

CHAPTER 26

REJET DE MATERIAUX A LA MER PAR REFOULEMENT HYDRAULIQUE RISQUES DE POLLUTION DES PLAGES

Louis Greslou
Chef de Service à la Sogreah

Il peut paraître intéressant lorsqu'une installation est implantée au bord de la mer de rejeter dans celle-ci les résidus de fabrication, qu'il s'agisse des cendres et suies d'une usine thermique, des stériles d'une mine, etc.

Divers procédés peuvent alors être utilisés et nous en énumérerons rapidement quelques uns avant d'examiner plus en détail celui qui fait l'objet de la présente communication.

Le transport au large par chalands est une solution qui peut permettre le rejet du matériau à une grande distance dans une zone préalablement choisie pour éviter au maximum toute pollution éventuelle du rivage. Ce procédé suppose évidemment non seulement le matériel nautique nécessaire mais la proximité d'un port ou d'un abri naturel pour ces bateaux.

Le transport à une certaine distance du rivage par téléphérique est une solution employée pour certains chargements de minerais. Mais l'installation que nécessite un tel dispositif risque d'entraîner des travaux trop onéreux pour l'évacuation de résidus de fabrication.

Dans le cas où la granulométrie du produit à rejeter est assez voisine de celle du matériau qui constitue les plages, ou évidemment si le rivage peut être pollué sans inconvénient majeur, le rejet peut être fait au voisinage de la laisse, la houle et les courants se chargeant d'entraîner au moins partiellement, le long du littoral ou vers le large, le stock ainsi réalisé à terre. Ce procédé, de beaucoup le plus simple et le plus économique, ne peut évidemment être employé qu'assez exceptionnellement.

Les solutions de rejet au large par chalands ou téléphériques étant donc en général beaucoup trop onéreuses, le déversement le long du rivage devant être souvent éliminé parce qu'inesthétique et même parfois dangereux, une solution consistant à refouler hydrauliquement le matériau à

*See English resume, p. 484

COASTAL ENGINEERING

rejeter à une certaine distance du rivage peut alors paraître séduisante.

Cette solution pose cependant un certain nombre de problèmes délicats, surtout lorsque la pente des fonds sous marins est douce et que le volume de matériaux à rejeter est important.

Dans cette communication nous exposerons les principaux résultats de deux études effectuées à la Sogreah, concernant le rejet par refoulement hydraulique de deux matériaux de granulométries très différentes.

En anticipant sur ce qui va suivre, un matériau rejeté au delà de la ligne de déferlement peut subir l'un des sorts suivants :

- soit demeurer sur place,
- soit être rejeté vers le rivage,
- soit être entraîné vers le large.

Un moyen particulièrement intéressant de réaliser cette dernière solution est de faire couler le matériau mêlé à l'eau sous la forme d'un "underflow" si la pente des fonds et la granulométrie le permettent.

Il est bien évident aussi que, suivant la granulométrie et les conditions hydrographiques et topographiques le matériau peut subir un tri : une partie peut demeurer sur place, une autre être entraînée au large, une autre enfin être rejetée vers le rivage.

On voit donc qu'avant d'aborder l'exposé proprement dit de nos résultats il peut être utile d'examiner les mécanismes élémentaires qui peuvent agir sur le matériau, et de façon plus précise l'action de la houle et des courants d'une part, le comportement d'un underflow d'autre part.

FACTEURS EN JEU

Les divers facteurs naturels susceptibles d'entraîner le matériau rejeté en mer sont essentiellement la houle et les courants.

La houle peut agir soit par la turbulence qu'elle provoque, soit par les courants qu'elle engendre.

REJET DE MATERIAUX A LA MER PAR REFOULEMENT HYDRAULIQUE RISQUES DE POLLUTION DES PLAGES

TURBULENCE PROVOQUEE PAR LA HOULE

Le mouvement orbitalaire des particules d'eau tend à créer de la turbulence. Les dimensions des orbites sont bien connues et on déduit de la théorie de la houle irrotationnelle au 1er ordre l'expression de la vitesse orbitale maximum

$$V_0 \text{ max} = \frac{2 \pi a}{T} \frac{1}{\text{sh} \frac{2\pi h}{L}}$$

où $2a$ est l'amplitude (distance de crête à creux)
 L est la longueur d'onde (distance entre 2 crêtes)
 T est la période
 h est la profondeur d'eau.

L'étude des conditions de début de mouvement des grains de matériaux constituant le fond révèle que la houle peut faire sentir son action même par des fonds de plusieurs dizaines de mètres. Une houle d'amplitude 6 m et de longueur d'onde 120 m doit être capable de mettre en mouvement un grain de sable de 0,3 mm par 60 m de fond. Mais s'il y a mise en mouvement, il n'y a pas forcément déplacement important. On peut même dire que l'intensité de ces déplacements est d'autant plus faible que l'on s'éloigne vers le large de la zone de déferlement.

COURANTS ENGENDRES PAR LA PROPAGATION DE LA HOULE A 2 DIMENSIONS

a) Pour une houle à deux dimensions, c'est à dire se propageant dans un canal, on constate que le mouvement orbitalaire des particules s'accompagne, dans la masse fluide, d'un mouvement général. C'est ce qu'on appelle le "courant de transport de masse" ou "courant de masse".

Ce courant apparait d'ailleurs dans les équations de la houle en fluide parfait à partir du 2ème ordre et son existence dans la nature parait très vraisemblable pour une houle suffisamment régulière.

La distribution verticale des vitesses de ce courant de masse présente les caractéristiques suivantes :

- A proximité de la surface le courant porte en général dans le sens de propagation de la houle ; on a observé toutefois expérimentalement un courant portant en sens inverse pour les faibles valeurs du rapport h/L

COASTAL ENGINEERING

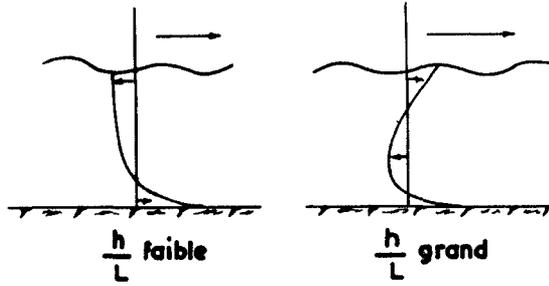


Fig. 1

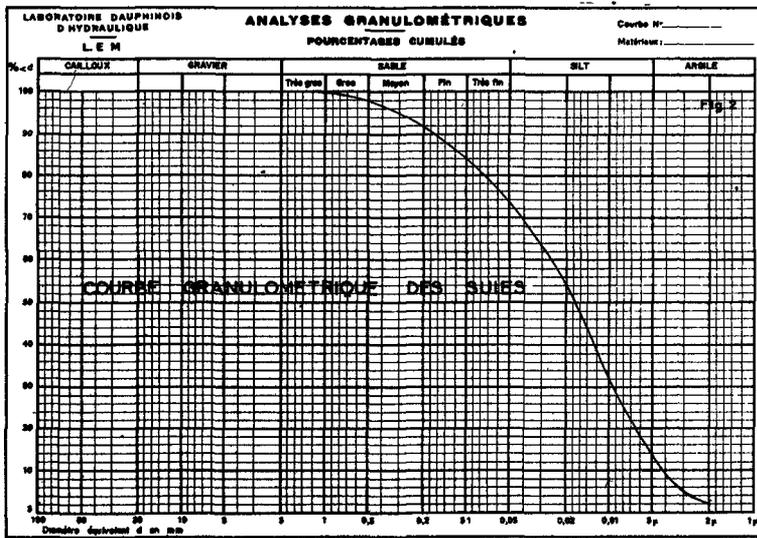
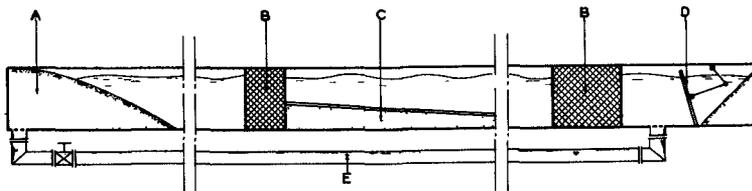


Fig. 2

SCHEMA DU CANAL A HOULE



- A Plage amortisseuse
- B Filtre
- C Chape en ciment
- D Batteur à houles
- E Conduite d'équilibrage

Fig. 3

REJET DE MATERIAUX A LA MER PAR REFOULEMENT HYDRAULIQUE RISQUES DE POLLUTION DES PLAGES

- A proximité du fond, le courant porte toujours dans le sens de propagation ; il est particulièrement marqué dans une zone de faible épaisseur au voisinage immédiat du fond.
- Entre ces 2 zones le courant est de sens opposé : en canal fermé le débit sur une verticale étant nul, les débits dans les 2 sens sont égaux.

Nous avons indiqué sur la figure 1 de manière schématique deux répartitions types de ce courant observées en canal fermé.

b) Par ailleurs dans un liquide visqueux et dans un canal fermé du côté rivage, l'expérience montre qu'il existe sur le fond une couche limite dans laquelle se produit un courant dirigé dans le sens de la propagation de la houle progressive.

La valeur de ce courant est donnée par la théorie de Longuet-Higgins. Son intensité maximum est donnée par la formule :

$$U_{\max} = \frac{1.376 T}{L} V_0^2 \max$$

$V_0 \max$ étant la valeur théorique maximum de la composante horizontale de la vitesse orbitale donnée précédemment (1er ordre, fluide parfait).

On voit donc que dans le cas schématique d'une houle à 2 dimensions atteignant un rivage, sans autre courant que ceux créés par la houle, le transport des matériaux peut se concevoir comme suit :

Le mouvement orbital des particules d'eau sur le fond et dans la masse tend à créer de la turbulence. Suivant le degré de turbulence ainsi créée et suivant la granulométrie et la densité du matériau, celui-ci pourra :

- soit rester immobile sur le fond,
- soit être mis en mouvement mais rester dans la couche limite du fond et donc avancer peu à peu vers le rivage,
- soit être mis en suspension et s'il est assez léger, monter dans la zone où existe un courant dirigé vers le large, une partie du matériau resté dans la couche limite ira donc vers le rivage comme décrit ci-dessus, une autre sera emportée vers le large,
- soit enfin être emporté encore plus haut par sa mise en suspension, jusque dans la zone où existe un courant de surface portant vers le rivage; outre les transports vers le rivage et vers le large décrits ci-dessus, s'ajoutera donc un transport vers le rivage au voisinage de la surface, de sorte que la mer entière dans toute sa masse

COASTAL ENGINEERING

sera progressivement envahie par le matériau jusqu'à la ligne de déferlement.

Au déferlement se passent des phénomènes complexes de mise en suspension et de transport qui dépendent des caractéristiques de la houle, du mode de déferlement, de la nature du matériau, etc... Dans certains cas une partie au moins du matériau peut être rejetée sur le rivage et engraisser celui-ci.

COURANTS ENGENDRES PAR LA HOULE A 3 DIMENSIONS

Ce que nous venons d'exposer suppose que les mouvements dus à la houle sont à deux dimensions. En fait la houle se propage dans un milieu à trois dimensions et les résultats ci-dessus peuvent être profondément modifiés au moins en ce qui concerne les courants.

Les principaux courants engendrés par la houle du fait de cette 3ème dimension sont :

a) Le "longshore current" qui se produit lorsque la houle aborde obliquement un rivage constitué par un plan incliné. Il est en gros parallèle au rivage.

b) Le "ripcurrent" qui se produit sur un rivage à topographie irrégulière et qui résulte de l'accumulation de l'eau en un point du rivage. L'eau repart alors vers le large suivant un courant grossièrement perpendiculaire au rivage.

c) Le "courant d'Iribarren" qui se produit par exemple derrière un cap autour duquel diffracte la houle. Il se propage des zones de grande amplitude vers les zones de faible amplitude, par suite de l'accumulation de l'eau dans les premières. Il est en gros parallèle au rivage.

d) Le "beach drifting" mouvement des grains en dents de scie qui se produit dans le jet de rive quand la houle est oblique par rapport au rivage.

AUTRES COURANTS MARINS

D'autres courants que ceux dus à la houle peuvent également exister en mer. Ce sont en particulier :

- a) les courants marins généraux,
- b) les courants de marée,
- c) les courants fluviaux si on se trouve à proximité d'une embouchure,

REJET DE MATERIAUX A LA MER PAR REFOULEMENT HYDRAULIQUE RISQUES DE POLLUTION DES PLAGES

d) les courants dus au vent - Ces derniers sont généralement accompagnés par des vagues créées par ce même vent. Près d'un rivage avec un vent soufflant de la mer par exemple, on peut considérer que les vagues sont accompagnées d'un courant de surface relativement fort portant vers le rivage et d'un courant de retour en sens inverse au voisinage du fond.

e) les courants de densité - Ceux-ci peuvent être dus à des différences de température, de salinité ou de concentration en sédiments entre des couches d'eau voisines. Nous reviendrons plus loin sur le mécanisme de l'underflow, forme particulière de ce courant de densité.

Si le mouvement orbital tend dans tous les cas à mettre le matériau en suspension et à le "livrer" en quelque sorte à l'action des courants ; l'existence des courants décrits dans les 2 paragraphes précédents peut modifier fondamentalement le processus de transport que nous avons esquissé plus haut sous l'action du courant de masse d'une houle à 2 dimensions.

Ce qui précède montre qu'avant de projeter une installation de rejet hydraulique il est nécessaire de mesurer de façon extrêmement soignée les conditions topographiques et hydrographiques locales (houles, courants, etc...)

L'UNDERFLOW

Les considérations qui précèdent conduiraient à penser que, dans le cas où le matériau a été disposé à des profondeurs telles qu'il puisse ensuite être remis en suspension par la houle, les courants de toutes sortes tendront à le répartir sur une zone très vaste de la mer, et en particulier sur les plages. S'il en était ainsi la solution de rejet en mer à une distance limitée du rivage serait insoluble.

Mais en réalité si le rejet hydraulique de matériau s'effectue dans certaines conditions de vitesse et de concentration on peut espérer obtenir l'écoulement du matériau vers le large par courant de densité sous forme d'underflow.

Parmi les très nombreux exemples de courant de densité, nous citerons celui du Rhône à son arrivée dans le lac Léman, car il se présente à l'état pur, les autres mouvements d'eau (vagues, seiches, courants généraux) ne jouant qu'un rôle négligeable.

COASTAL ENGINEERING

Si l'on suit les eaux du Rhône en période de hautes eaux durant lesquelles le charriage de boue et sable fin glaciaire est relativement important, on voit d'abord ces eaux sales s'étaler à la surface du Lac, Puis après quelques centaines de mètres ces eaux plongent brusquement et verticalement vers le fond où un écoulement de fond (Underflow) s'établit.

A l'endroit où les eaux sales plongent, la ligne de séparation avec les eaux limpides du lac est très nette mais il y a de très forts tourbillons. Les eaux paraissent se livrer une violente bataille sans se mélanger, c'est pour cette raison que le phénomène est appelé "bataillère" du mot français "bataille".

L'underflow ainsi formé s'écoule dans un chenal profond formé par le fleuve lui-même avec les alluvions qu'il transporte. Après 15 kilomètres environ ce chenal aboutit au fond du lac où les eaux sales se décantent suivant un plan horizontal de plusieurs kilomètres de côté.

Grâce à ce phénomène les eaux du lac Léman sont toujours parfaitement claires. Le même phénomène se produit sur le Rhin dans le lac de Constance.

Ce phénomène s'explique hydrauliquement de la manière suivante :

Lorsque un débit d'eau chargé de matériaux pénètre dans une masse d'eau claire il peut se produire à l'entrée et en surface une auréole colorée d'eau chargée où s'effectue un mélange. la masse d'eau chargée peut dans certaines conditions plonger dans l'eau claire et cheminer au fond.

Les facteurs qui déterminent la plongée sont en particulier le débit, la densité de l'eau chargée de sédiments donc la concentration. Dans le facteur débit intervient la vitesse de l'écoulement qui peut être plus ou moins grande du fait de la topographie des lieux.

La plongée est produite par l'ensemble des sédiments qui ont tendance à descendre et qui entraînent l'eau avec eux. Pour que la plongée s'effectue il faut que l'écoulement d'eau chargée parcourt une certaine longueur pour trouver une profondeur suffisante. Le vent peut faire varier la longueur de parcours.

REJET DE MATERIAUX A LA MER PAR REFOULEMENT HYDRAULIQUE RISQUES DE POLLUTION DES PLAGES

Lorsque la plongée s'est effectuée un courant peut donc s'établir au fond de la masse d'eau claire; à cause de la turbulence de l'écoulement des sédiments suffisamment fins sont maintenus en suspension. A la partie supérieure du courant de densité existe un entraînement d'eau claire. Dans cette zone d'entraînement souvent appelée interface se produit un mélange. Lorsque le courant de densité est établi on rencontre sur une verticale à partir du bas, d'abord un écoulement très net dont la densité est supérieure à l'eau (mais si les sédiments en suspension sont très fins la densité dans la masse du courant varie peu), plus haut existe une zone où la densité décroît pour atteindre la densité de l'eau claire et au-dessus l'eau claire.

Les lois établies pour les courants de densité sont assez semblables aux lois régissant les courants à surface libre. Les principales caractéristiques des courants de densité sont établies en faisant intervenir les forces de pression, de pesanteur et de frottement du courant sur le fond et à l'interface. L'équation générale est la suivante :

$$U^2 = \frac{8}{k} \frac{\Delta\rho}{\rho + \Delta\rho} g R i$$

- U** : vitesse de l'écoulement
 ρ : masse spécifique de l'eau claire
 $\rho + \Delta\rho$: masse spécifique du courant de densité
g : accélération de la pesanteur
i : pente du fond sur laquelle s'établit l'écoulement
R : rayon hydraulique de l'écoulement défini par le rapport de la section occupée par le courant au périmètre mouillé $R = \frac{lh}{l + 2h}$ avec
 l = largeur de la section
 h = profondeur de l'écoulement.
k : est un coefficient de frottement dépendant de la rugosité du fond et de l'interface.

La relation indiquée plus haut montre que les lois des courants de densité sont semblables à celles des écoulements à surface libre.

COASTAL ENGINEERING

Cependant dans ces derniers la pesanteur intervient directement alors que pour les courants de densité la pesanteur est réduite d'une manière importante par le terme $\frac{\Delta \rho}{\rho + \Delta \rho}$. C'est pourquoi les courants de densité ont des vitesses d'écoulement assez faibles alors que les hauteurs sont assez importantes. Ceci explique que des courants même faibles dus à d'autres facteurs (houle, marée, etc...) puissent contrecarrer ce cheminement.

ETUDES PARTICULIERES EFFECTUEES A LA SOGREAH

Le problème du rejet en mer par refoulement hydraulique peut donc se ramener dans la plupart des cas à examiner :

- 1°- s'il est possible, compte tenu de la granulométrie du matériau à rejeter, d'obtenir une concentration du mélange d'eau et de matériau et une vitesse d'écoulement de ce mélange susceptibles de provoquer un underflow,
- 2°- si les facteurs océanographiques (pente des fonds, houle, courants, etc...) permettront à cet underflow de se propager suffisamment loin vers le large en entraînant avec lui la majeure partie du matériau.

Ce problème est malheureusement très complexe et les résultats obtenus dans des cas très différents ne peuvent donner des enseignements qui permettraient de résoudre tous les problèmes. Cependant les 2 études dont nous allons exposer maintenant les résultats et qui se rapportent à des matériaux de granulométries très différentes nous ont paru susceptibles de fournir des indications intéressantes sur la formation des dépôts sous-marins.

Nous attirons d'autre part l'attention sur le fait qu'il est pratiquement impossible de réaliser une similitude correcte sur un modèle d'ensemble comme nous le verrons plus loin ; aussi est-on amené à étudier un certain nombre de cas schématiques dont les conclusions peuvent être utiles pour l'étude de cas plus complexes ; cette façon de procéder sera justifiée par la suite.

1ère ETUDE : REJET A LA MER DES SUIES D'UNE CENTRALE THERMIQUE

Exposé du problème

Le problème consistait à déterminer un procédé simple et économique pour évacuer 500.000 tonnes de suies chaque année avec un débit maximum de 2.000 tonnes par jour environ.

REJET DE MATERIAUX A LA MER PAR REFOULEMENT HYDRAULIQUE RISQUES DE POLLUTION DES PLAGES

La granulométrie de ces suies était définie par la courbe ci-jointe (V. fig. 2), le diamètre moyen se situant vers 20 microns.

Le procédé habituellement utilisé pour se débarrasser de la suie, quand la centrale est à proximité de la côte consiste à la déverser au large en utilisant des chalands. Cette méthode, d'ailleurs efficace, aurait entraîné, pour le projet considéré, des frais tant d'investissement que d'exploitation très importants et apparemment beaucoup plus élevés qu'un dispositif de pompage et de rejet, relativement près du rivage d'une mixture d'eau et de suie.

On pouvait espérer, la densité de la mixture étant supérieure à celle de l'eau, qu'un courant de densité se formerait au débouché de la conduite et qu'il s'écoulerait assez loin du rivage pour que la suie soit transportée au delà de la limite en deça de laquelle elle est indésirable. Sa présence soit sous forme d'un nuage en suspension large et épais, soit sous forme de dépôts par faibles profondeurs pouvait polluer non seulement les plages balnéaires avoisinantes, mais aussi les emplacements fréquentés par les poissons.

Les problèmes posés à la Sogreah

Il a donc été demandé à notre Société de déterminer par une série d'essais :

- d'une part les chances de formation d'un underflow et les meilleures conditions pour l'établissement de celui-ci, compte tenu de la granulométrie du matériau et de la pente des fonds,
- d'autre part l'effet sur cet underflow de la houle et des courants.

Les moyens employés

Comme nous l'avons signalé précédemment, il est impossible de réaliser en similitude un modèle reproduisant l'ensemble des phénomènes à étudier.

En effet, si on réalise les écoulements et mouvements d'eau en similitude, il faut trouver alors un matériau qui, à l'échelle choisie, réagisse aussi en similitude à la mise en suspension et à la sédimentation. Ceci exigerait en particulier une similitude de turbulence et on sait que ceci est théoriquement impossible.

COASTAL ENGINEERING

Pour tourner cette difficulté on peut essayer d'employer sur le modèle le même matériau que dans la nature et d'ajuster alors les facteurs hydrauliques pour qu'ils agissent sur lui de manière à peu près équivalente.

En ce qui concerne la houle, nous avons vu que celle-ci agit en particulier par le mouvement orbital des particules d'eau et par les courants de masse auxquels elle donne naissance.

Il est possible de trouver pour la houle modèle des valeurs de $2a$, L et h telles que la vitesse orbitale sur le fond soit la même sur le modèle que dans la nature. Cette condition est réalisée, si h et L étant réduits dans le rapport λ , $2a$ est réduit dans le rapport $\sqrt{\lambda}$.

Cependant le mouvement orbital existe sur toute la hauteur et contribue à maintenir le matériau en suspension. Cette mise en suspension est fonction des vitesses des particules et de la distribution de ces vitesses. Du fait que l'amplitude des vagues et la profondeur sont plus petites sur le modèle que dans la nature, on ne peut obtenir la même répartition de vitesse, si on s'impose l'égalité des vitesses orbitales au fond. Par conséquent les effets du mouvement orbital de la houle dans toute la masse d'eau ne peuvent être reproduits en similitude si on emploie sur modèle le même matériau que dans la nature.

Quant aux courants de masse, ils sont trop mal connus pour définir leur similitude. Il est cependant admis que la vitesse du courant de masse au fond augmente pour une houle donnée quand la profondeur diminue et d'après Longuet Higgins, sa valeur maximum serait, comme nous l'avons vu précédemment, liée à celle de la vitesse orbitale maximum au fond par une relation de la forme

$$U_{\max} = f \left(\frac{T}{L} V_o^2 \max \right)$$

Par conséquent, si la houle du modèle à la même vitesse orbitale au fond qu'une houle nature plus grande, les courants de masse près du fond ne seront pas les mêmes, Il est important cependant de noter que le courant induit va dans le même sens et agit dans une région où règne un degré de turbulence semblable (créé par les vitesses orbitales) : les mouvements seront donc proportionnels.

REJET DE MATERIAUX A LA MER PAR REFOULEMENT HYDRAULIQUE RISQUES DE POLLUTION DES PLAGES

Ces considérations montrent qu'une étude sur modèle précise et quantitative des phénomènes est pratiquement impossible. On peut cependant utiliser les essais de Laboratoire :

- soit pour mieux connaître le comportement des matériaux à certaines actions hydrauliques,
- soit pour fournir des images permettant une certaine analogie avec les images réelles et grâce auxquelles les ingénieurs peuvent tenter des prévisions pour la réalité.

Les essais ont consisté dans le cas de cette étude :

- a) à étudier d'abord à 2 dimensions dans un canal à houle le comportement du matériau nature soumis à la houle,
- b) à chercher à caractériser sur un modèle plus vaste, l'action de la houle à 3 dimensions sur des écoulements de mixture suie et eau en fonction de la concentration de celle-ci.
- c) à rechercher dans une installation spécialement aménagée pour l'étude des courants de densité, la concentration optimum à donner à cette mixture pour obtenir un underflow.

Description des essais

a) Essais en canal à houle

Nous avons utilisé un canal à houle de 70 m de long et 1 m,20 de large vitré sur 9 m de long et équipé d'un batteur plan articulé sur le fond (V. fig. 3). La période et l'amplitude de la houle étaient facilement réglables, la 1ère à l'aide du variateur de vitesse du groupe moteur d'entraînement du batteur, la 2ème par variation de l'excentricité du système bielle-manivelle d'attaque du volet. Un jeu de filtres placés devant le batteur purifiait les houles en supprimant les harmoniques et en empêchant les houles réfléchies de revenir jusqu'au batteur. Ces réflexions étant d'ailleurs réduites au minimum par d'autres filtres situés à l'autre extrémité du canal et en haut de la plage de manière à éviter les effets parasites sur la suie disposée dans le canal.

Après avoir aménagé dans le canal une plage en ciment de pente 5 % une bande de suie de 2 à 3 centimètres d'épaisseur et de 10 à 15 cm de largeur fut placée sur celle-ci, perpendiculairement à l'axe du canal à une profondeur de 60 cm.

COASTAL ENGINEERING

Cette profondeur fut choisie aussi grande que possible afin que, pour une vitesse sur le fond donnée, la condition de répartition des vitesses dans la profondeur ne soit pas trop éloignée de la réalité.

On fit alors agir une houle de 1,35 sec de période dont l'amplitude fut montée progressivement de 40 mm à 160 mm.

Après avoir observé pour 75 mm la formation d'un léger nuage de suie, celui-ci s'épaissit pour des amplitudes plus fortes quelques grains commençaient à remonter la pente sur le fond et en suspension tandis qu'un underflow se formait et descendait lentement la pente. Les 2 mouvements inverses s'accroissaient pour 160 mm d'amplitude. Sur les fig. 4 et 4 bis, on a groupé quelques photographies montrant le phénomène et le front d'underflow.

Il convient de noter que tout près de la plage sur des fonds très faibles le matériau qui remonte se met en suspension et occupe toute la hauteur d'eau sur une certaine distance à partir du rivage. Lorsque la concentration de ce nuage augmente un underflow se forme, plonge et redescend vers le large sous l'eau claire. La vitesse de cet underflow très faible à cause de l'opposition des courants de houle, augmente considérablement dès que la houle s'arrête.

Ces essais permirent d'observer que les houles étaient capables :

- de remonter du matériau vers la plage malgré la pente des fonds,
- de permettre la formation d'underflow à partir d'un tas disposé en eau calme, un underflow se forme d'une part à l'aplomb du tas et d'autre part, par très faibles fonds, près du rivage quand la concentration du nuage devient suffisante.

Cet underflow subsiste et se propage malgré l'action turbulente de la houle qui tend à le désorganiser et le courant de masse vers le rivage, existant dans la couche limite, qui tend à le freiner.

On peut également déduire de ces essais par la théorie irrotationnelle au 1er ordre, en supposant que la vitesse orbitale sur le fond est en 1ère approximation la seule force agissant sur les grains, que pour le matériau considéré une houle de 10 sec de période et 1 m d'amplitude peut commencer à faire bouger les grains de suie considérés par une profondeur de 40 m environ et qu'une houle de même période et d'amplitude 3 m,50 peut avoir la même action pour une profondeur d'environ 75 m.

REJET DE MATERIAUX A LA MER PAR REFOULEMENT
HYDRAULIQUE RISQUES DE POLLUTION DES PLAGES



Fig. 4. Action de la houle sur un tas de suie .

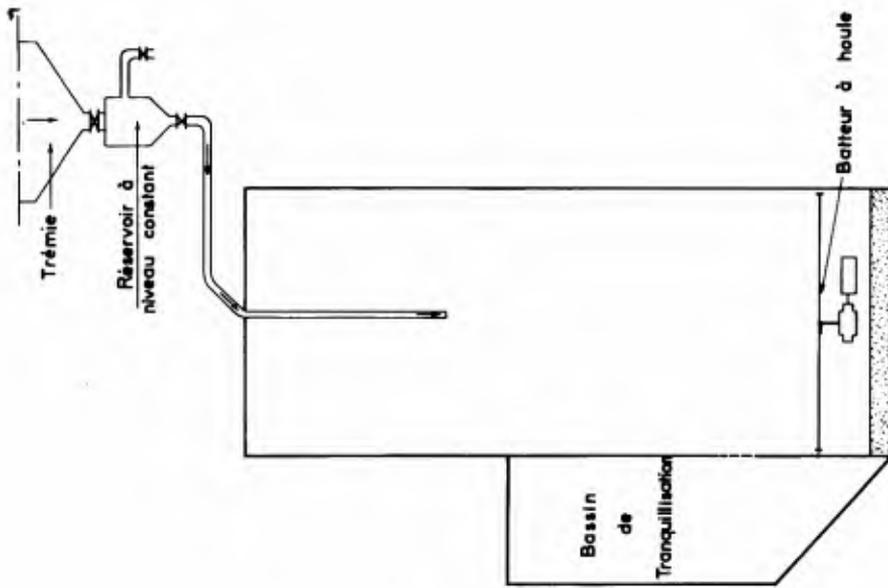


Fig. 5. Schema du bassin a houle .

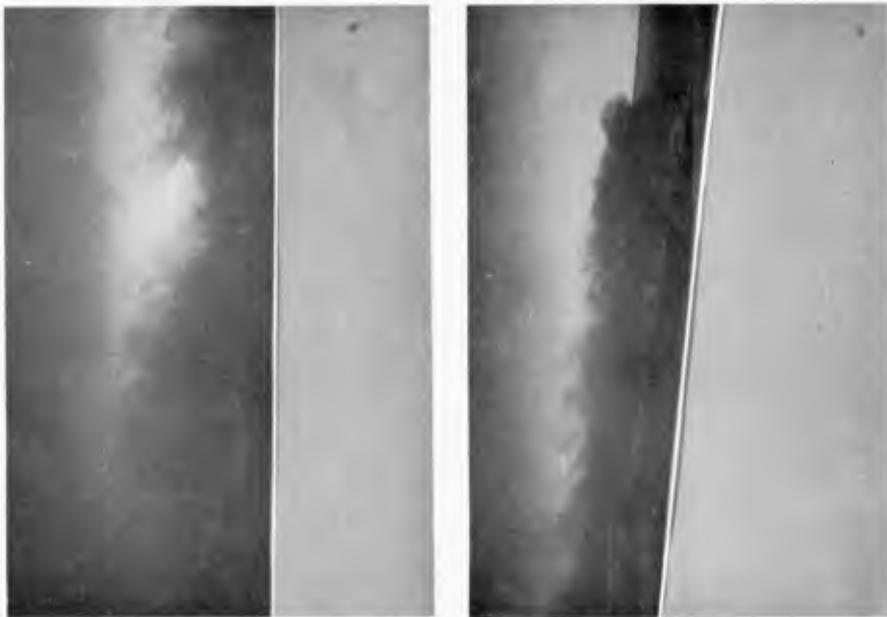


Fig. 4 bis. Action de la houle sur un tas de suie (underflow).

REJET DE MATERIAUX A LA MER PAR REFOULEMENT HYDRAULIQUE RISQUES DE POLLUTION DES PLAGES

b) Essais dans un bassin de plus grandes dimensions

Ces essais ont été réalisés dans un bassin rectangulaire de 25 m de long par 10 m de large équipé d'un batteur à houle sur toute sa largeur. A l'autre extrémité du bassin était installée une cuve mélangeuse dans laquelle était préparée la mixture de suie à la concentration désirée. Celle-ci était envoyée ensuite après réglage du débit à la valeur désirée dans un tuyau flexible permettant de la rejeter dans le bassin à la distance voulue du rivage (V. fig. 5)

Dans le bassin avait été en effet reproduite une plage de pente uniforme en ciment de 1,3 % correspondant à la pente moyenne des fonds naturels dans la région considérée, avec distorsion de 2.

Les échelles adoptées ont été en effet le 1/200 en plan et le 1/100 en hauteur. Ces échelles avaient un caractère assez arbitraire, car le peu de temps dont on disposait pour effectuer cette étude n'avait pas permis au préalable d'effectuer des recherches systématiques pour définir les échelles et le matériau à utiliser, ni d'effectuer ensuite les essais sur un modèle encore beaucoup plus vaste et plus complexe pour s'affranchir complètement de tout effet de paroi susceptible de créer des courants parasites.

Les essais n'avaient donc pas la prétention de donner des résultats quantitatifs, mais seulement de fournir aux ingénieurs chargés du projet une image des phénomènes susceptibles de se produire au débouché de la conduite rejetant la mixture en mer.

L'échelle en plan de 1/200 a donc été choisie en fonction des dimensions de l'installation quant à l'échelle en hauteur nous l'avons prise égale à 1/100 afin d'avoir une profondeur d'eau suffisante sans modifier cependant de façon trop sensible la pente du fond par rapport à la réalité.

La houle de crêtes parallèles au rivage, engendrée par le batteur avait des caractéristiques telles que les essais soient matériellement réalisables et qu'une interprétation qualitative raisonnable soit possible. En effet respecter les vitesses sur le fond aurait nécessité de très fortes amplitudes, donc des houles extrêmement cambrées qui auraient donné une très mauvaise répartition des vitesses sur une verticale : mais respecter cette répartition de vitesses aurait conduit à adopter des houles très petites engendrant des vitesses au fond sans action sur le matériau. Nous avons donc choisi des caractéristiques moyennes entre celles qu'auraient données ces 2 conditions contradictoires.

COASTAL ENGINEERING



Fig. 6. Forme du 1 er dépôt sans houle.

REJET DE MATERIAUX A LA MER PAR REFOULEMENT HYDRAULIQUE RISQUES DE POLLUTION DES PLAGES

Les essais furent effectués d' bord sans houle avec différents débits et différentes concentrations de mixture, l'extrémité du tuyau se trouvant, sur le modèle, à une distance du rivage correspondant approximativement à 8 m,50 par une profondeur de 15 cm environ.

Un premier essai fut effectué en rejetant pendant 1 h.30 dans le bassin un débit de 0,15 l/s. d'un mélange de densité 1,03 (environ 60 gr. de suie par litre).

A l'extrémité du tuyau le jet s'élargit rapidement en éventail formant un dépôt autour du débouché. Le mélange qui continue à arriver s'écoule par vagues successives sur les flancs du tas déjà constitué de façon analogue à un courant de densité mais en se répandant tout autour de l'orifice (V. fig. 6).

Le même essai repris en rejetant dans le bassin pendant 14 heures un débit 3 fois plus fort d'un mélange de densité plus faible 1,01 (soit 20 gr. par litre) donna des résultats très semblables. La différence essentielle résidait dans la force de l'écoulement qui maintenant le débouché dégagé, de sorte que le matériau avait moins tendance à remonter. Une remontée existait cependant encore en raison en particulier de la réflexion du jet sur le parement raide du dépôt face au débouché. (V. fig. 7)

Ces 2 essais effectués sans houle pour des conditions de débit et de densité de mixture très différentes permirent de conclure qu'il n'y avait guère d'espoir d'obtenir un courant de densité limité en largeur.

Sur le dépôt formé en eau calme lors du 2ème essai on fit alors agir une houle de 7mm d'amplitude, tout en continuant à introduire la mixture. On observa alors un certain arasement de l'île formée par le dépôt, un adoucissement de sa pente côté large et une recrudescence de l'écoulement de l'underflow vers le large. Ceci peut s'expliquer d'une part par le fait que la houle, favorisant la mise en suspension, augmente la concentration du mélange et alimente ainsi l'underflow, d'autre part parce qu'en arasant l'île, la houle ouvre ainsi un chemin au jet et facilite sa propagation vers le large. Il n'en reste pas moins toutefois que, si la houle favorise le dépôt de la suie au large, elle transporte également des grains vers le rivage. En prolongeant l'essai avec des houles de 14 mm puis de 30 mm d'amplitude on observe les mêmes phénomènes (V. fig. 8 et 8 bis).

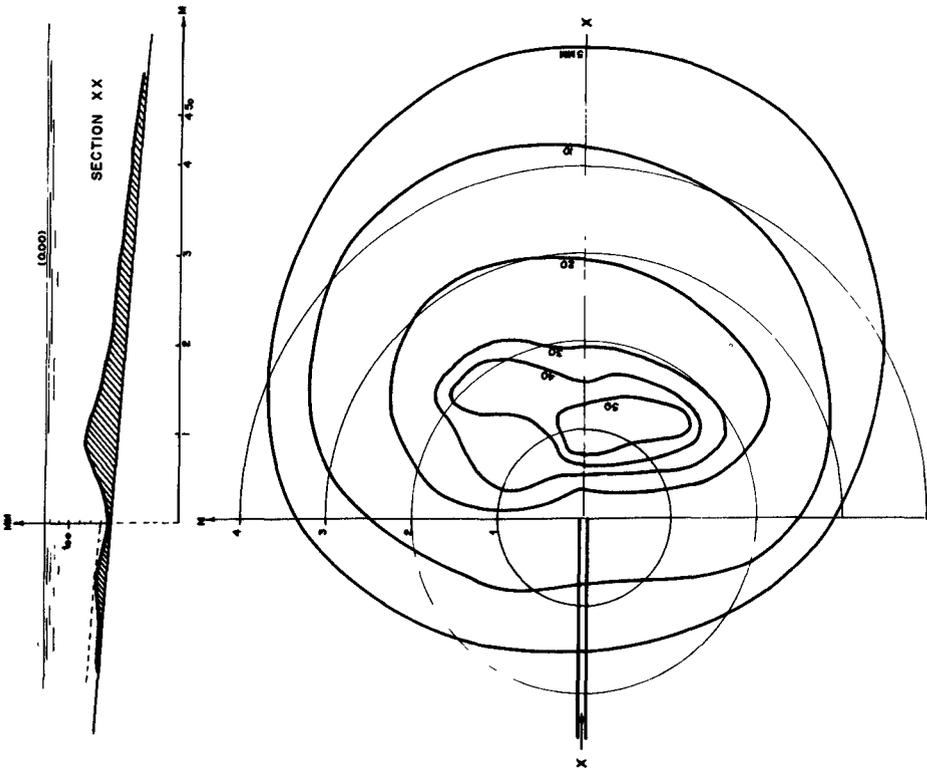


Fig. 8. Forme du 2 eme dépôt avec houle.

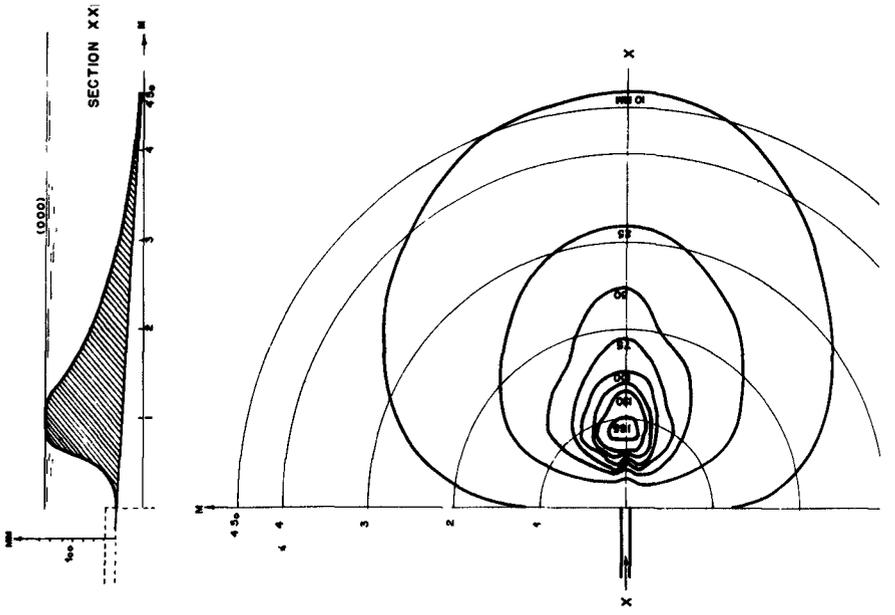


Fig. 7. Forme du 2 eme dépôt sans houle.

REJET DE MATERIAUX A LA MER PAR REFOULEMENT
HYDRAULIQUE RISQUES DE POLLUTION DES PLAGES



Fig. 8 bis. Forme du 2 eme depot sans houle .

COASTAL ENGINEERING

Il sembla alors utile d'effectuer un essai en faisant agir la houle dès le début de l'introduction de la mixture. L'essai fut donc recommencé avec un débit de 0,45 l/sec de la mixture de densité 1,01 précédente et une houle de 1 sec de période et 30 mm d'amplitude et ceci pendant 10 h. de sorte que 400 Kg de suie furent introduits dans le bassin.

Quoique le processus de formation d'un tas en face du débouché ait été assez analogue, l'épaisseur de ce tas fut beaucoup plus faible, un courant de densité plus important se forma avec l'aide de la houle. Malgré cela la suie se déposa en une fine couche dans tout le bassin.

Une analyse granulométrique de plusieurs échantillons prélevés après chacun de ces essais dans le bassin à différentes distances du débouché du tuyau permit de vérifier un tri, les grains les plus fins étant les plus au large et en proportion plus importante quand la houle a agi.

c) Essais dans un canal spécialement aménagé pour les études d'underflow

Pour ne pas allonger outre mesure cet exposé, nous ne citerons que pour mémoire les essais effectués sur une installation spéciale de notre Laboratoire destinée à l'étude des courants de densité.

Le but de ces essais était de définir la concentration optimum permettant à l'écoulement d'entraîner le maximum de suie avec le dépôt le plus faible. Il existe en effet simultanément deux tendances opposées. La première est de réaliser un courant d'une densité assez élevée afin que les vitesses d'écoulement soient suffisantes pour entraîner les matériaux. Mais si les grains ne sont pas très fins, plus la densité est élevée, plus il faudra d'énergie à l'écoulement pour transporter le matériau. Par contre la deuxième tendance, consistant au contraire à réaliser un courant de densité assez faible, conduira à un écoulement à faible vitesse donc à des dépôts.

Les essais effectués, quoique rapides et schématiques nous ont amenés à préconiser une concentration voisine de 20 à 30 gr/litre pour se trouver dans les conditions optima de formation d'un underflow.

d) Conclusions

Malgré la difficulté d'interprétation de ces essais il semble que l'on puisse en tirer les conclusions suivantes:

REJET DE MATERIAUX A LA MER PAR REFOULEMENT HYDRAULIQUE RISQUES DE POLLUTION DES PLAGES

Si le matériau est rejeté à une certaine profondeur de 10 m par exemple, les grains les plus gros se déposeront à une certaine distance de l'extrémité du tuyau et l'accumulation qu'ils formeront sera rabotée par l'action directe des houles.

Sous l'action de ces vagues le matériau déposé remontera en partie vers le haut de la plage en formant un nuage en suspensions qui sera très sensible à l'action de courants parallèles au rivage ou de houles obliques qui contribueront à son étalement. Une partie du matériau pourra vraisemblablement se déposer sur la plage, mais une autre partie repartira vers le large car la masse en suspension aura tendance à plonger dès qu'elle aura atteint une concentration suffisante.

Par ailleurs à l'aval du tuyau la mixture après avoir perdu ses éléments les plus gros, s'écoulera vers le large sous forme de courant de densité. Cependant, étant donné la très faible pente des fonds dans le cas considéré, il se produira un étalement de cet écoulement, fonction aussi de la forme du dépôt à proximité du tuyau ; ceci provoquera des dépôts successifs de matériaux de plus en plus fins au fur et à mesure de sa propagation vers le large.

Autrement dit dans le cas précis qui a été étudié dans cette première étude, malgré la granulométrie assez fine du matériau rejeté, l'underflow qui se formera à la sortie de la conduite ne sera vraisemblablement capable de transporter vers le large que les matériaux les plus fins car, d'une part, étant donné l'hétérogénéité du matériau, il sera impossible d'éviter le dépôt des grains les plus gros, d'autre part la faible pente des fonds et la présence du dépôt précédent étaleront cet underflow, lui enlevant de ce fait une partie de son efficacité. L'action de la houle sur ces dépôts pourra provoquer une remontée du matériau vers le rivage, mais une faible partie de celui-ci devrait seulement s'y déposer.

2ème ETUDE : REJET A LA MER DES STERILES D'UNE MINE D'AMIANTE

Exposé du problème

Il s'agissait cette fois d'évacuer par un procédé quelconque les 600.000 tonnes par an de stériles résultant de l'extraction de l'amiante d'une mine située à proximité de la mer.

COASTAL ENGINEERING

La situation du gisement conduisait donc tout naturellement à envisager un rejet en mer.

Malheureusement le matériau à rejeter est beaucoup plus gros que celui étudié au cours de la précédente étude, son diamètre moyen étant de l'ordre de quelques mm. Il y avait donc tout lieu de penser qu'une solution par rejet hydraulique ne permettrait pas d'obtenir un underflow susceptible d'emporter le matériau vers le large. Les courants de densité ne se développent en effet qu'avec des matériaux dont la majorité des grains est nettement inférieure à 50 microns.

Les problèmes posés à la Sogreah

Il fut demandé à notre Société d'effectuer une étude critique, du point de vue hydraulique des divers procédés d'évacuation en mer, à savoir :

- transport vers le large par chalands
 - refoulement hydraulique par conduite immergée
 - rejet au rivage
- afin d'apprécier leurs possibilités d'application.

Nous ne retiendrons dans cet exposé que la 2ème solution du refoulement hydraulique. La formation d'un underflow étant exclue, il restait cependant à examiner la possibilité de former des tas de stériles à une profondeur telle que l'action de la houle et des courants sur ces tas soit négligeable.

Les moyens employés

Les études comportèrent tout d'abord une campagne hydrographique très complète pour recueillir les données nécessaires à savoir :

- levé hydrographique au 1/2.500 de la zone intéressée,
- prélèvement de nombreux échantillons de fonds pour analyser la nature de ceux-ci,
- direction et intensité des courants marins,
- caractéristiques des houles,
- etc...

L'étude du transport hydraulique pour un débit solide de 100 tonnes/heures nécessitait la connaissance de l'écoulement des stériles à la sortie du tuyau en mer.

REJET DE MATERIAUX A LA MER PAR REFOULEMENT HYDRAULIQUE RISQUES DE POLLUTION DES PLAGES

Cet essai a été effectué avec un matériau analogue à celui de la réalité (V. fig. 9 sa courbe granulométrique) dans un canal vitré représentant la mer suivant une coupe verticale (la paroi vitrée). Devant la vitre arrivait une conduite d'amenée du matériau, qui était en réalité une 1/2 conduite plaquée contre la vitre pour permettre l'observation du phénomène en coupe. Une pompe à vitesse variable permettait des essais à différentes vitesses de transport. L'installation était complétée par un venturi pour mesurer les débits, donc les vitesses, et un manomètre pour suivre l'évolution de la pression nécessaire à assurer l'écoulement à la sortie de la conduite.

On put observer les phénomènes suivants :

Le jet de sortie transporte les matériaux à quelques dizaines de cm de l'extrémité de la conduite. Cette longueur varie avec la vitesse de transport. Les matériaux dont la granulométrie est étendue subissent une sorte de triage. Les gros grains s'arrêtent les premiers, les fins continuent un peu leur course. Les grains arrivant successivement se heurtent à ceux déjà déposés et le tri se continue.

Les gros grains sont stoppés, les fins sautent par-dessus. D'où, dès le début, apparition d'une petite dune en face de l'orifice de sortie. Cette dune s'élève peu à peu et à mesure se développe un croissant (où 1/2 croissant sur la maquette puisque le phénomène est reproduit en coupe).

Cette dune s'élève et se rapproche de l'orifice de la conduite. Elle présente une pente raide côté jet et une pente douce côté libre. La hauteur de la dune dépasse peu à peu la hauteur du tube et le jet s'infléchit vers le haut. Le croissant allonge ses bras et vient se refermer en arrière du jet.

Le phénomène se poursuit. L'extrémité de la conduite est prise dans un tas. Ce tas devient un cône tronqué dont le centre est un écoulement en forme de cheminée.

Les photos prises en cours d'essai et représentées sur la figure 10 montrent l'évolution du tas depuis le début jusqu'à la formation du cône.

Pour permettre une évolution plus rapide du phénomène, la vitesse de transport a été choisie basse : 1,20 m/s. La force du jet est affaiblie en proportion. On constate cependant que malgré la hauteur du cône et la quantité des gros grains accumulés dans la cheminée, l'écoulement reste libre. La pression nécessaire au maintien du débit ne s'accroît que faiblement avec la hauteur du cône.

COASTAL ENGINEERING

En cas d'arrêt, tous les matériaux en mouvement dans la cheminée tombent et obstruent l'extrémité de la conduite. Le tas a alors l'aspect d'un volcan éteint (cône tronqué et incurvé à son sommet). C'est ce que montre la photo n° 5. La remise en route se fait aisément même à des vitesses de pompe très inférieures à celles de fonctionnement. La pression au démarrage par contre devient légèrement supérieure à celle au fonctionnement.

Ces observations permettent de conclure que :

a) Le rejet en extrémité de conduite forme un tas conique dont la pente est la pente naturelle du matériau dans l'eau. Les caractéristiques du cône sont donc indépendantes :

- de la vitesse de transport
- de la position de l'extrémité du tube.

b) Seule la hauteur du cône, donc le volume de matériau rejeté, dépend de la force du jet.

c) La pression au redémarrage est supérieure à celle nécessaire au fonctionnement. C'est donc celle-ci qui, en définitive, déterminera la hauteur maximum admissible pour le fonctionnement de l'installation.

Il restait donc à déterminer les volumes maxima qui pourraient être rejetés ainsi en mer sous forme de cône en fonction du profil sous marin.

A cet endroit les pentes sous marines sont de l'ordre de 5 à 10 % jusqu'à une distance de 2 Km où elles atteignent 50 %. Mais ces pentes importantes ne prennent naissance qu'à une profondeur de 100 mètres. Leur intérêt est donc anéanti par l'impossibilité matérielle d'aller poser des conduites à de telles profondeurs.

Si on se limite alors au rejet par 40 m de fond la pente de ceux-ci ne permettra pas l'évacuation vers le large du matériau par glissement et on aura un cône analogue à celui observé sur modèle.

Pour éviter que les parties légères du matériau ne soient reprises par la houle il semble prudent de limiter la hauteur du cône à 25 m environ, on arrive donc ainsi à un cône de 65.000 m³. La quantité annuelle à rejeter étant de 400.000 m³, il faudrait donc réaliser 6 tas semblables c'est à dire déplacer 6 fois par an l'extrémité de la conduite d'une distance minimum de 100 mètres. Si on considère que les 50 derniers mètres de la conduite seront sous le talus, on voit de suite l'impossibilité de cette manoeuvre.

REJET DE MATERIAUX A LA MER PAR REFOULEMENT HYDRAULIQUE RISQUES DE POLLUTION DES PLAGES

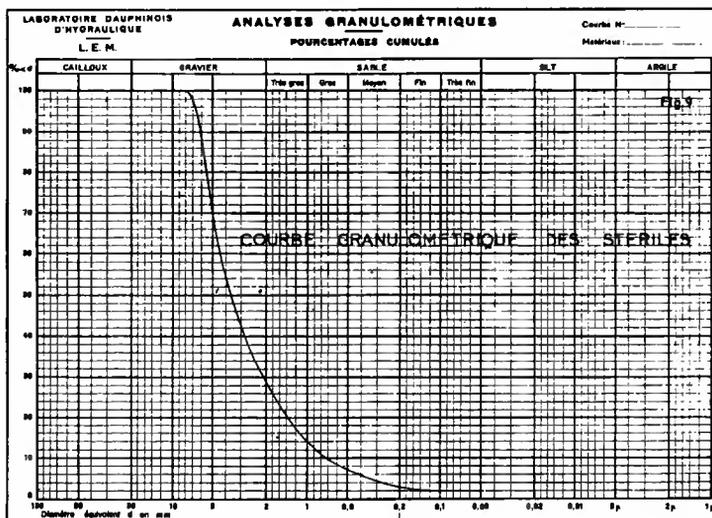


Fig. 9

TRANSPORT HYDRAULIQUE DE STERILES D'AMIANTE

EXTREMITE DE LA CONDUITE



1



2



3



4



5

Fig. 10

COASTAL ENGINEERING

Ces essais situent exactement le problème.

Le transport hydraulique est techniquement réalisable - dans le cas particulier le débit de 100 t/heure pourrait être refoulé sur 1 Km dans une conduite de 200 mm par 3 pompes en série donnant une puissance totale de l'ordre de 350 CV.-.

Le rejet en mer, même sous un tas important est possible, seul obstacle : le faible volume qui peut s'entasser naturellement à l'extrémité de la conduite.

Pour augmenter ce volume on peut jouer sur 2 facteurs : la hauteur du cône et le diamètre du cercle de base.

La hauteur du cône est liée à la profondeur à laquelle est installée l'extrémité de la conduite. On peut donc difficilement gagner sur ce facteur sans se heurter à des difficultés de pose de celle-ci.

Par contre le diamètre de base étant lié à la pente du talus naturel du matériau sous l'eau, on peut penser adoucir celle-ci en réduisant le diamètre des grains par broyage.

Nous avons repris les essais précédents en canal vitré en éliminant tous les grains supérieurs à 2 mm et en ajoutant 15 % de sable inférieur à 300 microns. Malgré la présence de ces éléments fins, la pente naturelle est restée la même. Un autre essai effectué uniquement avec du sable de 300 microns nous redonna encore la même pente de 50 % environ. Il faudrait donc arriver à un broyage à 50 microns pour trouver l'ébauche d'une solution. Le matériau ne serait plus alors qu'une fine poussière et ce serait une véritable boue qui s'écoulerait en mer suivant un processus analogue à celui examiné dans la précédente étude.

Dans le cas particulier ceci nécessiterait l'investissement de capitaux importants dans une installation de broyage.

CONCLUSION GENERALE

L'exposé précédent permet de se rendre compte de la complexité de tels problèmes; ceux-ci demandent à être étudiés dans chaque cas avec un soin tout particulier. On peut en effet difficilement dégager des lois générales, étant donné l'influence réciproque des différents facteurs en jeu.

REJET DE MATERIAUX A LA MER PAR REFOULEMENT HYDRAULIQUE RISQUES DE POLLUTION DES PLAGES

Il semble toutefois qu'on puisse conclure des essais précédents et de l'expérience de notre Société en matière de courant de densité que :

Le rejet hydraulique d'un matériau dans la mer ne peut donner naissance à un courant de densité en eau calme que si le diamètre des grains est inférieur à 50 microns.

Malheureusement la turbulence due à la houle peut gêner l'écoulement de ce courant de densité et faciliter une mise en suspension d'une partie du matériau. Le nuage ainsi formé sera très sensible à l'action des courants de toutes sortes et il est impossible d'affirmer sans une étude hydrographique très complète que le matériau ne se déposera pas partiellement sur le rivage.

Dans le cas d'un matériau plus gros, on ne peut plus espérer obtenir en eau calme un underflow. La pente des fonds, si elle est assez raide, peut permettre des éboulements du tas. Quand à la houle et aux courants ils agiront sur celui-ci en l'écrêtant si son sommet atteint une profondeur suffisamment faible. Compte tenu du processus d'action de ces facteurs il n'est pas non plus impossible dans ce cas, si la distance au rivage de l'extrémité de la conduite n'est pas assez grande, qu'une partie du matériau puisse être également remontée jusqu'au rivage pendant les tempêtes.

L'étude de tels problèmes doit donc, comme nous l'avons dit, s'appuyer sur une campagne hydrographique assez complète, mais aussi peut bénéficier de l'aide du modèle réduit, même si la reproduction en similitude de ces phénomènes n'est pas possible. Des essais schématiques tels que ceux exposés dans la présente communication sont un guide précieux pour se faire une idée des phénomènes et en tirer des conclusions pratiques.

Bien entendu ces conclusions ne peuvent être déduites directement des résultats d'essais et doivent s'appuyer sur une synthèse des divers renseignements recueillis, basée elle-même sur la théorie et l'expérience de phénomènes analogues.

COASTAL ENGINEERING

RESUME

Discharge of materials into the sea by pumping through a pipe and the risk of pollution of beaches

L. Greslou

For an industrial plant situated on the coast it may be a profitable proposition to discharge the waste products of the production process, such as ashes and soot from an electric power station, wastes from a mine etc., into the sea.

It will generally be too expensive to convey these materials to the open sea by barges or overhead cableways, whilst discharge along the shore is often prohibitive because this would ruin the landscape or because the materials involve certain dangers. On the other hand, it may seem an adequate solution to discharge the materials by pumping them with water through a pipe line which deposits them at some distance off the coast.

However, this solution involves some serious problems, especially so in cases where the sea-bed has a slow gradient and where large volumes of wastes must be disposed of.

The author deals with the results of various theoretical and experimental investigations carried out by the SOGREAH in relation with problems of this kind, with particular attention to the following points:

- (a) The form such deposits assume at the end of the pipe.
- (b) The possibility of the formation of a density current.
- (c) Displacement of the deposits under the action of swell and the consequent risks of pollution of the beach by material taken back to the shore, etc.

These investigations have led to more exact knowledge of the difficulties which may arise from this method in connection with the grain size of the waste material, the topographic and hydrographic conditions, and with factors related with the running of an industrial plant.