

S. CAVAZZA (*), P. PREGLIASCO (**)

RECHERCHES EXPERIMENTALES SUR LA SEDIMENTATION
AU FOND D'UN CREUX ARTIFICIEL D'UNE RIVIERE
EN CONDITIONS D'INTRUSION MARINE (***)

Résumé — Le cas présenté par ce rapport est typique des rivières en proximité de leurs embouchure lorsque des installation fixes d'extraction de matières y sont établies, en produisant la formation de creux profonds, aux eaux presque immobiles substituées parfois par des eaux d'intrusion marine. Les recherches illustrées se rapportent à la rivière Magra (Italie), à 6,5 Km de son embouchure.

A cette occasion des mesures bathymétriques, des profils de vitesse, de température, de salinité et de la teneur en sédiments, ainsi que des échantillonnages de matières déposées au fond du creux ont été menées.

Les données recueillies ont permis de tracer le bilan solide du tronçon de rivière contenant le creux et d'étudier la distribution granulométrique des sédiments et les formes de colmatage.

Riassunto — *Ricerche sperimentali sulla sedimentazione al fondo di una buca artificiale di un corso d'acqua in condizioni di intrusione marina.* La situazione che si illustra nella memoria è tipica dei corsi d'acqua lungo i quali, in prossimità della foce, esistono impianti fissi di estrazione di materiali lapidei dal fondo. Il caso studiato è quello del fiume Magra, a 6,5 Km dalla foce. Durante le ricerche sono state fatte misure batimetriche, profili di velocità, salinità, temperatura e concentrazione dei sedimenti dell'acqua, misure del trasporto di fondo, prelievo di campioni del materiale di deposito di fondo. I risultati delle campagne più recenti sono stati comparati con rilievi precedenti, tracciando il bilancio solido del tronco d'alveo studiato. Sono state esaminate infine le forme di sedimentazione e di colmamento della buca.

Summary — *Experimental researches on the sedimentation at the bottom of a river sink in conditions of marine intrusion.* The research illustrated in this paper concerns the form and the amount of the filling of an artificial sink, existing in the Magra river (Italy) at 6,5 Km from the mouth, and produced during the years preceding 1973 by an intensive and localised extraction of sandy and gravelly materials. After five years of suspension of this extractions, the solid balance of the

(*) Istituto di Idraulica dell'Università di Pisa.

(**) Boursier du C.N.R. auprès de l'Istituto di Idraulica de l'Università di Pisa.

(***) Recherche financée par le Consiglio Nazionale delle Ricerche d'Italie. Projet finalisé « Conservazione del suolo », sous-projet « Dinamica dei litorali ».

sink has been studied, comparing the bed load arrived in that period, the filling of the sink and the residual bed load to the mouth.

The filling of the sink has been studied by the comparison of cross sections. The mechanics and the forms of the deposition of the filling materials has been studied by sampling of deposits at the bottom of the sink and observing in 27 verticals the variations of velocity, salinity, turbidity and temperature of both fresh water, flowing in the upper layers, and the underflowing salted water. The techniques of observation and some results are finally exposed.

Key words — Sedimentation. Bed load. Marine intrusion. Magra river. Tuscany (Italy).

I - LE MILIEU PHYSIQUE

Les recherches illustrées dans cet ouvrage se rapportent à la rivière Magra qui a son embouchure à l'extrémité orientale du Golfe de Gênes (Méditerranée) et un bassin versant de 1694 Km².

Ce bassin est compris entre l'Apennin et les Alpes Apuaines, aux bordures ayant une altitude moyenne de 1500 m s.n.m. et maximale de presque 1900 m s.n.m.

La vallée de la Magra est assez étendue et aux affluents positionnés à éventail. Son principal affluent, la Vara, qui se verse dans la Magra à 15 Km de l'embouchure, a, par contre, une vallée étroite et bien longue.

La pente moyenne de la rivière est du 20% pour sa partie montagnaise, mais à l'aval de la confluence de la Vara, se réduit rapidement jusqu'à 1%.

Dans cette partie la rivière augmente en même temps sa largeur jusqu'à 350 m à l'embouchure. Elle s'écoule avec un parcours sinueux, à travers des terrains alluvionaires à sable et graviers plus ou moins alternés à horizons limoneux.

Depuis longtemps, mais avec intensité bien supérieure depuis les années 1950, les sables et les gravillons ont été extraits comme emploi de génie civil.

L'extraction est pratiquée, le long du tronçon terminale de la rivière qui est examiné par ce rapport, au moyen d'établissements fixes munis de pompes aspirantes ou de bennes et de dragues fixes.

Le résultat de ces extractions très intensives et localisées a été la formation de creux profonds, qui se succèdent le long du tronçon terminale de la rivière jusqu'à 2,5 Km de l'embouchure, et qui

ont abouti la profondeur maximale de 14 m sous le niveau de la mer.

En effet les besoins croissants en matière de sable et gravier enregistrés surtout entre 1958 et 1973, ont porté à des volumes de matières extraites bien supérieurs aux volumes des matériaux charriés, et par conséquent à l'extraction de matières constituant le lit de la rivière, qui étaient d'ailleurs de qualité plus satisfaisante. Cette situation est synthétisée par un volume de matières extraites de $1,23 \times 10^6$ m³/an contre un charriage de fond évalué en 58×10^3 m³/an (CAVAZZA et al., 1977).

Les modifications primaires de cette situation ont été: i) la modification morphologique du lit, actuellement plus profond en moyenne, et formé d'une alternance de creux et de seuils; ii) une modification du milieu hydrique, autrefois typique d'eaux douces et actuellement caractérisé par les eaux saumâtres et marines; iii) une activation de la pollution des nappes alluviales par les eaux saumâtres; iv) l'interruption de l'apport solide à l'embouchure et de l'alimentation des littorales voisines, qui montrent des formes dangereuses d'érosion marictime.

2 - OBJECTIFS ET PROGRAMME DE RECHERCHE

Il y a plusieurs années qu'une série de recherches est en marche ayant comme objectif l'évaluation du transport solide à l'embouchure de la Magra et les formes selon lesquelles il se déroule le long du tronçon terminale affecté par l'intrusion des eaux marines.

Les modifications morphologiques de ce tronçon furent appréciées par comparaison des relevés aerophotogrammétriques et bathymétriques des années 1958, 1960 et 1973 entre lesquelles le prélèvement de matières du lit et la formation de creux d'extraction avait été plus brutale.

Ces extractions ayant été suspendues en 1973, après cinq années, en 1978, l'étude du colmatage des creux a été entrepris afin d'évaluer: i) la quantité de matières déposées au fond du creux plus à l'amont; ii) la distribution en épaisseur et granulométrie des matières; iii) les formes de colmatage par sédimentation et par charriage de fond; iv) le milieu hydrique existant dans le creux.

Une enquête préliminaire a eu pour but l'évaluation du trans-

port solide entre 1973 et 1978 à l'amont du premier creux et à l'aval du dernier creux près de l'embouchure.

3 - EVALUATION DU TRANSPORT SOLIDE AU CREUX ET À L'EMBOUCHURE

Le transport de sédiments en suspension a été évalué au moyen de séries de échantillonnages ponctuelles pour la détermination des concentrations des sédiments. Ces données ont servi pour l'étalonnage au tronçon étudié des observations systematiques existant dès 1957 sur la Magra à la station de Calamazza (ANNUAIRES HYDROGRAPHIQUES, 1957 et suiv.).

D'après ces calibrations le transporte solide en suspension a été estimé en moyenne de 450×10^3 m³/an environ, qui correspondent à une dégradation spécifique du bassin versant de 0,27 mm/an.

Le charriage de fond arrivant au premier creux a été évalué par les formules de Meyer-Peter et de Shields. Les granulométries des matériaux charriés ont été obtenues par des échantillonnages au centre du lit et près des berges. Ces courbes granulométriques résultent très pareilles entre elles et définient un \varnothing_{50} de 30 mm referé à la distribution log-normale des matières criblées en classes définies par les $\log_2 \varnothing$.

Les débits charriés entre 1973 et 1978 ont été évalués par classes de débit de la rivière ayant amplitude de 50 m³/s, et multipliant ces débits solides pour les durées des débits liquides correspondants. Le charriage de fonf atteignant le creux resulte d'après ces calculs de 64.000 m³/an selon Meyer-Peter et de 51.200 selon Shields, et en moyenne de 58.000 m³/an environ. Ces valeurs résultent en effet assez faibles par rapport aux caracteristiques physiques du bassin versant et de la rivière, et corerspondent à une érosion spécifique de 0,035 mm/an.

Il est bien connu d'ailleurs que les résultats de ces calculs indirectes sont en général moins que orientatifs faute de la structure même des formules, de la difficulté d'y introduire des valeurs expérimentales sûres et précises. A ce propos il est bien démontré que ces formules sont extrêmement sensibles aux variations des valeurs de granulométrie et de la pente du courant liquide, et que même les erreurs de mesure de ces grandeurs portent à des variations sensibles des résultats (BUFFONI, 1979).

En conséquent des élaborations sus-indiqués, on a pu consta-

ter que les débits liquides qui produisent le charriage de toutes fractions granulométriques existantes au fond de la rivière sont de $415 \text{ m}^3/\text{s}$ selon Meyer-Peter et de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ selon Shields. Le transport solide atteignant le creux est donc estimé en total de $508 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$, desquels 58×10^3 par charriage de fond, qui est retenu en total ou en grand partie au fond du creux, et $450 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$ par transport en suspension, qui s'écoule en grande partie à l'aval du creux jusqu'à la mer.

Cette situation se vérifie en particulier parceque, étant le fond du creux sous le niveau de la mer, les eaux douces de la rivière s'écoulent à l'aval en glissant sur les eaux salées qui remplissent le creux, sans aucune importante augmentation de la sédimentation faute de décelération du courant.

En de pareilles conditions la langue d'eau salée qui pénètre à l'intérieur de la rivière en glissant sur son fond et remplissant les creux, change de position en fonction du débit d'eau douce et des conditions météo-marines à l'embouchure (figure 1).

L'extrémité de la langue d'eau salée constitue un point de discontinuité des conditions de charriage de fond, puisqu'à l'aval de ce point la force tractrice vient à s'éliminer rapidement faute du détachement des eaux douces du lit de la rivière. Les matières charriées s'immobilisent, par conséquent, au moment où elles rejoignent les eaux salées. Les matières ainsi accumulées se déplacent à nouveau vers l'aval, et le cas échéant vers l'embouchure, à l'occasion des périodes de crue, quand le courant d'eau douce pousse l'eau salée vers la mer.

Le long du tronçon de rivière affecté par l'intrusion marine le charriage de fond se déroule donc par pulsations (CAVAZZA, 1977). La Magra les mesures directes menées à l'aval du dernier creux, à sur 2,5 Km de l'embouchure, ont démontré que le transport du complexe des fractions granulométriques des matières du lit se manifeste seulement pendant 33 jours par an, quand les débits liquides sont assez élevés. Le charriage peut quand-même se vérifier pour des périodes plus longues, mais de façon plus limitée, par entraînement de fractions de plus en plus fines des matériaux de fond en raison de la diminution des débits.

Seulement au-dessous du débit de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ se termine le charriage de fond en tant que pour cette valeur la langue d'eau marine se pousse jusqu'à la section à l'aval des creux.

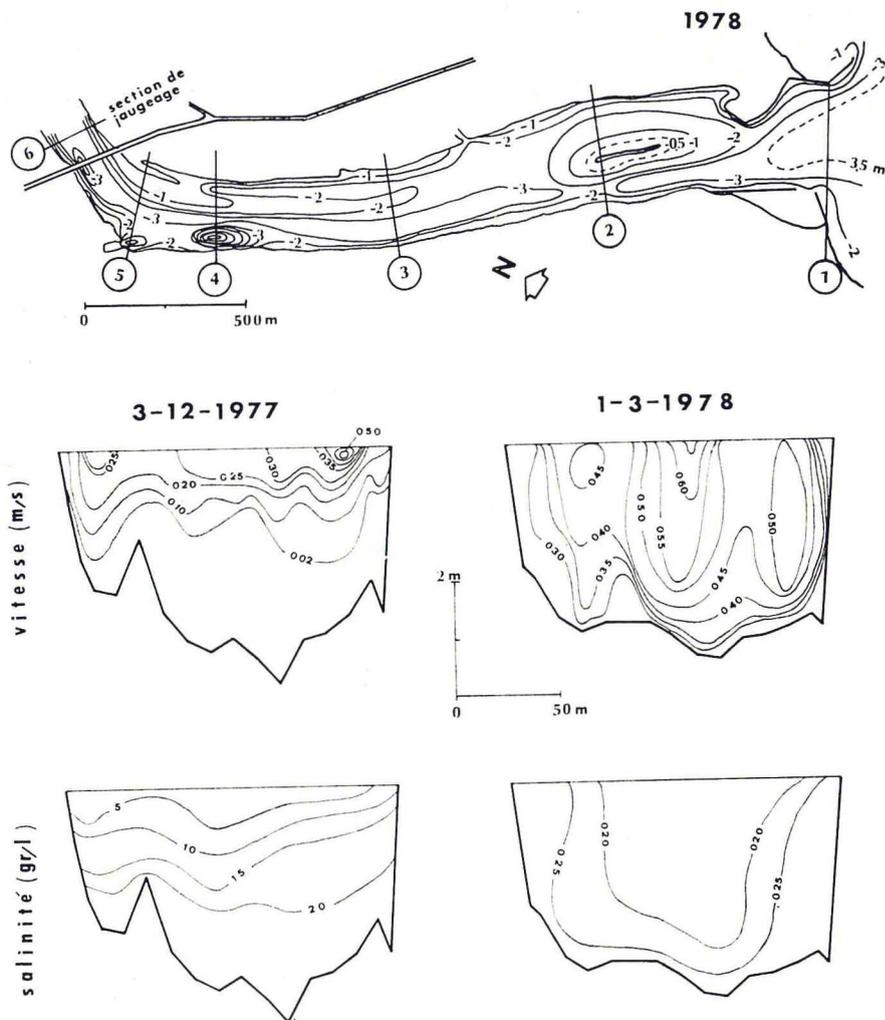


Fig. 1 - Jaugeage de vitesse et de salinité des eaux de la Magra au pont de la Colombière.

Ces déterminations ont été contrôlées par des mesures directes du charriage, effectuées en différentes conditions de débit de la rivière et météo-marines avec l'emploi de nasses du type adopté par l'Institut Scientifique des Recherches de l'URSS, au coefficient

d'efficacité de 0,75 (Shamov). Ces mesures ont démontré que le charriage de fond à l'aval des creux est nul, même à l'absence de intrusion marine au fond de la rivière. Cette circonstance se justifie pleinement par la présence même des creux, qui retiennent les matières provenant de l'amont.

4 - FORMES DE COLMATAGE DU CREUX

Le creux examiné est situé entre deux seuils distants entre eux de 800 m, il est large environ 250 m et il rejoint une profondeur maximale de 10,5 m (en 1973).

Pour ce tronçon de la rivière existent les relevés bathymétriques de 1958, 1960 et 1973. En 1978 les recherches ont été reprises et deux limnimètres ont été placés aux extrémités du tronçon et référés au niveau de la mer, distant environ 6,5 Km (figure 2).

Le critère de reconstruire la bathymétrie du creux par sections transversales a été suivi pour pouvoir relever les mêmes sections et les mêmes points auparavant relevés. En 1978 des sections supplémentaires ont été quand-même relevées, ayant ainsi un total de 11 sections.

Etant donné que la largeur de la rivière est modeste et ses vitesses faibles en période d'eaux basses lorsque les opérations ont été menées, on a renoncé à employer un sondeur à ultra-sons et on a préféré sonder à la main le long de câbles flottants tendus entre les repères situés sur les berges opposées.

En 20 de ces sections des échantillons des matières déposées au fond ont été prélevées. Pour cette opération plusieurs méthodologies ont été suivies: i) l'emploi d'une benne preneuse à deux cuillères et fermeture automatique, qui d'ailleurs ne s'adapte pas au prélèvement de dépôts à fractions gravillonneuses, n'assurant la récolte des fractions plus fines faute de sa incomplète fermeture; ii) l'emploi d'un carottier marin de 30 mm de diamètre, résultat inapte à l'échantillonnage des fractions plus grossières; iii) l'emploi d'une benne à entraînement, imprecise par le lessivage de l'échantillon et la mauvaise définition du point échantillonné.

Etant donné la faible profondeur du creux on a préféré le prélèvement direct des échantillons par plongeur. Ces échantillons, au volume de 2 dm³, sont sûrement localisés et représentatifs des premiers 30 cm d'épaisseur des dépôts de fond.

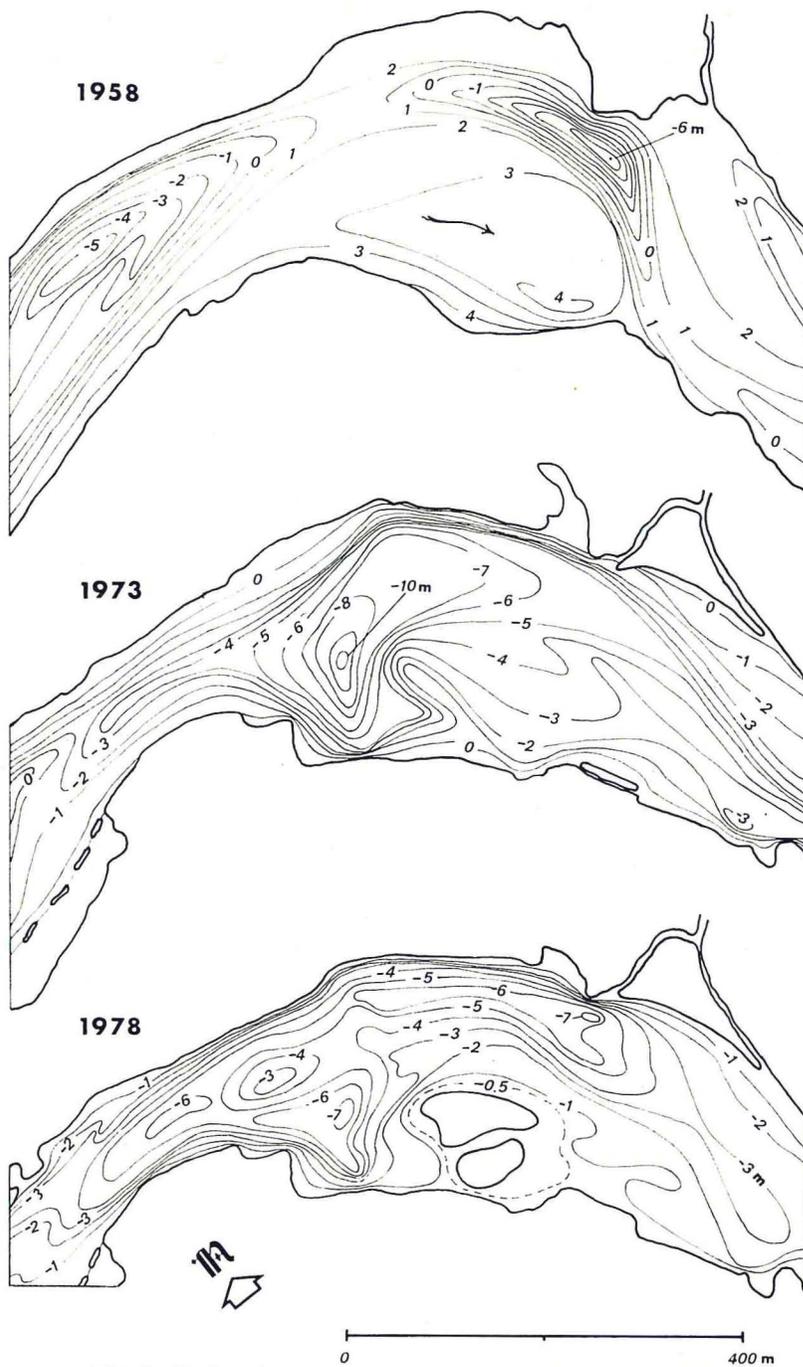


Fig. 2 - Bathymétries du creux relevées en 1958, 1973 et 1978.

D'après les observations du plongeur on a obtenu en même temps des précieuses informations sur le milieu de déposition, dont il n'avait pas été possible riprendre aucune photo sous-marine faute de la très forte dispersion des sédiments en suspension. Les échantillons ainsi collectés ont été soumis à des analyses au près du Laboratoire de Sédimentologie de l'Université de Pise.

Le milieu hydrique a été défini pour 27 verticales du creux, où on a observé: i) la vitesse et la direction de mouvement de l'eau, par jaugeages au moulinet: ces mesures ponctuelles ont bien défini la surface de contact entre eau douce et eau salées; ii) la variation de température de l'eau par rapport à la profondeur; iii) la variation de la teneur en sels de l'eau, au moyen de salinomètre à résistivité avec mesure continue par détecteur à plaques platinées; iv) la teneur des sédiments en suspension, par mesures continues au moyen de turbidimètre à double cellule photo-électrique. Cet instrument, en général étallonné par formazine, le cas échéant a été étallonné par les sédiments même de la rivière. La régression entre mesures au turbidimètre et pesées directes des sédiments est résultée à très haute confiance.

En même temps que les mesures illustrées, d'autres mesures de débit, de niveau aux échelles limnimétriques, de la température de l'air, du vent et des conditions de marée et des vagues ont été conduites, ainsi que les observations des variations de température des eaux du creux à différentes profondeurs.

D'après ces recherches le colmatage annuaire moyen du creux entre 1973 et 1978 a été évalué en $57.900 \text{ m}^3/\text{an}$. Ce valeur est à peu près égale au charriage de fond arrivant au creux. On démontre ainsi qu'en effet la totalité ou presque du charriage est reténu par le creux, sans possibilité de colmatage des autres creux existants plus à l'aval.

En général le fond du creux a subi un modellement portant à des formes plus douces, avec érosion au bord de l'amont, colmatage des zones plus profondes et formation d'ilôts la où la vitesse des eaux était plus faible.

Le milieu hydrique défini par les profils verticaux de ses paramètres présente un niveau supérieur d'eau douce de l'épaisseur de 40-50 cm, au dessous duquel le milieu est typiquement pélagique, aux eaux salées, immobiles, à faible concentration de sédi-

ments grossiers, mais avec une forte dispersion de particules colloïdales, à température constante.

BIBLIOGRAPHIE

- BUFFONI E. (1979) - Stima delle sensibilità nelle valutazioni indirette del trasporto solido di fondo dei corsi d'acqua. *C.R. «Le spiagge di Romagna: uno spazio da proteggere»*, 27-30.
- CAVAZZA S. (1977) - I criteri di stima dell'apporto terrigeno alla foce dei corsi d'acqua e il caso del fiume Magra. *C.R. Convegno di studi per il riequilibrio della costa fra il fiume Magra e Marina di Massa*, 123-133.
- CAVAZZA S., MERLISENNA P., PIAGGI G. (1977) - Variazioni morfologiche del tronco terminale del fiume Magra nel quindicennio 1958-1973. *C.R. Conv. Studi per il riequilibrio della costa fra il fiume Magra e Marina di Massa*, 135-155.
- (1957 et suiv.) - *Annali idrologici*; I parte. Servizio Idrografico. Sezione di Genova.

(ms. pres. il 18 dicembre 1980; ult. bozze il 24 febbraio 1981)