Recherches récentes en Océanographie littorale

Solutions nouvelles à quelques problèmes techniques

Recent research on littoral oceanography.
New solutions to some technical problems.

PAR A. RIVIÈRE

PROFESSEUR A LA SORBONNE

L'auteur raconte dans quelles conditions il a été amené à consacrer l'essentiel de son activité scientifique à la sédimentologie et expose quelques-uns des travaux effectués dans ce domaine par lui-même ou par ses collaborateurs scientifiques.

Après avoir traité de différentes questions relatives à la morphologie littorale ou aux phénomènes littoraux, il développe des conceptions nouvelles concernant l'évolution granulométrique des sédiments meubles, laquelle est souvent susceptible d'une interprétation mathématique simple. Il termine en décrivant d'une part un nouveau procédé de défense contre l'ensablement d'un port (La Cotinière), d'autre part un nouveau système d'épi d'une particulière efficacité dans la protection des côtes contre l'érosion littorale.

The author relates the circumstances which led him to devote the main part of his scientific activity to the study of sediment and describes some of the work in this field that he or his scientific collaborators have done.

After dealing with various questions concerning coastal morphology or littoral phenomena, he develops new ideas concerning the evolution of the sediment grading during transport, a factor which is often capable of simple mathematical interpretation.

He concludes by describing a new procedure for the protection of a port (La Cotinière) against silting up, and a new groin system particularly effective in protecting shores against littoral erosion.

Mes premiers contacts avec l'Océanographie littorale remontent à l'été 1935. Je venais de terminer une thèse de géologie très classique sur les montagnes du nord de l'Iran et de retour en France, je passais mes vacances au Pouliguen (Loire-Inférieure).

Les hasards de mes promenades sur les bords de cette curieuse lagune que l'on appelle le Traict du Croisic (Loire-Inférieure) me révélèrent des problèmes que l'enseignement classique n'apprenait pas à résoudre. Le désœuvrement d'abord, puis, bientôt, un intérêt passionné, me lancèrent dans un domaine alors

à peu près inexploré et dans lequel on ne risquait guère de se heurter à des conceptions toutes faites. Je n'exposerai pas ici les résultats détaillés de ce premier travail; ils se rapportaient essentiellement à l'histoire quaternaire du Traict (1) [*], mais j'y avais rencontré l'un des problèmes essentiels de la géologie littorale. Les prés-salés (*schorres*) qui bordent le Traict du Croisic étaient alors en voie de recul rapide et généralisé, recul souligné par l'existence d'une

[*] Les chiffres entre parenthèses renvoient à la bibliographie.

« micro-falaise » d'érosion, atteignant parfois près d'un mètre de hauteur (fig. 1), en avant de laquelle s'observaient des témoins en voie de destruction de l'ancienne extension du schorre. La première idée qui pouvait alors venir à l'esprit était d'assimiler les prés-salés à une terrasse et leur érosion à celle que produit, dans une plaine alluviale, l'abaissement du niveau de

Fig. 1

Erosion des prés-salés par remontée du niveau de la mer. Malgré l'érosion périphérique, l'altitude du schorre s'élève avec le niveau des hautes mers.

base d'un cours d'eau. Un peu de réflexion montre vite qu'une telle interprétation, pour classique qu'elle puisse paraître, ne peut être retenue, puisque menant à des conceptions dont la plus évidemment inacceptable est que l'abaissement du niveau de la mer aurait pour conséquence une augmentation de la surface inondée de la lagune, telle qu'elle peut être mesurée, par exemple, au niveau moyen des hautes mers de morte-eau. J'ai pris alors le problème sous l'angle de la notion de « profil d'équilibre », telle qu'elle était définie dans le traité classique de Arthur HOLMES. Il me fut facile de me rendre compte que le recul du schorre, impliquant une atténuation de la pente moyenne des fonds et montrant ainsi que cette pente était devenue supérieure à celle du profil d'équilibre, ne pouvait avoir, toutes choses égales d'ailleurs, d'autre cause qu'une surélévation relative du niveau marin. L'idée d'une remontée actuelle du niveau de la mer se trouvait ainsi posée bien avant que le dépouillement des enregistrements marégraphiques ait permis de le soupçonner. La faible étendue de la région prospectée ne permettait d'ailleurs pas d'éliminer l'hypothèse d'une déformation locale de la croûte terrestre. J'ignorais alors que la régression des schorres était un phénomène général dans les estuaires des côtes bretonnes, ce que devaient montrer plus tard les observations de C. FRANCIS-BŒUF. Malheureusement, celui-ci crut prudent de ne pas prendre nettement position entre la conception classique et... l'interprétation nouvelle, manquant ainsi le résultat important qui se déduisait de son travail.

Vers 1936, l'étude granulométrique des sédiments commençait à préoccuper les naturalistes et surtout les biologistes qui s'intéressaient à

l'écologie des animaux fouisseurs. A cette époque, en France, tout au moins, on représentait les résultats des tamisages au moyen de courbes de fréquences obtenues en portant en abscisses les dimensions de mailles des tamis (ou les logarithmes de ces dimensions) et, en ordonnées, les résidus correspondant à chacun d'eux. La forme des courbes dépendait alors des écarts plus ou moins arbitraires entre les dimensions de mailles des tamis successifs et, d'un laboratoire à l'autre, les résultats n'étaient pas comparables entre eux. Dès mes premières recherches dans ce domaine, je fus arrêté par ces difficultés et amené à chercher un mode de représentation à la fois rationnel et commode. J'eus l'idée d'utiliser des coordonnées polaires (2) : les arcs sont proportionnels aux dimensions moyennes correspondant à chacun des intervalles de tamisages et les rayons à la racine carrée de la masse de la fraction granulométrique correspondante. Très figurative, la méthode permet de mettre en évidence d'emblée les similitudes granulométriques ainsi que les caractères spéciaux correspondant aux différents milieux de sédimentation. Chose assez curieuse, la méthode, qui est malheureusement assez sensible aux imperfections des tamis, a été beaucoup plus utilisée par d'autres chercheurs que par moi-même. Ce sont, probablement, le Laboratoire d'Hydraulique de la Faculté des Sciences de Lille et le Laboratoire Central d'Hydraulique de Maisons-Alfort qui en ont tiré les résultats les plus intéressants pour des hydrauliciens : c'est, en effet, l'emploi de cette méthode de représentation qui a permis à ce dernier organisme de découvrir la possibilité de la similitude granulométrique en modèle réduit (fig. 1 bis).

Je saute maintenant par-dessus les années pour vous mettre au courant des conceptions nouvelles auxquelles des travaux théoriques me conduisirent en 1952 (3 à 9). Les recherches dans le domaine granulométrique s'étaient alors multipliées et des méthodes nouvelles de représentation étaient apparues. A côté des histogrammes, souvent peu significatifs, dont on continuait à faire ample usage, on recourait surtout à différents systèmes de représentations cumulatives semi-logarithmiques avec figuration des pourcentages en ordonnées arithmétiques ou plus souvent en ordonnées de probabilité. On utilisait aussi différents coefficients (dissymétrie, angulosité, etc) caractérisant avec plus ou moins de précision l'allure géométrique des courbes de fréquence, mais aucune notion générale ne se dégageait d'un ensemble de travaux sans cesse accru. Personnellement, je m'étais contenté de mettre au point une méthode d'analyse mécanique dérivant de celle de la pipette d'ANDREASEN (10), mais permettant de suivre

Fig. 1 bis

Tarage sédimentologique. Comparaison de la répartition granulométrique des sédiments prélevés en modèle réduit et en nature, après une période de crue.

sans difficulté la granulométrie des sédiments meubles jusque vers 0,00006 mm et d'utiliser une représentation semi-logarithmique banale de base 10. L'accumulation d'un très grand nombre de résultats finit par mettre en évi-

Fig. 2

Courbes semi-logarithmiques représentant les trois familles granulométriques représentant un ensemble continu.

(Extrait de la note du 19 mai 1952 présentée à la Société Géologique de France. Bull. S.G.F., t. II, pp 145-167.)

dence le fait que la granulométrie des sédiments fins se traduisait par des courbes qui pouvaient être réparties en trois familles (fig. 2) formant un ensemble géométriquement continu, ce qui laissait supposer que les granulométries caractéristiques des sédiments les plus variés appartenaient probablement à une même famille continue de fonctions. Compte non tenu des perturbations de caractère aléatoire au voisinage de leurs extrémités, certaines de ces fonctions étaient visiblement logarithmiques. Je pus vérifier que les granulométries linéaires que je savais depuis longtemps caractériser les sédiments non évolués, faisaient partie de cette même famille de fonctions. Or, la seule représentation analytique des fonctions d'une famille continue comprenant à la fois la fonction linéaire et la fonction logarithmique est de la forme $y = \int a x^n dx$. Je ne puis insister sur les difficultés d'ailleurs assez facilement surmontables qui se présentèrent lors de la confrontation de ce résultat théorique avec la réalité. La figure 3 représente les courbes théoriques mises sous forme « canonique ». Les premières recherches, largement confirmées depuis, ont montré que l'évolution d'un sédiment meuble — lorsqu'elle résulte d'un phénomène de *transport* de sens constant tel que celui qui peut résulter d'un courant — se traduit par une décroissance de l'indice n (ou *indice d'évolution*) de 0 (granulométries dites linéaires) vers -1 (granulométries dites logarithmiques). Ces dernières se trouvent caractériser aussi bien les sédiments

FIG. 3

Faisceau des courbes théoriques

$$n = N^{-1} \quad g = \log G \quad G = M/m$$

(Extrait de la note du 19 mai 1952 présentée à la Société
pp. 145-167.)Géologique de France. Bull. S.G.F., 6^e série, t. II,

d'estuaires (11-12) ou les vases littorales que des sables de la plage évolués par un transport à grande distance. Les sédiments argileux fins déposés en état de défloculation par *décantation* dans les cuvettes lacustres (cas de beaucoup d'argiles céramiques fines) correspondent à des indices d'évolution inférieurs à -1 (granulométries dites hyperboliques). L'étude des sédiments recueillis dans une même section transversale de la Medjerda (Pimienta, Thèse) (13 et 14) a montré (fig. 4) que les sédiments déposés sur les

FIG. 4

Répartition granulométrique des sédiments dans une même section de la Medjerda. Courbes semi-logarithmiques et courbes canoniques.

berges étaient caractérisés par un indice d'évolution compris entre 0 et -1 (granulométrie dite parabolique), tandis que ceux qui étaient entraînés par le courant au voisinage du fond avaient une granulométrie logarithmique (n voisin de -1), enfin que ceux que la turbulence maintenait en suspension avaient une granulométrie plus évoluée caractérisée par un indice d'évolution inférieur à -1 (granulométrie hyperbolique).

Par ailleurs, on a découvert que dans certaines conditions (phénomènes de lévigation dans les lagunes), l'indice d'évolution pouvait rétrograder vers des valeurs plus élevées (caractéristiques des granulométries paraboliques) et que dans des cas extrêmes (dépôts de pente soumis à un ruissellement prolongé), on pouvait même trouver des valeurs positives de n (15) (alors que les sédiments non classés sont caractérisés par une valeur de n voisine de zéro).

Ce sont les sédiments littoraux qui furent les plus rebelles à l'emploi de cette méthode, par suite du caractère aléatoire souvent accentué de leurs granulométries (qui, exceptionnellement, arrivent à être gaussiennes-logarithmiques). L'introduction d'un indice de dispersion a permis de tourner cette difficulté, mais les résultats acquis, dans ce domaine, sont encore trop récents pour que je les aborde ici. D'ores et déjà, la méthode est utilisée par un certain nombre de chercheurs étrangers à mon laboratoire. Présentée à F. SHEPARD et à H. PETTERSEN, elle a reçu d'eux un accueil flatteur.

J'exposerai, maintenant, quelques résultats des recherches d'océanographie littorale qu'en raison de la guerre je ne pus reprendre qu'en 1946, à l'occasion d'un séjour de vacances dans la région de l'Aiguillon (Vendée). Elles portèrent à la fois sur l'évolution des plages et sur la morphologie de l'estuaire du Lay (rivière de l'Aiguillon) (22). Dans cette région, classiquement considérée comme en voie de remblayage sédimentaire, et où, depuis des siècles, la terre ferme gagne sur le domaine maritime, la situation s'était renversée depuis quelques années, et la côte, particulièrement au droit de la station balnéaire de la Faute, était en voie d'érosion rapide. Il semble qu'à cette époque le phénomène ait été surtout attribué à l'érosion du chenal parallèle au rivage par lequel s'écoulaient au jusant les eaux d'une lagune littorale, longue et étroite, s'étendant en direction N.E. vers la Grière (fig. 5). Les travaux de défense, alors entrepris, épis de planches et de gabionnages, paraissaient, en effet, l'avoir été en fonction de cette hypothèse et se montraient peu efficaces. Il m'apparut vite que la solution du problème ne pouvait être trouvée que dans un cadre plus vaste (23). Une enquête, d'ailleurs difficile, menée près des habitants du pays, révélait que l'attaque de la côte, remontant à

peine à quelques années, avait succédé à une période prolongée de stabilité ou de gains sur la mer. D'autre part, une observation étendue à l'ensemble des plages montrait que l'érosion se faisait sentir très loin en direction de la pointe d'Arçay, bien au-delà de la zone d'action, d'ailleurs très réduite, du courant de jusan de la lagune. Des observations antérieures dans la région de Saint-Jean-de-Monts me conduisaient, par ailleurs, à la conviction que le phénomène

FIG. 5

Plage et lagune de La Faute, près de l'Aiguillon (1946-47).

d'érosion avait au moins un certain caractère de généralité. Enfin, l'absence d'érosion de la flèche littorale séparant la lagune de la mer, flèche qui était d'ailleurs en voie de progression rapide, achevait de poser le problème. C'est encore la notion de profil d'équilibre littoral, sous sa forme classique, qui permit de découvrir la solution. De ce point de vue, l'érosion littorale impliquait nécessairement une pente des fonds supérieure à celle correspondant au profil d'équilibre, tel qu'il pouvait résulter des conditions océanographiques locales. Or la période d'érosion avait succédé à une série de tempêtes exceptionnelles accompagnées de raz de marées qui avaient gravement menacé les côtes. Il était bien évident que l'attaque spectaculaire des dunes et des cordons littoraux s'était accompagnée, suivant un mécanisme connu, d'un creusement des petits fonds au-dessous des profils d'équilibre. Beaucoup plus discret, ce phénomène n'avait attiré que peu l'attention, mais il avait déclenché une érosion qui durait encore plusieurs années après, soulignant ainsi un phénomène d'hystérésis qui est une des caractéristiques essentielles des phénomènes littoraux. On pouvait en conclure que le recul du rivage durerait jusqu'au moment où les sédiments, que les courants de vagues apportaient du nord, auraient remblayé les petits fonds au niveau des profils d'équilibre. En opposition avec l'érosion de la côte, l'immunité des profils de la flèche sédimentaire et sa progression prouvaient assez que ces apports ne tarderaient pas à faire sentir

leur action dans la zone menacée. Le phénomène se produisit entre le mois d'avril et le mois de juillet 1947. Les ouvrages de défense, jusqu'alors inefficaces, se remblayèrent en un court délai et les 200 m de plage qui séparent maintenant de la mer les dunes jadis menacées, justifient les prévisions que je pus faire alors quant à l'évolution ultérieure de la situation — laquelle peut d'ailleurs toujours être remise en cause par une nouvelle série de tempêtes de caractère exceptionnel.

Simultanément, je poursuivis l'étude de la morphologie de l'embouchure du Lay (24), lequel se jette à la mer entre deux pointes sédimentaires en voie de progression : la pointe d'Arçay et la pointe de l'Aiguillon. Par sa largeur croissante vers l'aval, l'embouchure de ce très petit cours d'eau prend le caractère d'un estuaire, ce qui est contraire à la vieille conception classique qui considère qu'un estuaire est une basse vallée envahie par suite d'une remontée du niveau de la mer. En fait, les estuaires ne peuvent subsister, en tant que tels, que dans la mesure où l'ensemble des actions hydrodynamiques qu'ils subissent maintient leur forme caractéristique et cela est tout à fait indépendant de leur histoire géologique antérieure. Le bénéfice scientifique essentiel de mon étude fut de pouvoir préciser la signification des relations morphologiques entre les schorres (prés-salés) et les pentes vaseuses qui leur font suite (slikkes), signification déjà entrevue lors de mon premier travail sur le Traict du Croisic. Contrairement à ce qui se passe pour les estuaires de Bretagne, la zone de contact entre schorre et slikke se présente dans l'embouchure du Lay, tantôt comme une micro-falaise d'érosion, tantôt comme un passage progressif sans rupture de la pente. De nombreuses observations de caractère très varié et dont je ne puis ici donner le détail, confirmèrent pleinement le fait — alors très discuté malgré l'évidence de bon sens qu'il semble présenter — que le premier cas correspond toujours à un recul latéral du schorre par érosion et le second à une extension du schorre aux dépens de la slikke, le passage d'un état à l'autre pouvant d'ailleurs résulter d'un phénomène d'importance aussi réduite qu'un minime déplacement de méandre. Partant, de cette idée très simple et presque évidente, j'ai pu montrer, par une discussion théorique, que l'étude morphologique des formations d'estuaires pouvait — tout au moins en l'absence d'actions humaines trop marquées — donner sur le sens des variations actuelles du niveau de la mer, des indications qu'il est souvent difficile d'avoir autrement. Ainsi, la continuité du profil schorre-slikke dans toute la partie terminale de l'embouchure du Lay, révélant une sédimentation bilatérale, implique nécessairement un glissement aval de

loute la structure estuarienne (fig. 6) qui ne peut s'expliquer que par une prédominance très marquée de la sédimentation ou par une surélévation régionale progressive que semble confirmer la transformation des schorres en une sorte de basse-terrasse vers l'amont et qui est d'ailleurs admise par les géologues régionaux.

FIG. 6

Extension des schorres au cours d'une régression.

(Extrait de « Observations sédimentologiques sur la côte vendéenne », R.G.H. n° 48, nov.-déc. 1948.)

Au contraire, l'érosion bilatérale des schorres (fig. 7) implique nécessairement un recul bilatéral des rives et, par suite, une remontée vers l'amont de l'ensemble des structures estuariennes, ce qui ne peut guère s'expliquer que par une remontée actuelle du niveau de la mer, maintenant admise par tous, ou plus difficilement, par une réduction des apports sédimentaires, effective peut-être en certains points.

A partir de 1948, avec le concours de jeunes collaborateurs, j'ai reporté l'essentiel de mon effort sur les côtes méditerranéennes. La simplification résultant de l'absence ou de la faiblesse des marées, la transparence et la tiédeur des eaux permettant des observations de longue durée à la lunette de plongée (et plus rarement au moyen du scaphandre autonome), permirent une riche moisson de faits et d'idées nouvelles. Le nom de Mme DUBOUL-RAZAVET qui, sept années durant, porta son effort sur l'étude du delta du Rhône, dans des conditions rendues extrêmement pénibles par l'insuffisance des crédits de recherches, doit être associé au succès de ces travaux qui font l'objet de nombreuses notes et de plusieurs mémoires (25 à 37). Je ne pourrai, bien entendu, exposer ici que quelques-uns des résultats les plus significatifs quant à la connaissance pratique des phénomènes littoraux.

Les premières observations faites sur le delta attirèrent d'abord notre attention sur le fait que, toutes choses égales d'ailleurs, l'effet résultant de l'ensemble des actions littorales dépendait essentiellement de la charge sédimentaire des

eaux et cela d'une manière tout à fait comparable à ce qui se passe pour un cours d'eau. Bien que la notion de charge sédimentaire soit ici beaucoup plus difficile à définir, ce résultat devait dominer les études ultérieures. Peu après l'étude du golfe de Fos (38) nous révélâ des faits peu conformes aux conceptions classiques. Cette nappe d'eau est, en effet, caractérisée par une très forte érosion de ses rivages qui, en certains points, ont reculé de plus de 150 m au cours des dix dernières années. Or, cette érosion se trouve coïncider avec une pente exceptionnellement faible des profils littoraux, d'ailleurs interrompus par la présence de plusieurs rides sous-marines parallèles au rivage, caractère que l'on considère souvent comme définissant les côtes en voie d'émersion. Comme la côte du golfe de Fos était en voie de sédimentation rapide lorsque le Rhône se jetait encore dans le golfe de Fos et y déversait ses alluvions, le recul actuel du littoral apparaît comme une conséquence à peu près indiscutable de l'arrêt des apports sédimentaires consécutif au détournement du bras principal du fleuve vers le grau de Roustan, au sud du delta. L'ensemble des faits observés nous conduisit, après discussion serrée de toutes les possibilités d'interprétation, à l'idée qu'aucune

FIG. 7

Recul bilatéral des schorres au cours d'une transgression.

1. — Profil et limites anciens.
2. — Profil et limites consécutifs au recul des prés-salés.

(Extrait de « Observations sédimentologiques sur la côte vendéenne », R.G.H. n° 48, nov.-déc. 1948.)

côte formée d'éléments meubles fins et, en particulier, aucune plage ouverte ne peut se maintenir si elle ne reçoit pas un apport sédimentaire d'origine quelconque, fluviale ou autre, compensant non seulement les pertes qui peuvent évidemment résulter des transports littoraux, mais aussi, une inévitable « DISPERSION » vers le large. Les observations effectuées par la Mission de la SEHOM (filiale du Laboratoire Central d'Hydraulique), lors de l'étude du port de Safi (Maroc), confirmèrent la réalité de la

dispersion en montrant que les sédiments dragués dans le port et rejetés à l'extérieur de la grande jetée, par 13 m de fond, se « dispersaient » lentement et pouvaient être reconnus à des centaines de mètres au large, jusqu'à des profondeurs atteignant 30 m (les recherches n'ayant d'ailleurs pas été poursuivies plus loin). Les observations récentes de M. J. BOURCART et de ses élèves sur l'entraînement des grains de sable par flottation ont révélé un nouveau mécanisme, probablement important, de la dispersion. Ces faits ont conduit à l'abandon de la théorie classique du profil d'équilibre suivant laquelle une côte formée d'éléments meubles tend spontanément vers une forme de stabilité ne dépendant que de la granulométrie du sédiment et des conditions océanographiques locales. En réalité, et en dehors de cas exceptionnels, les formes de stabilité que l'on rencontre traduisent beaucoup plus un équilibre complexe et souvent précaire entre toutes les causes d'apport sédimentaires et toutes les causes de pertes — dispersion comprise. Sous cette réserve, la notion de profil d'équilibre peut être conservée et, bien qu'elle perde le caractère concret et précis qu'on lui conférerait, elle demeure un précieux élément de raisonnement et d'interprétation dans l'étude des phénomènes de l'évolution littorale.

Nous avons déployé un effort important dans l'étude des courants de fond compensateurs. Depuis très longtemps, on avait admis que les vagues poussées par les vents de tempête, soufflant du large vers la côte, produisaient une surélévation du plan d'eau au voisinage du rivage, surélévation compensée en profondeur par un courant de retour (undertow), tendant à entraîner en direction du large les sédiments mis en suspension par les vagues. Ainsi expliquait-on l'érosion des plages sous l'effet des tempêtes. Les vents de terre, abaissant le plan d'eau au rivage, produisaient des phénomènes inverses. La découverte des « rip currents » par F. SHEPARD, des essais en modèle réduit effectués surtout dans les pays anglo-saxons et des calculs théoriques ont conduit récemment certains savants à rejeter la théorie de l'undertow. Nous allons voir ce qu'il en est. Des observations faites à la lunette de plongée sur la plage qui s'étend de Saint-Aygulf à Fréjus (Var) me permirent pourtant de constater, par vent soufflant du large, perpendiculairement à la côte, un undertow très faible, mais qui suffisait à éloigner lentement du rivage, les sédiments mis en suspension par l'action des vagues. Le fait a été confirmé par les observations plus spectaculaires de J.-J. BLANC qui a pu voir, en certaines circonstances, l'undertow creuser de véritables chenaux dans les rides sous-marines littorales et par Mme RAZAVET qui, dans ses études de courant à la périphérie du delta du

Rhône, en a mesuré la vitesse. Enfin, s'il est exact qu'en modèle réduit, les houles qui prennent naissance sous l'impulsion des batteurs ne donnent pas naissance à des courants de fond compensateurs, il suffit de figurer l'action du vent au moyen de ventilateurs pour voir apparaître un undertow très caractéristique, avec entraînement au large des sédiments. Je tiens à préciser que les expériences ont été faites, en 1949-1950, au Laboratoire Central d'Hydraulique. J'ai donné une étude détaillée de ces phénomènes dans une communication au Congrès de Wageningen en 1950 (39). La réalité des phénomènes d'undertow est donc confirmée. La vieille théorie classique était solide.

Avant nos recherches, les transports littoraux sur la côte du delta du Rhône et sur la côte languedocienne étaient considérés comme résultant essentiellement de l'action du courant général de la Méditerranée, dirigé d'est en ouest et de celle des courants de vagues qui prennent naissance quand soufflent les vents du secteur S.E. Des observations faites à la côte, par vent du secteur N.W. (Mistral), nous montrèrent l'existence de courants littoraux dirigés en sens inverse entraînant les sédiments mis en suspension par les vagues avec des vitesses atteignant parfois plusieurs décimètres par seconde. De plus, il est bien évident que la stabilité de la région du delta (pointe de la Gracieuse), située à l'est de l'embouchure principale, ne saurait s'expliquer dans l'hypothèse des seuls transferts littoraux d'est en ouest. Celle-ci ne peut donc correspondre qu'à une part de la réalité et cette conclusion nous conduisit à examiner de

Fig. 8

Houles obliques au rivage par vent de terre.

manière plus précise le mécanisme des transports sédimentaires lorsque soufflent les vents continentaux. La plupart du temps, ces transports résultent de l'action de vagues obliques, assez paradoxalement orientées dans le lit du vent et résultant de la diffraction dans la zone de calme relatif adjacente au rivage (fig. 8) de

l'agitation normale du large (40). Par suite de la diminution de la profondeur au voisinage de la côte, ces houles de diffraction se réfractent progressivement en pivotant jusqu'à ce que leur direction soit voisine de celle du vent et elles viennent déferler obligatoirement en donnant naissance à des courants de vagues classiques. L'efficacité de ces phénomènes de transport en direction ouest-est est d'autant plus grande qu'ils s'effectuent sans pertes par « dispersion », contrairement à ceux qui résultent de l'action des houles du large. Dans ce dernier cas, en effet, ces pertes sont parfois assez importantes pour annuler très vite l'effet des apports : ce sont elles, en particulier, qui font que la côte de Faraman est en voie d'érosion rapide, bien que située à peu de distance à l'ouest de l'importante zone d'apports sédimentaires qu'est le grau de Roustan.

Une autre preuve de la prédominance des transports sédimentaires, d'ouest en est, est fournie par l'observation des ouvrages de défense construits en différents points de la côte du golfe du Lion (épis de défense aux Saintes-Maries, à Carnon, à Frontignan et jetées protégeant les embouchures des différents graus) (41). On y observe, le plus généralement, un remblayage marqué du côté ouest, ce qui témoigne de la prédominance des transports d'ouest en est au niveau des plages, mais on peut également constater, à la fois par le sens des remblaiements et par la situation des zones d'amai-grissement par rapport aux ouvrages, que la direction prédominante des transports change et devient est-ouest, dès qu'une légère modification de l'orientation de la côte fait que les actions de transport, liées à l'action des houles du secteur sud, viennent ajouter leur effet à celui des houles du secteur sud-est, comme c'est précisément le cas au voisinage de Sète et d'Agde (S. VERNHET). Il résulte de ces observations que la prédominance générale des phénomènes de transport d'ouest en est n'est, en définitive, que la résultante — dont le sens peut assez facilement changer — d'actions de sens opposé. De plus, comme les actions de transport d'est en ouest se produisent sous l'action de houles prenant naissance avec un fetch souvent considérable, il est à peu près certain qu'elles se font sentir à des distances plus grandes de la côte. Il est donc possible que pour les sédiments plus fins des fonds, au large des plages, le sens de transport prédominant soit l'inverse de celui observé au rivage. Ainsi se trouveraient expliquées les contradictions apparentes entre les observations à la côte et les conclusions que différents auteurs ont pu tirer de l'étude des minéraux lourds.

On doit au même auteur la découverte du fait que sur ces côtes, le transport des sédiments

sous l'action des vagues prend assez souvent l'aspect du lent déplacement d'un système de dunes sous-marines (fig. 9) (42). C'est ainsi qu'au grau du Roi, elle a pu observer de véritables barkhanes (dunes en croissant) sous-marines se déplaçant obliquement entre une

FIG. 9

Transport sédimentaire par dunes sous-marines.

a) Rides obliques. — b) Rides perpendiculaires observées dans l'étang de Leucate. — c) Formations observées au Grau-du-Roi.

ride sous-marine parallèle au rivage et celui-ci. Dans l'étang de Leucate, elle a signalé des dunes sous-marines perpendiculaires au rivage, migrant lentement vers le sud sous l'effet des clapotis soulevés par une faible brise nord. Ces dunes s'écartaient progressivement de la côte pour donner une immense flèche littorale dis-

continue se prolongeant très loin en direction sud vers l'intérieur de l'étang. Ses observations les plus intéressantes ont trait à une disposition festonnée de la première ride sous-marine littorale, disposition très fréquente sur les côtes méditerranéennes, mais dont aucune explication satisfaisante n'avait été donnée jusqu'ici. Bénéficiant de circonstances favorables, Mlle S. VERNHET put se rendre compte qu'il s'agissait de véritables dunes sous-marines, au profil dissymétrique, allongées parallèlement à la direction des lames obliques au rivage et se déplaçant le long de ce dernier suivant le mécanisme classique de la progression dunaire. La découverte du mouvement de ces structures révélait une modalité importante des transports littoraux et donnait, du même coup, l'explication la plus probable des paradoxales rides sous-marines obliques signalées sur différentes côtes atlantiques et si minutieusement étudiées par GUILCHER et ses élèves.

Je pourrais citer beaucoup d'autres observations faites par moi-même et par mes collaborateurs, mais je ne veux pas abuser de votre patience et je vais aborder différents problèmes pratiques dont notre connaissance des phénomènes littoraux a permis de trouver la solution.

Le premier d'entre eux est un problème de protection de port contre les ensablements (44-45). Il s'est posé lors des études en modèle réduit faites au Laboratoire Central d'Hydraulique pour le petit port de pêche de la Cotinière (île d'Oléron). C'est un port d'estran que ses jetées ne préservent pas des sables apportés par

les courants littoraux prenant naissance sous l'effet de vagues obliques par temps d'ouest et de nord-ouest. Des essais prolongés, en modèle réduit, montrèrent l'inefficacité de toutes les solutions classiques (fig. 10) : la prolongation de la jetée nord donnait bien un répit, mais les sables s'accumulaient au vent de l'ouvrage et finissaient par le déborder et par envahir de nouveau le port. Il me vint à l'idée qu'un ouvrage de défense efficace devait être conçu de manière à ne pas arrêter les courants de vagues, mais surtout en vue d'utiliser leur énergie à rejeter au large de l'entrée du port les sédiments entraînés. Ceci conduisit à la conception d'un ouvrage courbe terminé par un musoir perpendiculaire aux lames (fig. 11). Les essais en modèle réduit montrèrent la totale efficacité du procédé. Sceptique quant à cette solution de caractère révolutionnaire, l'Administration des Ponts et Chaussées fit reprendre les essais sous le contrôle de M. l'Inspecteur général SOLEIL. Ces essais confirmèrent les premiers et montrèrent, par surcroît, que l'ouvrage courbe avait tendance à dégager, très faiblement d'ailleurs, le port préalablement ensablé. Cet ouvrage courbe, à musoir perpendiculaire aux lames, est maintenant en construction. Précisons qu'ailleurs un problème analogue n'a pu être résolu que par pompage des sédiments.

Le second problème auquel j'ai apporté une solution nouvelle est celui de la défense des côtes au moyen d'épis. On sait que ce procédé est fréquemment décevant. Dans les régions où les transports sédimentaires ne sont pas abon-

FIG. 10

FIG. 11

dants et surtout lorsque les profils littoraux ont tendance à s'abaisser sensiblement au-dessous des profils d'équilibre théoriques, il est fréquent de constater que si la face au vent des épis se remblaye correctement, la partie de la plage située sous le vent est l'objet d'une érosion accélérée pouvant aboutir au contournement et à la destruction des ouvrages (fig. 12 a). Les épis hollandais surbaissés donnent des résultats meilleurs, en ce sens qu'étant immergés à marée haute sur une grande partie de leur longueur, ils s'opposent moins que les autres aux transports littoraux. En fait, ils arrêtent souvent l'érosion, mais les remblayages qu'ils produisent restent

geables. De plus, en raison de leur hauteur généralement réduite, il y a peu à attendre des épis hollandais quant à la reconstitution des plages érodées. Une autre solution qui a été réalisée dans le delta du Rhône, sur la côte de Farman (47), consiste en l'emploi d'épis perméables terminés par un massif d'enrochements. Le ralentissement du courant littoral, dans la zone d'abri créée par la présence du massif frontal, donne un remblayage important qui peu assurer la protection de la côte dans des cas difficiles, mais cette solution est encore très coûteuse. Mes observations m'ont conduit à une conception nouvelle (48) qui est d'utiliser des épis de cons-

FIG. 12.

Epi classique et épis interrompus Rivière-Laurent.

nettement dissymétriques. Si les pertes par dispersion, qui aggravent l'érosion des parties de la côte situées sous le vent des régions protégées, sont moins importantes que dans le cas des épis classiques (46), elles sont loin d'être négli-

tructions quelconque, variable avec les circonstances locales, dont le caractère essentiel est de présenter au voisinage de leur partie centrale une large interruption (fig. 12 b). Les essais en modèle réduit ont montré la très grande effica-

cité de ce procédé nouveau, même dans les cas où toutes les solutions classiques aboutissent à un total échec. Alors que les épis classiques ont tendance à rejeter au large le courant littoral chargé de sédiments et à aggraver la dispersion de ceux-ci, les épis interrompus provoquent une répartition toute différente des filets liquides surtout caractérisée par le fait que les courants qui longent la partie distale de l'ouvrage sont maintenant dirigés vers la côte et ramènent vers elle les sédiments qui, dans le cas des ouvrages classiques, sont définitivement perdus. L'explication hydrodynamique du phénomène est évi-

dente et je ne ferais pas à des hydrauliciens l'injure de la leur donner. Bien entendu, le courant chargé de sédiments passe par la partie laissée libre et produit sous le vent de l'épi un remblayage à peu près symétrique du remblayage habituel du côté « au vent ». Non seulement, ce procédé s'annonce comme devant être particulièrement efficace, mais il conduit au maximum d'économie. De plus, n'entraînant aucune dispersion des sédiments en transit, il a l'énorme avantage de ne pas accélérer l'érosion de la partie du rivage située sous le vent de la zone protégée.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) A. RIVIÈRE. — Une dépression au Quaternaire : le Traict du Croisic.
Revue de Géographie physique et dynamique, 1936.
- (2) A. RIVIÈRE. — Contribution à l'étude géologique des sédiments sableux.
Annales de l'Institut Océanographique, t. XVII, fasc. 4, octobre 1937.
- (3) A. RIVIÈRE, C. SALLE et S. VERNHET. — Sur certaines anomalies granulométriques apparentes des roches argileuses et leur interprétation géologique.
C.R. Ac. Sc., t. 232, pp. 1858-1860 16-5-51.
- (4) A. RIVIÈRE. — Sur la représentation graphique de la granulométrie des sédiments meubles.
Bull. S.G.F., 6^e série, t. II, pp. 145-154, 19-5-1952.
- (5) A. RIVIÈRE. — Expression analytique générale de la granulométrie des sédiments meubles.
Bull. S.G.F., 6^e série, t. II, pp. 155-167, 19-5-1952.
- (6) A. RIVIÈRE, J. PIMIENTA, C. RAZAVET, R. FRIDMAN et S. VERNHET. — Sur l'interprétation géologique de la granulométrie des sédiments argileux et argilo-vaseux.
C.R. Ac. Sc., t. 234, pp. 2298-2300, 4-6-1952.
- (7) A. RIVIÈRE. — La granulométrie des sédiments argilo-vaseux est susceptible d'une expression analytique générale. Notion de faciès granulométrique.
C.R. Ac. Sc., t. 234, pp. 2628-2630, 30-6-1952.
- (8) A. RIVIÈRE. — Méthode d'interprétation de la granulométrie des sédiments meubles.
Revue Inst. Fr. du Pétrole et Annales des Combustibles liquides, vol. VIII, pp. 102-107, 1953.
- (9) A. RIVIÈRE. — Généralisation de la méthode des faciès granulométriques. Evaluation de la dispersion aléatoire.
C. R. Ac. Sc., t. 238, pp. 2326-2328, 14-6-54.
- (10) A. RIVIÈRE et P. MUNIER. — Contribution à l'étude des argiles utilisées en céramique.
Fasc. II, p. 108, 1948.
- (11) L. R. LAFOND. — Sur l'évolution granulométrique des sédiments dans le bassin de la Vilaine.
Bull. S.G.F., 6^e série, t. III, pp. 175-185, 19-1-1953.
- (12) L. R. LAFOND. — Application de la méthode des indices à l'étude des sédiments du bassin de la Vilaine.
Revue Institut Fr. du Pétrole, 1953.
- (13) J. PIMIENTA. — Répartition granulométrique instantanée du transport solide dans la Medjerda en crue.
C. R. Ac. Sc., t. 239, pp. 441-443, 2-8-1954.
- (14) J. PIMIENTA. — *Thèse de Doctorat*.
Université de Paris, mai 1955.
- (15) L. R. LAFOND. — Etude des mouvements de sédiments estuariens dans le Morbihan et les rivières qui s'y déversent.
C. R. Ac. Sc., t. 237, p. 82, 1953.
- (16) W. DITTMAR. — Report on the composition of Ocean water, in Report of the scientific results of the exploring voyage of H.M.S. Challenger.
Physics and Chemistry, 1, p. 130, 1884.
- (17) J. F. Mac CLENDON. — *Proc. Nat. Ac. of Sciences (U.S.A.)*, 3, p. 612, 1917.
- (18) R. C. WELLS. — *Papers from the Department of Biology of the Carnegie Institution*, 9, p. 316, 1918.
- (19) A. RIVIÈRE. — Sur la dolomitisation des sédiments calcaires.
C. R. Ac. Sc., t. 209, p. 597, 16-10-1939.
- (20) A. RIVIÈRE. — Observations nouvelles sur le mécanisme de dolomitisation des sédiments calcaires.
C. R. Ac. Sc., t. 209, p. 691, 6-11-1939.
- (21) A. RIVIÈRE. — Sur la réserve alcaline et les carbonates de l'eau de mer.
C.R.S. S.G.F., n° 5, p. 19, 17-2-1941.
- (22) A. RIVIÈRE. — Observations sédimentologiques sur la côte vendéenne.
Revue Générale de l'Hydraulique, n° 48, novembre-décembre 1948.
- (23) A. RIVIÈRE. — Sur l'inversion temporaire de l'évolution des côtes basses en cours de sédimentation. Observations sur le littoral vendéen.
C. R. Ac. Sc., t. 228, pp. 413-415, 31-1-1949.
- (24) A. RIVIÈRE. — Sur l'embouchure du Lay (Vendée). La sédimentation et la morphologie estuarienne.
Bull. S.G.F., 5^e série, t. XVIII, pp. 139-151, 3-3-1948.
- (25) A. RIVIÈRE. — Sur certains aspects de la morphologie littorale des plages et leur interprétation.
C. R. Ac. Sc., t. 229, pp. 940-942, 7-11-1949.

- (26) A. RIVIÈRE. — Conditions d'existence et aspect des rides sous-marines littorales. Leur rôle dans la sédimentation côtière.
C.R. S.G.F., n° 13, 1949.
- (27) A. RIVIÈRE. — Sur la formation des rides sous-marines littorales.
C. R. Ac. Sc., t. 229, pp. 1086-1087, 21-11-49.
- (28) A. RIVIÈRE. — Quelques aspects de l'évolution littorale entre le delta du Var et la région d'Antibes. Causes et mécanismes. Séquences deltaïques.
Revue Générale de l'Hydraulique, n° 59, septembre-octobre 1950.
- (29) A. RIVIÈRE et Mme C. RAZAVET. — Sur certains phénomènes d'évolution deltaïque.
C. R. Ac. Sc., t. 233, pp. 186-188, 9-7-1951.
- (30) Mme C. RAZAVET. — L'évolution actuelle du delta du Rhône : phénomènes généraux.
C. R. Ac. Sc., t. 228, p. , novembre 1949.
- (31) Mme C. RAZAVET. — Sur l'évolution générale de la pointe de Beauduc.
C. R. Ac. Sc., t. 229, 21-11-1949.
- (32) Mme C. RAZAVET. — Actions littorales sur la région du Grau d'Orgon.
C. R. Ac. Sc., t. 230, 6-2-1950.
- (33) Mme C. RAZAVET. — Sur le littoral ouest de la pointe de Beauduc.
C. R. Ac. Sc., t. 232, 21-5-1951.
- (34) Mme C. RAZAVET. — Le littoral de Faraman.
C. R. Ac. Sc., t. 232, 11-6-1951.
- (35) Mme C. RAZAVET. — L'évolution lagunaire en Camargue.
C. R. Ac. Sc., t. 232, juillet 1951.
- (36) Mme C. RAZAVET. — Le promontoire deltaïque du grand Rhône.
Congrès international de Sédimentologie pp. 99-109, Wageningen, 1951.
- (37) Mme C. RAZAVET. — Variations des profils de pente littoraux au voisinage de la pointe de Beauduc (delta du Rhône).
Note présentée au 19^e Congrès Géologique International, Alger 1952.
- (38) A. RIVIÈRE et Mme C. RAZAVET. — Sur l'évolution sédimentaire du golfe de Fos et les facteurs de l'équilibre littoral.
C. R. Ac. Sc., t. 229, pp. 895-896, 20-11-49.
- (39) A. RIVIÈRE. — Etudes de sédimentologie littorale du Laboratoire de Géologie du S.P.C.N. à Paris.
Congrès de Sédimentologie de Wageningen, 5-12 juillet 1951.
- (40) A. RIVIÈRE et S. VERNHET. — Sur l'interprétation des phénomènes d'agitation au rivage sous l'influence des vents de terre.
C. R. Ac. Sc., t. 240, pp. 1451-1453, 28-3-55.
- (41) S. VERNHET. — Sur les transferts littoraux dans le golfe du Lion.
C. R. Ac. Sc., t. 237, pp. 1747-1748, 21-12-53.
- (42) S. VERNHET. — Sur un mode de cheminement littoral par migration lente de rides obliques ou perpendiculaires.
C. R. Ac. Sc., t. 237, pp. 1268-1270, 16-11-53.
- (43) A. RIVIÈRE et S. VERNHET. — Sur la formation des croissants de plage (beach-cusps) et les mouvements de sédiments dans le profil.
C. R. Ac. Sc., t. 237, pp. 659-661, 28-9-1953.
- (44) A. RIVIÈRE et J. LAURENT. — Sur la protection des ports, rades, estuaires contre les ensablements.
C. R. Ac. Sc., t. 232, pp. 96-98, 3-1-1951.
- (45) A. RIVIÈRE et J. LAURENT. — Résultats d'études complémentaires relatives à un type particulier d'ouvrage de protection des ports, rades ou estuaires contre les ensablements.
C. R. Ac. Sc., t. 235, pp. 1475-1477, 10-12-52.
- (46) A. RIVIÈRE. — Sur le mode d'action des épis utilisés pour la protection des côtes contre l'érosion marine.
C. R. Ac. Sc., t. 234, pp. 1993-1995, 12-5-52.
- (47) A. RIVIÈRE, A. DE ROUVILLE, AGRICOL-JULLIEN et Mme C. RAZAVET. — Considérations générales sur la défense des côtes meubles. Les ouvrages de protection de la plage de Faraman.
C. R. Ac. Sc., t. 233, pp. 319-321, 23-7-51.
- (48) A. RIVIÈRE. — Sur une méthode nouvelle et peu coûteuse de défense contre l'érosion littorale.
C. R. Ac. Sc., t. 239, pp. 298-300, 19-7-1954.
- (49) Mme C. RAZAVET. — Sur l'évolution actuelle du Vaccarès.
C. R. Ac. Sc., t. 229, p. , 5-12-1949.
- (50) Mme C. RAZAVET. — Contribution à l'étude géologique et sédimentologique du delta du Rhône.
Thèse de Doctorat. Université de Paris. 20-12-1954.

DISCUSSION

Président : M. LAVAL.

M. le Président remercie M. RIVIÈRE de son intéressant exposé.

M. RIVIÈRE indique que la méthode est surtout valable avec des profondeurs assez faibles.

M. HOURS suggère l'utilisation de sables radio-actifs.

M. RIVIÈRE ajoute que certains sédiments, par exemple les argiles, semblent accumuler la radio-activité, d'autant plus qu'ils sont riches en matières organiques.

M. GERMAIN demande si la granulométrie des alluvions est différente suivant que ces derniers sont dûs à un transport par suspension ou par charriage.

M. RIVIÈRE répond qu'un de ses collaborateurs a constaté qu'il en était bien effectivement ainsi dans les cours d'eau. En mer ses études ont porté surtout sur des sédiments déposés. Sur les côtes, la dispersion granu-

lométrique des sédiments est généralement aléatoire, rarement logarithmique; mais lorsqu'on suit l'évolution de cette granulométrie depuis la côte jusque vers le large, on trouve des solutions de continuité qui semblent correspondre à des changements dans le régime de la sédimentation.

M. GERMAIN, rappelant que M. RIVIÈRE a étudié les déplacements de matériaux jusqu'à 30 m de profondeur, considère qu'il serait intéressant d'étendre l'étude à des profondeurs plus importantes, où le transport est assuré par les vagues ou d'autres phénomènes que les courants, généralement trop faibles pour être efficaces.

M. RIVIÈRE estime que cette variété de causes de transport explique la dispersion de la granulométrie des sédiments et que, d'autre part, les effets des courants se font sentir jusqu'à une profondeur de 200 m.