaines sont aléatoires (Mosetti, 1971). Les dépressions atmosphériques provoquent souvent un soulèvement du niveau de la mer et, parfois, des seiches, qui dans l'Adriatique peuvent entrer en résonance avec l'onde de marée. Le vent, surtout le sirocco et la bora, tendent à accumuler de l'eau dans le golfe de Venise. Dans les conditions les plus défavorables, lorsque ces différents effets se superposent, le niveau de l'eau peut dépasser de plus de 2 m la marée prévue. A l'intérieur de la lagune, la bora incline nettement la surface de l'eau dans le sens NE-SW (Pirazzoli, 1981 *b*).
Récemment, la Mairie de Venise a mis en place un service de prévision de la marée (Canestrelli, Tomasin, 1981). S'il ne peut éviter l'*acqua alta,* ce service permet du moins de déclencher l'alarme avec quelques heures d'avance (Goldman *et al.,* 1975).
D'autres causes qui contribuent à accroître la fréquence du phénomène — comme les variations relatives du niveau moyen de la mer — agissent à long terme. D'après un carottage profond effectué par le Consiglio Nationale delle Ricerche (CNR, 1971), la base du Quaternaire sous Venise se trouve entre 800 et 900 m de profondeur. Or, ces sédiments, qui contiennent *Globigerina pachyderma,* se sont déposés à une profondeur de l'ordre de 200 m. On peut

en déduire qu'une subsidence de 600 à 700 m s'est produite en 1,8 millions d'années environ, soit à une vitesse moyenne de 3 à 4 cm par siècle.
Les dépôts marins du dernier interglaciaire, que l'on date souvent de 100 000 à 130 000 ans sont situés, au même endroit, d'après Serandrei Barbero (1975) et Mergen (1979), entre 66 et 78 m de profondeur, ce qui implique une subsidence moyenne de l'ordre de 6 cm par siècle. Mais ces valeurs moyennes ne constituent que des ordres de grandeur et la vitesse de la subsidence a vraisemblablement varié dans le temps (Bortolami *et al.*, 1977).
Depuis 2000 ans, en tout cas, la subsidence a dû être de l'ordre du mètre (Pirazzoli, 1976 ; 1981 *a*), bien que des affaissements plus importants aient pu se produire localement, surtout là où existent des couches tourbeuses (Favero, Serandrei Barbero, 1981 ; Pirazzoli *et al.*, 1981).
Une autre cause de submersion est constituée par la montée eustatique du niveau de la mer, que l'on évalue généralement à environ une dizaine de centimètres depuis un siècle. Cette montée, qui a été mise en corrélation avec un léger réchauffement climatique observé entre 1880 et 1950, résulte non seulement de l'eau de fonte des glaciers, mais également d'une diminution de densité des couches superficielles de l'eau de mer, à la suite du réchauffement, et de phénomènes rhéologiques et isostatiques (Clark, 1980).
Dans l'ensemble, cependant, subsidence et eustatisme n'expliquent qu'en partie la montée du niveau moyen de la mer observée à Venise qui, d'après les marégraphes, est d'environ 27 cm entre 1872 et 1969 et à peu près stable depuis 1969.
Au 20e siècle, des nivellements répétés ont révélé l'existence d'affaissements du sol non négligeables (Unesco, 1971), que l'on a pu mettre en corrélation avec la surexploitation, surtout à usage industriel à Marghera, des nappes d'eau souterraine (Gambolati, Gatto, 1975). Ainsi, pendant que les niveaux piézométriques des nappes artésiennes baissaient de près de 12 m à Venise, entre 1910 et 1969 (Carbognin *et al.*, 1976 ; Avanzi *et al.*, sous presse), les nivellements mesuraient un affaissement d'environ 14 cm, dont 8 cm au cours de la période 1952-1969. Depuis 1969 et surtout depuis 1975 — année d'arrêt des pompages — les niveaux piézométriques remontent et les affaissements semblent avoir cessé.
Les variations du niveau relatif de la mer n'expliquent pas à elles seules la fréquence accrue de l'*acqua alta* (voir fig. 6). D'autres causes, souvent ignorées ou minimisées (Comitato per lo Studio dei provvedimenti a difesa della città di Venezia ed a salvaguardia dei suoi caratteri ambientali e monumentali, 1968 ; Mosetti, 1969 ; Comitato per lo Studio dei provvedimenti a difesa della città di Venezia ed a salvaguardia dei suoi caratteri ambientali e monumentali, 1970 ; Di Silvio *et al.*, 1973) sont liées aux modifications du régime hydrodynamique de la lagune qu'ont provoquées les divers travaux d'aménagement effectués depuis un peu plus d'un siècle.

UN ÉQUILIBRE LAGUNAIRE FRAGILE

D'un point de vue morphologique (Zille, 1955 ; Morandini, 1960 ; Pirazzoli, 1973), la lagune de Venise est constituée par un ensemble de canaux, par où la marée pénètre, entourés soit de zones d'eau peu profonde (les *velme*), soit de *barene* (l'équivalent local du schorre) couvertes d'halophytes et qui ne sont submergées que par les pleines mers de vives-eaux (fig. 2).
En l'absence d'interventions humaines, la section de chaque canal lagunaire s'agrandit près des passes et diminue progressivement vers l'intérieur. Ainsi, plus l'on pénètre à l'intérieur de la lagune, plus le temps de propagation de l'onde de marée est long et plus l'amplitude de la marée s'atténue (Polli, 1952). Ces conditions subsistent de nos jours en plusieurs zones marginales de la lagune.
Mais la situation se modifie totalement si l'homme agrandit les passes, s'il creuse des canaux profonds ou s'il rétrécit la

Figure 2
Des *barene*, près de San Felice (à 5 km au nord de la passe de Lido). Par temps très clair, les Alpes sont visibles.
Barene *(local tidal flats) near San Felice (5 km north of Lido inlet). When the weather is very clear, the Alps are visible in the background.*

surface du bassin lagunaire. Dans tous ces cas, la pénétration de l'eau se faisant plus facilement ou les distances à parcourir étant raccourcies, le temps de propagation diminue et l'amplitude de la marée s'atténue moins. De même, lorsque des perturbations météorologiques tendent à accumuler de l'eau dans le golfe de Venise, faisant monter temporairement le niveau de la mer, l'eau pénètre plus facilement dans la lagune où elle atteint, rapidement, le même niveau qu'en mer.
L'endiguement des *barene* contribue fortement aux niveaux atteints par l'*acqua alta* : ne pouvant plus se répandre sur ces vastes surfaces, qui auparavant jouaient le rôle de bassins de déversement, le niveau de l'eau suivra avec un décalage moindre les variations qui se produisent en mer.
Enfin, le remplacement de surfaces de *barene*, à pente à peu près nulle, par des digues, aux parois verticales ou très inclinées, provoque des effets de réflexion (Supino, 1970) qui tendent à faire monter le niveau de l'eau en lagune plus haut qu'en mer.
Des interventions humaines de ce type, dont les plus marquantes seront rappelées au paragraphe suivant, se sont multipliées depuis un siècle et demi dans la lagune de Venise. Elles ont consisté à approfondir les passes, à creuser des canaux de navigation et à endiguer de très vastes surfaces de *barene* et de bassins lagunaires.

TRAVAUX RÉCENTS EFFECTUÉS DANS LA LAGUNE DE VENISE

En 1811, d'après la carte établie par Auguste Denaix, capitaine de l'armée napoléonienne, la passe de Malamocco (fig. 3) n'a que 4 à 5 m de profondeur. Peu après, les Français commencent les travaux d'aménagement qui seront poursuivis par le gouvernement autrichien et achevés, en 1872, par le royaume d'Italie : la profondeur de la passe, après la construction des deux digues, atteint 8 à 9 m.
Entre 1963 et 1969 la passe de Malamocco est approfondie à − 15 m et un canal de même profondeur est creusé en ligne droite à travers la lagune, jusqu'au nouveau terminal pétrolier de S. Leonardo. De là, avec 12 m de profondeur, le nouveau canal longe le bord lagunaire sur 10 km, jusqu'aux zones industrielles de Marghera.
Dans la passe de Lido, qui dessert directement Venise, la navigation était quasiment impossible au siècle dernier, la profondeur de l'eau n'étant que de 1,5 à 2 m. Ici, les travaux d'endiguement s'effectuent entre 1881 et 1905, ce qui amène la profondeur de l'eau vers 7 à 8 m.
En 1919 les travaux reprennent : approfondissement de la passe de Lido à − 11 m et creusement d'un canal continu, de même profondeur, qui traverse toute la lagune, en passant par Venise, jusqu'aux zones industrielles nouvellement créées à Marghera (canal Victor-Emmanuel III). Ces travaux se poursuivent jusqu'en 1930. Actuellement, la

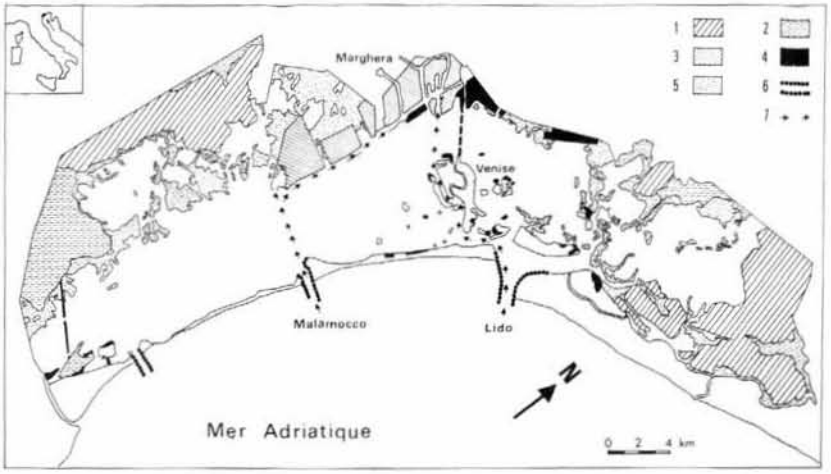


Figure 3

Travaux récents dans la lagune de Venise : 1 : pêcheries *(valli)* endiguées ; 2 : surfaces endiguées pour exploitation agricole *(bonifiche)* ; 3 : *barene* endiguées pour créer des zones industrielles ; 4 : zones urbanisées, décharges (depuis 1900) ; 5 : *barene* actuellement ouvertes à la marée ; 6 : digues des passes ; 7 : canaux artificiels.

Man's recent interventions in the lagoon of Venice. 1 : diked valli *(fisheries) ; 2 : diked reclamation areas for agricultural use ; 3 : diked* barene *for industrial use ; 4 : urbanized areas, dumping grounds (since A.D. 1900) ; 5 :* barene *currently open to tide ; 6 : dikes of the inlets ; 7 : artificial channels.*

profondeur de la passe de Lido est d'au moins 13 m (carte au 1/50.000 du Magistrato alle Acque de 1975).

Marghera, au début du siècle, n'était qu'une vaste étendue de *barene* ; 500 ha sont endigués avant 1930 pour créer la 1ère zone industrielle ; 500 ha nouveaux le sont, en 1953, pour la 2e zone ; en 1966, 1 200 ha, toujours de *barene,* sont endigués en prévision d'une 3e zone d'expansion industrielle.

Les *valli* de pêche (20 % de la surface de la lagune) étaient autrefois fermées par des parois en *arelle,* grillages composés de petites bottes de roseaux qui, laissant passer l'eau, ne constituaient pas un rétrécissement de la surface de la lagune (Magistrato alle Acque, 1937 ; Bullo, 1940) ; la République de Venise était très stricte sur ce point. Or, aujourd'hui, les *valli* sont toutes endiguées (Rosa Salva, Sartori, 1979).

Enfin, d'autres surfaces de la lagune ont été mises en culture (*bonifiche*), utilisées comme décharge (*sacche*) ou pour étendre les zones urbanisées. L'ensemble des travaux, que Rosa Salva (1974) étudie en détail, apparaît dans la figure 3.

Dans l'ensemble, au cours d'un siècle et demi, la surface de la lagune ouverte à la marée a diminué de presque un tiers. En même temps, les divers travaux de dragage ont enlevé des masses énormes de sédiments : 36 millions de m^3 au 19e siècle et au moins 53 millions de m^3 entre 1900 et 1973.

C'est dans la partie centrale de la lagune, à proximité de la ville de Venise, que les interventions anthropiques ont été les plus massives, cumulant leurs effets négatifs. C'est ici, en effet, qu'on a opéré à la fois :

1) un rétrécissement important des bassins par endiguement de vastes surfaces de *barene* ;

2) un approfondissement exagéré des passes de Lido et de Malamocco ;

3) la création d'un réseau continu de canaux profonds qui relient les deux passes de Lido et Malamocco avec Venise et Marghera (fig. 3).

La profondeur de ces canaux apparaît d'autant plus démesurée qu'en 1974, six ans après l'achèvement du canal des pétroles, 96,4 % des bateaux arrivés à Marghera avaient un tirant d'eau maximum ne dépassant pas 9 à 10 m (Rosa Salva, Rabagliati, 1978).

Dans cette partie centrale de la lagune, il n'y a plus aujourd'hui d'atténuation de la marée. Au contraire, l'amplitude de la marée y est devenue plus élevée qu'en mer. De même, la profondeur excessive des passes et des canaux de navigation bouleversent l'hydrodynamique et la morphologie lagunaires : au lieu de suivre, lors du jusant, le parcours des canaux mineurs pour contourner les divers bassins, l'eau s'écoule maintenant transversalement à ces bassins vers les canaux de navigation (Cavazzoni, 1977). Il s'ensuit une forte érosion et un approfondissement progressif de la partie centrale de la lagune, phénomène qui, à son tour, engendre des courants plus forts et une érosion accrue. En d'autres termes, le centre de la lagune se transforme peu à peu en un bras de mer et le processus se poursuivra tant que la profondeur des passes et des canaux de navigation n'aura pas été sensiblement réduite.

CONSÉQUENCES DE CES TRAVAUX SUR L'*ACQUA ALTA* À VENISE

L'influence de la construction des digues de la passe de Malamocco sur la marée à Venise est impossible à évaluer avec précision, la première station marégraphique n'ayant été installée à Venise qu'en 1871. On peut cependant estimer que ces travaux ont dû avoir un effet non négligeable, d'autant plus que le nouveau canal de S. Spirito reliait la passe de Malamocco à Venise. A partir de cette époque, l'*acqua alta* a dû pénétrer en lagune plus facilement qu'auparavant et il n'est pas étonnant que l'*acqua alta* la plus grave (+ 1,53 m) depuis la rupture des « murazzi » de 1825 se soit produite vers la fin des travaux, en 1867 (Dorigo, 1961 ; Tonini, 1961). Pour les périodes postérieures à 1871, les marégraphes apportent des témoignages précieux.

Les dénivellations mer-lagune

Une étude de Adami (1974) compare les amplitudes des marées moyennes de vives-eaux de Venise avec celles de la digue sud de la passe de Lido, entre 1924 et 1973. Il apparaît que les valeurs étaient plus faibles en lagune qu'en mer avant 1966 et que la situation s'est inversée après la construction du canal des pétroles. Cette variation est cependant limitée (Pirazzoli, 1973 ; Tomasin, 1974 ; Adami, 1974). En effet, les marées moyennes de vives-eaux atteignant à peine la surface des *barene,* ce n'est qu'avec des marées nettement plus hautes que l'influence de l'endiguement peut devenir sensible.

De ce fait, les marées moyennes de vives-eaux (de l'ordre de 80 cm d'amplitude) et, à plus forte raison, les marées moyennes mensuelles ou annuelles (environ 60 cm d'amplitude) (Toniolo, 1970) constituent des valeurs peu significatives pour l'étude de l'*acqua alta.* Plus intéressantes sont les valeurs maximales atteintes chaque année par la marée.

Ainsi, la comparaison des valeurs les plus élevées de Venise avec celles de la digue sud de la passe de Lido montre (Pirazzoli, 1973, fig. 27) que jusqu'aux environs de 1950 les niveaux maxima de Venise étaient inférieurs d'environ 7 cm à ceux enregistrés sur la digue. Or, depuis 1950, cette différence a rapidement diminué, pour s'annuler vers 1958. Les valeurs disponibles pour la digue s'arrêtant en 1966, il n'a pas été possible de poursuivre la comparaison après cette date.

Les amplitudes maximales annuelles et les périodicités astronomiques

A Venise, l'étude des variations des valeurs extrêmes de la marée fournit des résultats très instructifs.

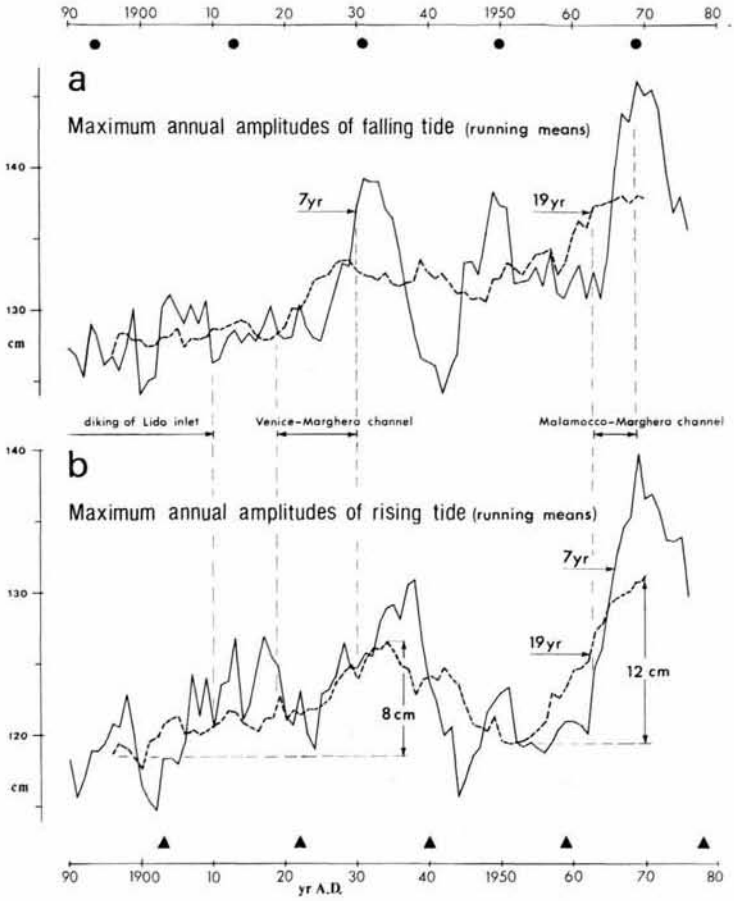
En figure 4 sont représentées les moyennes mobiles sur 7 et 19 ans des amplitudes maximales de baissée et de montée. Des deux amplitudes, c'est surtout celles de montée (b) qui intéressent, puisqu'elles contribuent à former l'*acqua alta,* alors que celles de baissée (a) vident la lagune.

Les moyennes mobiles sur 7 ans indiquent des oscillations répétées, dont les sommets et les creux coïncident, le plus souvent, avec les périodes de plus forte ou de plus faible influence du cycle de la déclinaison lunaire.

Cette déclinaison varie, au cours d'une révolution sidérale, entre + 29° et − 29° environ, lorsque le point vernal coïncide avec le nœud ascendant de l'orbite. 9,3 ans plus tard, la déclinaison varie entre + 18° et − 18° environ ; le point vernal coïncide alors avec le nœud descendant. On remarque ainsi, dans plusieurs mers, une succession d'années à marées plus fortes, suivies par des années à marée plus faible, avec une périodicité de 18,61 ans.

Un maximum de ces fluctuations a été observé en 1950, un minimum en 1959 (Rouch, 1961, p. 49). On peut en déduire que les autres maxima sont situés en 1876, 1894, 1913, 1931, 1969 et 1987 (cercles pleins, en fig. 4) ; les autres minima sont situés en 1885, 1903, 1922, 1940, 1978 et 1996 (triangles pleins).

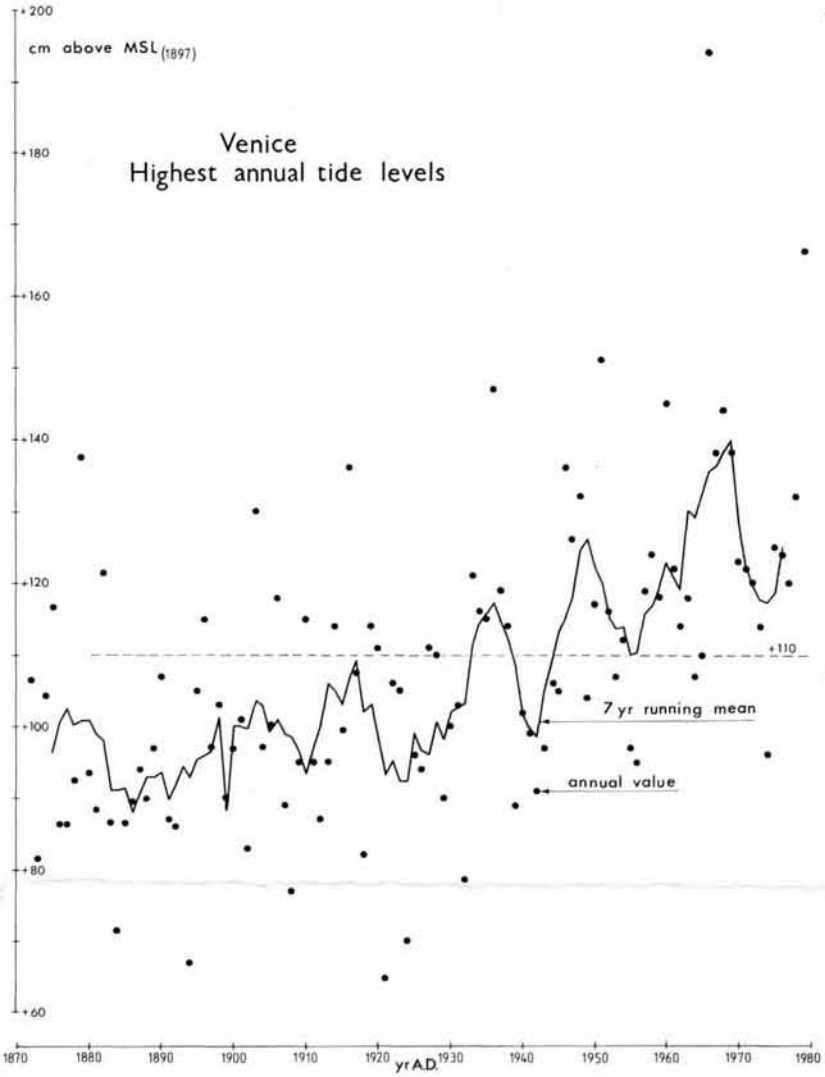
Parmi les autres périodicités astronomiques pouvant influencer la marée, on peut mentionner le Saros (18 ans et 11 jours) et le « cycle » de Méton (19 ans environ). Dans l'ensemble, d'éventuelles influences astronomiques devraient reproduire tous les 18 ou 19 ans des effets comparables sur les marées à Venise. On peut donc estimer que les moyennes mobiles sur 19 ans filtrent l'influence de ces périodicités. Or, ces moyennes indiquent (fig. 4 *b*), jusqu'au début des années 1930, une augmentation d'amplitude de 8 cm, qu'il est difficile de ne pas mettre en



▲ Figure 4

Amplitudes maximales annuelles de la marée à Venise, entre 1887 et 1979 : moyennes mobiles sur 7 et 19 ans. a : baissées ; b : montées ; cercles pleins : années d'influence maximale de la déclinaison lunaire sur la marée ; triangles pleins : années d'influence minimale de la déclinaison lunaire.

Maximum annual tide amplitudes in Venice, from 1887 to 1979 : 7-yr and 19-yr running means. a : ebb tide ; b : flood tide ; full circles : years of strongest influence of lunar declination on tides ; full triangles : years of weakest influence of lunar declination.



◀ Figure 5

Niveaux maximaux annuels atteints par la marée à Venise entre 1872 et 1979. Cercles pleins : valeurs annuelles ; trait continu : moyenne mobile sur 7 ans. Les valeurs sont rapportées au niveau moyen de la mer de l'année 1897.

Highest annual tide levels in Venice from 1872 to 1979. Full circles : annual values ; continuous line : 7-yr running means. Data are related to the mean sea level of the year 1897.

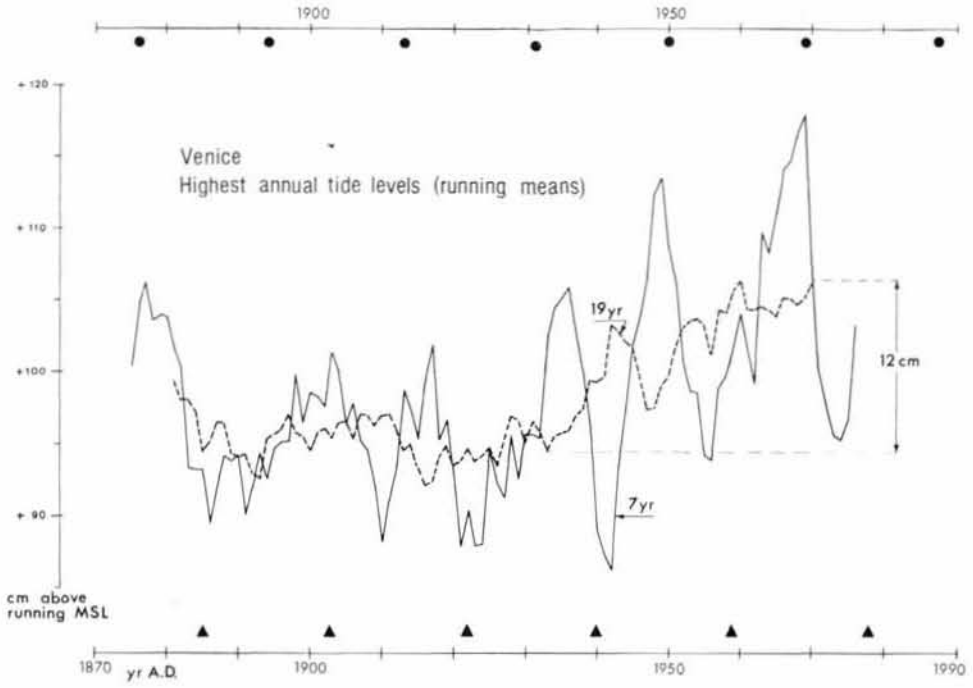


Figure 6
Niveaux maximaux annuels de la marée à Venise, entre 1872 et 1979, après déduction des variations du niveau moyen de la mer : moyennes mobiles sur 7 et 19 ans. Les années d'influence maximale de la déclinaison lunaire sont indiquées par des cercles pleins ; celles d'influence minimale par des triangles pleins. Depuis 1930, les niveaux maximaux se sont accrus d'au moins 12 cm.

Highest annual tide levels in Venice, from 1872 to 1979, after deduction of mean sea level changes : 7-yr and 19-yr running means. Years of maximum influence of lunar declination are marked by full circles ; years of minimum influence by full triangles. Since 1930, the elevation of the highest levels has increased by about 12 cm.

corrélation avec l'approfondissement de la passe de Lido, le creusement du canal Victor Emmanuel III et les endiguements pour la 1ère zone industrielle de Marghera.
L'amplitude diminue ensuite, jusque vers 1950. Cette diminution est vraisemblablement la conséquence de l'ensablement progressif des passes et de l'envasement des canaux, du fait de l'interruption des travaux d'entretien lors de la deuxième guerre mondiale.
Enfin, après 1950, on assiste à une nouvelle augmentation progressive de l'amplitude, qui atteint, en 1970, 12 cm.

Les niveaux maximaux annuels

Les cas d'*acqua alta* supérieure ou égale à + 1,10 m à Venise sont distribués irrégulièrement dans le temps : plusieurs cas se produisent parfois au cours d'une même année, alors qu'il peut ne se présenter aucun cas pendant plusieurs années consécutives. Cette irrégularité, qui dépend des aléas météorologiques, rend peu aisée l'étude statistique du phénomène.
Afin de pallier cet inconvénient, nous avons considéré une seule valeur de marée pour chaque année : la plus élevée. On obtient ainsi une série de données couvrant avec continuité la période 1872-1979 (fig. 5). Malgré la grande dispersion des valeurs annuelles, la tendance apparaît, dans l'ensemble, nettement croissante. La moyenne mobile sur 7 ans fait ressortir, de nouveau, l'existence d'une périodicité d'environ 19 ans et l'on peut observer qu'entre le début et la fin du diagramme la dénivellation est de l'ordre de 37 cm, soit 10 cm de plus que la montée du niveau moyen de la mer au cours de la même période.
Pour un meilleur aperçu du phénomène, nous avons déduit, année par année, les variations du niveau moyen évolutif de la mer (Pirazzoli, 1970 *a*) des valeurs maximales de la marée. Les résultats sont reportés dans la figure 6. Les moyennes mobiles sur 7 ans indiquent, très clairement, des oscillations qui dépendent étroitement du cycle de la déclinaison lunaire. Cette influence astronomique, dont nous avions auparavant mal perçu l'existence (Pirazzoli, 1973 ; 1975), faute de séries suffisamment longues, ne fait plus de doute.
Il apparaît nettement que, depuis 1930, l'amplitude de l'oscillation de 18,61 ans s'amplifie et que les niveaux maximaux de marée sont de plus en plus élevés. Actuellement nous traversons une période favorable, qui est en train de s'achever. Au cours des prochaines années, on peut prévoir que la fréquence de l'*acqua alta* connaîtra une nouvelle aggravation. Vers 1987, lors de la prochaine période la plus critique, l'*acqua alta* sera, en moyenne, 20 à 30 cm plus haute qu'elle ne l'aurait été, à conditions météorologiques égales, vers le milieu des années 1970.
Enfin, la moyenne mobile sur 19 ans précise que depuis 1930 les niveaux maximaux de la marée à Venise se sont accrus de 12 cm environ. Cette montée, dont l'ordre de grandeur est comparable à celui des affaissements provoqués par les pompages d'eau souterraine, risque de se

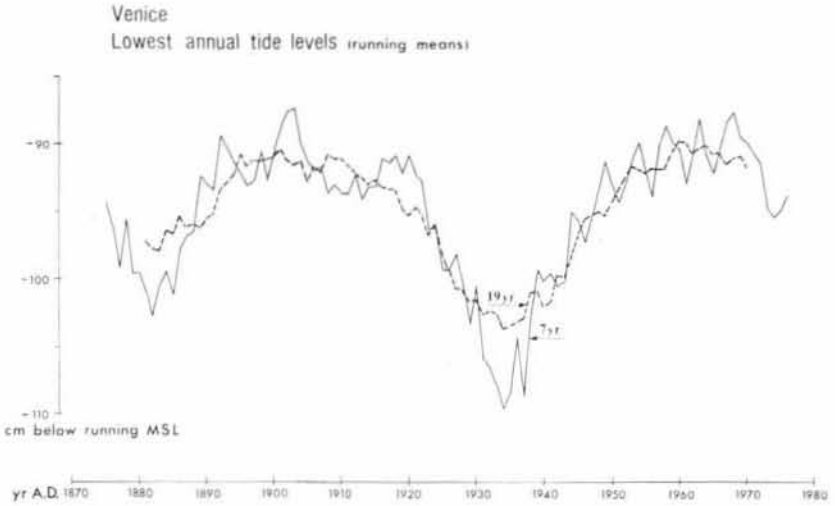


Figure 7
Niveaux minimaux annuels de la marée à Venise, entre 1872 et 1979, après déduction des variations du niveau moyen de la mer : moyennes mobiles sur 7 et 19 ans.

Lowest annual tide levels in Venice, from 1872 to 1979, after deduction of mean sea level changes : 7-yr and 19-yr running means.

poursuivre au cours des prochaines années ; en effet, ce n'est qu'en 1987 que 19 ans se seront écoulés depuis l'achèvement des travaux portuaires les plus récents.

Les niveaux minimaux annuels

Pour les marées les plus basses de chaque année à Venise, après déduction du niveau moyen évolutif de la mer, l'influence de la déclinaison lunaire est très peu marquée (fig. 7). Une périodicité apparente de 50 à 60 ans apparaît, par contre, plus nette ; elle exigerait, pour être confirmée, une période d'observations beaucoup plus longue et son origine reste à élucider.
Depuis 1930, il est clair en tout cas que les niveaux minimaux annuels sont devenus moins bas d'une dizaine de centimètres, malgré la déduction de la montée du niveau moyen de la mer, en même temps que montaient d'une valeur analogue les niveaux maximaux (fig. 6) et l'amplitude maximale de la marée (fig. 4).

CONCLUSION

Depuis 1872 l'*acqua alta* est montée, à Venise, de 27 cm à cause de l'accroissement du niveau moyen de la mer (dont de 14 cm au moins du fait de l'exploitation des nappes souterraines) et d'environ 12 cm du fait des travaux effectués en lagune. Si l'on tient compte également des perturbations provoquées par l'endiguement de la passe de Malamocco, au siècle dernier, on peut estimer que l'*acqua alta* à Venise est aujourd'hui presque 0,5 m plus haute qu'elle ne l'était il y a un peu plus d'un siècle. Pour plus des deux tiers, cette aggravation est la conséquence d'interventions anthropiques. Cependant, à la différence des affaissements du sol, qui sont irréversibles, les déséquilibres hydrodynamiques peuvent être corrigés en diminuant la profondeur des passes et de certains canaux lagunaires.
Dans la figure 8, les cas d'*acqua alta* ont été regroupés non plus par décennies, mais autour des années où l'influence de la déclinaison lunaire est plus forte ou plus faible. En haut figurent les cas où le niveau a été supérieur ou égal à 1,10 m par rapport au niveau moyen de la mer de 1897 ; au milieu et en bas, les cas où les niveaux ont été supérieurs ou égaux à 1,10 m et à 1,00 m respectivement, par rapport au niveau moyen évolutif de la mer. Il en ressort une nette tendance en dents de scie.
D'après les deux diagrammes inférieurs, l'augmentation du nombre des cas d'*acqua alta* entre une période astronomiquement favorable et la période défavorable suivante est, en moyenne, de 150 %. Or, la prochaine crise est prévue vers 1987 ; si l'on veut prendre des mesures, il est encore possible de le faire, mais le temps presse. Encore faudrait-il que les remèdes proposés ne négligent pas certains aspects du problème et s'attaquent aux causes véritables des déséquilibres actuels.

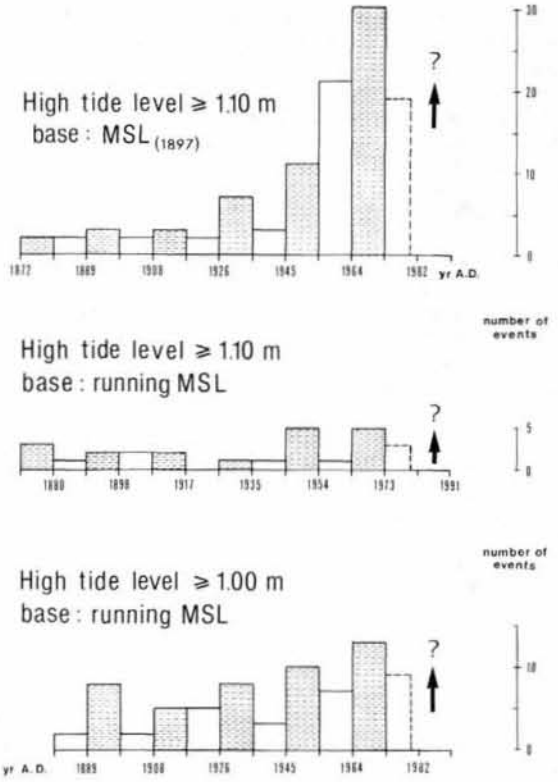


Figure 8
Fréquence de l'*acqua alta* à Venise par périodes de forte (en tireté) et de faible (en blanc) influence de la déclinaison lunaire sur la marée. En haut : nombre de cas avec niveaux de la marée ≥ 1,10 m (par rapport au niveau moyen de la mer de l'année 1897). Au milieu et en bas : nombre de cas avec niveaux de la marée ≥ 1,10 m et ≥ 1,00 m (par rapport au niveau moyen évolutif de la mer). Entre 1982 et 1991 le phénomène d'*acqua alta* sera beaucoup plus fréquent qu'entre 1973 et 1982.
Frequency of acqua alta *in Venice during periods of strong (dashed) and weak (white) influence of lunar declination upon tide. Above : number of occurrences with tide levels ≥ 1.10 m (relative to mean sea level of the year 1897). Centre and below : number of occurrences with tide levels ≥ 1.10 m and ≥ 1.00 m (after deduction of mean sea level changes). Between 1982 and 1991,* acqua alta *will occur much more frequently than between 1973 and 1982.*

Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien financier du CNRS (contrat hors convention A 6412 et E.R.A. 867). Nous remercions l'Ingénieur A. Sbavaglia et MM. Fracon, D'Este et Gottardo de l'*Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque*, Venise, pour les facilités apportées lors du dépouillement des données marégraphiques.

RÉFÉRENCES

Adami A., 1974. Analisi statistica di un lungo periodo di maree sizigiali contemporanee all'interno e all'esterno della laguna di Venezia, *Riv. Ital. Geofis.*, **23**, 5-6, 302-308.

Avanzi C., Fossato V., Gatto P., Rabagliati R., Rosa Salva P., Zitelli A., sous presse. *Ripristino, conservazione ed uso dell'ecosistema lagunare veneziano*, Comune di Venezia.

Bortolami G. C., Fontes J. Ch., Markgraf V., Saliege J. F., 1977. Land, sea and climate in the northern Adriatic region during late Pleistocene and Holocene, *Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol.*, **21**, 139-156.

Bullo G., 1940. Le valli salse da pesca, in : *La laguna di Venezia, monografia*, **3**, 6, 11, 27-48, Ferrari, Venezia.

Canestrelli P., Tomasin A., 1981. *Sull'attendibilità di un modello empirico-statistico per la previsione dell'acqua alta a Venezia*, Comune di Venezia-C.N.R., 16 p.

Carbognin L., Gatto P., Mozzi G., Gambolati G., Ricceri G., 1976. New trend in the subsidence of Venice, *Proc. Second Inter. Symp. on land subsidence, Anaheim, USA, Publ. n° 121 of the Inter. Assoc. Hydrolog. Sci.*, 65-81.

Cavazzoni S., 1977. Variazioni batimetriche e idrografiche nella laguna di Venezia intercorse tra il 1933 ed il 1971, in : *Rapporti e studi, Ist. Veneto Sci. Lett. Art., Venezia*, **7**, 1-18.

Clark J. A., 1980. A numerical model of worldwide sea level changes on a viscoelastic Earth, in : *Earth rheology, isostasy and eustasy*, edited by N. A. Mörner, Wiley, New York, 525-534.

C.N.R. (Laboratorio Dinamica Grandi Masse), 1971. *Relazioni sul pozzo Venezia 1-C.N.R.* TR14 à TR21 (8 rapports), Venezia.

Comitato per lo studio dei provvedimenti a difesa della città di Venezia ed a salvaguardia dei suoi caratteri ambientali e monumentali IV, Gruppo : Idraulica, 1968. *Influenza sul regime lagunare che potrà essere indotta dalla apertura del canale Malamocco-Marghera e dai terrapienamenti della III zona industriale e dall'argine in fregio al canale litoraneo, con riferimento particolare al bacino del Lido ed alla entità delle acque alte in Venezia,* Ministero dei Lavori Pubblici, Venezia, 6 p.

Comitato per lo studio dei provvedimenti a difesa della città di Venezia ed a salvaguardia dei suoi caratteri ambientali e monumentali IV, Gruppo : Idraulica-V Gruppo : Oceanografia, 1970. *Il canale navigabile Malamocco-Marghera e sua influenza sul regime idraulico lagunare,* Ministero dei lavori Pubblici, Venezia, 12 p.

Di Silvio G., D'Alpaos L., 1973. *Modello matematico unidimensionale della laguna di Venezia,* Comitato per lo studio dei provvedimenti a difesa della città di Venezia ed a salvaguardia dei suoi caratteri ambientali e monumentali, Padova, 24 p. + Annexes.

Dorigo L., 1961. Maree eccezionali registrate a Venezia-Punta della Salute. Periodo 1867-1960, in : *Rapporti e studi, Ist. Veneto Sci. Lett. Art., Venezia,* **1,** 39-69.

Dorigo L., 1968. Le alte maree eccezionali a Venezia. Periodo 1867-1966, *Pubbl. Uff. Idrogr. Magistrato Acque, Venezia,* **156,** 38 p.

Favero V., Serandrei Barbero R., 1981. Evoluzione paleoambientale della laguna di Venezia nell'area archeologica tra Burano e Canale San Felice, *Lavori, Soc. Ven. Sci. Nat.,* **6,** 119-134.

Gambolati G., Gatto P., 1975. Simulazione della subsidenza a Venezia, in : *Venezia e i problemi dell'ambiente,* Il Mulino, Bologna, 299-354.

Goldman A., Sguazzero P., Giommoni A., 1975. La previsione dell'acqua alta, in : *Venezia e i problemi dell'ambiente,* Il Mulino, Bologna, 63-224.

Magistrato alle Acque, 1937. *Bonifica e vallicultura,* Ist. Poligr. Stato, Roma, 306 p.

Mergen Ph., 1979. La paléogéographie et les foraminifères du sondage de Venise, *Bull. Soc. Belge Géol.,* **88,** 2, 159-178.

Morandini G., 1960. Elementi geografici ed aspetti morfologici della laguna, in : *Atti Conv. Conservazione e difesa della laguna e della città di Venezia,* Ist. Veneto Sci. Lett. Art., Venezia, 65-82.

Mosetti F., 1969. Relazione fra la frequenza dell'acqua alta e l'aumento del livello medio marino a Venezia, *Boll. Geofis. Teor. Appl.,* **11,** 43-44, 255-260.

Mosetti F., 1971. Considerazioni sulle cause dell'acqua alta a Venezia. Esame degli avvenimenti negli anni 1966-1968, *Boll. Geofis. Teor. Appl.,* **13,** 50, 169-184.

Pirazzoli P. A., 1970 *a.* Alcune schematizzazioni per l'andamento del livello medio marino a Venezia, *Tec. Ital.,* **35,** 1-2, 27-34.

Pirazzoli P. A., 1970 *b.* Valori estremi di marea nella laguna di Venezia, *Tec. Ital.,* **35,** 9, 433-446.

Pirazzoli P. A., 1973. Inondations et niveaux marins à Venise, *Mém. Lab. Géomorphol., École Pratique des Hautes Études, Dinard,* **22,** 1-284.

Pirazzoli P. A., 1974. Dati storici sul medio mare a Venezia, *Atti Accad. Sci. Ist. Bologna, Rendiconti,* **13,** 1, 125-148.

Pirazzoli P. A., 1975. Sulle ampiezze di marea nella laguna di Venezia, *Atti Accad. Sci. Ist. Bologna, Rendiconti,* **13,** 2, 124-155.

Pirazzoli P. A., 1976. Les variations du niveau marin depuis 2000 ans, *Mém. Lab. Géomorphol., École Pratique des Hautes Études, Dinard,* **30,** 1-421.

Pirazzoli P. A., 1977. Le acque alte a Venezia e le loro cause, in : *Atti dei Convegni 1977,* Assoc. Civica Venezia Serenissima, Venezia, 29-35.

Pirazzoli P. A., 1981 *a.* Le variazioni del livello del mare nel Postglaciale. *Riv. Geogr. Ital.,* **88,** 2, 154-164.

Pirazzoli P. A., 1981 *b.* Bora e acqua alta, *Acqua e Aria,* **10,** 1115-1118.

Pirazzoli P. A., Planchais N., Rosset-Moulinier M., Thommeret J., 1981. Interprétation paléogéographique d'une tourbe de Torson di Sotto (Lagune de Venise, Italie), *Géol. Médit.,* **8,** 3, 121-128.

Polli S., 1952. Propagazione della marea nella laguna di Venezia, *Annal. Geofis.,* **5,** 2, 273-292.

Rosa Salva P., 1974. Trasformazioni ambientali ed alterazioni nella laguna veneta, *Urbanistica,* **62,** 5-44.

Rosa Salva P., Rabagliati R., 1978. Indagine di fattibilità di un modello per la pianificazione del territorio lagunare, *Acqua e Aria,* **9,** 697-709.

Rosa Salva P., Sartori S., 1979. *Laguna e pesca. Storia, tradizioni e prospettive,* Arsenale Coop. Ed., Venezia, 71 p.

Rossi F. C., 1887. Il comune marino di Venezia, in : *L'ingegneria a Venezia nell'ultimo ventennio,* Naratovich, Venezia, 42-48.

Rouch J., 1961. *Les marées,* Payot, Paris, 230 p.

Sbavaglia A., 1977. Situazioni di « acqua alta » in Piazza S. Marco-Venzia, in : *Rapporti e Studi, Ist. Veneto Sci. Lett. Art., Venezia,* **7,** 201-225.

Serandrei Barbero R., 1975. Il sondaggio Venezia 2 : stratigrafia e paleoecologia, *Giorn. Geol.,* **40,** 1, 163-180.

Supino G., 1970. The propagation of the tide inside a lagoon, *Meccanica,* **5,** 1, 42-53.

Tomasin A., 1974. Recent changes in the tidal regime in Venice, *Riv. Ital. Geofis.,* **23,** 5-6, 275-278.

Tonini D., 1961. Elaborazione statistica dei livelli marini a Venezia, in : *Rapporti e Studi, Ist. Veneto Sci. Lett. Art., Venezia,* **1,** 95-125.

Toniolo A., 1970. *Tabelle dei valori medi mensili ed annuali delle escursioni di marea registrate a Venezia-Punta della Salute dal 1912 al 1969,* Comitato per lo studio dei provvedimenti a difesa della città di Venezia ed a salvaguardia dei suoi caratteri ambientali e monumentali, Ministero dei Lavori Pubblici, Venezia, 20 p.

Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque, 1909-1953. *Boll. mensile,* Ferrari, Venezia, puis Ist. Poligr. Stato, Roma.

Unesco, 1971. *Sauver Venise,* Laffont, Paris, 368 p.

Zille G. G., 1955. Morfologia della laguna, in : *La laguna di Venezia, monografia,* **1,** 2, 2, 1-33.