

COURANTOLOGIE DU CANYON DE LA CASSIDAIGNE*

Michel BOURCIER

Station Marine d'Endoume, 13007 Marseille — France

Summary: *Currents in Cassidaigne submarine canyon (north-western Mediterranean).* In Cassidaigne canyon, a red mud discharge area (residues from alumina fabrication), currents have been recorded during conditions of different winds (wind from the East and wind from the North-West called Mistral). Midwater currents at 250 m and bottom currents at 1038 m depend on wind direction and speed. Those at 250 m become established about 1 hour 20 minutes after the rise of a gust of wind, those at 1038 m only after 3 to 4 hours. Generally the bottom currents are directed down canyon. During weak Mistral a compensation current in the canyon lifts up red mud (observed up to 103 m depth). During strong Mistral a bottom counter-current flows down canyon. When it stops, red mud can be lifted up to the surface in about 5 hours. The observations made in Cassidaigne canyon are compared with those known for Var canyon (north-western Mediterranean) and for canyons in North Carolina and California.

Résumé : dans le canyon de la Cassidaigne, zone de déversement de boues rouges (résidus de la fabrication d'alumine), les courants ont été enregistrés pendant des régimes de vents différents (vent d'Est et vent du Nord-Ouest, dit Mistral). Les courants en pleine eau à 250 m et au fond du canyon à 1038 m dépendent de la direction et de la vitesse des vents. Lors d'un coup de vent les courants s'établissent 1 heure 20 minutes environ après son début à 250 m, et 3 à 4 heures après son début à 1038 m. En général les courants sur le fond descendent le canyon vers le large. Par Mistral faible un courant de compensation fait remonter les boues rouges (remontées observées jusqu'à 103 m). Par Mistral violent un contre-courant va vers le large au fond du canyon. Lorsqu'il s'arrête, des boues rouges peuvent être entraînées jusqu'à la surface en 5 heures environ. Les observations effectuées dans le canyon de la Cassidaigne sont comparées à celles connues pour le canyon du Var (Méditerranée nord-occidentale) et pour des canyons en Caroline du Nord et en Californie.

Depuis l'époque où le canyon de la Cassidaigne a été choisi comme lieu de rejet des résidus de la fabrication de l'aluminium (à partir de mai 1967, 12 700 m³ de "Boues Rouges" y ont été déversés quotidiennement), le problème de la circulation des masses d'eau dans ce canyon a été posé.

De nombreuses spéculations ont été formulées donnant lieu à des controverses concernant le sens général des courants prédominant et, partant, de l'épandage possible des "Boues Rouges" dans le canyon ou de leur remontée sur le plateau continental.

Cependant, quelques mesures courantologiques superficielles, des observations effectuées à partir de la Soucoupe Plongante SP 300 (Laborel et al., 1961) sur le plateau continental situé au-dessus du canyon, et, enfin, ce que l'on connaissait de la circulation des eaux dans d'autres canyons, ont permis de penser que le courant général au fond du canyon devait être descendant. En conséquence, les "Boues Rouges" déversées devaient s'écouler vers le Sud et ne devaient en aucun cas remonter sur le plateau continental.

Depuis l'époque du début de ces rejets une étude courantologique du golfe de Marseille a été menée à bien (Castelbon, 1972).

Quelques mesures faites au nord du canyon (fonds à *Leptometra phalangium*, à 85 m de profondeur, en 1971) ont permis de confirmer le sens du courant observé à partir de la soucoupe SP 300 (1961) et d'en évaluer la vitesse : à savoir qu'au niveau du fond, sur le plateau continental situé au nord du canyon de la Cassidaigne, par temps calme, le courant se dirige vers le Sud-Sud Est à une vitesse supérieure à 10 cm.s⁻¹. D'autre part, une campagne de dragages a été effectuée en 1968 au fond du canyon sur ses pentes et au dessus du thalweg (Bourcier, 1969), pour déterminer le sens de l'écoulement et l'extension des dépôts de "boue rouge" (décelée ainsi jusqu'à 103 m au NW du canyon) ainsi que son effet sur la macrofaune benthique ; son action sur la méiofaune a été étudiée ultérieurement (Vivier, 1975). Enfin, en juin 1971, une nouvelle série

(*) Extrait de la thèse de Doctorat d'état, A.O. du CNRS N° 12.150, soutenue le 10 Décembre 1976 à l'Université d'Aix-Marseille II, devant la Commission d'examen : MM. G. Bellan, J.J. Blanc, P. Drach, L. Laubier, J.M. Pérès, J. Picard.

de plongées en soucoupe (SP 350) a permis de faire de nombreuses observations concernant la macrofaune benthique vivant au contact des "Boues Rouges" sur le pourtour et sur les pentes du canyon.

APPAREILS, METHODE ET CONDITIONS D'ENREGISTREMENT

La courantologie profonde du canyon de la Cassidaigne a été étudiée en 1973 au moyen de quatre courantographes Mécabolier prêtés par le laboratoire d'Océanographie physique du Muséum national d'Histoire naturelle de Paris. Réglés pour une autonomie de marche de 28 jours à raison d'un enregistrement photographique toutes les 6 minutes, ils donnent la vitesse du courant de 1.1 cm s^{-1} à 5 m s^{-1} avec une précision de 1 cm s^{-1} , la direction du courant est donnée à 5° près. La ligne de mouillage est représentée par la figure 1 ; cependant, dans le canyon, un courantographe était placé le plus près possible du fond (à 2 m, soit à 1038 et 818 m de profondeur) et l'autre à 250 m de profondeur. Le mouillage sur le fond de 1040 m était fait au niveau de l'étranglement du canyon à 10 milles au large et l'autre sur un fond de 820 m légèrement sur le flanc est du canyon au niveau du diverticule oriental.

Sur la figure 2, ont été marqués les emplacements des deux lignes de mouillage sur lesquelles étaient fixés deux courantographes (à 250 et 2 mètres du fond). Sur la ligne de mouillage nord (au niveau du diverticule oriental) seul le courantographe proche du fond (818 m) a fonctionné. Par contre, les deux courantographes accrochés sur la ligne de mouillage sud ont fonctionné normalement. Cette ligne sud était placée très exactement dans le rétrécissement du canyon (à 10 milles au large, sur un fond de 1040 m, la largeur du rétrécissement, au fond, est de 400 m environ). (Fernex et al., 1975). Les résultats des enregistrements

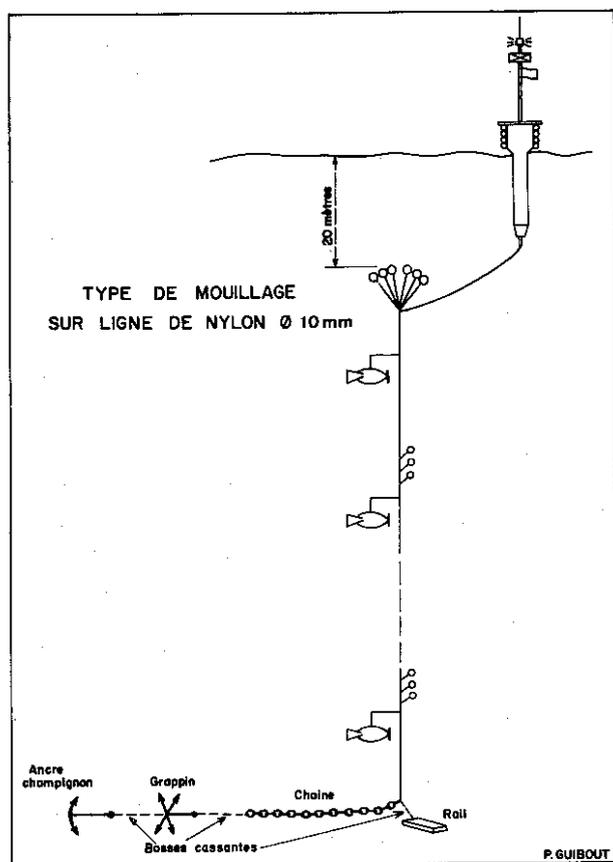


Figure 1 - Ligne de mouillage des courantographes

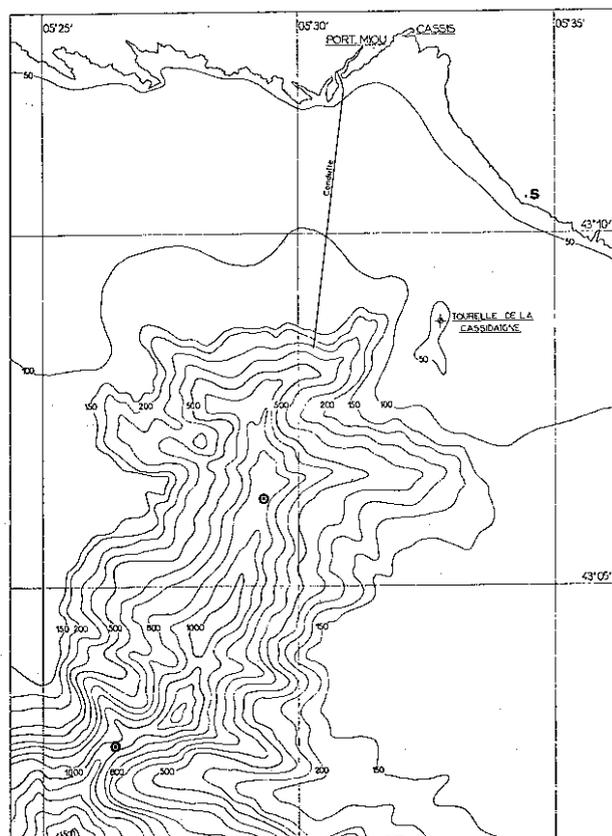


Figure 2 - O Emplacement des mouillages des deux lignes de courantographes ;

S : Sémaphore du Bec de l'Aigle.

Carte modifiée dressée d'après celle de Bourcart (1958) et la carte marine 5318. Isobathes : 50, 100, 200, 300, 400, ... 1500 m.

des deux courantographes de la ligne Sud (250 m et 1038 m) sont analysés ici. Cependant, le courantographe placé au Nord (818 m) a permis de confirmer ce que l'on observait à 1038 m. Les vitesses sont plus faibles à 818 m qu'à 1038 m, (dans le rétrécissement existe un accroissement des vitesses).

Les courantographes ont fonctionné pendant 29 jours (du 23 mai au 20 juin 1973), à raison d'un enregistrement photographique toutes les 6 minutes. A chaque enregistrement sont mesurés : la direction instantanée, la moyenne des vitesses durant les 6 minutes précédentes (en cm s^{-1}) et le temps (jours, heures, minutes).

Régime des vents durant la période des enregistrements

Les valeurs, (vitesses et direction des vents), fournies par le Centre météorologique de Marignane, sont celles observées au Sémaphore du Bec de l'Aigle (S, fig. 2). Les observations ont été faites à 10 milles seulement du rétrécissement du canyon. Sur la figure 3, n'ont été pris en considération que les vents supérieurs à 3 m s^{-1} . Ceci supprime en grande partie le régime des brises et met en valeur les vents influençant réellement la circulation des masses d'eau. En examinant la figure 3, on remarque l'existence de deux coups de vent d'Est et trois coups de Mistral, durant ces enregistrements courantologiques.

VENT D'EST.

— Le 31 mai et le 1^{er} juin, vent venant de 80 à 100° , vitesse moyenne de 14 à 22 nœuds avec une pointe à 32 n à 14 h 50 le 1^{er} juin.

— Le 5 juin, vent venant de 80° , vitesse 32 à 34 n avec pointe à 48 n à 10 h 40 et mer agitée.

MISTRAL.

— Le 29 et 30 mai, vent venant de 280 à 360° , vitesse de 20 à 26 n avec pointe à 38 n, le 29 à 12 h 55 et mer agitée.

— Le 2 juin, vent venant de 280 à 360° , vitesse de 16 à 20 n, avec pointe à 30 n à 15 h 55 et mer agitée.

— Le 8 juin, violent mistral venant de 320 à 340° , vitesse de 34 à 36 n avec pointe à 48 n à 05 h 30 et mer agitée.

Entre ces coups de vents ou vents forts, il y a eu, soit du Mistral faible (10 à 15 n), soit un régime de brises, avec très beau temps. Après chaque coup de vent, la houle résiduelle (de SE après le vent d'Est, de SW après le Mistral) persiste au maximum 24 h, à cette époque de l'année.

En conclusion, on peut affirmer qu'il y a eu, durant cette période, tous les types de temps habituels à la région, sauf la très rare "mer de Labé" (qui donne de très grosses tempêtes de SO, généralement en novembre). Cependant, la houle de SW (persistant après un coup de Mistral), donne une idée des courants par "mer de Labé".

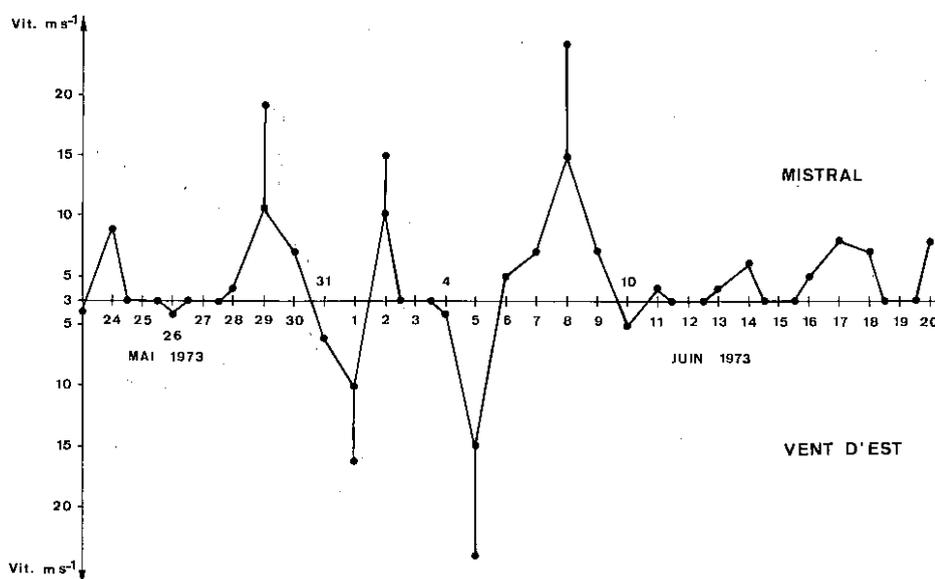
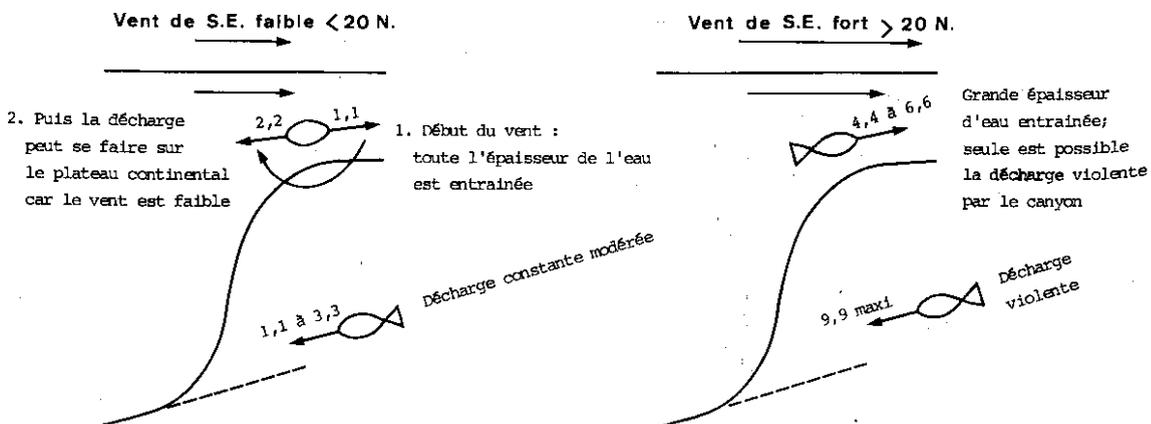
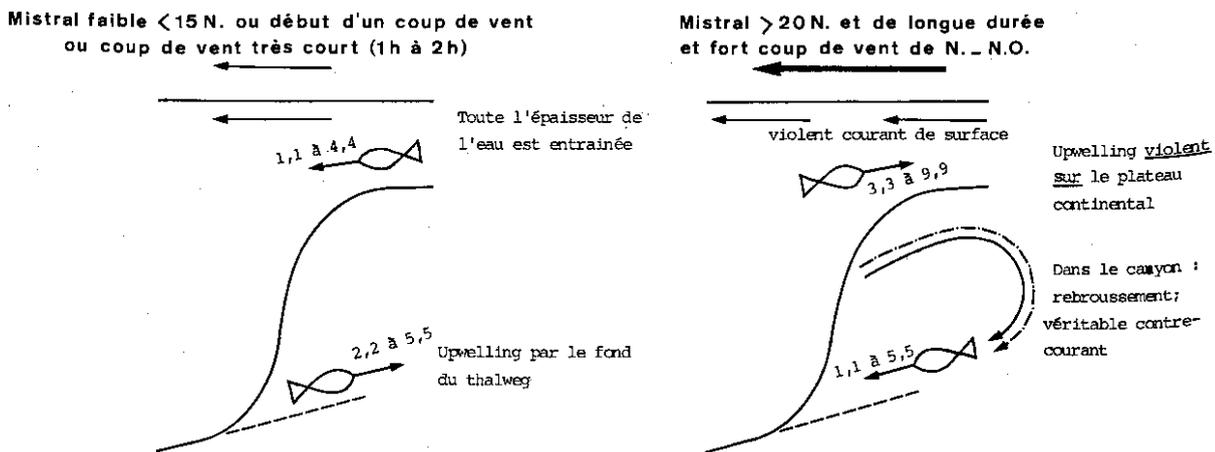


Figure 3 — Régime des vents supérieurs à 3 m s^{-1} (de secteur NW et SE au Sémaphore du Bec de l'Aigle), du 23 mai au 20 juin 1973.

Régime de vent d'Est - Sud Est ou houle de Sud Est



Régime de Mistral



Houle de Sud Ouest après un coup de Mistral ou par mer de Labé

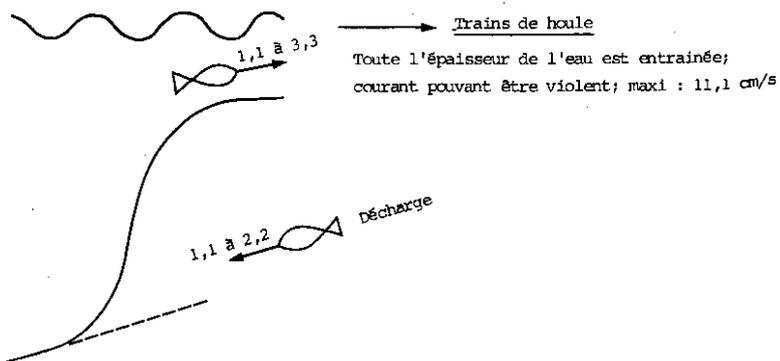


Figure 4 - Courants du canyon de la Cassidaigne, en fonction des principaux types de temps. La coupe du canyon au niveau du rétrécissement et la direction des courants sont projetées sur un plan vertical N-S (vitesse des courants en $cm\ s^{-1}$).

LES PRINCIPAUX RESULTATS DES ENREGISTREMENTS COURANTOLOGIQUES

A) La nuit, par très beau temps, le courant est nul (ou tout au moins inférieur à $1,1 \text{ cm s}^{-1}$ qui est la vitesse minimale mesurable). En fin de nuit, lorsque la brise de terre légère se lève, on assiste à une reprise qui se fait au niveau du fond, à 1038 m, vers le NE (canalisée par la direction du canyon au niveau du rétrécissement), mais la vitesse reste très faible ($1,1 \text{ cm s}^{-1}$). Cependant, il faut considérer ces résultats avec les plus grandes réserves en raison de la faible vitesse du courant.

B) Après une période de calme (courant nul), quand un coup de vent se lève brusquement (le 29 mai, Mistral ; le 5 juin, vent d'Est), les masses d'eau se mettent en mouvement, à 250 m, 1 h 15 le plus souvent ou 1 h 30 après le début du coup de vent. A 818 m, 2 h à 3 h après le début du coup de vent, et à 1038 m, 3 h à 4 h après le début de ce même coup de vent, et cela quelles que soient les directions des vents et des courants observées.

C) Au fond du canyon, au niveau du rétrécissement, le courant se dirige vers le NNE dans les circonstances suivantes :

- par très beau temps le matin (brise de terre) mais les résultats sont sujets à caution ;
- par Mistral faible ($< 15 \text{ n}$), ou encore au début d'un coup de Mistral, ou, enfin, par coup de Mistral très court (le 17 juin, Mistral à 30-40 n pendant 1 h seulement).

D'une manière générale, ces vents de NW $< 15 \text{ n}$ sont de courte durée. En conséquence, les courants, remontant au fond du thalweg et sur les flancs de celui-ci, sont également brefs. Ceci est heureux, car ces courants peuvent atteindre $5,5 \text{ cm s}^{-1}$ et faire ainsi remonter de la "Boue Rouge" sur le plateau continental (103 m).

D) Au fond du thalweg, le courant descend vers la plaine abyssale (direction SSW) dans les conditions météorologiques suivantes :

- par régime de Mistral fort, ou très fort, supérieur à 20 n (le courant peut aller jusqu'à $5,5 \text{ cm s}^{-1}$) ;
- par régime de brise de mer faible, mais le courant est alors très lent ($1,1 \text{ cm s}^{-1}$) et sa vitesse et sa direction sont sujettes à caution ;
- par régime de brise de mer forte (20-25 n, en été), le courant descendant peut alors atteindre $4,4 \text{ cm s}^{-1}$;
- par régime de vent d'Est ; par vent d'Est faible $< 20 \text{ n}$: courant de compensation allant de $1,1$ à $3,3 \text{ cm s}^{-1}$; par vent d'Est fort $> 20 \text{ n}$: courant pouvant aller jusqu'à $9,9 \text{ cm s}^{-1}$;

— par grosse houle de SW, après un coup de Mistral prolongé ou par mer de Labé ($1,1$ à $2,2 \text{ cm s}^{-1}$).

E) Nous allons tenter d'expliquer en détail ces phénomènes, grâce aux enregistrements du courantographe le moins profond (250 m). A cette profondeur, l'appareil est approximativement placé, au niveau du plateau continental situé latéralement, au-dessus du rétrécissement du canyon.

Au début d'un coup de vent de NW, tant que sa vitesse reste inférieure à 15 n, une grande épaisseur d'eau, allant de la surface jusqu'à 250 m au minimum, est entraînée lentement vers le large (à 250 m courant à vitesse de $1,1$ à $4,4 \text{ cm s}^{-1}$ vers le SE), et la compensation se fait par le fond du canyon (vitesse de $2,2$ à $5,5 \text{ cm s}^{-1}$ vers le NE, car le courant est canalisé par l'étranglement). C'est le seul cas où de la "boue rouge" peut remonter au fond et le long des flancs du canyon. Ce Mistral léger, ne dure généralement pas ; le plus souvent il se renforce rapidement et dépasse 20 n, (10 m s^{-1}). Au delà de cette vitesse, et 1 h 30 environ après que celle-ci ait été dépassée, l'eau de surface est violemment chassée vers le large. La compensation, qui se faisait jusqu'alors au fond du canyon devient largement insuffisante, et elle s'effectue par dessus la rupture de pente du plateau continental. A 250 m, à la verticale de l'étranglement, le courant a changé de sens : de direction NW et de vitesse relativement rapide ($3,3$ à $9,9 \text{ cm s}^{-1}$), ce courant de compensation s'intercale et se trouve comprimé entre le violent courant de surface (dû au Mistral, vers le SE), et le plateau continental ; il trouve dans le canyon une véritable soupape de sécurité et se rebrousse vers le Sud à l'intérieur de celui-ci. Au niveau du fond, et à l'endroit de l'étranglement, ce courant descend vers le Sud, à une vitesse de $1,1$ à $5,5 \text{ cm s}^{-1}$. C'est donc un véritable contre-courant de rebroussement, figurant dans un plan vertical ce qui se passe au fond des baies dans un plan horizontal.

Au moment où le coup de vent faiblit, ce contre-courant de rebroussement cesse brutalement et le courant de fond, au niveau de l'étranglement, s'inverse une nouvelle fois. C'est à ce moment là, surtout, que la "boue rouge" peut être entraînée, jusqu'à la surface, par un gigantesque tourbillon vertical, heureusement très bref, sur plus de 1000 m de hauteur.

Ce phénomène est apparu très nettement le 8 juin. Au moment où le coup de Mistral commence à faiblir, mais possède encore, pendant quelques heures, une vitesse relativement importante (36 n. à 13 h et 18 n. à 19 h), on constate la diminution de la vitesse du courant de compensation au dessus du plateau continental (il peut passer ainsi de $8,8$ à $4,4 \text{ cm s}^{-1}$ sans changement de sens en 1 h 30 environ). En même temps, a lieu une inversion des courants commençant au niveau du fond.

A ce moment, le nuage de "boue rouge" commence à s'élever vers la surface à une vitesse d'environ $5,5 \text{ cm s}^{-1}$; 3 h 45 après que le phénomène se soit produit au niveau du fond, le sens du courant s'inverse à son tour à 250 m. Or, en 3 h 30, le sommet du nuage de "boue rouge" arrive au niveau 250 m, il est repris par cette deuxième inversion et il est porté jusqu'à la surface en 1 h 15 environ (à raison de $5,5 \text{ cm s}^{-1}$). On peut ainsi affirmer, qu'à la fin d'un coup de Mistral, à partir du moment où la vitesse du vent commence à diminuer, la "boue rouge" peut remonter verticalement, du fond du canyon jusqu'à la surface, en 5 h environ. La présence de cette "boue rouge", à 250 m et à la surface, est indiscutable. La moitié supérieure du courantographe, situé à 250 m, était rouge (par redéposition de celle-ci); la bouée de surface avait toutes ses parties horizontales immergées (batteries, base des flotteurs, etc.) nettement teintées de rouge. Enfin, au cours d'une sortie commune avec des planctonologistes de la Station marine d'Endoume, nous avons observé la présence de "boues rouges" sur le filet et dans le collecteur (ouverture et fermeture à 100 m). Cette station était située légèrement au Sud du débouché des conduites Péchiney, et avait eu lieu après un coup de Mistral.

DISCUSSION

Bien que chaque canyon ait ses propres caractéristiques de circulation, il ne me semble pas inutile de comparer nos observations avec diverses études courantologiques faites dans d'autres canyons.

Aux Etats-Unis, le long de la côte de Caroline du Nord, Rowe et al. (1968) ont déterminé, (grâce à des photos sous-marines montrant des "ripple marks" jusqu'à 3600 m de profondeur) la direction de courants très importants. Ces courants qui avaient été mesurés par Barret auraient une vitesse moyenne de 25 cm s^{-1} . Tous ces courants avaient une direction NE jusqu'à 800 m, et SW à plus grande profondeur (de 1200 à 5000 m). En 1971, ces mêmes auteurs ont mesuré les courants de fond, non loin de là, dans le canyon du cap Hatteras. Là encore à 500 m, les courants allaient vers le NE et, plus profondément, jusqu'à 2000 m, ils allaient vers l'WSW à une vitesse de 25 cm s^{-1} . A 3100 m, les courants s'inversaient alternativement 45 mn à 15 cm s^{-1} vers l'Est, puis 75 mn à 23 cm s^{-1} vers l'Ouest. Enfin à 3700 m ils se dirigeaient le plus souvent vers l'Ouest à 38 cm s^{-1} avec quelques "bouffées" vers l'Est, à $2,7 \text{ cm s}^{-1}$. Dans ce dernier cas, cette alternance des courants empêchait la formation des "ripple marks". Ces auteurs pensent, dans le premier cas, à l'influence directe du Gulf Stream, qui longe vers le NE les côtes des Carolines. Près de la surface et

jusqu'à 800 m, ce courant entraîne la masse d'eau vers le NE. Plus profondément, existe un véritable contre-courant, qui est peut-être comparable, dans une échelle 5 fois supérieure, à ce qui se passe dans le canyon de la Cassidaigne par fort Mistral. Rowe et Menzies (1971) pensent plutôt à un courant de densité et de turbidité, dans le canyon du cap Hatteras. Pour ma part, je pencherai pour l'hypothèse d'une sorte de balancement dû à une ondulation de l'interface: courant principal de surface vers le NE (Gulf Stream), et contre-courant de fond: ce dernier subissant de plus une déviation due à l'axe du canyon.

Sur la côte de Californie, Shepard et al. (1974) ont mesuré les courants dans des canyons peu profonds (348 à 375 m de profondeur) mais relativement allongés (jusqu'à 20 km). Ils ont fait des enregistrements de courtes durées, de 70 à 214 h. Ils ont enregistré des courants alternatifs changeant de sens plusieurs fois par jour et liés évidemment aux marées. Les courants peuvent être longitudinaux ou transverses par rapport à l'axe du canyon (et dans ce cas la largeur du canyon à une action déterminante sur la vitesse des courants au niveau du fond). Le bilan du transport de l'eau (dont la vitesse est mesurée à 34 m au-dessus du fond du canyon), est très nettement positif en direction de l'aval du canyon, avec des vitesses comprises entre $6,1 \text{ cm s}^{-1}$ et 18 cm s^{-1} . Dans cette publication, les auteurs font une observation très intéressante en étudiant les relations existant entre les vents et la vitesse des courants de fond: pour des vents soufflant vers la côte à environ 30 n, on a des courants de compensation violents atteignant 30 à 50 cm s^{-1} , qui ont pu même déplacer les courantomètres ou éroder le fond du canyon.

Genesseeux et al. (1971) ont montré l'existence, dans la vallée sous-marine du Var, de courants semblables à ceux décrits par Rowe dans le canyon du cap Hatteras. Leurs enregistrements ont été effectués pendant 25 jours à 800 m à 1,50 m du fond. Ils montrent l'existence de pointes de vitesse à accroissement quasi instantané, pouvant dépasser 100 cm s^{-1} . Les auteurs attribuent le phénomène à des courants de turbidité canalisés par la vallée sous-marine du Var. Les conditions météorologiques du moment, tempête d'Est et très fortes pluies, ont provoqué une forte crue du Var constituant très vraisemblablement l'origine du phénomène. Ces courants de turbidité sont différents de ceux que nous venons d'étudier. En effet, dans le canyon de la Cassidaigne, il ne peut en être de même, car aucun fleuve côtier n'aboutit actuellement au fond de la Baie de Cassis. La résurgence sous-marine de Port-Miou, en cours de captation, a un débit très insuffisant pour engendrer de tels courants (débit moyen $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, crues exceptionnelles de $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de très courte durée). D'autre part, un courant de densité ou de turbidité, causé par la "boue rouge" elle-même (densité

1,2), ne peut être concevable que dans la partie supérieure du canyon (jusqu'au premier surcreusement) ; car comment expliquer alors la remontée de la "boue rouge" du fond de cette cuvette à - 1235 m jusqu'au seuil du rétrécissement à 1040 m.

CONCLUSION

La seule explication satisfaisante est bien la présence quasi permanente d'un courant de compensation au niveau du fond du thalweg et descendant vers la plaine bathyale (présence de "boue rouge" à 1800 m). La corrélation de ces courants avec le régime des vents est parfaitement explicite. De plus, existe, en même temps, au niveau de la tête du canyon, une décharge quasi permanente des masses d'eau transitant d'Est en Ouest au-dessus du plateau continental (courantologie générale du bassin Nord Occidental Méditerranéen, Allain, 1960). Ces eaux viennent buter dans l'entonnoir formé par l'archipel de Riou et la côte, puis se rebroussent au niveau du fond, et descendent vers la tête du canyon. Les témoins de ce courant de fond sont les nombreux exemplaires de *Leptometra phalangium*, dragués ou observés en soucoupe au-dessus de la tête Ouest du canyon de la Cassidaigne. Un enregistrement courantologique, effectué à cet endroit, en collaboration avec Castelbon (juin 1969), démontre parfaitement l'exactitude de cette hypothèse. Une première couche, épaisse d'environ 50 m, se dirige vers l'WNW avec une vitesse atteignant 20 cm s^{-1} à 20 m de profondeur. De 50 à 70 m de profondeur, le courant tourne brutalement dans le sens des aiguilles d'une montre, et, dans les 15 m qui surmontent le fond, la compensation se fait vers le SSE (150°) ; elle atteint une vitesse de 10 cm/s au voisinage du sédiment à *Leptometra phalangium* et se dirige vers la tête du canyon de la Cassidaigne.

REFERENCES

- Allain C., 1960. Topographie dynamique et courants généraux dans le bassin occidental de la Méditerranée (golfe du Lion, mer Catalane, mer d'Alboran, secteur à l'est de la Corse). *Rev. Trav. Inst. Pêches marit.*, 24 (2) : 121-145.
- Blanc J.J., Pérès J.M., Picard J., 1959. Coraux profonds et thanatocoenoses quaternaires en Méditerranée pp. 185-192, in : La topographie et la géologie des profondeurs océanographiques. 83^e Coll. int. CNRS.
- Bougis P., 1958. Contribution à la connaissance des courants superficiels dans le nord-ouest de la Méditerranée occidentale. *P.V. Réun. CIESM* : 67-84.
- Bougis P., Ruivo M., 1954. Descente d'eaux côtières superficielles dans la fosse du rech Lacaze-Duthiers au large de Banyuls. *C.R. Ac. Sci.*, Paris, 238 : 1331-1334.
- Bourcart J., 1958. Carte du précontinent sous-marin entre Marseille et Antibes (1/200 000). Monaco, Musée océanographique.
- Bourcier M., 1968. Etude du benthos du plateau continental de la baie de Cassis. *Rec. Trav. Sta. mar. Endoume*, 60 (Bull. 44), 1967 : 63-108.
- , 1969. Ecoulement des Boues Rouges dans le canyon de la Cassidaigne (Décembre 1968). *Téthys*, 1 (3) : 779-782.
- Bourcier M., Zibrowius H., 1973. Les "Boues Rouges" déversées dans le canyon de la Cassidaigne (région de Marseille) observations en soucoupe plongeante SP 350 (juin 1971) et résultats de dragages. *Ibid.*, 4 (4) 1972 : 811-842.
- Castelbon C., 1972. Etude de la circulation des masses d'eau dans le golfe de Marseille. *Ibid.*, 4 (2) : 269-312.
- Chedin J., 1963. Commission chargée d'examiner les problèmes de déversement des "boues rouges" dans la baie de Cassis. Rapport spécial sur les problèmes d'ordre chimique. Ministère des Travaux Publics et des Transports et Ministère de l'Industrie. Paris (le 18 janvier 1965 (rapport non publié) : 15 pp.
- Dethlefsen V., Rosenthal H., 1973. Problems with dumpling of red mud in shallow waters. A critical review of selected literature. *Aquaculture*, 2 (3) : 267-280.
- Fernex F., Simon J.J., Froget C., 1975. Remarques sur la formation du canyon de Cassidaigne (B. du R.) et sur celle des vallées sous-marines voisines. *P.V. Réun. CIESM*, 23 (4a), 1974 : 257-259.
- Gennevaux M., Guibout P., Lacombe H., 1971. Enregistrement de courants de turbidité dans la vallée sous-marine du Var (Alpes Maritimes). *C.R. Ac. Sci.*, Paris, 273 : 2456-2459.
- Idrac P., 1933. Influence du vent d'Est et du Mistral sur la température des couches sous-marines sur la côte d'Azur. *Ibid.*, 197 : 1680-1682.
- Laborel J., Pérès J.M., Picard J., Vacelet J., 1961. Etude directe des fonds des parages de Marseille de 30 à 300 m avec la soucoupe plongeante Cousteau. *Bull. Inst. Océanogr.*, Monaco, No. 1206 : 1-15.
- Lacombe H., 1954. Contribution à l'étude de la Méditerranée occidentale. Aperçu dynamique. *Bull. Inf. COEC* (Com. Etude Côtes), 6 (1) : 1-31.
- Minas H.J., 1968. A propos d'une remontée d'eaux profondes dans les parages du golfe de Marseille (Octobre 1964). Conséquences biologiques. *Cah. océanogr.*, 20 (8) : 647-674.

- Pères J.M., Picard J., 1954. Bionomie en fonction de la géomorphologie sous-marine dans la région de Cassis (B. du R.). *Rec. Trav. Sta. mar. Endoume*, 13 (Bull. 8) : 1-9.
- Romanovsky V., 1955. Résultats de la détermination dans le bassin occidental de la Méditerranée des courants superficiels par la méthode des flotteurs dérivants. *Trav. Centre Rech. Et. Océanogr.*, 2 : 1-2.
- Rowe G.T., 1971. Observations on bottom currents and epibenthic populations in Hatteras submarine canyon. *Deep-Sea Res.*, 18 : 569-581.
- Rowe G.T., Menzies R.J., 1968. Deep bottom current of the coast of North Carolina. *Ibid.*, 15 : 711-719.
- Shepard F.P., Marshall N.F., Mc Loughlin P.A., 1974. Currents in submarine canyons. *Ibid.*, 21 : 691-706.
- Tchernia P., Lacombe H., 1956. Contribution à l'étude de la Méditerranée occidentale. Deuxième mémoire préliminaire. Hydrologie et aperçu dynamique. *Cah. océanogr.*, 8 (9) : 427-463.
- Vivier M.H., 1975. Le meiobenthos du canyon de la Cassidaigne influence des déversements de boue rouge d'alumine sur la nématofaune. Univ. Aix-Marseille, Thèse de 3^e Cycle : 1-109.

REMERCIEMENTS

Je remercie vivement les personnes et les organismes qui m'ont permis de mener à bien ce travail : M. le Prof. H. Lacombe, Directeur du Laboratoire d'Océanographie physique du Muséum à Paris, qui a bien voulu me prêter les courantographes ainsi que leur mouillage, leur bouée de signalisation et les personnes nécessaires à leur mise en œuvre, MM. Guibout et Bihery, à qui je tiens à exprimer toute ma gratitude ; Mr. B. Saint-Guily, du même laboratoire, qui a bien voulu confirmer l'exactitude de l'interprétation concernant les relations vents courants ; enfin, le Centre Météorologique Régional de Marignane, qui m'a aimablement communiqué toutes les données nécessaires.

Manuscrit accepté le 25 Novembre 1977