

8

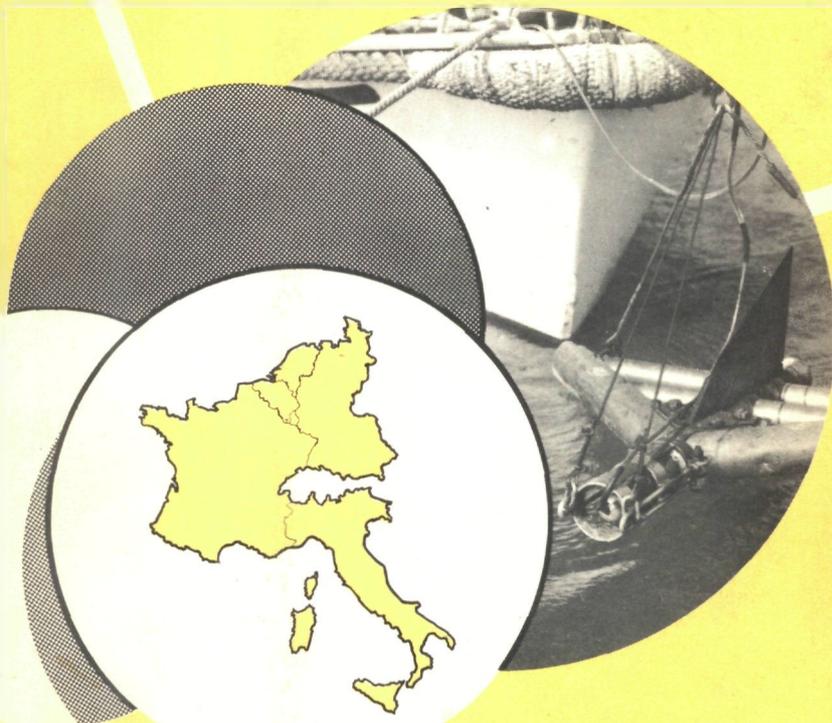
BIBLIOTHEEK

45 09

CAHIER D'INFORMATION DU BUREAU

**EURISOTOP**

comptes rendus - 2



**EMPLOI DE TRACEURS  
RADIO-ACTIFS POUR LA  
DETERMINATION DU MOU-  
VEMENT DE SUBSTANCES  
SOLIDES DANS L'EAU**

**Volume II :**

**364**

rapports présentés à la réunion de travail



DECEMBRE 1965

#### AVERTISSEMENT

La Commission d'Euratom, ou toute personne agissant en son nom, décline toute responsabilité quant au caractère complet des informations contenues dans ce "Cahier d'information" et quant aux dommages qui pourraient résulter de l'utilisation d'informations, d'équipements, de méthodes ou de procédés qui y sont présentés.



CAHIER D'INFORMATION DU BUREAU

**EURISOTOP**

**8**

Série : Comptes rendus - 2

# EMPLOI DE TRACEURS RADIO-ACTIFS POUR LA DETERMINATION DU MOUVEMENT DE SUBSTANCES SOLIDES DANS L'EAU

Volume II

b2399

RAPPORTS PRESENTES A LA REUNION DE TRAVAIL DU

BUREAU EURISOTOP

Bruxelles, 2-4 octobre 1963

145735

0307 002 3841



1965



Présenté par la section  
« Information et Documentation »  
du Bureau Eurisotop

## TABLE DES MATIERES

	Page
1. Le problème de l'Escaut considéré comme voie d'accès au port d'Anvers A. Sterling	1
2. Formation des dunes et des rides dans les modèles fluviaux J. Chabert, J.-L. Chauvin	23
3. Techniques de mesure radio-isotopique du cheminement des sables dans l'Innenjade et l'Aussenjade H. Fahse	45
4. Recherche expérimentale sur le transport de solides dans les courants sous pression I. Melisenda	55
5. Mesure du débit solide des cours d'eau par charriage au moyen de traceurs J. Chabert	71
6. Méthodes utilisant un traceur fluorescent dans l'étude de l'évolution des plages belges A. Bastin	99
7. Rapport sur l'expérience acquise lors de l'utilisation de méthodes radio-actives dans la Communauté européenne M. Petersen	107
8. Résultats des recherches effectuées à l'aide d'isotopes radio-actifs sur les mouvements de sable dans la région côtière allemande de la mer du Nord et de la mer Baltique H. Schulz	113
9. Mesure du déplacement de la vase au moyen de verre marqué au scandium radio-actif H.A. Klein	139
10. Emploi de radio-éléments dans le transport solide par charriage du Stung Sen au Cambodge F. Anguenot et al.	143

- |     |   |     |
|-----|---|-----|
| 11. | Importance du choix du type et de la granulométrie des traceurs radio-actifs selon les problèmes étudiés<br>W. Nesteroff  | 171 |
| 12. | Procédé de marquage d'échantillons de sable naturel au moyen de substances radio-actives<br>H. Becker, H. Götte   | 179 |
| 13. | L'Iridium-192 dans les études de mouvements de sédiments et descriptions d'une méthode de marquage en surface de grains de sable à l'Iridium-192<br>Ch. Rispal, G. Courtois | 185 |
| 14. | Technique de marquage radio-actif pour l'étude des mouvements de sable dans les eaux côtières allemandes<br>G. Meyn   | 195 |
| 15. | Mesures par traceurs radio-actifs du mouvement des sables aux Pays-Bas 1957-1962<br>J.J. Pilon  | 201 |
| 16. | Traitement et utilisation de substances marquées<br>M. Petersen   | 315 |
| 17. | Technique de mesure des mouvements de sable dans les eaux côtières allemandes<br>G. Meyn  | 323 |
| 18. | Développement d'une installation électronique de mesure pour hélicoptère<br>W. Petersen   | 327 |
| 19. | Procédé de mesure "in situ" de sédiments traceurs radio-actifs<br>J. Guizerix, G. Grandclément  | 331 |
| 20. | Possibilité d'emploi d'un nombre limité de grains radio-actifs dans les études quantitatives de mouvements de sédiments<br>G. Courtois                                      | 333 |
| 21. | Utilisation des mesures du bruit de fond pour l'établissement d'une carte lithologique du fond de la mer<br>A. Bastin   | 349 |

22. Détermination du temps de séjour des boues activées 357  
dans les installations d'épuration  
R. Krone
23. Mesure du débit solide des cours d'eau par charriage 361  
au moyen de traceurs  
J.-L. Chauvin, J. Danion
24. Détermination de la pénétration d'un cours d'eau 395  
dans la mer ou dans un lac  
J. Guizerix, G. Grandclément
25. Détermination quantitative des mouvements de sable 401  
G. Schulze-Pillot
26. Résultats de l'enquête du Commissariat français à 407  
l'énergie atomique sur la portée économique des  
substances radio-actives  
G. Robin
27. Risques inhérents à l'utilisation des radio-isotopes, 411  
et mesures de protection requises  
M. Petersen
28. Marquage radio-actif des boues  
- Premiers résultats du marquage superficiel à l'aide 417  
de l'or-198, selon la méthode de M. Petersen  
G. Antier et al.
29. Proposition concernant les conditions particulières 441  
d'emploi (1) des radio-éléments artificiels pour étu-  
dier les mouvements de sédiments  
G. Courtois, R. Hours

Le problème de l'Escaut considéré comme voie d'accès  
au port d'Anvers

A. STERLING

Ingénieur en chef-Directeur des Ponts  
et Chaussées

Directeur du Laboratoire de Recherches Hydrauliques

I. - INTRODUCTION.

La méthode des traceurs radio-actifs présente un grand intérêt pour l'étude de nombreux problèmes relatifs à la navigation maritime en Belgique, je me limiterai cependant dans cet exposé aux problèmes du dragage des sables dans l'Escaut et ses accès.

Nous avons à faire à un fleuve de plaine à faible bassin versant qui débouche dans une mer soumise à marée et comportant un transport littoral important.

L'ensablement éventuel se fait donc de l'aval, le débit tant liquide que solide venant d'amont étant minime.

L'estuaire de l'Escaut est d'origine relativement récente et la configuration des passes et des bancs évolue suivant des lois imposées par le fleuve dans son état naturel. L'intervention de l'homme ne s'est manifestée dans le passé que par l'érection de digues ou par l'exécution de dragages sur les seuils.

Ce n'est qu'avec les travaux de normalisation en cours que nous allons remodeler le lit dans le but d'améliorer les conditions de navigation. Ces travaux, aussi importants soient-ils, doivent tenir compte du fait qu'après leur réalisation ce seront les courants de flot et de jusant qui devront continuer à entretenir les chenaux de navigation.

Il est donc de la première importance de bien comprendre le mécanisme des mouvements des sables dans le fleuve.

Si la méthode des traceurs radio-actifs n'a pas encore été utilisée chez nous dans ce domaine, le principe des traceurs est largement utilisé en laboratoire hydraulique.

Avant de décrire les essais sur modèle réduit il est utile de rappeler succinctement les caractéristiques du régime du fleuve.

## II. - L'ESCAUT.

---

Le port d'Anvers est situé à 80 km de l'embouchure de l'Escaut. Sur ses 70 km aval, qui se trouvent en territoire néerlandais, le fleuve affecte plutôt l'allure d'un bras de mer. Ce n'est qu'à partir de la frontière hollando-belge qu'il prend la forme d'une rivière comprise entre deux digues sensiblement parallèles (figure 1).

La propagation de la marée dans le bassin de l'Escaut se trouve facilitée du fait que la rivière et ses affluents serpentent dans une véritable plaine. Sur l'Escaut la marée est arrêtée par un barrage à Gand, à 180 km de l'embouchure. Elle se propage dans ses divers affluents, le Rupel, la Nèthe Supérieure, la Petite et la Grande Nèthe, la Dyle, et la Senne d'une part et la Durme d'autre part, jusqu'aux endroits indiqués à la figure 1.

A la figure 2 sont reproduites les courbes locales simultanées de la marée moyenne de l'année 1950 à Flessingue (embouchure), Hansweert, Anvers, Termonde et Gand.

Le tableau ci-joint donne une série de résultats de la cubature de cette marée.

On remarquera combien le débit d'amont est petit, comparé à celui de la marée.

Le lit de l'Escaut se compose en majeure partie de sable très fin (120 - 150  $\mu$  ).

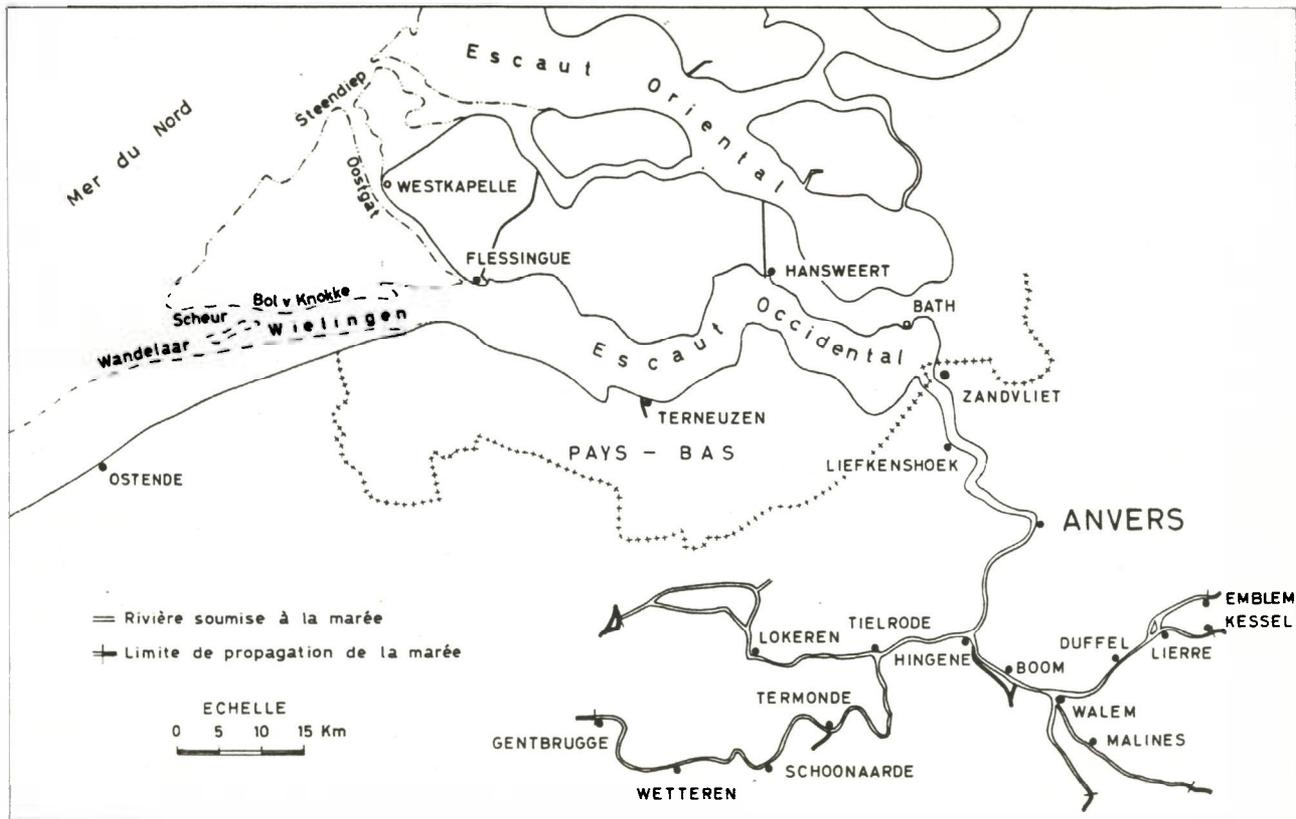
La figure 3 donne le cours de l'Escaut depuis Flessingue à Anvers avec sa passe navigable. Depuis l'embouchure jusqu'à Hansweert cette passe est large et profonde, mais à l'amont de cet endroit le fleuve présente une série de seuils où la profondeur naturelle est de l'ordre de 6 à 7 m sous marée basse. La navigation se pratiquant à marée montante, ces profondeurs ont été suffisantes jusqu'au début du siècle. A partir de cette époque, il a fallu recourir à des dragages, sur ces seuils, eu égard à

	Niveau en m.			Durée en heure et minute.		Débit supérieur en m <sup>3</sup>		Débit total du flot en 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	
	M. H.	M. B.	Amplitude	Flot	Jusant	par seconde	par marée	Flot	Jusant
Flessingue	4,28	0,62	3,66	6h12	6h13	118	5.274.600	1.065.288	1.070.562
Walsoorden*	4,62	0,34	4,28	5h55	6h30	95,5	4.268.850	357.234	361.502
Anvers	4,95	0,28	4,67	5h42	6h43	80,5	3.598.350	62.769	66.367
Termonde	4,85	1,67	3,18	4h28	7h57	26,65	1.191.255	4.278	5.470
Gand	4,85	3,09	1,76	-	12h25	25,75	1.151.025	-	1.151

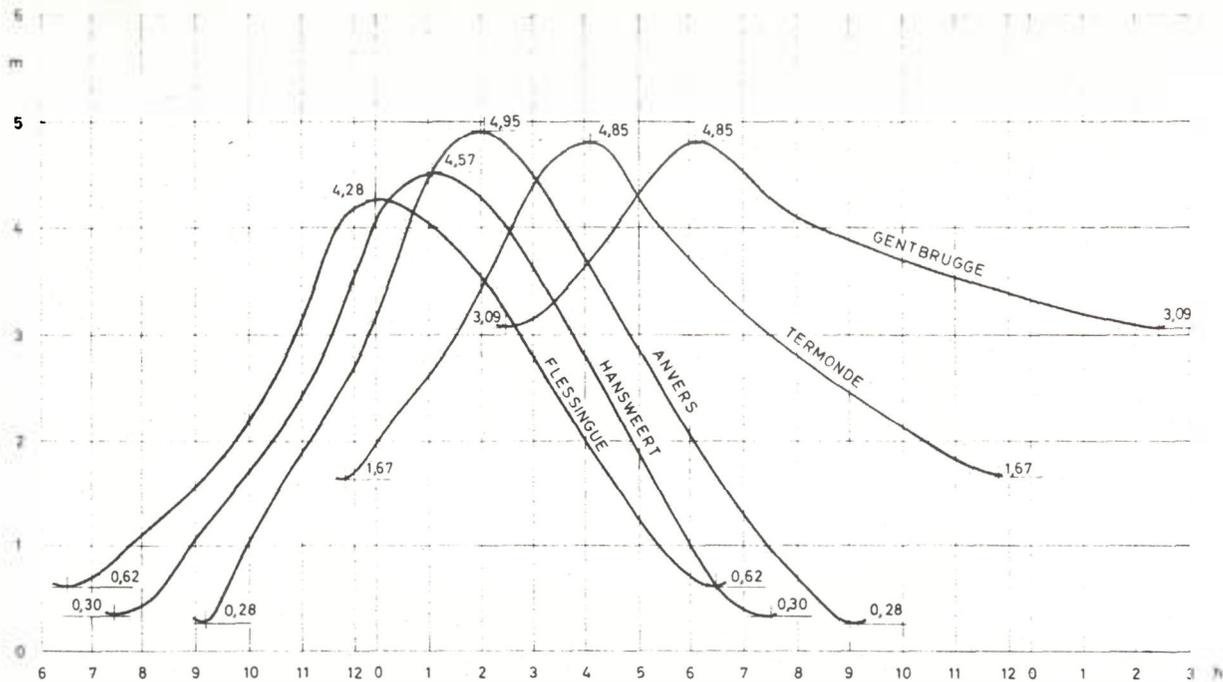
  

	Débit maximum		Section transversale en m <sup>2</sup>		Vitesses moyennes en m/sec.		Vitesses maxima en m/sec.	
	Flot m <sup>3</sup> /sec.	Jusant m <sup>3</sup> /sec.	M. H.	M. B.	Flot	Jusant	Flot	Jusant
Flessingue	95.300	71.500	97.200	78.175	0,52	0,56	1,01	0,83
Walsoorden*	32.300	21.700	38.125	25.050	0,51	0,49	0,91	0,69
Anvers	4.800	4.075	5.530	3.690	0,60	0,62	0,88	0,85
Termonde	446	282	579	292	0,56	0,50	0,87	0,62
Gand	-	25,75	128	56	-	0,32	-	0,46

\* à environ 6 km. à l'amont de Hansweert.



**Figure 1 -** Passage de la haute mer à l'Escaut par deux voies distinctes : Wielingen et Oostgat.



0h = Marée haute à FLESSINGUE . Les cotes sont rapportées au zero du Dépôt de la Guerre

**Figure 2** - Courbes locales simultanées de l'année 1950 à Flessingue (embouchure), Hansweert, Anvers, Termonde et Gand.

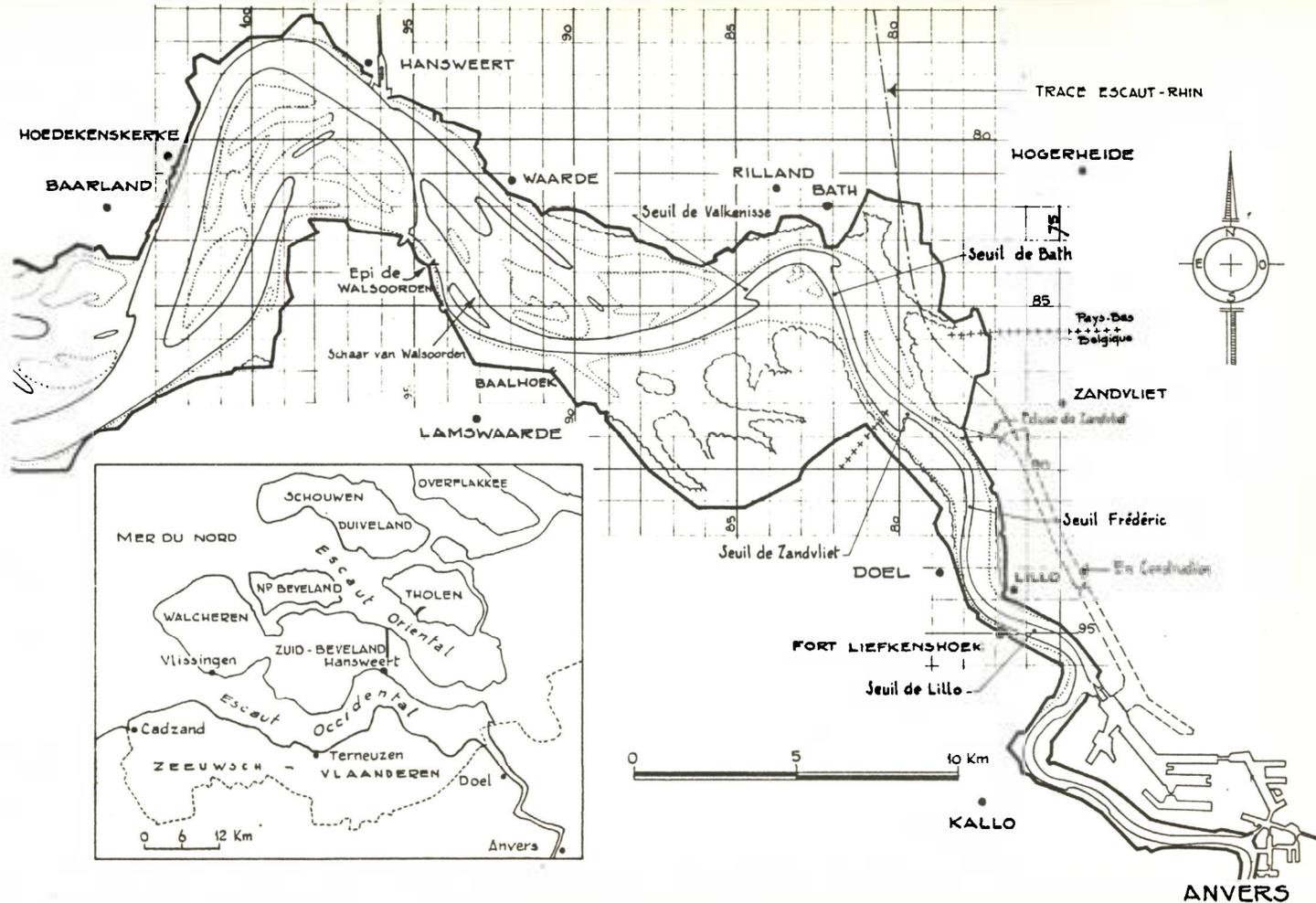


Figure 3 - Cours de l'Escaut de Flessingue à Anvers avec sa passe navigable.

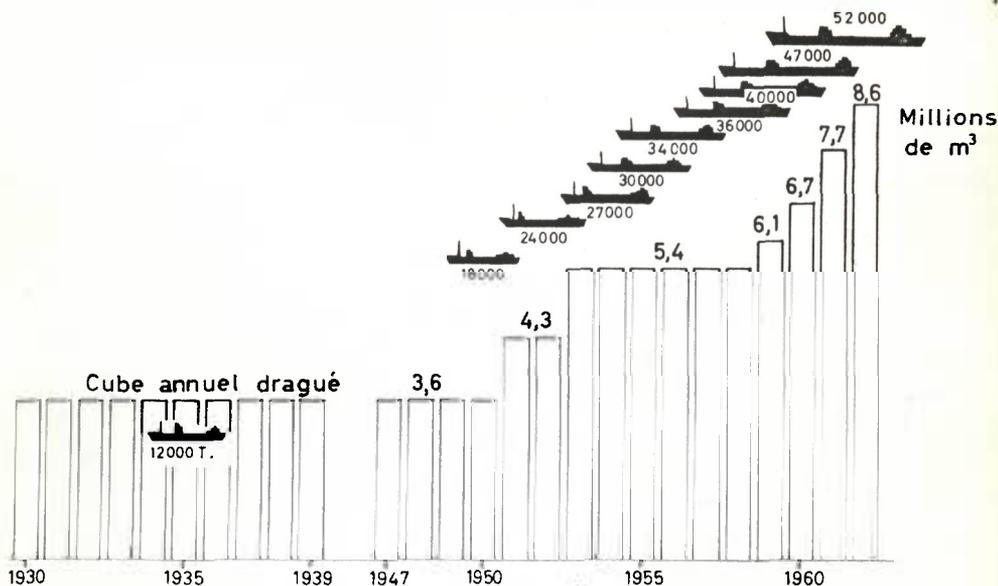
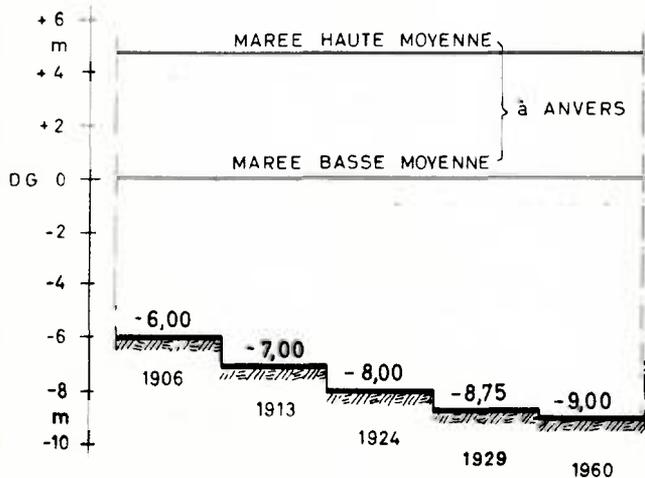


Figure 4a - Le cube a passé de 3,6 millions de m<sup>3</sup> en 1950 à 8,6 millions de m<sup>3</sup> en 1962.



En territoire néerlandais les profondeurs sont majorées de 0,50 m

Figure 4b - Evolution du programme des profondeurs à entretenir sur les seuils.

l'augmentation du tirant d'eau des navires. Celui-ci ne cessant de croître les dragages ont dû être intensifiés au cours des années et surtout depuis la dernière guerre.

Ainsi que le montre la figure 4(a) le cube dragué a passé de 3,6 millions de m<sup>3</sup> en 1950 à 8,6 millions de m<sup>3</sup> en 1962.

Les profondeurs sur les seuils sont actuellement, sur une largeur de 200 m, de 9,00 m sous marée basse en territoire belge et 9,50 m sous marée basse en territoire néerlandais, ainsi qu'il résulte de la figure 4(b) qui schématise l'évolution du programme des profondeurs à entretenir sur les seuils.

Cependant les dimensions des navires, surtout des pétroliers et des minéraliers, ayant subi une nouvelle et forte poussée, il est indispensable de continuer d'améliorer les conditions de navigabilité. Par ailleurs, s'il est possible en territoire belge d'éloigner définitivement du lit du fleuve les cubes dragués par refoulement sur les rives, il n'en est pas de même en territoire néerlandais où ils doivent être déversés dans ce lit. Il importe donc de choisir judicieusement les endroits de déversement afin d'augmenter le rendement des dragages.

Mais, il est certain qu'il ne sera pas possible d'obtenir, par des dragages uniquement, une amélioration suffisante de la navigabilité et que des travaux d'amélioration doivent être envisagés.

Pour l'étude de ces questions il a été décidé de construire au Laboratoire de Recherches Hydrauliques des Ponts et Chaussées à Borgerhout (Anvers) un grand modèle de l'Escaut.

Le premier problème, c'est-à-dire le choix des endroits de déversement, a été étudié sur ce modèle pourvu d'un fond fixe et à l'aide d'un matériau mobile qui représente le sable et qui est déposé aux endroits de déversement.

Pour l'étude du deuxième problème - les travaux d'amélioration - le fond fixe est remplacé par un fond mobile dans la région où les améliorations sont étudiées.

### III. - LE MODELE DE L'ESCAUT.

---

La partie de l'Escaut reproduite au Laboratoire s'étend depuis Hansweert jusqu'aux écluses donnant accès au port d'Anvers. Cette section comprend pratiquement tous les seuils qui doivent être dragués régulièrement. La figure 3 indique les limites du modèle.

Les échelles adoptées sont 3/1000 pour les dimensions en plan et 1/100 pour les hauteurs.

Le fond dur du modèle est en ciment et reproduit la situation 1955-1956. Aux deux extrémités la marée est réalisée par un générateur automatique. La similitude avec la nature des courbes de marée, des débits de marée, des vitesses de courant tant en grandeur qu'en direction, du partage du débit liquide et solide entre la passe principale et le faux-chenal, a été obtenue en appliquant au modèle la rugosité voulue.

### IV. - CHOC DES ENDROITS DE DEVERSEMENT DES PRODUITS DE DRAGAGE.

---

Eu égard au fait que les transports de sable sont les plus marqués aux fortes marées, tous les essais ont été exécutés à l'aide de la marée de syzygie, de grande amplitude, du 30 décembre 1955.

Le matériau mobile qui doit simuler le sable et dont le déplacement doit être suivi, se compose de grains de polystyrène d'un diamètre moyen de 2,8 mm et d'un poids spécifique de 1,05. Le polystyrène du commerce n'est cependant pas utilisable directement; aussi les grains ont-ils dû subir un traitement spécial au laboratoire.

Les endroits examinés en premier lieu sont ceux où le déversement se pratique actuellement dans la nature; puis viennent tous ceux qui peuvent venir en considération, c'est-à-dire ceux qui, tenant compte de la marée, peuvent être atteints par les engins de dragage ou de transport et où la profondeur est suffisante pour pouvoir opérer le déversement. Il en résulte que les endroits de déversement se trouvent soit dans le voisinage de la voie navigable, soit à l'entrée de faux-chenaux.

Les essais qui sont complètement terminés à l'heure actuelle ont été conduits de la manière suivante.

Le lieu de déversement dans le modèle est une surface de 60 x 30 cm, la plus grande dimension étant parallèle à la direction du courant. Pendant un certain nombre de marées successives, il y a été déposé, à l'étale de flot, une certaine quantité de polystyrène, toujours la même. Le moment de l'étale de flot fut choisi pour des raisons de commodité, de nombreux essais préliminaires ayant montré que l'instant de la marée auquel le matériau mobile est déposé n'a pas d'influence sur le résultat final de l'essai.

Le relevé des déplacements du matériau a eu lieu, dans certains cas, après la marée qui suit immédiatement le dépôt de la dernière quantité de matériau mobile, et dans d'autres il ne s'est fait qu'après le passage d'un nombre déterminé de marées subséquentes.

Le plus souvent cependant , le dépôt du matériau a eu lieu au cours de 20 marées consécutives et le relevé des déplacements après le passage de la 65e marée.

L'emploi de grains de polystyrène de différentes couleurs a permis d'examiner simultanément plusieurs endroits de déversement.

L'exécution du programme a exigé le fonctionnement du modèle pendant 1050 marées.

Dans la plupart des cas la quantité de polystyrène déposée était de 500 cm<sup>3</sup>. Cependant aux endroits où les déplacements se sont montrés peu importants, cette quantité fut réduite de moitié afin d'éviter une accumulation de matériaux mobiles qui pourrait modifier d'une manière sensible la topographie du modèle.

Les résultats des relevés des déplacements sont exprimés en pourcentage de la quantité totale déposée, ceci uniquement dans le but de faciliter la comparaison des divers essais. Afin d'éviter à ce sujet toute erreur d'interprétation il est sans doute bon de rappeler que des essais du genre de ceux que nous décrivons ont une valeur qualitative et non quantitative.

\*

\*                      \*

Nous donnerons ci-dessous les résultats des essais en ce qui concerne quelques lieux de déversement caractéristiques.

- 1) Côté gauche de la passe navigable , au lieu dénommé "Koniinenschor" où dans la nature, sont déversées de grandes quantités de sable dragués sur les seuils de Valkenisse et de Bath.

La figure 5 montre où se retrouve après le passage de 65 marées, le matériau mobile déposé au Konijnenschor, au cours des 20 premières marées.

Si l'on fait abstraction des quantités très faibles qui se sont déplacées vers l'amont et se sont déposées à hauteur du seuil de Valkenisse ou ont pénétré dans le Schaar van Valkenisse, on constate que le mouvement a eu lieu presque exclusivement vers l'aval, la majeure partie s'étant déposée dans la passe navigable tandis que la partie restante se retrouve sur le talus sud des Platen van Valkenisse dans le Schaar van Walsoorden, où ces dépôts favorisent l'évolution naturelle qui consiste en une extension de ces Platen van Valkenisse vers la passe navigable, évolution qui est nuisible pour la navigation.

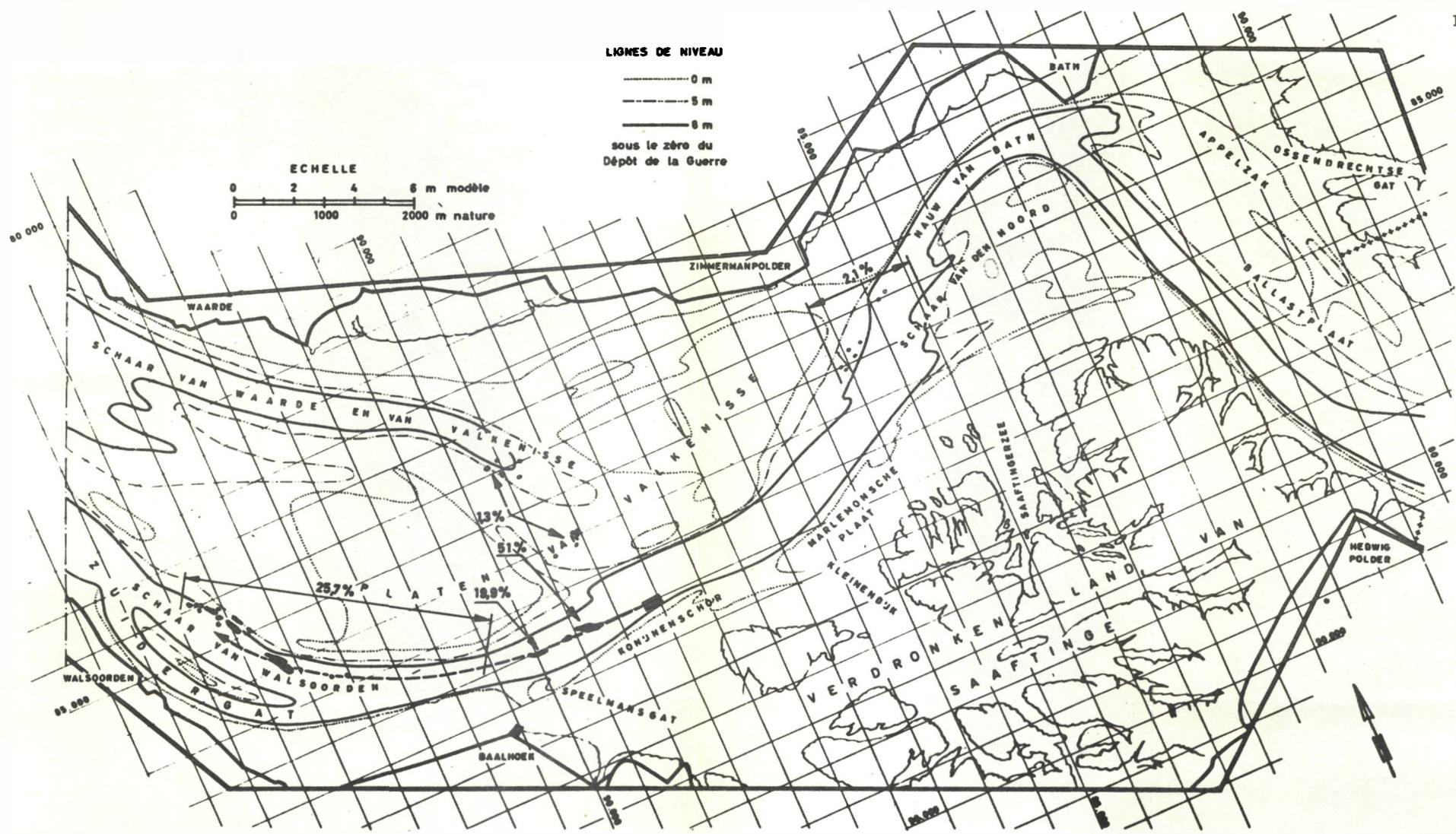
Le côté gauche de la passe navigable, au Konijnenschor, ne convient donc pas comme lieu de déversement.

On pouvait dès lors se demander si le côté droit de la passe ne conviendrait pas mieux.

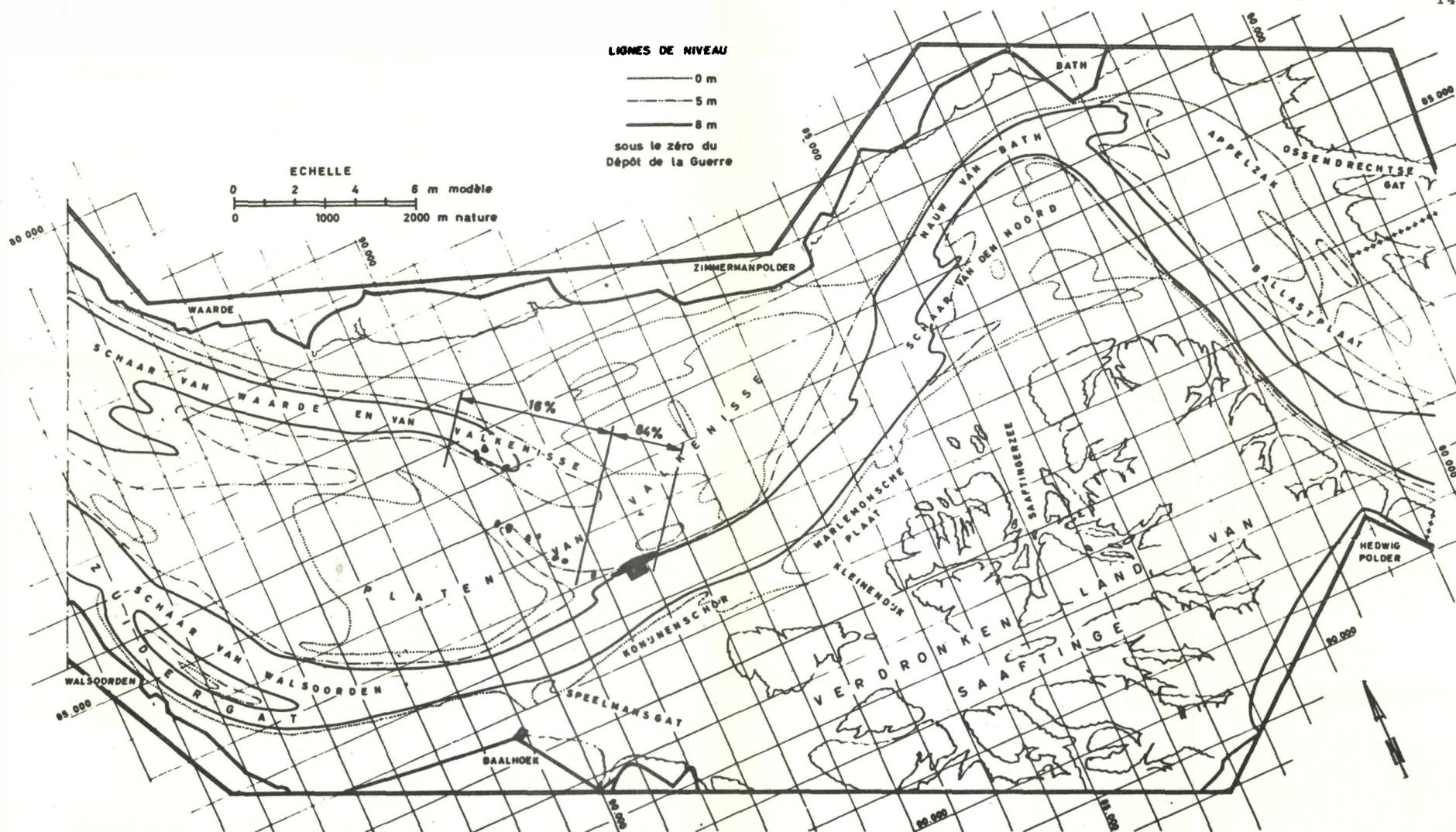
2) Côté droit de la passe navigable, le long des Platen van Valkenisse et près de l'entrée du Schaar van Valkenisse.

La figure 6 reproduit les déplacements après le passage de 65 marées, du matériau mobile déversé en cet endroit au cours des 20 premières marées.

Le mouvement a été lent et la plus grande partie du matériau déposé s'est maintenue sur place. La partie restante s'est déplacée vers l'aval, principalement dans le Schaar van Valkenisse.



**Figure 5** - Konijschor, côté gauche de la passe : Endroit de déversement de 500 cc à l'étaie de flot pendant les 20 premières marées. Situation après le passage de 65 marées.



**Figure 6** - Déplacements, après le passage de 65 marées, du matériau mobile déversé au cours des 20 premières marées le long des Platen van Valkenisse et près de l'entrée du Schaar van Valkenisse.

De ce qui précède il résulte clairement que le côté droit de la passe, le long des Platen van Valkenisse, et près de l'entrée du Schaar van Valkenisse convient mieux comme lieu de déversement, que le côté gauche de la passe.

Des essais effectués en d'autres points le long du côté droit de la passe ont par ailleurs montré qu'il convient d'effectuer les déversements le plus haut possible sur le talus des Platen van Valkenisse.

### 3) Schaar van de Noord.

Dans la nature cet endroit reçoit souvent les produits de dragage provenant du seuil de Bath et de celui de Valkenisse.

La figure 7 donne un aperçu du résultat des essais, après le passage de la 65e marée, le matériau mobile ayant été déposé à l'étale de flot dans le Schaar van de Noord au cours des 20 premières marées.

Il convient de noter que :

- a) le matériau mobile déposé à l'étale de flot ne se déplace pas pendant le jusant subséquent, au contraire au cours du flot qui y fait suite, toute la quantité déposée se met en mouvement dans le Schaar van de Noord, vers la passe navigable à l'amont de Bath et se dépose sur la rive gauche de cette passe.
- b) Le jusant suivant ramène la plus grande partie du matériau mobile dans le Schaar van de Noord. La trajectoire des grains est cependant située au Nord de la première et le matériau se dépose à nouveau à l'entrée aval du Schaar van de Noord.



- c) Les déplacements donnés ci-dessus sous a) et b) se répètent au cours des marées suivantes, le mouvement du matériau mobile étant celui indiqué à la figure 7. Après le 3e flot, des premiers dépôts se forment sur les talus Nord des Platen van Saeftingen, dans le coude de Bath.
- d) Un petit pourcentage du matériau mobile qui s'était déposé à l'étale de flot, le long du talus de rive gauche de la passe à l'amont de Bath, se déplace dans la passe sous l'effet du jusant suivant et contourne le coude de Bath.
- e) Les dépôts le long du talus Nord des Platen van Saeftingen, qui se sont formés à partir du 3e flot, s'accroissent régulièrement au cours des marées suivantes. Une partie de ces dépôts est prise par le jusant et se déplace vers l'aval pour se déposer à hauteur du seuil de Valkenisse. Depuis ce seuil une petite quantité est transportée plus en aval par le jusant, le long des Platen van Valkenisse, et se dépose, en partie dans le Schaar de Valkenisse, en partie le long du talus Nord de la passe navigable dans le Schaar de Walsoorden.

En conclusion le Schaar van de Noord ne convient pas comme endroit de déversement puisque tous les produits se retrouvent après un certain temps dans le coude de Bath et sur le seuil de Valkenisse.

Il importe cependant de signaler qu'il résulte en même temps des essais que le dragage du talus Nord des Platen van Saeftingen, à hauteur de Bath, favorise le maintien des profondeurs sur le seuil de Valkenisse.

#### 4) Schaar van Cuden Doel.

La figure 8 donne le résultat du déversement dans le

Schaar van Cuden Doel pendant 20 marées, le 1<sup>er</sup> ayant eu lieu après le passage de la 65<sup>e</sup> marée.

On constate un déplacement général vers l'amont dans le Schaar van Cuden Doel avec dépôts dans le Schaar et sur le Plaat van Cuden Doel.

Le matériau ne revient pas dans la passe navigable et l'endroit de déversement convient donc fort bien.

#### V. - L'ACCES A L'ESCAUT.

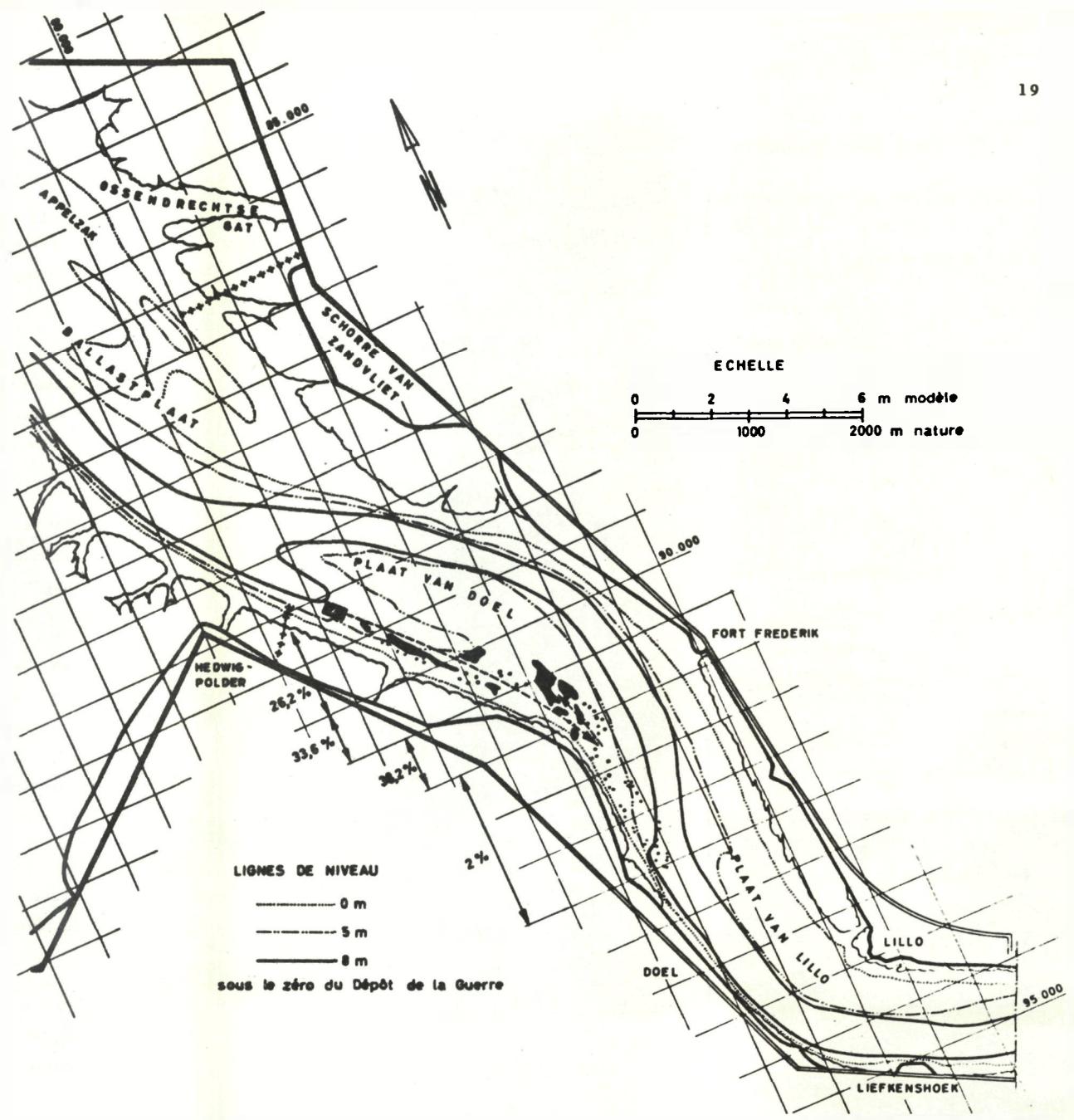
---

L'accès de haute mer vers l'Escaut se fait par deux voies distinctes: celles des Wielingen et de l'Oostgat (voir figure 1).

La navigation par la première et empruntée par les navires en provenance ou à destination des ports nordiques, est réglée par la profondeur rencontrée sur le seuil du Steendiep situé au Nord de la pointe de Westkapelle, profondeur qui n'atteint que 8 mètres à marée basse.

La seconde route, celle par l'Ouest, employée par les navires allant vers ou provenant de la Manche, passe sur deux seuils, celui de Wandelaar à environ 40 km de Flessingue et celui des Wielingen à 22 km.

La profondeur minimum sur ces deux seuils est pratiquement la même, soit 8m60; elle est donc plus grande que celle trouvée sur le seuil du Steendiep à l'entrée de l'Oostgat.



**Figure 8** - Résultat du déversement du matériau dans le Schaar van Ouden Doel pendant 20 marées, le premier déversement ayant eu lieu après le passage de la 65e marée.

Depuis quelques années, par suite de l'accroissement des dimensions et des tirants d'eau des navires, un certain nombre de pétroliers et de minéraliers, en provenance du Nord, sont obligés de continuer leur route vers l'Ouest pour arriver à Flessingue en empruntant les Wielingen au lieu de la passe de l'Costgat. Le détour est de l'ordre de 62 km.

La navigation se pratiquant, comme nous l'avons dit, à la marée montante, et la célérité de l'onde marée étant plus élevée que la vitesse du navire, c'est le premier seuil, celui du Wandelaar, qui limite les possibilités de navigation vers Anvers des unités à très fort enfoncement.

L'approfondissement par dragages des seuils du Wandelaar et des Wielingen pour assurer un mouillage plus élevé, représenterait malheureusement un travail très onéreux et de longue haleine par le fait qu'il devrait s'étendre sur environ 6 km.

Une autre passe, celle du Scheur, située au Nord de celle des Wielingen, présente comme elle deux seuils dont heureusement le premier à l'Ouest, se trouve à environ 1 m plus bas que celui du Wandelaar. Le second, près du "Bol van Knokke", se trouve à la même profondeur que le seuil des Wielingen avec cette condition favorable que sa longueur n'est que de quelques centaines de mètres.

Il en résulte qu'il est moins coûteux de draguer une passe à travers le seuil du Scheur, que d'approfondir les seuils du Wandelaar et des Wielingen.

Une campagne de dragage a été exécutée dans le Scheur. Dans un proche avenir on pourra se rendre compte de l'évolution de l'approfondissement réalisé et ainsi évaluer les dragages d'entretien nécessaires au maintien de la passe approfondie.

## VI. - CONCLUSION.

---

Si l'examen des cartes hydrographiques dressées à l'aide des résultats de sondages successifs permet de suivre l'évolution globale de la configuration des bancs et des passes, les essais sur modèle montrent le mécanisme intime du phénomène, mécanisme qui met en évidence le cheminement du sable suivant des itinéraires complexes et sinueux.

La confirmation sur le fleuve des résultats qualitatifs obtenus en modèle permettrait sans aucun doute d'augmenter le rendement des dragages par la création de trappes à sable disposées sur des itinéraires préférentiels, situés en dehors de la voie de navigation où les engins de dragage et de refoulement ne gêneraient pas le trafic.

Jusqu'à ces dernières années l'utilisation de traceurs radio-actifs sur l'Escaut s'est heurtée aux difficultés suivantes :

- les vitesses du courant élevées (de l'ordre de 2m/sec.) et l'importance des déplacements des sables au cours d'un flot ou jusant.
- l'alternance de flot et de jusant masque la trajectoire réelle des particules pour ne faire apparaître que le cheminement résultant.

La progression d'un banc se fait par l'alimentation de son talus aval et les matériaux charriés sont rapidement enfouis à grande profondeur. Il faut donc disposer d'un détecteur très sélectif qui permette de différencier le rayonnement de surface du rayonnement en profondeur.

Enfin je rappellerai que toute cette partie de l'Escaut se trouve bien sur le territoire de la Communauté mais chez nos voisins du Nord et que toute campagne d'études sera entreprise en accord avec eux.

Pour terminer, disons encore qu'un essai de matériau luminescent a été tenté en laboratoire pour suivre les trajectoires des sables charriés. Nous employons en l'occurrence des grains de polystyrène rendus fluorescents et photographiés en lumière ultraviolette.

## Rapport 2

### Formation des dunes et des rides dans les modèles fluviaux

J. CHABERT et J.-L. CHAUVIN

Centre de Recherches et d'Essais de Chatou  
Département Laboratoire National d'Hydraulique

L'étude des critères d'apparition des rides et des dunes, de leurs caractéristiques et de leur influence sur l'écoulement fait l'objet de nombreuses recherches; cet article fait le point sur l'état d'avancement des recherches effectuées sur ce sujet au Département Laboratoire National d'Hydraulique, recherches principalement orientées en vue de leur utilisation pour les modèles fluviaux.

On sait en effet depuis longtemps que, sur de tels modèles, un fond mobile trop fin produit des rides considérées généralement comme parasites du fait des perturbations qu'elles peuvent apporter à la similitude du charriage et de l'écoulement. Il en résulte donc une limite pour la granulométrie des fonds mobiles, limite par ailleurs assez mal connue, mais dont il faut tenir compte dans la détermination des échelles des modèles.

#### NOTATIONS -

$b$	largeur du canal
$C = \sqrt{RJ}$	coefficient de Chézy
$d$	diamètre du grain
$d_m = \frac{\sum d \cdot \Delta_p}{100}$	diamètre moyen du matériau
$\mathcal{F} = \frac{v}{\sqrt{gh}}$	nombre de Froude
$g$	accélération de la pesanteur
$q'_s = Q_s \frac{w_a w'}{w_s b}$	débit solide spécifique (en poids sous l'eau)
	profondeur moyenne de l'écoulement

NOTATIONS (suite)

J	penne de la ligne d'énergie
$J_0$	penne du canal
$k = \frac{V}{R^{2/3} J^{1/2}}$	coefficient de Strickler
K	rugosité du fond
$K_*$	coefficient de Von Karman
P	périmètre mouillé
Q	débit liquide
$q_s = Q_s / b$	débit solide spécifique (en volume apparent)
$Q_s$	débit solide (en volume apparent)
$R = S / P$	rayon hydraulique
S	section mouillée
$u_* = \sqrt{\tau / \rho} = \sqrt{g R_f J}$	vitesse de cisaillement
$V = Q / S$	vitesse moyenne dans une section
w	vitesse de chute du grain en eau calme
$w'$	vitesse de chute de la sphère de même d et même $w'$
$\lambda$	longueur d'onde des dunes
$\Lambda$	coefficient de perte de charge
$\mu$	hauteur des dunes
$\nu$	viscosité cinématique de l'eau
$\omega = \rho g$	poids spécifique de l'eau
$\omega_a$	poids spécifique apparent du matériau
$\omega_s = \rho_s g$	poids spécifique du matériau
$\omega' = \omega_s - \omega = \rho' g$	poids spécifique du matériau sous l'eau
$\rho, \rho_s, \rho'$	masses spécifiques correspondantes

$\tau = \omega R_f J$	tension tangentielle sur le fond ("force tractrice")
$\varphi = V/u_* = C/\sqrt{g}$	coefficient de perte de charge
$\psi = \frac{\tau}{\omega d_m}$	coefficient d'entraînement
$\omega$	angle de talus naturel du matériau (mesuré sous l'eau)

### Indices

f	relatif au fond du canal
m	moyen, ou relatif à l'ensemble du canal
p	relatif aux parois du canal.

### I - RÉSUMÉ SYNTHÉTIQUE DES ÉTUDES DÉJÀ EFFECTUÉES.

Les différents problèmes posés par les rides et les dunes ont été abordés par de nombreux auteurs étrangers, en particulier aux U.S.A.; il est impossible dans le cadre de cet article de les citer tous et on se bornera donc à un résumé synthétique de leurs études.

#### 1) Aspect qualitatif des phénomènes.

On sait qu'un lit de sable présente successivement plusieurs aspects correspondant à différents types de déformations, à mesure que croît la force tractrice. Au-delà du seuil de charriage, le fond reste d'abord plat. Il apparaît ensuite des rides ou "ripples-marks", petites ondulations serrées, puis des dunes, plus allongées; ces dernières disparaissent complètement: c'est l'état de "transition" avant les antidunes qui, à l'inverse des dunes, se propagent vers l'amont. Un état intermédiaire correspond à des "ondulations stationnaires" en relation avec les ondes de surface.

Ce schéma résulte toutefois d'expériences portant surtout sur des sables fins et effectuées avec de fortes pentes, de façon à obtenir facilement des valeurs élevées de la force tractrice, car, si l'on maintient l'écoulement fluvial, les antidunes ne peuvent apparaître; de même, si le sable utilisé est suffisamment grossier, les rides ne se produisent pas.

#### 2) Causes de la formation des ondulations.

Parmi les diverses hypothèses avancées pour expliquer la formation des rides, une des plus récentes et des plus séduisantes est celle de H.K.Liu [15] qui attribue la naissance des rides à l'instabilité de la sous-couche laminaire. On n'observe effectivement jamais de rides en écoulement laminaire ni dans un écoulement pleinement rugueux, mais seulement dans le domaine intermédiaire, où l'écoulement est turbulent dans son ensemble avec

une sous-couche laminaire plus ou moins développée. Elle ne s'applique pas cependant au cas des dunes, qui peuvent apparaître en régime rugueux quadratique où la sous-couche laminaire n'existe pas.

### 3) Conditions d'apparition

Le même auteur, s'appuyant sur l'analyse dimensionnelle et l'analogie entre le charriage et la chute libre des grains, a montré que la naissance des rides est caractérisée par une relation entre  $\frac{u_*}{w}$  et  $\frac{u_* d}{\nu}$ . La courbe traduisant cette relation a été tracée empiriquement à partir de différents essais, elle se trouve légèrement au-dessus de celle de Shields caractérisant le début de charriage.

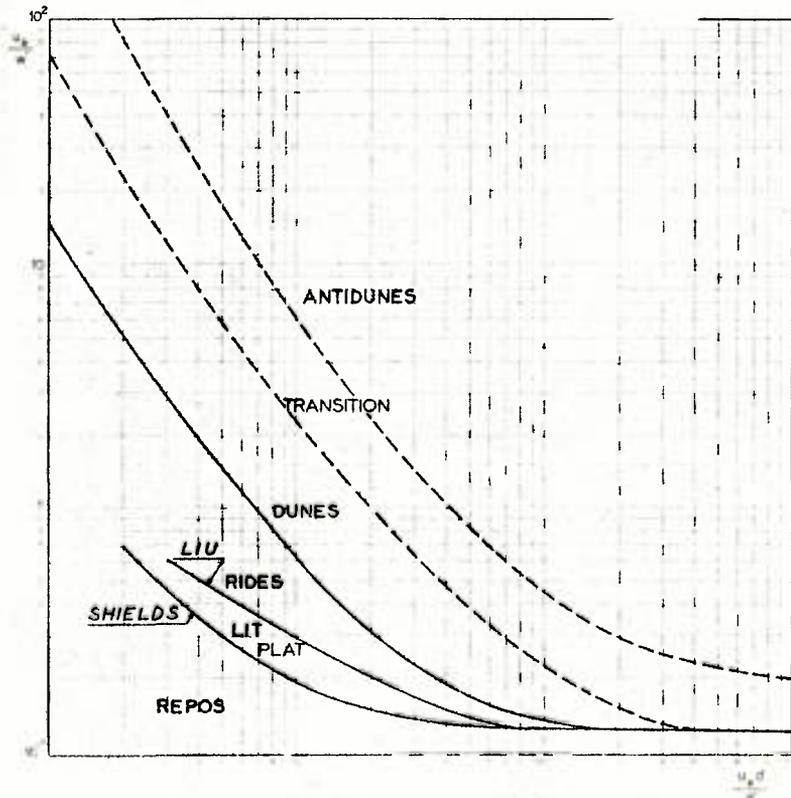


Figure 1 - Critère des régimes d'écoulement (d'après Albertson, Simons et Richardson).

Dans la discussion du même article, M. Albertson, D. Simons et E. Richardson complètent ce graphique en délimitant les domaines des rides, dunes, transition et antidunes (figure 1). J. Bogardi [17] présente des graphiques analogues avec d'autres coordonnées.

Pour mieux tenir compte de l'influence du nombre de Froude sur l'apparition des phénomènes de transition et des antidunes, R.J. Garde [29] propose un graphique complémentaire dans les coordonnées  $(\frac{\tau}{w'd}, Fr)$

Le graphique d'Albertson, Simons et Richardson a l'inconvénient de représenter beaucoup trop schématiquement le comportement des matériaux grossiers, par exemple les sables de quelques millimètres ( $\frac{u_*d}{\nu}$  de l'ordre de 50 à 100) qui ne produisent pas de rides, mais où il existe au contraire une zone de charriage sans ondulations. Ce dernier régime est d'une grande importance pratique, car il est particulièrement fréquent.

#### 4) Rugosité du lit.

La perte de charge moyenne dans un canal peut être caractérisée par le nombre  $\varphi = \frac{V}{u_*}$ , expression adimensionnelle du coefficient de Chézy, puis que  $\varphi = \frac{C}{\sqrt{g}}$ . Dans un écoulement turbulent rugueux sur un fond fixe de rugosité  $K$ , si la répartition des vitesses est logarithmique, il vient :

$$\varphi = \frac{2,3}{K_*} \log \frac{12,2 \cdot Rf}{K}$$

Pour l'eau claire  $K_* = 0,40$ , soit  $\frac{2,3}{K_*} = 5,75$

Plusieurs auteurs, tels que V. Vanoni, N. Brooks, G. Nomnicos et R.J. Garde [26 à 29] ont constaté que, dans les cours d'eau alluvionnaires, la répartition des vitesses reste logarithmique, mais que le charriage produit deux effets opposés :

- la présence de matériaux en suspension diminue le coefficient  $K_*$ ,
- les ondulations augmentent la rugosité  $K$  du fond.

Différentes relations empiriques ont été présentées pour le calcul de la perte de charge. Celle de H.A. Einstein et N. Barbarossa [25] se traduit sous forme d'un graphique indiquant que la rugosité varie en sens inverse de  $\tau$ . Elle est valable surtout au voisinage du domaine de transition, mais la dispersion expérimentale est considérable. La courbe de K. Shinohara et T. Tsubaki [23], basée sur un principe analogue, fait ressortir au contraire un maximum de rugosité au passage des dunes à la "transition".

On peut noter aussi la formule de H.K. Liu et S.Y. Hwang [30] :  $V = C_d R^X J^Y$ , où  $C_d, X$  et  $Y$  sont données en fonction de  $d$  pour les différents types

d'ondulation.

Mais en définitive ces diverses méthodes sont peu précises, et il n'existe encore aucun moyen de déterminer  $\varphi$  à mieux de 30 % près.

#### 5) Autres problèmes.

Les dimensions des rides et des dunes, leur vitesse de propagation, ont été étudiées entre autres par K. Shinohara et T. Tsubaki [23], et par R.J. Garde et Albertson [24]. Ces derniers tentent de grouper dans le plan  $\frac{\tau}{\omega d}$ ,  $\frac{\mu}{\lambda}$ , malgré leur dispersion importante, les points expérimentaux du domaine "rides" suivant des courbes d'égal nombre de Reynolds  $\frac{u_* d}{\nu}$ , et ceux du domaine "dunes" suivant des courbes d'égal nombre de Froude  $\varphi = \frac{V}{\sqrt{gh}}$

Pour le débit solide, la plupart des auteurs, tels que H.A. Einstein, E. Meyer-Peter, tiennent compte de l'influence des ondulations en affectant la force tractive  $\tau$  d'un coefficient réducteur, du fait qu'une fraction de l'énergie du fluide se dissipe sur les dunes sans entraîner le fond mobile. R.J. Garde et M. Albertson [36] font intervenir graphiquement le nombre  $\varphi$  comme variable supplémentaire.

En résumé, malgré la multitude des études portant sur les dunes et les rides, les résultats ne sont encore que très incomplets ou très dispersés, parfois même en désaccord entre eux. C'est principalement sur l'étude des critères d'apparition des rides et dunes, points particulièrement importants pour les études sur modèle, qu'ont été axés les essais effectués au L.N.H.

## II - ESSAIS EN CANAL.

Les matériaux utilisés (diamètre, densité) et les conditions hydrauliques (pente, tirant d'eau) correspondent au domaine des modèles les plus courants. Les essais n'ont donc pas été poussés jusqu'à des nombres de Froude élevés (transition, antidunes), ni effectués avec des matériaux très fins qui sont transportés principalement par suspension.

#### 1) Conditions expérimentales.

L'installation expérimentale principale est un canal inclinable à parois vitrées (longueur 21 m, largeur 80 cm, profondeur 70 cm) où le fond mobile est de 15 cm d'épaisseur.

Pour chaque essai, poussé jusqu'à la stabilisation du régime, on mesure :

- la température de l'eau,
- la ligne d'eau,

- le débit solide de charriage,
- trois profils en long des fonds sur toute la longueur du canal (un dans l'axe du canal, et deux à 0,20 m de part et d'autre).

On en déduit :

- les hauteurs et les longueurs des ondulations,
- le profil en long moyen du fond caractérisé par une droite déterminée par la méthode des moindres carrés,
- la profondeur moyenne  $h$
- la vitesse moyenne,
- la pente  $J$  de la ligne d'énergie.

Le rayon hydraulique  $R_f$  relatif au fond, qui intervient au lieu de  $h$  dans l'expression de la force tractrice  $\tau = \omega R_f J$ , se calcule en admettant que les rugosités se composent suivant la formule d'Einstein :

$$\frac{b}{h_f^{3/2}} + \frac{2h}{k_p^{3/2}} = \frac{b+2h}{k_m^{3/2}}$$

en adoptant pour les parois vitrées un coefficient de Strickler  $k_p = 110$ .

## 2) Matériaux.

Les matériaux étudiés en canal ont les caractéristiques suivantes :

N°	Matériau	$d_m$ (mm)	$\sigma^*$ (mm)	$\sigma/d_m$	$\bar{w}_s$	$\bar{w}_a$	$w$ (cm/s)	$w'$ (cm/s)	tg $\omega$
1	Noyau d'abricot	2,72	0,49	0,180	1,32	0,6	8,1	14,2	0,76
2	Noyau d'abricot	1,31	0,32	0,245	1,31	0,9	5,75	7,3	0,69
3	Sable de Loire	0,96	0,082	0,085	2,62	1,4	11,5	14,3	0,64
4	Galet concassé	0,397	0,15	0,378	2,60	1,3	3,85	5,8	0,72
5	Styvarène traité	3,0	0,13	0,043	1,075	0,54	5,6	6	0,72
6	Sable de Loire	0,45	0,049	0,109	2,60	1,45	5,2	6,6	0,62
7	Sable de Loire (mélange n°3 et 6)	0,72	0,27	0,375	2,60	1,66	9	11	0,62
8	Sable de Loire	2,48	0,47	0,190	2,60	1,43	21	32,5	0,72
9	Ponce	0,17	0,059	0,350	2,2	0,74	0,83	1,6	0,66
10	Bakélite	1,277	0,31	0,410	1,326	0,70	5,2	7,1	0,79
11	Galet concassé	0,52	0,16	0,315	2,60	1,3	5,3	7,9	0,71

$\sigma$  : écart-type de la granulométrie.

Les essais du galet concassé n° 11 ont été effectués dans un canal fixe (45m x 1,50 m x 1 m) avec des parois en ciment lissé  $k_p = 90$ . Les résultats sont moins précis en raison de la pente faible et de la forte correction de parois due à la grande profondeur de l'écoulement.

Quelques autres résultats d'essais n'ont pas pu être entièrement exploités, par exemple ceux de la ponce n° 9, trop fine et entraînée surtout par suspension.

### III - CRITERES D'APPARITION DES RIDES ET DES DUNES.

#### 1) Comportement des matériaux.

Les matériaux essayés peuvent être classés en deux catégories selon leur comportement au cours d'une succession d'essais à force tractrice croissante.

Avec les plus gros (n° 1, 2, 3, 5, 8 et 10) le charriage a lieu d'abord sans ondulations. La forme plate du fond est alors la seule possible ; un bourrelet provoqué artificiellement finit toujours par s'effacer. Ensuite, apparaissent individuellement des bancs longs et plats qui, en évoluant, prennent la forme de dunes plus hautes et plus rapprochées, souvent recouvertes par des dunes plus petites.

Les matériaux fins (n° 4, 6, 9 et 11) forment des rides dès qu'un charriage net s'établit : des séries de petites stries rapprochées (10 à 15 cm) apparaissent çà et là et se propagent progressivement vers l'aval jusqu'à recouvrir tout le fond, tandis que leur espacement augmente légèrement jusqu'à 15 à 25 cm et leur hauteur jusqu'à 15 à 20 mm en moyenne. Parfois, aux très faibles charriages, le nombre de grains en mouvement est trop petit pour amorcer la première ride avant la fin de l'essai ; mais une ride artificielle se maintient et déclenche la série de rides. Aux fortes valeurs de  $\tau$ , les rides se transforment progressivement en dunes.

Le sable n° 7, dont la granulométrie est étendue, ne forme pas de rides dès le début de charriage, mais seulement dans les zones de fins, lorsque le charriage est devenu assez intense pour provoquer une ségrégation granulométrique. Ensuite se produisent les dunes comme pour les gros matériaux.

#### 2) Diamètre critique.

Pour définir une limite entre les deux catégories de matériaux, il est nécessaire d'aborder le problème par l'analyse dimensionnelle.

C'est par cette méthode que A. Shields a montré que le début de charriage pouvait se définir par une relation du type :

$$\frac{\rho u_*^2}{\omega d} = f_1 \left( \frac{u_* d}{\nu} \right) \quad (1)$$

Le début de formation des ondulations, qui dépend des mêmes variables, est donc défini de même par :

$$\frac{\rho u_*^2}{w'd} = f_2\left(\frac{u_* d}{\nu}\right) \quad (2)$$

Un raisonnement analogue montre que la chute libre d'un grain suit une loi du type :

$$\frac{\rho u_*^2}{w'd} = f_3\left(\frac{u_* d}{\nu}\right) \quad (3)$$

La comparaison de (2) et de (3) fournit une autre expression de la relation (2) :

$$\frac{u_*}{w} = f_4\left(\frac{u_* d}{\nu}\right) \quad (4)$$

qui est celle utilisée par H.K. Liu.

La séparation des deux catégories de matériaux, indépendante de  $u_*$ , correspond d'après (2) à une valeur fixe de  $\frac{w d^3}{\rho \nu^2}$  \*, ou d'après (4), de  $\frac{w d}{\nu}$ . Le diamètre limite est donc fonction à la fois de la densité du matériau sous l'eau et de la viscosité de l'eau.

En première approximation, on peut négliger l'influence de ce dernier paramètre, car la température de l'eau varie peu. Pour comparer les diamètres de matériaux de densité différentes, on conviendra de les ramener à des diamètres  $d_e$  de sable équivalent par la formule :

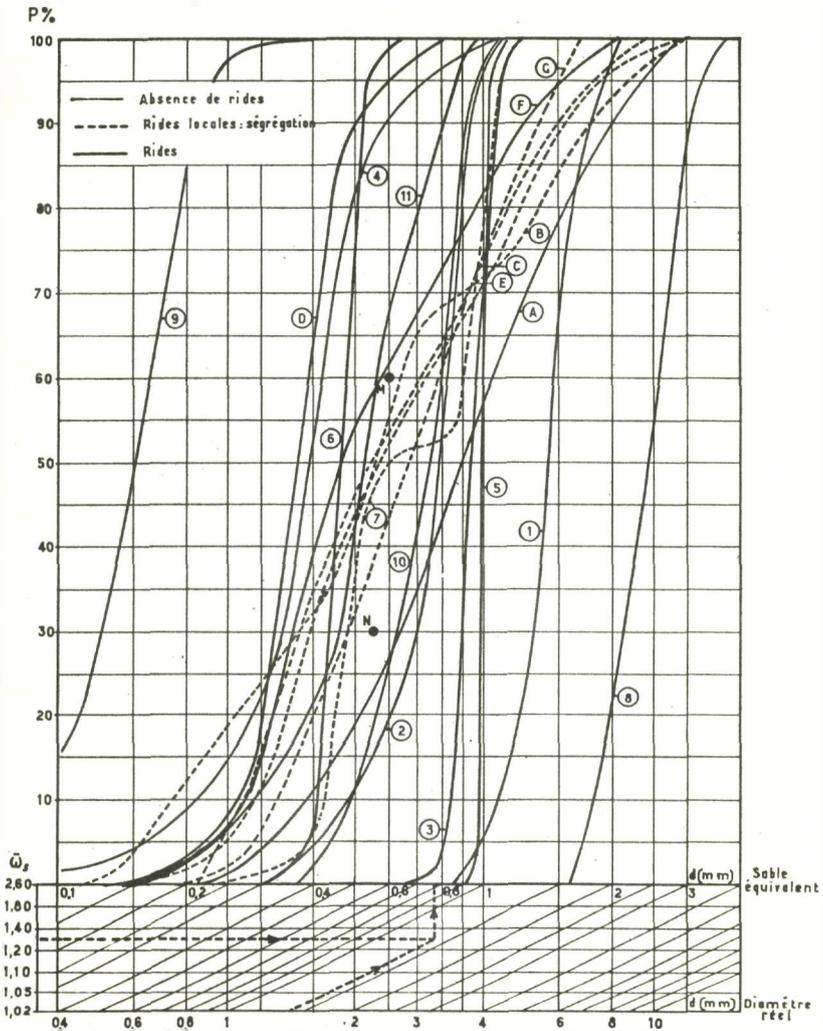
$$d_e = d \left(\frac{w}{1,6}\right)^{1/3}$$

Sur la figure 2 sont rassemblées, après transposition en diamètres de sable équivalent, les granulométries de différents matériaux classés en trois catégories :

- matériaux ne formant jamais de rides,
- matériaux formant des rides par ségrégation granulométrique,
- matériaux formant des rides dans leur ensemble.

La correction de densité est effectuée à l'aide de l'abaque au bas de la figure. Aux matériaux essayés en canal ont été ajoutés ceux utilisés au Laboratoire sur différents modèles particuliers (tronçon du Rhône, du Rhin, de la Loire, etc...) et qui ont en général une granulométrie relativement étendue. Les matériaux A, B et C correspondent à du sable, le maté-

\* - Sur l'utilisation de ce paramètre sans dimension, cf J. Valembois. Etude sur modèle du transport littoral. Conditions de similitude.- Proc. 7 th Conference on coastal Engineering, La Haye, août 1960.



**Figure 2 - Influence de la granulométrie sur la formation des rides.**

riau D à de la ponce, et les matériaux E, F, G, à du sable mélangé respectivement avec 37 %, 50 % et 20 % de la ponce D.

En remarquant que le diamètre moyen  $d_m$  de la granulométrie est généralement voisin du  $d_{60}$  (diamètre supérieur aux 60 % plus fins) il est intéressant de comparer le  $d_{60}$  des différentes courbes ainsi que leur  $d_{30}$ . Cette dernière valeur représente le diamètre moyen de la moitié fine de la granulométrie, qui correspond aux éléments qui peuvent se rassembler localement par ségrégation et risquer de former des rides.

On constate alors que les points M et N séparant les trois familles de courbes :

- $d_m < 0,6$  mm environ (courbes à gauche de M) : matériaux formant des rides,
- $d_m > 0,6$  mm et  $d_{30} < 0,55$  mm (courbes entre M et N) : rides locales,
- $d_{30} > 0,55$  mm (courbes à droite de N) : jamais de rides.

Pour les matériaux autres que le sable, ces diamètres doivent être multipliés par  $\sqrt[3]{\frac{1,6}{w}}$ .

Ces indications permettent de choisir la granulométrie d'un matériau pour éviter les rides. Elles doivent cependant être interprétées avec une certaine souplesse, car l'importance de la ségrégation granulométrique dépend de différents facteurs, la courbure du lit par exemple.

### 3) Domaines d'apparition des rides et des dunes.

En reportant les résultats des essais dans les coordonnées  $\left(\frac{u_* d}{v}, \frac{\tau}{w'd}\right)$  (figure 3), et  $\left(\frac{u_* d}{v}, \frac{u_*}{w'}\right)$  (figure 4), les points relatifs aux différents phénomènes se groupent assez bien pour permettre de délimiter différentes zones :

- absence de charriage (repos),
- charriage sans ondulations (lit plat),
- rides,
- dunes.

La courbe de début de charriage est légèrement inférieure à celle de A. Shields. Il est vrai que l'appréciation du commencement d'entraînement est assez subjective.

Le début de formation des dunes pour les gros matériaux se produit pour  $\frac{\tau}{w'd}$  voisin de 0,055, mais jusqu'à 0,07 les dunes sont des bancs plats au nombre de quelques unités sur toute la longueur du canal. Au contraire,



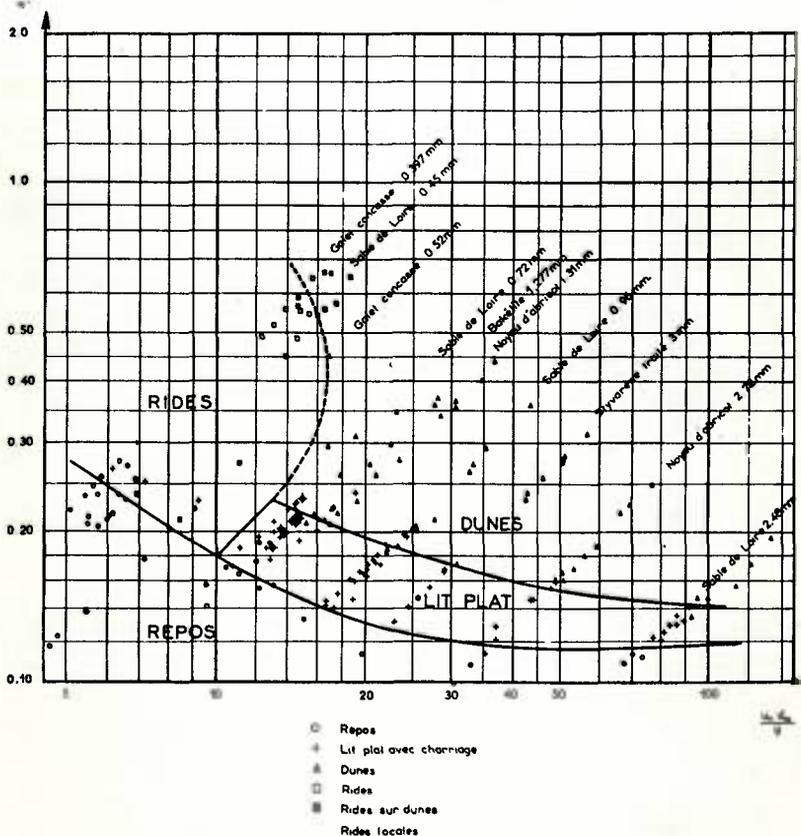


Figure 4 - Domaines d'apparition des dunes et des rides.

En admettant que la séparation entre les domaines "rides" et "lit plat" soit indépendante de  $u_*$ , celle-ci serait une droite de pente 2 sur la figure 3 et inclinée de  $45^\circ$  sur la figure 4, droite dont la position exacte devra être précisée à l'aide d'essais plus serrés. Cette limite correspond sensiblement à une valeur  $\frac{w d^3}{\rho v^2} = 3500$  et  $\frac{w d}{v} = 45$ .

Pour chaque matériau, les points expérimentaux se dispersent légèrement autour d'une droite de pente 2 (figure 3) et inclinée de  $45^\circ$  (figure 4),

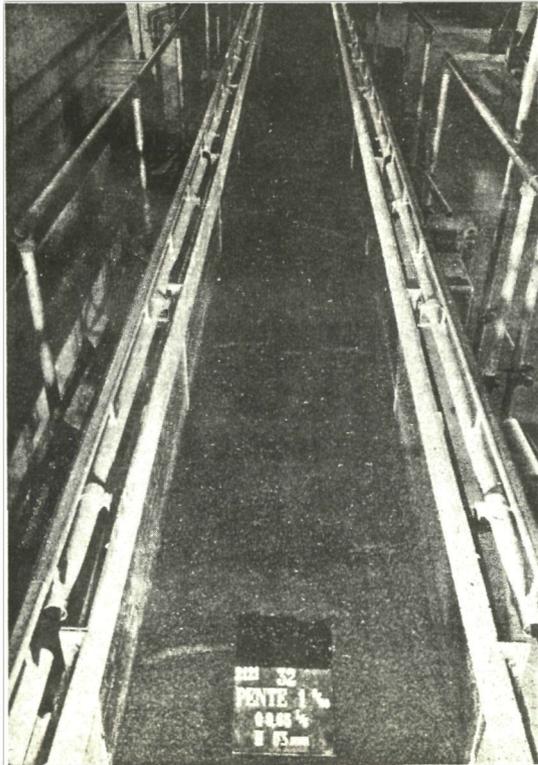


Photo 1 - Formation des dunes.

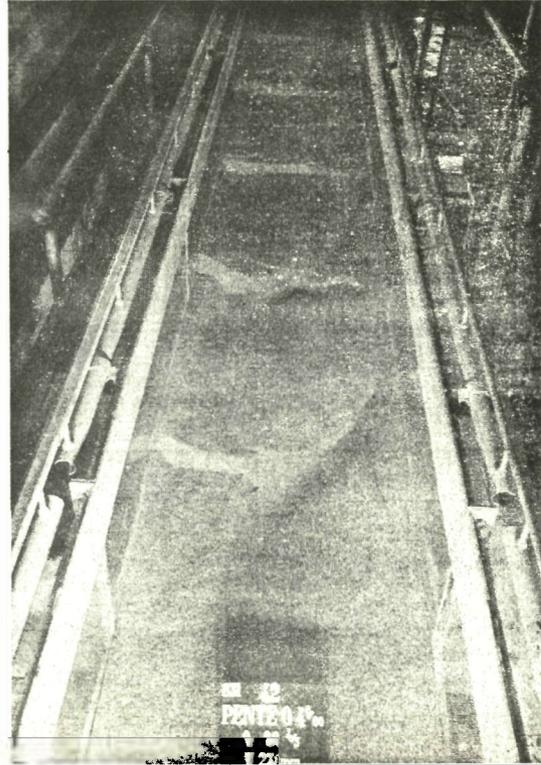


Photo 2 - Dunes.

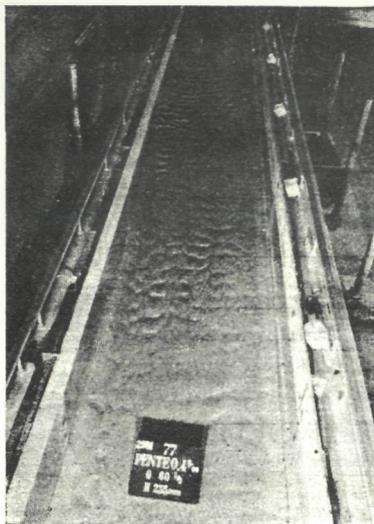


Photo 3 - Formation de rides.

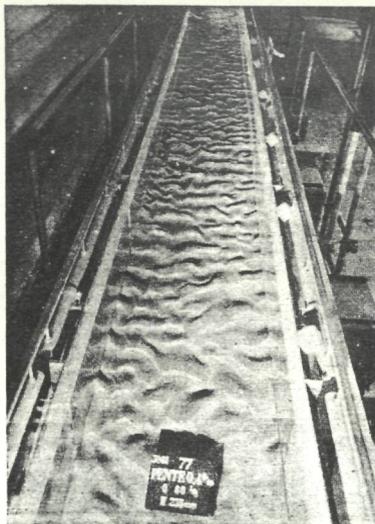


Photo 4 - Rides développées.

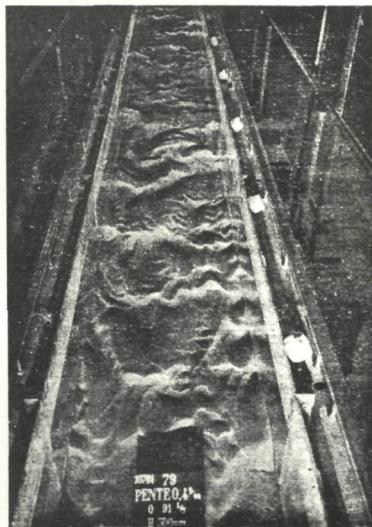


Photo 5 - Rides et dunes superposées.

les écarts étant dus uniquement aux variations de température\*. Cette droite correspond à une valeur constante du paramètre  $\frac{\omega' d^3}{\rho v^2}$  ou du paramètre  $\frac{w d}{v}$ .

#### IV - RUGOSITÉ DU FOND.

La pente J de la ligne d'énergie mesurée dans le canal, permet de calculer le coefficient  $\Lambda$  de perte de charge de Darcy-Weisbach.

$$\Lambda = \frac{8g R_f J}{v^2} = \frac{8 u_*^2}{v^2}$$

On peut en déduire la rugosité d'après la formule logarithmique :

$$\frac{v}{u_*} = \sqrt{\frac{8}{\Lambda}} = 5,75 \lg \frac{12 R_f}{K} \quad (5)$$

(Les matériaux étudiés étant assez gros, l'influence de la sous-couche laminaire est négligeable par rapport aux écarts expérimentaux, excepté pour la ponce n° 9).

Les valeurs  $K'$  de K pour un lit sans ondulations (avec ou sans charriage), qui devraient être théoriquement identiques pour un matériau donné, présentent en fait une dispersion notable. Leurs valeurs moyennes sont les suivantes.

N°	Matériau	$d_m$ mm	$d_{90}$ mm	$K'$ mm
1	Noyau d'abricot	2,72	3,4	8,34
2	Noyau d'abricot	1,31	1,68	2,28
3	Sable de Loire	0,96	1,08	1,9
4	Galet concassé	0,397	0,60	1,04
5	Styvarène traité	3,0	3,15	2,49
6	Sable de Loire	0,45	0,51	0,94
7	Sable de Loire	0,72	1,02	1,24
8	Sable de Loire	2,48	3,10	8,57
10	Bakélite	1,277	1,77	2,56

Dans le cas de rides ou de dunes,  $\Lambda$  est supérieur à la valeur  $\Lambda'$  qu'il aurait si le lit était plat, définie en fonction de  $K'$  par la formule (5).

\* - En effet pour un même matériau et une même valeur de  $v$ ,  $u_*$  est la seule variable.  $\frac{u_* d}{v}$  est proportionnel à  $\frac{u_*}{w'}$ , et  $\frac{r}{w' d_m}$  est proportionnel à  $\left(\frac{u_*}{w'}\right)^2$ .

La différence  $\Lambda'' = \Lambda - \Lambda'$  est l'accroissement du coefficient de perte de charge, résultant de la présence des ondulations.

Sur la figure 5 où sont portées les valeurs de  $\Lambda''$  en fonction de  $\frac{\tau}{\omega'd}$  les points expérimentaux correspondant aux dunes se groupent au voisinage d'une droite coupant l'axe des abscisses pour  $\frac{\tau}{\omega'd} = 0,055$  environ, valeur qui correspond en moyenne au début de formation des dunes.

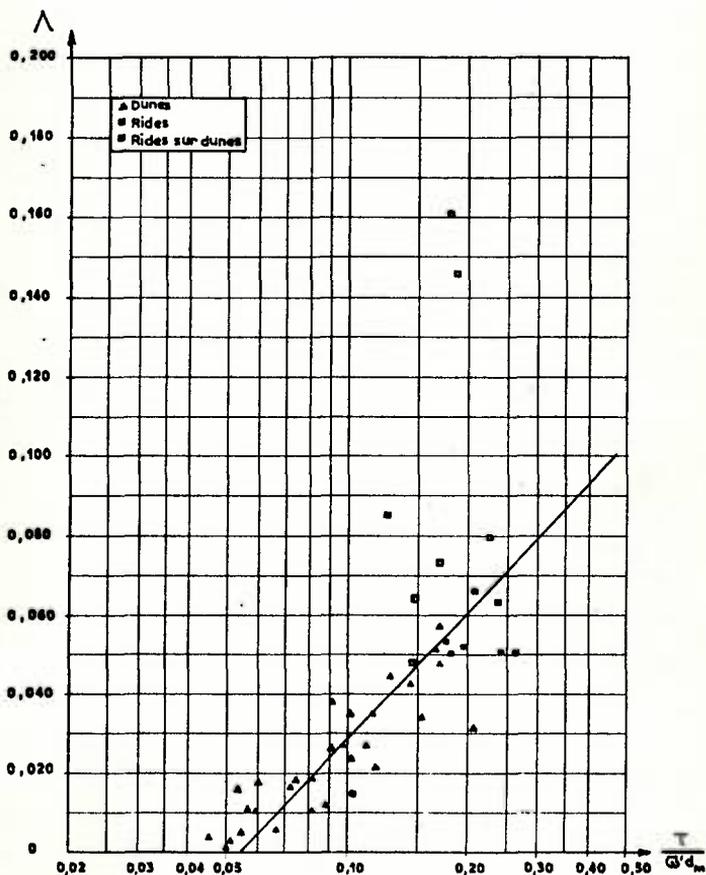


Figure 5 - Perte de charge due aux rides ou aux dunes.

La dispersion, assez considérable, semble toutefois être indépendante des paramètres hydrauliques essentiels : nombre de Froude;  $\frac{u_* d}{\nu}$  etc.

Les points correspondant aux dunes produites après le "domaine rides" par les matériaux "fins" pour les valeurs élevées de  $\frac{\tau}{\omega d}$  ne se distinguent pas de ceux correspondant aux dunes formées par les matériaux plus grossiers. Au contraire les rides donnent en général des valeurs de  $\Lambda$  bien plus élevées.

#### V - CONCLUSION.

Les essais ont mis en évidence l'existence d'une diamètre limite (pour une densité donnée) à partir duquel les matériaux d'un lit mobile ne peuvent former de rides et qui, sous une forme sans dimension  $\left(\frac{\omega}{\rho v^2}\right)^{1/3} d$  est de l'ordre de 15; des expériences complémentaires seront d'ailleurs nécessaires pour serrer de plus près cette valeur qui pour un sable calibré correspond à un diamètre de l'ordre de 0,6 mm. Ces essais ont permis de mieux définir en coordonnées adimensionnelles les domaines relatifs aux rides et aux dunes, ce qui est lié à la différence fondamentale de genèse entre ces deux types de déformations, différence qui apparaît nettement à tout expérimentateur ayant abordé ce problème. Les dunes se forment en effet progressivement; au début de leur apparition, elles se présentent comme des bancs longs et plans, chacune d'elles gardant son individualité. L'apparition des rides se déclenche au contraire brusquement, comme la rupture d'un équilibre métastable et crée immédiatement un accroissement de rugosité considérable; elles se présentent en effet toujours par séries, car dès que l'une d'elles est amorcée (naturellement ou artificiellement), il s'en forme une autre immédiatement à l'aval et une succession de rides recouvre tout le fond mobile. Par contre, dans le domaine "lit plat" situé entre le domaine "repos" et le domaine "dunes", une irrégularité artificielle du fond s'aplanit d'elle-même, la singularité ne s'amplifiant que pour des valeurs élevées de la force tractrice correspondant au début de formation des dunes, c'est-à-dire nettement au-dessus des conditions de début d'entraînement.

Les règles approximatives qui ont pu être déduites pour les granulométries étendues, utilisées sur les modèles fluviaux, permettent de prévoir le comportement des matériaux et d'éviter ainsi les rides parasites.

Par contre, plusieurs objectifs de cette étude n'ont pas encore été atteints :

- l'étude du débit solide en présence d'ondulations n'a donné que des résultats très dispersés ;
- la vitesse de propagation des dunes et des rides est très irrégulière, variant même au cours du même essai ;
- les dimensions des dunes et des rides qui, dans le même fond mobile, présentent une grande dispersion devront être analysées statistiquement

à partir des relevés complets qui ont été effectués. Les valeurs expérimentales de  $\frac{\mu}{\lambda}$  moyennes portées en fonction de  $\frac{\tau}{\omega d}$  sur les diagrammes de R.J. Garde et M. Albertson pour les rides et les dunes, montrent la même influence respective de  $\frac{u_* d}{\nu}$  et  $\mathcal{F}$ , mais ne correspondent pas aux mêmes courbes d'égale valeur de ces paramètres ;

la courbe obtenue pour caractériser l'influence des dunes sur la perte de charge n'est pas très précise. Pour les rides, aucune loi de variation n'a pu être obtenue.

Des essais sont en cours pour tenter de préciser ces différents points, ils sont principalement axés sur l'utilisation des matériaux de faible densité.

- BIBLIOGRAPHIE -

I - THÉORIES DE LA FORMATION DES RIDES ET DUNES.

- [1] - DE CANDOLLE - Rides formées à la surface du sable déposé au fond de l'eau et autres phénomènes - Arch. Sciences Physiques et Naturelles, Genève, 1883.
- [2] - G. H. DARWIN - On the formation of ripple-marks (De la formation des rides) Proc. Royal Society, Londres, 1884.
- [3] - F. M. EXNER - Über die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen (Sur l'action réciproque de l'eau et du sable dans les cours d'eau) - Comptes rendus Acad. Sciences, Vienne, 1925.
- [4] - M. A. VELIKANOV - Formation of sand ripples on the stream bottom (Formation de rides de sable sur le fond des cours d'eau) - Commission de Potamologie, Sec. 3, Rapport 13, A.I.H.S., 1936.
- [5] - G. POLYA - Zur Kinematik der Geschiebebewegung (Cinématique du charriage), Zurich, 1937.
- [6] - L. J. TISON - Etude des conditions dans lesquelles les particules sont transportées dans les courants à lit mobile - Assemblée générale de l'U.G.G.I., Oslo, 1948.
- [7] - L. J. TISON - Origine des ondes de sable et des bancs de sable sous l'action des courants - 3ème réunion de l'A.I.R.H., Grenoble, 1949.
- [8] - M. A. VELIKANOV - Dynamique des cours d'eau, Leningrad, 1949.
- [9] - F. FRANKL - Mouvement des ondes de sable - Izvestia Akad. Nauk S.S.S.R., 1953 (Trad. S.E.H. n° 288).

- voir aussi - n° 15,20.

## II - CRITÈRES DE FORMATION DES RIDES ET DUNES

- [10]- G.K. GILBERT - The transport of debris by running water (Le transport de matériaux par les cours d'eau) - U.S.G.S., Professional Paper 86, 1914.
- [11]- W. LANGBEIN - Hydraulic criteria for sand waves (Critères hydrauliques de formation des ondes de sable) - Trans. A.G.U., 1942, part II.
- [12]- A. KALINSKE et C. HSIA - Study of transportation of fine sediment by flowing water (Etude du transport de fines particules par les cours d'eau) - University of Iowa, Studies in Engineering, bull. n° 29, 1945.
- [13]- C.C. INGLIS - Bed ripples and bed dunes (Rides et dunes de sable) - The behaviour and control of rivers and canals, p.459-469 - Res. Publication n° 13 - Central Water Power Irrigation and Navigation Research Station, Poona, Indes, 1949.
- [14]- E. PLATE - Studies of sediment ripple formation (Etudes de la formation des rides). Dissertation Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1957.
- [15]- H.K. LIU - Mechanics of sediment-ripples formation (Mécanique de formation des rides d'alluvions). Proc. A.S.C.E., vol. 83, n° HY2, avril 1957. Discussion par : V. Vanoni et N. Brooks ; E. Tinney ; M. Albertson, D. Simons et E. Richardson, J. Bogardi ; H.K. Liu. (Trad. S.E.H. n° 743).
- [16]- J. BOGARDI - Hydraulic similarity of river models with movable bed (Similitude hydraulique des modèles fluviaux à fond mobile) - Acta Technica Acad. Scient. Hung., tome XXIV, fasc. 3,4, Budapest, 1959.
- [17]- J. BOGARDI - Channel stability and sediment movement (Stabilité des canaux et mouvement des sédiments) - Congrès de Padoue, mai 1959, L'Energia Elettrica, n° 6, 1959.
- [18]- J. BOGARDI - Neuere Parameter und Invarianten bei der Bestimmung der Geschiebeförderfähigkeit (Paramètres et invariants nouveaux pour la détermination de la capacité de charriage) - Die Wasserwirtschaft, déc. 1959. (Trad. S.E.H. n° 680).
- [19]- J. BOGARDI - Neue Erkenntnisse auf dem Gebiete der Geschiebeforschung (Nouvelles acquisitions dans le domaine du charriage) - Oest. Wasserwirtschaft, déc. 1959.

## III - CARACTÉRISTIQUES DES RIDES ET DUNES.

- [20]- A. ANDERSON - The characteristics of sediment waves formed by flow in open channels (Caractéristiques des ondes de sable dans les canaux à surface libre) - Proc. 3d. Midwestern Conference in Fluid Mechanics, 1953.
- [21]- T. TSURAKI, T. KAWASUMI, T. YATSUMI - On the influence of sand ripples upon the sediment transport in open channels (Influence des dunes sur le transport solide en canal découvert) - Report of Research Institut for Applied Mechanics, Kyushu University, vol II, n° 8, 1953.
- [22]- N. MIKHAILOVA - Débit solide et caractéristiques évolutives des ondes de sable - Morphologie du lit des cours d'eau, p. 133 - Akad. Nauk. S.S.S.R., 1958.
- [23]- K. SHINOHARA, T. TSURAKI - On the characteristics of sand waves formed upon the beds of the open channels and rivers (Caractéristiques des ondes de sable en canaux découverts et en rivières) - Report of Research Init. for Appl. Mech., Kyushu University, vol.VII, n° 25, 1959.
- [24]- R.J. GARDE et M.L. ALBERTSON - Characteristics of bed forms and regimes of flow in alluvial channels (Caractéristiques des formes du lit et des régimes d'écoulement dans des chenaux alluvionnaires). Fort Collins, Colorado, 1959.

## IV - ROUGHSSE, D'UN LIT AVEC RIDES ET DUNES.

- [25]- H.A. EMBERTON, N. BARBAROSSA - River channel roughness (Rugosité des canaux naturels). Trans. A.S.C.E., vol. 117, 1952, p 1121, n° 2528. Discussions par : T. Blench ; J.J. Doland et Ven Te Chow ; K.B. Banks ; L. Bujorunas ; C.C. Ingilis.
- [26]- V. VANONI, N. BROOKS - Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams (Etudes en laboratoire de la rugosité et du charriage par suspension des cours d'eau alluvionnaires). California Inst. of Technology, Report n° E.68, déc.1957.
- [27]- N. BROOKS - Mechanics of streams with movable beds of fine sand (Hydraulique des cours d'eau dont le lit mobile est constitué de sable fin). Trans. A.S.C.E., vol.123, 1928, p 256, n° 2911.

- Discussions par T. Blench, J. R. Barton, H. A. Einstein et Ning Chien  
E. J. Carlson et G. Mostafa, H. K. Liu, P. N. Lin, N. Brooks.
- [28]- R. J. GARDE - Total sediment transport in alluvial channels (Transport solide total dans les canaux alluvionnaires) - Dissertation Colorado State University, Fort Collins, Colorado, janv. 1959.
- [29]- V. VANONI,  
G. NOMICOS - Resistance properties of sediment-laden streams (Résistance à l'écoulement des cours d'eau transportant des matériaux) - Proc. A. S. C. E. vol 85, n° 115, mai 1959  
Discussion par E. Laursen, Tsung Lien Chou, D. Simons et E. Richardson, V. Vanoni et G. Nomicos (Trad. S. E. H. n° 816).
- [30]- H. K. LIU,  
S. Y. HWANG - Discharge formula for straight alluvial channels (Formule de débit pour les canaux rectilignes alluvionnaires) - Proc. A. S. C. E., vol 85, n° 111, nov. 1959  
Discussions par T. Blench, G. Lean, L. Brush, D. Culbertson et P. Jordan, B. Colby, C. Blanchet, D. Dawdy et R. Carter, G. Mostafa, J. Culbertson et C. Nordin, R. J. Garde, J. Bogardi (Trad. S. E. H. n° 815).
- [31]- D. SIMONS,  
E. RICHARDSON - Résistance to flow in alluvial channels (Résistance à l'écoulement dans les cours d'eau alluvionnaires) - Proc. A. S. C. E., vol 86, n° 115, mai 1960  
Discussions par H. A. Einstein, T. Blench, E. Laursen et G. Zernial, D. Hallmark, T. Maddock et W. Langbein, R. Taylor et N. Brooks, L. Bru...
- [32]- A. KUMAR - Resistance of a transporting sand bed (Résistance d'un lit de sable en mouvement) - Proc. Inst. Civ. Eng., vol 17, déc. 1960.
- [33]- D. SIMONS,  
E. RICHARDSON - Forms of bed roughness in alluvial channels (Formes de rugosité du lit dans les canaux alluvionnaires) - Proc. A. S. C. E. vol 87, n° 113, mai 1961.
- voir aussi n° 23

V - DEBIT SOLIDE D'UN LIT COUVERT DE RIDES OU DE DUNES

- [34]- A. KALINSKE - Movement of sediment as bed-load in rivers (Mouvement du sédiment charrié sur le lit des rivières) - Trans. A. G. U., vol 28, part 4, 1947.
- [35]- E. MEYER-PETER,  
R. MULLER - Formulas for bed-load transport (Formules de charriage) - 2ème réunion de l'A. I. R. H., Stockholm, 1948.
- [36]- R. J. GARDE,  
M. L. ALBERTSON - Le charriage de fond dans les chenaux alluviaux - La Houille Blanche, mai-juin 1961. (Pour plus de détails, voir [27]).

Techniques de mesure radio-isotopique du cheminement  
des sables dans l'Innenjade et l'Aussenjade

H. FAHSE

Wasser- und Schiffsamt  
Wilhelmshaven

Au cours des années 1958-1960, la profondeur de la passe de l'Innenjade et l'Aussenjade a été portée, grâce à des travaux de dragage, à une profondeur moyenne de 12 m en dessous du zéro des cartes (basse mer de vive eau moyenne). Comme certains endroits, notamment dans l'Aussenjade dans la zone de la passe de Wangerooge, ont tendance à s'ensabler, des dragages d'entretien sont nécessaires. Afin de réduire ces dragages au minimum, on a effectué notamment des mesures radio-métriques du cheminement des sables, propres à renseigner sur l'importance et la direction du cheminement des sables se produisant notamment dans l'Aussenjade.

La première étude a eu lieu au printemps de 1959 dans la zone d'étude 1, Feldbalje (voir plan d'ensemble). Après avoir prélevé dans cette zone environ 10 kg de sable, on a activé ce dernier avec une solution chlorhydrique de  $Cr^{51}$ . Puis, moyennant un tonneau, on l'a redéposé sur le fond de la mer qui, au point de déversement, se trouve à 6 m de profondeur. L'appareil de mesure utilisé est l'appareil LgS/B de la firme Berthold. Il est constitué d'une sonde à scintillations à tête étanche à l'eau. Celle-ci contient un cristal de Na I (TL) d'un diamètre de 25 mm et d'une longueur de 25 mm, recouvert d'une couche d'aluminium de 3 mm, ainsi qu'un photomultiplicateur de type FS 9-A avec cathode-follower. L'amplificateur, qui est abrité dans un boîtier étanche aux projections d'eau, fonctionne sur transistors à Si. L'appareil dispose de 6 niveaux de mesure de 0 à 10 000 impulsions par seconde. La constante de temps est réglable au choix sur 2, 6 ou 15 secondes. La sonde est enserrée dans une grille protectrice en fer, qui la garantit contre les chocs et en augmente le poids. L'espace intermédiaire entre la

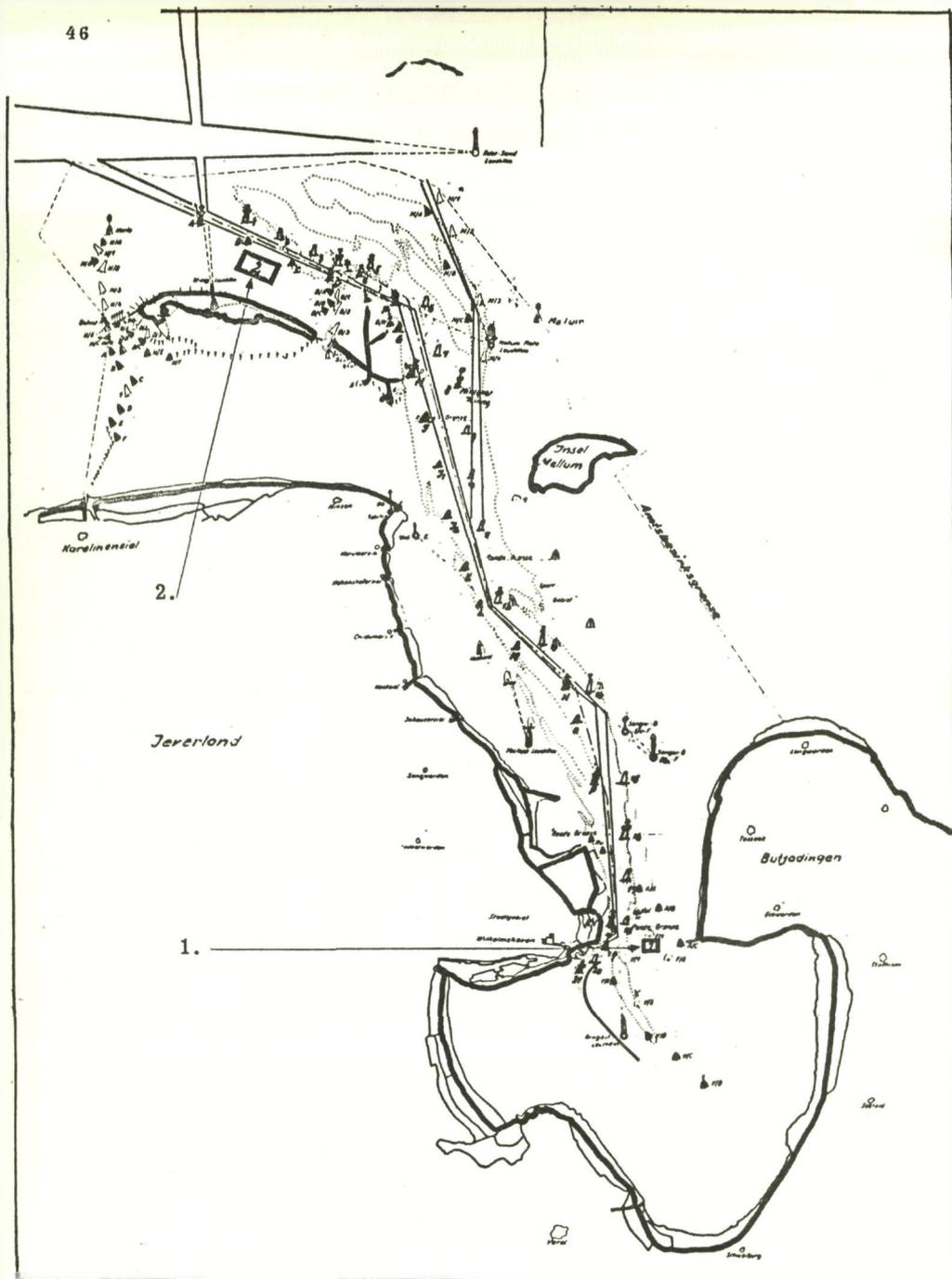


Figure 1 - Plan d'ensemble : 1. Zone d'étude 1, Feldbalje  
2. Zone d'étude 2, côte nord de Wangerooge.

grille et la sonde est occupé par du caoutchouc mousse et la grille est elle-même entourée d'une épaisseur de caoutchouc mousse. La liaison entre la sonde et l'amplificateur est assurée par un câble fixé par fiches. Lors des premiers essais, des infiltrations d'eau de mer à travers ces fiches ont rendu la sonde inutilisable. Pour les mesures suivantes, la sonde a été placée dans un sac protecteur en cellophane fermé par ligature.

Pour les mesures à partir du navire, le câble avait environ 50 m de long; pour les mesures à partir de la plage, il n'avait que 3 m de long, la sonde et le câble devant, dans ce dernier cas, être portés par un auxiliaire.

Le remplacement des câbles constituait un travail fort fastidieux, étant donné que la sonde devait à chaque fois être extraite de sa cage de fer et y être replacée après le remplacement des câbles. C'est pourquoi on a équipé la sonde d'un mètre de câble inamovible, la jonction avec le câble proprement dit étant assurée par un couplage étanche à l'eau.

Les mesures effectuées étaient de type ponctuel. Pour la localisation des différents points de mesure, on s'est servi de sextants à miroirs (mesure biangulaire) orientés sur amers. On déterminait ainsi l'emplacement de la plate-forme des compas du navire de mesure. Autant que possible, il fallait mouiller la sonde sur le fond marin, à la verticale de cette plate-forme, sous peine de ne pas faire concorder l'emplacement du navire avec le point effectif de mesure. Cette concordance, cependant, n'a pas pu être obtenue dans la pratique, car la sonde n'est susceptible d'être déposée sur le fond de la mer qu'avec un câble courant le long du bordé. La distance entre plate-forme et bord du bordé a été une cause constante d'erreur dans les mesures. Avec le navire de mesure utilisé pour la première étude, cette distance était de 3 m.

Une autre erreur de mesure dans la localisation découlait du fait que le navire était à maintenir au-dessus du point de mesure par fort courant de marée (vitesse de courant jusqu'à 1m/sec.) pendant

1 à 2 minutes environ, le temps de faire aboutir la sonde et de permettre à l'appareil de mesure de se mettre en marche. Très souvent, il s'avère impossible d'éviter une légère dérive du navire. La sonde elle-même n'a pas toujours pu être déposée sur le fond de la mer à la verticale du navire malgré l'adjonction d'un poids supplémentaire et, par ailleurs, elle était déportée par le courant. Enfin comme la localisation par le procédé susdit était assez approximative, il n'a pas été possible d'éviter des erreurs de localisation de l'ordre de 40 m.

Comme la sonde de mesure ne pouvait être traînée sur le fond, il a fallu renouveler le mouillage pour chacun des points de mesure. Pour l'ensemble de la zone, il en est résulté tout un réseau de points de mesure. Comme en dehors de l'erreur mentionnée en premier (distance entre plate-forme et bord du bordé), les erreurs de mesure ne sont pas constantes, mais changent de point en point, de par leur valeur et leur direction dans le réseau de coordonnées, il est exclu que l'on procède à une correction a posteriori des erreurs. Ainsi donc, lorsqu'il s'agit de mesures ponctuelles du type mentionné ci-dessus, une localisation précise n'est possible que dans des eaux à faibles vitesses de courant. Etant donné qu'avec de vastes étendues maritimes une erreur de 30 m n'est nullement inadmissible (notamment si l'on considère qu'à l'échelle de 1 : 20 000 elle se traduit par une différence de 1,5 mm) la méthode en question est parfaitement utilisable dans certains cas.

Ceci est également apparu dans la présente étude. La propagation du matériau sur le fond de la mer a observé un rythme relativement lent. C'est pourquoi on a prospecté la zone périphérique en vue d'y localiser d'éventuels dépôts. Une prospection de ce genre sur une vaste étendue marine est relativement rapide avec la méthode ponctuelle décrite ci-dessus. Quelque deux semaines après le déversement du matériau, on a enregistré un taux de comptage important à environ  $\frac{1}{4}$  km du point de déversement, imputables sans nul doute à certaines fractions du matériau; si donc le matériau, non seulement se déplace comme boue sur le fond de la mer, mais est transporté sur de grandes

distances en tant que matières en suspension (comme dans le cas décrit ci-dessus), le cheminement du matériau n'est pas susceptible d'être suivi de manière continue et il faut procéder à une prospection systématique des points de dépôt.

La seconde étude a été effectuée par le Wasser-und Schifffahrtsamt Wilhelmshaven, en collaboration avec la Bundesanstalt für Wasserbau-Aussenstelle Küste, au mois de septembre 1960, sur la côte nord de l'île Wangerooge (2). Après avoir prélevé environ 40 kg de sable, on les a traités avec une solution de silicate de soude. Puis, on a fixé sur ce sable environ 2,5 g de chrome d'une activité globale de 0,7 curie. Enfin, le 14.9.1960, on l'a mouillé à l'étale de basse mer à environ 1000 m du nord de la ligne d'étiage sur la côte nord de Wangerooge. La profondeur au point de mouillage était d'environ 3 m. La sonde utilisée était du même type que pour la première étude. Elle a été montée dans un traîneau spécial et traînée sur le fond de la mer.

Il n'a pas été possible de tirer le traîneau à partir de l'arrière du navire, car la résultante entre la force de traction du câble et la pression du courant était supérieure au poids du traîneau (75 kg), et celui-ci se soulevait du sol. Pour les mesures à effectuer par le Wasser-und Schifffahrtsamt Wilhelmshaven, on a donc muni le traîneau d'un câble d'acier de 8 m de long, fixé par son autre extrémité à l'ancre du navire de mesure. Ensuite, on a mouillé l'ancre jusqu'à environ 1 m au-dessus du fond de la mer. Pour une faible vitesse du navire, l'ancre pendait presque verticalement. On réussit ainsi à réduire à une très faible valeur l'angle entre la traction sur le câble du traîneau et la pression du courant, et le traîneau resta maintenu contre le fond marin. Toutefois, le navire n'a pu effectuer les mesures que dans la direction du courant. Lorsqu'il se déplaçait contre le courant, la pression de celui-ci était telle que l'ancre était, elle aussi, chassée vers l'arrière et que le traîneau une fois de plus se soulevait du fond marin. Après chaque traversée de la zone de mesure dans le sens du courant, il nous a fallu remonter le traîneau pour le faire redescendre une fois regagnée la position de départ. Ces opérations ont pris la moitié du temps prévu pour les mesures.

Pour effectuer le travail, il faut disposer d'un bateau équipé d'un petit mât de mouillage avec dispositif de levage, qui permette de soulever le lourd traîneau et de le faire passer par-dessus bord. De plus, les mesures ne sont réalisables que par grandes profondeurs, car il faut éviter que l'ancre une fois lâchée n'aille endommager le véhicule de mesure. C'est pourquoi, au nord de Mangerooge, et notamment dans la zone côtière de faible profondeur, nous avons également procédé à des mesures ponctuelles, tout comme dans la première étude.

Pour les localisations avec traîneau, nous avons utilisé la méthode biangulaire avec sextants à miroirs orientés sur amers. Comme, dans ce cas encore, le traîneau de mesure ne se trouvait pas situé directement en dessous de la plate-forme des compas, une erreur constante est intervenue dans la localisation. Mais cette erreur peut être calculée et le résultat des mesures peut être corrigé en conséquence. Au cours des mesures, la vitesse du traîneau au sol était d'environ 1,5 m/sec. Cette vitesse correspond à l'allure la plus lente du navire. L'indicateur de la soude a été surveillé en permanence et toutes les deux minutes on a procédé à une localisation et à une lecture. Lorsque les indications dépassaient la normale, on a également effectué des lectures intermédiaires. L'appareil de mesure présentait toutefois l'inconvénient que, pour des valeurs élevées, il fallait commuter les niveaux de mesure. Avant que l'indicateur eût fini d'osciller et que l'on pût procéder à la lecture, le traîneau de mesure avait déjà parcouru un trajet supplémentaire. Une lecture exacte devenait alors impossible. C'est pourquoi, pour ce genre de mesure, il conviendrait d'utiliser des appareils de mesure auto-enregistreurs. On obtiendrait alors un profil complet de l'activité des rayonnements dans la zone d'étude.

Lors d'une nouvelle étude entreprise pendant l'été de 1962, la localisation a été effectuée pour la première fois avec un appareillage hydrodist. Cet appareillage est fabriqué par la firme Tellurometer (PTY) LTD, Afrique du Sud. Il est composé de 2 stations "remote" et 2 stations "master". Les stations "remote" sont disposés en deux points localisés

sur la côte avec précision. Les deux stations "master" se trouvent à bord du navire. Par télémétrie électrique, on mesure les distances entre une station master et la station-remote qui lui correspond. On arrive ainsi à connaître les trois côtés du triangle constitué par les deux stations-remote et le navire, triangle qui donne la localisation du navire. Ce procédé dépasse en précision celui des sextants à miroirs.

Pour rendre les mesures indépendantes de l'intensité et du sens du courant, le Wasser-und Schifffahrtsamt Wilhelmshaven a conçu le dispositif reproduit à la figure 2. Un câble d'acier d'environ 12 m partant du navire porte un contrepoids à plan incliné. Celui-ci est fixé à l'extrémité de ce câble par deux courts câbles d'acier. L'attache est réglée de telle manière que l'accessoire en question se maintient toujours à la même profondeur.

A environ 1 m avant l'extrémité du câble est fixé un deuxième câble d'acier d'environ 18 m, qui est le câble de traction du traîneau. Avec ce système, on arrive à maintenir le traîneau sur le fond de la mer quelles que soient la force et la direction de la vitesse du courant, et la surface susceptible d'être explorée se trouve doublée par rapport à la méthode précédente (traîneau fixé à l'ancre). Toutefois, cette méthode de mesure n'a pas encore été expérimentée dans la pratique et l'on ne peut rien dire encore sur ses possibilités effectives d'utilisation.

En résumé, on peut dire que, d'après l'expérience acquise par le Wasser-und Schifffahrtsamt de Wilhelmshaven dans la mesure radio-isotopique du cheminement des sables, la migration des sables n'est susceptible d'être suivie en détail que dans des zones très limitées, où le transport de sable se cantonne au niveau du fond marin. Dans des zones relativement vastes comme l'Aussenjadc, où le sable est transporté non seulement au long du fond mais encore comme matière en suspension, on ne peut dégager des résultats enregistrés par nous avec les méthodes décrites, que des points de dépôt. On ne peut tirer de conclusions probantes sur le cheminement exact du sable que si, en même

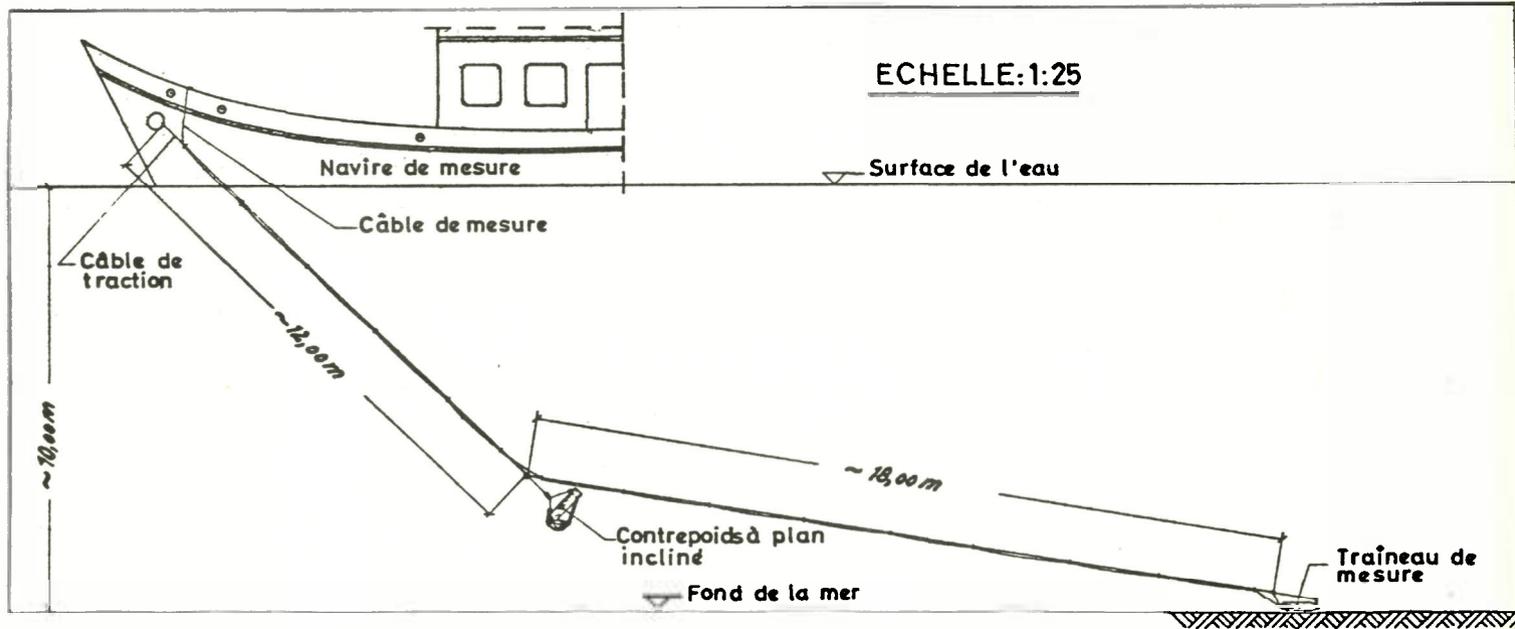


Figure 2 - Utilisation du contrepoids pour les mesures du cheminement des sables.

temps, on effectue des mesures de courant et des observations du niveau de l'eau, du vent et de l'état de la mer, ainsi que des mesures de la teneur en matières de suspension. Comme le Wasser-und Schifffahrtsamt a pu le constater, le transport de matières est plus élevé en période de mer forte, circonstance qui empêche précisément d'effectuer des mesures à partir du navire. Lorsque, après quelques jours, le temps revient au calme, on ne retrouve généralement plus trace de matières répandues, celles-ci ayant été recouvertes par des matières non activées. En ce qui concerne l'épaisseur de la couche de recouvrement qui s'oppose aux mesures, on ne peut rien dire de précis. L'intensité au travers des couches superposées de sable diminue selon une fonction  $e$ . La couche de demi-absorption est d'environ 4 cm. C'est pourquoi, lors des recherches à venir, on prélèvera également des échantillons du sol de la zone étudiée.

Les opérations de mesure radio-isotopique du cheminement des sables seront poursuivies dans l'Aussenjade car, dans le cadre de l'ensemble des recherches, elles sont de nature à renseigner utilement sur le mouvement des sables dans cette région.

### Bibliographie

- (1) Heinz Schulz und Gerhard Ströhl  
"Untersuchung der Sandwanderung  
im Bereich der deutschen Küste  
mit radioaktiven Leitstoffen"
- (2) Bundesanstalt für Wasserbau  
- Aussenstelle Küste -  
"Untersuchung der Sandwanderung  
im Gebiet der Aussenjade,  
Messung im September 1960"

Recherche expérimentale sur le transport de solides  
dans les courants sous pression

I. MELISENDA

Dr.-Ing. - Assistant de la chaire d'Hydraulique  
à l'Institut d'Hydraulique de l'Université de Palerme

1. L'Institut d'Hydraulique de Palerme a entrepris depuis quelque temps des recherches expérimentales sur les courants sous pression transportant des solides en suspension.

Les recherches s'intègrent dans cet ensemble d'études qui, depuis plusieurs années déjà, se développe au rythme de l'intérêt croissant que revêt, dans le domaine des constructions hydrauliques et de nombreuses industries, le problème du transport de matériaux solides à l'aide de courants fluides, et plus particulièrement de courants hydriques.

La recherche se rattache aux études les plus récentes effectuées par des Français, Américains, Russes et Allemands et vise à apporter une contribution à la connaissance plus approfondie du phénomène du transport en suspension et du mécanisme par lequel il s'effectue.

Les expériences de Palerme se rapportent au transport de matériaux en suspension. Dans ce domaine, les résultats obtenus à la suite d'autres recherches, même s'ils ne concordent pas toujours entre eux, font généralement apparaître que, en ce qui concerne les caractéristiques du mouvement (telles que les résis-

tances au mouvement), il existe des différences parfois notables entre les courants chargés de matériau solide et les courants d'eau claire.

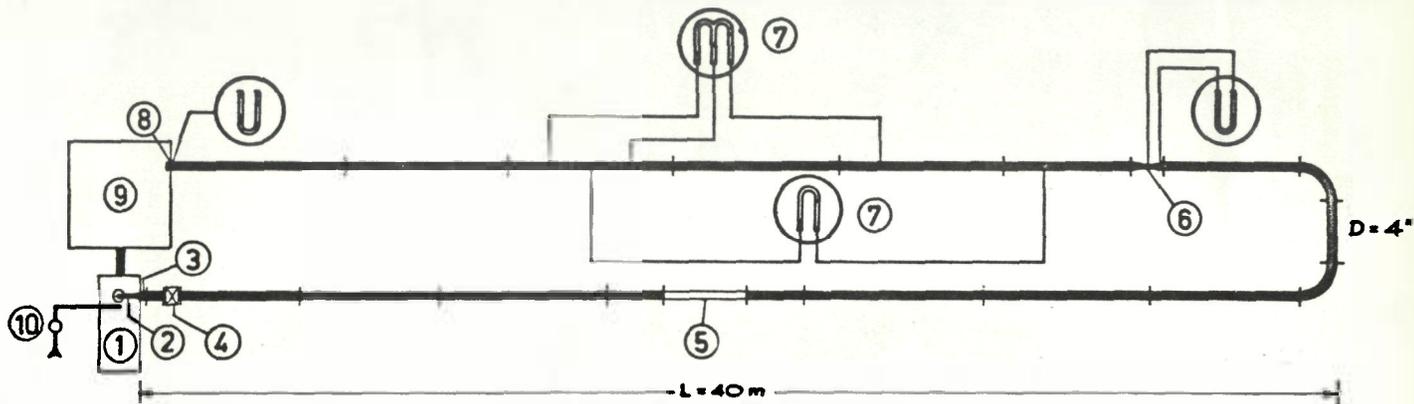
Nous avons déjà effectué des recherches sur les modifications que subit la loi de résistance des courants d'eau claire sous pression par effet du transport en suspension totale de matériau solide. Actuellement, les recherches visent à interpréter les résultats obtenus.

2. Nous avons utilisé une installation de circulation expérimentale fonctionnant en circuit fermé.

L'installation (voir figure 1) est constituée d'une conduite, longue au total de 80 m, qui s'étend sur un plan horizontal en forme d'U très étroit.

La conduite est reliée à l'aide d'une très courte portion verticale à une pompe électrique et débouché dans un petit caisson à fond à trémie, par lequel la pompe électrique est directement alimentée.

Le tronç expérimental de mesure, est constitué par les trente derniers mètres. Dans celui-ci sont installées cinq prises piézométriques reliées à des manomètres différentiels. A proximité de la bouche de la conduite est installé un appareil pour le relevé de la distribution de vitesse dans la section;



- |                               |   |
|-------------------------------|---|
| ① POMPE ELECTRIQUE            | ⑥ TUBE DE VENTURI COURT   |
| ② TRONC D'ALIMENTATION (D=3") | ⑦ DISPOSITIF POUR LE RELEVÉ DES PERTES DE CHARGE                                |
| ③ DIFFUSEUR 3/4"              | ⑧ DISPOSITIF POUR LE RELEVÉ DES VITESSES  |
| ④ PETIT TRONC AVEC DIAPHRAGME | ⑨ PETIT CAISSON AVEC FOND A TREMIE  |
| ⑤ TRONC EN PLEXIGLASS         | ⑩ CONDUITE MUNIE DE COMPTEUR POUR LA LUBRIFICATION DU PRESSE-ETOUPE DE LA POMPE |

Figure 1 - Schéma de l'installation expérimentale.

cet appareil est essentiellement constitué d'un tube de Pitot dont les déplacements sont commandés par un coordinatonètre.

Des troncs de tube en plexiglass insérés dans la conduite permettent de suivre l'évolution du phénomène du transport de matériau solide et de constater la présence éventuelle de dépôts ou de traînées de matériau sur le fond.

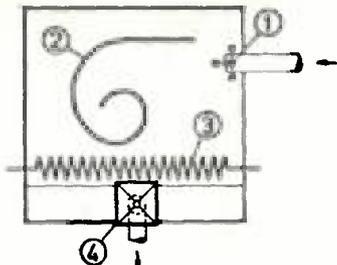
Le réglage du débit est obtenu par inscription au début de la conduite de petits troncs spéciaux en acier, munis de diaphragmes.

Le débit est mesuré à l'aide d'un tube de Venturi court.

La mise au point de l'installation a exigé un long travail préparatoire et de laborieux contrôles. Il a fallu notamment essayer différentes installations pour la bouche de la conduite. Il importait de remédier à certains inconvénients résultant du type de circuit réalisé (tels que l'échauffement de la masse d'eau en cycle fermé) et, en tout cas, d'assurer la constance de la concentration volumétrique du mélange en circulation, en évitant soigneusement le dépôt de matériau solide dans le caisson et l'entraînement d'air dans la conduite.

La figure 2 indique les détails de deux types d'installation réalisés. Pour l'exécution des expériences, le choix

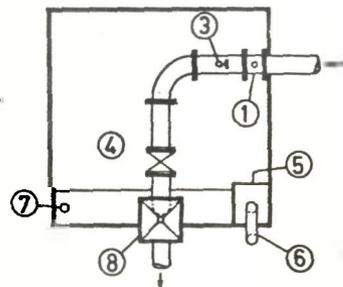
**INSTALLATION AVEC  
BOUCHE LIBRE.**



**INSTALLATION AVEC BOUCHE LIBRE**

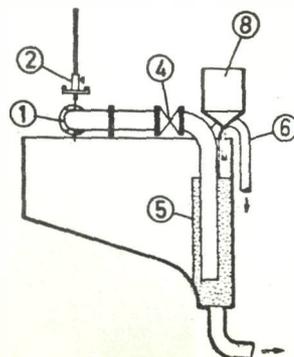
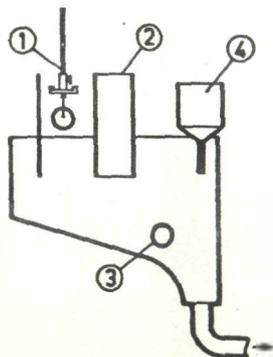
- ① TUBE DE PITOT AVEC DISPOSITIF POUR LES DEPLACEMENTS ORIZONTAUX ET VERTICAUX
- ② AVALOIR À TOURBILLONS POUR LA DESAERATION DE L'EAU
- ③ SERPENTIN POUR LA CIRCULATION DU MELANGE DE REFROIDISSEMENT
- ④ TREMIE POUR LE DOSAGE DU SABLE

**INSTALLATION AVEC  
BOUCHE IMMERGEE**



**INSTALLATION AVEC BOUCHE IMMERGEE**

- ① PETIT TRONC MUNI DE TUBE DE PITOT
- ② DISPOSITIF POUR LES DEPLACEMENTS VERTICAUX DU TUBE DE PITOT
- ③ ECHAPPEMENT
- ④ VANNE
- ⑤ CAGE EN GRILLAGE METALLIQUE
- ⑥ SIPHON DE DECHARGE
- ⑦ TUBE D'ALIMENTATION EN EAU PROPRE
- ⑧ TREMIE POUR LE DOSAGE DU SABLE



**Figure 2 - Installation de la bouche de la conduite expérimentale.**

s'est finalement porté sur celle dont la bouche est immergée et qui correspond mieux aux critères requis pour les essais.

De nombreux autres contrôles dont nous ne mentionnons pas les résultats pour des raisons de brièveté, ont porté tout d'abord sur l'étalonnage de la conduite avec de l'eau claire, tant en ce qui concerne les lois de résistance, que les lois de distribution de la vitesse dans la section.

**3.** Les recherches sur les lois de résistance des mélanges ont été effectuées avec des mélanges d'eau et de sable.

Pour la préparation du mélange, on a utilisé du sable siliceux provenant du lac de Massaciuccoli, d'un poids spécifique de 2.650 kg/mc, tamisé soigneusement de manière à obtenir un degré d'uniformité non supérieur à 1,5 et, par conséquent, pratiquement monogranulaire. Nous avons notamment utilisé trois types de sable ayant respectivement des diamètres moyens de  $d_1 = 0,88$  mm,  $d_2 = 0,41$  mm,  $d_3 = 0,30$  mm, tous les trois compris dans cette catégorie granulométrique de matériaux dont le transport en suspension au sein de courants hydriques présente, d'après les études effectuées jusqu'ici, une grande variété de comportements.

Les recherches ont été exécutées avec des nombres de Reynolds du courant compris entre 200.000 et 500.000.

Les essais effectués jusqu'ici peuvent se classer en trois grands groupes d'expériences : un groupe pour chaque type de sable utilisé. Chaque série d'expériences est caractérisée par un nombre de Reynolds déterminé et concerne des mélanges de concentration volumétrique croissante allant, à partir de l'eau claire, jusqu'à 10 %.

Il est possible, avec les résultats recueillis, de faire ressortir la courbe des pertes de charge du courant de mélange en fonction du nombre de Reynolds (rapporté au courant d'eau) et l'influence exercée par la granulométrie du matériau solide transporté ainsi que par la concentration volumétrique du mélange.

À la figure 3, on observe que pour le sable  $d_1$  les pertes de charge du mélange se sont révélées, dans le champ des valeurs de  $N$  à l'intérieur duquel les recherches ont été effectuées, et pour toutes les concentrations, supérieures aux pertes de charge du courant d'eau claire.

Avec l'augmentation de la concentration, la perte de charge dépasse en quantités toujours plus importantes la perte de l'eau claire. Mais l'écart entre la perte de charge du mélange d'une concentration déterminée et la perte de charge de l'eau claire s'atténue avec l'augmentation de la valeur du nombre de Reynolds.

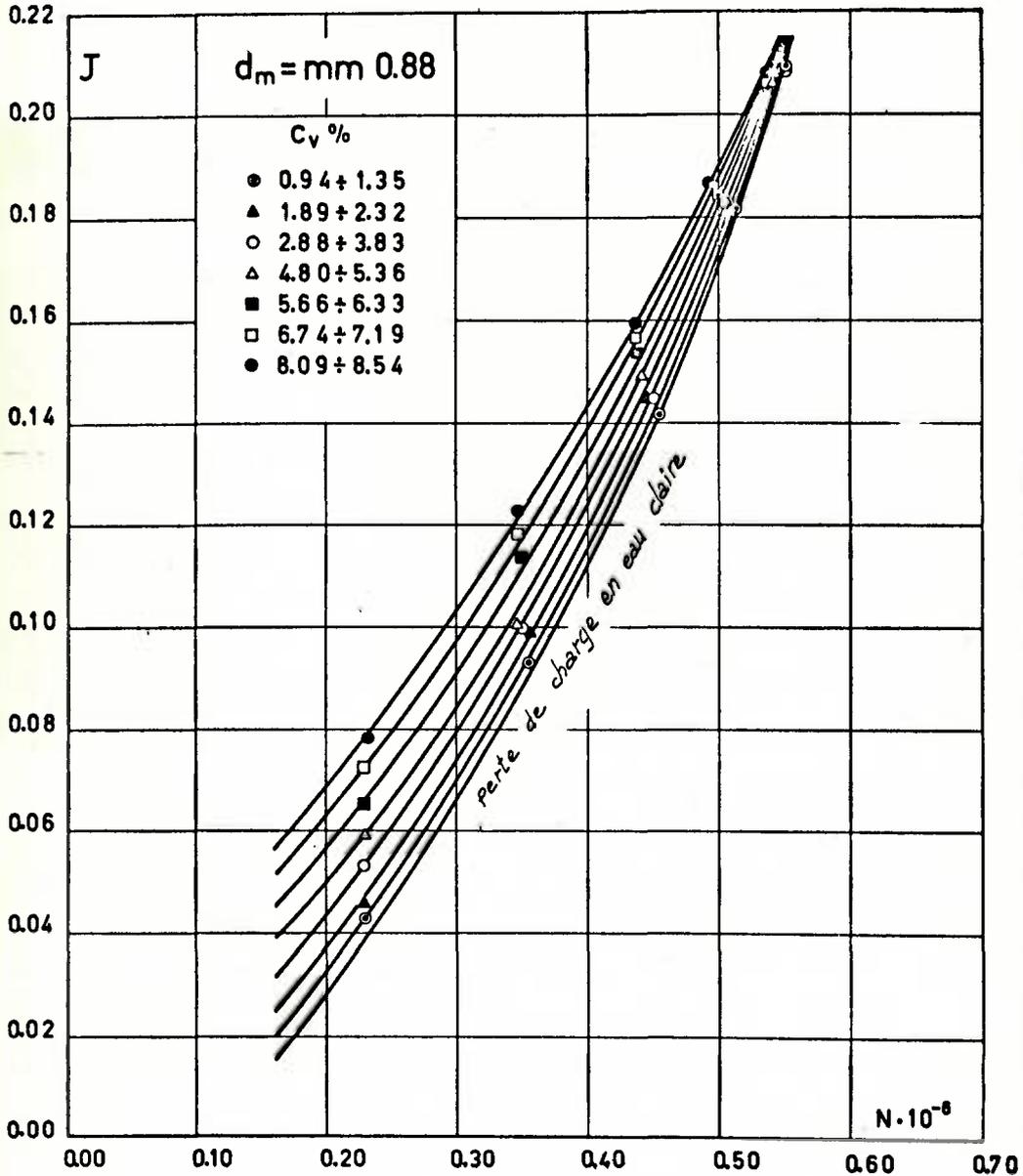
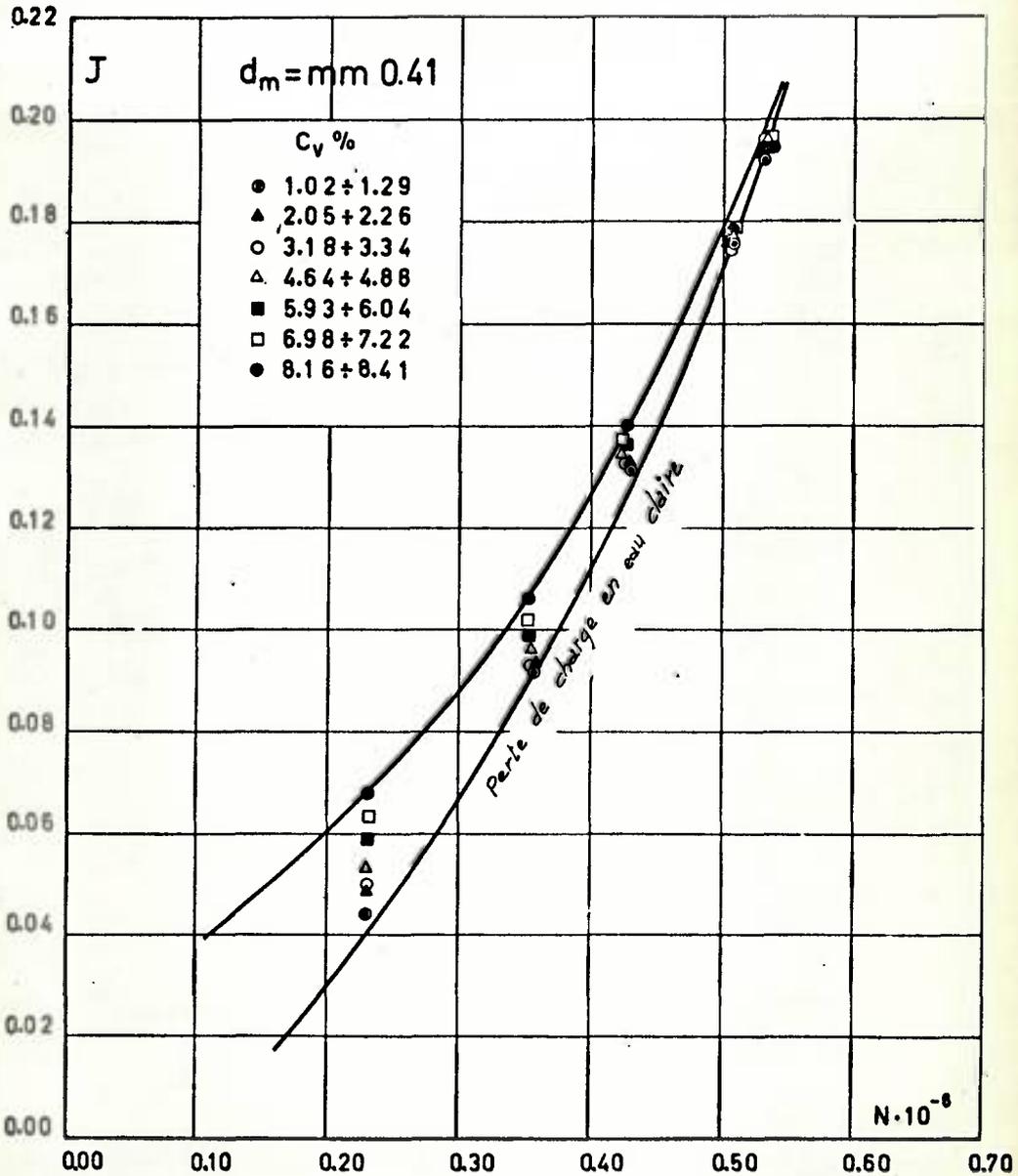


Figure 3 - Sable  $d_1$  : pertes de charge du mélange dans le champ des valeurs de N.



**Figure 4** - Sable  $d_2$  : pertes de charge du mélange dans le champ des valeurs de  $N$ .

La figure 4 indique des résultats analogues pour le sable  $d_2$ . La courbe des pertes de charge est analogue à celle de la figure 3, mais, toutes autres conditions restant égales, les écarts relevés entre les pertes de charge du mélange et les pertes de charge de l'eau claire, ont diminué.

Pour des valeurs du nombre de Reynolds dépassant  $500.10^3$ , ces écarts deviennent insignifiants et les pertes de charge du mélange ne diffèrent pas sensiblement de celles de l'eau claire.

Des écarts encore plus faibles ont été constatés pour le sable  $d_3$ , ainsi qu'il ressort de la figure 5.

Par conséquent, pour les trois types de sable, et pour une concentration déterminée de matériau solide, les pertes de charge du mélange dépassent les pertes de charge du courant d'eau limpide, de quantités qui diminuent parallèlement à l'augmentation de la valeur du nombre de Reynolds.

La granulométrie du matériau intervient pour modifier sensiblement les pertes de charge : à égalité de  $N$  et de la concentration, des diamètres moyens inférieurs du sable donnent lieu à de plus faibles pertes de charge.

La diminution de l'écart entre les pertes de charge du mélange par rapport aux pertes de l'eau limpide, avec l'aug-

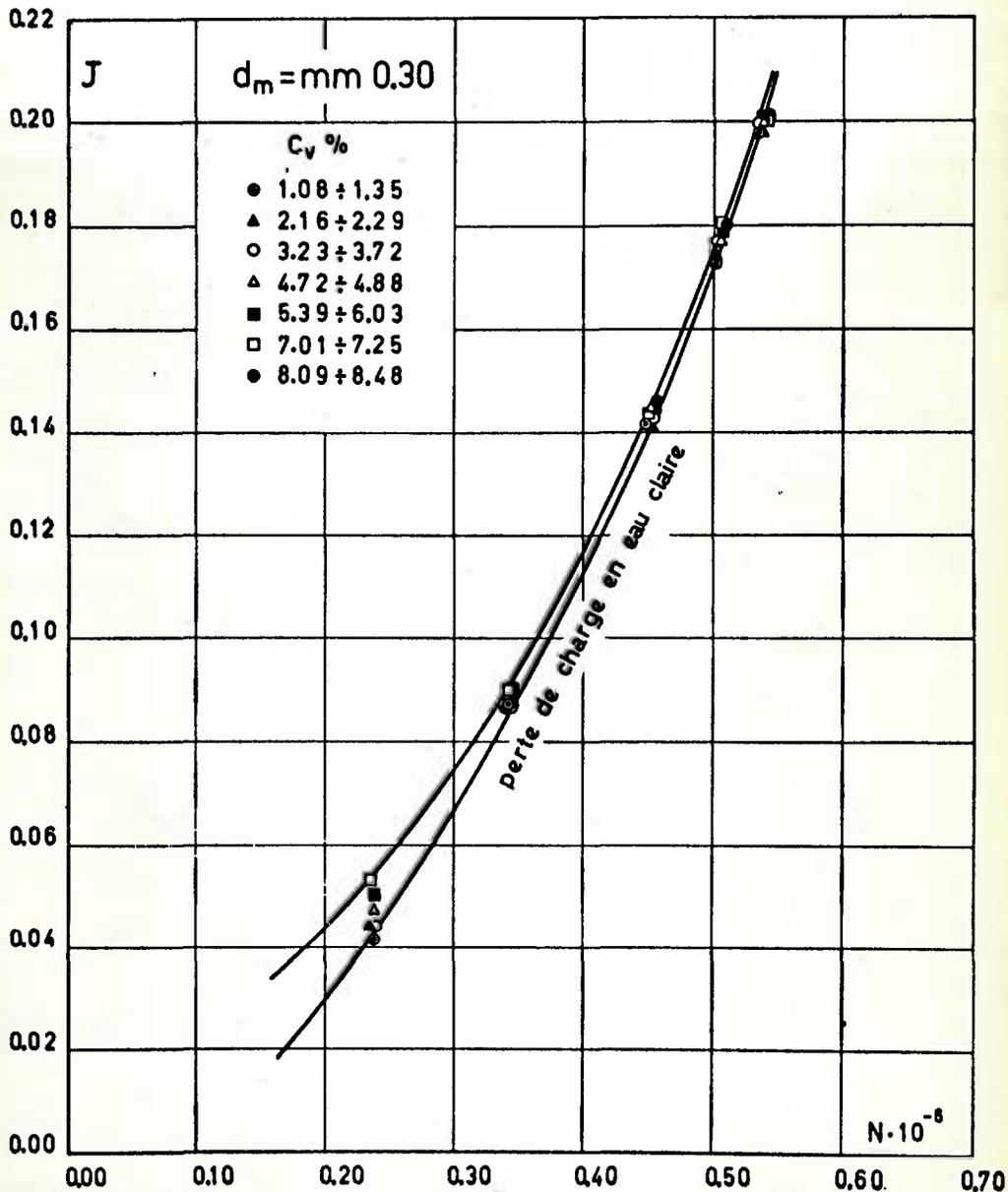


Figure 5 - Sable  $d_3$  : perte de charge du mélange dans le champ des valeurs de N.

mentation du nombre de Reynolds, est plus accentuée lorsque le diamètre du matériau diminue. Pour les diamètres  $d_2$  et  $d_3$ , l'écart devient nul pour  $N = 500 \cdot 10^3$  et s'est même parfois révélé négatif.

Ce dernier cas ne paraît pas suffisamment confirmé par nos expériences, vu la dispersion des points expérimentaux pour les valeurs les plus élevées de  $N$ .

Les résultats obtenus sont, dans l'ensemble, qualitativement en accord avec ceux de Howard, de Durand et de Fuhrbater. Ils ne concordent en revanche pas avec ceux de Ismail, qui, comme on le sait, n'avait noté, avec des tubes à section rectangulaire, des pertes de charge dans les mélanges d'eau et de sable supérieures à celles de l'eau limpide qu'en présence de transport de fond, alors que, dans nos expériences, il y a toujours en suspension totale du matériau transporté.

La constatation que, pour les mélanges d'eau et de sable, les pertes de charge sont supérieures à celles de l'eau limpide est, par ailleurs, en accord avec la réalité physique : le courant effectue en effet un travail pour transporter du matériau solide, même en suspension.

Toutefois, les résultats font apparaître que, à égalité de concentration volumétrique et, par conséquent, à égalité de poids

de matériau solide transporté en moyenne par l'unité de poids du mélange, l'écart des dissipations d'énergie, par rapport aux dissipations liées au mouvement du courant limpide, ne reste inchangé, ni en pourcentage ni en valeur absolue.

Pour mieux se rendre compte du déroulement des phénomènes que nous avons observés, et en vue de recueillir des éléments expérimentaux contribuant à une interprétation satisfaisante desdits phénomènes, nous avons associé aux recherches sur les résistances au mouvement d'autres recherches visant à déterminer quelles autres caractéristiques du courant d'eau claire subissaient des modifications par effet du transport du sable en suspension.

Ces recherches sont encore en cours. Certains résultats ont déjà été obtenus en ce qui concerne la distribution de la vitesse dans la section.

En particulier, on a observé les altérations de la distribution de vitesse le long du diamètre vertical d'une section du courant, lorsque ledit courant se charge de matériau en suspension.

Les expériences ont été conduites pour les trois types de sable de diamètre  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ , et, jusqu'ici, pour des con-

centrations volumétriques de 5,4 % et des valeurs du nombre de Reynolds de 220.000 et 480.000

Ainsi que l'on observe à la figure 6, dans laquelle ont été comparées, avec représentation adimensionnelle  $u/u_{max}$ , les distributions de vitesse enregistrées pour l'eau claire et le mélange dans les différentes conditions de fonctionnement, les altérations sont d'autant plus sensibles, à égalité de concentration du mélange et à égalité du nombre de Reynolds du courant, que le diamètre moyen du sable est plus grand.

À égalité de concentration et pour un même diamètre moyen du sable, il apparaît en revanche que les altérations sont d'autant moins sensibles que la valeur du nombre de Reynolds est élevée. Les altérations disparaissent pratiquement pour le sable de faible diamètre moyen et pour des nombres de Reynolds élevés, précisément en correspondance des conditions pour lesquelles on avait trouvé que les résistances au courant d'eau claire au mouvement ne subissaient pas de variations sensibles du fait du transport de solide en suspension.

Lors des recherches ultérieures, on compte mettre en relation le comportement des résistances avec les observations expérimentales qui sont ou seront effectuées à propos de la distribution de la vitesse, grâce à une étude de la distribution des concentrations locales dans la section du mélange.

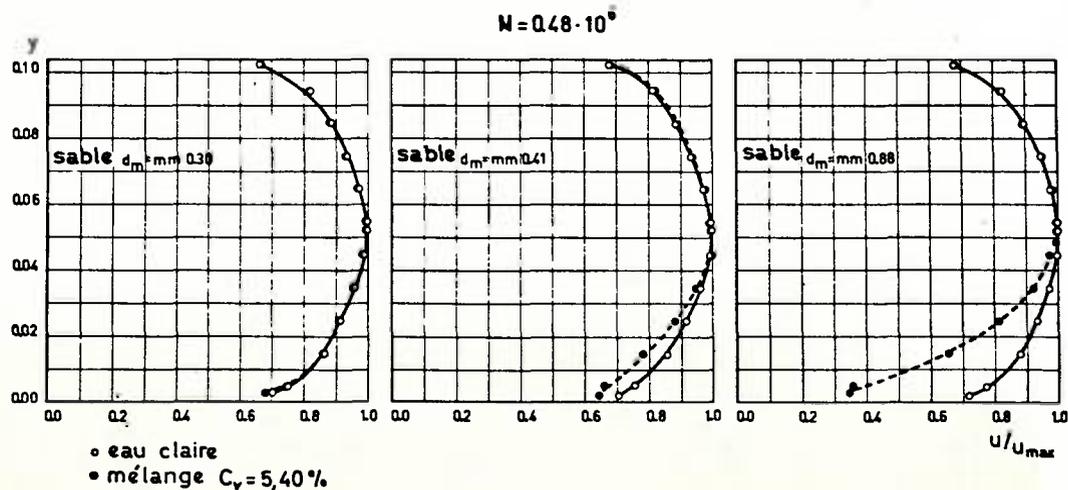
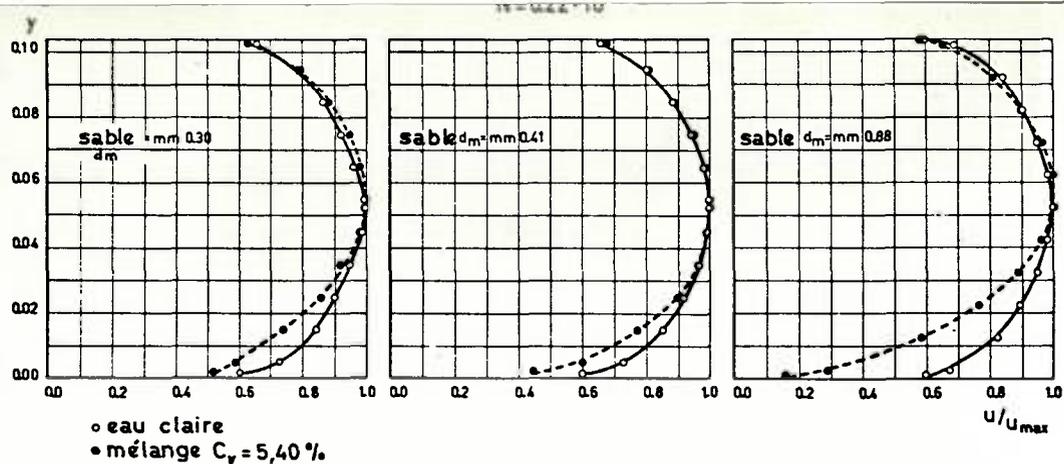


Figure 6 - Représentation adimensionnelle  $u/u_{\max}$ , dans différentes conditions de fonctionnements, des distributions de vitesse enregistrées pour l'eau claire et le mélange.

## Rapport 5

### Mesure du débit solide des cours d'eau par charriage au moyen de traceurs

Résultats des premiers essais en laboratoire  
avec des traceurs luminescent

**J. CHABERT**

**Chef du Département "Laboratoire National d'Hydraulique"**  
**Centre de Recherches et d'Essais de Chatou**

L'étude expérimentale menée au Laboratoire se propose de rechercher les possibilités et moyens d'adaptation à la mesure du débit solide des cours d'eau par charriage des différentes méthodes utilisées couramment pour la mesure des débits liquides à l'aide de traceurs.

La note n° 1 (\*) précisait les données générales du problème et exposait dans le détail le processus expérimental adopté. Ces derniers éléments seront cependant rappelés brièvement.

#### I. CANAL D'ESSAIS

Le canal d'essais utilisé (figure 1) est à fond fixe horizontal, long de 45 m et large de 1,5 m. La longueur utilisable avec des fonds mobiles est de 30 m. La zone à fond mobile est précédée d'un seuil cimenté long de 5 m.

Les lignes d'eau sont déterminées par deux pointes limnimétriques situées aux points d'abscisses 3 et 29 m, l'extrémité aval du seuil étant l'origine des abscisses.

Un chariot équipé d'une pointe limnimétrique se déplace sur des rails longitudinaux horizontaux pour le relevé des fonds du canal.

(\*) Réf.: T 529 A du 6 novembre 1962

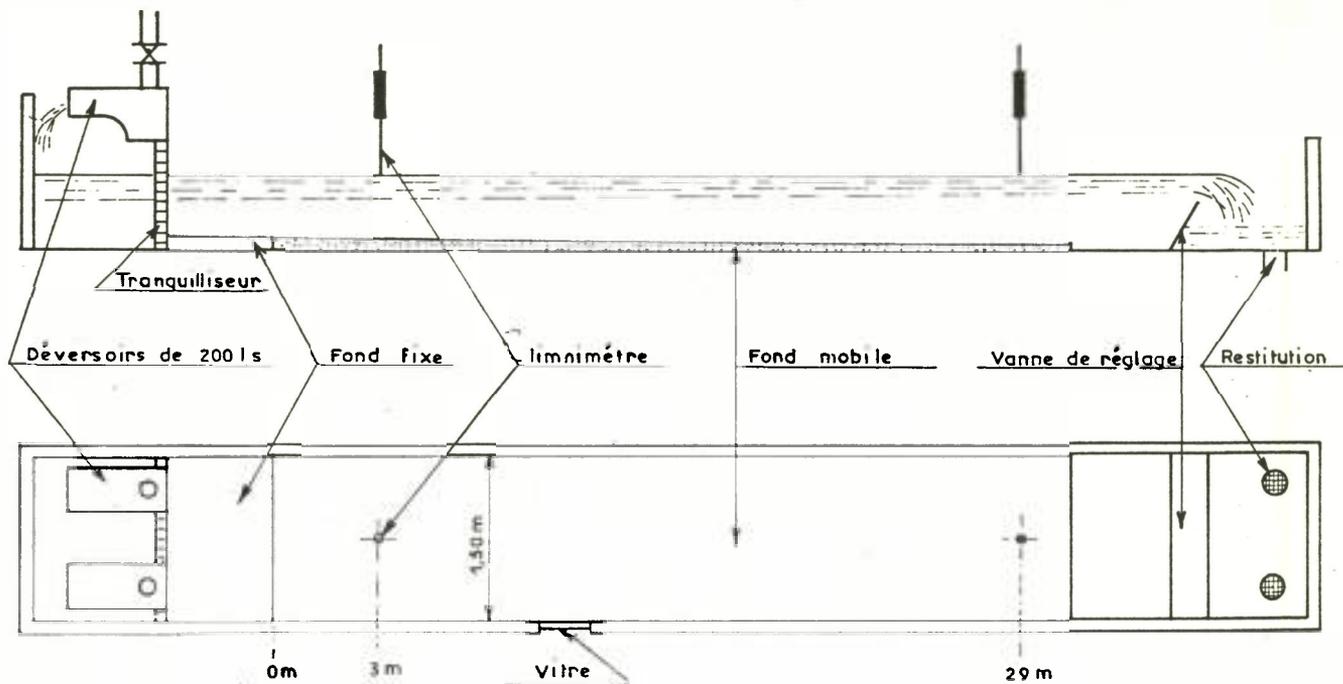


Figure 1 - Installation expérimentale.

## II. MATERIAU DE FOND MOBILE ET TRACEUR

### 1) Matériau de fond mobile:

Trois catégories de matériau de fond ont été utilisées: des galets naturels concassés de diamètres moyens respectifs 0,52 et 0,3 mm (photos 1 et 2), et du noyau d'abricot broyé de diamètre moyen 2,72 mm (photo 3).

La figure no. 2 donne les courbes granulométriques de ces matériaux dont les caractéristiques principales sont par ailleurs mentionnées dans le tableau 1 ci-après:

Tableau 1

### Caractéristiques des matériaux de fond mobile

Matériau de fond mobile	Caractéristiques granulométriques (mm)				Poids spécifique (g/cm <sup>3</sup> )
	d <sub>m</sub>	d <sub>90%</sub>	d <sub>50%</sub>	d <sub>10%</sub>	
Galet concassé no. 1	0,52	0,73	0,53	0,28	2,61
Galet concassé no. 2	0,30	0,48	0,30	0,16	2,61
Noyau d'abricot	2,72	3,4	2,7	2,0	1,33

### 2) Traceur:

Le traceur est constitué par un échantillon du matériau de fond, marqué en surface par de la peinture luminescente; ce traitement n'affecte aucunement les caractéristiques géométriques et physiques des particules (granulométrie, forme des grains, poids spécifique, vitesse de chute en eau calme).

Pour ces premiers essais en laboratoire les traceurs luminescents furent préférés aux traceurs radioactifs en raison de leurs facilités d'utilisation, le but essentiel de l'étude étant à présent de rechercher les possibilités de mesure du débit solide à l'aide de grains marqués, indépendamment du mode de marquage.

Pourcentages en poids cumulés

P %

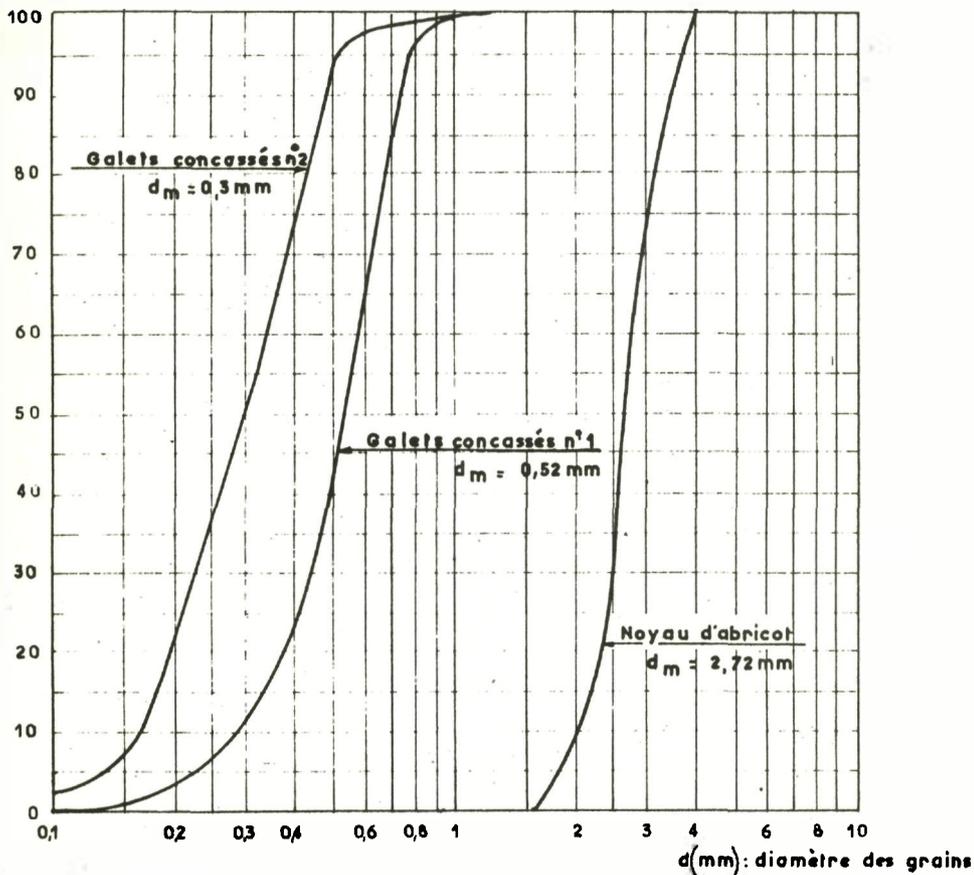


Figure 2 - Courbes granulométriques.

### III. CARACTERISTIQUES DES ESSAIS ET PROCESSUS EXPERIMENTAL.-

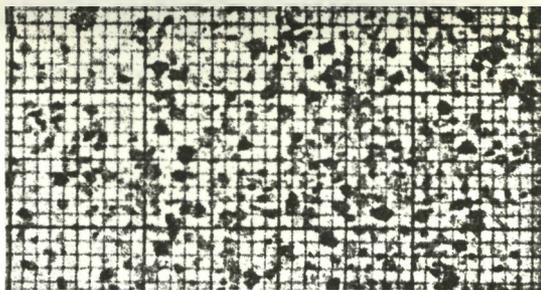
#### 1) Caractéristiques des essais:

A chaque catégorie de matériau correspond une série d'essais de longue durée avec traceurs, les conditions hydrauliques étant inchangées pour une même série.

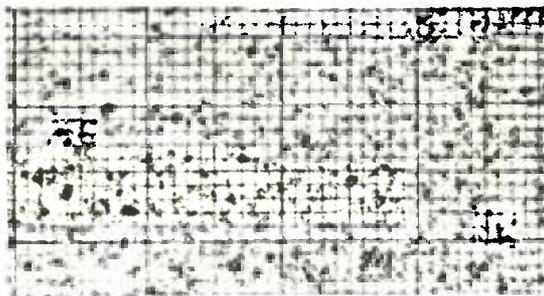
Les caractéristiques d'écoulement étaient choisies de telle sorte que le charriage se fasse avec dunes ou rides.

Au galet no. 1, grossièrement concassé, et au noyau d'abricot correspondent des dunes, ondulations du lit de grandes longueurs d'onde, espacées assez régulièrement. La face amont des dunes présente une pente douce tandis que la face aval est abrupte. Les grains de matériaux arrachés sur le dos d'une dune s'accumulent au pied de celle-ci et ainsi la dune semble se translater vers l'aval. Mais les dunes ne conservent pas leur intégrité de forme; les grandes dunes progressent plus rapidement que les autres et absorbent en quelques sorte les dunes de moindre importance; il est donc difficile de définir et déterminer une vitesse moyenne de progression des dunes. Enfin, aux dunes principales peuvent se superposer des dunes secondaires de très faible amplitude comme le montrent les photographies no. 4 et 5 correspondant au galet concassé no. 1

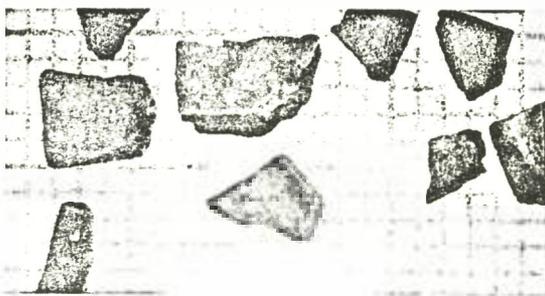
Les rides se présentent sous l'aspect d'ondulations de faibles amplitudes et faibles longueurs d'ondes, imbriquées les unes dans les autres (photographie no. 7). La cambrure de ces ondulations est forte. Les grains de matériau progressent sur le fond de façon discontinue, comme précédemment, par déformation des rides. A un instant donné, seules les particules superficielles du lit participent au charriage; les particules enfouies sous une ondulation restent en place jusqu'à ce que, celle-ci ayant progressé vers l'aval, ils soient mis à découvert. Le brassage du matériau participant au charriage est donc loin d'être uniforme.



Photographie 1 - Galet concassé n° 1 -  $d_m = 0,52 \text{ mm}$   
(grossissement : 2 fois)

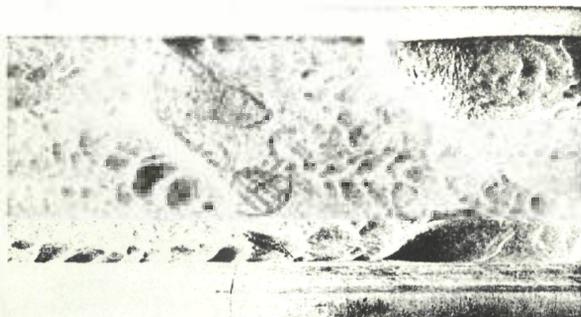


Photographie 2 - Galet concassé n° 2 -  $d_m = 0,30 \text{ mm}$   
(grossissement : 2 fois)



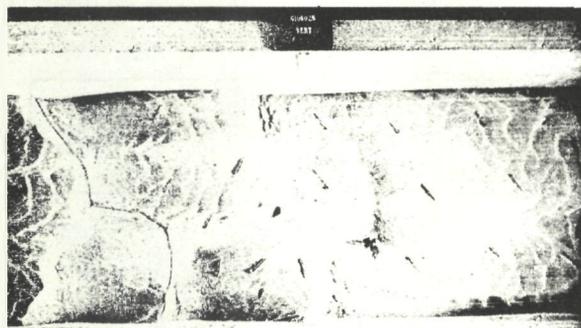
Photographie 3 - Noyau d'abricot -  $d_m = 2,72 \text{ mm}$   
(grossissement : 2 fois)

→ Sens de l'écoulement



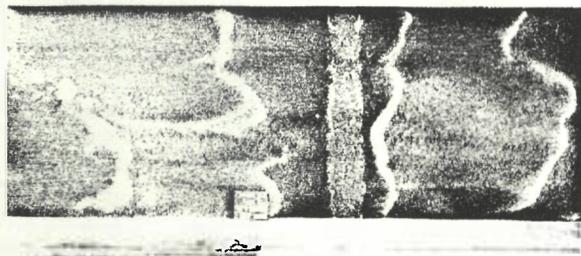
Photographie 4

Série d'essais n° 400  
Galet concassé n° 1  
Immersion n° 1  
T = 18 h 5 min - X = 24 m



Photographie 5

Série d'essais n° 400  
Galet concassé n° 1  
Immersion n° 2  
T = 30 h 35 min - X = 14 m



Photographie 6

Série d'essais n° 422  
Noyau d'abricot  
T = 0 - X = 12 m



Photographie 7

Série d'essais n° 430  
Galet concassé n° 2  
T = 105 h - X = 6 m

Des essais préliminaires de longue durée ont été nécessaires pour déterminer par approximation successives le débit solide à injecter en amont du canal pour recueillir quantité équivalente de matériau en aval.

Le tableau suivant donne les caractéristiques principales des essais.

**Tableau 2**  
**Caractéristiques des essais**

Série d'essais n°	400	422	430
Matériau de fond mobile	galet concassé no. 1	noyau d'abricot	galet concassé no. 2
débit liquide (l/s)	360	300	360
pente de la ligne d'énergie	$0,32 \times 10^{-3}$	$0,22 \times 10^{-3}$	$0,23 \times 10^{-3}$
hauteur d'eau moyenne (cm)	51,2	50,9	59,7
longueur d'onde moyenne des dunes ou rides (cm)	110 (dunes)	170 (dunes)	24 (rides)
hauteur moyenne des dunes ou rides (cm)	4,0	2,9	1,9
débit solide (l/h)	20	71	4,5
temps d'essai avec traceurs correspon- dant à ces carac- téristiques relevées	15h 35 mm (immersion no. 1)	6h	0h

2) Immersion et détection des traceurs:

Divers modes d'immersion des traceurs furent essayés:

- immersion ponctuelle dans l'axe du canal en eau, mais sans écoulement

- immersion par saignée transversale superficielle, le canal étant à sec,
- immersion par plaques superficielles dans les creux des rides, le canal étant à sec.

Les diverses caractéristiques des traceurs et leurs modes d'immersion sont résumées dans le tableau suivant.

**Tableau 3**  
**Caractéristiques des traceurs - Modes d'immersion**

Série d'essais no.	Matériau de fond	Immersion	Poids de traceur injecté (g)	Abscisse du point d'immersion (m)	Mode d'immersion
400	galet concassé no. 1	no.1	450	20	ponctuelle, dans l'axe du canal en eau, sans écoulement
"	"	2	550	10,5	( par saignée transversale superficielle dans canal à sec
422	noyau d'abricot	3	10220	12	)
430	galet concassé no. 2	4	950	10	plaques superficielles dans canal à sec

Des carottages dans le matériau de fond mobile, de profondeurs suffisantes pour couvrir la hauteur de matériau participant au charriage, permettent de suivre la progression du traceur et de déterminer par comptage la concentration en particules marquées. Ces carottages étaient effectués à l'aide de tubes à mince paroi tous les 50 cm, à raison de 3 à 5 par profil selon les séries d'essais.

Le tableau no. 4 ci-après donne la chronologie des détections effectuées.

Tableau 4  
Chronologie des détections effectuées

Série d'essais no.	Immersion no.	Temps d'essais entre l'immersion des traceurs et les détections					
400	1	10h15'	18h5'	25h50'	33h20'	40h50'	48h
	2		7h50'	15h35'	23h5'	30h35'	37h45'
422	3	3h	6h	9h	12h	15h	
430	4	15h	30h	45h	60h	75h	90h

#### IV. RESULTATS

La comparaison, qualitative seulement, des concentrations moyennes sur les verticales et des concentrations superficielles ne fait pas apparaître de corrélation bien nette entre la répartition des traceurs en profondeur et en surface. La distribution superficielle des grains marqués était déterminée par photographie en lumière ultraviolette.

Les figures 3, 4, 5 et 6 indiquent les répartitions longitudinales de traceurs obtenues après divers temps d'essais, pour les 4 immersions réalisées.

Les fluctuations en dents de scie observées à proximité de la source de traceurs sont très importantes; plus particulièrement dans le cas d'un lit avec dunes, car l'homogénéité du mélange en traceur est loin d'être réalisée tant longitudinalement que transversalement au voisinage de la zone d'immersion: longitudinalement, les grandes longueurs d'ondes des dunes ne sont pas favorables à un rapide brassage du traceur dans la couche de matériau en mouvement, tandis que, transversalement, les dunes ne progressent pas avec un front rectiligne perpendiculaire à l'axe du canal. De ce fait, l'on note de fortes concentrations au pied d'une dune où s'accumulent les particules marquées tandis qu'en un point voisin du même profil correspondant au dos de la dune il n'y a que quelques particules marquées en surface.

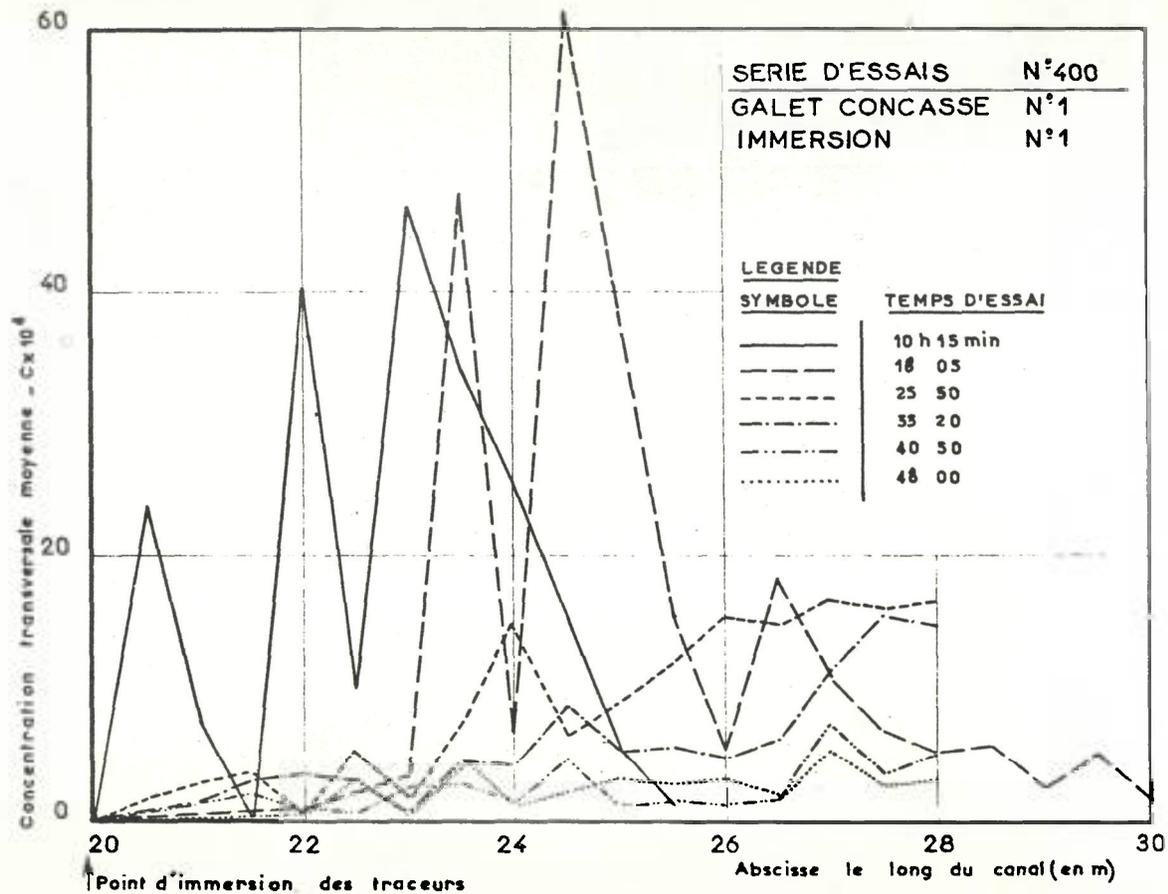


Figure 3 - Dispersion longitudinale des traceurs.

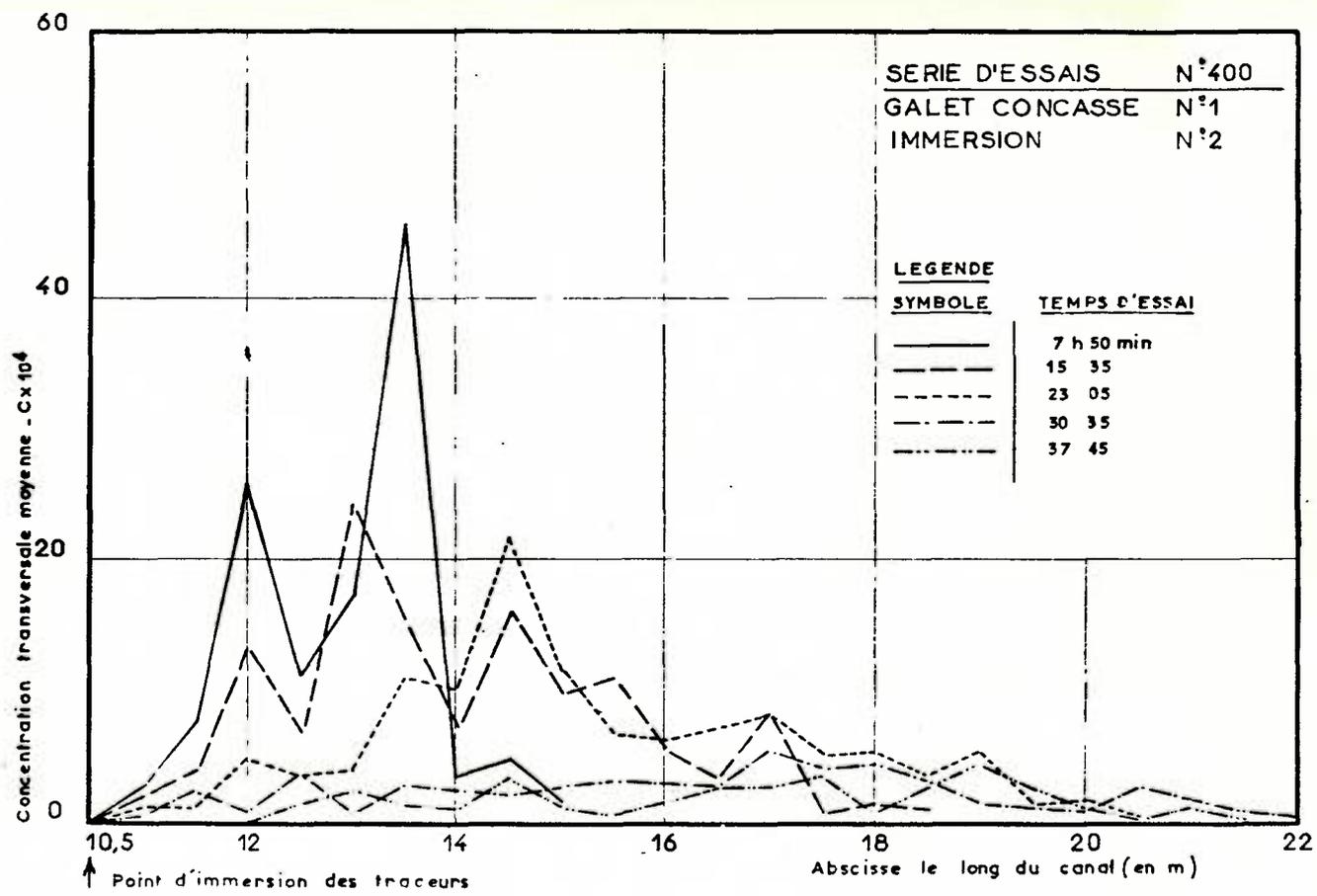


Figure 4 - Dispersion longitudinale des traceurs .

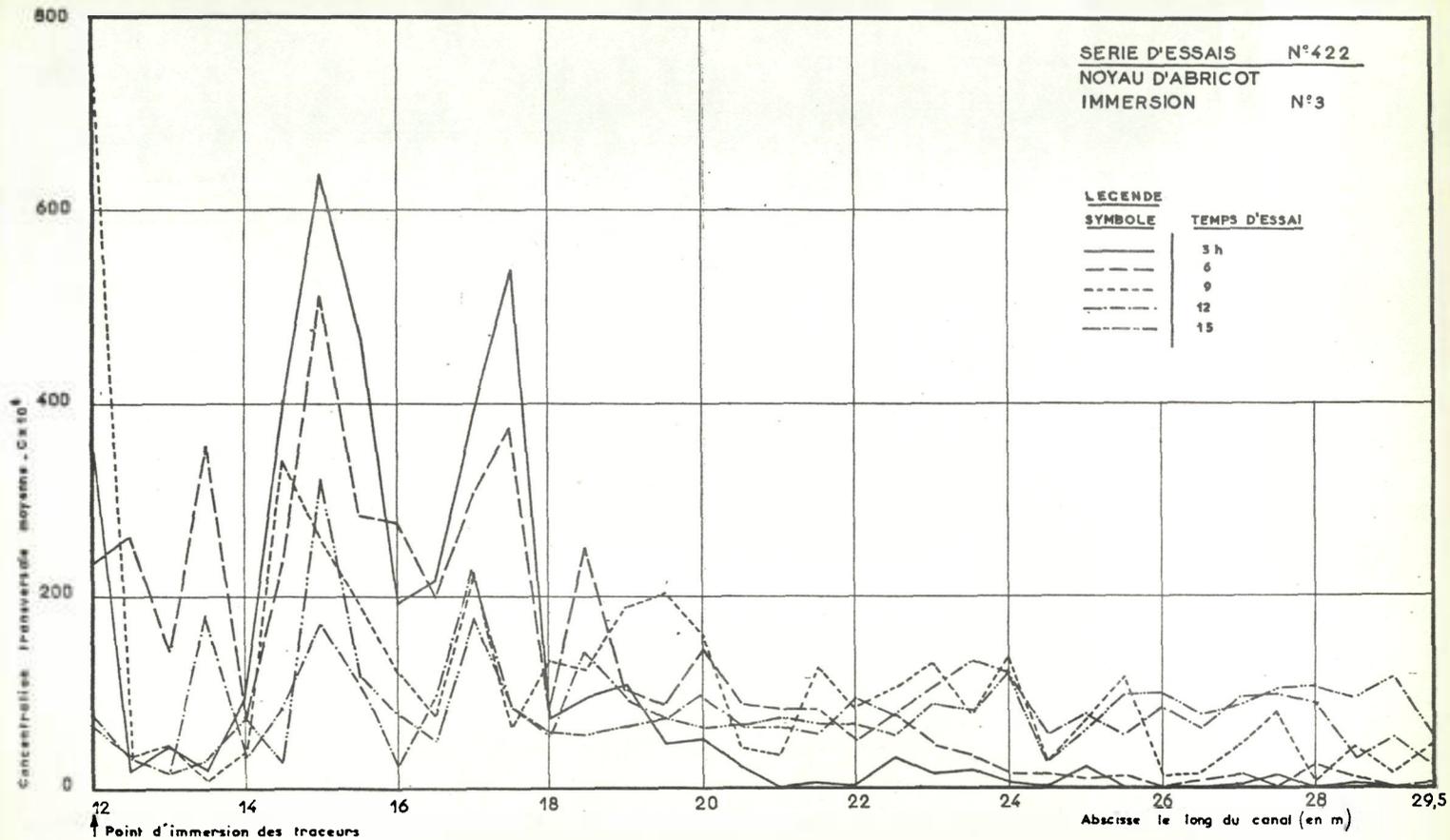


Figure 5 - Dispersion longitudinale des traceurs.

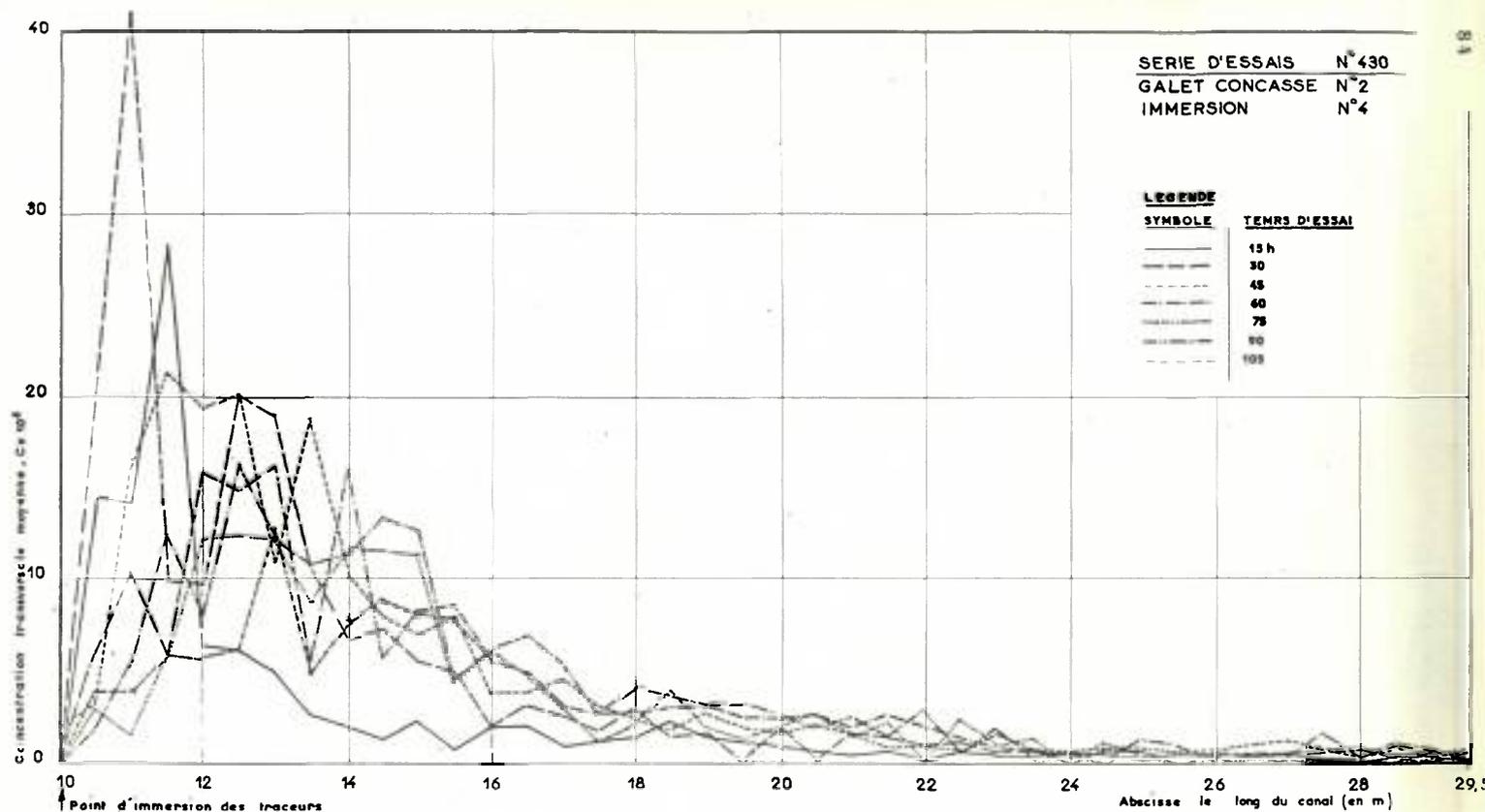


Figure 6 - Dispersion longitudinale des traceurs.

Il n'y a pas de discontinuités aussi marquées dans le cas de rides, comme le montre la figure 6, puisque ce type d'ondulations du lit permet un brassage bien plus efficace.

A la suite de ces essais, ont été examinées les possibilités d'application de la méthode du centre de gravité, dérivée de la méthode d'Allen pour la mesure des débits liquides, et de la méthode d'intégration dans le temps, dénommée également méthode de numération totale. Rappelons que pour la première méthode l'on suit la progression du nuage de traceurs, alors que pour la deuxième l'on détermine en un profil donné l'évolution dans le temps des concentrations en traceurs.

#### 1) Méthode du centre de gravité:

Des carottages successifs permettent de suivre l'évolution et la déformation du nuage de traceurs. La vitesse moyenne de progression du centre de gravité de ce nuage n'est autre que la vitesse moyenne des particules marquées qui, associée à l'épaisseur moyenne de la couche de matériau en mouvement, donne le débit solide.

#### 1)1. Vitesse du centre de gravité $V_G$

Malgré les irrégularités observées sur la répartition longitudinale en traceurs, on obtient une progression assez régulière de ce centre de gravité (figure 7,8,9 et 10).

Pour l'immersion no. 1 il n'est pas possible d'utiliser les résultats des détections effectuées au-delà du temps  $T = 18h 15$  min car la plupart des particules marquées ont déjà atteint la fosse aval du canal d'essais et ne participent plus au charriage.

L'écart notable des vitesses calculées pour les immersions 1 et 2 de la série 400 (0,28 et 0,18 m/h) ne peut s'expliquer a priori que par le mode d'immersion adopté dans le 1er cas, puisque par ailleurs les essais relatifs à ces deux traceurs ont été menés simultanément dans le même canal et dépouillés selon le même processus. La première immersion, réalisée ponctuellement à l'aide d'un tube débouché au voisinage du fond, conduit en effet à une dispersion initiale importante des traceurs en

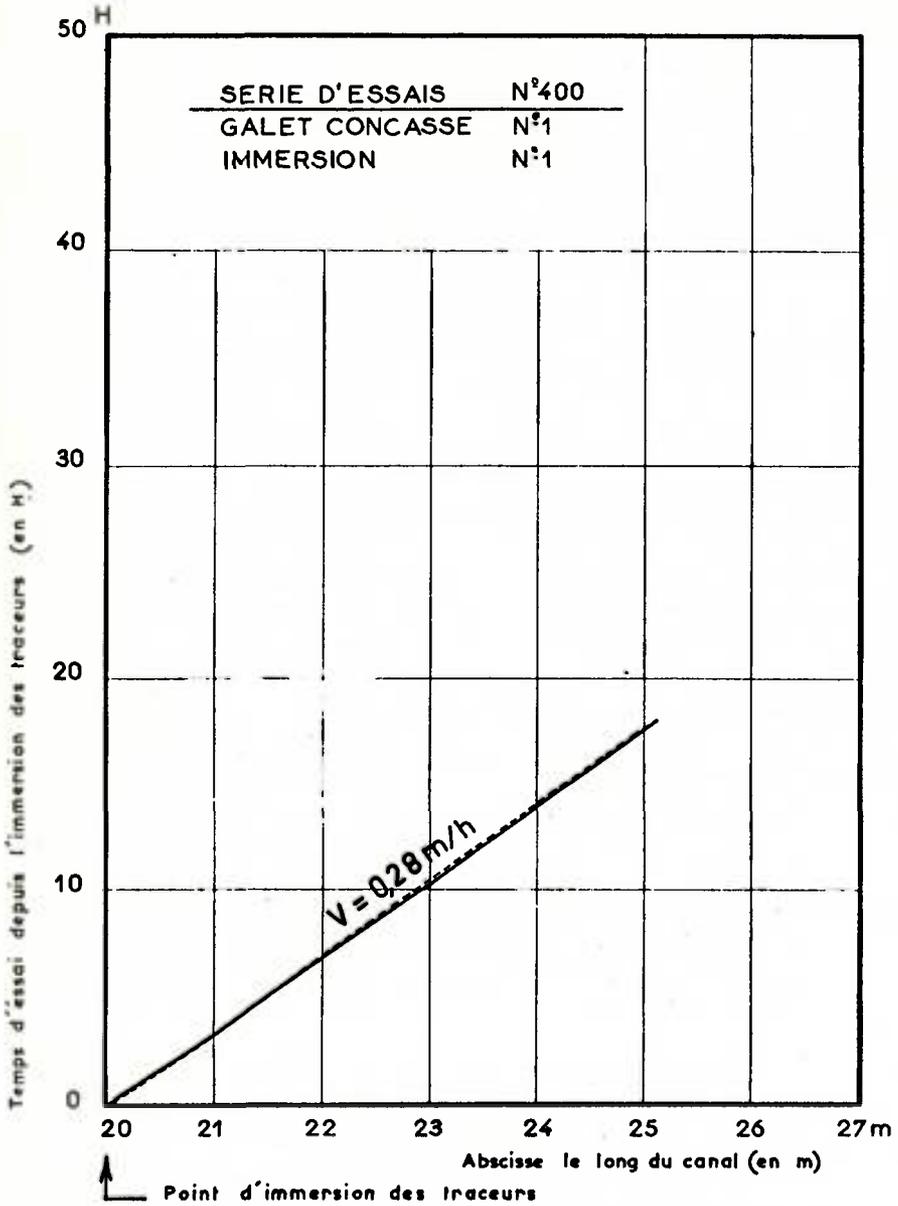


Figure 7 - Progression du centre de gravité du nuage de traceurs.

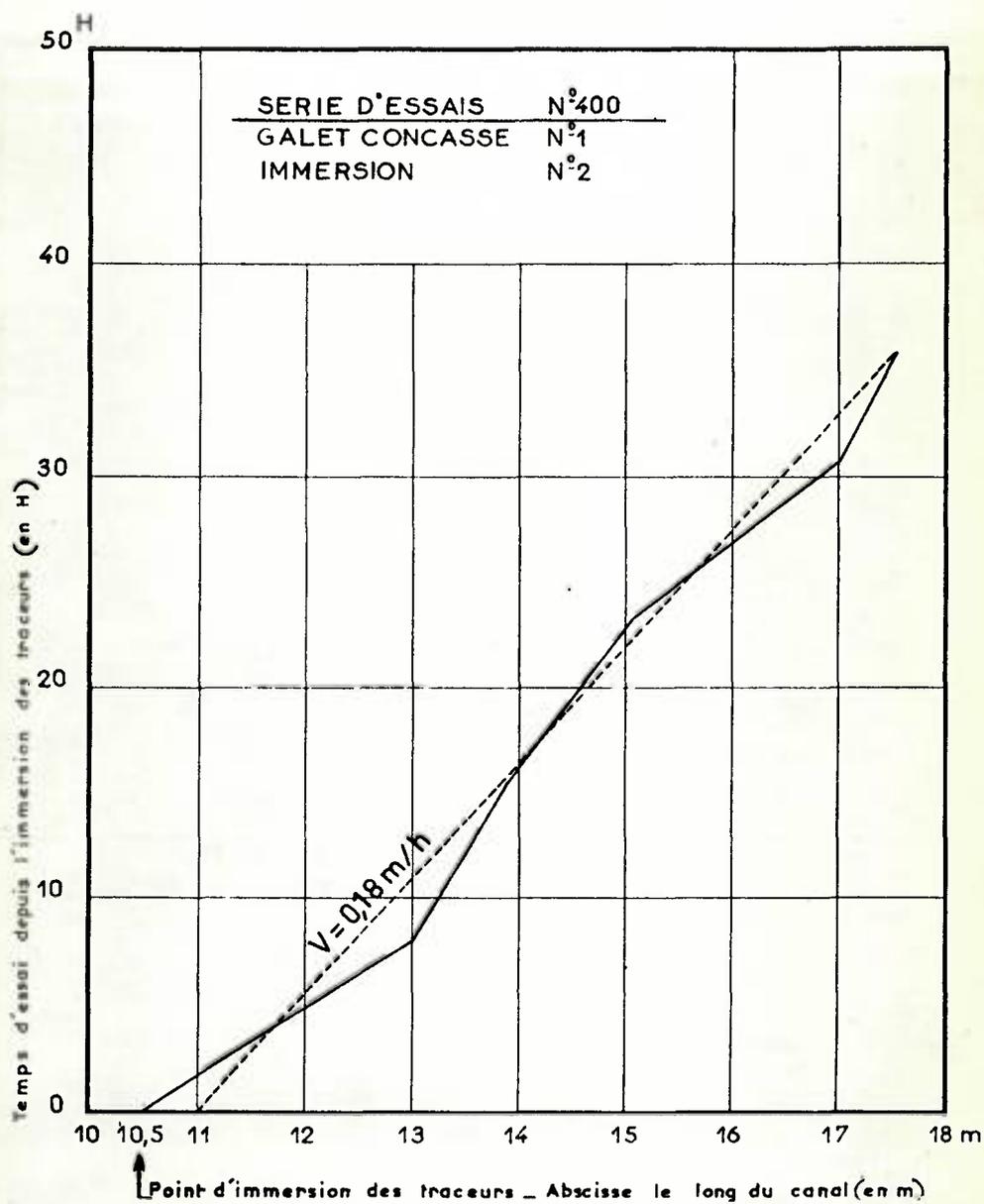


Figure 8 - Progression du centre de gravité du nuage de traceurs.

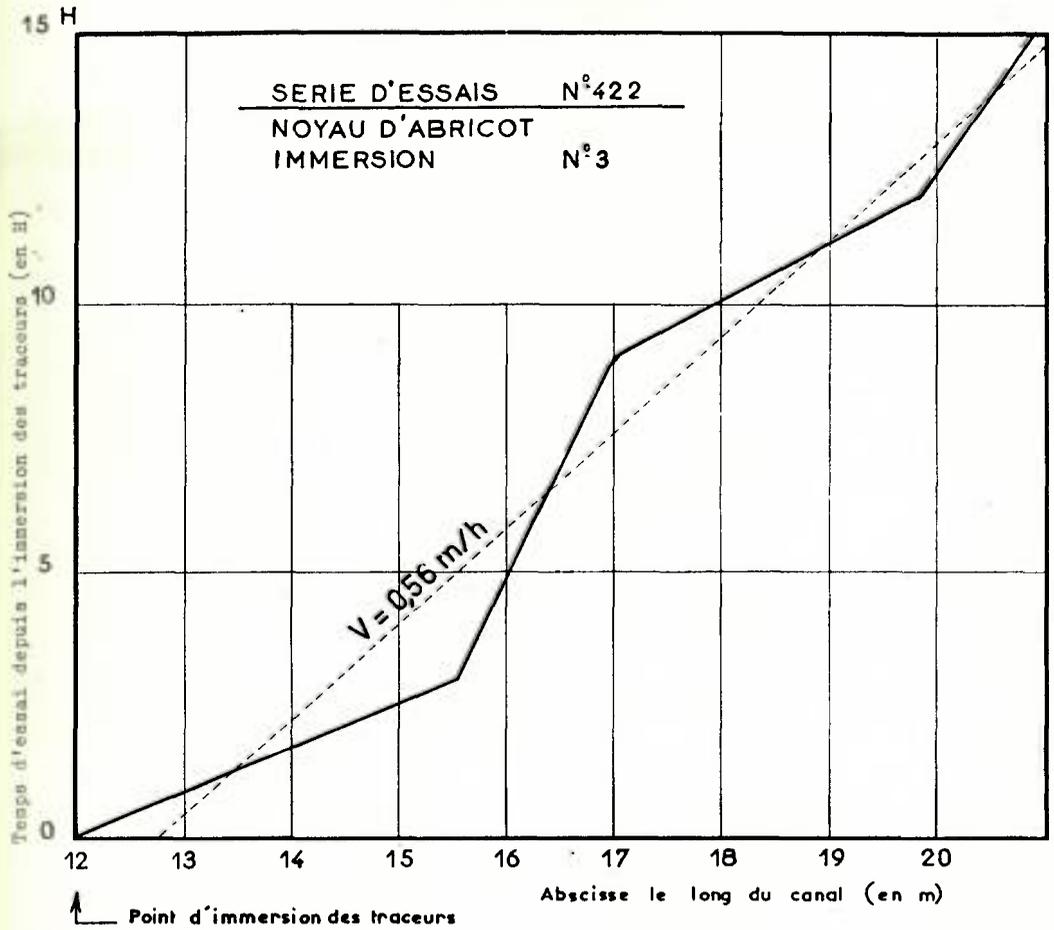


Figure 9 - Progression du centre de gravité du nuage de traceurs.

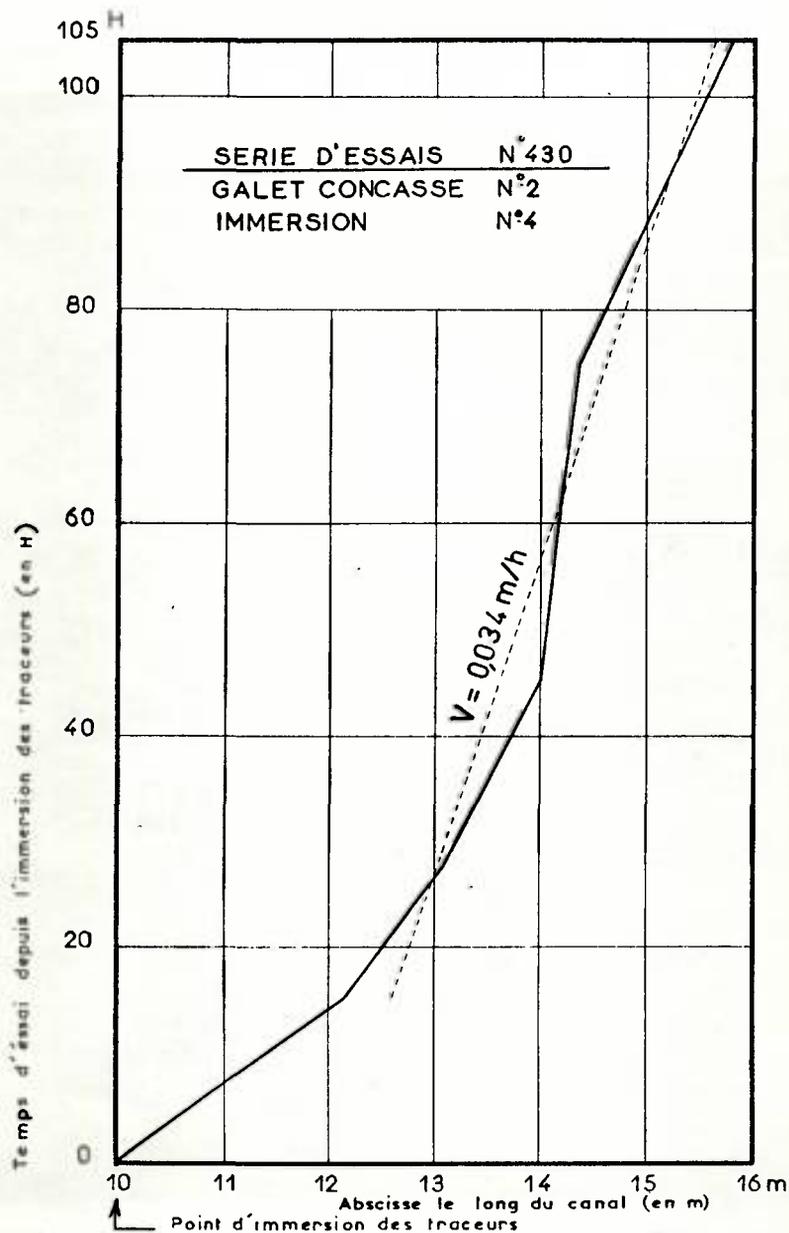


Figure 10 - Progression du centre de gravité du nuage de traceurs.

tout début de l'écoulement.

En ce qui concerne l'immersion no. 3 (figure 9), l'on constate que la vitesse du centre de gravité calculée entre deux détections consécutives peut différer beaucoup de la vitesse moyenne calculée pour la série d'essais complète. Il est donc important de multiplier les détections.

Le mode d'immersion no. 4, par plaques superficielles sur les rides, explique la rapide progression du traceur au cours du premier essai qui pour cette raison, n'a pas été retenu pour le calcul de la vitesse moyenne.

#### 1)2. Épaisseur de la couche de matériau en mouvement:

Le calcul du débit solide à partir de cette vitesse suppose que l'on connaisse ou puisse déterminer l'épaisseur de la couche de matériau en mouvement.

Il est cependant difficile de définir une épaisseur moyenne car, dans le cas d'un transport solide avec rides ou dunes, les ondulations du fond ne sont pas régulièrement réparties.

L'amplitude des rides et dunes déterminée entre crêtes et creux successifs diffère peu de l'amplitude moyenne calculée à partir d'un relevé de fonds complet du canal. Cette amplitude moyenne permettrait de caractériser l'épaisseur moyenne de la couche de matériau participant au charriage si crêtes et creux successifs étaient régulièrement distribués de part et d'autre de la droite moyenne des fonds. Mais ces ondulations d'aspect uniforme se superposent en fait à un système d'ondulations du lit plus importantes (amplitude moyenne double) et de caractéristiques très irrégulières échappant à toute analyse statistique. L'amplitude moyenne des rides et dunes est donc bien plus faible que l'amplitude maximum définie entre crêtes et creux extrêmes, laquelle définit la hauteur maximum de brassage du matériau.

L'épaisseur de la couche de matériau en mouvement à prendre en compte est donc supérieure à l'amplitude moyenne des rides ou dunes. Le débit solide calculé avec ce paramètre est d'ailleurs systématiquement plus faible que le débit solide réellement mesuré (cf tableau no. 5).

Les nombreux carottages effectués dans le matériau de fond font apparaître une certaine hauteur moyenne de matériau en mouvement malgré l'importante dispersion signalée précédemment.

La figure no. 11 indique, à titre d'exemple, les résultats obtenus pour l'immersion de traceurs no. 1. La hauteur "active" moyenne des carottes contenant des traceurs varie peu d'un profil à l'autre, à distance suffisante du point d'immersion des traceurs pour que le brassage vertical ait pu être réalisé; d'autre part les résultats varient peu d'une détection à l'autre.

Les hauteurs actives maximales notées correspondent à l'amplitude maximale des ondulations irrégulières du lit mentionnées auparavant.

### 113. Discussion des résultats:

Le tableau no. 5 ci-dessous donne l'ensemble des résultats obtenus par la méthode du centre de gravité.

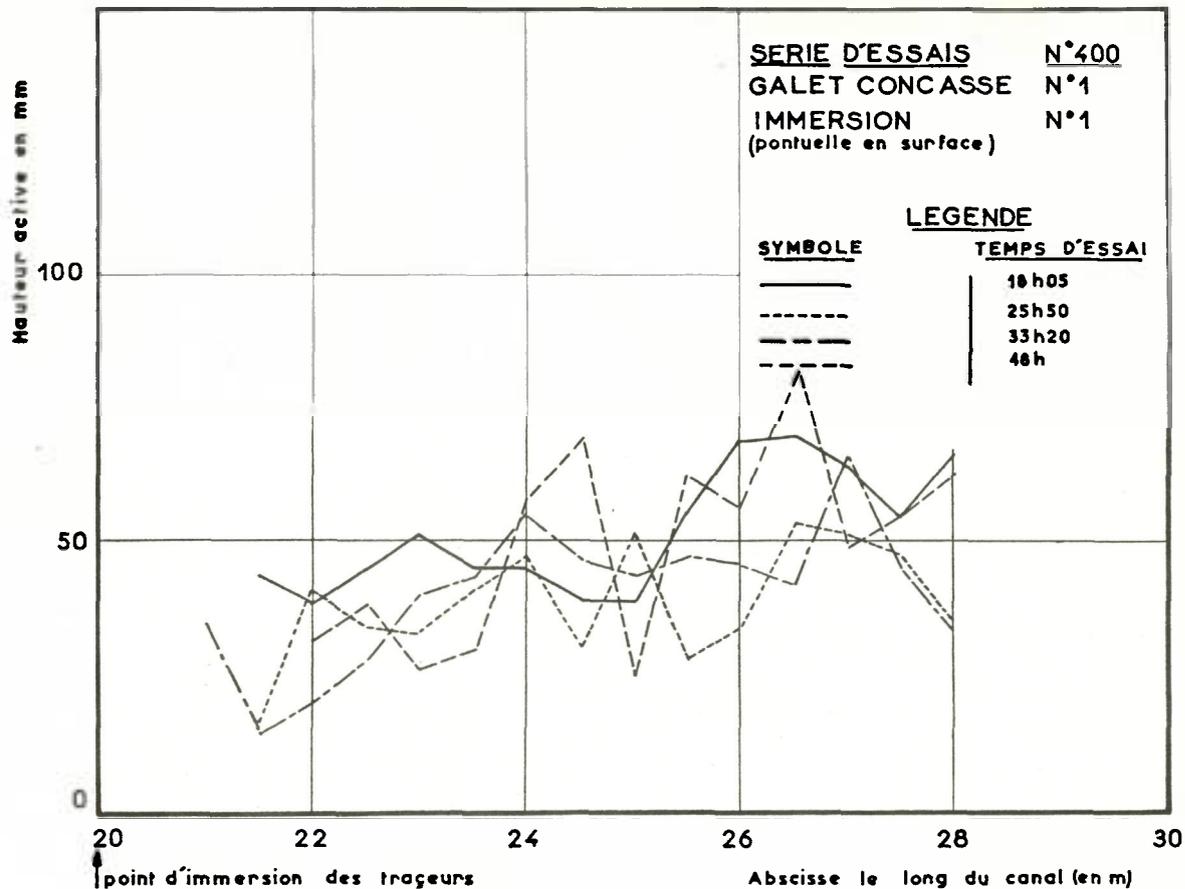


Figure 11 - Hauteur de carottes contenant des traceurs.

Tableau 5

Méthode du centre de gravité - Résultats

Série d'essais no.	Immersion no.	Transport solide avec	Amplitude moyenne des rides ou dunes $H_1$ (cm)	Hauteur active moyenne des carottes $H_2$ (cm)	Vitesse du centre de gravité du nuage de traceurs $V_G$ (cm/h)	Débit solide calculé l/h		Débit solide mesuré l/h
						avec $H_1 V_G$	avec $H_2 V_G$	
400	1	dunes	4,0	5,0	28	17	21	20
	2	dunes	4,0	5,3	18	11	14	20
422	3	dunes	2,9	9,3	56	24	78	71
430	4	rides	1,9	3,3	34	1	1,7	4,5

Dans le cas d'un transport solide avec dunes, les débits solides calculés en adoptant pour épaisseur moyenne de la courbe de matériau en mouvement la hauteur active moyenne des carottes sont en assez bon accord avec les débits solides mesurés. Pour l'immersion no. 1 les résultats sont très satisfaisants, ce qui permet de supposer valable la vitesse de progression du centre de gravité discutée au paragraphe IV.1.1. Aussi l'écart entre les  $V_G$  des immersions no. 1 et 2 serait plutôt imputable à un léger basculement des fonds ayant entraîné un exhaussement des fonds en amont; c'est-à-dire qu'une certaine quantité de traceurs de l'immersion no. 2 aurait cessé de participer au charriage, donc faussé la courbe de distribution longitudinale du traceur en mouvement.

Dans le cas de l'immersion no. 4, avec rides, le débit solide calculé diffère beaucoup du débit solide réel. Un basculement important des fonds observé au cours de ces essais, avec exhaussement amont, en est la cause. L'axe de basculement est situé vers le profil  $x = 21$  m. Comme le centre de gravité des traceurs n'avait pas encore atteint ce profil en fin d'essai, de nombreux grains marqués ont dû se trouver enfouis et immobilisés en dessous de la couche de matériau en mouvement.

Pour les raisons indiquées au paragraphe précédent, l'adoption de l'amplitude moyenne des dunes ou rides comme épaisseur caractéristique de charriage conduit à une estimation par défaut du débit solide.

## 2) Méthode d'intégration

En un profil suffisamment éloigné du profil d'immersion des traceurs, pour que les conditions de bon mélange soient satisfaites, la masse de traceur  $M$  détectée au passage du nuage de particules marquées a pour expression:

$$M = Q_s \int_0^{\infty} C dt$$

$Q_s$  étant le débit solide

et  $C$  la concentration moyenne en traceurs dans le profil considéré au temps  $t$ .

Puisque M est d'autre part la masse de traceur connue injectée (en supposant la saignée d'injection superficielle, c'est-à-dire pratiquée dans la couche de matériau mobile), le débit solide est donné par:

$$Q_S = \frac{M}{\int_a^{\infty} C dt}$$

La vérification de la méthode d'intégration a été effectuée en plusieurs profils transversaux du canal pour lesquels l'on pouvait déterminer l'intégrale  $\int_a^{\infty} C dt$ , c'est-à-dire dans les profils où la presque totalité du traceur était déjà passé. Du fait de la lente progression du point de concentration maximale, l'on se trouve limité à quelques profils proches de la zone d'immersion.

Comme le montre le tableau no. 6, les résultats obtenus par cette méthode ne sont satisfaisants que pour le transport solide avec rides (Immersion no. 4). Le brassage du matériau de fond est en effet particulièrement énergique avec ce mode de charriage et le mélange en traceurs est déjà convenable à 1 mètre seulement du profil d'immersion. Compte tenu de la précision propre à la mesure directe du débit solide l'on peut considérer ces résultats comme très valables.

Pour les trois autres immersions correspondant à un transport solide avec dunes, les débits solides calculés diffèrent beaucoup des débits solides mesurés, Cette divergence tient à deux raisons majeures:

- Les profils de mesures considérés sont trop proches des profils d'immersion des traceurs. Le mélange en traceur est donc loin d'être réalisé sur un parcours aussi limité.
- La courbe d'évolution dans le temps de la concentration en un profil donné doit nécessairement comporter des dents de scie en raison même du mode de charriage discontinu par dunes. Des détectations fréquentes sont donc indispensables pour pouvoir déterminer

Tableau 6

## Méthode d'intégration - Résultats

Série d'essais no.	Immersion no.	Distance du profil de mesure considéré au point d'immersion des traceurs (m)	Q solide	Q solide
			calculé	mesuré
			l/h	l/h
400	1  (dunes)	4	8,2	20
		4,5	4,6	
		5	6,9	
		5,5	12,3	
		6	13,0	
		6,5	8,2	
		<u>Moyenne 8,9</u>		
400	2  (dunes)	1,5	14,0	20
		2	19,9	
		2,5	11,5	
		3	7,4	
		3,5	23,0	
		4	11,8	
		4,5	20,4	
<u>Moyenne 15,4</u>				
422	3  (dunes)	1	364	71
		1,5	69	
		2	228	
		2,5	53	
		<u>Moyenne 178</u>		
430	4  (rides)	1	5,2	4,5
		1,5	5,4	
		2	6,2	
		2,5	3,3	
		<u>Moyenne 5,0</u>		

l'allure moyenne de cette courbe alors que quelques détectations espacées ne permettent pas de déceler avec certitude le passage du centre de gravité du nuage et peuvent entraîner de grandes erreurs. S'il était possible de détecter le passage du nuage de traceurs de façon continue - par des sondes enfouies dans le fond, par exemple, pour des traceurs radioactifs - la méthode serait sans doute susceptible de meilleurs résultats.

#### V. CONCLUSIONS

La méthode du centre de gravité peut donner de bons résultats pour la mesure du transport solide par charriage dans le cas d'un lit avec rides ou dunes, à condition cependant que le lit soit stable et ne bascule pas.

L'amplitude moyenne des rides ou dunes ne correspond pas à l'épaisseur moyenne de la couche de matériau en mouvement.

Il est préférable d'adopter comme épaisseur caractéristique la hauteur active moyenne des carottes grandeurs qui, par ailleurs, présentent l'intérêt d'être plus aisément mesurable sur les cours d'eau naturels.

La méthode d'intégration n'est valable qu'en un profil éloigné de la zone d'immersion des traceurs, ce qui conduit à des temps d'essais très longs. Une détection continue du traceur semble indispensable pour pouvoir déterminer avec précision l'évolution des concentrations en ce profil de mesure.

Méthodes utilisant un traceur fluorescent dans l'étude  
de l'évolution des plages belges

A. BASTIN

Assistant du Professeur Gullentops  
Institut géologique, Louvain

Certains problèmes de déplacement de sables se posent à propos des plages belges; ces problèmes sont de caractère non seulement scientifique, mais aussi pratique, comme par exemple le déconglomement de la plage de Knokke très fréquentée par les estivants. Pour des raisons de sécurité - les touristes étant fort nombreux - il est pratiquement impossible d'utiliser ici des traceurs radio-actifs pour l'étude de ces problèmes. C'est pourquoi on a dû avoir recours aux traceurs fluorescents. Diverses expériences de laboratoire ont été effectuées pour marquer les grains de sable à l'aide de certains produits mentionnés dans la littérature et à l'aide d'autres substances auxquelles sont mélangés les produits fluorescents. Ces différents facteurs susceptibles de jouer un rôle dans le choix d'un produit, tels que le pouvoir de fluorescence, la résistance à l'abrasion, le prix du produit et la facilité de préparation ont été examinés. En ce qui concerne le pouvoir de fluorescence, les meilleurs résultats ont été obtenus à l'aide de certains amidons résistant au lavage, bien que ceux-ci polymérisent à haute température, que leur prix ne soit pas avantageux et que la résistance à l'abrasion ne dure que deux mois environ. Les silicates remplissent en revanche particulièrement bien ces dernières conditions, comme d'ailleurs les résines plastiques, et parmi celles-ci l'aérolite CBU ou mélocol, très utilisé en Angleterre. Actuellement, on trouve sur le marché des traceurs fluorescents fabriqués avec ce mélocol; ces traceurs sont parfaitement au point et présentent toutes les granulométries.

En vue de l'étude du comportement dans la nature, plusieurs expériences ont été effectuées au moyen d'un traceur introduit dans le sable et marqué par un amidon résistant au lavage et par différents produits fluorescents.

Les premiers essais ont été effectués sur la plage non protégée d'Oostduinkerke, située sur la partie occidentale du littoral belge. Plusieurs kilogrammes de traceurs de différentes couleurs ont été déposés sur chaque banc de sable. La dispersion, après une seule marée, est indiquée à la figure 1. Le temps était très calme et c'est dans de telles conditions météorologiques qu'un délavage s'est produit sur cette plage au moment du jusant.

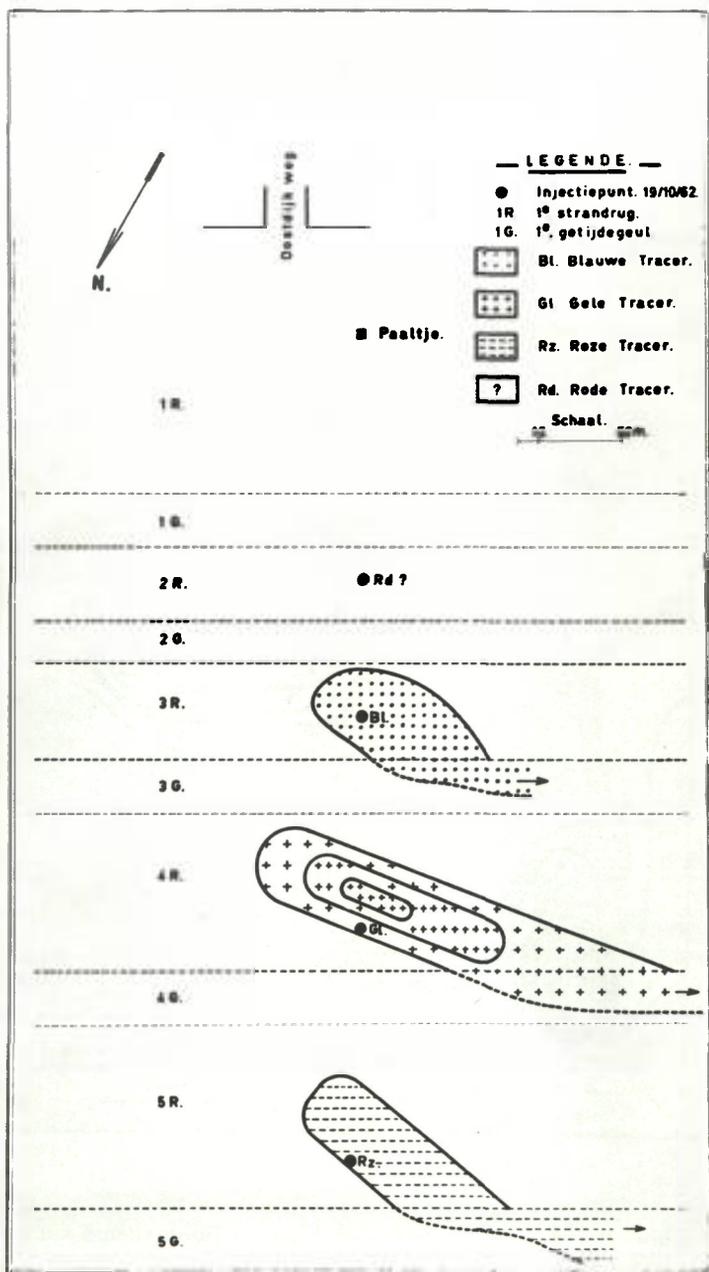
Une expérience a été réalisée ensuite sur la plage protégée de Knokke; il s'agissait de savoir s'il est possible de déterminer les concentrations après différentes marées.

Le comptage des grains a eu lieu pendant la nuit, à marée basse, à l'intérieur de cadres de superficie connue. La dispersion et les différentes concentrations après 2 marées sont représentées à la figure 2.

Le vent soufflait de l'ouest, les vagues se brisaient contre le brise-lames de l'est et, comme on peut le constater d'après la dispersion, le mouvement était dévié à partir des points d'injection. Ensuite le vent a tourné et a soufflé du nord avant la dispersion suivante. Les vagues ont alors été rejetées contre le brise-lames de l'ouest et le mouvement s'est effectué dans le sens inverse des aiguilles d'une montre; c'est ce qu'on constate à la figure 3, qui indique la dispersion des concentrations après 4 marées. Il faut en effet prendre comme référence pour la deuxième dispersion les points de concentration importants après exécution des premières mesures et non les points d'injection. La force des vagues avait aussi légèrement augmenté et les plus hautes vagues, qui n'étaient plus suffisamment déviées, projetaient un peu de sable par-dessus le brise-lames.

Nous ne nous étendrons pas davantage sur ces expériences, qui ont servi de test à la méthode employée.

Pour l'élaboration des résultats que les expériences ultérieures éventuelles pourront nous fournir, c'est à la méthode de Russel, spécialement mise au point à cet effet, que l'on aura recours. Il s'agit là de la méthode des concentrations constantes, avec des injections (semi) con-



**Figure 1** - Essais au moyen de traceurs fluorescents sur la plage non protégée d'Oostduinkerke (Belgique), en 1962.

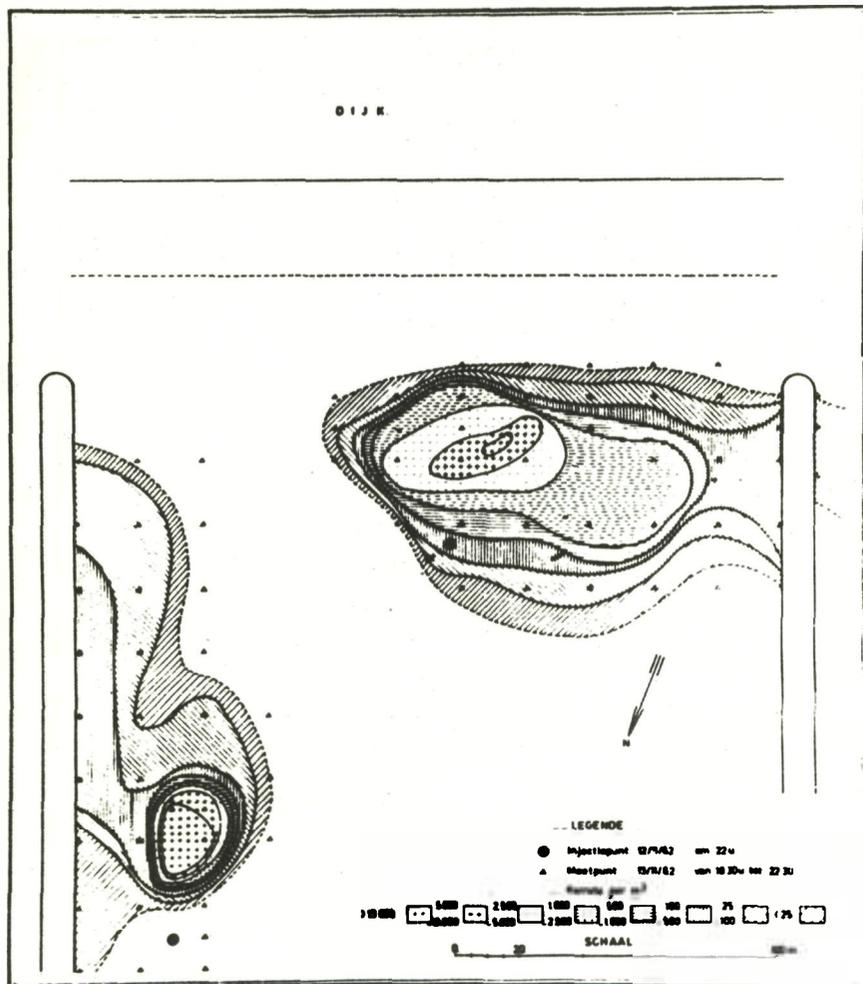


Figure 2 - Essais au moyen de traceurs fluorescents sur la plage protégée de Knokke-Duinbergen (Belgique).

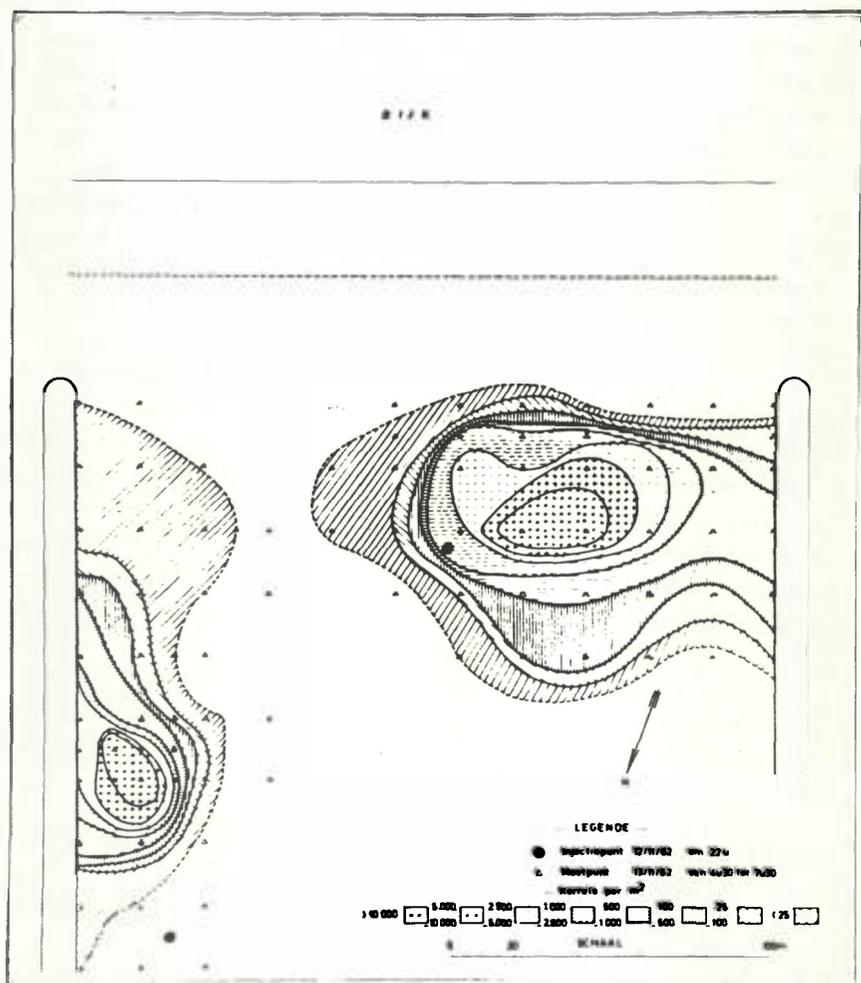


Figure 3 - Essais au moyen de traceurs fluorescents sur la plage protégée de Knokke-Duinbergen (Belgique), en 1962.

tinues, par opposition à la méthode d'intégration. Un grand nombre d'injections d'une quantité déterminée de traceurs sont effectuées à des intervalles de temps réguliers. Les concentrations sont mesurées en amont et en aval du point d'injection lorsqu'elles sont devenues constantes en certains points. Un certain nombre d'hypothèses ont été formulées, dont la principale est que le traceur doit être disséminé d'une manière uniforme par la couche en mouvement. La détermination des concentrations peut avoir lieu directement par comptage des grains fluorescents à la surface.

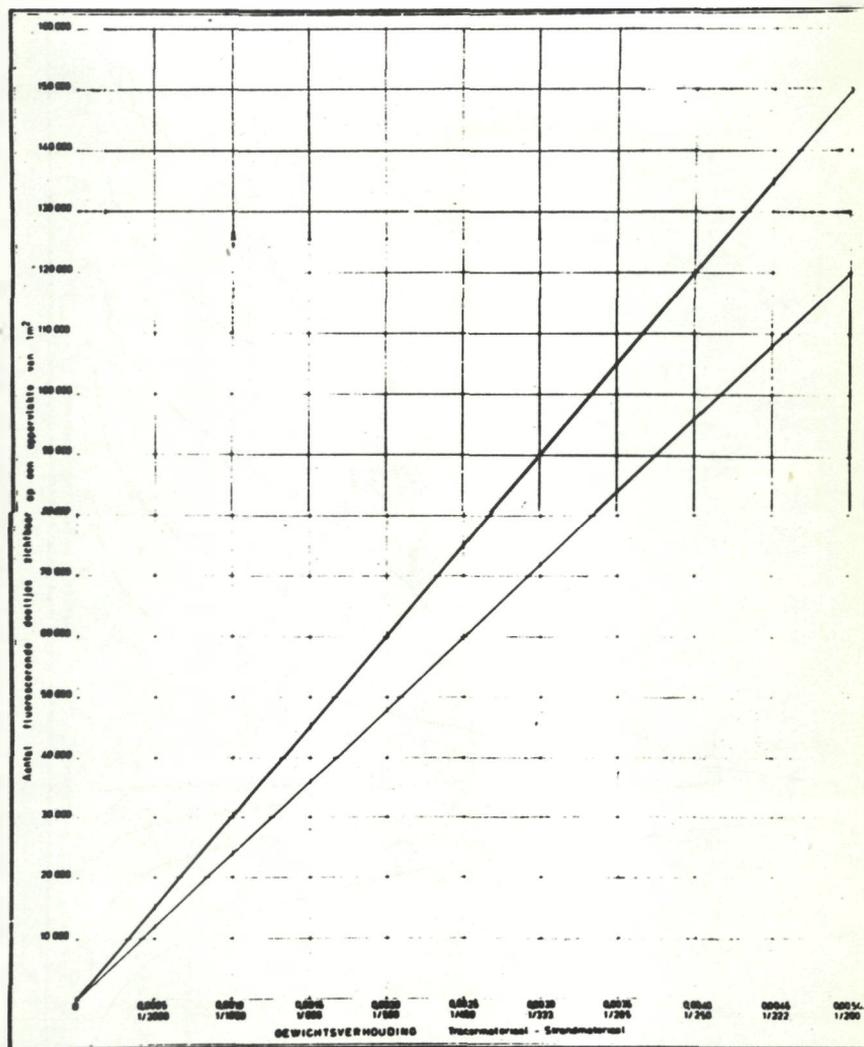
La figure que nous avons établie au laboratoire en mélangeant, dans des proportions différentes, du sable à un traceur indique le rapport direct qui existe entre le nombre de particules visibles par  $m^2$  et leur pourcentage pondéral (Fig. 4).

Afin de pouvoir recueillir également des données quantitatives, des diagrammes ont été établis; ils indiquent le mécanisme théorique de la dispersion après différentes injections. A cet effet, on a construit un modèle mathématique dans lequel le terrain étudié a été divisé en compartiments, à gauche et à droite du point d'injection. Les calculatrices électroniques de l'Université de Louvain ont fourni les chiffres indiquant les possibilités théoriques de dispersion du traceur, après un temps  $t$ , dans  $x$  compartiments.

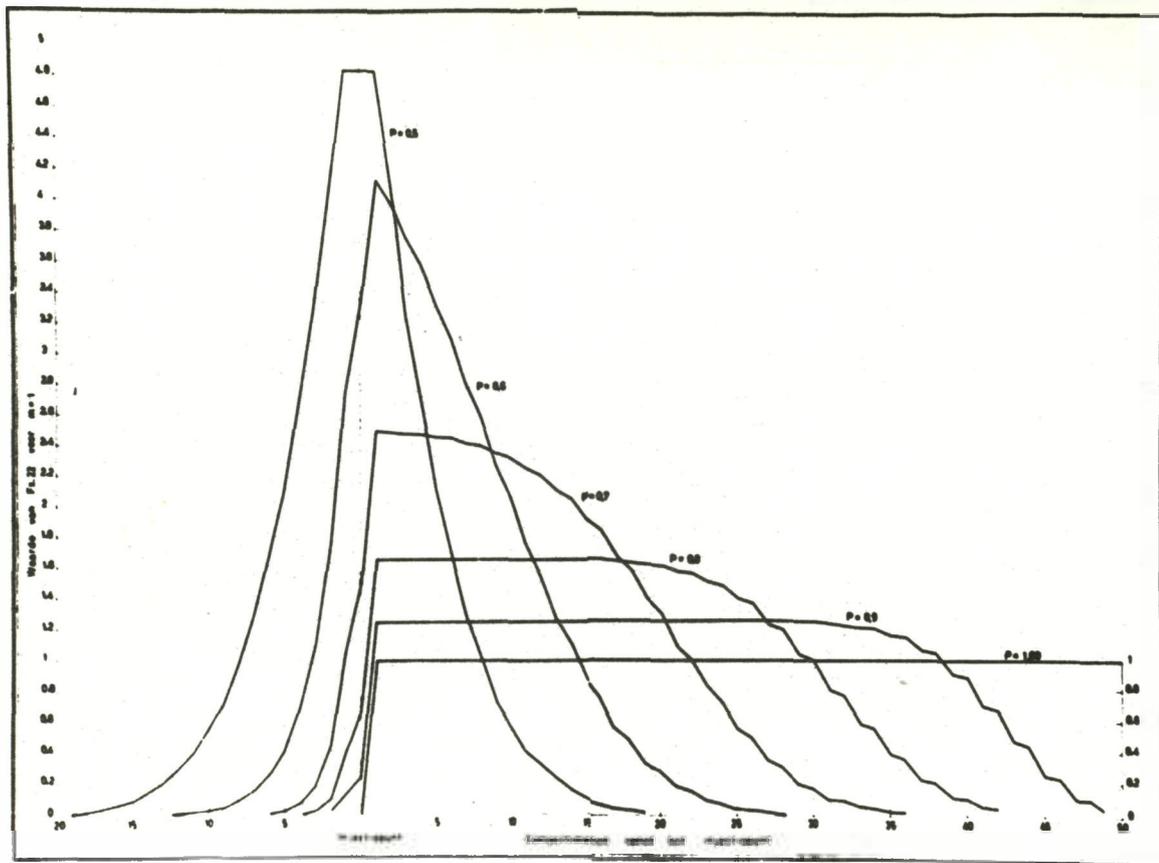
La figure 5 donne des courbes de comparaison pour les 5 rapports de dispersion possibles dans deux directions au bout d'un an, c'est-à-dire après 52 injections hebdomadaires et pour 70 compartiments environ.

La courbe pratique, construite à partir de mesures de concentration sur le terrain, est comparée à ces courbes théoriques; on obtient ainsi des coefficients susceptibles d'être introduits dans une formule générale permettant d'obtenir un aperçu du tonnage de sable déplacé.

Ce procédé d'élaboration de données peut également, moyennant certaines adaptations, être utilisé pour les traceurs radio-actifs.



**Figure 4** - Essais au moyen de traceurs fluorescents en laboratoire. Rapport direct entre le nombre de particules visibles par m<sup>2</sup> et leur pourcentage pondéral.



**Figure 5** - Courbes de comparaison pour les cinq rapports de dispersion possibles dans deux directions après 52 injections hebdomadaires et pour environ 70 compartiments.

## Rapport 7

### Rapport sur l'expérience acquise lors de l'utilisation de méthodes radio-actives dans la Communauté européenne

M. PETERSEN

Landesamt für Wasserwirtschaft  
Schleswig-Holstein, Kiel

Pour la mesure de la cinétique de l'érosion et des mouvements de sable le long de côtes sablonneuses, on a développé une méthode au cours de laquelle le sable de la mer est marqué par du Scandium<sup>46</sup>, tandis que l'indicateur radio-actif est incorporé par diffusion dans le grain, par un traitement thermique. Ce mode de marquage a été élaboré et soumis à des essais dans le laboratoire des Farbwerke Hoechst à Francfort/Main.

Le sable marqué est transporté dans des appareillages spéciaux au lieu d'utilisation.

Pour le transport de 100 kg de sable radio-actif (2-3 curies) il a fallu concevoir et fabriquer deux récipients de sable et un récipient de protection avec les équipements de manipulation nécessaires.

Le sable marqué a été largué à l'aide d'un hélicoptère en un point déterminé du récif. A cet effet, il a fallu construire une traverse spéciale. Dans l'hélicoptère se trouvent les appareillages de mesure, connectés au moyen d'un câble avec la tête de mesure de radiations larguée au fond des eaux. On a construit une sonde de mesure dans laquelle a été monté un compteur à scintillations avec un cristal d'iodure de sodium (thallium) et un analyseur transistorisé d'impulsions à un canal. Aux fins de détecter de manière impeccable le rayonnement naturel et le rayonnement artificiel, on a consacré des soins particuliers à la géométrie des mesures au fond des eaux. Lors de la construction du bâti de la sonde, il a fallu tenir compte de toutes les forces hydromécaniques en jeu dans le déferlement. En outre, il a fallu créer un montage d'amplification et d'enregistrement pour le logement des instruments à bord de l'hélicoptère.

En suite de la capacité de transport limitée de l'hélicoptère, il a été nécessaire de prévoir des constructions d'un poids aussi réduit que possible. Chaque pièce non indispensable a, après un contrôle détaillé, été déterminée et éliminée.

L'hélicoptère communique avec les stations sur terre par radiotéléphonie. Les positions sont relevées par voie géodésique au moyen de théodolites.

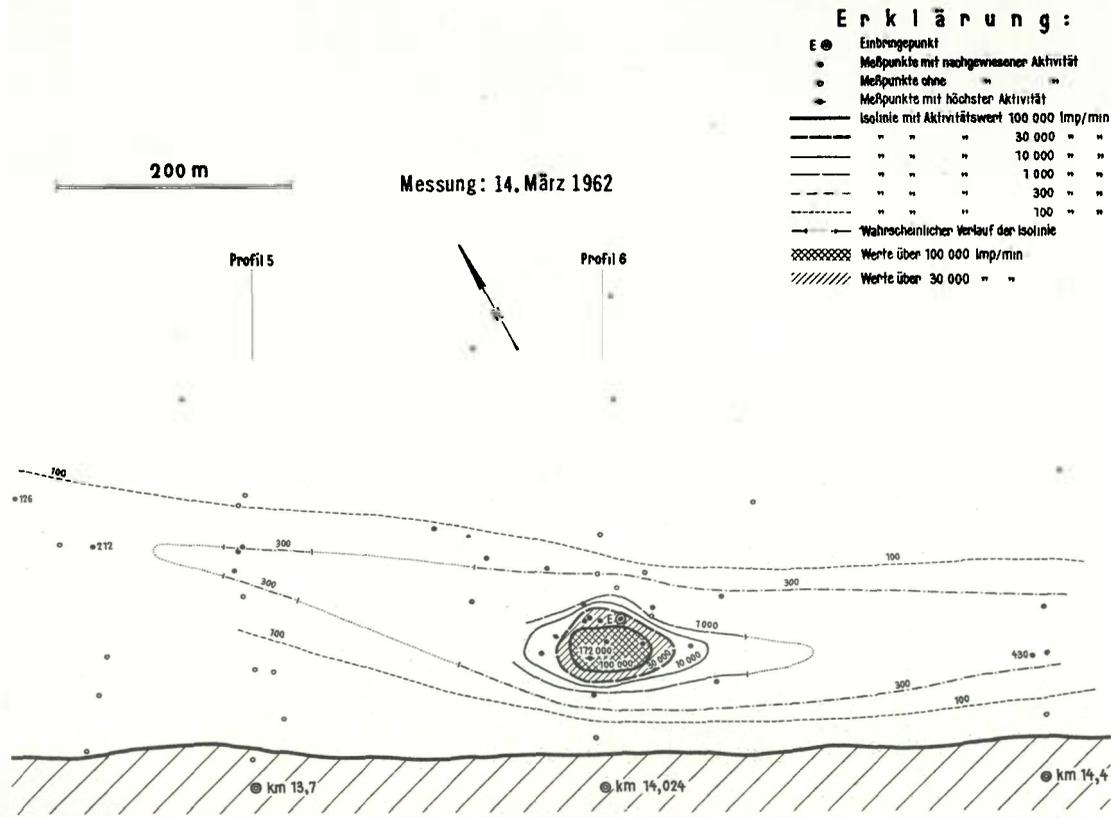
Les mesures sont effectuées par les soins d'un groupe de travail spécialisé comprenant des ingénieurs en hydrologie, des ingénieurs arpenteurs et des ingénieurs-mécaniciens, des radiochimistes, des radiophysiciens et des géologues ainsi que des spécialistes aéronautiques. Ce groupe a procédé à un vaste travail préparatoire et a exécuté les deux premières tranches de la recherche, à savoir :

- I. sur la côte de la mer Baltique, dans des conditions simplifiées  
sur une mer sans marée
- II. sur la côte de la mer du Nord, devant Westerland sur l'île de Sylt avec des marées, la situation atmosphérique étant calme.

La 3<sup>ème</sup> tranche sera mesurée à la fin septembre jusqu'en octobre 1963 devant Kampen sur l'île de Sylt, avec un déferlement qui sera probablement plus intense.

Le programme de mesure a été élargi par l'introduction de recherches, avec des quantités identiques de sable de luminophores dans les mêmes conditions météorologiques, hydrographiques et morphologiques, ceci pour confronter les deux méthodes.

Les résultats des mesures sont traduits par des plans sur lesquels figurent des lignes de même activité artificielle (isolignes d'impulsion).



**Figure 1** - Isolignes d'impulsion du sable de mer marqué - Plage de Stakendorf à la mer Baltique, 1962.



# Iso-Linien des radioaktiv markierten Seesandes

- Ostsee, Stakendorfer Strand 1962 -

Messung: 4. April 1962

## Erklärung:

- E ⊙ Einbringepunkt
- Meßpunkte mit nachgewiesener Aktivität
- Meßpunkte ohne " "
- ⬇ Meßpunkte mit höchster Aktivität
- Isolinie mit Aktivitätswert 100 000 Imp/min
- " " " 30 000 " "
- " " " 10 000 " "
- - - " " " 1 000 " "
- - - " " " 300 " "
- - - " " " 100 " "
- Wahrscheinlichen Verlauf der Isolinie
- ▣ Werte über 100 000 Imp/min
- ▨ Werte über 30 000 " "

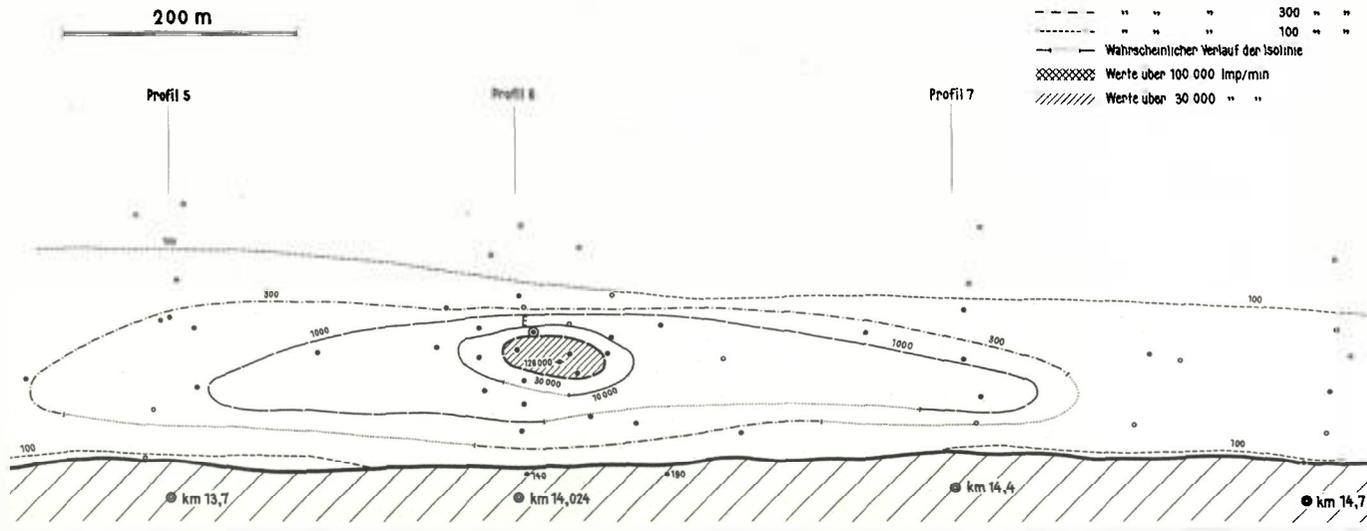


Figure 3 - Isolignes d'impulsion du sable de mer marqué - Plage de Stakendorf à la mer Baltique, 1962.

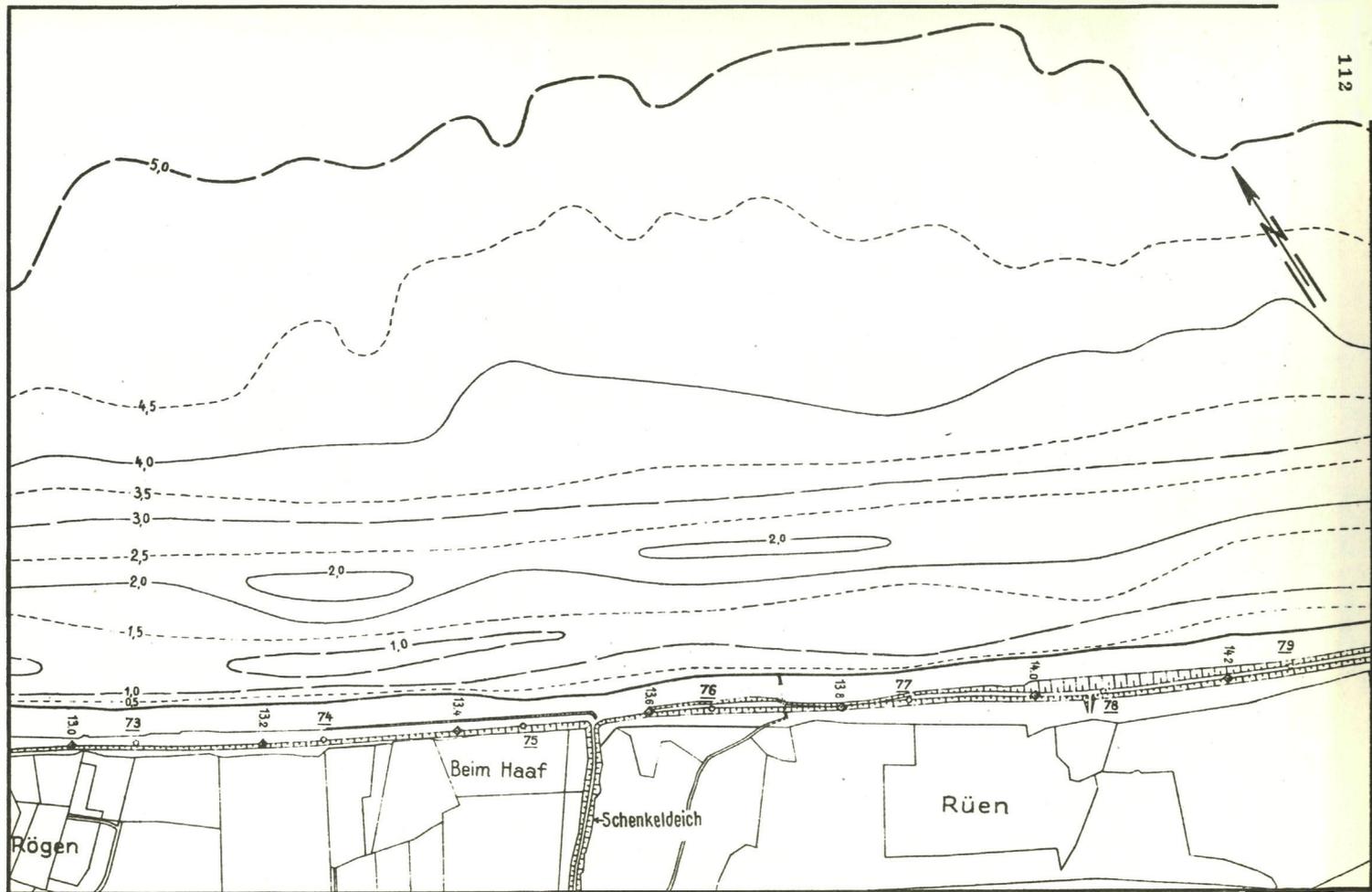


Figure 4 - Plan des profondeurs.

M. 1:5000

Résultats des recherches effectuées à l'aide d'isotopes  
radio-actifs sur les mouvements de sable dans la région côtière  
allemande de la mer du Nord et de la mer Baltique

H. SCHULZ

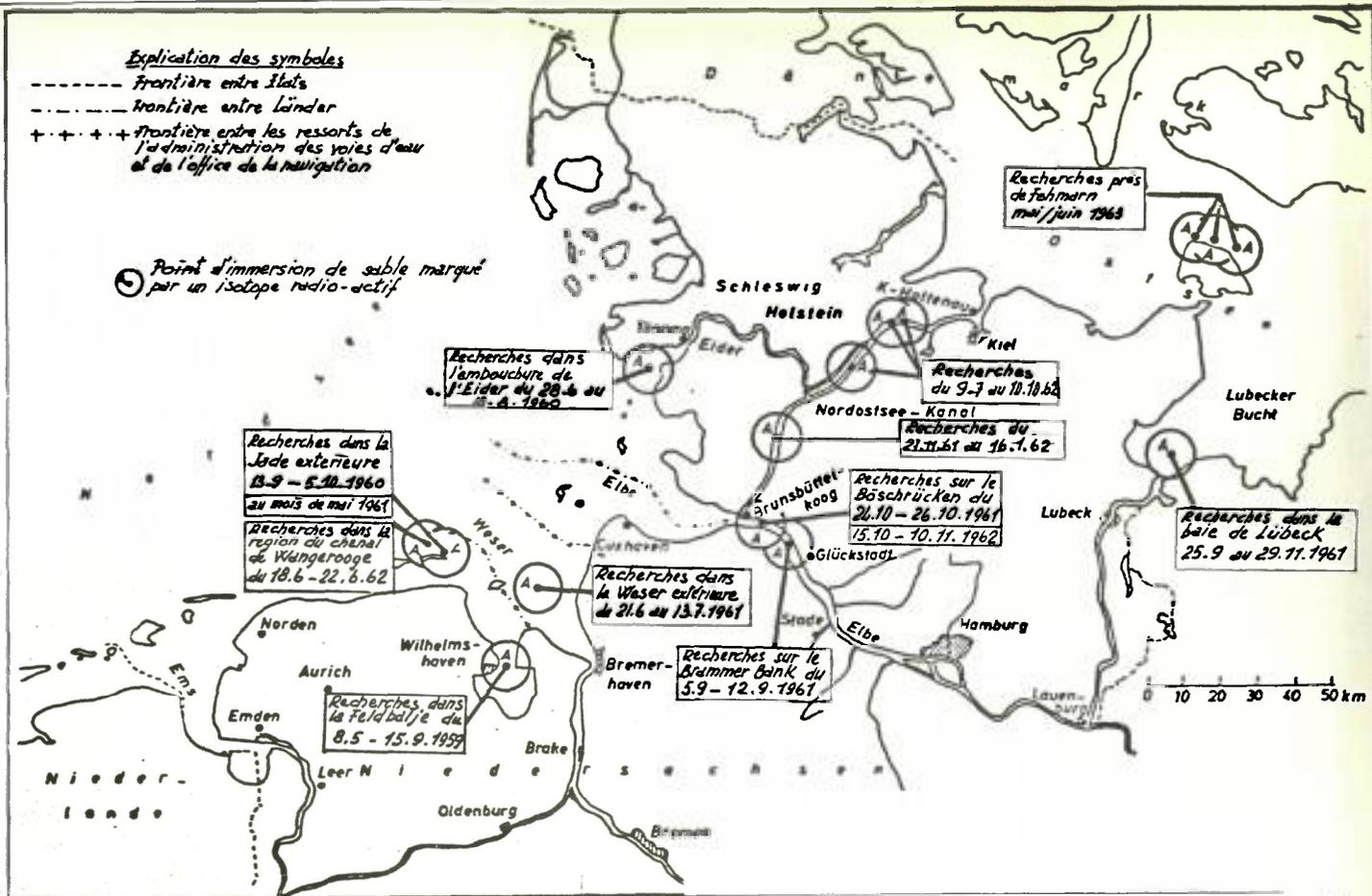
Bundesanstalt für Wasserbau, Hambourg

1. Régions étudiées

L'étude des phénomènes de migration des sables déposés dans la zone avant-côtière de la mer du Nord et de la mer Baltique et qui s'avancent parfois très profondément dans les estuaires des rivières a, depuis toujours, placé les experts allemands en hydraulique devant des problèmes très complexes : ce n'est que depuis peu qu'il est possible, à l'aide d'isotopes radio-actifs, d'étudier avec plus de précision les mouvements de sables dans des zones assez étendues. Jusqu'ici, les recherches ont porté sur les régions suivantes :

- 1959 : 1. La Jade, en amont de Wilhelmshaven
- 1960 : 2. L'embouchure de la Jade, en amont de Wangerooge  
3. L'embouchure de l'Eider
- 1961 : 4. L'embouchure de la Jade, en amont de Wangerooge  
5. La Weser extérieure  
6. L'Elbe inférieure, à hauteur du banc de Brauner  
(Brauner Bank)  
7. L'Elbe inférieure, à hauteur du Böschrücken  
8. La baie de Lübeck - embouchure de la Trave
- 1961/62 : 9. Le canal de la mer du Nord à la mer Baltique, près de  
Grünenthal
- 1962 : 10. L'embouchure de la Jade, en amont de Wangerooge  
11. Le canal de la mer du Nord à la Baltique près de Rendsburg  
12. L'Elbe inférieure, à hauteur du Böschrücken
- 1962 : 13. Le Fehmarn Belt (Baltique)

Les régions étudiées sont représentées au plan d'ensemble  
(Figure 1).



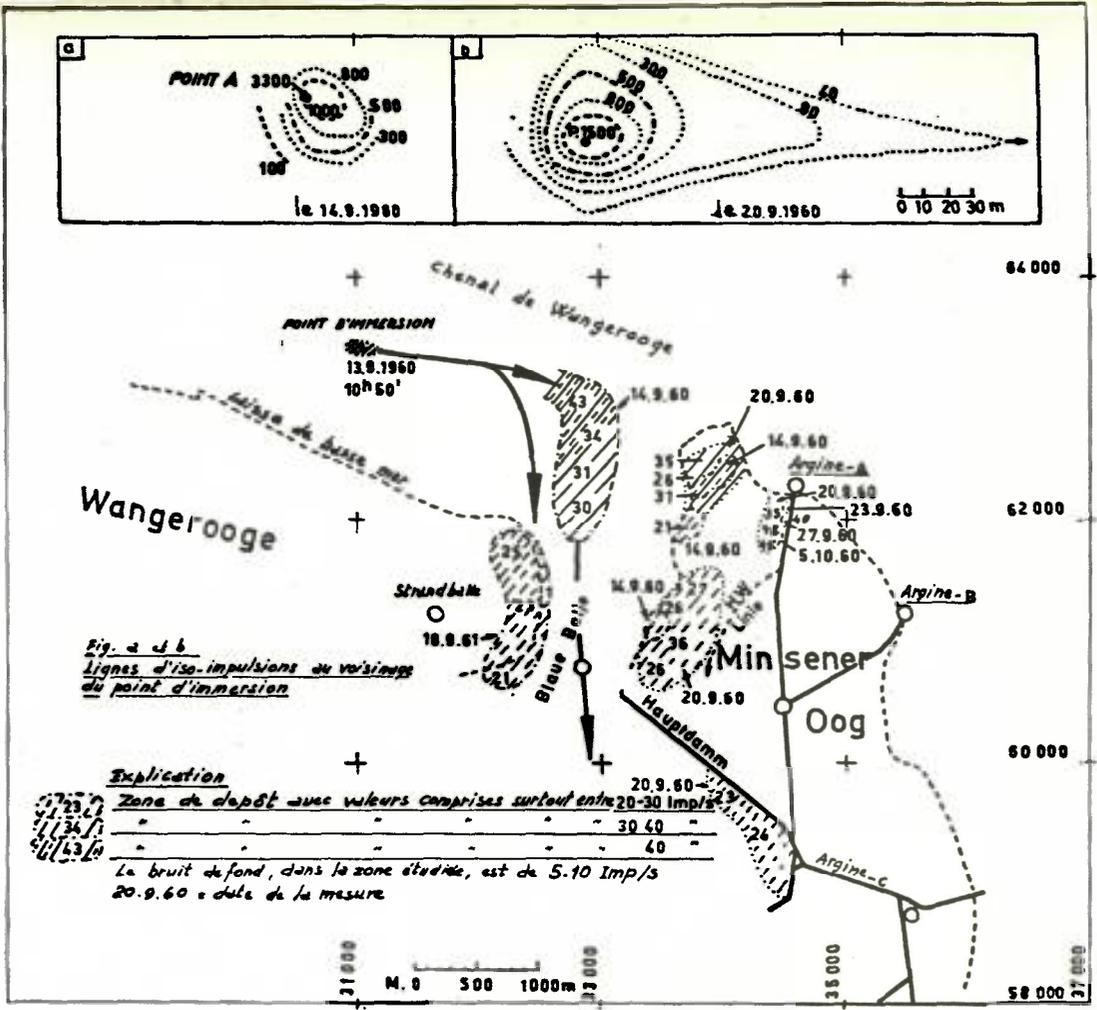
**Figure 1 -** Mesure des mouvements de sable avec des isotopes radio-actifs dans la zone côtière allemande de la Mer du Nord et de la Mer Baltique. Plan d'ensemble.

Au cours des recherches effectuées dans les zones de marées, on a ajouté 5 g de Cr d'une activité totale de 3 curies de Cr 51 à environ 80 kg de sable provenant de la zone étudiée. Les masses de sable ont ensuite été déposées sur le fond de la mer au moyen d'un appareil d'immersion spécialement conçu à cet effet. Cet appareil était constitué par un bâti dans lequel était encastrée une bouteille de verre contenant matériau de recherche. Lorsque l'appareil touchait le fond, la bouteille était brisée sous l'action d'une masse tombante. Depuis quelque temps, on emploie des sachets en matière plastique, qui se dissolvent dans l'eau en l'espace de quelques minutes. L'opération d'immersion devient dès lors très simple et rationnelle. Les mesures d'activité, qui s'étendent parfois sur plusieurs semaines, ont lieu à l'aide d'appareils de prospection de la Firme Prof. Berthold, à Wildbad (Forêt Noire).

Nous n'avons pas l'intention d'entrer dans le détail des résultats expérimentaux des différentes mesures. En principe, on peut dire que, dans les zones susmentionnées, il a été possible, pour la première fois, de suivre avec une précision suffisante l'évolution des mouvements de sables à l'aide de mesures isotopiques. Par la même occasion, on a mesuré les vitesses des courants au moyen de roues à aube. En outre, on a tenu compte du niveau des eaux et de l'influence des vents dans le déroulement des opérations de mesure. Ces différents facteurs ont permis de déterminer avec une bonne précision l'influence des forces en mouvement sur la direction et l'évolution des migrations de sable dans la zone étudiée.

Les résultats de la première étude (1959) ont fait l'objet d'un rapport détaillé dans (1).

Les résultats de la deuxième étude, effectuée dans l'embouchure de la Jade en amont de Wangerooge (1960), sont indiqués à la figure 2.



L'expérience dans l'embouchure de l'Eider (3) et le deuxième essai dans l'embouchure de la Jade (4) ont été infructueux, la bouée n'ayant pas permis de procéder à des mesures après l'immersion du sable.

L'expérience réalisée dans la Weser extérieure (5), sur le banc de Brammer (6), dans la baie de Lübeck (8), dans le canal de la mer du Nord à la mer Baltique (9) et (11), la troisième intervention en avant de Wangerooge (10) ont abouti aux résultats résumés aux figures 3 à 8.

Les études dans le Belt de Fehmarn sont actuellement encore en cours.

## 2. Exemple d'interprétation d'un essai

L'étude, effectuée en automne 1962, des mouvements de sable dans l'Elbe inférieure à hauteur du Böschrücker, près de Brunsbüttelkoog, nous donnera un exemple plus précis de la méthode de mesure et d'interprétation employée.

### 2.1 Travaux préparatoires et immersion du sable

Environ 40 kg de sable, provenant de la zone de recherche, ont fait l'objet, dans le laboratoire flottant, d'un traitement préparatoire selon la méthode décrite dans le rapport (1/5a.01). Puis on a ajouté à ce sable environ 5 g de chrome d'une activité totale de 3 curies. Le 15.10.62, à l'heure de l'étalement de flot, le sable a été emballé dans des sachets en plastique solubles dans l'eau et un navire a, à l'aide de paniers spéciaux, déposé les sachets au fond de la mer. Pour retrouver et pour suivre le trajet du sable marqué, on s'est servi d'appareils de prospection de la Firme Prof. Berthold (Rapport 1/5a01). Aux endroits peu profonds, on a utilisé des appareils équipés de paniers de protection.

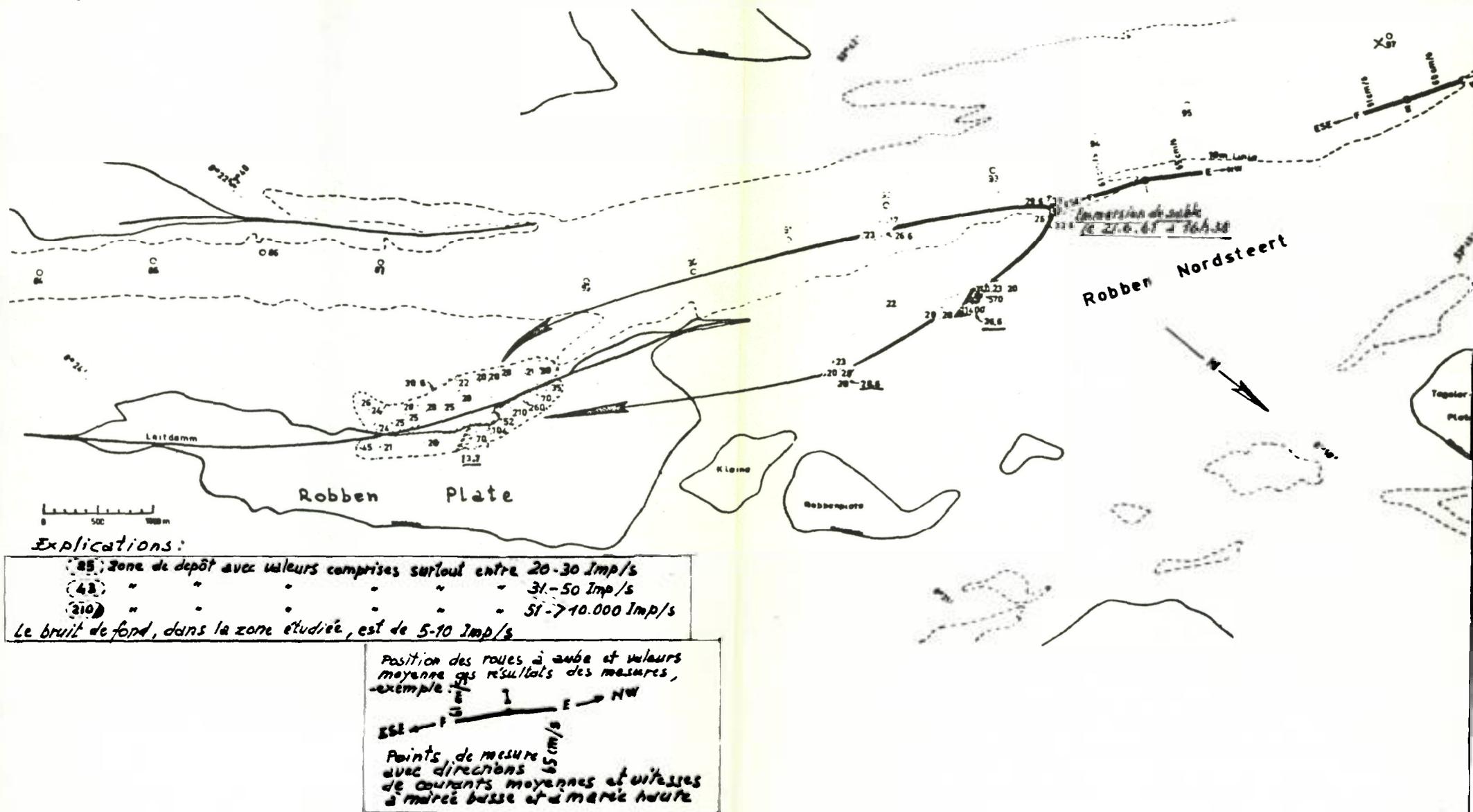


Figure 3 - Résultats des mesures d'impulsion : mesures des mouvements de sable avec des isotopes radio-actifs dans le Weser extérieur, en juin-juillet 1961.

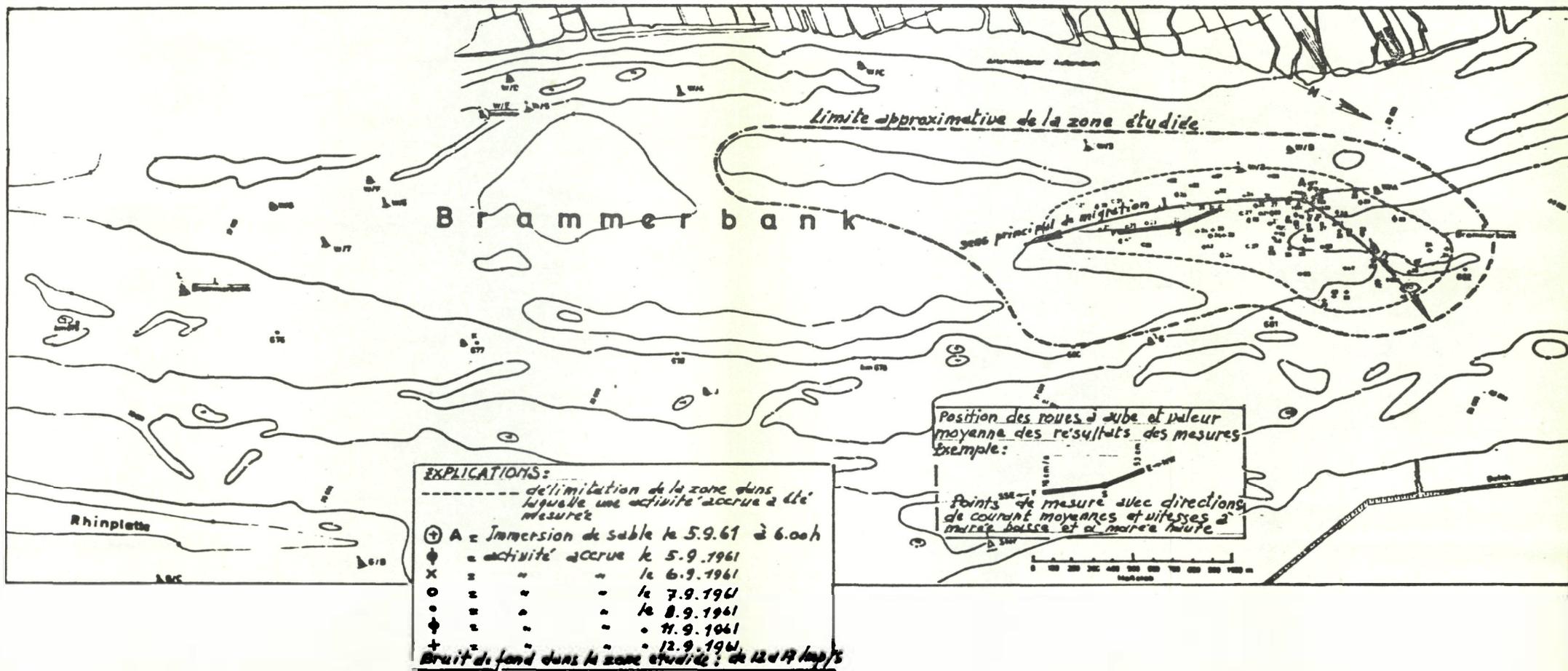


Figure 4 - Résultats des mesures d'impulsion : mesures des mouvements de sable à l'aide d'isotopes radio-actifs dans l'Elbe inférieure à hauteur du Brammerbank, septembre 1961.



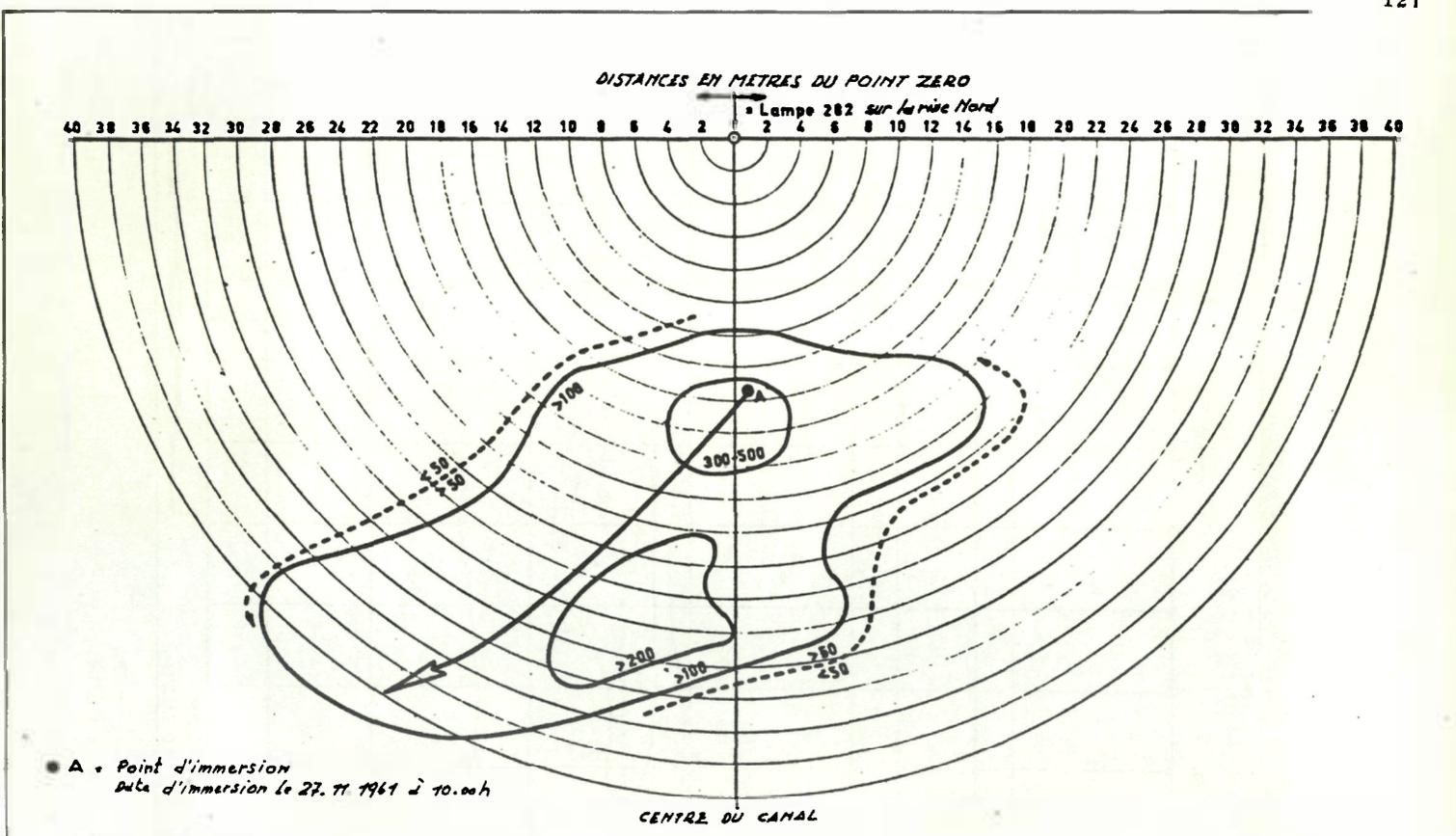


Figure 6 - Résultats des mesures d'impulsion : mesures des mouvements de sable dans le canal de la Mer du Nord à la Mer Baltique, au km 25, 8, le 9 janvier 1962 (43e jour après l'immersion).

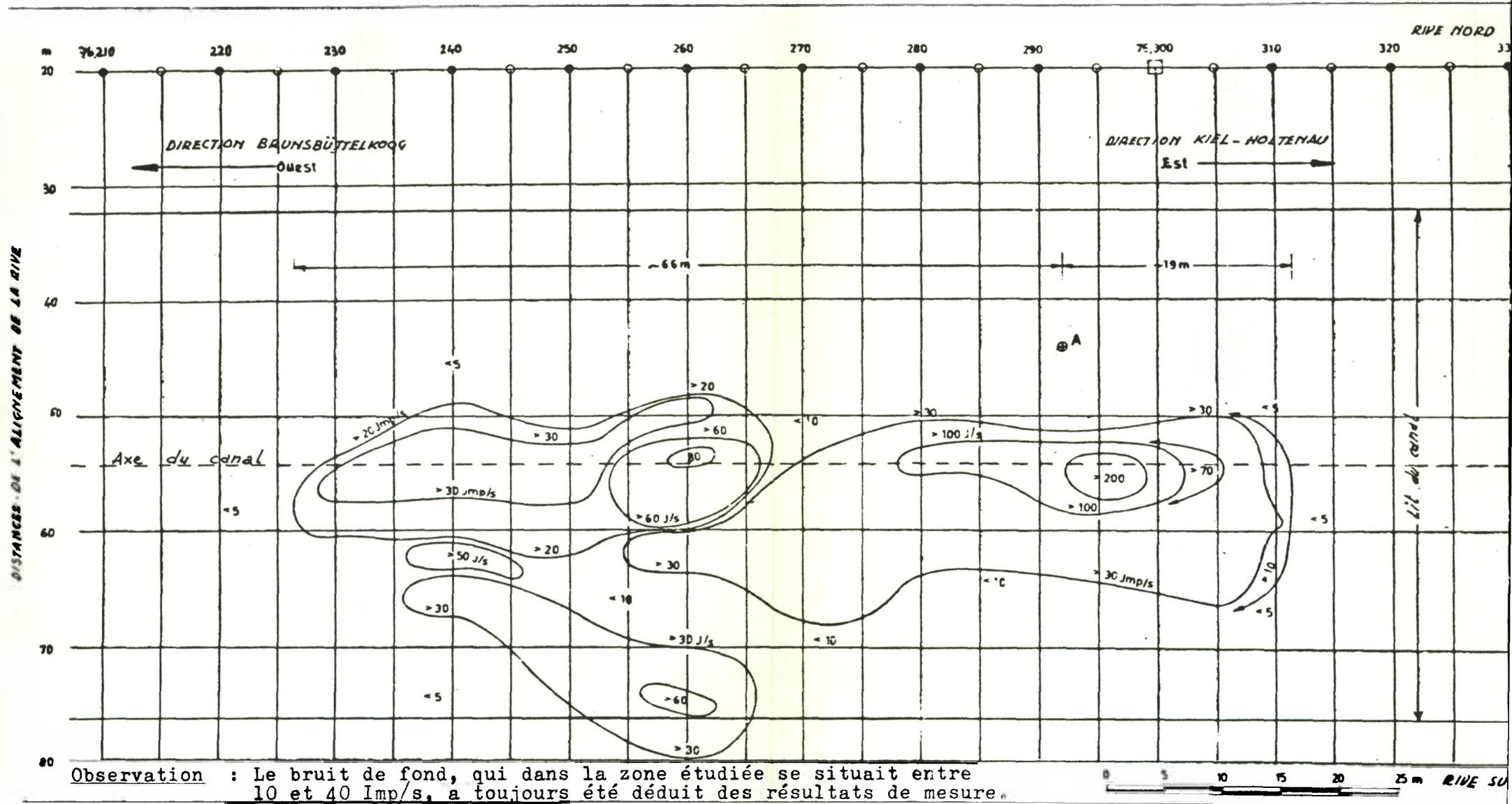


Figure 7 - Résultats des mesures d'impulsion : mesures des mouvements de sable le long de la rive sud de l'Elbe.



Aux endroits profonds, ces appareils détecteurs ont été traînés sur le fond de la mer dans un chariot de mesure spécialement conçu à cet effet (rapport / 1.5.4.01)

### 3.2 Résultats des mesures des mouvements de sable

On a d'abord mesuré le bruit de fond. Dans la zone étudiée, où le fond était surtout sablonneux, le bruit de fond était de 15 à 20 impulsions/seconde, sur la rive sud de l'Elbe, dans des zones à fond partiellement boueux, il pouvait atteindre jusqu'à 30 impulsions/seconde. Lorsque, après immersion du sable marqué et compte tenu de la décroissance dans le temps de l'intensité d'irradiation (constante radio-active; la période du Cr 51 est de 28 jours), les valeurs mesurées dépassaient 30 impulsions/seconde pour un fond sablonneux et 50 impulsions/seconde dans les zones vaseuses, on pouvait admettre avec certitude qu'il s'agissait de sable marqué retrouvé.

La figure 9 donne les résultats des mesures par impulsions, les points caractérisés par un signe spécial - accompagné de la valeur de la mesure d'impulsion - représentant les endroits où des activités accrues ont été décelées à une date déterminée. Les zones d'activité accrue ont été délimitées dans le plan et hachurées, ce qui permet de mieux les distinguer. La zone étudiée a également été délimitée. Elle a fait chaque jour l'objet d'une prospection systématique, pour autant que les marées le permettaient. La figure 9 n'indique que les valeurs correspondant à une activité d'irradiation accrue et qui présentent donc de l'importance pour l'interprétation des mouvements de sable.

Lorsque les marées le permettaient, la zone recouverte par le sable immergé a été systématiquement mesurée au niveau du Böschrücken, qui se découvrait à marée basse. Les résultats sont traduits sur les figures 10 et 11 par des courbes d'iso-impulsions. Lors de ces mesures, le bruit de fond a



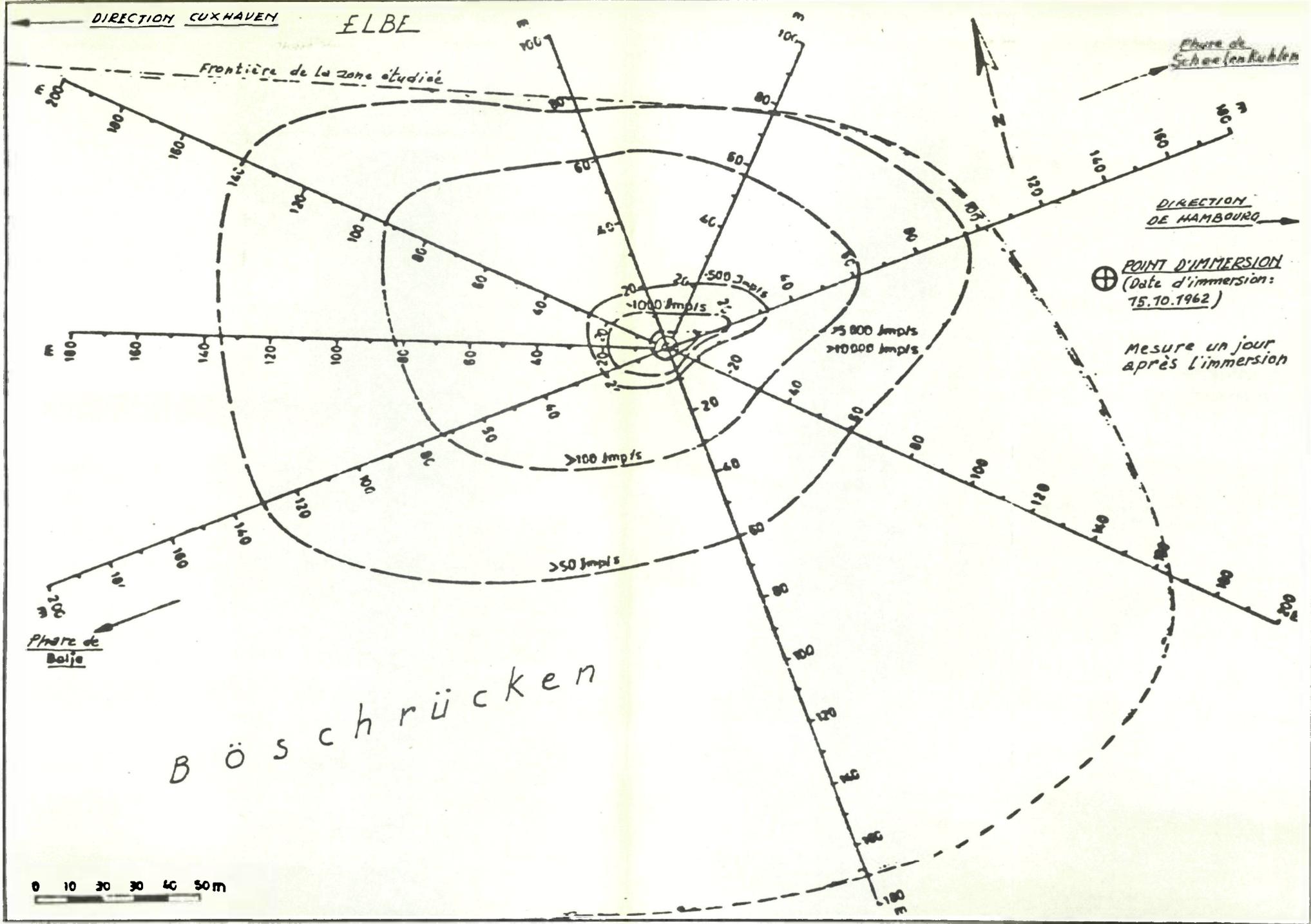


Figure 10 - Résultats des mesures d'impulsion au point d'immersion : mesures des mouvements de sable dans la région du Böschrücken de l'Elbe inférieure, octobre-novembre 1962.

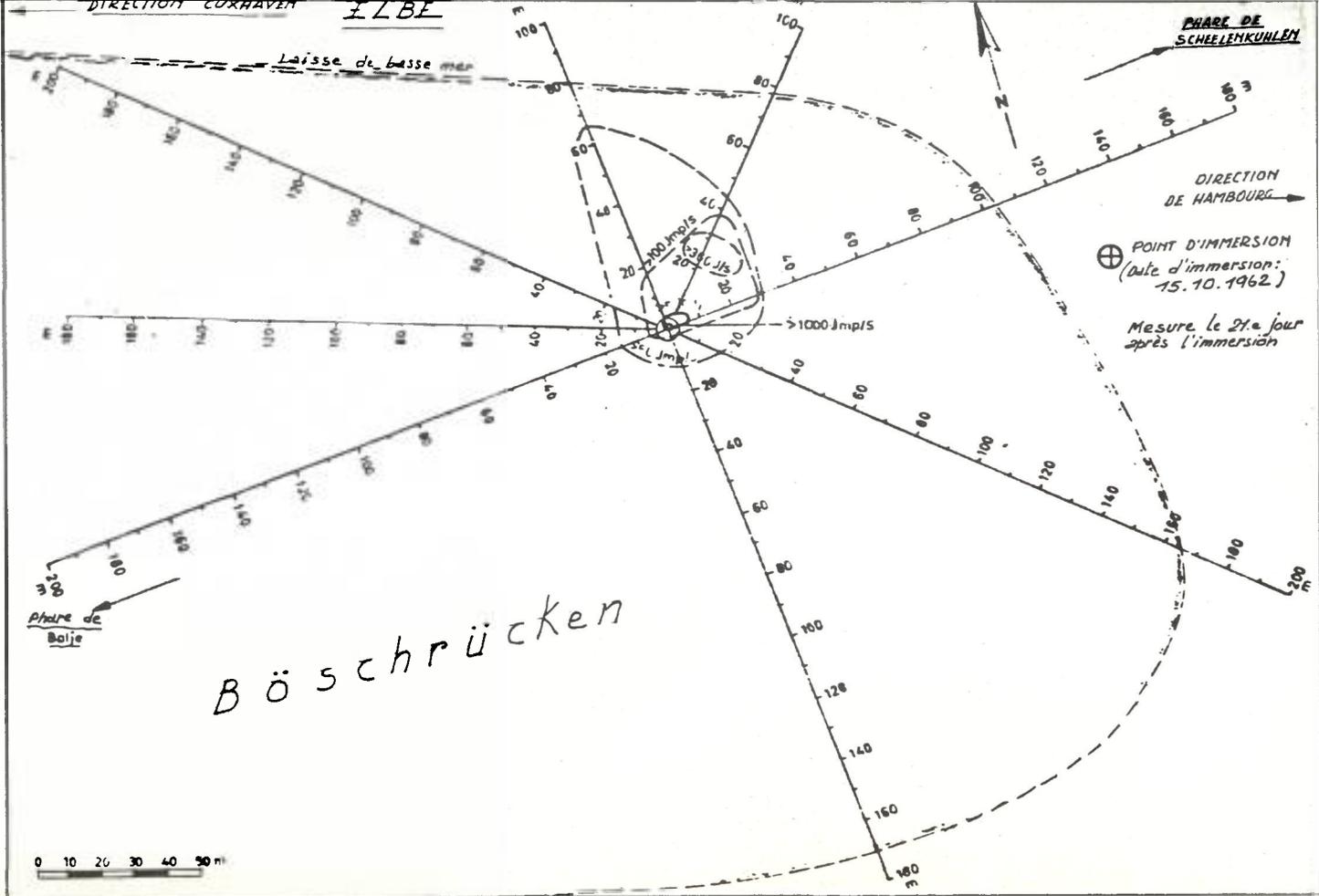


Figure 11 - Résultats des mesures d'impulsion au point d'immersion : mesure des mouvements de sable dans la région du Böschrücken de l'Elbe inférieure, octobre-novembre 1962.

donné des valeurs plus élevées, ce qui tient au fait que l'appareil de prospection ne se trouvait pas dans un panier protecteur et que l'eau n'agissait plus comme écran. Dans ce cas, on a adopté, comme seuil inférieur pour le sable marqué, un taux de comptage de 50 Imp/s.

Pour l'étude des mouvements de sable dans la région du BÜschrücken, il est utile d'examiner tout d'abord les résultats des mesures d'impulsions au point d'immersion. La figure 10 montre l'évolution le premier jour après l'immersion. Au point d'immersion même, on a relevé des taux d'impulsion supérieurs à 10.000. Le sable s'est propagé en direction du nord, où il a pu être décelé jusqu'à la ligne d'étiage de l'Elbe, principalement en direction de l'ouest, donc vers Cuxhaven. Le deuxième jour après l'immersion, la forme des isolignes et, dès lors, de la zone du sable marqué radioactivement, était plus compacte que le jour précédent. Les constituants fins du sable examiné sont emportés et entrent en suspension. Ici également, la propagation se fait principalement en direction du nord et de l'ouest. L'évolution, jusqu'au neuvième jour après l'immersion, est la même. On note toujours des taux d'impulsion très élevés au point d'immersion; 21 jours après l'immersion, la zone du sable marqué s'était, certes, contractée, mais son extension était toujours d'environ 40 x 70 m (Fig. 11).

Au point d'immersion, on a encore enregistré des taux d'impulsion relativement élevés. La tendance de la direction de migration est alors plus au nord, vers la laisse de basse mer. En résumé, on peut dire, en ce qui concerne les conditions au point d'immersion :

- a) il ne se produit pas de mouvements de sable sur le BÜschrücken en direction sud;
- b) le mouvement principal de migration est dirigé, d'une part, vers le nord, donc à partir du Rücken vers le

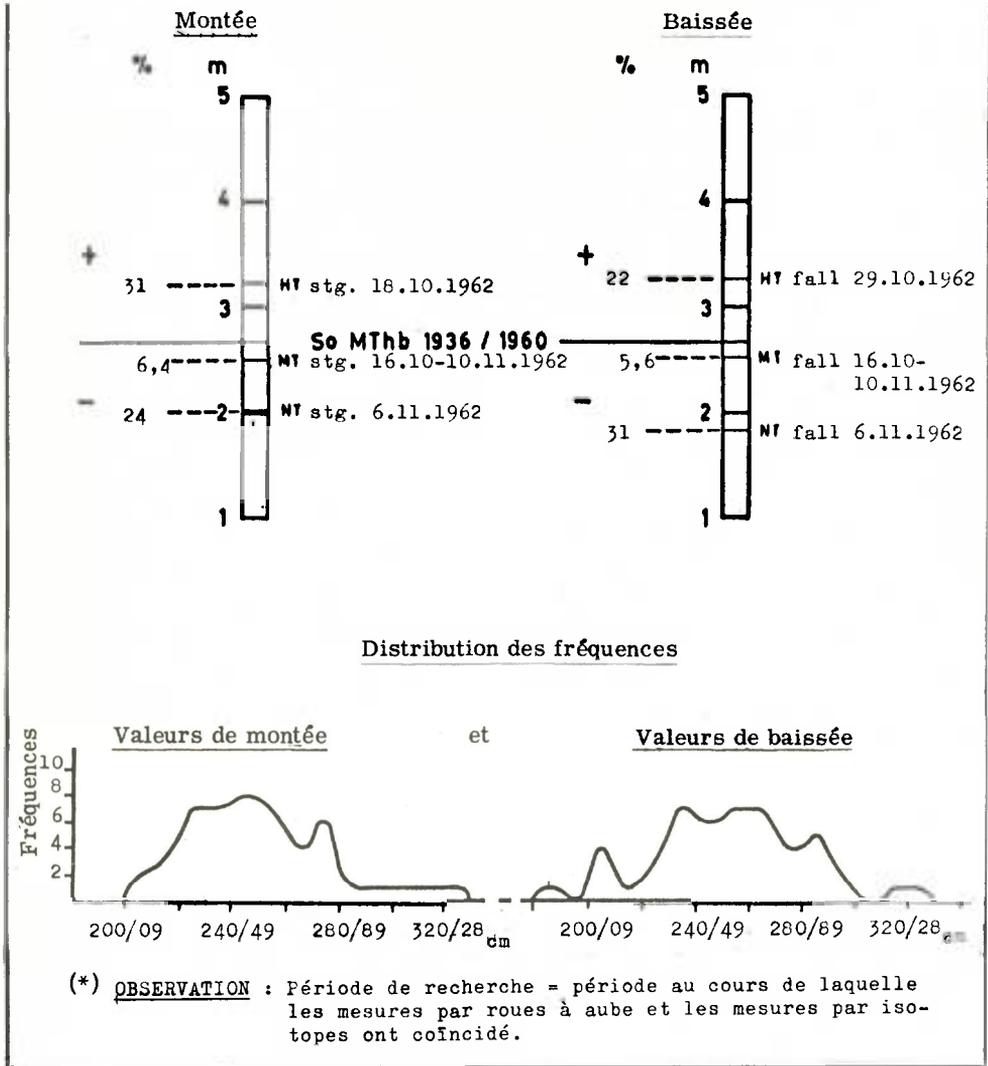
chenal et, d'autre part, le long du Rücken, dans le sens du courant de l'Elbe;

- c) des quantités assez grandes de sable, probablement les particules les plus fines du sable immergé, sont charriées avec une certaine rapidité;
- d) une certaine quantité du sable plus grossier reste pendant longtemps au point d'immersion.

La figure 9 donne une vue d'ensemble des résultats des mesures d'impulsions qui confirme clairement les mécanismes de migration constatés au point d'immersion. Au cours de la période de recherche, c'est-à-dire du 15.10 au 20.11.1962, on a constaté très nettement la présence de deux voies de migration presque parallèles en direction de l'ouest, la principale étant celle qui longeait le côté sud du Rücken. Les phénomènes morphologiques, caractérisés par la présence d'un chenal au nord-est de la balise B et le déplacement vers l'ouest du Rücken, ont été confirmés par les résultats des mesures. C'est surtout grâce aux mesures effectuées les 25/26.10, 5/6.11 et 20.11 que ces phénomènes ont pu être constatés.

### 2.3 Niveau de l'eau et courant

Pour avoir un aperçu des corrélations qui existent entre les mouvements de sable et le courant ainsi que des phénomènes hydrologiques intervenus au cours de recherches, on a comparé à la fig. 12 les valeurs caractéristiques de montée et de baisse avec les valeurs relevées au cours de plusieurs années sur une échelle de marée (hydromètre) située à proximité de la zone étudiée (Brunsbüttelkoog). On est parti à cet égard du point de vue que les valeurs de montée et de baisse étaient, en première approximation, caractéristiques de la vitesse



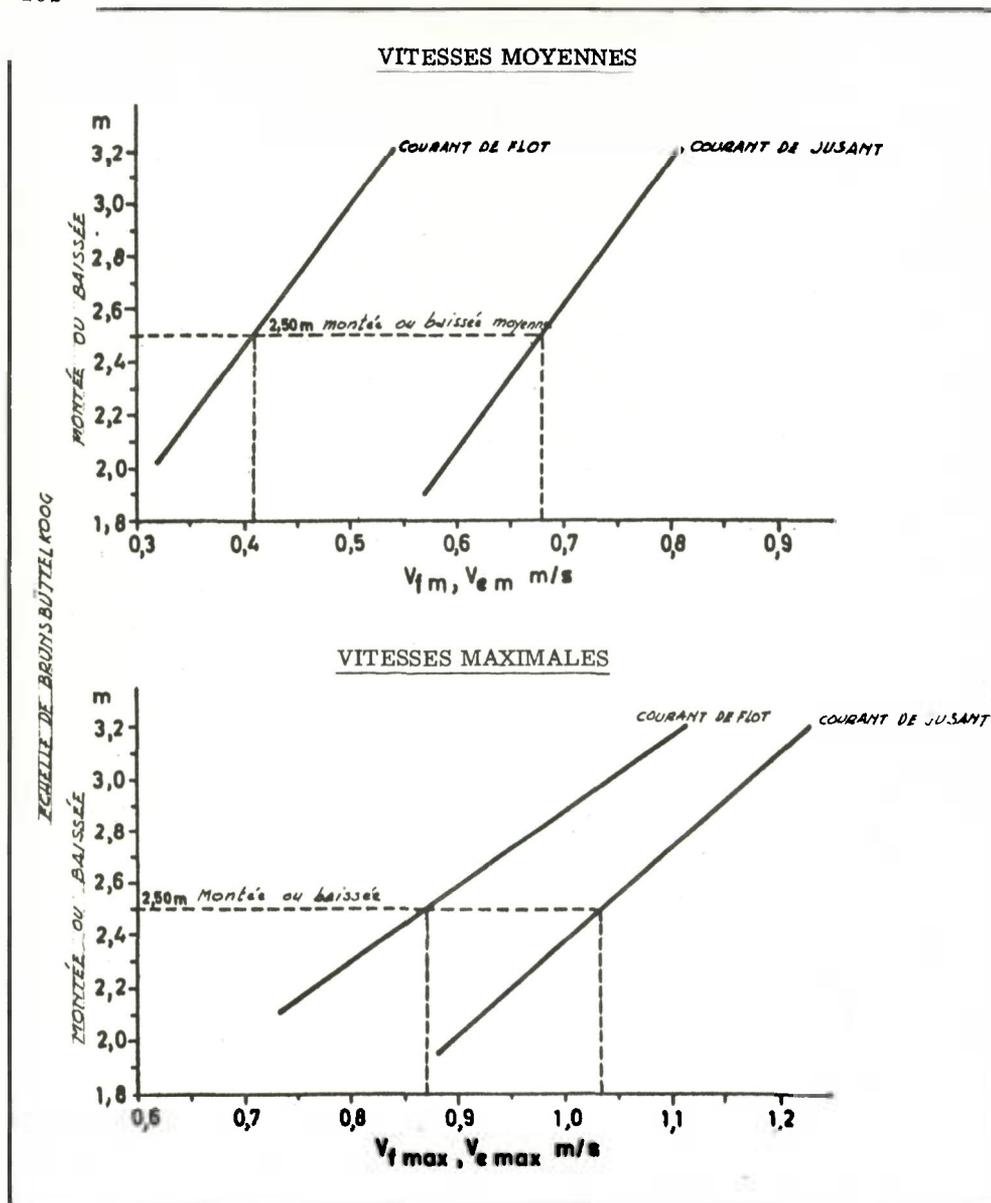
**Figure 12** - Mesures des mouvements de sable dans la région du Böschrücken de l'Elbe inférieure, octobre-novembre 1962. Comparaison des grandeurs caractéristiques de montée et de baissée relevées pendant la période de recherche (\*) avec les valeurs relevées durant plusieurs années sur l'échelle des marées de Brunsbuttelkoog.

du courant. Une analyse plus poussée de ces relations, telle que la prise en considération des vitesses de montée et de baisse, des capacités de marée, etc. s'est avérée impossible dans le cadre de la présente étude.

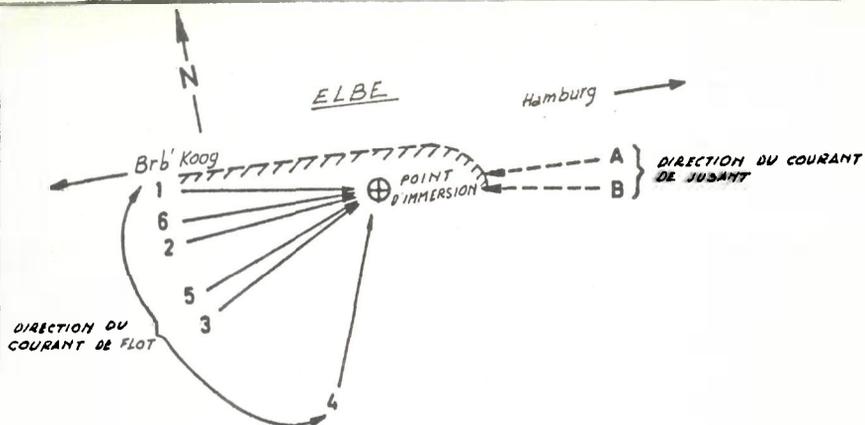
On a choisi une période au cours de laquelle les mesures de courant au moyen de roues à aube et les mesures isotopiques ont pu être réalisées en même temps. La figure montre, par exemple, que les moyennes de montée et de baisse, pour la période considérée, sont inférieures de seulement 6 % à la moyenne estivale de marnage relevée pendant de longues années. En examinant la fréquence de montée et de baisse, on s'aperçoit que ce sont les gradations moyennes qui sont le mieux représentées et qui contribuent dès lors le plus fortement à la formation de la moyenne. Les vitesses de courant mesurées au moyen d'une roue à aubes en un point (S) à proximité du point d'immersion pendant la période considérée ont été portées sur la figure 13 en fonction de la montée ou de la baisse. Les vitesses de courant ont été mesurées à la cote 3,5 m au-dessus du fond. Pour un marnage de 2,50 m., les vitesses moyennes du courant de jusant (0,68 m/s) sont supérieures d'environ 26 cm à celles du courant de flot (0,42 m/s).

Les vitesses maximales mesurées sont, pour le courant de jusant, supérieures d'environ 16 cm/s à celles du courant de flot. A cet endroit (point S) caractéristique de l'allure du courant en amont de l'arête côté chenal du Bëschrücken, le courant de jusant est sensiblement plus intense que le courant de flot. Il résulte des observations hydrologiques que, pendant la période considérée, les conditions n'étaient pas anormales.

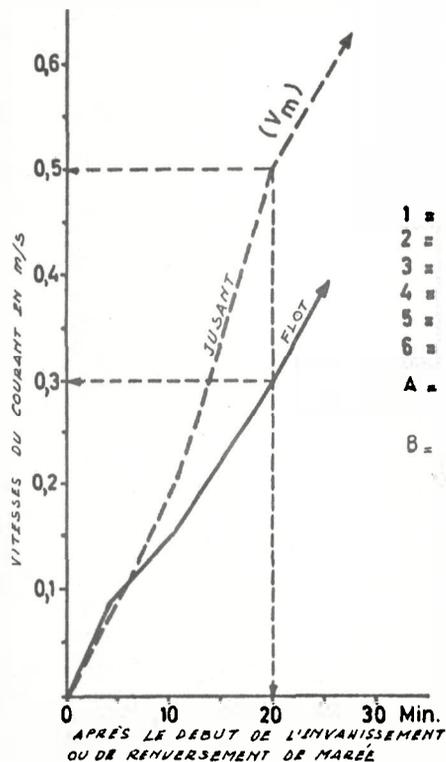
Le Bëschrücken s'étant découvert, il n'a pas été possible de déterminer le régime du courant par des enregis-



**Figure 13** - Vitesses de courant en fonction de l'amplitude de la marée (marnage) : mesures des mouvements de sable dans la zone du Böschrücken de l'Elbe inférieure, octobre-novembre 1962.



AUGMENTATION DES VITESSES  
DE COURANT AU POINT D'IMMERSION APRÈS  
LE DÉBUT DE L'ENVANISSEMENT OU APRÈS  
LE RENVERSAMENT DE MARÉE (Étude)



#### EXPLICATIONS

- |     |  |
|-----|--|
| 1 = | DIRECTION DU COURANT DE FLOT AU DÉBUT DE L'ENVANISS. |
| 2 = | " " " 4 MIN. APRÈS                                   |
| 3 = | " " " 6 " "  |
| 4 = | " " " 10 " "   |
| 5 = | " " " 15 " "   |
| 6 = | " " " 25 " "   |

A = DIRECTION DU COURANT PRINCIPAL APRÈS L'ÉTALE DE FLOT PENDANT LA PREMIÈRE MOITIÉ DU JUSANT

B = DIRECTION DU COURANT PRINCIPAL PENDANT LA DERNIÈRE MOITIÉ DU JUSANT

Figure 14 - Mesures de courant au point d'immersion : mesures de sable dans la région du Böschrücken de l'Elbe inférieure, octobre-novembre 1962.

tements en continu au point d'immersion. C'est pourquoi on a mesuré au point d'immersion, en une journée, l'intensité et la direction des courants au moyen de barrillets et de moulinets, ainsi qu'au moyen de flotteurs. La fig. 14 donne les résultats de ces mesures.

On constate que la direction du courant de flot varie fortement au cours des 25 premières minutes après l'envahissement. Au début de l'envahissement, le courant de flot a la direction du courant dans le chenal principal. Peu après, l'accumulation des eaux de la marée montante derrière le Büschrücken exerce ses effets; il donne lieu à un courant dirigé vers le nord-est à partir du chenal auxiliaire et qui s'écoule vers le chenal principal en passant transversalement au-dessus du Rücken et ce phénomène perd de son intensité au fur et à mesure que la cote monte. Il est terminé environ 15 à 20 minutes après le début de l'envahissement. Dès lors, le courant de flot reprend à cet endroit la direction générale du cours principal du fleuve. Il n'est pas douteux que c'est ce changement de direction du courant de flot vers le nord-est que l'on peut constater peu de temps après l'envahissement, qui est la cause de cette migration du sable vers le nord, dont il a été question au chapitre 2.2. 20 minutes après l'envahissement, on a mesuré une vitesse de 0,3 m/s. Le courant de jusant change à peine de direction et, 20 minutes après le commencement du reflux, il a déjà une vitesse moyenne de 0,5 m/s.

Les directions principales du courant et les vitesses moyennes au point S sont indiquées à la figure 3.

Les distributions de fréquences portées sur les diagrammes 13 et 14 et les valeurs de  $V_{em}$  et de  $V_{fm}$  révèlent clairement la prédominance du courant de jusant.

#### 2.4. Observations météorologiques

Les enregistrements de la station météorologique de Brunsbüttelkoog nous renseignent sur les directions du vent observées au cours des recherches et sur la force de ces vents. C'est ainsi que le 15.10.62, jour de l'immersion, on a mesuré des vents du sud, de force 2 selon l'échelle de Beaufort. Les jours suivants, bien que le vent eût tourné du sud au nord-ouest par ouest-sud-ouest et, le 25.10, de nouveau au sud, on n'a pas enregistré de vent d'une force supérieure à 4. Le 22.10, c'était le calme pendant toute la journée. Ce n'est qu'à la fin du mois que l'on a parfois observé des vents de sud, sud-ouest, de force Beaufort n° 7. Au cours du premier tiers du mois de novembre, les vents d'est étaient prédominants; ils atteignirent la force 8 le 10.11. Le 20.11, dernier jour des mesures, on enregistra un vent de sud-ouest de force 1. En résumé, on peut dire que, pendant la période considérée, les vents n'ont jamais été extrêmement forts. Pendant presque toute la période considérée, la situation météorologique a été calme, à l'exception de quelques jours.

Comme l'état de la mer à l'endroit des recherches dépendait presque exclusivement des vents locaux, il semble certain que son influence sur le déplacement des sables a été minime, ce qui explique également pourquoi le sable étudié est resté fixé au point d'immersion. Il n'en aurait certainement pas été ainsi si une forte houle avait bouleversé les couches supérieures du Rücken. L'action de la houle sur les mouvements de sable avait été observée en 1961 lors des recherches effectuées sur la migration des sables à hauteur du Brauner Bank.

#### 2.5 Conclusions

Les conclusions que l'on peut tirer des résultats des mesures effectuées en octobre/novembre 1962 sur la migration des sables sont les suivantes : le sable marqué

déposé sur le côté nord du Böschrücken supérieur est transporté par le courant de jusant vers l'extrémité inférieure du Böschrücken et au-delà. Dans cette région, le courant de jusant est relativement fort et prédomine nettement sur le courant de flot. Ces faits confirment donc l'hypothèse, selon laquelle les prolongements du Böschrücken, qui se forment en aval de l'Elbe et se terminent près de la bouée A par des formations aplatiques qui se prolongent très loin dans le chenal, sont créés par le courant de jusant. Les deux cheneaux représentés à la figure 3, qui passent transversalement au-dessus du Rücken - le chenal situé à l'est du point d'immersion est de date plus récente - ont probablement été créés par le courant de jusant. Comme le révèlent les observations, ils ouvrent au courant de jusant une véritable voie de passage par laquelle le sable est transporté vers l'extrémité inférieure du Rücken. Cela n'est certes pas prouvé pour le chenal de formation récente, mais si l'on choisissait un point d'immersion situé sur le Böschrücken à hauteur de la bouée C, on parviendrait probablement aux mêmes constatations. Ce sont les cartes des modifications de profondeur qui répondent le mieux à la question de savoir si, et dans quelle mesure la masse de sable du Böschrücken s'est accrue au cours des ans, et quelle est la tendance qui se dessine à cet égard.

Cette première série d'essai n'a pas permis d'établir si le sable chassé dans le chenal près de la bouée A provient d'une région du fleuve plus éloignée ou s'il s'agit d'un circuit fermé au voisinage immédiat du Böschrücken (par exemple, transport par courant de flot de la zone de la bouée A vers la zone de la bouée C - transport par courant de jusant de cette dernière zone vers A, en passant par le Rücken). Ces recherches, qui ont fourni des indications précieuses sur les mouvements de sable à cet endroit, seront suivies d'autres recherches visant à résoudre ce problème, grâce au choix adéquat d'un point d'immersion. Des mesures de courant plus étendues seront alors nécessaires.

### 3. Autres travaux en vue du développement de la méthode de mesure

#### 3.1 Interprétation quantitative

Les connaissances acquises au cours des recherches effectuées jusqu'ici ne se prêtent qu'à une interprétation qualitative. Pour arriver à des résultats quantitatifs, il faudra prélever des échantillons de sol et mesurer leur activité. Les valeurs ainsi trouvées sont directement liées à l'activité totale immergée. En répartissant les échantillons en fonction de leur granulométrie et en mesurant les différentes fractions, on peut déterminer si certaines fractions sont transportées par préférence.

Il faudra, en outre, déterminer la relation qui existe entre les valeurs résultant des mesures sur le fond effectuées au moyen de sondes remorquées et les valeurs obtenues lors du prélèvement des échantillons. Ces dernières valeurs étant une mesure directe de la proportion de sable marqué, il sera donc possible d'interpréter quantitativement les valeurs trouvées au moyen de la première méthode. Pour le prélèvement des échantillons, on pense utiliser tout d'abord un grappin. Toutefois, afin d'éviter de perturber la stratification des échantillons, on met actuellement une machine à découper le sol, chassée dans le sol par explosion.

#### 3.2 Enregistrement automatique

L'enregistrement des impulsions mesurées sur le sol par les sondes est assuré par un montage intégrateur à 6 genres de mesures différentes, associé à un circuit transistorisé d'alimentation et d'amplification. Lorsque les mesures se prolongent pendant des journées et des semaines entières, l'observation et l'inscription continuelles des valeurs indiquées est une opération fatigante et peu rationnelle. C'est pourquoi un enregistrement automatique est nécessaire. L'enregistreur doit être équipé d'un dispositif

logarithmique pour pouvoir enregistrer, avec une sensibilité identique, sur une gamme allant de 10 à 10.000 impulsions par seconde. L'emploi d'une imprimante digitale peut également être envisagé.

### 3.3 Spectrométrie des impulsions

Pour pouvoir distinguer, lors des mesures, le sable marqué des activités étrangères, telles qu'elles se présentent fréquemment dans les zones boueuses, il est nécessaire de déterminer l'énergie du rayonnement mesuré. L'enregistrement de spectres d'énergie est prévu à cet effet.

#### Bibliographie:

1. Schulz, H. et Ströhl, G: Untersuchung der Sandwanderung im Bereich der deutschen Küste mit radioaktiven Leitstoffen  
Deutsche Gewässerkundl.Mitteilungen,  
Jg.4, 1960, H.1

Mesure du déplacement de la vase au moyen de verre  
marqué au scandium radio-actif

H. A. KLEIN

Oberregierungsaurat  
Wasser- und Schifffahrtsdirektion, Hambourg

En 1959, on a mesuré, à l'aide de verre marqué au scandium radio-actif, les déplacements de la vase dans la partie de l'Oste - affluent gauche de l'Elbe - soumise encore aux mouvements des marées.

Les résultats ont prouvé que la vase, se détachant des rives de l'estuaire de l'Elbe, est transportée dans l'Oste jusqu'à la limite-amont de la marée.

Grâce aux résultats obtenus à la suite de cette expérience, on dispose à présent de données précieuses pour l'étude des incidences morphologiques d'un barrage de marée situé au confluent de l'Oste et de l'Elbe.

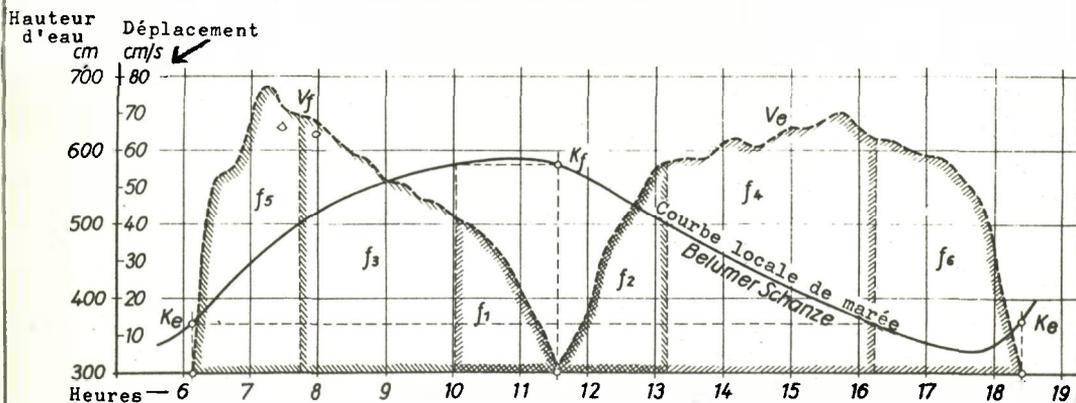


Figure 1a - Mesure du courant effectuée le 10 mai 1957 au lieu dit Belumer Schanze (km 77 du cours de l'Oste).

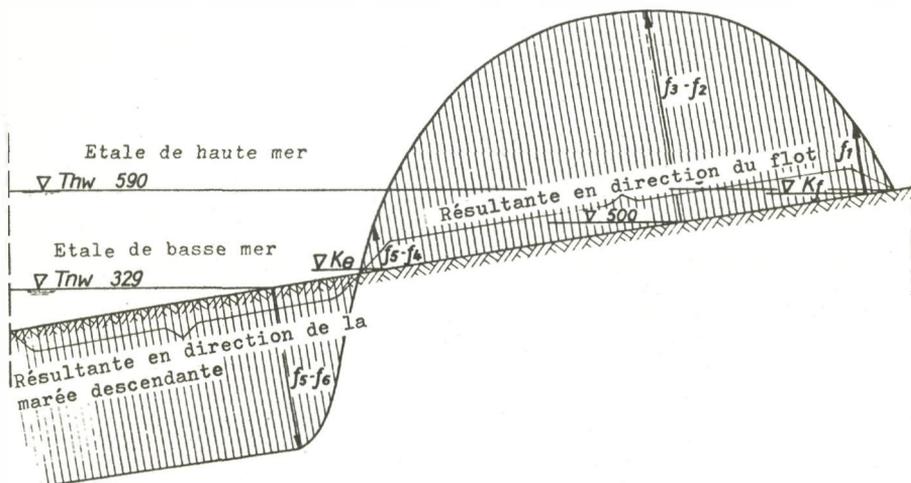


Figure 1b - Sommes des parcours (vitesse moyenne de section  $\times$  temps =  $V_e \cdot dt$ ) dans la zone d'alternance des eaux, portée en ordonnées au-dessus (direction de la marée montante) et au-dessous (direction de la marée descendante) du fond.

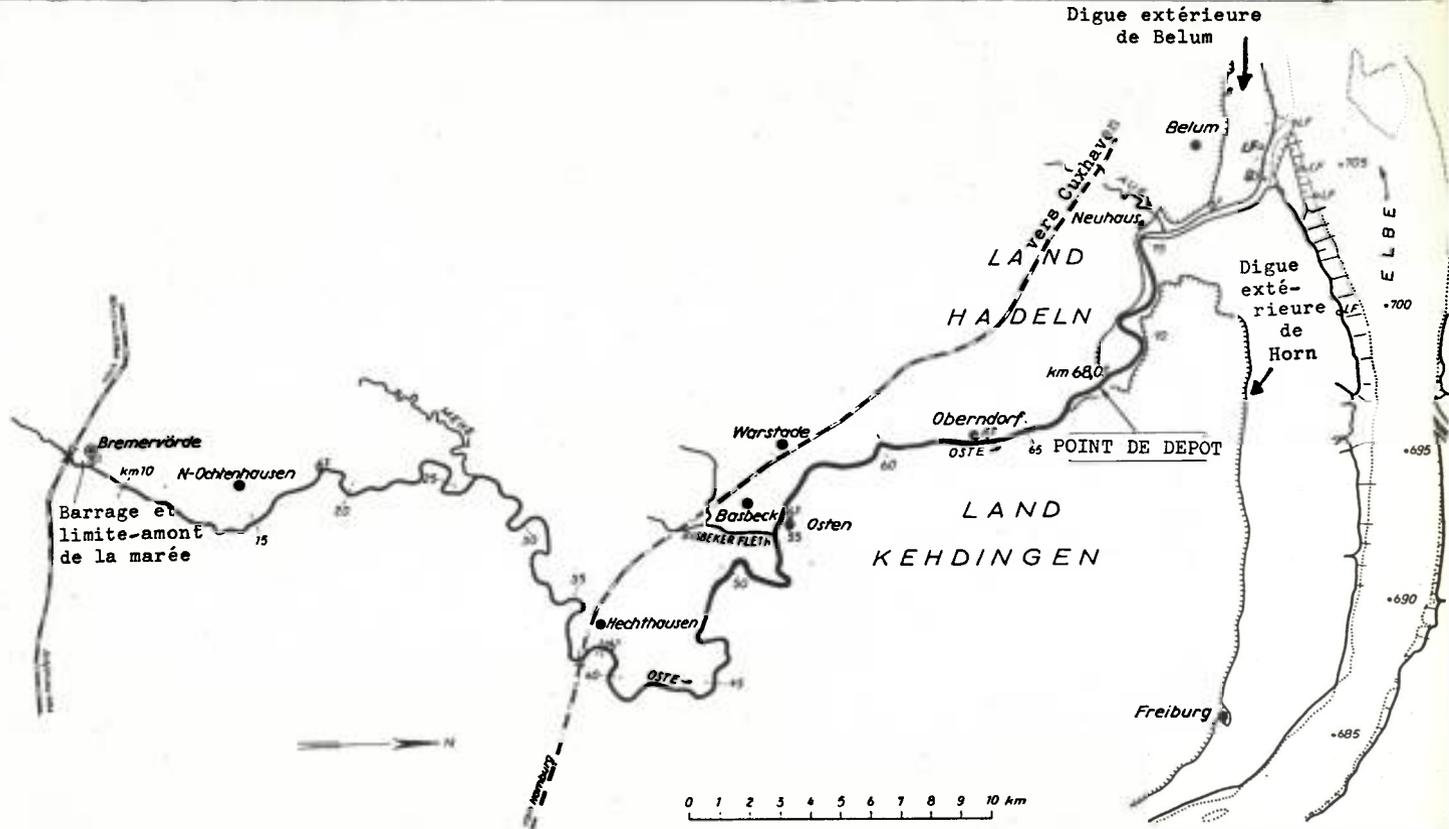


Figure 2 - Plan d'ensemble de l'Ostsee.

Emploi de radio-éléments dans le transport solide

par charriage du Stung Sen au Cambodge

F. ANGUENOT<sup>(\*)</sup>, J.-P. CARBONNEL<sup>(+)</sup>, G. COURTOIS<sup>(\*)</sup>,  
R. DANION<sup>(°)</sup>, H. FORSBERG<sup>(x)</sup>, M. HEUZEL<sup>(°)</sup>

I. - INTRODUCTION

La Commission Economique des Nations Unies pour l'Asie et l'Extrême-Orient (C.E.A.E.O.) s'est fixé, entre autres tâches, de mettre en valeur les ressources hydrauliques du bassin inférieur du Mékong.

L'étude des nombreux projets suggérés par cette Commission a été confiée au Comité pour la Coordination des Etudes sur le bassin inférieur du Mékong, lequel comprend des représentants de la C.E.A.E.O. et des quatre pays riverains intéressés.

L'Agence Internationale de l'Energie Atomique offrit ses services à ce Comité en 1957. Dans le cadre de son programme étendu d'assistance technique, une étude du transport solide par charriage, à l'aide de traceurs radio-actifs, fut décidée sur le Stung Sen (Fig. 1), l'une des principales rivières se jetant dans le Grand Lac du Cambodge.

En effet, l'efficacité du barrage prévu sur le Tonlé Sap à hauteur de Prek Dam, dont le rôle essentiel sera d'écrêter les crues du Mékong, est en partie liée aux taux de comblement de ce lac.

Une mission préliminaire, en mars 1963, a permis de jeter les bases de coopération des divers organismes devant participer à l'étude et de préciser les lieux d'expérience.

La mission officielle, elle-même resta deux mois au Cambodge, en juin et juillet 1963.

(\*) Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay,  
Section d'Applications des Radio-éléments

(+) Mission Française d'Assistance Economique et Technique au Cambodge

(°) Centre de Recherches et d'Etudes de Chatou

(x) Agence Internationale de l'Energie Atomique

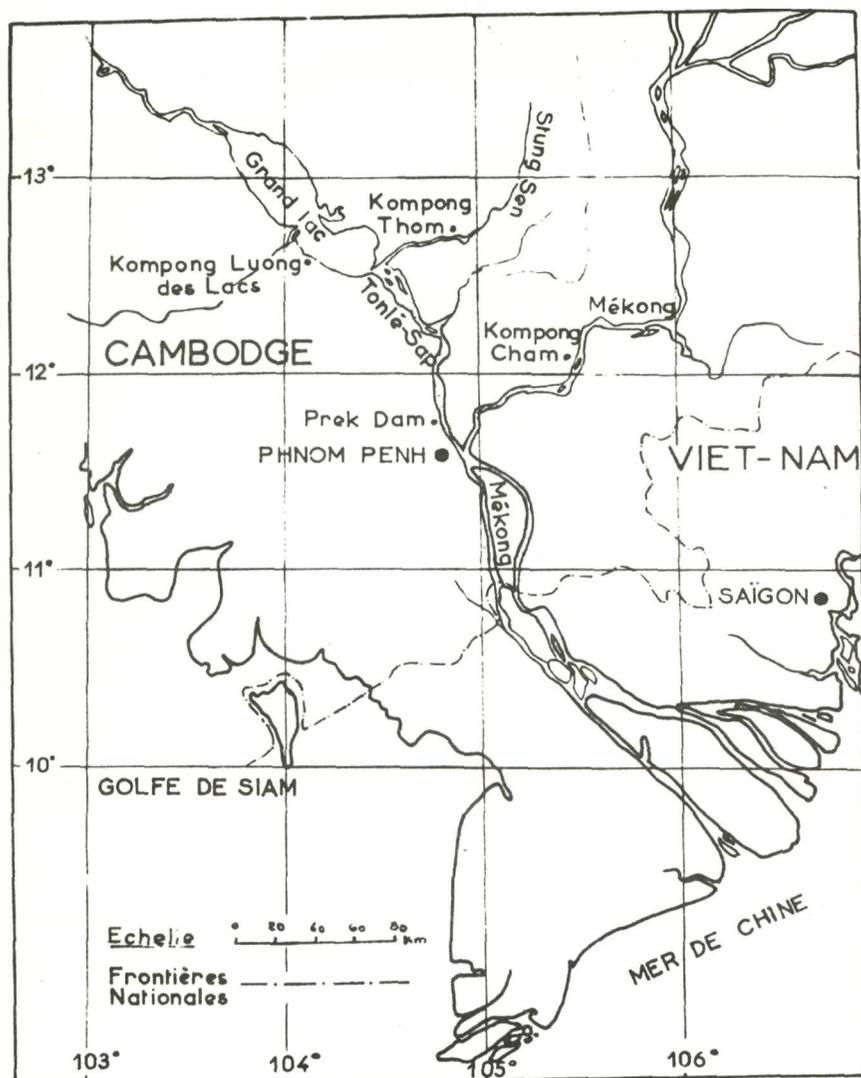


Figure 1 - Le bassin inférieur du Mékong.

## II. - POSITION DU PROBLEME

Le Stung Sen est la plus importante des quelques 29 rivières ou "stungs" alimentant le Grand Lac. Il débouche dans la partie orientale du Grand Lac (Fig. 4) en tête du Tonlé Sap qui, à la décrue du Mékong, constitue l'exutoire de ce vaste réservoir d'accumulation naturel.

Un seuil très étendu sépare le Tonlé Sap du Grand Lac. L'origine de ce delta était jusqu'à présent expliqué par les apports solides conjugués du Stung Sen et du Tonlé Sap.

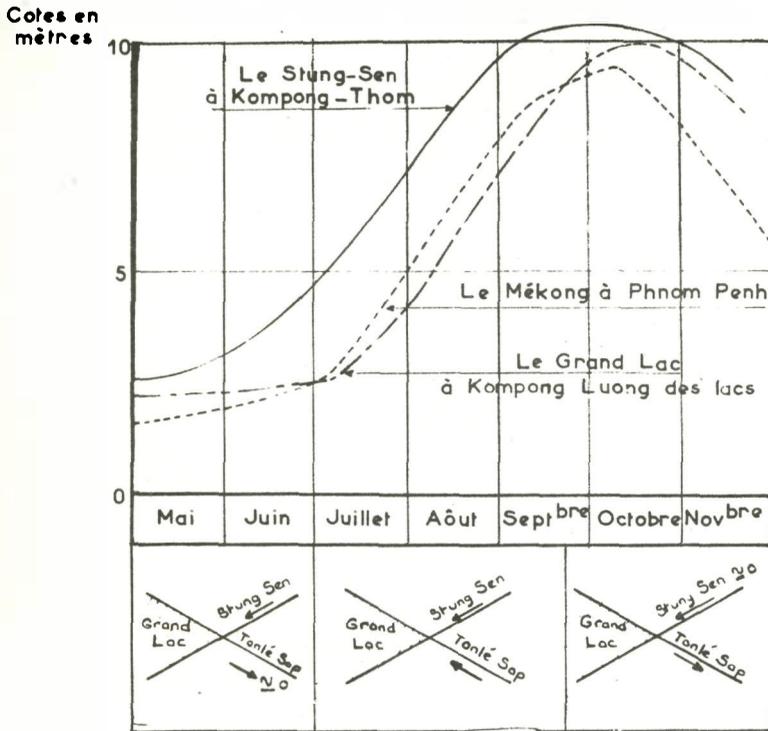
L'objet de la mission était donc d'étudier la contribution actuelle du Stung Sen au comblement du Grand Lac et à la formation du seuil de Snoc Trou.

Le régime hydrologique local est assez complexe (Fig. 2). Les crues du Stung Sen commencent d'ordinaire avec la saison des pluies (début juin), et devançant la montée des eaux du Grand Lac. Le Tonlé Sap, seul émissaire de ce bassin, coule faiblement vers le Mékong jusqu'au début juillet. Quand survient alors la crue du Mékong, le courant change de sens dans le Tonlé Sap et les eaux refluent dans le Grand Lac.

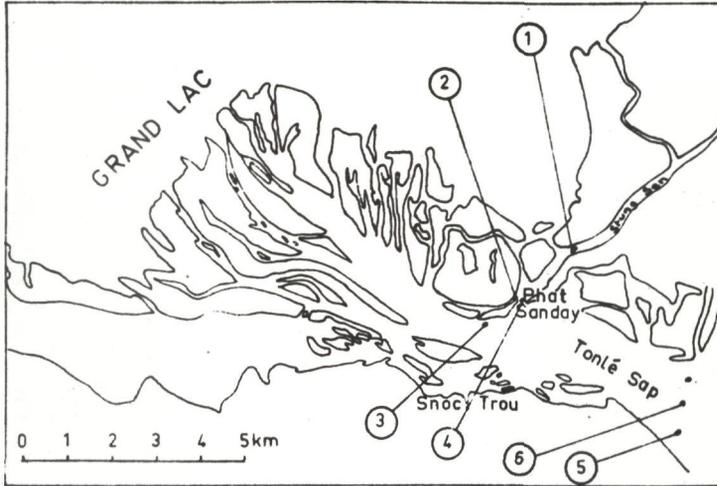
Les crues du Stung Sen n'ont lieu en général qu'aux mois de juin et juillet. Comme le niveau du Grand Lac est assez bas à cette époque, la capacité d'entraînement des matériaux de fond est alors au maximum.

Le débit du Stung Sen devient négligeable en août; cependant ses eaux continuent à monter car le remplissage du Grand Lac se poursuit jusqu'à fin septembre.

Pour ces raisons, les deux mois de juin et juillet furent retenus pour effectuer la campagne d'étude du transport solide par charriage du Stung Sen à l'aide de traceurs radio-actifs.



**Figure 2 - Evolution schématique des crues du Stung Sen et du Mékong.**



**Figure 3** - Zone d'étude du Stung Sen : emplacements des points de prélèvements.

Désignation

Référence des échantillons

M. Dussart (Cahiers du Pacifique, n° 4, juin 1962)

- ①
- ②
- ③
- ④
- ⑤
- ⑥

n° 08.12.60F

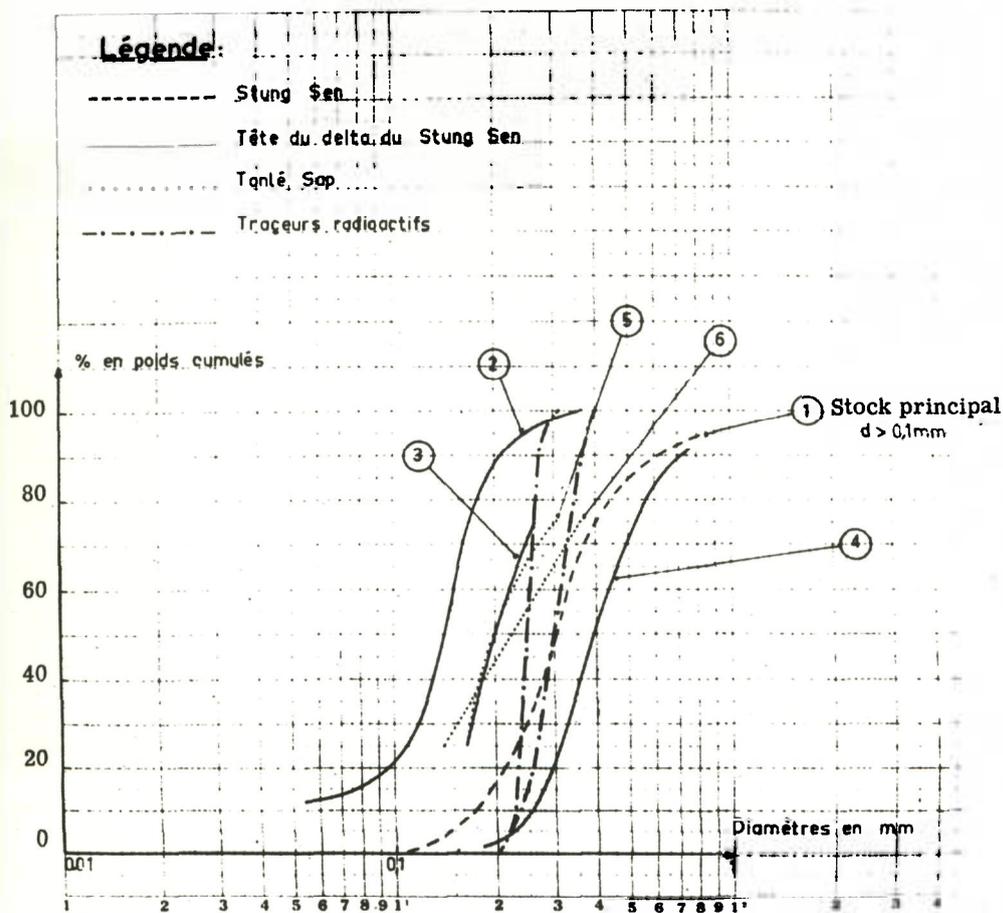
n° 28.12.60F

n° 29.12.60A

n° 28.12.60D

n° 28.12.60A

n° 28.12.60B



Complément à la Figure 3.

### III. - TRACEURS

#### III.1 - Radio-éléments

L'élément radio-actif de base choisi a été l'iridium-192 ( $^{192}\text{Ir}$ ), d'une période de 74 jours, émetteur de 2,8  $\gamma$  par désintégration dont une très forte proportion (84%) émet une énergie voisine de 300 KeV.

A cet élément de base furent adjoints deux traceurs auxiliaires :

- le tantale-182 ( $^{182}\text{Ta}$ ) d'une période de 111 jours, émetteur  $\gamma$  dur de 1.180 KeV;
- le thulium-170 ( $^{170}\text{Tm}$ ) d'une période de 127 jours, émetteur  $\gamma$  mou de 84 et 53 KeV.

#### III.2 - Formes

Le traceur était incorporé à un verre contenant peu d'oxydes alcalins :

- verre à l'iridium à 0,3 % en poids d'iridium,
- verre au tantale à 11,4 % en poids de tantale,
- verre au thulium à 1,25 % en poids de thulium.

Chaque tube de traceur contenait 40 g de verre broyé. Deux granulométries de traceur 0,2 - 0,315 mm et 0,2 - 0,4 mm (soit respectivement 3.000.000 et 1.000.000 de grains par tube) furent adoptées par précaution, en raison de l'extrême diversité que présentent les sédiments dans la zone d'étude (Fig. 3).

Ont été préparés :

- 12 tubes de verre à l'iridium,
- 1 tube de verre au tantale,
- 1 tube de verre au thulium.

#### III.3 - Activités

Les activités prévues à la sortie du réacteur étaient de :

- 500 mCi par tube d'iridium-192,
- 400 mCi par tube de tantale-182,
- 6.000 mCi par tube de thulium-170.

Les activités réelles d'utilisation sont données plus loin.

#### IV. - MISE EN OEUVRE

Deux zones d'étude avaient été retenues pour la campagne de traceurs radio-actifs :

- sur le Stung Sen entre Kompong Chamlang et Néang Sao,
- sur le Tonlé Sap et le Tonlé Kramon entre l'île portant le phare n° 1 et le Presk Ksah.

La première tâche de la mission fut, avant toute immersion de traceurs, de reconnaître les lieux par sondages et prélèvements d'échantillons de fond.

##### IV.1 - Sondages

De nombreux sondages systématiques par profils en travers et en long ont été effectués à l'ultrason dans toute la zone expérimentale (Fig. 4) afin de déterminer les emplacements favorables pour les immersions des traceurs. Ces sondages ont montré l'existence d'un chenal très localisé dans le Tonlé Sap, de seuils et barres de sable à l'entrée du Stung Sen et du Prek Phat Sanday. Le thalweg du lit du Stung Sen n'est pas régulier; il présente dans certaines courbes des mouilles très accentuées.

Les sondages ont été plus particulièrement poussés dans les zones d'immersion de traceurs afin de localiser les endroits encombrés d'obstacles tels les restes de ces barrages de branchages, dits samras, utilisés pour capturer les poissons lors des basses eaux.

Le repérage des points et profils de mesures avait nécessité l'implantation préalable de quelques balises sur le Tonlé Sap en complément des deux seuils amers remarquables que constituent les phares n° 1 et n° 2.

Un réseau de repères avait été mis en place sur le Stung Sen entre Néang Sao et Kompong Chamlang avant l'arrivée de la mission au Cambodge.

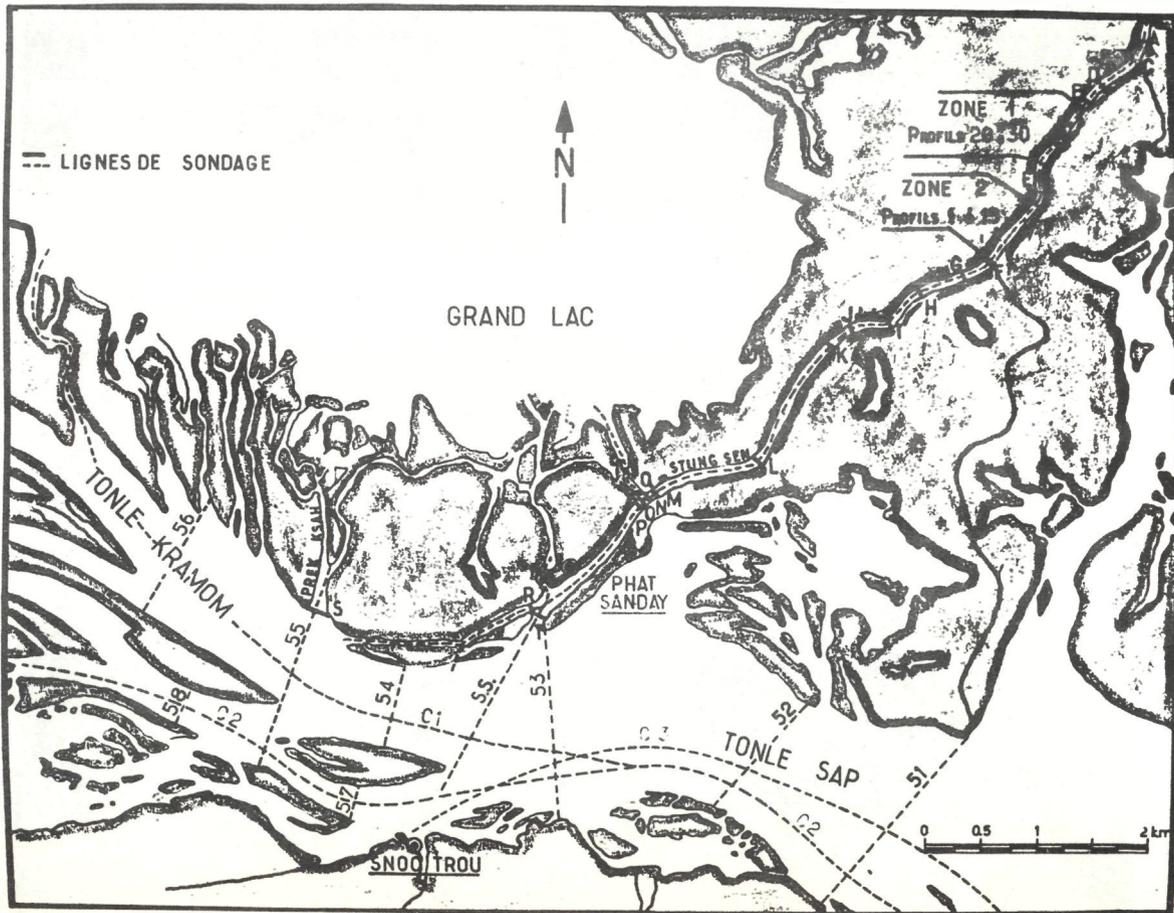


Figure 4 - Profils de sondage.

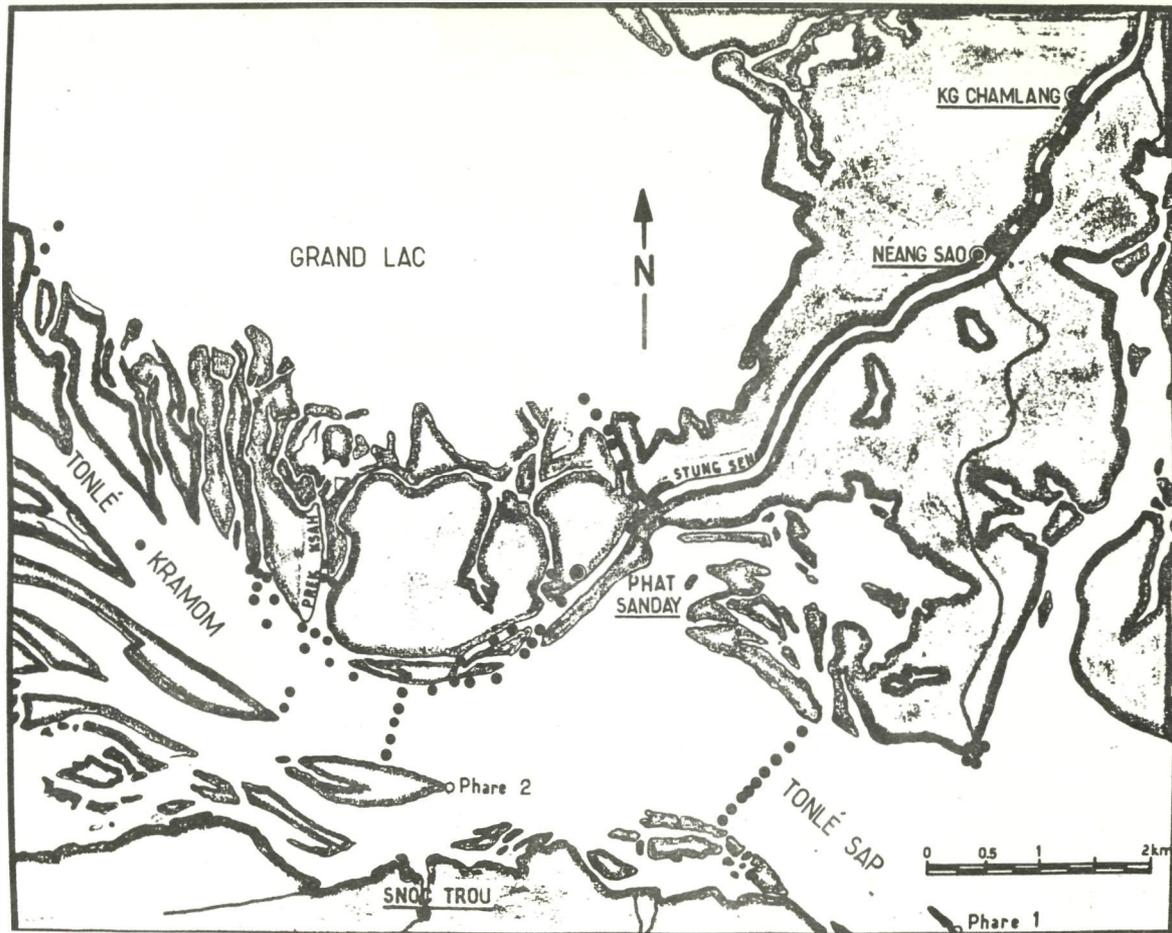


Figure 5 - Points des prélèvements.

#### IV.2 - Prélèvements de matériau de fond

Des prélèvements de matériau de fond ont été également réalisés pour localiser les zones de sable où devaient se faire les dépôts radioactifs (Fig. 5). Ces recherches systématiques n'ont pas permis de déceler la moindre présence de sable dans le Tonlé Sap et le Tonlé Kramon, comme il avait été escompté, même en dessous de la couche superficielle de vase molle, sauf à l'embouchure du Stung Sen et à l'entrée de Prek Ksah.

De ce fait, l'étude par traceurs fut limitée au cours du Stung Sen. Les échantillons de fond prélevés en rivière ont confirmé un phénomène sédimentologique déjà observé et signalé : le lit du Stung Sen ne comporte de sable qu'en son milieu, tandis que l'argile compactée prédomine sur les côtés. A l'époque de ces prélèvements le sable était recouvert d'une couche de vase molle correspondant aux dépôts, en fin de crue, des sédiments en suspension. Mais, dès la crue, cette couche très mobile est rapidement balayée, mettant ainsi le sable à découvert.

#### IV.3 - Bruits de fond

Les bruits de fond correspondant à la radio-activité naturelle ont également été déterminés. Ils variaient, par compteur, entre 6 cps moyens pour les fonds sableux et 16 cps moyens pour les fonds argileux.

Il était d'ailleurs relativement aisé, par simple mesure du bruit de fond, de déterminer la largeur du lit de sable dans la section de la rivière.

#### IV.4 - Sécurité

##### IV.4.1 - Sécurité des populations

La mobilité du village de Phat Sanday durant les crues ne permettait pas de travailler sur le tronçon de Stung Sen Phat Sanday - Néang Sao. Pour cette raison, les deux tronçons rectilignes situés entre Néang Sao et Kompong Chamlang furent retenus.

Pendant cette campagne de mesures, il fut demandé aux "Hékums" (chefs de village) d'interdire la pêche dans les zones d'études.

#### IV.4.2 - Sécurité du personnel

Elle était contrôlée par l'emploi des appareils suivants :

- pour la protection collective : détecteur portatif à G M "Radiamètre" permettant les mesures de doses  $\gamma$  de 0,1 mR/h à 1 R/h;
- pour la protection individuelle : stylos-dosimètres de 200 mR de sensibilité totale.

#### IV.5 - Immersion des traceurs

Les immersions de traceurs ont été effectuées aux points mentionnés sur la figure 6.

Le tableau ci-après précise le type de traceur utilisé et son activité au moment de l'immersion.

Immersion	Profil	Radio-élément	Date (1963)	Activité à la date d'immersion	Nombre approximatif de grains
1	P 1	$^{192}\text{Ir}$	21 juin	148 mCi	3.000.000
2	P 2	$^{192}\text{Ir}$	22 juin	128 mCi	3.000.000
3	P 2	$^{192}\text{Ir}$	22 juin	132 mCi	3.000.000
4(*)	P 4	$^{192}\text{Ir}$	26 juin	183 mCi	10.000
5	P 5	$^{182}\text{Ta}$	1 juillet	263 mCi	1.000.000
6	P 6	$^{192}\text{Ir}$	4 juillet	126 mCi	3.000.000
7	P 5	$^{170}\text{Tm}$	5 juillet	4,12 Ci	1.000.000
8	P 8	$^{192}\text{Ir}$	16 juillet	130 mCi	1.000.000

(\*) tube de 4 g seulement.

L'appareillage utilisé consistait en deux appareils d'immersion : le premier, utilisé pour 7 immersions sur les 8 effectuées, est représenté à la figure 7; le fonctionnement du deuxième fait l'objet de la figure 8.

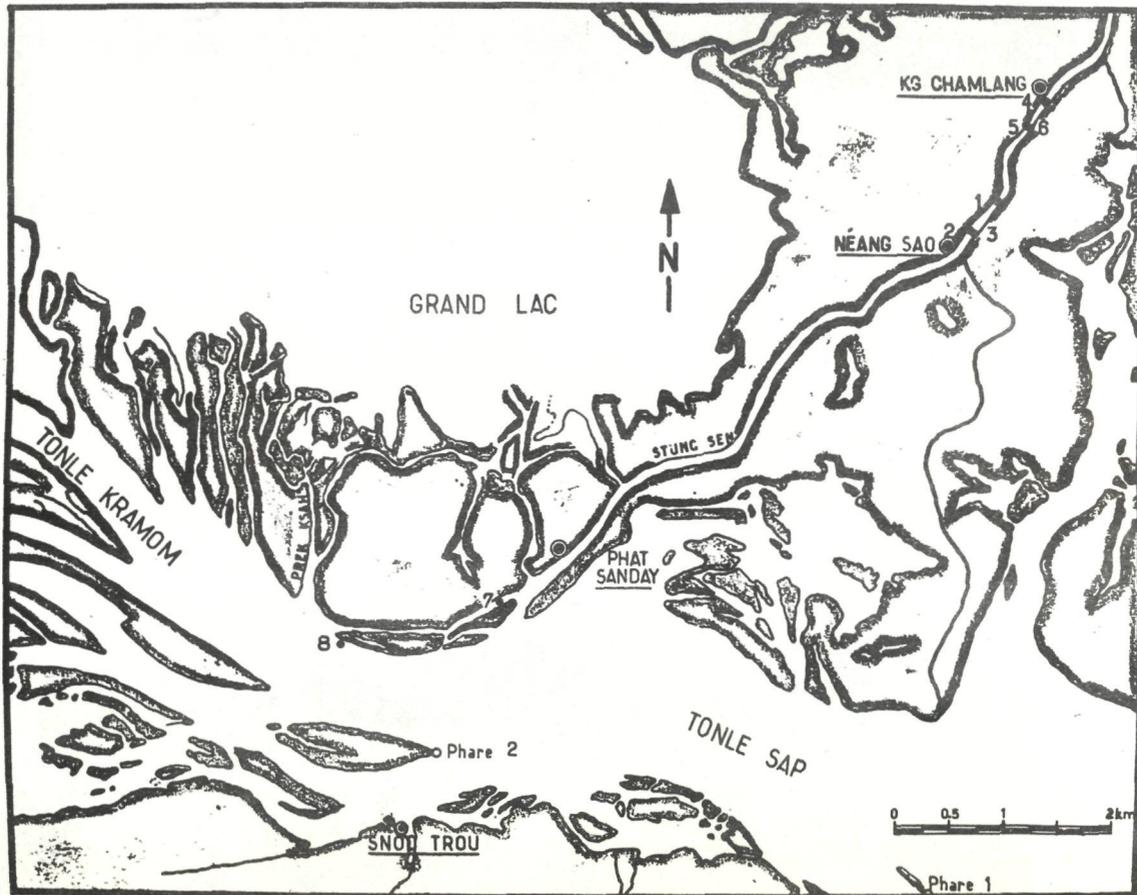
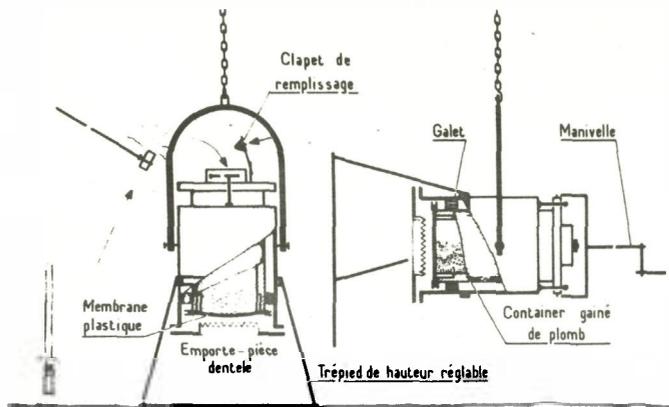


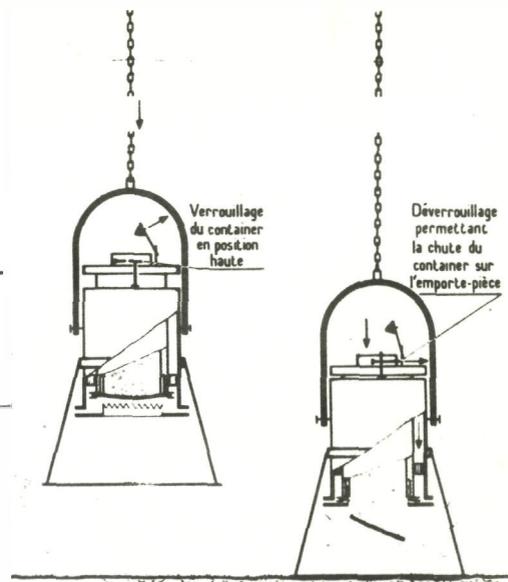
Figure 6 - Points d'immersions.



PRÉPARATION DU MELANGE TRACEUR-SEDIMENT NATUREL

Introduction  
du  
traceur

Malaxage  
par rotation  
du container

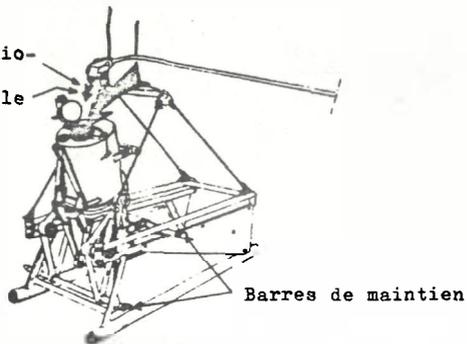


Immersion

Ouverture par  
déchirure de la  
membrane

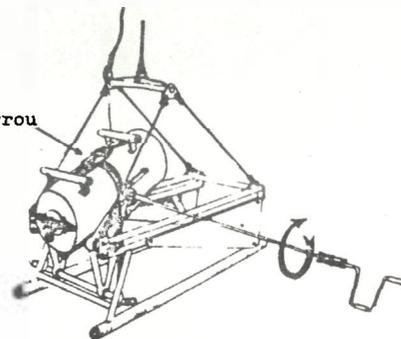
Figure 7 - Dispositif permettant la préparation d'un mélange traceur radio-actif - sédiment naturel, et son dépôt sur le fond.

Introduction radio-  
élément  
Introduction sable



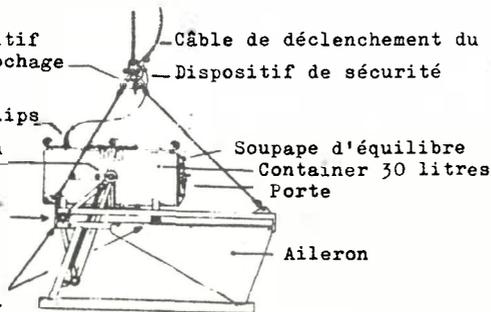
① Introduction des produits

Verrou



② Brassage

Dispositif d'accrochage — Câble de déclenchement du verrou  
— Dispositif de sécurité  
Clips  
Axe de rotation du container — Soupape d'équilibre  
— Container 30 litres  
— Porte  
Axe de basculement  
Aileron  
Barres de maintien



③ Descente

④ Immersion du mélange actif

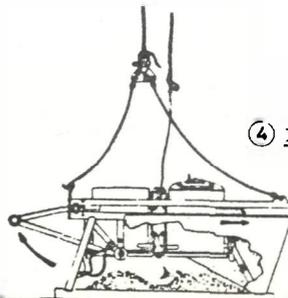


Figure 8 - Dispositif d'immersion.

#### IV.6 - Détection des traceurs

##### IV.6.1 - Méthodes

Les détections successives des traceurs ont été effectuées selon deux méthodes :

- Première méthode : la détection, nécessitant 3 personnes, se faisait par balayage en travers de la zone prospectée. Les relevés des mesures et localisations topographiques se faisaient en statique, canot à l'arrêt : ils étaient par conséquent discontinus.
- Deuxième méthode : la détection, nécessitant 8 personnes, se faisait par balayage en long (passes) de la zone prospectée. Les relevés étaient continus et le repérage de la position du bateau pris toutes les minutes ou toutes les 30 secondes.

##### IV.6.2 - Appareillage

Les ensembles de détecteurs à scintillations adoptés comprenaient :

- pour la première méthode : 1 détecteur à scintillations SPP 3 monté sur un chariot simple (voir en annexe les caractéristiques de la sonde et de l'intégrateur SPP 3);
- pour la deuxième méthode : 3 sondes SPP 3
  - 3 intégrateurs "Lecomte"
  - 2 enregistreurs CdC
 (voir en annexe les caractéristiques de ces éléments).

On doublait le mouvement propre de 10 cps avec une activité de 0,07  $\mu\text{Ci}$  superficiel et 0,20  $\mu\text{Ci}/\text{m}^2$  pour l'activité enfouie sous 5 cm de sable.

#### V - LE REGIME DU STUNG SEN AU COURS DE LA MOUSSON DE 1963

##### V.1 - Hauteurs d'eau et débits

Les cotes du plan d'eau à Snoc Trou, Néang Sao et Kompong Chamlang furent relevées régulièrement sur les échelles limnimétriques.

De nombreux jaugeages furent effectués sur le Stung Sen à Kompong Chamlang.

Le régime du Stung Sen différa en 1963 du régime habituel, comme nous l'avons précisé au chapitre II, avec des petites crues pendant les mois de juin et juillet.

A la mi-juin, le débit était encore pratiquement négligeable. Une lente augmentation du débit se fit alors sentir jusqu'à la mi-juillet : ( $Q_{14 \text{ juillet}} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Cependant le niveau de la rivière était déjà monté de 2 m, de la fin de la saison sèche à cette date, puisqu'il est soumis au remous d'exhaussement du Tonlé Sap.

La renverse du courant dans le Tonlé Sap eut lieu au début de juin, c'est-à-dire avec un mois d'avance sur la renverse habituelle. Ceci s'explique par les faibles pluies tombées en début de mousson sur le réseau hydrologique du Grand Lac dont le niveau resta stationnaire; dès lors, le moindre exhaussement du niveau du Mékong à Phnom Penh suffisait en début de crue à modifier le sens d'écoulement du Tonlé Sap.

La crue du Stung Sen attendue ne se manifesta qu'à partir du 15 juillet; après une légère décrue de quelques jours, le débit maximum atteint fut de  $385 \text{ m}^3/\text{s}$  à la fin du même mois.

#### V.2 - Turbidité

A l'occasion des jaugeages, des échantillons d'eau furent prélevés dont la teneur en matières solides en suspension fut déterminée par la suite en laboratoire.

La turbidité du cours du Stung Sen suit fidèlement l'évolution du débit liquide, son maximum mesuré fut de 0,6 g/l.

### VI - RESULTATS ET CONCLUSION

Des conclusions définitives ne pourront être émises que lorsque l'ensemble des documents et renseignements recueillis par la mission auront été entièrement dépouillés.

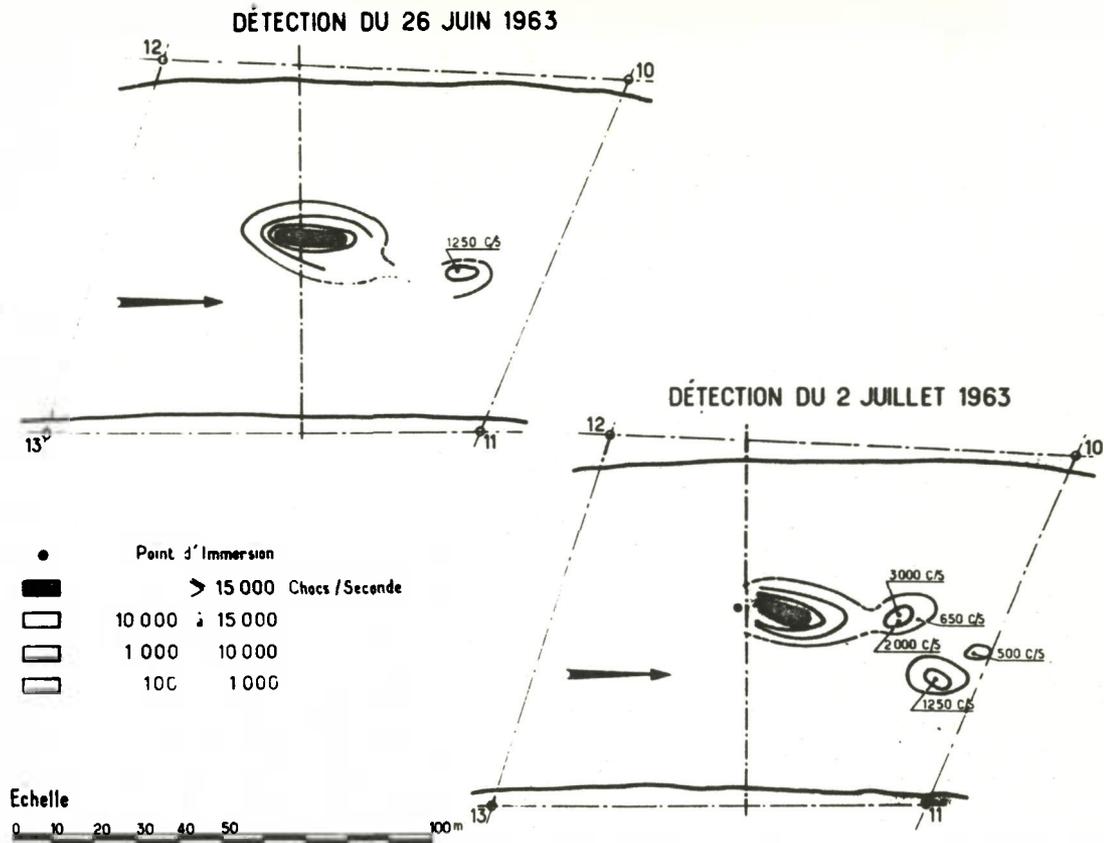
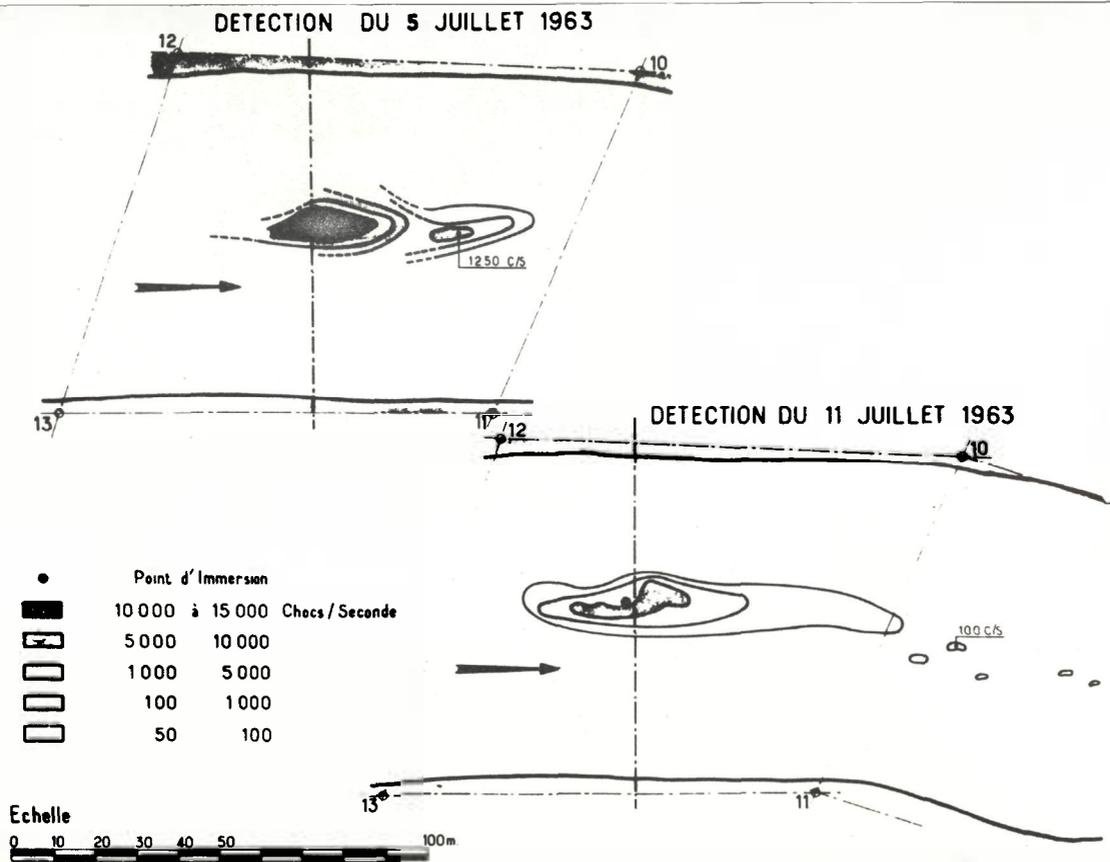


Figure 9 - PROFIL 1 : Immersion le 21 juin 1963.



**Figure 10 - PROFIL 1 : Immersion le 21 juin 1963.**

Les détections effectuées permettent néanmoins d'établir les courbes d'isoactivité des traceurs. Les figures 9, 10 et 11 montrent la progression du dépôt de traceur immergé au point 1 du Stung Sen, le 21 juin 1963. Seuls y sont portés les premiers résultats correspondant aux détections effectuées avant le retour en France de la mission : le déplacement des traceurs est négligeable jusqu'au 5 juillet, la détection du 11 juillet montre une légère migration alors que le débit du Stung Sen n'est encore que de  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ . La détection du 20 juillet montre un allongement important de la tache radio-active au cours de la crue : le centre de gravité du nuage de traceur s'est déplacé d'environ 30 m seulement, mais l'on retrouve des particules marquées jusqu'à 200 m du point d'immersion.

La progression des traceurs est d'autre part caractérisée par une dispersion latérale très faible. C'est ainsi que les traceurs de tantalum et de thulium immergés respectivement aux points 5 et 6 d'un même profil, distants de 15 m, ne se sont pas mélangés; il fut encore possible de distinguer les deux radio-éléments lors des dernières détections de juillet.

Par trois moyens différents (carottages, prélèvements à la benne et détection directe des particules marquées), l'épaisseur de la couche de matériau de fond en mouvement a été déterminée en quelques points. L'étude systématique de ce paramètre n'a pu être effectuée.

Il semble cependant que le transport fut surtout superficiel (3 cm) dans les zones étudiées; mais des particules marquées ont été également retrouvées à une dizaine de centimètres de profondeur.

La migration de traceurs observée montre donc que le Stung Sen est capable de charrier des matériaux lors de crues d'importance moyenne, même si celles-ci surviennent quand la mousson est bien avancée, c'est-à-dire quand le niveau du Tonlé Sap est déjà haut. Aussi les crues du Stung Sen en début de mousson sont certainement susceptibles d'entraîner une quantité notable de sables.

Bien que peu favorisée par les conditions hydrologiques assez différentes des conditions hydrologiques normales escomptées, la mission

# PROFIL 1

DETECTION DU 20 JUILLET 1963

IMMERSION  
LE  
21 JUIIN 1963

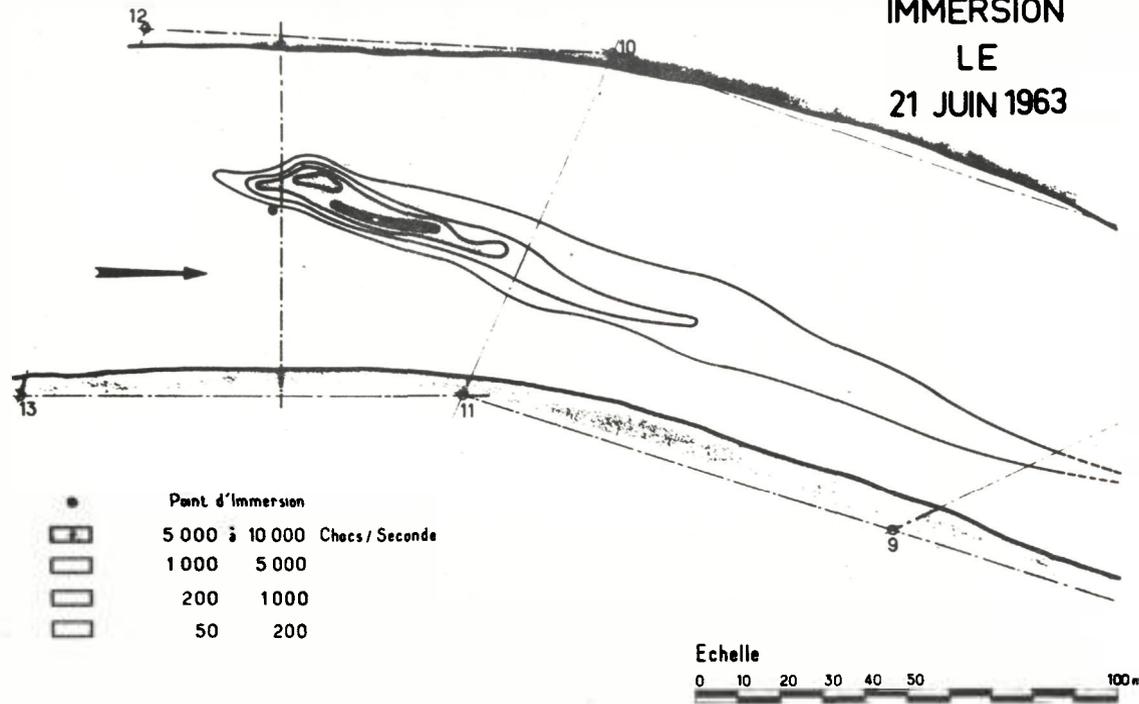


Figure 11 - PROFIL 1 : Immersion le 21 juin 1963.

a réuni des éléments importants sur le régime du transport solide du Stung Sen. Une seconde campagne permettrait certainement d'acquérir d'autres renseignements utiles mais, à notre avis, elle ne serait pas justifiée.



Figure 12 - Le tube de verre radio-actif est versé dans le «Jonas».

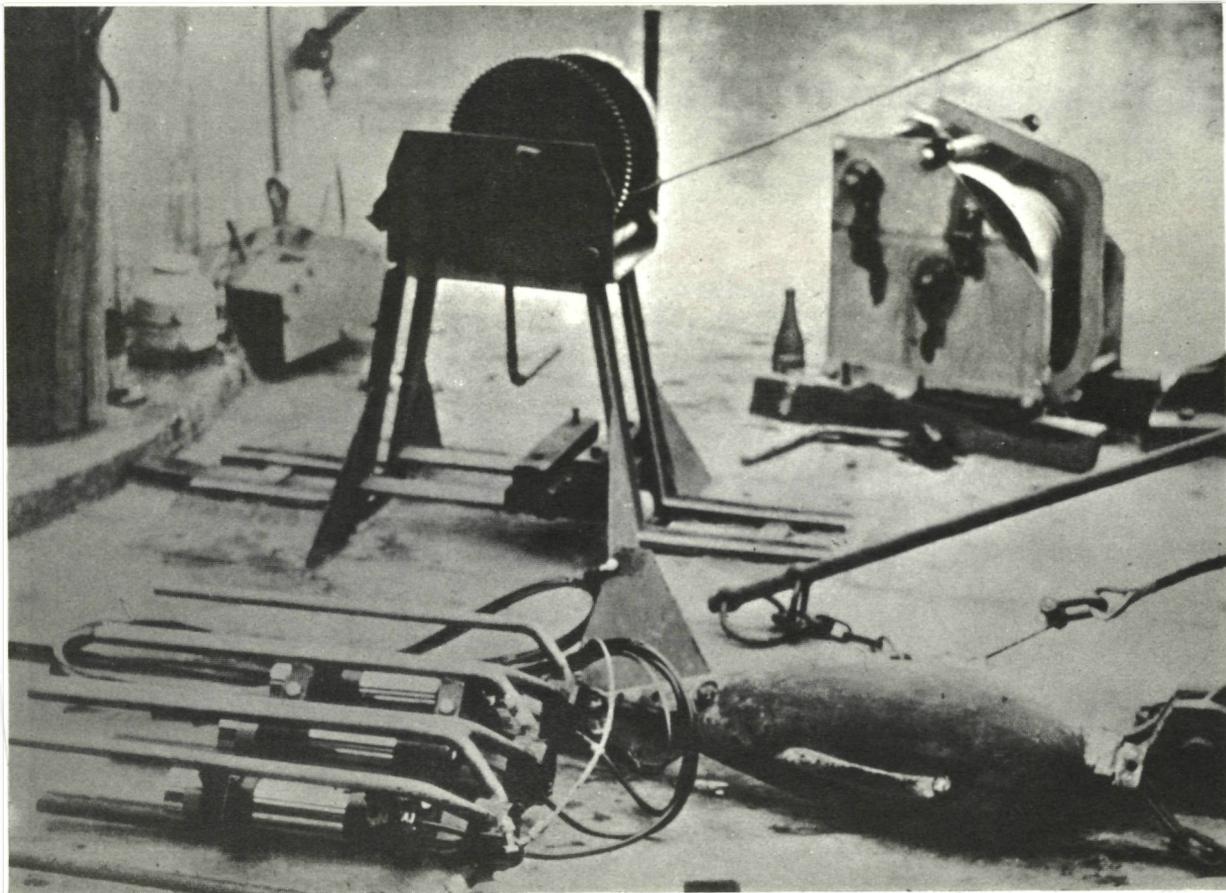


Figure 13 - Divers instruments à bord de l'embarcation : le plomb-poisson et la sonde, les 3 détecteurs à scintillations, les 2 treuils d'immersion et de traînée de la sonde.

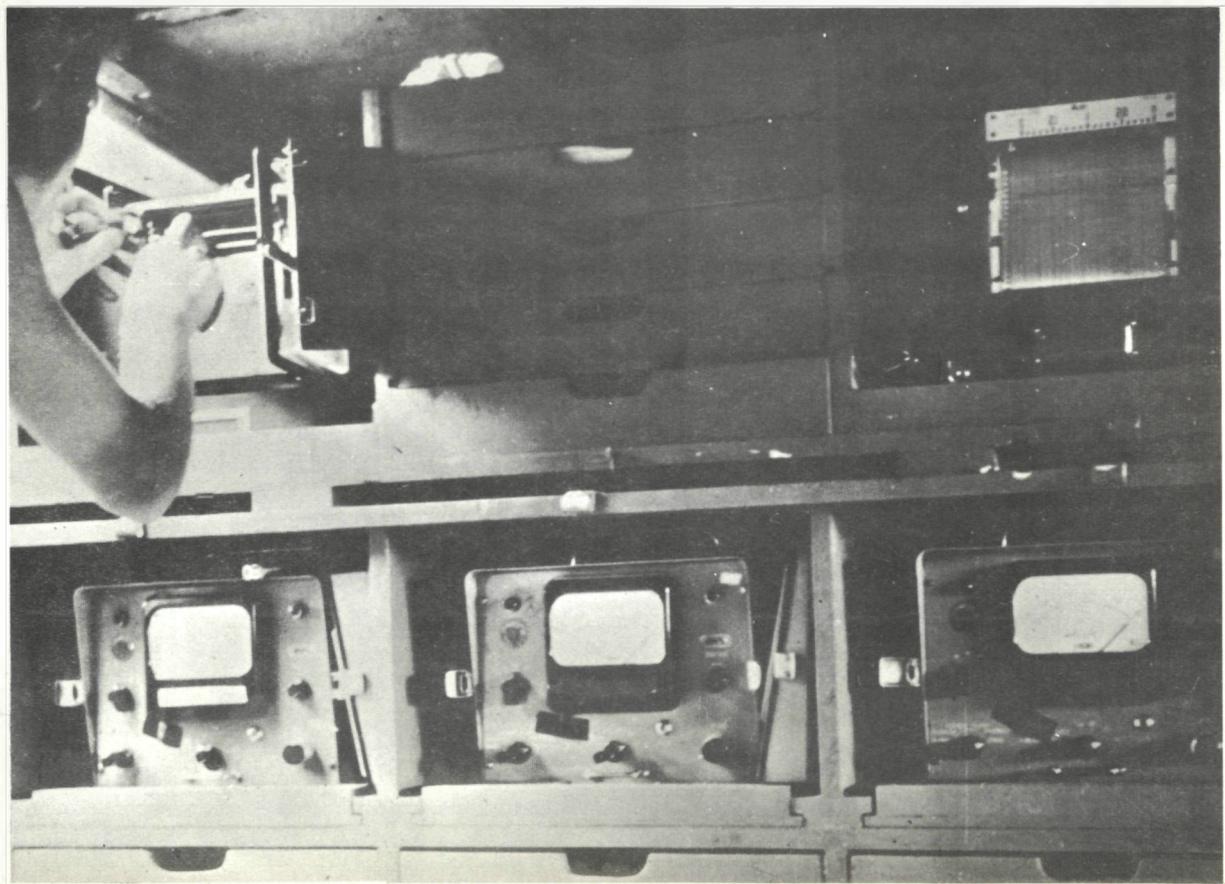


Figure 14 - Réglage d'un enregistreur à l'intérieur de l'embarcation.

ANNEXECARACTERISTIQUESDE L'APPAREILLAGE DE DETECTION UTILISE1 - Sonde détectrice

- sonde étanche en acier inoxydable : jusqu'à 10 kg de pression
- cristal détecteur :  $\text{INa(Tl)}$   $1\frac{1}{2} \times 1$ " muni d'un dispositif antichoc
- photomultiplicateur : 150 AVP de la "Radiotechnie", blindé avec du  $\mu$ métal
- préampli : constitué par 2 transistors OC 139, charge de sortie :  $82 \Omega$
- câble associé à 7 conducteurs : 50 m de câble par sonde, résistance mécanique : 80 kg, perte d'impulsions par réflexion dans la câble  $\leq 10\%$

Fournisseur : Sté de Recherches et d'Applications Techniques  
(S.R.A.T.)  
41, rue Emeriau  
Paris-15e

2 - Intégrateur SPP 3

- Circuits électroniques entièrement transistorisés présentés dans un boîtier étanche à la pression 0,600 kg (poids 5 kg)
- alimentation : 3 piles de 1,5 V en série
  - autonomie : 60 h en fonctionnement intermittent  
30 h en fonctionnement continu
  - T.H.T. : 500 V + 1000 V en 2 éléments série, débitant respectivement  $50 \mu\text{A}$  et  $15 \mu\text{A}$
  - discrimination : par sélecteur d'amplitude de réglage possible par un bouton de tarage
  - 12 seuils disponibles par plots : 50 KeV, 100 KeV, 150 KeV, 200 KeV, 250 KeV, 300 KeV, 400 KeV, 600 KeV, 800 KeV, 1000 KeV, 1500 KeV, 2000 KeV

- cote de temps par 6 positions : 0,12 s, 0,4 s, 1,2 s, 4 s, 12 s  
1 position normale correspondant à une déviation standard relative  $\frac{\sigma(N)}{N}$  de 5% en bout de chaque  $\gamma$ .
- sensibilité : 6 gammes : 0-5 cps, 0-150 cps, 0-500 cps, 0-1500 cps, 0-5000 cps, 0-15000 cps
- sorties : soit en impulsion (adaptation échelle ou écouteurs), soit en continu pour l'attaque d'un enregistreur, le courant de sortie maximum est alors de 50  $\mu$ A s/ 1 impédance de 1000  $\Omega$
- électronique : tropicalisée entre -25 et +50° C

Fournisseur : Sté de Recherches et d'Applications Techniques  
(S.R.A.T.)  
41, rue Emeriau  
Paris-15e

### 3 - Intégrateur "Lecomte"

Circuits électroniques entièrement transistorisés (poids 15 kg)

- alimentation autonome de l'intégrateur par 2 éléments "Voltabloc" de 12 V chacun
- autonomie : 10 h en marche continue
- T.H.T. : stabilisée, variable d'une façon continue de 750 à 1500 V - débit 300  $\mu$ A
- amplificateur : à entrée positive ou négative
- discrimination : par sélecteur d'amplitude non linéaire constitué par un potentiomètre "rotapot" qui prélève une fraction plus ou moins grande des impulsions d'entrée issues du préampli de la sonde. Il s'ensuit une discrimination qui suit une loi seuil (en nombre de divisions) = f (énergie en KeV) hyperbolique (courbes...)
- cote de temps : 1, 3 et 10 secondes
- sortie enregistreurs : 50 mV ou 2 mA selon la plaquette transistorisée utilisée
- sensibilités : pour les besoins du problème, elles ont été modifiées. Nous disposons en définitive de : 0-10 cps, 0-30 cps, 0-100 cps, 0-300 cps, 0-1000 cps, 0-3000 cps, 0-10000 cps

Fabriqué d'abord par le Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble  
Ensuite par la Sté d'Applications Industrielles de la Physique  
(S.A.I.P.)  
38, rue Gabriel-Crié  
Malakoff (Seine)

**4 - Enregistreurs galvanométriques**

- cadre : 2 mA sur 3500  $\Omega$ , muni d'un toppeur fonctionnant sur 12 V
- temps de balayage de l'échelle pour un signal de 2 mA : t 2 s
- largeur de l'échelle : 120 mm
- entraînement par un mouvement d'horlogerie à remontage manuel
- vitesses disponibles :
  - gamme PV (petites vitesses) 15, 30, 60, 120, 240 mm/h
  - gamme GV (grandes vitesses) 15, 30, 60, 120, 240 mm/mn
- inscription : soit à l'encre, soit sur papier métallisé à claquage sous 30 V

Fournisseur : Compagnie des Compteurs  
12, place des Etats-Unis  
Montrouge (Seine)

Importance du choix du type et de la granulométrie des  
traceurs radio-actifs selon les problèmes étudiés

W. NESTEROFF

Laboratoire de géologie dynamique  
Université de Paris

L'application des traceurs radio-actifs à la dynamique sédimentaire ouvre une nouvelle ère dans ce domaine. En effet, si nous mettons à part les galets, l'étude du déplacement des sables où des particules de vase était extrêmement délicate avant l'apparition de ces techniques nouvelles. Dans le cas des sables littoraux, par exemple, des observations globales ainsi que des cas particuliers (accumulations au vent des épis) nous indiquent qu'un littoral donné se transforme. Mais nous sommes incapables de saisir les mécanismes de ces transformations. Le déplacement du sable se produit dans un laps de temps trop court et entraîne des transformations instantanées trop faibles pour que nos sens puissent les saisir. A cause de son échelle, les effets du déferlement d'une vague (quelques secondes et quelques mètres de littoral) nous échappent et nous ne percevons que les résultats cumulés (de l'ordre de quelques jours et d'une large portion de plage). Nos sens sont capables d'intégrer mais non d'analyser ces phénomènes.

Par contre, les traceurs radio-actifs permettent de suivre, par exemple, une petite quantité de grains de sable donnés. Toutefois, l'utilisation de ces traceurs demeure délicate et certaines précautions doivent être prises.

Nous assumons dans nos expériences que les traceurs introduits au milieu d'un complexe sédimentaire en mouvement se comportent comme les sédiments autochtones. Ceci réduit considérablement nos possibilités quant au choix des caractéristiques physiques des grains employés comme traceurs. En effet, le transport étant effectué par de l'eau, le comportement hydraulique des traceurs doit être identique à celui des grains en place, sinon un triage préférentiel se produit et on

observe ce triage préférentiel et non les déplacements du matériel du fond étudié.

Ces caractéristiques physiques des traceurs que nous ne pouvons choisir que dans une certaine mesure, sont la forme, la densité et la dimension.

La forme est importante. On sait que les feuillets ou plaques sont plus facilement transportés par l'eau que des masses plus sphériques. Dans le triage produit par la houle, par exemple, les feuillets de micas de 800  $\mu$  sont entraînés à la même place que les grains de quartz de 250  $\mu$ . Nous ne sommes donc pas libres d'utiliser des traceurs de n'importe quelle forme. Celle-ci doit obligatoirement se rapprocher de celle des grains autochtones.

De son côté la densité n'est pas moins importante. Les minéraux lourds des sables se rassemblent souvent en horizons préférentiels sur les plages (3) et peuvent même être complètement éliminés d'un stock de sable donné (1).

La dimension enfin, joue un rôle fondamental. Nous savons en effet, que tout transport hydraulique, que ce soit celui de la houle (2) ou celui des courants, aboutit essentiellement à un triage dimensionnel.

En résumé, lors de la sélection des traceurs nous ne sommes absolument pas libres de choisir leurs caractéristiques physiques. La forme et la densité devant être obligatoirement très proches du matériel autochtone, seule la dimension nous laisse une certaine liberté de choix. Dans la plupart des cas, on est conduit à adopter une granulométrie identique à celle du sédiment autochtone. C'est le cas le plus simple, représenté par exemple, par les études de l'évolution des sables situés au large des ports marins (4). Il est intéressant de remarquer que les résultats de ces études n'indiquent, en général, qu'un étalement des sables de part et d'autre du point d'injection.

Les expériences deviennent beaucoup plus délicates lorsque les sédiments naturels de dimensions différentes se succèdent sur un espace

relativement limité. C'est le cas en particulier de toutes les études littorales. Le choix de la dimension des traceurs conditionne alors le succès des recherches, et je voudrais, dans ce cadre, analyser deux exemples typiques.

### LA PLAGE

Sur une plage marine, la distribution des dimensions le long d'une perpendiculaire à la côte, est assez spéciale. La plage émergée est formée de sable souvent grossier dont le diamètre moyen diminue à mesure que l'on s'éloigne vers le large, le long de la plage sous-marine. Mais cette tendance s'inverse à l'approche de la barre où l'on trouve, de nouveau, du sable assez grossier. Une fois la barre dépassée, le diamètre moyen des grains décroît de nouveau et cette fois sans inversion vers le large (Fig. 1). Cette distribution est liée à l'action de la houle, et à un moment donné, pour une houle de direction et de période donnée, chaque dimension a une place bien déterminée sur la plage. C'est la notion de "grains caractéristiques" (2). Chaque grain naturel en déséquilibre dimensionnel avec le fond sur lequel il repose, est, sous l'action de la houle, transporté dans une zone où cet équilibre est rétabli (7).

On comprend aisément que si l'on introduit des traceurs dont la dimension est différente, même très légèrement, du matériel autochtone, on observera simplement une adaptation du matériel traceur à la houle. Le cheminement des traceurs ne représente absolument pas, dans ces conditions, les mouvements du sable du fond naturel, mais bien un transport propre aux seuls traceurs.

De plus, ce transport peut être dirigé dans des directions très différentes selon le point d'introduction des traceurs. Ainsi, des grains traceurs trop fins, introduits sur la face de la barre regardant la terre, seront transportés vers le littoral, tandis que le même matériel abandonné sur la face de la barre tournée vers le large, cheminera vers la haute mer.

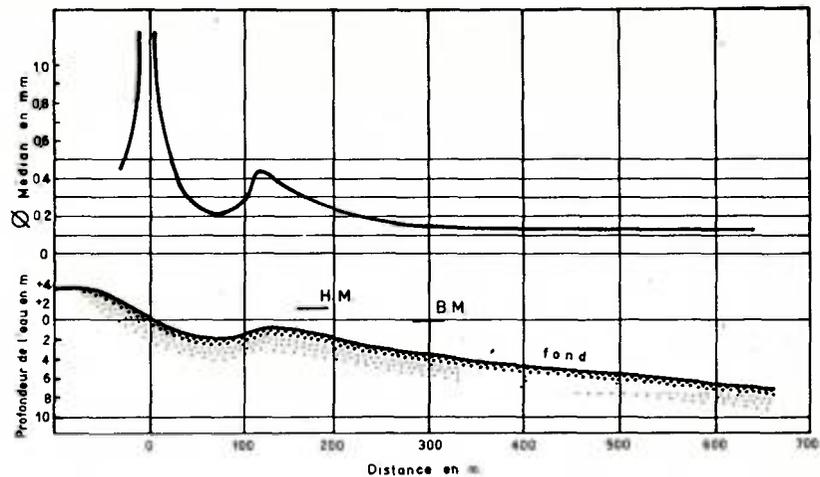


Figure 1 - Répartition dimensionnelle des grains de sable par rapport à la topographie d'une plage. (6)

B.M. : niveau moyen des basses mers.

H.M. : niveau moyen des hautes mers.

Il convient donc d'adapter avec beaucoup de soins la granulométrie des traceurs à celle du fond à étudier. Mais cette sensibilité du matériel littoral à l'action de la houle permet en contrepartie des études très fines sur le mouvement des sables. On peut en particulier, suivre sur une plage donnée, le destin des grains de n'importe quelle dimension, et assister par exemple à la mise en place sur la plage sous-marine d'un matériel trop fin abandonné sur la ligne du rivage.

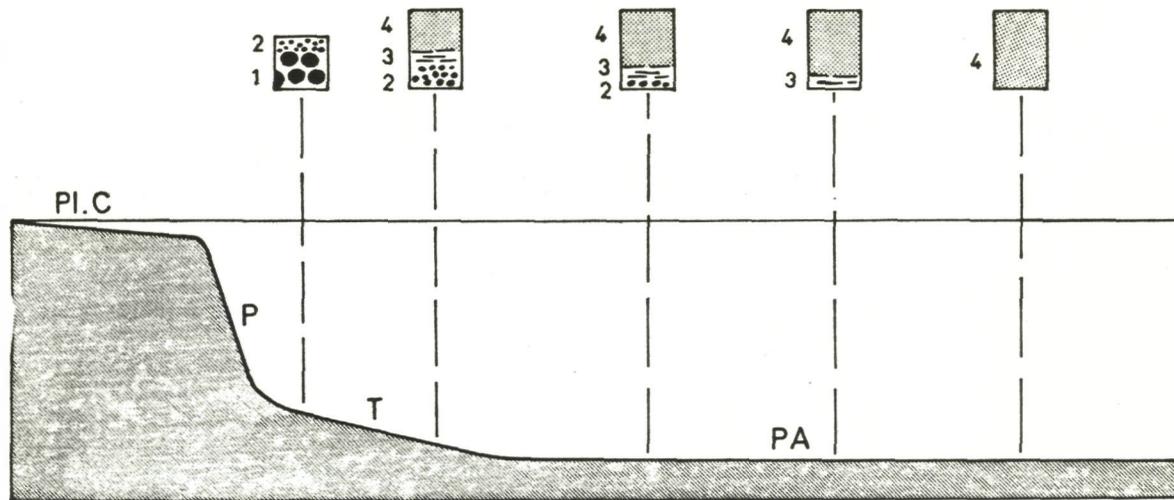
### LES TURBIDITES

Les courants de turbidité sont des avalanches boueuses sous-marines qui entraînent à partir de zones littorales, des sédiments qu'ils étalent dans certaines zones profondes de nos mers : les plaines abyssales (5). Les sédiments transportés comprennent toutes les dimensions, des galets aux vases.

Lorsque la pente du fond marin décroît, en général à partir de la base de la pente continentale, le délestage sédimentaire commence. Les éléments de grande dimension sont évidemment abandonnés les premiers et on constate, dans la mince nappe que dépose un courant de turbidité, un granoclassement horizontal en se dirigeant vers le large. Ainsi, on ne trouve des galets que sur la pente continentale et au début de la plaine abyssale tandis qu'ils disparaissent plus loin. Les sables se rencontrent dans la plaine abyssale mais deviennent de plus en plus fins lorsqu'on se dirige vers le large pour passer finalement aux sablons et même aux vases.

De plus, en chaque point de ces nappes, on observe un granoclassement vertical, la dimension du matériel diminuant de la base à la surface de la nappe déposée.

En résumé, le dépôt d'un courant de turbidité conduit à une nappe formée de couches superposées de sédiments de plus en plus fins. En chacun de ces points, on peut mettre en évidence une certaine séquence sédimentaire (A), (Fig. 2).



**Figure 2** - Répartition, selon les provinces topographiques de la mer profonde, des divers sédiments dans une nappe déposée par un courant de turbidité.

P.I.C : plateau continental - P : pente - T : talus - P.A. : plaine abyssale.

1 : galets - 2 : sables - 3 : sablon - 4 : vase.

On a évidemment pensé à étudier ces courants de turbidité à l'aide de traceurs radio-actifs. Toutefois aucune expérience n'a été tentée jusqu'à maintenant.

Du point de vue théorique, cependant, on peut se demander comment procéder à ce marquage, plus exactement quelle dimension convient-il de marquer. Les galets sont en général très rares, donc difficiles à retrouver, surtout en mer profonde. On peut évidemment leur incorporer des sources à très haute activité mais celles-ci présenteraient alors un certain danger.

Le sable est généralement déposé à la base du dépôt et surmonté de sablon et de vase qui peuvent rendre la détection difficile. Les sablons par contre, sont situés dans une position plus favorable. Enfin, les vases présentent un très grand risque de dispersion par suite des possibilités de leur transport en suspension.

Sans parler du très délicat problème de la dissémination des traceurs dans une nappe pouvant s'étaler sur des dizaines de kilomètres, on voit que le choix dimensionnel des traceurs présente de très grandes difficultés. Il ressort toutefois de la discussion précédente, que ce sont les sablons qui semblent les plus intéressants à marquer. En effet, ils ne sont généralement recouverts que d'une couche de vase épaisse d'une vingtaine de centimètres et sont souvent entraînés jusqu'aux extrémités les plus éloignées du dépôt. Il ne s'agit cependant que d'une hypothèse de travail et seule l'expérience montrera les meilleures méthodes. Cet exemple des courants de turbidité met particulièrement bien en valeur l'importance du choix dimensionnel des traceurs.

#### BIBLIOGRAPHIE

1. Duplaix, S. et Nesteroff, W.D.  
Recherches sur les minéraux lourds du golfe de la Napoule et du golfe Juan  
B.S.G.F., 7 (1959), t.I, 107-111
2. Eaton, R.O.  
Littoral processes on sandy coasts  
Proc. First Conf. Coast. Eng., Long Beach, California, 1950

3. Emery, K.O. et Stevenson, R.E.  
Laminated beach sand  
Journ. Sed. Pet., 20 (1950), 220-223
4. Forest, G. et Jaffry, P.  
Emploi des traceurs radio-actifs dans l'étude des mouvements de sédiments sous l'action de la houle et des courants  
7e Congrès Ass. Intern. Rech. Hydraul., Lisbonne, 1957,  
Communication D. 16
5. Heezen, B.C.  
Turbidity currents  
dans : The Sea, p. 742  
Ed. J. Wiley and Sons, New York, 1963
6. Inose, S., Kato, M., Sato, S. et Siraishi, N.  
The field experiment of littoral drift using radioactive glass sand  
Proc. Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy,  
Geneva, 1955, 8/P/1053
7. Nesteroff, W.D.  
Recherches sur les sédiments marins actuels de la région d'Antibes  
Thèse, Sciences, Paris, 1958
8. Nesteroff, W.D.  
La "séquence-type" dans les turbidités terrigènes modernes  
Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dynam., 4 (1961), 263-268

Procédé de marquage d'échantillons de sable naturel  
au moyen de substances radio-actives

H. BECKER et H. GÖTTE  
Farbwerke Hoechst AG., Francfort-sur-le-Main

L'un des procédés mis au point par la firme Hoechst consiste à marquer le grain en surface. Il supprime de nombreux inconvénients propres à d'autres procédés. Il permet d'exploiter quantitativement les activités utilisées et fournit un produit dont les caractéristiques de surface ne sont pas modifiées par le marquage.

Des échantillons de sable naturel sont mis en suspension dans une solution alcoolisée de radionuclides, exempte d'entraîneur ou pauvre en entraîneurs, que l'on convertit à l'aide d'un agent approprié en une forme insoluble (par exemple hydroxyde, oxyhydrate, oxalate, phosphate). La suspension étant agitée d'une manière continue, il y a précipitation de certains composés et (consécutivement à l'évaporation du solvant) condensation de l'activité en distribution fine et homogène à la surface des grains de sable à raison de plus 99 %. Pour que l'activité reste fixée à la surface, il faut ensuite chauffer jusqu'à une température de 500 à 1000° C. Les radio-isotopes utilisables à cet effet se sont avérés être ceux des éléments des groupes III et IV, mais aussi des groupes II, V et VIII du système périodique. Des résultats encourageants ont été obtenus jusqu'ici avec  $^{46}\text{Sc}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{95}\text{Zr}$  et  $^{95}\text{Nb}$  ainsi que  $^{140}\text{Ba}$ , et, par modification d'un procédé mis au point en France, également avec  $^{192}\text{Ir}$ . Les éléments des groupes III et IV sont facilement fixables sous leur forme oxydée, notamment lorsqu'on passe par leurs hydroxydes et leurs oxalates, alors que pour le baryum la forme la plus appropriée est celle du phosphate ou du fluorure. L'iridium est avantageusement utilisable sous la forme de  $(\text{NH}_4)_2 \text{IrCl}_6$ , qui est soluble et qui, par calcination à l'air, se transforme en  $\text{IrO}_2$ . L'activité spécifique susceptible d'être obtenue avec cette méthode va jusqu'à 0,5 c/g lorsqu'on utilise du  $^{46}\text{Sc}$  et elle est plus élevée encore lorsqu'on utilise du  $^{95}\text{Zr}$ .

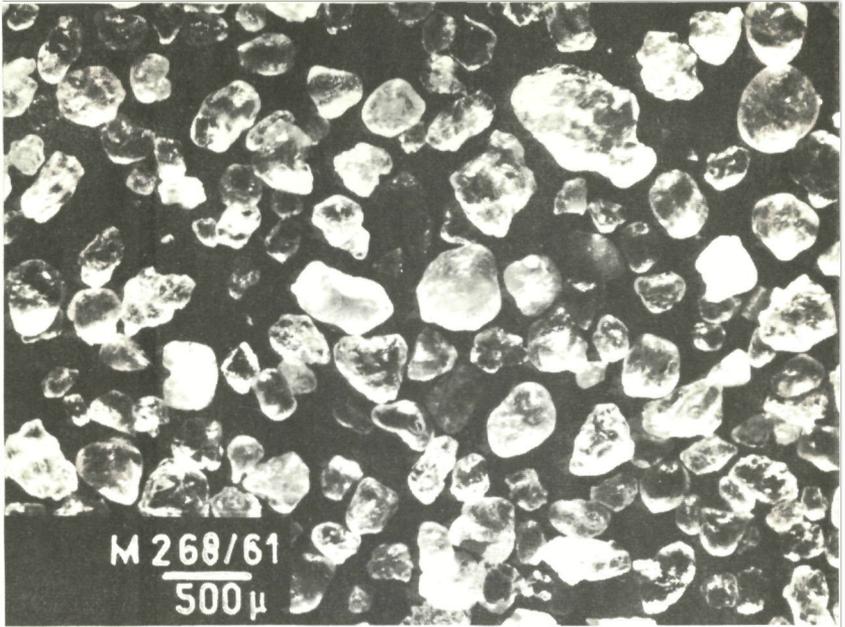


Fig. 1a



Fig. 1b

Figure 1 - Les microphotographies font apparaître que les grains marqués (fig. 1b) conservent la même forme extérieure que les grains non marqués (fig. 1a)

Pour l'étude du marquage du sable dans la région côtière allemande, Hoechst a marqué jusqu'ici trois fois 100 kg de sable de mer avec à chaque fois 3c <sup>46</sup>So.

### Etude du sable marqué d'après le procédé de Hoechst

Le sable marqué selon le procédé que nous venons de décrire a été étudié au cours d'une série d'examen, sous l'angle de ses propriétés physiques et de la résistance à l'abrasion de l'activité portée en surface.

#### 1. Etude des propriétés physiques

Le sable marqué a été étudié sous l'angle de ses propriétés de surface et d'autres caractéristiques physiques susceptibles d'influer sur le mouvement des sables et il a été comparé avec du sable non marqué de même provenance. Les microphotographies (Fig. 1) font apparaître par exemple que les grains marqués conservent la même forme extérieure que les grains non marqués. Des examens quantitatifs effectués par le professeur Seybold (de l'Institut géologique de l'Université de Kiel), il ressort que la rondeur du grain n'est pas sensiblement affectée par le marquage.

La figure 2 montre que la distribution granulométrique du sable marqué correspond à celle du sable non marqué, tout au moins dans les limites de sensibilité de l'appareillage utilisé. Des examens comparatifs ont également été effectués en ce qui concerne la densité des grains, la densité de vrac et la densité de tassement, ainsi que le comportement sous écoulement.

Le tableau ci-après fait apparaître que le marquage ne modifie pas sensiblement les caractéristiques en question, qui sont en liaison avec la matière du grain, sa grosseur et sa structure superficielle.

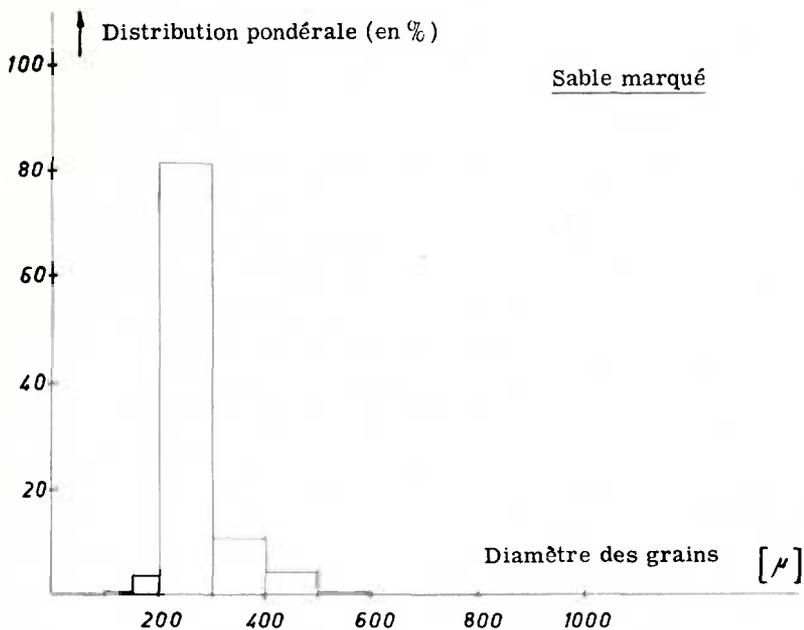
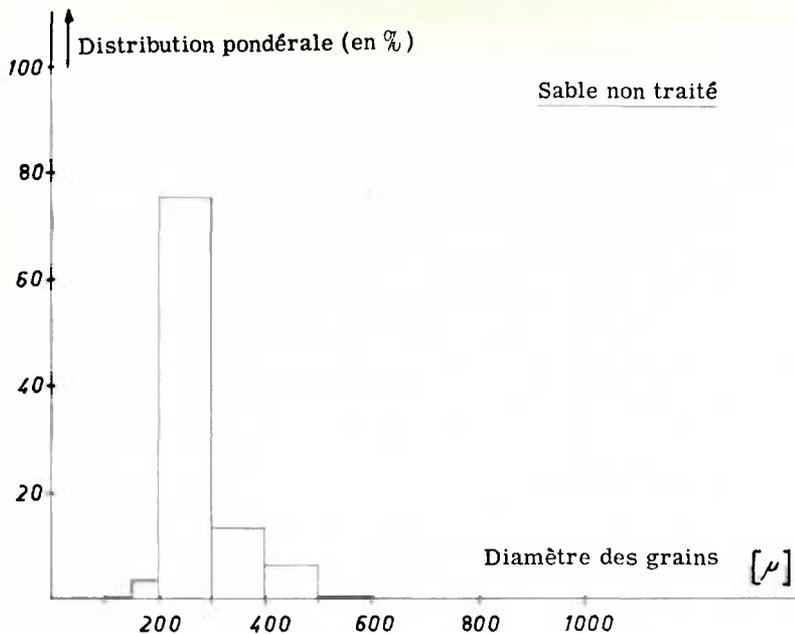


Figure 2 - Considérant les limites de sensibilité de l'appareillage utilisé, la distribution granulométrique du sable marqué correspond à celle du sable non marqué.

Sable marin :	Densité du grain (g/cm <sup>3</sup> )	Densité de vrac (g/cm <sup>3</sup> )	Densité de tassement (g/cm <sup>3</sup> )	Ecoulement (*) (min)
Marqué	2,625 ± 0,005	1,47 ± 0,005	1,61 ± 0,005	3,58 ± 0,02
Non marqué	2,615 ± 0,005	1,48 ± 0,005	1,61 ± 0,005	3,50 ± 0,06

(\*) Temps de passage à travers un tube capillaire de 5cm de long.

Compte tenu de ces essais, on peut s'attendre à ce que le comportement migratoire du sable marqué soit exactement le même que celui du sable non marqué.

## 2. Etude de la solubilité de la substance de marquage

Afin de tester l'efficacité de l'adhérence de l'activité à la surface du grain, on a soumis différents échantillons de sable marqué, de 25 grammes chacun, immergés dans 25 cm<sup>3</sup> d'une solution salée à 3 % (ce qui est la concentration saline de l'eau de mer) à un essai oscillatoire de type excentrique, d'une fréquence de 80/min. et d'une amplitude de 10 cm environ. La fraction d'activité ayant passé dans l'eau salée a été mesurée à partir du filtrat d'eau recueilli à travers un filtre à membrane. Les courbes de la figure 3 indiquent la relation entre la proportion d'activité dissoute et la durée des oscillations pour différents types de radionuclides. La fraction effectivement dissoute est très variable selon le radionuclide utilisé; la perte est la plus forte avec le <sup>140</sup>Ba (~1 %), elle est la plus faible avec le <sup>46</sup>Sc (< 0,1 %). Toutes les courbes tendent vers une valeur de saturation.

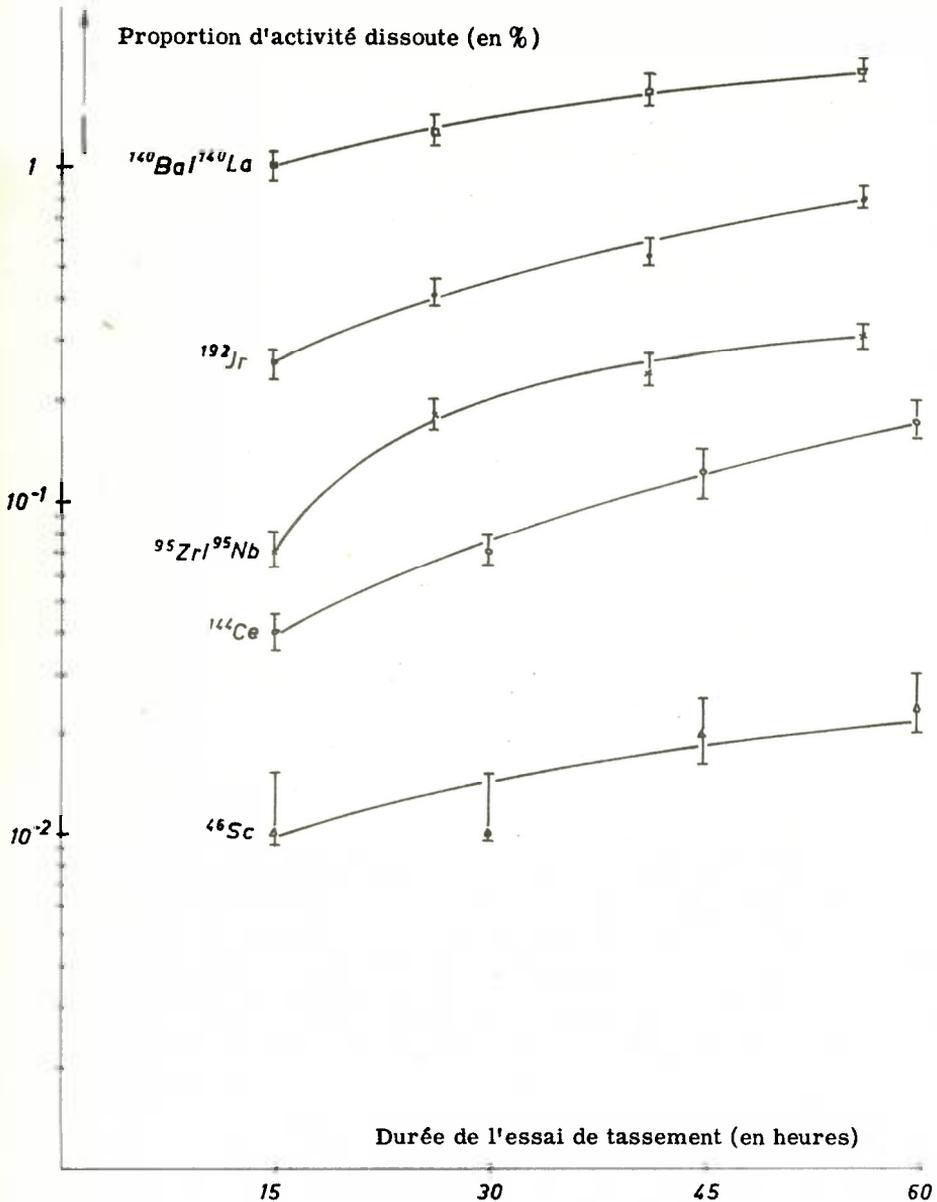


Figure 3 - Relation entre la proportion d'activité dissoute et la durée des oscillations pour différents types de radionuclides.

L'Iridium-192 dans les études de mouvements de sédiments  
et descriptions d'une méthode de marquage en  
surface de grains de sable à l'Iridium-192

Ch. RISPAL et G. COURTOIS  
Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay  
Section d'Application des Radio-éléments

I - QUALITES DE L'IRIDIUM-192

L'Iridium-192 est un émetteur  $\gamma$  qui présente, dans les études de mouvements de sédiments, de nombreuses caractéristiques intéressantes.

Telles sont :

1°) Sa période, 74 jours, bien adaptée aux expériences entreprises dans de nombreuses études de charriage.

2°) Son énergie voisine de 300 Kev (voir représentation au tableau de la page 4). Cette énergie :

- permet l'obtention de bons rendements de détection avec les détecteurs à scintillation, préférés de plus en plus aux compteurs Geiger Müller. Ces rendements sont de 75 % environ pour un cristal d'un pouce d'épaisseur, de 85 % environ pour un cristal d'1,5 pouce d'épaisseur. Certes les épaisseurs moitié dans l'eau et le sable humide sont un peu plus petites pour l' $^{192}\text{Ir}$  que pour un émetteur  $\gamma$  dur tel que le  $^{46}\text{Sc}$ , mais la diminution est relativement faible (dans l'eau: environ 7 cm pour l' $^{192}\text{Ir}$  et 9 cm pour le  $^{46}\text{Sc}$ ).
- facilite la protection réalisée avec des containers peu volumineux et peu lourds. Ainsi, à activité égale (250 mCi), il faut un container de 60 kg pour transporter du  $^{182}\text{Ta}$ , 6 kg pour l' $^{192}\text{Ir}$ , en respectant les normes françaises de transport des radioéléments (moins de 200 mR/h au contact du container, moins de 10 mR/h à 1 mètre).

3°) Sa forte section efficace de 360 barns

Cette valeur élevée de la section efficace permet :

- la fabrication de verre à l'iridium à très faible teneur en iridium, dont il est par suite très facile d'ajuster le poids spécifique à celui du sédiment,
- l'obtention d'activité spécifique élevée, facteur important dans la stabilité des sables marqués en surface.

4°) Son nombre important de  $\gamma$  émis par désintégration : 2,8  $\gamma$ 

Ainsi, si on fait la comparaison avec le  $^{51}\text{Cr}$  qui émet approximativement la même énergie, mais avec environ 0,1  $\gamma$  utilisable par désintégration, on s'aperçoit qu'il n'est besoin d'utiliser que 35 mCi de  $^{192}\text{Ir}$  à la place de 1 Ci de  $^{51}\text{Cr}$  pour avoir le même nombre de  $\gamma$  utiles. L'avantage "psychologique" est évident.

D'autre part, du point de vue sécurité, un grain de sable marqué au  $^{51}\text{Cr}$  se comporte comme un petit poste à rayons X puisque 9 sur 10 de ses désintégrations conduisent à l'émission d'une raie X du chrome. Lors de l'ingestion accidentelle d'un de ces grains, cette émission n'est plus négligeable.

Par suite des considérations précédentes, nous avons été amenés à fabriquer un verre à l'iridium et à mettre au point pour l' $^{192}\text{Ir}$  une méthode de marquage en surface de grains de sable.

II - VERRE A L'IRIDIUM

Le verre à l'iridium utilisé contient 0,3 % en poids d'iridium introduit dans le mélange verrier au moment de la fabrication sous forme de chlorure  $\text{Ir Cl}_3$  (0,5 % en poids).

Il a la composition pondérale moyenne suivante :

$\text{Si O}_2$ .....	48 %
$\text{Al}_2 \text{O}_3$ .....	19 %
$\text{Ti O}_2$ .....	5 %
$\text{Ca O}$ .....	14 %
$\text{Mg O}$ .....	3,5 %
$\text{Ba O}$ .....	5 %
$\text{K}_2 \text{O}$ .....	5 %

Dans cette composition on voit qu'on a évité l'emploi d'éléments de forte section efficace ou donnant par irradiation des émetteurs de longues périodes. Ainsi, pour une irradiation d'une semaine à  $1,2 \cdot 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>/s donnant 250 mCi d'<sup>192</sup>Ir à sortie de réacteur, les principales impuretés radioactives restantes au bout d'une semaine de décroissance sont :

<sup>154</sup> Ir	:	31 mCi
<sup>45</sup> Ca	:	0,75 mCi
<sup>131</sup> Ba	:	0,65 mCi
<sup>42</sup> K	:	7 µCi

CARACTERISTIQUES DE L'IRIDIUM-192

Période : 74,4 jours

Obtention :  $^{191}\text{Ir} (n,\gamma) \rightarrow ^{192}\text{Ir}$

Emission  $\gamma$  (spectre complexe)

Energie en KeV	Intensité	Représentation simplifiée	
		Energie moyenne en KeV	Intensité partielle
136	4		
174	1		
282	10	310	0,841
296	380		
302	370		
316	990		
415	1		
468	300	468	0,145
589	11	600	0,014
604	14		
612	5		
885	1		

Nombre moyen de  $\gamma$  utilisables émis par désintégration : 2,8

Ionisation spécifique : 0,5 R/h à 1 m par curie

Epaisseur multié : plomb 2,3 mm - eau 7 cm

Section efficace : 360 barns

### III - DESCRIPTION DE LA METHODE DE MARQUAGE EN SURFACE

Ce travail a été complètement développé par M. RISPAL auprès duquel tous renseignements complémentaires pourront être obtenus.

#### III.1 - Mise en oeuvre

1°) On part, comme matières premières, soit de chloroiridate de sodium ( $\text{Ir Cl}_6 \text{Na}_2$ ), soit de chloroiridate d'ammonium ( $\text{Ir Cl}_6 (\text{NH}_4)_2$ ). Ces deux sels sont solubles dans l'eau acidulée par HCl.

2°) On prépare donc une solution chlorhydrique 6N environ pour éviter toute hydrolyse. Il faut utiliser ces sels avec une activité spécifique élevée, car on ne doit pas déposer plus de 0,1 mg d'Iridium métal par gramme de sable. Au-delà de cette quantité d'entraîneur, le dépôt n'est plus aussi stable à la lixiviation. En admettant que l'on irradie le métal une semaine à un flux de neutrons de  $10^{13}$ , on obtient une activité spécifique de 17 curies par gramme d'Iridium, ce qui permettrait de déposer 1,7 curie d' $^{192}\text{Ir}$  par kg de sable.

3°) La solution radioactive est malaxée avec du sable dont on a sélectionné les granulométries désirées pour ressembler exactement au sédiment à marquer. Il est préférable, pour obtenir une activité spécifique constante, de traiter séparément chaque granulométrie sélectionnée. De plus, pour avoir une tenue identique du radioélément sur chaque granulométrie, il est souhaitable d'utiliser une quantité d'entraîneur proportionnelle à la surface spécifique du sable. Ces deux derniers détails techniques ne sont pas d'une nécessité rigoureuse pour obtenir un produit satisfaisant.

4°) Pendant le malaxage, la solution radioactive est évaporée de manière à déposer uniformément le radioélément à la surface des grains de sable. L'évaporation peut être réalisée soit par chauffage simple, soit par chauffage sous vide, ce qui permet d'opérer à température plus basse et évite l'emploi d'un récipient en matériau céramique résistant à la corrosion par HCl à chaud, mais peu résistant à l'abrasion. La quantité de solution à utiliser puis à évaporer est d'environ 0,250 litre par kg de sable.

5°) Après le dépôt du radioélément par évaporation de 95 % environ de la quantité de la solution utilisée, le sable presque sec est versé dans un four étanche, où il est traité ensuite pendant une heure à une température de 1000°C environ sous un courant d'hydrogène pur. On a réduction de l'Iridium à l'état

métallique et probablement en même temps légère diffusion des atomes radioactifs dans le réseau cristallin du sable, ce qui confère une extrême solidité au dépôt. Il s'est avéré par la suite, que le traitement à l'hydrogène n'est pas absolument indispensable et qu'une mise en température d'une heure à 1 000°C est très souvent suffisante. Néanmoins, en opérant suivant cette dernière méthode, il faut prendre quelques précautions. En effet, la décomposition du sel d'iridium sous l'action de la chaleur, qui donne de l'iridium métal, est lente et peut être précédée d'une volatilisation partielle, ce qui provoque d'une part une perte de radioélément d'autre part, une répartition moins homogène de l'activité à la surface des grains de sable. Si on veut effectuer la cuisson en atmosphère oxydante, il faut un programme thermique beaucoup plus long. En atmosphère d'hydrogène, au contraire, la décomposition du sel d'iridium est immédiate et le programme thermique peut être suivi sans précaution particulière si ce n'est celles qui sont appropriées à l'emploi de l'hydrogène.

6°) A la suite de ce traitement à chaud, puis après refroidissement, le sable radioactif est prêt à l'emploi.

### III.2 - Extension possible de la méthode

Cette méthode n'est applicable sans modification, qu'aux métaux nobles, c'est-à-dire aux isotopes tels que :  $^{192}\text{Ir}$  déjà nommé,  $^{198}\text{Au}$ ,  $^{110}\text{Ag}$ .

Une méthode voisine au point de vue technique, mais comportant une fixation de l'isotope sous forme d'oxyde et non plus sous forme métallique, est applicable aux isotopes suivants :  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{175}\text{Hf}$ ,  $^{95}\text{Zr}$  et surtout  $^{46}\text{Sc}$  ainsi que  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{90}\text{Y}$ .

L'appareillage nécessaire est peu différent, notamment en ce qui concerne le four de cuisson, qui doit travailler sous atmosphère oxydante au lieu de réductrice.

### III.5 - Performances obtenues

La tenue au secouage dans l'eau de mer du sable marqué par le procédé ci-dessus est excellente. On constate rapidement une dégradation du dépôt de l'ordre, ou inférieure, à 10 % et une remise en solution de l'activité inférieure à 1 %. Après ces pertes, on n'en décèle plus aucune si on poursuit l'essai de tenue.

Ce résultat dépend essentiellement du coin apporté au malaxage et de la température de cuisson. Les valeurs précitées ont été obtenues pour une température de 1 000°C. La fixation peut sans difficulté être améliorée par cuisson à 1 200 °C par exemple.

### III.4 - Conclusion

Les avantages de cette nouvelle méthode de marquage radiotatif en surface des sédiments naturels sont les mêmes que ceux des autres procédés analogues, déjà décrits dans la littérature, (1) à (9), c'est-à-dire :

1°) La possibilité de faire varier le nombre de grains et l'activité spécifiques,

2°) L'identité physique avec le sédiment à marquer.

De plus deux autres avantages ont été obtenus :

1°) La solidité parfaite de fixation du dépôt.

2°) La standardisation et la simplification de la méthode, qui permet d'obtenir avec un rendement élevé, donc sans recyclage et sans traitement préalable du sable, un matériau bien reproductible.

Ces deux avantages sont acquis grâce à la combinaison de trois précautions techniques dont l'ensemble constitue l'innovation importante :

- évaporation complète de la solution active sur le sable,
- traitement thermique à haute température pendant la fixation chimique. Ce traitement permet de faire diffuser le radioélément dans le réseau cristallin du sable,

- emploi du radioélément à haute activité spécifique.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - GOLDBERG et INMAN  
"Neutron irradiated quartz as a tracer of sands movements"  
Bulletin of Geological Society of America - Vol. 66, May 1955, 611-615.
- 2 - GIBERT  
"Essai sur la possibilité d'employer <sup>110</sup>Ag dans l'étude du transport du sable par la mer".  
Ministerio das Obras Publicas - Laboratorio Nacional de Engenharia Civil  
Publication n° 63, Coimbra 1955.
- 3 - SMITH et BAKINS  
"Radioactive method for labelling and tracing sand and pebbles in investigations of littoral drift"  
International Conference on Radioisotopes in Scientific Research -  
UNESCO/NS/RIC/63 - Paris, septembre 1957.
- 4 - PETETSEN  
"Some radioactive surface labelling methods"  
Ingeniøren - Vol. 4, n° 3, septembre 1960, 99-102.
- 5 - DAVIDSON  
"Investigations of sands movements using radioactive sand"  
Svensk Geografisk Årsbok, 33, Lund. 1957
- 6 - SCHULZ et STROHL  
"Etudes expérimentales des migrations de sable sur les côtes allemandes,  
à l'aide de traceurs radioactifs"  
Deutsche Gewässerkunde Mitteilungen, Vol. 4, n° 1, p. 17 à 27.
- 7 - HOURS et JAFFRY  
"Application des isotopes radioactifs à l'étude des mouvements des sédiments  
et des galets dans les cours d'eau et en mer"  
Rapport C.E.A. n° 1269.

6 - ARIJAN - SANTEMA et SVASEK

"Movement of bottom sediments in coastal waters by currents and waves :  
measurement with the aid of radioactive tracers in the Netherlands"  
Progress report, June 1957, issued by Deltadients Rykswaterstaat,  
Ministry of Transport and Waterstaat, The Netherlands.

9 - Dr Hans GÖTTE (Sté HOECHST)

"Procédé pour marquer superficiellement le sable naturel avec des  
radionucléides"

Brevet DAS. 1.146.427 du 5 octobre 1961.

Technique de marquage radio-actif pour l'étude des  
mouvements de sable dans les eaux  
côtières allemandes

G. MEYN

Bundesanstalt für Wasserbau  
Aussenstelle Küste

Parmi les diverses possibilités de préparation d'indicateurs radio-actifs pour l'étude des mouvements de sable, on a choisi celle qui permet la fixation de substances radio-actives sur le matériau naturel. Ce procédé offre les avantages suivants :

1. Le sable à marquer peut être directement prélevé dans l'aire étudiée et ses propriétés hydrauliques ne diffèrent en aucune façon du sable non marqué.
2. Ce procédé permet de marquer de grandes masses de sédiments dans un laps de temps relativement court.
3. On est relativement libre du choix de l'indicateur.

Les études effectuées dans les eaux côtières allemandes ont démontré l'efficacité du nuclide Cr 51 (1). La période de demi-vie de 28 jours est favorable. L'énergie relativement faible de 0,3 MeV facilite la protection radiologique et porte à un degré élevé de la probabilité de réponse des compteurs à scintillations. Avec un émetteur  $\gamma$  de plus grande énergie, le parcours dans l'eau augmente; dans le cas du Sc 45, d'énergie égale à 1,1 McV, l'épaisseur-moitié est accrue du facteur 1,7. Mais, comme le parcours dans le plomb des rayonnements de plus haute énergie augmente dans une proportion incomparablement plus grande (après avoir traversé une couche de plomb de 5 cm, l'énergie du rayonnement  $\gamma$  émis par le Cr 51 est de l'ordre de  $1.10^{-6}$  et celle du rayonnement  $\gamma$  émis par le Sc 45 ne descend pas au-dessous de  $1,2 \cdot 10^{-2}$ ), la protection radiologique est rendue nettement plus difficile. Un inconvénient du Cr 51 est son faible rende-

ment en rayonnements  $\gamma$  (environ 8%) qu'une activité spécifique supérieure permet cependant de compenser. Pour des essais de courte durée, on a utilisé du La 140, dont la période est de 46,2 h.

Les éléments sont fixés sur le sable, dans une couche de silicate obtenue par un traitement préalable spécial. Pour pouvoir irradier de grandes quantités de sable à des doses aussi faibles que possible, l'on a mis au point une méthode de préparation largement automatisée (2). On commence par produire sur le sable une couche gélativeuse de silicate. A cet effet, le sable est imprégné d'une solution de verre soluble à 3-5 %, puis il est séché par brassage et lavé à l'acide nitrique.

Le sable traité se comporte comme un échangeur d'ions chargé d'ions  $H^+$ , qui échange ces ions  $H^+$  contre des ions  $Cr^{+++}$ . Du point de vue technique, il est préférable, quand la chose est possible, de charger le sable d'ions Cr en continu. Pour obtenir une répartition suffisamment uniforme du chrome sur le sable, il importe d'utiliser si possible au maximum la capacité de fixation des ions  $Cr^{+++}$ . Si l'on ajoute trop peu de chrome, seule la couche supérieure de sable est chargée en Cr; si l'on emploie trop de chrome, celui-ci traverse la colonne. Le  $p_H$  de la solution doit être de 5 à 6, le température d'environ 70°. Dans un petit montage expérimental, on a obtenu un rendement de plus de 99 %. Lors d'un essai d'abrasion, un échantillon de sable ainsi préparé a été maintenu pendant une semaine dans une solution de sel de cuisine à 3% et agité quotidiennement. Moins de 1 % de l'activité est passé dans la solution. Pour des quantités de sable plus importantes, on a réalisé une installation d'une capacité de 30 kg de sable à fonctionnement largement automatique (Fig. 1). La cuve à réaction de 30 cm de diamètre et de 1 m de long est en acier au chrome-nickel et est chauffée au moyen d'une résistance réglable d'une puissance de 2250 W. Les solutions sont injectées à l'aide d'une pompe doseuse pouvant débiter entre 0 et 20 l/h. L'appareil est monté à l'arrière d'un écran protecteur en plomb, le chauffage et la pompe étant commandés de l'extérieur.

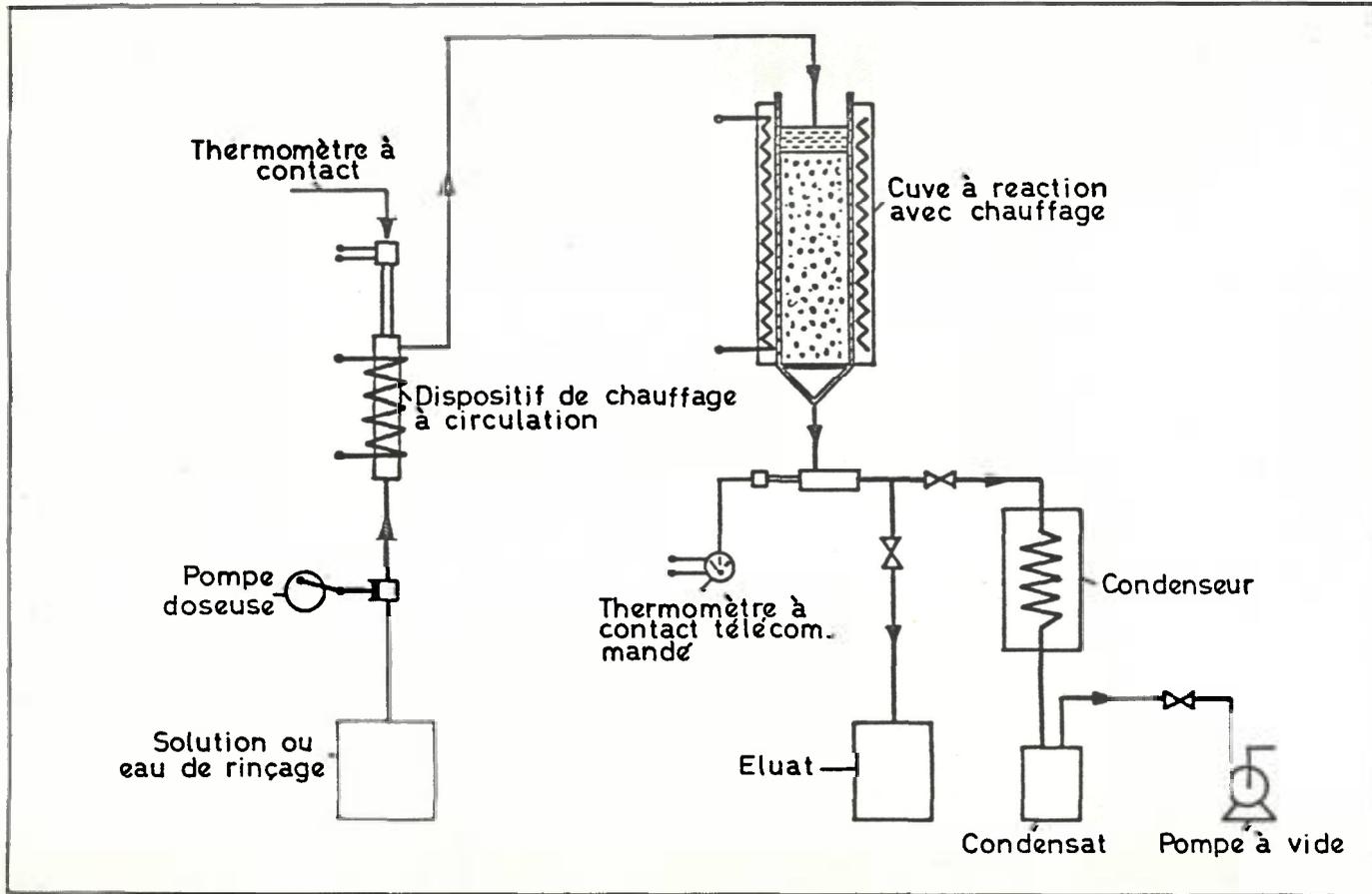


Figure 1 - Installation à fonctionnement largement automatique ayant une capacité de 30 kg de sable.

Les premiers essais ont montré qu'il était préférable de chauffer préalablement la solution. Aussi a-t-on construit à cet effet un dispositif de chauffage à circulation où la solution est portée à environ 90° avant d'atteindre la cuve à réaction. Le réglage du chauffage s'effectue au moyen d'un thermomètre à contact. Le préchauffage permet d'éviter une chute de température dans la cuve à réaction ainsi que le risque de surchauffe.

De l'eau est introduite par pompage dans le sable jusqu'à ce qu'on ait atteint la température et le  $p_H$  voulus. A ce moment-là, on ajoute la solution de Cr radio-actif. En traversant le sable, celle-ci s'acidifie légèrement par substitution d'ions  $H^+$  aux ions  $Cr^{+++}$  et une partie du chrome reste de ce fait en solution. La solution recueillie à la sortie doit alors être neutralisée, puis recyclée. L'adjonction d'un tampon approprié à la solution tendra à prévenir cet effet. Après rinçage suffisant à l'eau, le sable est séché dans la cuve à réaction. A cet effet, une pompe à vide fait passer de l'air dans le sable pendant que l'on chauffe à pleine puissance. En faisant basculer l'appareil, on transvase le sable sec dans des sacs en plastique qui se dissolvent dans l'eau.

Cette méthode, qui ne requiert pratiquement aucun entretien de l'installation, laquelle est de surcroît montée derrière un écran de plomb, se recommande particulièrement au point de vue de la protection radiologique. C'est ainsi, par exemple, que la dose d'irradiation reçue par le personnel, en cas de marquage de 80 kg de sable au moyen de 1,5 curie de Cr 51 est inférieure à 20 milliroentgens, de sorte que l'on peut travailler avec des activités même nettement plus élevées.

Pour éviter d'avoir à transporter du sable radio-actif sur de longs trajets, on a transformé un bateau en laboratoire, susceptible d'être amené à proximité de l'aire étudiée.

Pour la dissolution du chrome radio-actif, irradié en pile sous forme de poudre métallique, on peut au besoin recourir aux services d'un laboratoire extérieur spécialement équipé pour l'exécution de travaux mettant en oeuvre des substances radio-actives.

#### Bibliographie

1. Schulz, H. et Ströhl, G.

Untersuchung der Sandwanderung im Bereich der deutschen Küste mit radioaktiven Leitstoffen  
Deutsche Gewässerkundl. Mitteilungen, Jg. 4, 1960, H. 1

2. Schulz, H. et Meyn, G.

Sandwanderungsuntersuchungen mit radioaktiven Isotopen im deutschen Küstengebiet der Nord- und Ostsee in den Jahren 1961/62  
Deutsche Gewässerkundl. Mitteilungen, Jg. 7, 1963, H. 2

Mesures par traceurs radio-actifs du mouvement

des sables aux Pays-Bas

1957-1962

J.J. PILON

Rijkswaterstaat - Deltadienst  
Waterloopkundige Afdeling  
Bureau Hellevoetsluis

I. Introduction

Pour l'exécution de travaux hydrauliques, il est parfois nécessaire de savoir comment et dans quelle mesure le sable et la boue se déplacent sous l'influence des courants et du mouvement des vagues.

Cette connaissance est particulièrement importante lorsque les travaux sont effectués sur les fleuves, les bras de mer et le littoral ou dans leur voisinage immédiat.

L'exécution du projet Delta, qui prévoit la fermeture des bras de mer du sud-ouest des Pays-Bas, modifiera profondément la situation hydrographique de cette région côtière, notamment dans le "delta submergé" qui prolonge les estuaires.

En effet, les courants marins arrivant aux embouchures et en sortant perpendiculairement à la ligne de rivage disparaîtront en majeure partie pour ne laisser que les courants parallèles à la côte.

Sous l'influence du déplacement modifié des sédiments, la configuration du sol changera et, de ce fait, le schéma d'écoulement de l'eau ainsi que le mouvement, très important pour le transport du sable, des vagues sur la côte.

Une étude détaillée, de caractère surtout expérimental, du déplacement des sables et des boues dans les régions côtières intéressées s'imposait donc dans le cadre du projet Delta.

Cette étude est effectuée à la fois sur des modèles réduits dans les laboratoires d'hydraulique et au moyen de mesures sur le terrain.

Les travaux sur le terrain s'effectuent en trois étapes.

Au cours d'une première étape, on mesure les causes du déplacement des sables, ainsi que l'origine des courants et des vagues (que l'on doit d'ailleurs connaître pour d'autres raisons encore).

La deuxième étape comprend les sondages et les analyses d'échantillons du matériau de fond grâce auxquels on peut obtenir le résultat des déplacements de sable.

Enfin, on étudie directement le processus du mouvement même des sables. Outre les compteurs de débit de sable, on a mis au point, au cours de ces dernières années, un procédé de mesure fondé sur l'utilisation d'un traceur radio-actif.

Si l'on marque le sable en un point déterminé du fond de la rivière ou de la mer à l'aide d'un tel traceur, il est possible - grâce à l'extrême sensibilité des mesures de radio-activité - de déceler la radio-activité dans le sable pendant une longue période encore et à une assez grande distance du point choisi. En effectuant ce type de mesure, on s'efforce de faire aussi des déterminations quantitatives de charriage.

La mesure du déplacement des sables au moyen de traceurs radio-actifs a donc un double objectif :

en premier lieu, faire connaître la direction du mouvement des sables; en second lieu, permettre la détermination, en valeur absolue, des quantités de sable charriées par unité de temps.

Après les expériences préliminaires du laboratoire d'hydraulique "de Voorst" en 1957, des mesures de transport des sables au moyen de traceurs radio-actifs ont été effectuées pour la première fois en 1958.

De nouvelles mesures ont suivi en 1959, en 1960 et en 1962.

Après un bref aperçu des mesures expérimentales faites en laboratoire, des considérations ayant présidé au choix des traceurs radio-actifs utilisés et des mesures du mouvement des sables effectuées avec

ces traceurs en 1958, en 1959 et en 1960, on trouvera une description détaillée de l'objectif, de la préparation, du mode d'exécution et des résultats des mesures effectuées à l'aide de traceurs radio-actifs dans le Rak van Scheelhoek (Haringvliet) en 1962.

## 2. Essais de laboratoire avec des traceurs radio-actifs

Pour vérifier les possibilités d'application de la méthode consistant à mesurer le mouvement des sables au moyen de traceurs radio-actifs, on a, en 1957, procédé à des expériences dans une "rivière artificielle" du Laboratoire d'hydraulique "de Voorst", situé dans le polder du Nord-Est.

Cette "rivière" était constituée par un canal maçonné de 39 m de long et de 2,50 m de large; le fond était recouvert de sable et l'on avait installé, aux deux extrémités, des batardeaux permettant de régler le niveau de l'eau et la vitesse du courant.

Un compteur à scintillations, pourvu d'un blindage de 300 kg de plomb pour atténuer l'effet des rayonnements perturbateurs, fut accroché à un pont mobile en bois. Sur celui-ci se trouvait l'appareillage de mesure de l'intensité de rayonnement (en imp./min.), ainsi qu'une échelle graduée permettant de lire le niveau de l'eau au-dessus du fond de sable et un tube servant à prélever les échantillons du fond.

Pour les essais d'orientation, des perles de verre ont servi de traceurs. Ces perles avaient été rendues radio-actives par irradiation neutronique dans le réacteur de Kjeller (près d'Oslo), exploité conjointement par la Norvège et les Pays-Bas.

A partir du sodium présent dans le verre, il s'est formé par irradiation l'isotope radio-actif Na-24 qui émet des rayons gamma très durs (1,38 et 2,76 MeV). La période du Na-24 est de 15 heures environ.

L'irradiation de 15 petites boîtes en aluminium contenant chacune 128 grammes de perles de verre a duré une semaine, au bout de laquelle on a mesuré une activité totale de 20 curies. Après transport de Kjeller

au Laboratoire d'hydraulique "de Voorst", l'activité était encore de 1,5 curie.

Les perles de verre d'une boîte ont été mélangées dans une bétonnière à une quantité connue de sable et d'eau. Le traceur ainsi obtenu a été immergé en un point déterminé du canal.

On a mesuré ensuite l'activité sur toute la longueur du canal, à des moments différents.

Ces mesures ont permis de constater ce qui suit.

Le déplacement des perles de verre était nettement plus lent que celui du sable. Les perles employées étaient en moyenne plus grosses que les grains de sable (pour un poids donné, le diamètre de 50 % des perles était supérieur à 270  $\mu$ , celui de 50 % du sable à "de Voorst" étant supérieur à 160  $\mu$ ).

La granulométrie des perles de verre était aussi totalement différente.

Elles avaient un poids spécifique de 2,95, alors que celui du sable était de 2,65.

Les mesures expérimentales ont mis en évidence les erreurs auxquelles il faut s'attendre lorsque le traceur est charrié dans d'autres conditions que le sable.

On a constaté en outre que la technique de mesure utilisée peut fournir des données utiles sur la répartition de l'activité existante, même si celle-ci est minime (au bout de 100 heures, il ne restait au total que 1,5 % de l'activité initiale).

Sur la base des résultats obtenus, on décida d'effectuer des mesures à l'aide de traceurs radio-actifs sur le terrain.

### 3. Choix du traceur radio-actif

Les résultats des expériences, effectuées en laboratoire avec des traceurs radio-actifs, prouvent que le marquage d'une quantité de sable de mer par irradiation dans un réacteur nucléaire serait la manière idéale de garantir un comportement absolument identique du traceur au cours du déplacement provoqué par les courants et le mouvement des vagues.

En particulier, on aurait alors la certitude quasi absolue que chaque grain de sable acquiert une activité proportionnelle à son poids. Dans ce cas, l'activité notée permettrait de mesurer directement les quantités pondérales de sable charrié, indépendamment de la ségrégation des grains de sable de taille différente lors du déplacement.

Malheureusement, les éléments existant dans le sable de mer ou bien produisent une activité trop faible pour le but recherché, ou bien n'aboutissent qu'à des émetteurs bêta dont le rayonnement n'est donc pas assez pénétrant, alors que leurs périodes sont trop courtes.

C'est pourquoi il faut chercher un radio-isotope convenable qui puisse soit "adhérer" au sable ou à un corps lui ressemblant suffisamment, soit y être incorporé par un procédé chimique.

L'étude de différents isotopes a conduit au choix du Sc-46. Cet isotope a une période de 85 jours et donne 2 photons gamma, l'un de 0,89 MeV et l'autre de 1,12 MeV.

Vers 1958, on ne connaissait encore aucune méthode permettant d'incorporer le Sc-46 à des grains de sable.

Il existe cependant une solution satisfaisante et économique, qui consiste à lier l'isotope à un échangeur d'ions anorganique de structure granulaire.

Certains échangeurs d'ions ont une granulométrie proche de celle du sable de mer.

En outre, les échangeurs peuvent lier les ions du scandium trivalent avec une telle force que les échanges ultérieurs avec les ions mono et bivalents dans l'eau de mer restent négligeables.

Les zéolites argileuses font partie de ce type d'échangeurs d'ions. Une de ces zéolites est le "greensand", ou sable glauconieux, qui possède la propriété d'incorporer de façon permanente dans son réseau cristallin les ions polyvalents qui, en solution, ont été en contact avec lui.

Ce "greensand", que l'on peut se procurer dans le commerce sous le nom d'"Ionac-C50", a une densité (2,72-2,76) proche de celle du sable de la mer du Nord et peut facilement absorber la quantité nécessaire de scandium.

Cette faculté d'absorption de l'Ionac-C50 à l'égard du scandium est même beaucoup trop forte pour le but que l'on s'est fixé.

L'inconvénient, dans le cas de l'Ionac-C50, est que ses grains sont moins durs que les grains de sable auxquels ils sont mélangés.

C'est pourquoi, lorsque les sédiments sont charriés sur le fond de la mer, les grains sont érodés par le sable, leur granulométrie se modifie rapidement et la ségrégation qui intervient alors rend les caractéristiques de migration trop différentes de celles du sable.

On peut toutefois augmenter considérablement la dureté des grains d'Ionac-C50 en les chauffant à 750 °C. Il semble qu'après ce traitement, la capacité et la vitesse d'absorption du matériau à l'égard du Sc-46 soient encore suffisantes pour le but que l'on s'est fixé; la quantité limitée d'activité que l'on désire avoir par grain est absorbée en deux heures environ (les grains non chauffés absorbent la même quantité en 3 minutes).

Après traitement, les possibilités d'érosion sont suffisamment réduites, comme on a pu le constater après avoir brassé pendant 10 heures dans une bétonnière un mélange d'Ionac-C50 préalablement chauffé et de sable quartzeux; la granulométrie ne s'est pas modifiée sensiblement.

Après avoir agité durant 48 heures de l'Ionac-C50 activé au Sc-46 dans de l'eau de mer, on n'a pu déceler aucune perte d'activité mesurable.

Eu égard à ce qui précède, on a utilisé de l'Ionac-C50 activé au Sc-46 pour toutes les mesures de déplacement de sable effectuées à l'aide de traceurs radio-actifs, dans la région du Delta.

#### 4. Mesure du déplacement des sables à l'aide de traceurs radio-actifs en 1958, 1959 et 1960

Dans les paragraphes qui suivent, les mesures de déplacement du sable effectuées à l'aide de traceurs radio-actifs pendant la période 1958-1960 sont décrites succinctement. Les méthodes utilisées pour ces mesures et l'exploitation des résultats obtenus ne seront qu'effleurées. De plus amples détails seront fournis sur les mesures effectuées en 1962.

Au début de l'année 1958, on a effectué, à titre expérimental, la première mesure sur le terrain du charriage de sable au moyen de traceurs radio-actifs près de Zwarte Hoek, à la pointe occidentale de l'île de Voorne (fig. 4.1).

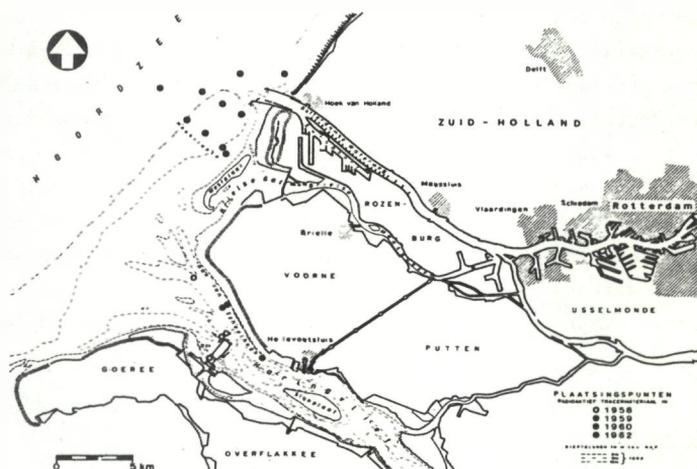


Fig. 4.1.

On avait mesuré auparavant la radio-activité naturelle du fond de la mer à l'aide d'un détecteur à scintillations sur traîneau et déterminé la granulométrie du matériau de fond grâce aux échantillons prélevés.

Avant immersion, le traceur a été préparé sur un chaland ponté amarré à un embarcadère de Hellevoetsluis. Une ampoule de Sc-46 radio-actif, provenant d'un réacteur nucléaire, a été brisée dans une cuve de dissolution et son contenu dissous dans de l'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ). La solution a été neutralisée et diluée avec de l'eau, puis transférée au moyen d'air comprimé dans le malaxeur (bétonnière), avec 100 kg d'Ionac-C50. Après quelques heures de malaxage, le Sc-46 était distribué

de façon suffisamment uniforme sur la surface des grains de l'échangeur d'ions. Les 100 kg de "greensand" avaient alors une radio-activité de 1140 mC.

Après l'activation de l'Ionac-C50, le malaxeur a été vidé dans un container qu'une allège devait amener jusqu'au point d'immersion.

Le traceur a été immergé le 10 mars 1958 au point qui avait été marqué au préalable dans le Rak van Scheelhoek, près de Zwarte Hoek.

L'immersion a été effectuée à l'étale de basse mer pour éviter une trop grande dispersion du traceur à la surface du point d'immersion. Le récipient utilisé se composait du container proprement dit et d'une enveloppe cylindrique amovible d'un mètre de diamètre environ. Au cours de l'immersion, l'enveloppe reposait sur le fond de la mer, tandis que le container se vidait à l'intérieur de l'enveloppe, ce qui a permis aux grains du traceur d'atteindre le fond alors que la mer était presque étale.

Entre le 11 et le 20 mars 1958, on a mesuré les vitesses et les directions du courant au point d'immersion.

Diverses méthodes ont été utilisées pour le dépistage du traceur.

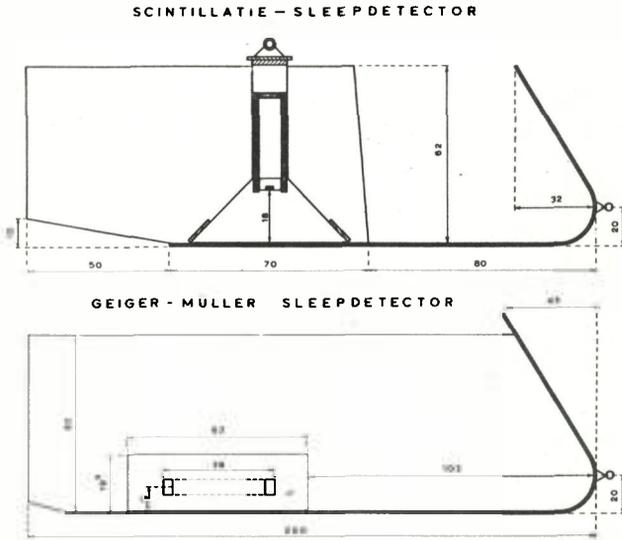
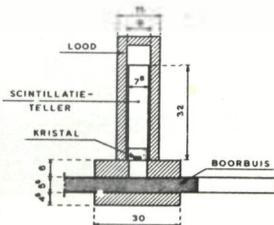


Fig. 4.2.

On a mesuré la dispersion du traceur radio-actif à l'aide d'un détecteur à scintillations ou d'un compteur Geiger-Müller sur traîneau (fig. 4.2). Par ailleurs, on a prélevé des échantillons de fond dans la zone de dispersion et effectué des carottages à une profondeur maximale de 2 m dans le matériau au repos. La radio-activité de ces derniers échantillons a été déterminée au laboratoire (fig. 4.3).

METING AKTIVITEIT IN STEEKMONSTER  
MEETOPSTELLING



STECKMONSTER

Fig. 4.3.

On a utilisé un sextant pour déterminer chaque point du dépistage du traceur.

A partir des résultats obtenus, on a établi des courbes de dispersion du traceur, d'où l'on a déduit la direction du mouvement du traceur chargé.

A l'aide de ces courbes, on a calculé la quantité de traceur radio-actif retrouvée.

On a effectué cette opération en appliquant sur les tracés précités les courbes établies à partir de la radio-activité mesurée transversalement et en mesurant au planimètre l'aire sous-tendue par ces courbes. Cette aire a été rapportée ensuite perpendiculairement à un axe longitudinal (l'axe de déplacement). La nouvelle aire ainsi formée a été également mesurée au planimètre. La valeur obtenue a été multipliée par le facteur de conversion  $\alpha$  (ou :  $\alpha \cdot f_x$ ) déterminé à partir de l'étalonnage du détecteur à scintillations sur le traîneau. Le produit a fourni le nombre de mC retrouvé par mesure.

Les mesures effectuées avec ce détecteur ont montré qu'au bout de 30-40 jours, la quantité de radio-activité retrouvée avait été réduite au quart environ de la quantité immergée; la diminution s'est ralentie ensuite.

A l'aide du tracé de déplacement, on a encore déterminé le centre de gravité de la quantité de radio-activité mesurée. La ligne reliant ce centre de gravité au point d'immersion a donné des renseignements supplémentaires sur l'orientation du déplacement du traceur.

On n'a pas effectué de calculs quantitatifs du charriage.

Après cette première mesure d'essai, on a effectué, d'une manière identique, les 28, 29 et 30 juillet 1958, des mesures de déplacement du sable en immergeant une seule fois des traceurs radio-actifs en trois endroits situés dans le voisinage de la fouille des écluses d'évacuation dans le Haringvliet (fig. 4.1).

Ce type de mesure du déplacement des sables avait ainsi dépassé le stade expérimental.

En 1959-1960, on a effectué, au moyen de traceurs radio-actifs, des mesures de déplacement du sable ayant un objectif pratique direct.

Elles devaient fournir des données plus détaillées sur la direction et l'intensité des déplacements de sable au voisinage de l'embouchure du "Rotterdamse Waterweg" (fig. 4.1), en vue de l'établissement du projet d'avant-port de l'Europoort.

Ces mesures, sensiblement identiques à celles de 1958, ont été effectuées en plaçant en une seule fois sur le fond de la mer trois séries d'une certaine quantité de traceur radio-actif, avec au total 10 points d'immersion (fig. 4.4).

	D A T U M	HOEVEELHEID TRACERMATERIAAL	AKTIVITEIT OP HET MOMENT VAN PLAATSING	DEPTE PLAATSPUNT IN m - N A P
S E R I E 1 Maasvlakte	3 juni 1959	d kg	0,04 Curie	3,5 m
	4 juni 1959	42 kg	0,2 Curie	7 m
	5 juni 1959	50 kg	1,9 Curie	10 m
	6 juni 1959	50 kg	2,0 Curie	5 m
S E R I E 2 Mond Rotterdamse Waterweg	5 oktober 1959	50 kg	2,6 Curie	12 m
	6 oktober 1959	50 kg	2,1 Curie	13 m
	7 oktober 1959	50 kg	2,4 Curie	8 m
	8 oktober 1959	50 kg	2,8 Curie	6 m
S E R I E 3 Mond Rotterdamse Waterweg	26 september 1960	80 kg	1,71 Curie	7 m
	26 september 1960	80 kg	4,21 Curie	17 m

Fig. 4.4.

En plus de ces mesures, on en a encore effectué d'autres à l'aide de la "bouteille de Delft" les :

- 15 et 16 octobre 1959 à marée descendante et à marée montante en deux points d'immersion
- 27 septembre 1960 à marée descendante en un seul point d'immersion
- 28 septembre 1960 à marée montante en un seul point d'immersion.

On disposait, en outre, des résultats des mesures du courant qui avaient été effectuées en 1958 dans la Vallée de la Meuse et au voisinage de l'embouchure du "Rotterdamse Waterweg", à proximité des points d'immersion.

Lorsque les appareils sur traîneau ne fonctionnaient pas, on a pris des échantillons du fond et effectué des carottages, ou bien on a mesuré l'intensité de rayonnement au moyen d'un détecteur ponctuel à scintillation (fig. 4.5).

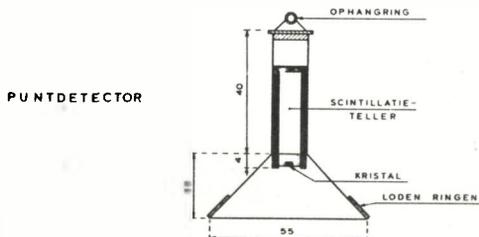


Fig. 4.5.

Le détecteur ponctuel est déposé sur le fond de la mer à partir d'un bateau immobile. Après avoir effectué des mesures pendant quelques secondes, on remonte le détecteur; on obtient ainsi une indication enregistrée de la radio-activité sur une surface de fond de  $0,25 \text{ m}^2$  environ.

Pour déterminer l'emplacement, lors du dépistage du traceur, on a utilisé le système radiographique Decca mis en service entre-temps dans la région du Delta.

Le dépouillement des résultats des mesures a donné les indications suivantes.

On a constaté qu'il était peu souhaitable d'employer un traceur possédant une faible activité, tel celui que l'on avait utilisé les 3 et 4 juin 1959 (fig. 4.4), car la valeur des mesures s'en trouve sensiblement diminuée.

Une activité minimale de  $\pm 2$  curies par 50 kg de traceur est nécessaire, vu la distance relativement grande (1-2 km) sur laquelle ce matériau est charrié en un temps assez court.

En mesurant les carottes, on a constaté que le traceur radio-actif se retrouvait encore à 15 cm dans le matériau de fond.

Les mesures n'ont fourni aucune indication définitive permettant d'affirmer que l'intensité du charriage du sable par le courant en-deçà de la ligne de profondeur de -12 m N.A.P. change lorsque la distance jusqu'à la côte ou la profondeur de l'eau augmente.

On a constaté en outre qu'il était possible, en mesurant les roses des courants près du fond, de prévoir l'orientation principale du mouvement du sable soumis uniquement à l'influence du courant. Signalons cependant d'ores et déjà que les résultats des mesures effectuées en 1962 donnent à la question un aspect entièrement différent.

Enfin, les résultats des mesures ont permis de conclure que, en règle générale, une hauteur de vague significative de 2 m environ n'a plus aucun effet sur l'orientation du mouvement du sable, une fois dépassée une profondeur de -5 à -6 m N.A.P.

## 5. Mesure du déplacement des sables à l'aide de traceurs radio-actifs en 1962

### 5.1. Introduction

Les mesures du déplacement du sable effectuées pendant la période 1958-1960 au moyen de traceurs radio-actifs, telles que nous les avons décrites précédemment, se caractérisaient par l'adaptation de la granulométrie de l'élément traceur à celle du matériau de fond.

Une autre caractéristique était que ce traceur avait été activé directement sur place et immergé en une seule fois, le container déversant une assez grande quantité dans une enveloppe tubulaire par mer étale.

Lors des mesures ultérieures, la direction du mouvement du traceur a pu être déterminée avec précision.

Les mesures n'avaient pas permis d'atteindre le deuxième objectif visé, à savoir la détermination du débit de sable absolu. Il existait encore trop de facteurs d'incertitude, en partie parce qu'une fraction seulement du traceur avait pu être retrouvée lors des mesures. Les carottes avaient indiqué, en outre, qu'après le charriage, le traceur se retrouvait dans le fond sablonneux jusqu'à 15 cm de profondeur.

Des expériences complémentaires en laboratoire seraient nécessaires pour pouvoir contrôler si le traceur charrié à une certaine profondeur se mélange d'une manière homogène avec le matériau de fond.

En 1962, on a utilisé une méthode différente pour mesurer le débit de sable à l'aide de traceurs radio-actifs.

C'est à la suite de la publication, en 1960 (7th Conference on Coastal Engineering - the Hague), du rapport :

"The use of fluorescent tracers for the measurement of littoral drift" <sup>■</sup>

de R.C.H. RUSSEL  
Hydraulics Research Station  
Wallingford/England

que nous avons décidé d'appliquer cette méthode.

Dans ce rapport, il est fait état pour la première fois d'une méthode d'immersion répétée (pseudo-continue) d'éléments traceurs permettant de calculer les quantités charriées selon une formule mathématique.

Le matériau étudié dans cette publication est le gravier de certaines plages d'Angleterre.

Sous l'influence du mouvement des vagues et du courant, ce gravier se déplace dans deux directions.

En mesurant le mouvement du sable au moyen d'un traceur radio-actif, on a constaté que ce dernier suivait, en règle générale, le mouvement de va et vient imprimé par le courant à marée descendante et à marée montante.

Sur cette base, on a tenté de vérifier si la formule mathématique indiquée par Russel pour le calcul de quantités de matériau charriées pouvait s'appliquer aussi au calcul du débit de sable.

La méthode utilisée en 1962 pour mesurer les déplacements de sable à l'aide de traceurs radio-actifs a donc consisté à immerger l'élément traceur par dix fois en trois points compris dans le domaine de la marée.

Par ailleurs, la quantité usuelle (50 kg) de substance traceuse a été divisée en lots de 5 kg. Pour des raisons pratiques, on a dû renoncer à la fabrication sur place du traceur radio-actif. L'activation a eu lieu à l'usine de la S.A. Philips-Duphar d'Amsterdam.

---

■ "Utilisation de traceurs fluorescents pour la mesure du charriage littoral"

Compte tenu de la méthode préconisée par Russel pour les immersions répétées, l'élément traceur doit être directement impliqué dans le processus des mouvements de sable. Il faut donc qu'au point d'immersion la substance soit répartie aussi uniformément que possible sur le fond de la mer. On a pensé obtenir un résultat satisfaisant en déposant les 5 kg de traceur à 0,50 m au-dessus du fond à marée montante, la vitesse du courant étant de 0,30 m/sec.

On a fixé à une semaine l'intervalle compris entre chaque immersion.

La période consacrée aux mesures devant donc s'étendre sur 10 semaines, il fallait que la zone de mesure remplisse certaines conditions.

En ce qui concerne le fond, il fallait qu'il soit stable, de manière que l'on n'ait pas à craindre d'affaissement ou de rehaussement notable pendant les mesures.

En outre, il devait être plat, par conséquent sans rides.

Il était également nécessaire que la radio-activité naturelle n'accuse pas des différences importantes sur une grande étendue.

La vitesse moyenne du courant à la verticale, depuis la surface jusqu'au fond, devait être relativement élevée pour assurer un déplacement de sable suffisamment important.

Pour que les mesures ne soient pas perturbées, il était souhaitable que la zone de mesure se trouve en dehors des routes très fréquentées par les navires.

Vu l'importance du programme de mesure, il fallait avoir des conditions de travail aussi favorables que possible (mouvement des vagues). En effet, l'immersion des traceurs radio-actifs devait s'effectuer trois fois par semaine et, une fois par semaine au moins, il fallait dépister l'élément immergé au moyen du détecteur sur traîneau.

Eu égard à ces considérations, on a choisi, après examen, trois points situés dans le Rak van Scheelhoek/Haringvliet (fig. 4.1).

Ces points d'immersion, situés dans l'axe de chenaux, sont indiqués par les lettres A, B et C (fig. 5.2.2.1).

Pour le point A, on a constaté que la période d'une semaine, qui avait été fixée au préalable, était nettement trop longue, le traceur ayant pratiquement disparu au bout de ce laps de temps. Pour cette raison, l'immersion du traceur a été interrompue en ce point pendant sept semaines.

Après achèvement des immersions du traceur radio-actif aux deux autres points, on a immergé le traceur au point A à six reprises, en observant un intervalle de deux jours.

De ce fait, la durée de la période d'immersion prévue à l'origine s'est trouvée prolongée.

Le plan initial était de diviser les 50 kg de traceur d'une activité de  $\pm 2$  curies, utilisés lors des mesures précédentes, en 10 lots de 5 kg ayant chacun une activité de  $\pm 0,2$  curie par rapport à une date de radio-activité fixe. L'activité par grain de traceur était alors de  $4,10^{-4} \mu\text{C}$ .

Pour la préparation du traceur radio-actif destiné aux trois points d'immersion, on disposait de 167 kg d'Ionac-C50 du degré choisi; la quantité était donc largement suffisante.

Lors de la préparation du traceur à l'usine, on s'était aperçu que l'Ionac était fortement basique et qu'il fallait ajouter une grande quantité de HCl pour neutraliser le traceur.

Compte tenu du volume des containers déjà disponibles, il a donc fallu ramener les lots de 5 kg de traceur à 2,5 kg. Pour faire réussir les mesures avec une quantité de traceur moindre, on a porté l'activité par lot de 0,2 à 0,3 curie, en fonction d'une date d'activité fixe.

Eu égard aux dates auxquelles les mesures ont commencé et se sont terminées, la date d'activité a été fixée au 16 mai 1962, c'est-à-dire

entre la première et la dernière immersion de traceur radio-actif.

Le temps consacré effectivement aux mesures ayant été plus long que prévu, l'activité réelle par grain de matériau traceur s'est située entre  $15.10^{-4}$  et  $5,6.10^{-4}$   $\mu\text{C}$ .

L'expérience officielle par la méthode d'immersion du traceur radio-actif, faite à la lumière des mesures de sécurité à prendre à l'égard des rayonnements radio-actifs, a eu lieu le 15 mars 1962.

Le traceur radio-actif a été immergé pendant la période comprise entre le 16 avril et le 6 juillet 1962.

Les mesures, liées à celle du mouvement du sable au moyen d'un traceur radio-actif, ont été effectuées du 20 février au 27 septembre 1962.

Elles ont été poursuivies occasionnellement pendant les mois d'octobre et novembre 1962.

## 5.2. Préparation des mesures

### 5.2.1. Généralités

La mesure proprement dite des déplacements du sable au moyen d'un traceur radio-actif a exigé un assez grand nombre de travaux préparatoires.

Ces travaux étaient nécessaires tant pour réaliser les conditions voulues dans la zone de mesure que pour pouvoir contrôler leur respect pendant la période de mesure.

Pour assurer la comparabilité des résultats lors du dépistage du traceur, il était nécessaire d'effectuer l'étalonnage de l'appareil de mesure sur le support que l'on se proposait d'utiliser. Eu égard au choix de granulométrie du matériau traceur, l'Ionac-C50 dut subir un traitement préalable, de manière à pouvoir lier le Sc-46 au moment voulu.

Des containers durent être fabriqués pour le transport du traceur radio-actif et il fallut prendre des dispositions tant à bord du bateau que dans la voiture automobile qui devaient transporter ces containers.

Enfin, la méthode d'immersion du traceur radio-actif devait être contrôlée du point de vue à la fois de ses possibilités d'utilisation et des mesures de sécurité à prendre contre le rayonnement radio-actif.

### 5.2.2. Protection de la zone de mesure

La protection de la zone de mesure avait pour but la sauvegarde de la configuration naturelle du fond (ancres de navires), qui devait subir uniquement l'action du courant.

Ce procédé a permis en même temps de dépister le traceur sans perturbation due à la navigation par exemple.

L'étendue de la zone de mesure protégée devait être réduite au maximum afin de porter atteinte le moins possible aux intérêts de tiers (pêche !).

Les dimensions de cette zone ont été déterminées de la manière suivante.

On avait prévu que la dispersion du traceur se ferait surtout parallèlement à l'axe du chenal et, dans une moindre mesure, perpendiculairement à cet axe. Sur la base de la configuration du fond et des vitesses de courant mesurées, on a prévu que le charriage du traceur aurait lieu :

- au point A : principalement à marée montante
- au point B : principalement à marée descendante
- au point C : principalement à marée montante.

En partant des points d'immersion du traceur radio-actif, on a admis, pour chacun de ces points, que la distance mesurable dans le sens du charriage serait de 1000 m et, en sens opposé,

de 600-800 m.

Perpendiculairement à la direction du chenal, on a supposé, de part et d'autre du point d'immersion, un charriage maximum sur 400 mètres.

Après avoir déterminé approximativement les dimensions de la zone de mesure à protéger, il fallut en tracer les limites d'une manière simple et nette.

A cet effet, on s'est servi des piquets de plage et des bouées du service de pilotage marquant les chenaux de navigation. Afin de réduire l'étendue de la zone, le service de pilotage a déplacé temporairement quelques bouées (fig. 5.2.2.1).

Pour informer la navigation des mesures de déplacement du sable au moyen de traceurs radio-actifs, qui auraient lieu dans la zone délimitée pendant la période du 16 avril au 15 juillet 1962, on a inséré une communication (n° 1621 (T) ) dans "Het Bericht aan Zeevarenden" (avis à la navigation) n° 84 du 27 avril 1962.

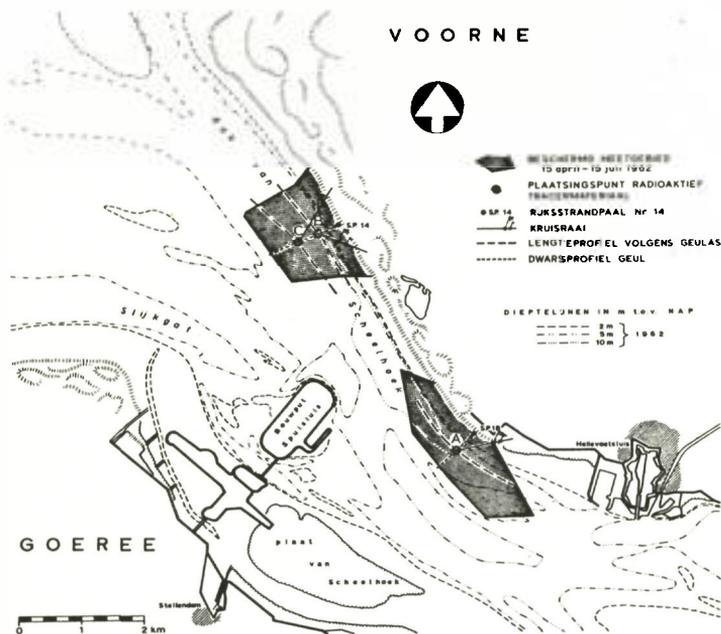


Fig. 5.2.2.1.

Le Club nautique de Hellevoetsluis a été également informé de ces travaux.

Le Service des Domaines de Dordrecht établit les contrats de pêche dans la région en question. Ces contrats venaient d'être renouvelés au début de 1962.

Grâce à la coopération du Service précité et de l'Inspection des Pêches, on a pu insérer dans les contrats en question une clause stipulant que la zone de mesure serait interdite à la pêche pendant la période comprise entre le 15 avril et le 15 juillet 1962.

### 5.2.3. Etude du fond

Eu égard aux conditions auxquelles devait répondre le fond pour la mesure des déplacements de sable, on a apporté une attention particulière à sa configuration.

Avant et après les mesures, on a déterminé la profondeur au moyen d'une sonde acoustique Kelvin Hughes. L'emplacement a été généralement relevé au sextant; ce n'est qu'au mois de juin 1962 qu'on a pu utiliser le système Decca.

La zone de mesure située au voisinage du point d'immersion A a été étudiée pendant les périodes suivantes :

- a. 25 février - 5 mars 1962
- b. 17 - 27 juillet 1962.

Pour la zone de mesure située dans le voisinage des points d'immersion B et C, ces études ont été effectuées pendant les périodes mentionnées ci-dessous :

- a. 20 - 22 février 1962
- b. 14 - 15 juin 1962.

Les résultats de mesure obtenus ont permis de tracer les sections longitudinales et transversales des chenaux à l'endroit des points d'immersion (fig. 5.2.3.1).

Il en découle que la condition selon laquelle la zone de mesure ne devait accuser aucune variation de profondeur au cours de la mesure des déplacements de sable par traceur radio-actif n'a pas été remplie.

Dans la zone entourant le point d'immersion A, un affaissement maximum de 1,00 m (fig. 5.2.3.2) est intervenu, alors que dans la zone située autour des points B et C, on a constaté un haussement pouvant atteindre 1,00 m (fig. 5.2.3.3).

Ces variations du fond sont sans doute attribuables à la forte tempête des 16 et 17 février 1962, lorsque de grandes quantités de sable ont été charriées dans l'embouchure du Haringvliet comme des sondages l'ont montré.

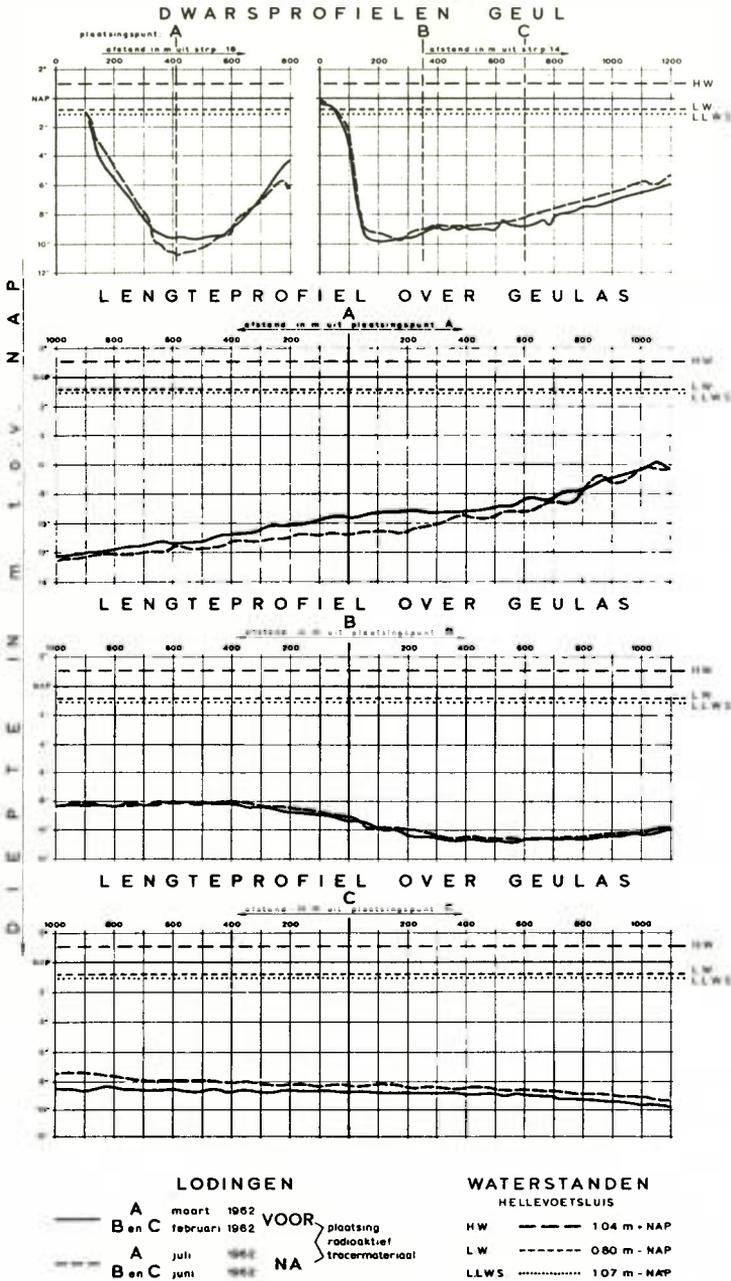


Fig. 5.2.3.1.

C'est pourquoi l'équilibre initial du fond est probablement devenu instable et ne s'est rétabli que lentement après cette tempête.



Fig. 5.2.3.2.

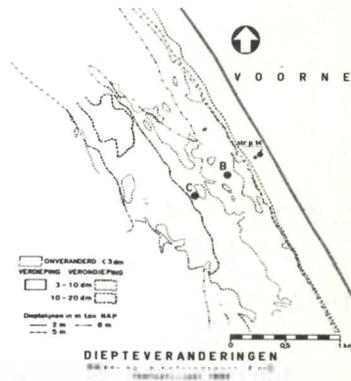


Fig. 5.2.3.3.

Pour la mesure des déplacements de sable par traceur radio-actif, il était également nécessaire que le fond fût plat dans la zone située autour des points d'immersion.

Le 14 juin 1962, l'occasion de faire une étude détaillée à ce sujet s'est présentée soudainement.

Etant donné que l'immersion de traceur radio-actif au point A avait été interrompue depuis le 7 mai 1962 et que la radio-activité naturelle s'était presque rétablie dans la zone de mesure (fig. 5.2.8.2 et 5.2.8.3), l'étude a été effectuée en ce point.

Des scaphandriers de la Marine royale ont établi qu'au voisinage du point d'immersion A, il y avait des ondulations de sable d'une hauteur de 50-75 cm, sur lesquelles se trouvaient de petites rides d'une hauteur de + 3 cm. La distance entre les crêtes des ondulations était de 4-6 m.

Aucune ondulation de sable n'avait été constatée à cet endroit auparavant.

Le 20 août 1962, en faisant des sondages dans la même zone par une mer d'huile, on a observé des ondulations de 30 cm de hauteur.

A la limite sud-est de la zone de mesures protégée, autour du point d'immersion A, on a mesuré, dans le chenal (fig. 5.2.2.1.) et sur une longueur de  $\pm 1$  km, des ondulations d'une hauteur de 0,75-1,00 m.

La condition posée au début de notre étude n'était donc pas remplie, tout au moins pour la zone située autour du point d'immersion A.

#### 5.2.4. Traceurs

Pour déterminer le choix de la granulométrie des matériaux traceurs, il a fallu prélever des échantillons du fond à l'endroit des points d'immersion.

L'échantillonnage a été effectué au moyen de la petite benne preneuse. En théorie, cette benne pouvait creuser jusqu'à 5 cm de profondeur. On a constaté, en effectuant une longue série d'essais pratiques, qu'elle ne pouvait retirer des échantillons que jusqu'à une profondeur de 2-3,5 cm, et ce, en fonction de la dureté du fond sablonneux.

A l'origine, on avait eu l'intention d'effectuer la mesure des déplacements de sable en question à l'aide de traceurs radio-actifs pendant l'automne de 1961; pour des raisons d'ordre pratique, on y a renoncé et reporté les opérations à 1962.

Le choix de la granulométrie du matériau traceur avait déjà été fait en principe dès 1961.

Le 10 juillet 1961, on a prélevé deux échantillons, au moyen de la petite benne preneuse, à chaque point d'immersion future du traceur radio-actif.

Les histogrammes des granulométries indiquent qu'il n'y a guère de concordance entre les rapports de granulométrie des échantillons provenant des différents points (fig. 5.2.4.1).

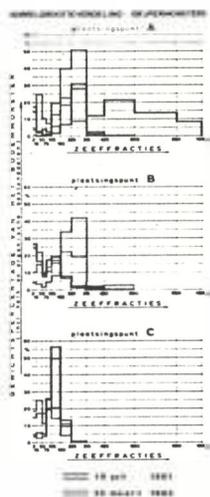


Fig. 5.2.4.1

Sur la base de la granulométrie des deux fractions les plus importantes provenant des échantillons prélevés à la benne, la granulométrie des matériaux traceurs a été fixée à 150-210  $\mu$ .

Le 22 mars 1962, on a prélevé à nouveau deux échantillons, au moyen de la benne et aux mêmes endroits. Les nouveaux histogrammes des granulométries ont prouvé qu'il y avait une grande différence avec les échantillons prélevés auparavant (fig. 5.2.4.1).

Des expériences effectuées ultérieurement dans la zone à marée ont démontré que la répartition des granulométries du sable dans les chenaux pouvait être soumise à des modifications assez importantes pendant une marée.

Pour des raisons d'ordre pratique, le choix de la granulométrie du traceur est resté fixé à 150-200  $\mu$ .

Pour le matériau traceur, on a utilisé l'Ionac-C50 (greensand).

Puisqu'on prévoyait 10 dépôts de 5 kg de traceur en trois points d'immersion, il fallait disposer de 150 kg d'Ionac-C50 ayant une granulométrie de 150-210 $\mu$ .

Etant donné que les granulométries de l'Ionac-C50 vendu dans le commerce sont très différentes, il a fallu tamiser le matériau. Avant de procéder à cette opération, on a dû le chauffer à 750 °C pour en augmenter la dureté.

En effectuant le tamisage, on s'est aperçu que la quantité d'Ionac-C50 chauffé, ayant la granulométrie désirée, était insuffisante.

Pour obtenir néanmoins la quantité voulue, on a moulu l'Ionac-C50 chauffé, puis on l'a soumis à un nouveau tamisage.

En définitive, on a disposé de 167 kg d'Ionac-C50 chauffé, d'une granulométrie de 150-210 $\mu$ , que l'on a envoyé d'Hellevoetsluis à l'usine de la S.A. Philips-Duphar à Amsterdam pour activation.

#### 5.2.5. Transport des traceurs radio-actifs

Le transport des éléments marqués devait être effectué par route, de l'usine d'Amsterdam à Hellevoetsluis. A partir d'Hellevoetsluis, le transport jusqu'au point d'immersion devait se faire par bateau.

L'immersion du traceur à partir de l'allège devait être aussi simple que possible. A cet égard, il fallait tenir compte du fait qu'il est extrêmement difficile de lancer par-dessus bord des containers d'un poids élevé.

C'est pourquoi on a décidé d'adopter deux types de containers :

- un container de transport
  - un container d'immersion,
- celui-ci se trouvant à l'intérieur du premier.

Compte tenu de la fréquence d'immersion des traceurs radio-actifs, on a construit 6 containers du deuxième type.

Pour déterminer leurs dimensions, on est parti des considérations suivantes.

Le container d'immersion devait pouvoir contenir 5 kg de traceur radio-actif, ainsi que trois balles de ping-pong.

Le container de transport, en principe une caisse de plomb à couvercle de plomb, devait pouvoir renfermer le premier, ainsi qu'une chaîne de suspension.

L'épaisseur de la paroi de plomb devait garantir une protection telle que, lors du transport du container d'immersion, le rayonnement à 1 m de distance fut inférieur à 1 mR/heure. A cette fin, on a donné à la paroi et au couvercle de la caisse une épaisseur de 6 cm. On a constaté, dans la pratique, qu'une protection suffisante était assurée.

Le container de transport est constitué par une caisse en plomb avec couvercle et par un récipient intérieur mobile en tôle. Dans un des angles de ce récipient, on a aménagé un compartiment destiné à recevoir la chaîne de suspension du container d'immersion. La caisse en plomb est entourée d'un treillis d'acier. (fig. 5.2.5.1.)

Le couvercle de la caisse comporte deux anneaux permettant de le soulever.

Le container de transport peut être fermé au moyen d'un cadenas fixé sur le couvercle et passant dans deux pitons scellés dans le treillis.

Les dimensions extérieures du container de transport sont 41 x 35 x 35 cm. Son poids est de 400 kg.

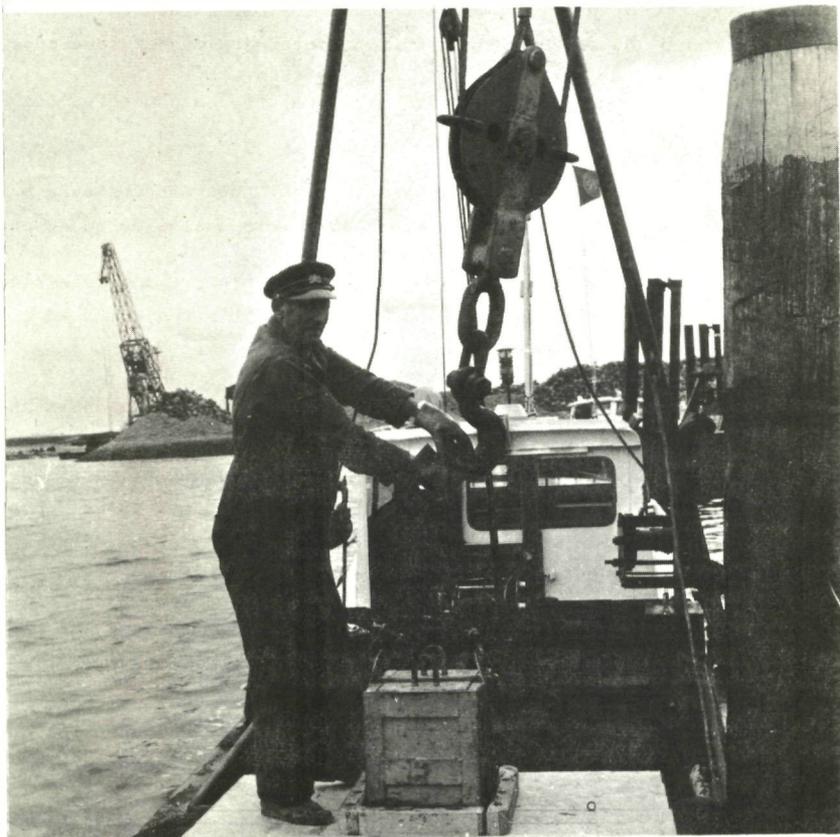


Fig 5.2.5.1

## PLAATSINGSCONTAINER

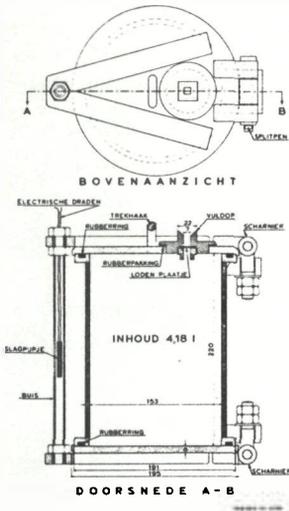


Fig. 5.2.5.2.

Le container d'immersion est composé d'un tube d'acier inoxydable d'une hauteur de 220 mm et (fig. 5.2.5.2.) d'un diamètre intérieur de 153 mm; l'épaisseur de la paroi est de 6 mm.

Les deux extrémités du tube sont pourvues de couvercles à charnières, reliés entre eux, à l'extérieur du tube, par un tube de jonction en acier à filetage extérieur. A l'intérieur, il faut pouvoir placer un détonateur par un procédé simple.

Le tube de jonction a un diamètre extérieur de 13 mm et un diamètre intérieur de 9 mm. Les couvercles se rabattent sur le tube par une garniture de caoutchouc.

Dans le couvercle supérieur, se trouve un bouchon de remplissage. Le bouchon est percé de part en part, le trou étant plus grand à la partie inférieure qu'à la partie supérieure. L'intérieur est fileté à la partie inférieure de manière à pouvoir recevoir un écrou avec boulon. La partie perforée peut être fermée par une membrane de plomb au moyen de cet écrou.

Sur le couvercle supérieur se trouve un anneau auquel on peut attacher la chaîne de suspension au moyen d'une manille.

A l'autre extrémité de la chaîne se trouve également une manille qui retient un cordage de nylon dont l'extrémité est terminée par une boucle.

Le cordage de nylon dépasse plus tard du couvercle de plomb du container de transport.

La capacité du container d'immersion est de 4,18 l.

Pour le transport des containers, on a placé dans la camionnette V.W. utilisée à cet effet une planche à rebords.

Sur l'un des côtés, ce rebord est amovible, afin de faciliter le chargement et le déchargement du container de transport. De cette manière, il a été possible de maintenir le container de transport solidement en position dans la camionnette.

Sur le pont arrière de l'allège à moteur, qui devait amener sur place le container de transport avec le container d'immersion, on a placé une planche surélevée.

Sur cette planche, on a ménagé une élévation dans laquelle le container de transport s'adapte. Cette élévation est nécessaire pour éviter les déplacements pendant le transport (mouvement des vagues).

Pour assurer la stabilité de l'allège pendant le transport, le coqueron avant doit être lesté, comme des essais l'ont prouvé.

#### 5.2.6. Appareillage de mesure du rayonnement radio-actif

Les diverses caractéristiques de la mesure du déplacement des sables au moyen de traceurs radio-actifs exigent un appareillage de mesure spécial.

Pour des raisons de protection contre les rayonnements, il faut pouvoir mesurer immédiatement l'intensité du rayonnement à l'aide d'un appareil simple.

L'appareillage utilisé est celui qui est vendu dans le commerce et fabriqué par la S.A. Philips à Eindhoven. Dans les paragraphes suivants, on trouvera le numéro de la marque déposée de cet appareil.

Pour les mesures directes de l'intensité du rayonnement, on a employé un moniteur portatif PW 4014.

L'intensité du rayonnement mesurée avec cet appareil peut aussi bien être provoquée par des traceurs radio-actifs restés dans les moyens de transport, que se manifester dans les environs immédiats du container de transport dans lequel se trouvent le container d'immersion avec le traceur radio-actif.

Pour la mesure en laboratoire de la radio-activité des échantillons de fond contenant des traceurs, on utilise un système composé des appareils suivants :

un collimateur	PW 4124
un compteur à scintillations	PW 4111
un appareil d'alimentation à haute tension	PW 4022
un chronomètre électronique	PW 4052
un compteur électronique	PW 4032

Le dépistage du traceur radio-actif sur le fond de la mer a lieu par bateau. On y place l'appareillage d'enregistrement, alors que l'appareillage de mesure se trouve sur le fond de la mer. Les deux appareils sont reliés l'un à l'autre par un câble électrique.

L'appareillage de mesure placé sur le fond de la mer est monté sur une sorte de traîneau qui est rattaché au bateau par un câble en acier.

On dispose de deux types de détecteurs sur traîneau :

- a. le détecteur Geiger-Müller
- b. le détecteur à scintillations (fig. 4.2.)

Le détecteur Geiger-Müller est un système composé :  
d'un appareillage d'alimentation avec 15 batteries  
de 50 V

de 24 tubes compteurs (type Philips n° 18503),

alors que l'appareillage d'enregistrement annexe se compose :

d'un appareil de mesure du  
taux de comptage PW 4042

d'un enregistreur PR 2210 A/21.

Le détecteur à scintillations est un système composé :

d'un compteur à scintillations PW 4111

et d'un préamplificateur d'alimentation  
à haute tension,

l'appareil d'alimentation PE 4801 se trouvant à bord du bateau.

L'appareillage d'enregistrement annexe comprend également :

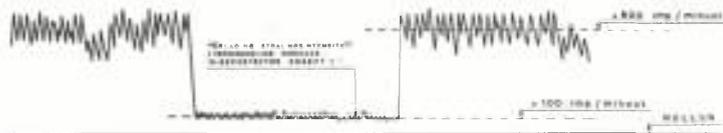
un appareil de mesure du taux de comptage PW 4042

un enregistreur PR 2210 A/21.

Vu sa grande efficacité, on accordera la préférence au détecteur à scintillations sur traîneau. Il présente d'ailleurs un autre avantage : lorsque le traîneau quitte le fond et qu'il se met à "flotter", l'enregistreur l'indique nettement, tout au moins lors de la mesure de la radio-activité naturelle du fond.

Le niveau de rayonnement mesuré tombe alors brusquement à une valeur de  $\pm 100$  imp./min., par suite de la couche d'eau qui sépare le détecteur du fond. Cette couche d'eau peut atteindre rapidement une épaisseur telle que l'intensité des rayonnements se trouve réduite de moitié ( $d_{1/2} = \pm 12$  cm).

L'effet signalé ici ne se manifeste pratiquement pas avec le détecteur Geiger-Müller. La cause en est probablement que ce détecteur peut mesurer également les rayons émis d'en



REGISTRATIE SCINTILLATIE - SLEEPDETECTOR

fig. 5.2.6.1

haut, alors que le détecteur à scintillations ne mesure pratiquement que le rayonnement provenant d'en bas.

Lors de la mesure de la radio-activité naturelle du fond, le détecteur Geiger-Müller mesure probablement aussi la radio-activité de l'eau environnante ainsi que le rayonnement cosmique, de sorte que le "flottement" ne produit pas ou ne produit guère de diminution du niveau de rayonnement.

Signalons encore que le choc du détecteur à scintillations est également enregistré. Etant donné, toutefois, qu'en cas d'enregistrement normal du niveau de rayonnement, il se produit aussi de nombreuses pointes, il est difficile de constater si une telle pointe est provoquée par le choc ou par la radio-activité mesurée.

Un inconvénient initial du détecteur à scintillations était que le câble électrique d'alimentation entre le bateau et le traîneau était à 6 conducteurs. On avait constaté que, si le câble se rompait, ce qui peut évidemment arriver lorsque les vitesses du courant ou du bateau sont trop élevées, la réparation était très difficile et prenait beaucoup de temps.

On a donc adapté ce détecteur à l'utilisation d'un câble d'alimentation à deux conducteurs, ce qui facilite la réparation.

Pour la mesure du déplacement des sables au moyen de traceurs radio-actifs, on a employé le détecteur Geiger-Müller monté sur traîneau jusqu'au 9 mai 1962; après cette date, on a utilisé le détecteur à scintillations sur traîneau.

### 5.2.7. Étalonnage de l'appareillage de mesure

L'appareillage de mesure décrit doit être étalonné avant de pouvoir être employé. Le contrôle technique préalable a été effectué à la S.A. Philips à Rijswijk.

Le but de ce contrôle était d'étalonner l'appareillage de mesure sur le support qui allait être utilisé.

Il ne pouvait être question d'un étalonnage effectif du moniteur portatif. Pendant la période de mesure, ce moniteur a été étalonné d'après les échantillons qui avaient servi à l'étalonnage de l'appareillage de laboratoire.

Ces échantillons d'étalonnage étaient : Sc-46/ $\text{NO}_3$ , avec une activité de  $30 \mu\text{C}$ , et Sc-46/Cl avec une activité de  $16,9 \mu\text{C}$ .

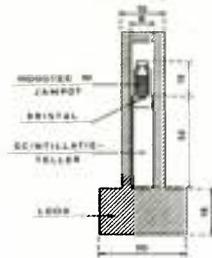
L'appareillage de mesure à l'usage du laboratoire sert à l'examen de la radio-activité d'échantillons du matériau de fond prélevés dans la région de dispersion des traceurs radio-actifs. A cet effet, les échantillons de fond ont été placés dans de petits pots à confiture. Leur volume variait entre  $140$  et  $300 \text{ cm}^3$ , soit une couche de  $4-9$  cm de hauteur dans chaque pot.

Le dispositif de mesure de la radio-activité de l'échantillon du fond se compose d'un pot à confiture contenant l'échantillon qui, dans le collimateur, est placé directement sur le compteur à scintillations; on mesure alors l'intensité du rayonnement en imp./min. (fig. 5.2.7.1.)

Le but de cet étalonnage est de déterminer le rapport entre l'intensité de rayonnement mesurée et la radio-activité de l'échantillon en  $\mu\text{C}/\text{dm}^3$ .

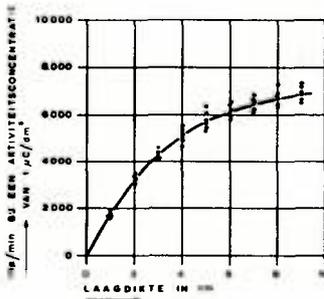
Lors de l'étalonnage, l'intensité de rayonnement de la radio-activité naturelle -  $90$  imp./min. lorsque le collimateur est fermé - n'a été déduite que lorsque l'intensité mesurée était inférieure à  $10.000$  imp./min.

METING AKTIVITEIT IN GRUJPERMONSTER  
MEETOPSTELLING



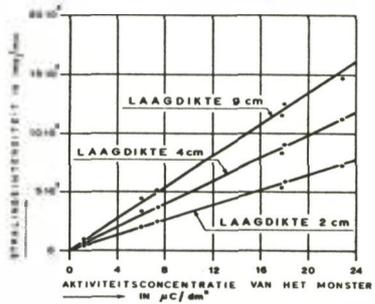
GRUJPERMONSTER

Fig. 5.2.7.1



JKKROMME VOOR DE BEPALING VAN DE AKTIVITEITSCONCENTRATIE VAN GRUJPERMONSTERS

Fig. 5.2.7.2



STRALINGSINTENSITEIT VOOR VERSCHILLENDE AKTIVITEITSCONCENTRATIES BIJ EEN BEPAALDE LAAGDIKTE VAN HET ZANDMONSTER

Fig. 5.2.7.3

On a utilisé pour l'étalonnage des échantillons de sable radio-actifs obtenus en mélangeant une quantité de sable pesée avec une quantité, également pesée, de soluté de chlorure de scandium. En prenant différentes concentrations du Sc, on a obtenu des échantillons de sable ayant également une concentration différente.

Chaque échantillon de sable radio-actif composé de cette manière a été placé dans un pot à confiture en couches ayant une épaisseur de 1 à 9 cm. On en a mesuré l'intensité de rayonnement en imp./min., le collimateur étant fermé.

Les résultats de l'étalonnage ont été portés sur deux graphiques d'étalonnage qui indiquent :

- a. le rapport entre l'intensité de rayonnement en imp./min. pour une concentration d'activité de  $1 \mu\text{C}/\text{dm}^3$ , ainsi que l'épaisseur des couches d'échantillon de sable radio-actif (fig. 5.2.7.2.);
- b. Le rapport entre l'intensité de rayonnement en imp./min. pour différentes concentrations de Sc et pour une même épaisseur des couches d'échantillon de sable.

On a constaté que ce rapport était presque linéaire (fig. 5.2.7.3.).

Dans l'étalonnage des détecteurs sur traîneau, il faut tenir compte des différences qu'ils présentent et qui se manifestent dans la construction de chacun de ces appareils (fig. 4.2.).

Dans le détecteur à scintillations, on a incorporé un appareil de mesure du taux de comptage, alors que le détecteur Geiger-Müller est pourvu de 24 tubes compteurs Geiger-Müller. Ces tubes sont disposés en cercle. Le diamètre du cercle est de 36,4 cm.

Dans le cas du détecteur Geiger-Müller, l'intensité de rayonnement mesurée est la plus élevée lorsque l'échantillon

d'étalonnage faisant office de source ponctuelle se trouve placé presque perpendiculairement au-dessous des tubes compteurs. Le graphique d'étalonnage indique une double pointe lorsque l'échantillon est déplacé sous le chariot.

La distance entre la base des compteurs et le fond diffère. Pour le détecteur à scintillations, elle est de 18 cm; pour le détecteur Geiger-Müller elle est de 8 cm.

Ces différences de construction des deux appareils de mesure - qui, par ailleurs, peuvent être étalonnés de la même manière - s'expriment par une différence de sensibilité aux intensités de rayonnement.

Pour les deux systèmes, l'enregistrement de l'intensité de rayonnement mesurée en imp./min. est fait - comme on l'a constaté au paragraphe 5.2.6. - au moyen des appareils suivants :

un appareil de mesure du taux de comptage	PW 4042
un enregistreur	PR 2210 A/21,

alors que, pour l'appareillage de laboratoire, cet enregistrement est effectué au moyen

d'un compteur électronique	PW 4032
d'un chronomètre électronique	PW 4052.

Pour cette raison, il est nécessaire de comparer les intensités du rayonnement en imp./min. mesurées avec les deux types d'appareillage afin d'aboutir à des résultats comparables. A cet effet, on a appliqué la méthode suivante.

Lors de l'étalonnage des détecteurs sur traîneau et de l'appareillage de laboratoire, l'intensité de rayonnement en imp./min. a été déterminée par l'appareillage composé

d'un compteur électronique	PW 4032
d'un chronomètre électronique	PW 4052.

Comme pour ce dernier système, l'échelle horaire a une précision de 0,2 sec., on peut déterminer très exactement le nombre d'imp./min. en mesurant l'intensité de rayonnement.

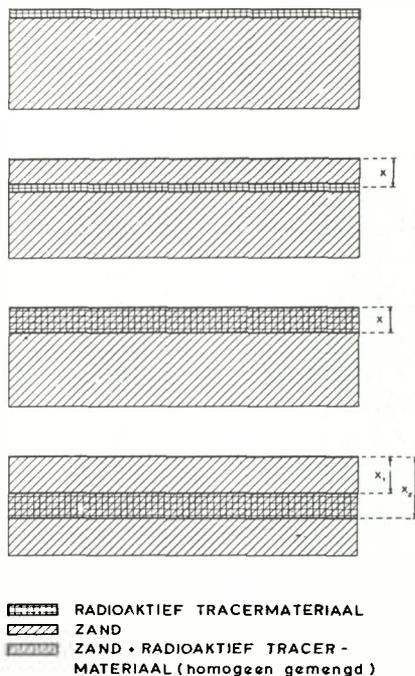


Fig. 5.2.7.4

En étalonnant les détecteurs, on a enregistré, en outre, l'intensité de rayonnement en imp./min. au moyen  
 d'un appareil de mesure du taux de comptage PW 4042  
 et d'un enregistreur PR 2210 A/21.

Etant donné que, lors des mesures de l'activité sur le terrain, seul le dernier système a été utilisé, les valeurs obtenues à l'aide des deux systèmes ont été comparées entre elles pendant les étalonnages. On n'a pas constaté de différence mesurable dans le nombre des imp./min. noté.

Les détecteurs sur traîneau servent à dépister le traceur radio-actif qui a été déposé sur le fond de la mer ou de la rivière et, par conséquent, le déplacement de ce traceur.

A cet effet, le détecteur est traîné sur le fond. Au moyen de l'appareillage de mesure, on détermine la concentration du traceur radio-actif sur le fond. Pour savoir quelle quantité du traceur se trouve en un point donné, il faut connaître le rapport entre la radio-activité de cette quantité et l'intensité de rayonnement, mesurée en imp./min.

Le traceur radio-actif peut se présenter sous les formes suivantes sur ou dans le fond (fig. 5.2.7.4) :

- a. en mince couche à la surface du fond
- b. en mince couche, à une profondeur  $x$ , au-dessous de la surface du fond
- c. mélangé à du sable "ordinaire", en une couche allant de la surface jusqu'à une profondeur  $x$
- d. mélangé à du sable "ordinaire", en une couche ayant une épaisseur  $x_2-x_1$ , et recouverte elle-même de sable "ordinaire".

Lorsqu'on veut calculer le déplacement, il faut donc partir des rapports énoncés ci-dessous, pour les formes

susmentionnées sous lesquelles se présente le traceur radio-actif sur ou dans le fond :

$$\underline{a.} \quad A = \alpha \cdot I$$

$$\underline{b.} \quad A = \alpha \cdot f_x \cdot I$$

$$\underline{c.} \quad A = \alpha \cdot f_{0-x} \cdot I$$

$$\underline{d.} \quad A = \alpha \cdot f_{x_1-x_2} \cdot I \quad (\text{ce cas n'a pas été étudié ici})$$

dans lesquelles :

$A$  = radio-activité en  $\text{mC/m}^2$

$\alpha$  = facteur de conversion

$f_x$  = coefficient d'absorption

$f_{0-x}$  = coefficient d'absorption pour une couche de mélange homogène

$f_{x_1-x_2}$  = coefficient d'absorption

$I$  = intensité du rayonnement, mesurée en imp./min.

Le facteur de conversion  $\alpha$  et les coefficients d'absorption  $f_x$ , etc. doivent être déterminés par étalonnage.

Au cours des mesures de déplacement du sable au moyen d'un traceur radio-actif, effectuées en 1957 dans le canal d'essai du laboratoire hydraulique "de Voorst" et en 1959 dans la Vallée de la Meuse, on a constaté d'après les carottages que le traceur s'était mélangé essentiellement (de façon plus ou moins homogène) à du sable "ordinaire" depuis la surface du fond jusqu'à 5 à 10 cm au-dessous.

Pour l'étalonnage des détecteurs, le schéma de mesure est déterminé par :

a. la mise en place du traîneau sur un fond de sable sous l'eau

b. la forme sous laquelle se présente le traceur radio-actif sur ou dans le fond.

A cette fin, on a utilisé une caisse contenant une couche de sable de ± 75 cm de haut, puis remplie d'eau jusqu'à 40 cm au-dessus de cette couche. (fig. 5.2.7.5.)

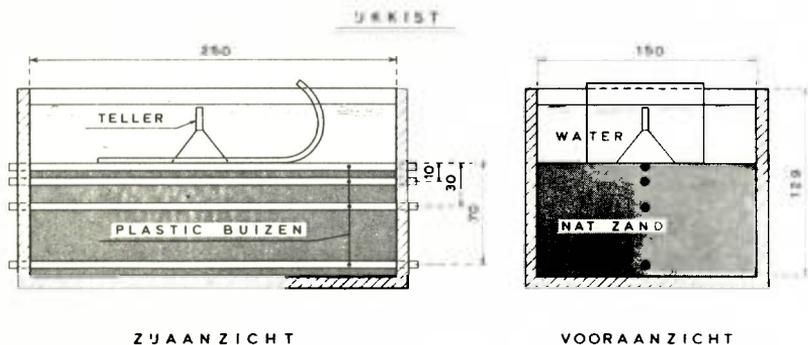


Fig. 5.2.7.5.

Etant donné qu'il est difficile de composer une mince couche homogène de traceur ayant une radio-activité déterminée, on a employé une source ponctuelle comme échantillon d'étalonnage.

A cet effet, on a placé horizontalement dans la couche de sable 4 tubes en plastique à respectivement 0, 10, 30 et 70 cm de profondeur (fig. 5.2.7.5.). La source ponctuelle a été fixée dans un mince tube gradué en matière plastique.

Le détecteur à étalonner a été posé sur la surface du sable au moyen d'un chevalet, de manière à faire coïncider l'axe du(des) compteur(s) avec l'axe des tubes en plastique; on a mesuré ensuite l'emplacement exact. (fig. 5.2.7.6.)

L'étalonnage des détecteurs a été fait de la manière suivante.

Le tube en plastique avec la source ponctuelle a été glissé dans le tube supérieur en plastique et dans la caisse de sable; on peut lire sur l'échelle la distance exacte de l'échantillon jusqu'à l'axe du compteur. On a mesuré l'intensité du



Fig. 5 2 7 6.

rayonnement, exprimée en imp./min., à des distances déterminées par rapport à cet axe.

On a répété l'opération précédente avec les tubes en plastique à 10, 30 et 70 cm au-dessous de la surface du fond; les tubes situés au-dessus, et dans lesquels on avait déjà procédé à l'étalonnage, ont reçu un tube en plastique plus mince rempli de sable mouillé.

On a constaté, lors d'un essai en laboratoire, que l'effet des tubes en plastique sur l'intensité de rayonnement mesurée était négligeable.

Les trois échantillons d'étalonnage utilisés étaient composés d'un support en plexiglas, rempli d'Ionac-C50 sur lequel était fixé du Sc-46.

Le 20 avril 1962, la radio-activité s'élevait respectivement à 10,4,98 et 1000  $\mu$ C.

En étalonnant le détecteur à scintillations, on a obtenu les résultats suivants.

Le calcul des intensités de rayonnement mesurées en présence des échantillons d'étalonnage, aux différentes profondeurs au-dessous de la surface du fond, a été converti pour une source ponctuelle ayant une activité de 1  $\mu$ C. (fig. 5.2.7.7.)

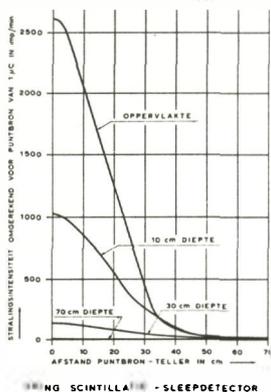
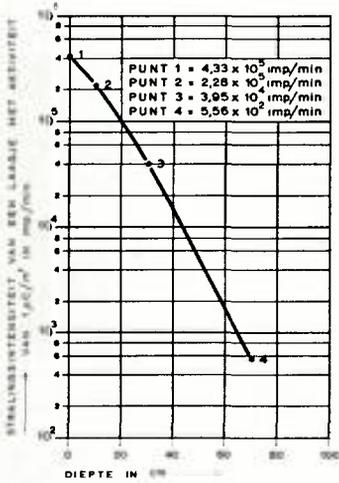
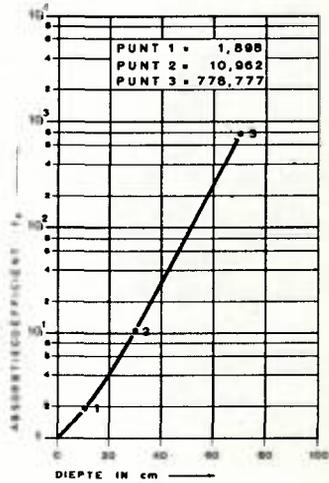


Fig. 5.2.7.7.

A partir de ces résultats, on a calculé le nombre d'imp./min. produit par une mince couche homogène d'activité aux profondeurs en question. (fig. 5.2.7.8)



BEPALING OMREKENINGSFACTOR  $\alpha$  EN HALVERINGSDIKTE  $d_{1/2}$  VAN NAT ZAND



BEPALING ABSORPTIECOEFFICIENT  $f_x$

UKING SCINTILLATIE - SLEEPEDECTOR

Fig. 5.2.7.8.

Si une telle couche se trouve à la surface, que son activité est de  $A \text{ mC/m}^2$ , et qu'elle émet une intensité de rayonnement de  $I_0 \text{ imp./min.}$ , on peut établir que :

$$A = \alpha \cdot I_0.$$

Une couche d'activité à une profondeur  $x$  produit un nombre de  $\text{imp./min.}$   $I_x$ , auquel s'applique la formule :  $A = \alpha \cdot f_x \cdot I_x$ .

Les valeurs  $I_0$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{30}$  et  $I_{70}$  sont indiquées à la fig. 5.2.7.8.

Les coefficients d'absorption  $f_x$ , calculés d'après la formule  $f_x = \frac{I_0}{I_x}$ , sont également indiqués à la fig. 5.2.7.8.

Il appert de cette dernière figure que la couche de valeur moyenne d'½ du sable humide est de 9 cm en moyenne pour une activité pénétrant jusqu'à 30 cm de profondeur.

A partir des valeurs indiquées dans la fig. 5.2.7.8., on a déterminé le facteur de conversion  $\alpha$  qui donne le rapport entre la quantité d'activité à la surface en  $\text{mC/m}^2$  et l'intensité de rayonnement mesurée.

Pour le détecteur à scintillations, on a constaté que  $\alpha = 0,231 \cdot 10^{-5}$ .

Pour une couche d'activité située à une plus grande profondeur, donc recouverte de sable "ordinaire", il faut non seulement multiplier le nombre d'imp./min. mesuré par le facteur de conversion  $\alpha$ , mais aussi par le coefficient d'absorption  $f_x$ .

Toutefois, si le traceur radio-actif est mélangé à du sable "ordinaire", par exemple sur une profondeur de  $0-x \text{ cm}$ , il faut appliquer un coefficient d'absorption  $f_{0-x}$ , que l'on peut obtenir par dérivation de  $f_x$ .

On peut prouver que :

$$f_{0-x} = \frac{0,693 \cdot x/d^{1/2}}{1 - 0,693 \cdot x/d^{1/2}}$$

Pour le détecteur à scintillations étalonné, on a calculé à cet effet les valeurs mentionnées ci-dessous : (5.5.5.4.).

Répartition homogène de l'activité		f <sub>0-x</sub>
de	à	
0	4,5 cm	1,185
0	9 cm	1,389
0	13,5 cm	1,608
0	18 cm	1,848

Pour l'étalonnage du détecteur Geiger-Müller, on a obtenu les résultats suivants :

La couche de valeur moyenne d $\frac{1}{2}$  du sable mouillé est en moyenne de 6,2 cm pour une activité pénétrant jusqu'à une profondeur de 70 cm.

Pour le facteur de conversion, on obtient  $\epsilon = 0,404 \cdot 10^{-5}$ .

La sensibilité du détecteur Geiger-Müller à l'égard de l'intensité de rayonnement est donc environ la moitié de celle du détecteur à scintillations.

Les étalonnages des différents appareils de mesure ont été effectués aux dates suivantes :

- appareillage de laboratoire - 27 avril 1962
- détecteur à scintillations - 3, 7, 8 et 9 mai 1962
- détecteur Geiger-Müller - 11 et 14 mai 1962.

#### 5.2.8. Mesure de la radio-activité naturelle du fond

Le sable du fond de la mer est constitué par des grains de grosseur et de composition différentes. Ce fait est confirmé par la radio-activité naturelle du fond.

C'est pourquoi, pour la mesure des déplacements de sable au moyen d'un traceur radio-actif, il est nécessaire de connaître cette radio-activité naturelle dans la zone où seront effectuées les mesures.

La mesure de la radio-activité naturelle a une double fonction.

Le niveau de rayonnement naturel du fond est mesuré en imp./min., afin de pouvoir déduire ensuite ce niveau des résultats de la mesure des déplacements du traceur radio-actif.

La même mesure est effectuée à la fin de celle des déplacements du sable, pour voir si la radio-activité naturelle du fond s'est rétablie.

En ce qui concerne l'importance des déplacements du traceur radio-actif à partir des points d'immersion, on n'a aucune donnée précise.

Le déplacement est prévu principalement dans la direction du canal, par conséquent parallèlement aux lignes de profondeur.

Le déplacement perpendiculaire à la direction du chenal se fera sur une distance moins grande.

Il s'ensuit que le meilleur choix est celui qui porte sur les rayons de mesure perpendiculaires aux lignes de profondeur.

Pour déterminer l'emplacement, on a utilisé le système radiographique Decca. Utilisé à bord de bateaux, cet appareil permet d'obtenir des résultats indépendants des conditions atmosphériques. En outre, il permet de travailler d'une manière plus rapide.

Le système Decca est fondé sur l'intersection de deux systèmes de lignes qui se coupent (lanes). Ces lignes sont indiquées en rouge et en bleu.

Pour les rayons de mesure, on a choisi les "Decca-lanes" rouges, celles-ci donnant la meilleure intersection perpendiculaire avec les lignes de profondeur dans le Haringvliet.

Le bateau de mesure est équipé d'un appareil Decca et d'un appareillage d'enregistrement de la radio-activité naturelle. (fig. 5.2.8.1.)



Fig. 5281

Pour la mesure de la radio-activité naturelle, on a utilisé le détecteur Geiger-Müller jusqu'au 9 mai 1962, puis le détecteur à scintillations.

La longueur du câble d'alimentation électrique est de 100 m; lorsque les vitesses de courant sont faibles, le câble n'est pas filé en entier. En remorquant le traîneau, il faut veiller à ne pas laisser ce câble fragile se coincer entre le bateau et le câble de remorque.

Le câble de remorque a une longueur de 50 m. La longueur utilisée dépend de la profondeur de l'eau dans la zone de mesure.

Dans le Haringvliet, les longueurs ordinairement employées étaient de 40 à 50 m, pour une profondeur de l'eau de 8-10 m.

Le câble porte des marques régulièrement espacées.

Afin de déterminer la direction du câble de remorque, on a placé une échelle graduée sur le pont arrière du bateau.

La mesure de la radio-activité naturelle a été effectuée de la manière suivante.

Dans le voisinage du point d'immersion, on a fait passer le détecteur par-dessus bord; après quoi, tout en naviguant, on a filé le câble de remorque jusqu'à 50 m.

Ensuite, le détecteur a été traîné sur le fond en suivant les rayons de mesure (lanes) à une vitesse de 3-6 km à l'heure, établie en fonction de la vitesse du courant.

On a choisi des distances respectives de 100 et de 200 m entre les rayons de mesure.

Sur les rayons de mesure, on a reporté, tous les 25 m, les lignes du réseau Decca bleu. En faisant cette mesure, on trace une marque sur la bande de papier de l'appareil enregistreur. Ces marques sont numérotées et la date de la mesure est inscrite à côté.

Pour chaque mesure topographique, on a noté les résultats de mesure suivants :

- a. le numéro de la mesure topographique
- b. sa date
- c. la position, évaluée au Decca, du bateau
- d. le cours du bateau
- e. la direction du câble de remorque par rapport à l'axe du bateau
- f. la longueur du câble de remorque.

Ces données avaient pour but de déterminer, pour chaque tronçon de 25 m, la position du détecteur évaluée au Decca.

Les positions relevées au Decca ont été indiquées ensuite sur une carte avec mention de l'intensité correspondante, enregistrée en imp./min.

A l'aide des intensités de rayonnement de la radio-activité naturelle du fond ainsi portées sur une carte, on a tracé des lignes d'activité équivalente.

Les mesures de l'intensité de rayonnement de la radio-activité naturelle du fond ont été effectuées dans la zone située autour des points d'immersion.

On a relevé (fig. 5.2.8.2., 5.2.8.3. et 5.2.8.4.) les valeurs suivantes aux dates ci-après et pour les régions situées autour :

du point d'immersion A :	mars/avril 1962	150-200 imp./min.
	20 juin 1962	150-250 imp./min.
	6 août 1962	150-200 imp./min.
des points d'immersion	mars 1962	200-300 imp./min.
B et C :	septembre 1962	150-300 imp./min.



Fig. 5.2.8.2

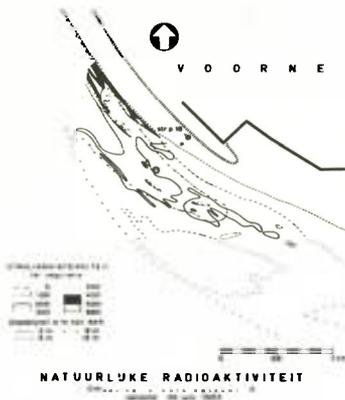


Fig. 5.2.8.3

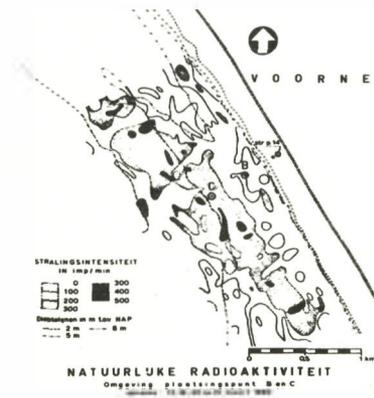


Fig. 5.2.8.4

### 5.2.9. Dépôt expérimental du traceur radio-actif

Avant l'immersion définitive du traceur radio-actif, on a effectué quelques dépôts à titre expérimental.

Ces dépôts ont été exécutés par le personnel qui devait en être chargé plus tard. Toutes les opérations ont été répétées plusieurs fois.

Ces dépôts d'essai avaient pour but d'assurer au personnel une sécurité aussi grande que possible à l'égard des rayonnements radio-actifs.

Les opérations ont été exécutées en partie avec la protection de la paroi en plomb du container de transport, en partie dans cette protection.

Les opérations effectuées avec protection de la paroi en plomb étaient les suivantes :

- a. passer un crochet fixé à une corde par la boucle de la corde de nylon reliée à la chaîne de suspension attachée au container d'immersion dans le container de transport fermé;
- b. soulever le couvercle du container de transport;
- c. retirer de son compartiment, à distance et au moyen de la corde précitée, la chaîne de suspension du container d'immersion;
- d. fixer la chaîne de suspension, au moyen d'une manille, à la chaîne de levage du treuil;
- e. introduire à distance - avec l'aide d'un miroir - et au moyen d'une pince, un petit détonateur dans le tube de jonction situé entre les couvercles du container d'immersion;
- f. briser à distance - avec l'aide d'un miroir - et au moyen d'un marteau et d'un poinçon, la membrane de plomb située dans le bouchon de remplissage du container précité.

L'opération effectuée sans protection de la paroi de plomb consistait à mettre par-dessus bord le container d'immersion.

Il fallait normalement moins de 10 secondes pour extraire ce container du container de transport et le plonger dans l'eau.

Le dépôt expérimental officiel a eu lieu le 15 mars 1962.

Les services suivants avaient été invités à assister à l'opération.

- a. L'Inspection principale des Services de Pharmacie de la Santé publique de La Haye.
- b. L'Inspection des Services de Pharmacie de la Santé publique de La Haye.
- c. L'Inspection du travail, 3<sup>me</sup> district de Rotterdam.
- d. L'Institut national pour l'Épuration des Eaux usées de Voorburg.
- e. Philips-Duphar d'Amsterdam.

Sur la base de cet essai, l'autorisation a été accordée d'effectuer la mesure des déplacements de sable au moyen d'un traceur radio-actif, conformément à la méthode d'immersion dont démonstration avait été faite.

### 5.3. Mise en place du traceur radio-actif

#### 5.3.1. Généralités

Avant sa mise en place, le traceur devait être activé à l'usine de la S.A. Philips-Duphar à Amsterdam.

On a constaté que ce traceur était tellement basique qu'il était nécessaire d'y ajouter une grande quantité de HCl pour le neutraliser.

La capacité des containers d'immersion disponibles a obligé à réduire de moitié la quantité de traceur prévue à l'origine pour chaque immersion.

Pour garantir la réussite des mesures, l'activité de chaque quantité de traceur a été augmentée, sans cependant dépasser l'activité admise par grain de traceur, soit  $10^{-2}$   $\mu$ C.

Le traceur radio-actif a été transporté aux points d'immersion par auto et par allège à moteur.

Avant, pendant et après le dépôt du traceur radio-actif, on a pris différentes mesures de sécurité et, à bord de l'allège, on a mesuré le rayonnement radio-actif en plusieurs endroits.

#### 5.3.2. Activation du traceur

Peu avant de commencer l'opération de mise en place du traceur radio-actif, on a envoyé la quantité d'Ionac-C50 mentionnée au paragraphe 5.2.4., soit 167 kg, à l'usine de la S.A. Philips-Duphar à Amsterdam, afin de la mélanger à l'isotope Sc-46.

On devait placer au total 50 kg de traceur par point d'immersion, en 10 opérations successives.

En ce qui concerne l'activation, on avait établi que, comme pour les mesures effectuées en 1959 et 1960 - l'activité devait être de 2 curies par 50 kg de traceur.

Pendant 10 semaines, un lot de traceur de 5 kg devait être déposé en chaque point d'immersion; ce lot

aurait une activité de 0,2 curie par rapport à une date d'activité fixe.

La période de placement devant être comprise entre le 16 avril et le 23 juin 1962, la date d'activité a été fixée au 16 mai 1962.

A cette date, l'activité du traceur était de 0,2 curie par 5 kg, soit  $40 \mu\text{C}$  par gramme.

Pour exprimer en  $\mu\text{C}$  l'activité par grain de traceur, on procède comme suit :

Le nombre de grains  $n$  par gramme de traceur est de :

$$n = \frac{10^{12}}{\frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3} \text{ poids spécifique du traceur}$$

dans laquelle :  $d$  = diamètre du grain en  $\mu$   
poids spécifique du traceur = 2,7.

Pour le diamètre du grain, on peut prendre le facteur  $d_{50}$ . Pour le calcul de l'activité par grain de traceur avec une granulométrie de 150-210  $\mu$ , on a établi que  $d_{50} = 200$ . Bien qu'en réalité  $d_{50}$  soit plus petit, on a pris cette valeur pour des raisons de sécurité.

Sur la base de ce qui précède, le nombre de grains par gramme de traceur est de 100.000.

L'activité devant être de  $40 \mu\text{C}$  par gramme, l'activité par grain de traceur s'élève à  $4,10^{-4} \mu\text{C}$ .

Or, on s'est aperçu à l'usine, en préparant le traceur radio-actif, que l'Ionac-C50 était fortement basique et que, par conséquent, il fallait utiliser une grande quantité de HCl pour neutraliser le traceur.

Compte tenu de la capacité du container d'immersion dont on disposait déjà, il a fallu réduire à 2 ½ kg, au lieu de 5 kg, le poids des lots de traceur. Pour assurer la réussite des mesures malgré l'emploi d'une quantité moins

importante de traceur, l'activité de chaque lot a été portée de 0,2 à 0,3  $\mu\text{C}$ , par rapport à la date d'activité arrêtée.

Par rapport à cette date, l'activité par grain de traceur a été triplée et portée de  $4,10^{-4} \mu\text{C}$  à  $12,10^{-4} \mu\text{C}$ .

Compte tenu de la période de placement définitive, soit du 16 avril au 6 juillet 1962, l'activité effective par grain de traceur a varié entre  $15,10^{-4}$  et  $5,6,10^{-4} \mu\text{C}$ . (fig. 5.3.2.1.)

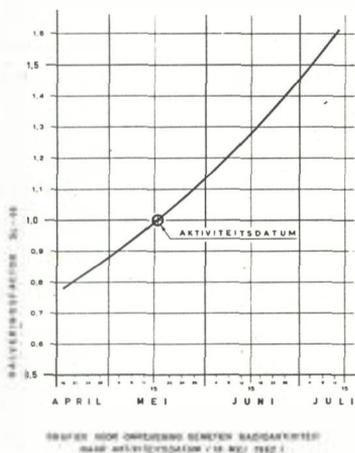


Fig. 5.3.2.1.

Signalons encore que l'Inspection nationale de la Santé publique tolère une activité maximale de  $10^{-2} \mu\text{C}$  par grain de traceur.

On a constaté, en définitive, que le traceur déversé avec le HCl avait, en chaque point d'immersion, l'activité totale mentionnée ci-dessous, par rapport à la date d'activité du 16 mai 1963 (fig. 5.4.2.1.) :

	<u>Ionac-C50</u>	<u>HCl</u>
point d'immersion A	2677,2 mC	242 mC
point d'immersion B	2665,5 mC	237,5 mC
point d'immersion C	2689,2 mC	223,8 mC

Le traceur placé par point d'immersion avait donc une activité moyenne de 0,27 curie au lieu de 0,30 curie.

### 5.3.3. Transport du traceur radio-actif

Le traceur activé devait être transporté de l'usine d'Amsterdam à Hellevoetsluis, puis amené aux points d'immersion.

Pour le transport du matériau sorti d'usine, on avait fourni auparavant à celle-ci les containers d'immersion disponibles avec quelques membranes de plomb, des garnitures en caoutchouc et des tubes de jonction pour les couvercles.

A l'usine, le personnel a versé dans chaque container, par l'ouverture de remplissage, la quantité désirée de traceur radio-actif, y a ajouté trois balles de ping-pong, puis a fermé les containers.

Avant chaque mise en place du traceur radio-actif, on est allé chercher à l'usine, avec la camionnette V.W. dans laquelle le container de transport était placé, un container d'immersion rempli. Le container de transport restait dans l'auto.

Pour des raisons de sécurité, on a expressément évité, lors du transport par route, le tunnel de Rotterdam ou les bacs traversant le Rotterdamse Waterweg.

A l'arrivée du traceur radio-actif à Hellevoetsluis, le container de transport a été retiré par glissement de la camionnette V.W. et déposé sur le terrain du Rijkswaterstaat, puis placé, au moyen d'une grue, à bord de l'allège à moteur spécialement aménagée à cet effet. (fig. 5.3.3.1. et 5.3.3.2.)

Par mesure de sécurité, le personnel chargé d'enlever le container de transport de la camionnette V.W. et de l'y remettre après la mise en place portait des gants de cuir pour exécuter ces opérations.

Le traceur radio-actif a été amené au point d'immersion par l'allège à moteur.

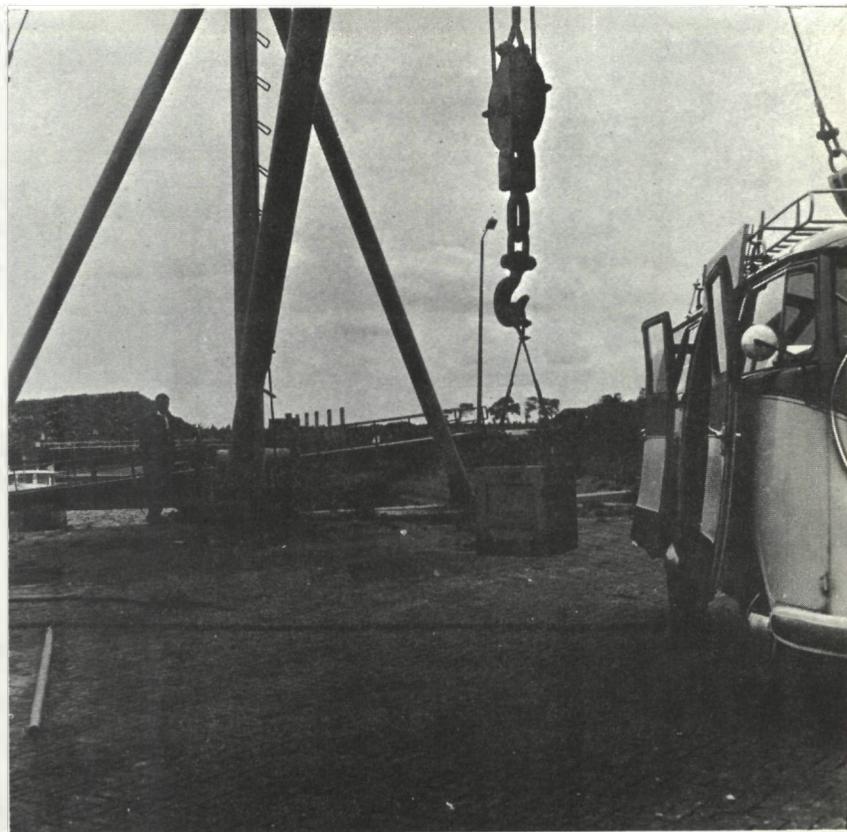


Fig. 5.3.3.1.

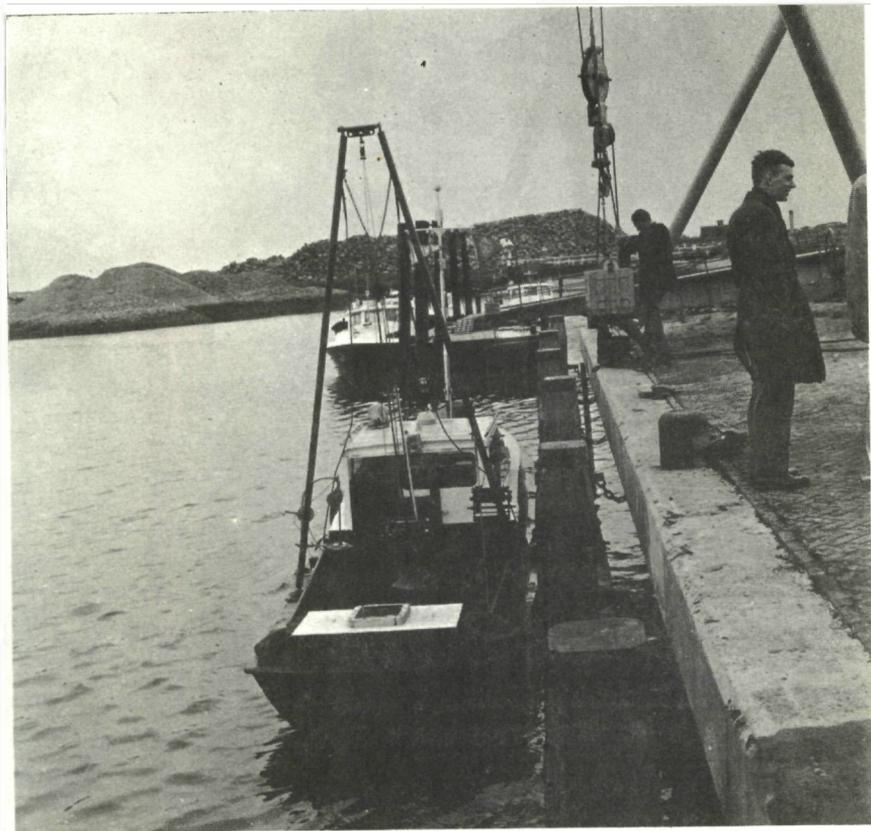


Fig 5 3 3 2

#### 5.3.4. Mise en place du traceur radio-actif

Avant de procéder à la mise en place proprement dite du traceur radio-actif, il a fallu mesurer et marquer avec précision l'emplacement du point d'immersion.

Compte tenu de la condition liée à la mise en place (5.1.), il a fallu, en outre, mesurer la vitesse du courant.

C'est ensuite seulement que l'on a pu procéder à l'immersion du traceur radio-actif.

Eu égard aux opérations à effectuer, on a mesuré l'intensité du rayonnement en divers endroits afin de s'assurer de l'efficacité des mesures de sécurité prises.

La mise en place du traceur radio-actif s'est effectuée de la manière suivante :

Peu avant l'immersion, on a déterminé à l'aide d'une allège à moteur le point d'immersion comme étant le point d'intersection de deux rayons de mesure (fig. 5.2.2.1.). Ce point a été marqué par une bouée.

Ensuite, l'allège à bord de laquelle se trouvait le container de transport a jeté l'ancre en ce point. (fig. 5.3.4.1.)

A cet effet, 3 ancres ont été jetées, soit une ancre à l'avant et deux ancres latérales orientées vers l'arrière. L'allège chargée de déterminer le point d'immersion a aidé à effectuer l'opération.

Après avoir ancré l'allège (fig. 5.4.3.2.) sur laquelle se trouve le container de transport, on a mesuré à partir de ce bateau la vitesse de courant au voisinage du point d'immersion, à 50 cm au-dessus du fond. (fig. 5.3.4.3.)

Le traceur radio-actif devait n'être immergé qu'à une vitesse de courant d'environ 30 cm/sec., à 50 cm au-dessus du fond.



Fig. 5.3.4.1

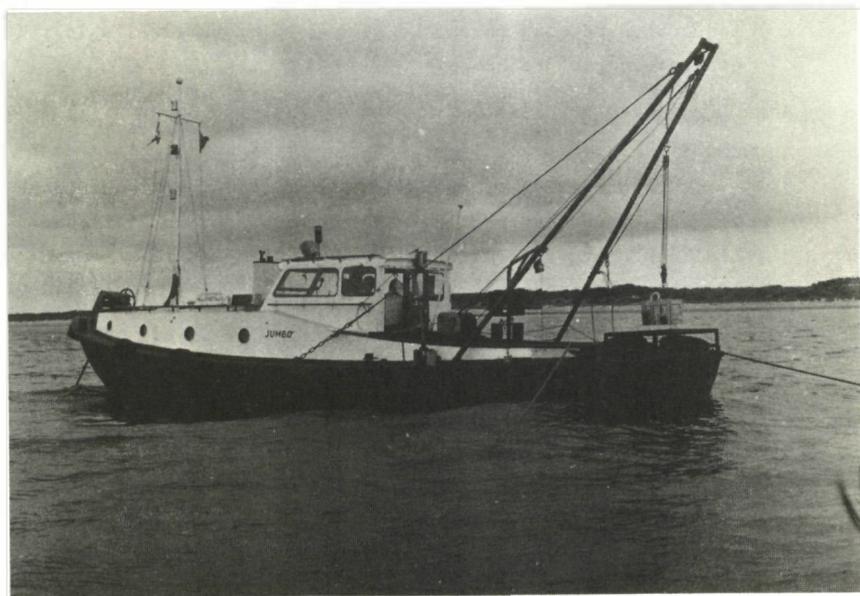


Fig. 5.3.4.2

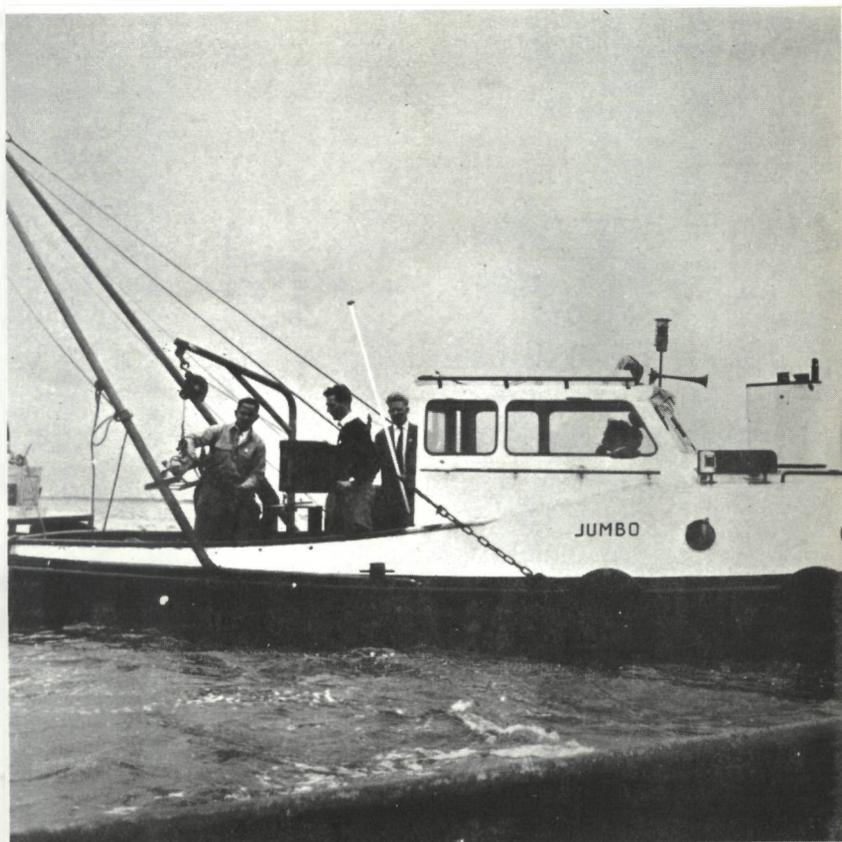


Fig. 5.3.4.3.

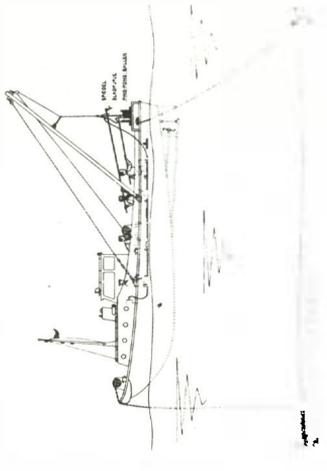
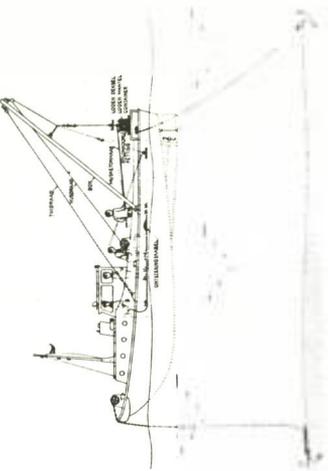
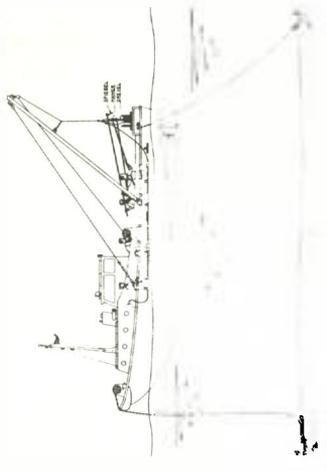
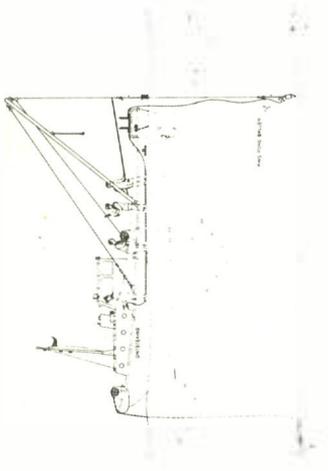


FIG. 5-3-4-4.

Pendant les mesures de la vitesse du courant, le container d'immersion a été préparé. (fig. 5.3.4.4.)

A cet effet, on a ouvert le cadenas du container de transport et on a enlevé l'étrier de fermeture. On a passé un crochet fixé à une corde par la boucle de la corde en nylon reliée à la chaîne de suspension du container d'immersion placé dans le container de transport. Puis on a soulevé et retiré le couvercle de plomb du container de transport au moyen d'une petite grue. Avec la corde précitée, on a enlevé, à distance, la chaîne de suspension du container d'immersion, du compartiment qui la contenait dans le container de transport. Cette chaîne a été fixée au câble de levage du treuil au moyen d'une manille. A l'aide d'un miroir et d'une pince, on a placé, à distance, le détonateur dans le container. Les fils électriques de ce détonateur ont été reliés au câble percuteur placé à bord.

Dès que la vitesse de courant à 50 cm au-dessus du fond fut revenue à 30 cm/sec., on a rompu à distance la membrane de plomb du container d'immersion, avec poinçon et marteau, à l'aide d'un miroir.

Immédiatement après, le container a été mis par-dessus bord au moyen d'une petite grue (fig. 5.3.4.5.), puis déposé sur le fond et soulevé de 50 cm. A ce moment, le câble percuteur a été relié à l'accu du bateau, ce qui a fait sauter le tube de jonction placé entre les couvercles du container d'immersion et provoqué l'écoulement du traceur.

On a contrôlé cet écoulement au moyen des balles de ping-pong qui remontaient (fig. 5.3.4.6.) du fond.

Dès que ces balles sont apparues à la surface de l'eau, on les a repêchées au moyen d'un filet (fig. 5.3.4.7.), puis déposées dans un seau afin de les renvoyer plus tard à l'usine avec le container de transport.

Pendant le retour à Hellevoetsluis, le container d'immersion a été remorqué derrière l'allège à moteur afin d'être

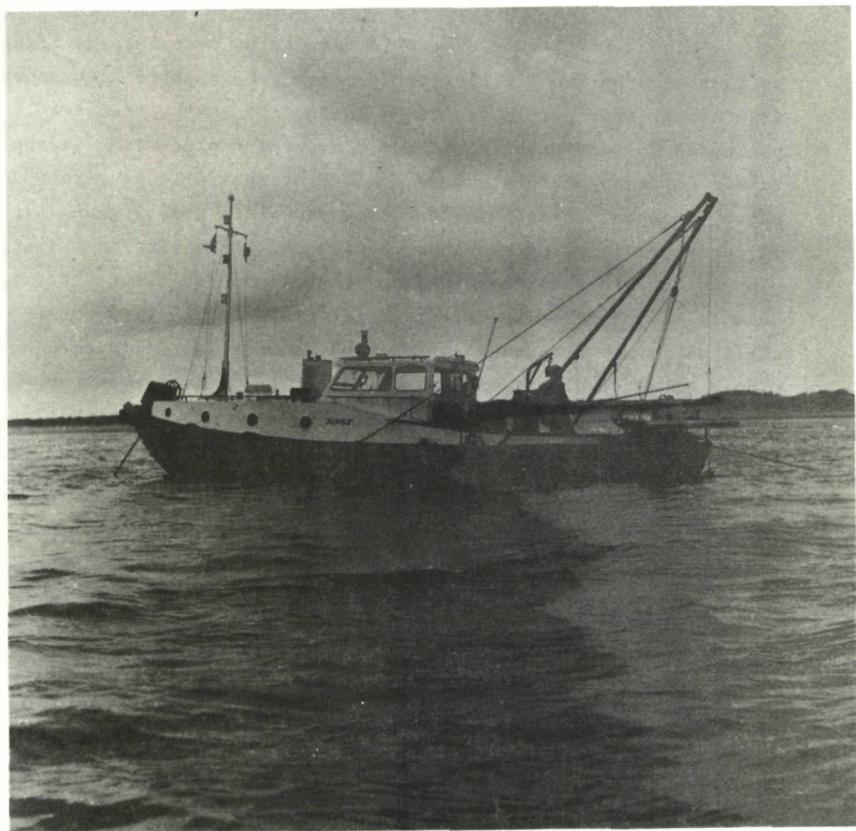


Fig. 5.3.4.5.

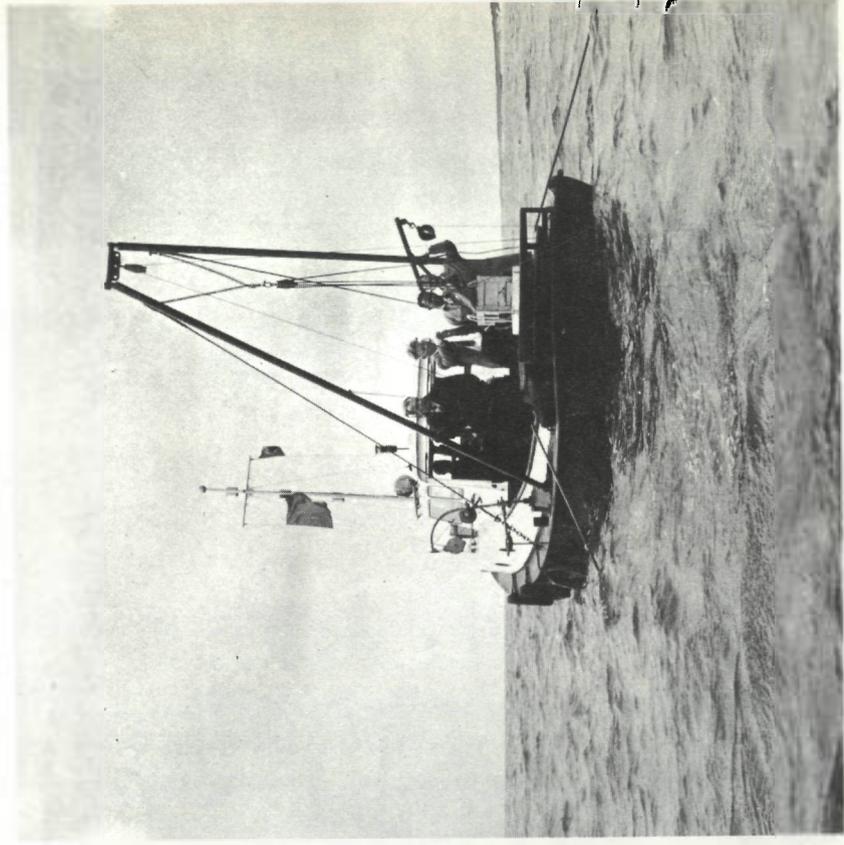


Fig. 5.3.4.6.



Fig. 5.3.4.7.

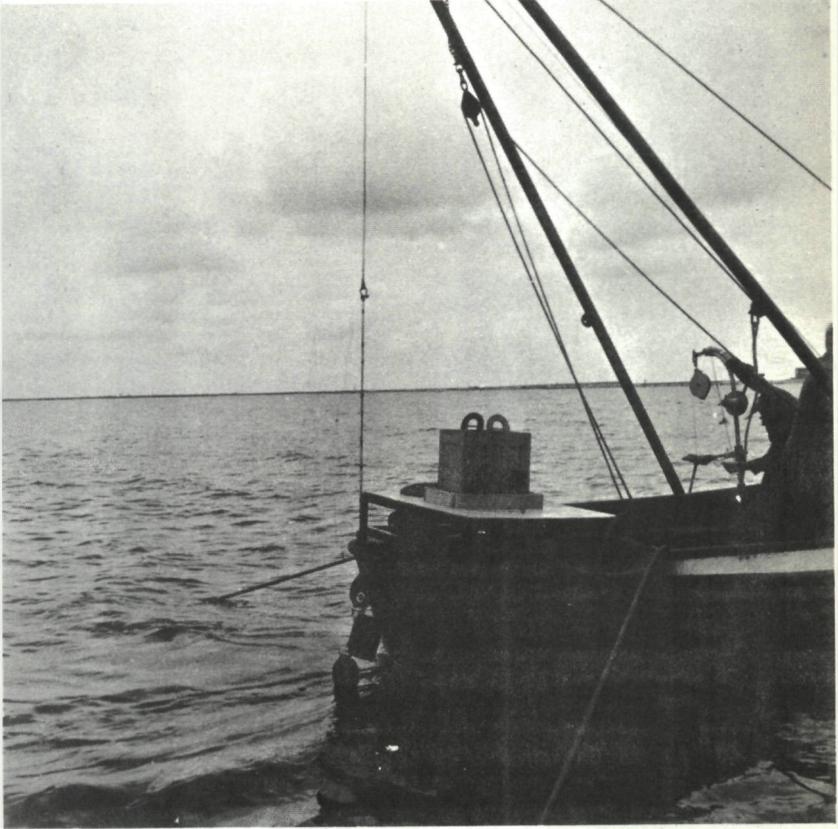


Fig. 5 3 4 8

nettoyé par rinçage dans toute la mesure du possible; après quoi, près d'Hellevoetsluis, il a été ramené à bord et de nouveau placé dans le container de transport. (fig. 5.3.4.8.)

A Hellevoetsluis, sur le terrain du Rijkswaterstaat, le container de transport, après avoir été fermé au moyen du couvercle et du cadenas, a été placé sur la camionnette V.W. à l'aide d'une grue.

Le personnel chargé du transport et de l'immersion des matériaux portait à chaque fois un film-badge (film macaron) qui enregistrerait le rayonnement radio-actif reçu.

Tous les badges étaient pourvus d'un numéro. Bien que ces badges dussent être renouvelés tous les quinze jours, chacun gardait toujours le numéro qui lui avait été attribué. Pour les personnes désirant assister aux travaux de mesures, on possédait encore quelques badges de réserve.

Tous les quinze jours, les badges étaient envoyés pour analyse au groupe de travail radiologie T.N.O. à Arnhem. Les résultats des analyses nous étaient communiqués peu de temps après.

La dose d'irradiation reçue par le personnel en 14 jours était toujours inférieure à 20 mR, alors que la dose légalement admise est de 300 mR par semaine.

Par ailleurs, l'intensité du rayonnement dans la camionnette V.W. pendant le transport du traceur radio-actif a été mesurée chaque fois à la place occupée par le chauffeur, au moyen du moniteur portatif. On a constaté que la dose reçue était toujours inférieure à 2 mR/h.

Sur l'allège qui a transporté les containers et le traceur radio-actif, on a également mesuré en plusieurs endroits le rayonnement radio-actif à l'aide du moniteur portatif.

Dans le rouf de cette allège, le rayonnement était inférieur à 0,2 mR/h et on a enregistré un maximum de 0,6 mR/h près du treuil.

Près du container de transport, le rayonnement radio-actif accusait les valeurs suivantes :

- a. à 1 m du récipient en plomb : 5 mR/h au max.
- b. contre le récipient : max. > 30 mR/h
- c. dans le récipient, après retrait du container d'immersion : 10 mR/h au max.

Les balles de ping-pong repêchées avaient un rayonnement radio-actif max. > 30 mR/h.

Après immersion du traceur radio-actif, le rayonnement du container était de 20 mR/h au max.

Signalons que le personnel qui entrait en contact avec le container d'immersion vide ou avec les balles de ping-pong portait des gants de caoutchouc.

Les dates de dépôt du traceur radio-actif aux divers points d'immersion ainsi que l'importance de la quantité d'activité déposée - liée tant au traceur qu'à l'HCl - sont indiquées à la figure 5.4.2.1.

Cette figure prouve que l'immersion du traceur radio-actif s'est effectuée moins régulièrement qu'il n'avait été prévu à l'origine. Pendant la période fixée pour la mise en place du traceur radio-actif, il a fallu différer 7 fois les opérations à cause du vent et du mouvement des vagues.

Les jours pendant lesquels il a été impossible de travailler étaient : les 9, 10, 16, 17 et 21 mai 1962, ainsi que les 19 et 20 juin 1962.

## 5.4. Mesures

### 5.4.1. Généralités

Sous l'influence des vitesses du courant, le traceur radio-actif immergé s'est déplacé assez rapidement. On a mesuré, au moyen d'un détecteur sur traîneau, la dispersion de ce traceur entre les dates où l'immersion a été effectuée. Dans les limites de la zone de dispersion, on a mesuré l'augmentation de la radio-activité naturelle en imp./min.

En outre, on a prélevé à intervalles réguliers des échantillons du fond dans cette zone de dispersion, au moyen d'une petite benne preneuse. Au laboratoire, on a mesuré l'intensité de rayonnement de ces échantillons en imp./min.

On a observé différentes mesures de sécurité au cours du prélèvement.

Afin d'avoir une idée des vitesses de courant intervenues pendant les déplacements du traceur radio-actif, on a mesuré la vitesse du courant aux points d'immersion.

Pendant plus de trois mois, on a fait de nombreux travaux de mesure et il a donc fallu utiliser un plus grand nombre de bateaux avec le personnel nécessaire.

### 5.4.2. Déplacement du traceur radio-actif

Les déplacements du traceur radio-actif ont été mesurés pendant les périodes comprises entre les dates d'immersion.

Ces mesures avaient pour but de mettre en évidence la dispersion du traceur radio-actif ainsi que ses limites.

On a mesuré, dans ces limites, l'augmentation de la radio-activité naturelle en imp./min.

Le principe fondamental et le mode d'exécution de la mesure des déplacements du traceur radio-actif sont très semblables à ceux de la mesure de la radio-activité

naturelle du fond, telle qu'elle est décrite au paragraphe 5.2.8.

Les différences essentielles seront précisées ci-dessous.

Pour obtenir de bons résultats lors de la mesure des déplacements du traceur radio-actif, il a fallu remplir les conditions suivantes :

- a. réseau de mesure serré
- b. distances topométriques assez courtes
- c. mesure achevée à l'étale de la marée.

La raison pour laquelle la dernière condition devait être remplie est que, pour une vitesse de courant moyenne sur la verticale (du fond à la surface de l'eau) supérieure à 1,00 m/sec., le détecteur sur traîneau a tendance à quitter le fond et à "flotter".

Vu les conditions posées, il est très difficile d'achever les opérations en cas de forte diffusion du traceur radio-actif. C'est pourquoi il a fallu les interrompre à plusieurs reprises pendant une période de mesure.

Etant donné que toutes les mesures avaient été numérotées par point d'immersion, une mesure interrompue a reçu deux et même trois numéros. (fig. 5.4.2.1.)

En règle générale, la mesure devait être interrompue de 2½ à ½ h avant PM jusqu'à 3 à 5 h après PM. A l'étale de marée basse, il était possible d'effectuer les mesures pendant cinq heures au moins.

Afin de limiter les interruptions autant que possible, la distance entre les rayons de mesure a été choisie de manière différente, suivant que la dispersion du traceur radio-actif était réduite ou importante.

Pour une diffusion réduite, cette distance était de 25 m, alors que, pour une diffusion importante, elle était de 50 m de part et d'autre du point d'immersion, pour atteindre plus loin 100, voire 200 m, pour des intensités de rayonnement plus faibles.

Quelle que fût la diffusion du traceur radio-actif, la distance des points topométriques comportait deux sections de "lanes" du schéma Decca bleu, soit 10 m environ.

Les faits suivants sont cités à titre d'illustration.

Le 22 juin 1962, on a effectué la mesure n° B.27. Les travaux ont duré 4 heures et ont porté sur 19 rayons de mesure. (fig. 5.5.3.3.)

La distance entre ces rayons était de 80 m jusqu'à 600 m à l'ouest et à 500 m à l'est du point d'immersion. Au-delà, elle était de 100 m.

Le déplacement du traceur radio-actif a été mesuré aussi souvent que possible. A cause du temps, on n'a pu effectuer de mesure les 16, 17, 21 et 25 mai 1962.

On a fait au total 85 opérations de mesure, réparties comme suit :

point d'immersion A : 32  
point d'immersion B : 29  
point d'immersion C : 24.

Pour chaque point d'immersion, on trouvera les mesures effectuées à la figure 5.4.2.1. avec indication de la date et du numéro. Cette figure indique en outre le déplacement maximal du traceur radio-actif en direction de la marée descendante et de la marée montante.

A plusieurs occasions, on a retrouvé le traceur radio-actif en direction de la marée montante à 1500 m environ du point d'immersion. En direction de la marée descendante, cette distance était au maximum de :

600 m au point d'immersion A  
2000 m au point d'immersion B  
1500 m au point d'immersion C.

Signalons en outre qu'au point d'immersion A, il n'y a souvent pas eu de déplacement à marée descendante. (fig. 5.4.2.1. et 5.5.3.2.)

On a donc retrouvé le traceur radio-actif même en dehors de la zone de mesure protégée.



Perpendiculairement à la direction du chenal, le traceur radio-actif accusait, comme prévu, une dispersion beaucoup plus réduite.

La distance maximale entre les limites de la dispersion du traceur et l'axe du chenal, dont la position est indiquée par les points d'immersion, était de :

60 m pour le point d'immersion A	} pour le point d'immer-	sion B
150 m en direction de la plage		
130 m en direction inverse		
190 m pour le point d'immersion C.		

#### 5.4.3. Echantillons prélevés à la benne preneuse

En dépistant le traceur radio-actif au moyen du détecteur sur traîneau, on a mesuré l'augmentation de la radio-activité naturelle en imp./min. Toutefois, cette opération n'était pas suffisante.

A l'intérieur de la zone de diffusion du traceur radio-actif, on a également prélevé des échantillons du fond. On a mesuré, au laboratoire, l'intensité de rayonnement de chacun de ces échantillons en imp./min. pour éventuellement comparer, plus tard, les résultats ainsi obtenus avec les résultats des mesures effectuées à la même époque.

Le choix des points d'échantillonnage a été déterminé par le tracé de la diffusion du traceur radio-actif indiqué par la mesure précédant l'échantillonnage. Les points ont été répartis sur tracé avec un espacement régulier.

Pour déterminer l'emplacement des points de prélèvement, on pouvait utiliser le Decca ou le sextant.

On a d'abord choisi le sextant comme méthode de relèvement, car on ne disposait que de trois allèges à moteur équipées d'un appareillage Decca; une de ces allèges était continuellement utilisée pour la mesure de la diffusion du traceur radio-actif et les deux autres étaient réservées à des travaux sortant du cadre de ces opérations.

A cause de la mauvaise visibilité, une autre allège à moteur équipée d'un appareillage Decca s'est trouvée libre entre le 19 avril et le 23 mai 1962 et a pu servir à la détermination des points d'échantillonnage.

Pour le prélèvement des échantillons, on a utilisé la petite benne preneuse décrite au paragraphe 5.2.3.

Après chaque prélèvement, la benne a été placée, fermée, dans la coursive de l'allège. Avant de l'ouvrir, on a contrôlé le rayonnement au moyen du moniteur portatif. Le rayonnement maximal mesuré était de 0,1 à 0,2 mR/h.

Ensuite, on a ouvert la benne dans la coursive que l'on pouvait facilement débarrasser par rinçage du sable éventuellement tombé.

L'échantillon de fond a été versé de la benne ouverte dans un pot à confiture au moyen d'une cuiller et d'un entonnoir. Les mains du personnel chargé d'effectuer l'opération n'étaient donc pratiquement pas en contact avec le sable. Pour des raisons de sécurité, le matériel utilisé a été rincé après remplissage des pots à confiture. Après chaque opération, le personnel précité s'est soigneusement lavé les mains.

Enfin, on a contrôlé au moniteur portatif le rayonnement radio-actif sur les mains du personnel et sur le matériel utilisé.

L'échantillonnage dans son ensemble aussi bien que le nombre d'échantillons du fond à prélever par échantillonnage dépendaient des bateaux et du personnel disponibles.

En outre, les conditions atmosphériques ont joué un rôle décisif en la matière. Lorsque, sous l'influence du vent, il se formait des vagues dont la hauteur pouvait atteindre 80 cm environ, il devenait difficile de prélever des échantillons du fond où la benne ne se posait qu'avec difficulté.

Nous avons fait remarquer auparavant qu'il a souvent fallu recourir au sextant pour déterminer l'emplacement des points d'échantillonnage. On a alors fixé des points de repère situés à 4 km environ des premiers. Pour un bon échantillonnage, il fallait une visibilité de 4 km au moins.

Le Decca ne pouvait être utilisé pour la détermination de l'emplacement que s'il n'y avait pas de perturbations causées par des orages ou par des averses; sinon, le relèvement devenait trop imprécis.

Par ailleurs, le prélèvement d'échantillons pouvait encore être gêné par une vitesse de courant trop élevée. Une grande différence se produit alors entre le courant supérieur et le courant inférieur et la benne ne "prend" pas suffisamment. En outre, il est alors souvent difficile de constater si elle a atteint le fond, de sorte qu'elle remonte plus d'une fois vide ou ouverte.

C'est pour cette raison que la plupart des échantillons prélevés au moyen de la benne ont été pris par mer étale.

Lorsque la marée était favorable, on a pu prendre près de 25 échantillons par heure.

Pour chaque point d'immersion, la figure 5.4.2.1. indique les dates de prélèvement et le nombre d'échantillons. On constate que le prélèvement des échantillons s'est souvent effectué en même temps qu'une mesure faite au détecteur sur traîneau.

Ce dernier cas s'est produit dans la zone de diffusion du traceur radio-actif au voisinage :

du point d'immersion A : 2 X

du point d'immersion B : 5 X

du point d'immersion C : 6 X

On a encore effectué 14 échantillonnages individuels.

Au total, on a prélevé 1.574 échantillons de fond, répartis de la manière suivante sur la zone de diffusion du traceur radio-actif autour :

du point d'immersion A : 303 échantillons

du point d'immersion B : 782 échantillons

du point d'immersion C : 489 échantillons

#### 5.4.4. Mesure du courant

Aux points d'immersion A, B et C, on a mesuré à plusieurs reprises le courant en même temps que les déplacements de sable, afin d'obtenir une indication de la vitesse et de la direction du courant au-dessus du fond et, en moyenne, sur la verticale (fond-surface de l'eau) en périodes de déchet et de revif.

Signalons que les différences de niveau d'eau constatées entre BM et PII, d'une part, entre PM et BII, d'autre part, étaient dues non seulement à la marée astronomique, mais encore, en ce qui concerne la direction et la vitesse, au débit du Rhin à Lobith et au vent.

Le nombre et la durée des mesures du courant dépendaient des bateaux et du personnel disponibles, ainsi que des conditions atmosphériques.

Pour cette mesure, il faut un temps calme et un mouvement des vagues peu accentué.

La vitesse du courant a été mesurée au moyen du moulinet Ott, sa direction à l'aide de l'appareil Jacobsen.

Pour chaque mesure, on a fait toutes les demi-heures une mesure verticale complète dans les deux sens. On a mesuré tous les deux mètres à partir de la surface de l'eau jusqu'au fond et également à 1,50 m, 1,00 m et 0,15 m au-dessus du fond.

Les opérations ont duré 1 minute à chaque profondeur.

La figure 5.4.2.1. indique, pour chaque point d'immersion, la date, le nombre d'heures, l'état de la marée (descendante et/ou montante), ainsi que la phase de la marée astronomique pendant laquelle une mesure de courant a eu lieu.

En outre, cette figure indique, pour chaque mesure, l'importance de la différence du niveau de l'eau entre BM et PII, d'une part, entre PM et BII, d'autre part.

On a effectué en tout 16 mesures de courant, réparties de la manière suivante selon les points d'immersion :

- point d'immersion A : 5 mesures
- point d'immersion B : 6 mesures
- point d'immersion C : 5 mesures.

Les 12 avril, 22 juin et 19 juillet 1962, on a mesuré le courant simultanément aux trois points d'immersion.

#### 5.4.5. Nombre de bateaux et personnel nécessaires

La mesure des mouvements de sable à l'aide du traceur radio-actif a été effectuée pendant la période comprise entre le 20 février et le 27 septembre 1962.

Les opérations les plus fréquentes se sont situées entre le 12 avril et le 20 juillet 1962, soit une période de plus de trois mois. (fig. 5.4.2.1.)

Ces opérations comprenaient :

- a. l'immersion du traceur radio-actif
- b. le déplacement du traceur radio-actif (mesure)
- c. le prélèvement d'échantillons au moyen de la benne preneuse
- d. les mesures du courant.

A cette fin, on avait continuellement besoin de plusieurs bateaux et de personnel.

Pour la première exploitation des résultats, il fallait du personnel de bureau; d'autre part, il a fallu utiliser une camionnette V.W. avec un chauffeur.

Dans les paragraphes suivants, on donnera un aperçu sommaire de la fréquence des mesures ainsi que du nombre des bateaux et du personnel requis.

Il y a eu 30 immersions de traceur radio-actif.

Une camionnette V.W. avec chauffeur a été nécessaire au transport du traceur radio-actif, qu'elle allait chercher à

Amsterdam avant chaque immersion, en partant de Hellevoetsluis.

Pour déterminer le point d'immersion et pour faciliter le mouillage, on a eu besoin d'une allège à moteur et d'un marin.

Le personnel chargé de l'immersion est ensuite monté à bord d'une deuxième allège à moteur qui transportait les traceurs radio-actifs. Ce personnel a exécuté également les mesures de vitesse du courant indispensables à la mise en place du traceur radio-actif.

Cette deuxième allège avait un équipage de 4 hommes.

Le déplacement du traceur radio-actif a été mesuré presque quotidiennement (5 x par semaine). Quarante-vingt-cinq mesures ont été effectuées au total.

Un bateau et 5 hommes étaient nécessaires à cet effet.

Aux points d'immersion, on a effectué 27 échantillonnages.

Un bateau et 5 hommes étaient nécessaires pour chacun d'eux. Lorsque le relèvement se faisait au Decca, 4 hommes suffisaient.

Aux points d'immersion, on a effectué 17 mesures de courant, dont 3 simultanées.

Il a fallu un bateau et 4 hommes par point de mesure.

Voici l'énumération des bateaux et du personnel occupés simultanément aux jours où le plus grand nombre de mesures a été pratiqué :

immersion du traceur		
radio-actif	2 bateaux	5 hommes
déplacement du traceur	1 bateau	4 hommes
échantillons prélevés		
au moyen de la petite		
benne preneuse	1 bateau	5 hommes
mesure du courant	1 bateau	<u>4 hommes</u>
Total	5 bateaux et	18 hommes

En outre, il y avait encore la camionnette V.W. avec chauffeur.

Pendant la période totale de mesure, soit trois mois, il a fallu employer en outre du personnel pour le premier dépouillement des résultats, à savoir :

- a. dépouillement des résultats de mesure 3-4 personnes
- b. étude au laboratoire des échantillons prélevés au moyen de la benne preneuse 1 personne
- c. salle de dessin 1 personne  
(report sur carte des résultats de mesure).

L'exploitation provisoire des résultats exigeait donc la présence de 5 à 6 personnes dans les bureaux pendant toute la période de mesure.

## 5.5. Résultats des mesures

### 5.5.1. Généralités

Les mesures ont fourni une multitude de données qui devaient permettre de calculer le débit de sable pour chaque point d'immersion.

Les résultats des mesures du courant ont été élaborés de manière à mettre en évidence la vitesse moyenne du courant depuis la surface de l'eau jusqu'au fond, et la vitesse du courant à 50 cm au-dessus du fond, en fonction du temps exprimé en heures après PM, à Hellevoetsluis.

Le tableau général des courbes de vitesse du courant s'est révélé presque identique pour les trois points d'immersion.

Les directions du courant correspondaient à celle de l'axe du chenal en chaque point d'immersion.

Après avoir mesuré les déplacements du traceur radio-actif au moyen d'un détecteur sur traîneau, on a déterminé l'augmentation de la radio-activité naturelle du fond. La lecture des enregistrements a été faite d'une autre manière que pour les enregistrements obtenus lors de la mesure de la radio-activité naturelle du fond.

Les déplacements du traceur radio-actif ont été reportés sur une carte pour chaque mesure, en tant qu'augmentation de la radio-activité naturelle exprimée en imp./min.

On a constaté qu'il n'existait pas de rapport net entre les vitesses du courant mesurées aux points d'immersion et la direction principale du déplacement du traceur radio-actif.

La radio-activité des échantillons prélevés à l'aide de la benne preneuse a été mesurée au laboratoire en imp./min., puis convertie en concentration d'activité

en  $\mu\text{C}/\text{dm}^3$ , sur la base des résultats des étalonnages. On a alors converti cette concentration d'activité au moyen du facteur de demi-vie du Sc-46 en concentration de l'activité intervenue le jour du prélèvement des échantillons.

A partir de cette concentration, on a calculé, pour les échantillons prélevés au moyen de la benne, l'intensité en imp./min. le jour du prélèvement. Ces résultats ont été inscrits sur la carte comme courbes de dispersion du traceur radio-actif. Ces courbes ont été comparées à celles qui avaient été obtenues à partir d'une mesure faite au détecteur sur traîneau.

Pour une mesure simultanée de la dispersion du traceur radio-actif au détecteur et à partir d'échantillons prélevés à l'aide de la benne, on a établi ensuite, sur la base de la formule  $A = \alpha f_{0-x} \cdot I$ , un schéma de calcul destiné à déterminer la quantité de radio-activité retrouvée au moyen des détecteurs. Par ailleurs, à l'aide des points de mesure où l'on avait simultanément prélevé un échantillon avec la benne et mesuré l'intensité du rayonnement au détecteur, on a déterminé l'épaisseur moyenne de la couche de sable charriée et mélangée de façon homogène avec le traceur radio-actif.

En se référant aux résultats d'étalonnage, on a pu alors calculer la quantité de radio-activité dépistée et, de ce fait, la quantité de traceur radio-actif présente dans les courbes de dispersion.

La mesure des mouvements de sable effectuée en 1962 au moyen d'un traceur radio-actif a été conçue et exécutée de manière à s'adapter au mode de calcul indiqué par Russel pour le charriage du gravier dans deux directions. Pour cette raison, la méthode de Russel est esquissée brièvement ci-après et expliquée sur le plan pratique : on a calculé le débit de sable pour chaque point d'immersion, sur la base des résultats de mesure des déplacements du traceur radio-actif déposé aux trois points d'immersion.

En effectuant ces calculs, on s'est heurté à un certain nombre de difficultés qui ont fait douter de l'exactitude des résultats. C'est pourquoi la méthode de Russel a été sensiblement modifiée et mieux adaptée au mécanisme du charriage du sable, régi par le flux et le reflux, dans le domaine de la marée. On a estimé que la durée d'une marée convenait le mieux pour représenter l'intervalle de temps dans le schéma de calcul utilisé.

Ce schéma ne convient en réalité qu'au calcul du charriage de sable par marée suivant une seule immersion de traceur.

#### 5.5.2. Mesure du courant

Les résultats des différentes mesures de courant ont été exploités de la manière suivante.

Pour chaque journée de mesure, on a fait la moyenne des vitesses de courant enregistrées à marée descendante et à marée montante. Ces valeurs moyennes ont été rapportées à la profondeur de mesure.

On a fait ensuite la moyenne des vitesses de courant à la verticale; ces valeurs moyennes ont été rapportées au temps - exprimé en heures après PM à Hellevoetsluis - ce qui a donné des courbes moyennes de vitesses du courant.

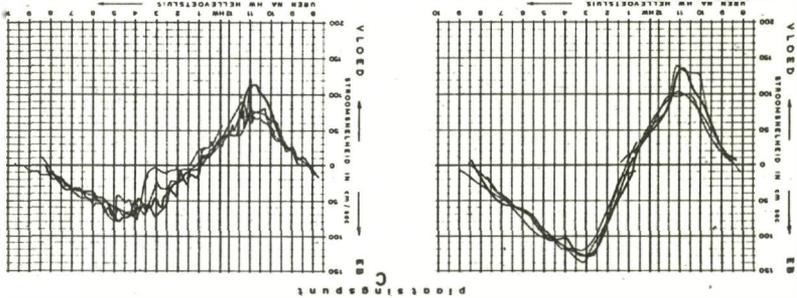
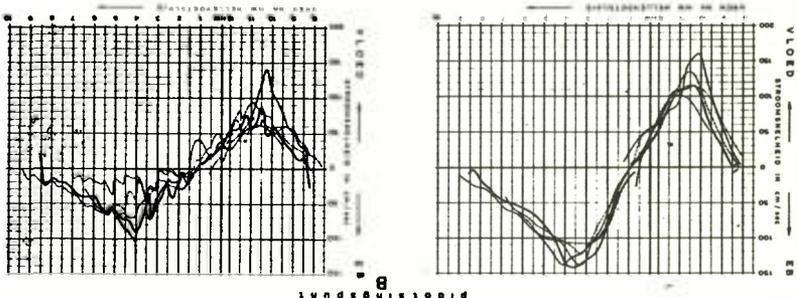
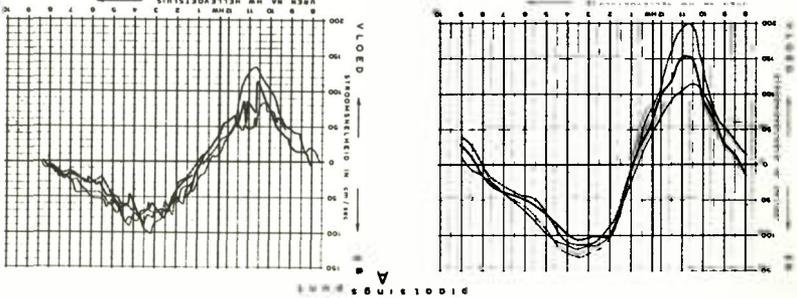
Pour chaque point de mesure, on a tracé sur un même graphique ces courbes de vitesse suivant les différents jours de mesure (fig. 5.5.2.1.).

Pour chaque jour de mesure, on a également fait la moyenne des vitesses du courant à 50 cm au-dessus du fond à marée descendante et à marée montante. Ces valeurs moyennes ont aussi été rapportées au temps - exprimé en heures après la marée haute, à Hellevoetsluis - et l'on a donc obtenu les courbes de vitesse du courant à 50 cm au-dessus du fond.

Pour chaque point de mesure, on a, une fois de plus, tracé ces courbes de vitesse suivant les différents jours de mesure (fig. 5.5.2.1.).

STROOMSNELHEIDSMETINGEN

STROOMSNELHEID  
OP DE BAKEN DE BAKEN



STROOMSNELHEID  
OP DE BAKEN DE BAKEN

1	1955	11:00	150
2	1955	11:00	150
3	1955	11:00	150
4	1955	11:00	150
5	1955	11:00	150
6	1955	11:00	150
7	1955	11:00	150
8	1955	11:00	150
9	1955	11:00	150
10	1955	11:00	150
11	1955	11:00	150
12	1955	11:00	150

Fig. 5.5.2.1.

Les résultats ainsi obtenus montrent ce qui suit.

La vitesse moyenne du courant au point d'immersion A peut être soumise à de fortes fluctuations à marée montante; ces fluctuations sont beaucoup moins importantes aux points d'immersion B et C.

Les différences de vitesse du courant à 50 cm au-dessus du fond sont considérables au point d'immersion B; elles le sont beaucoup moins aux points d'immersion A et C.

Par ailleurs, le tableau général, tant des courbes moyennes de la vitesse du courant que des courbes de la vitesse du courant à 50 cm au-dessus du fond, est identique pour les trois points d'immersion.

D'après le résultat de la mesure de la direction du courant aux points d'immersion, cette direction coïncidait plus ou moins avec celle de l'axe du chenal à chaque point d'immersion (fig. 5.2.2.1.).

### 5.5.3. Déplacement du traceur radio-actif

Pendant la mesure du déplacement du traceur radio-actif au détecteur sur traîneau, on a enregistré de manière continue l'intensité du rayonnement de l'augmentation de la radio-activité naturelle en imp./min., à l'aide de l'appareil enregistreur placé à bord du bateau.

En chaque point topométrique, on a tracé une marque sur le papier enregistreur et on a noté les résultats de la mesure de l'emplacement du détecteur, comme il est décrit au paragraphe 5.2.8.

En dépouillant les résultats de la mesure de l'activité aux détecteurs, la lecture des enregistrements de l'intensité du rayonnement, en imp./min., a été faite d'une autre manière pour la mesure de la dispersion du traceur radio-actif que pour la mesure de la radio-activité naturelle.

En voici la raison.

La mesure de la radio-activité naturelle a pour but de donner un aperçu des variations auxquelles est soumise la radio-activité moyenne dans l'ensemble de la zone de mesure.

Peu importe que l'enregistrement indique quelques crêtes puisque l'on ne peut tenir compte de toutes lors de l'exploitation des résultats de mesure.

Après avoir mesuré le déplacement du traceur radio-actif, on trace des courbes de déplacement que l'on compare ensuite à l'intensité de rayonnement, déterminée au laboratoire, d'échantillons prélevés à la benne dans la zone de mesure (voir 5.4.3.). Dans ce cas, il est important que les crêtes de l'intensité de rayonnement mesurée soient indiquées aussi exactement que possible sur les courbes de déplacement.

Se fondant sur ce qui précède, la lecture des enregistrements de l'intensité de rayonnement se fait de la manière suivante (fig. 5.5.3.1.).

Les enregistrements de l'intensité de rayonnement obtenus lors de la mesure de la radio-activité naturelle sont divisés en secteurs. Les limites de ces secteurs sont situées à égale distance de deux marques topométriques successives. On fait la moyenne des valeurs de l'intensité de rayonnement mesurée de façon continue dans un secteur. Cette valeur moyenne (exprimée en imp./min.) est considérée comme étant la valeur mesurée pendant l'établissement des points topométriques dont la marque se trouve au milieu du secteur envisagé.

On calcule le plus soigneusement possible la moyenne des fluctuations de l'intensité de rayonnement enregistrée pendant la mesure des déplacements du traceur radio-actif. L'intensité de rayonnement mesurée en imp./min. est représentée par une ligne brisée dont les points d'inflexion correspondent naturellement aux points topométriques, mais peuvent se situer aussi entre deux de ces points. Dans ce dernier cas, on détermine par interpolation l'emplacement du point de mesure et par conséquent celui du détecteur.

Le déplacement et la dispersion du traceur radio-actif, notamment la détermination des limites de cette dispersion, sont mis en évidence par l'augmentation de la radio-activité naturelle du fond.

Cette augmentation est déterminée de la manière suivante.

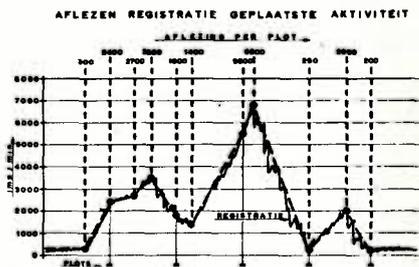
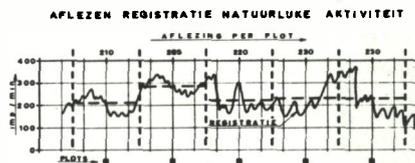


Fig. 5.5.3.1.

L'intensité de rayonnement (en imp./min.), enregistrée sur un rayon de mesure du déplacement du traceur radio-actif, est représentée par une ligne brisée sur l'enregistrement, comme nous l'avons décrit ci-dessus.

Sur cet enregistrement, la ligne-0 est déplacée sur une hauteur égale à l'intensité moyenne de rayonnement, déterminée à partir de la mesure de la radio-activité naturelle de la zone dans laquelle est situé le rayon de mesure en question.

De cette manière, on connaît l'augmentation de la radio-activité naturelle dans ce rayon.

Une fois fixée, pour une mesure déterminée, l'importance de l'augmentation de la radio-activité naturelle dans les différents rayons de mesure, on trace les courbes de dispersion du traceur radio-actif pour le point d'immersion donné.

Les rayons de mesure sont indiqués sur un plan avec les points topométriques et les points de mesure obtenus par interpolation. Pour chaque point de mesure, on inscrit l'augmentation de la radio-activité naturelle mesurée en imp./min. Ensuite, on trace des lignes de même intensité de rayonnement.

De cette manière, on obtient une courbe de dispersion du traceur radio-actif pour chaque mesure autour de chaque point d'immersion.

Les figures 5.5.3.2. et 5.5.3.3. prouvent nettement que le déplacement du traceur radio-actif a suivi essentiellement :

- au point d'immersion A : la direction de la marée montante
- au point d'immersion B : la direction de la marée descendante
- au point d'immersion C : la direction de la marée montante.

En règle générale, cette tendance s'est manifestée lors de toutes les mesures (fig. 5.4.2.1.). Remarquons que, pour le point A, il n'y a pas eu de charriage à marée descendante. Des résultats de la mesure du courant (fig. 5.5.2.1.), il ne procède pas d'explication nette de ce phénomène. On pense qu'à marée descendante, l'eau charrie déjà une telle quantité de sable en suspension provenant

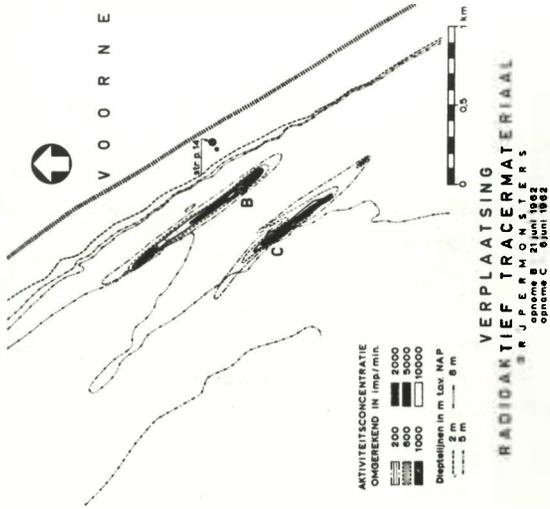


Fig. 5.5.3.3.

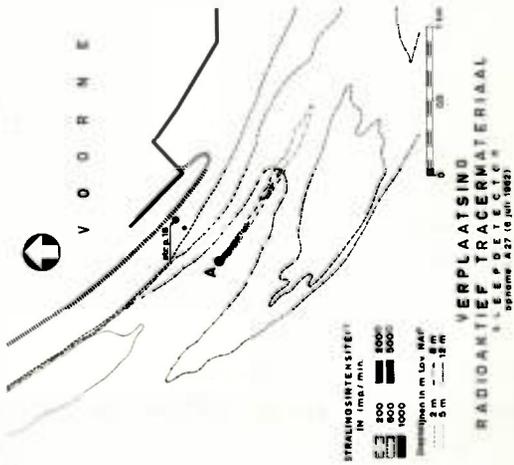


Fig. 5.5.3.2.

d'ailleurs que la capacité de déplacement est nulle à l'emplacement du point d'immersion.

Les résultats de la mesure du courant aux points d'immersion B et C (fig. 5.5.2.1.) n'indiquent pas clairement s'il existe un rapport entre les vitesses de courant notées et la direction principale du déplacement du traceur radio-actif immergé en ces points.

#### 5.5.4. Echantillons prélevés au moyen de la benne preneuse

Au cours de la mesure des déplacements de sable au traceur radio-actif, on a prélevé des échantillons dans la zone de dispersion du traceur avec la benne preneuse.

Les points d'échantillonnage avaient été fixés au préalable et déterminés sur place par mesure.

On a mesuré ensuite au laboratoire l'intensité de rayonnement des échantillons ainsi prélevés (imp./min.).

Auparavant, on avait déterminé au laboratoire la radio-activité naturelle (en imp./min.) des échantillons prélevés au voisinage des points d'immersion avant le dépôt du traceur radio-actif (voir par. 5.2.7.).

L'intensité de rayonnement naturel a été déduite de l'intensité de rayonnement mesurée au laboratoire, ce qui a donné l'augmentation de la radio-activité naturelle, en imp./min., de l'échantillon prélevé au moyen de la benne preneuse.

Cette augmentation a été déterminée également pour le jour de la mesure au laboratoire. En règle générale, cette date se situait quelques jours après le prélèvement de l'échantillon.

Afin de déterminer l'augmentation de la radio-activité naturelle en imp./min., pour le jour de l'échantillonnage, on a calculé la concentration d'activité de l'échantillon. A cet effet, on en a mesuré l'épaisseur dans le pot à confiture.

En outre, l'intensité de rayonnement de l'échantillon mesurée au laboratoire - compte tenu du facteur de demi-vie du Sc-46 (fig. 5.3.2.1.) - a été ramenée par calcul à l'intensité de rayonnement qui aurait été mesurée le jour du prélèvement.

On a déterminé en  $\mu\text{C}/\text{dm}^3$  la concentration d'activité de l'échantillon, à l'aide du nombre d'imp./min. calculé à la suite de l'augmentation de l'intensité du rayonnement naturel et à l'aide de la figure 5.2.7.3. obtenue par étalonnage.

Pour l'échantillon prélevé au moyen de la benne, on a pu calculer ensuite l'augmentation de la radio-activité naturelle en imp./min. le jour de l'échantillonnage, à l'aide de la figure 5.5.5.2. et compte tenu de l'épaisseur de la couche, déterminée suivant 5.5.5.

Après avoir effectué les opérations précitées, on a indiqué, sur un plan des lieux, les endroits où l'on avait prélevé des échantillons. A côté de ces points d'échantillonnage, on a inscrit l'intensité de rayonnement en imp./min., résultant de l'augmentation de la radio-activité naturelle. Enfin, on a tracé des lignes de même intensité de rayonnement.

De cette manière, on a tracé des courbes de dispersion du traceur radio-actif (fig. 5.5.4.1. et 5.5.4.2.).

En comparant les courbes de dispersion 5.5.3.2. et 5.5.3.3. qui reflètent la situation telle qu'elle se présentait un ou deux jours après celle que représentent les courbes 5.5.4.1. et 5.5.4.2., on constate que l'ensemble du tableau est pratiquement identique.

Les divergences sensibles sont dues aux différences des dates de mesure et du nombre de points de mesure.

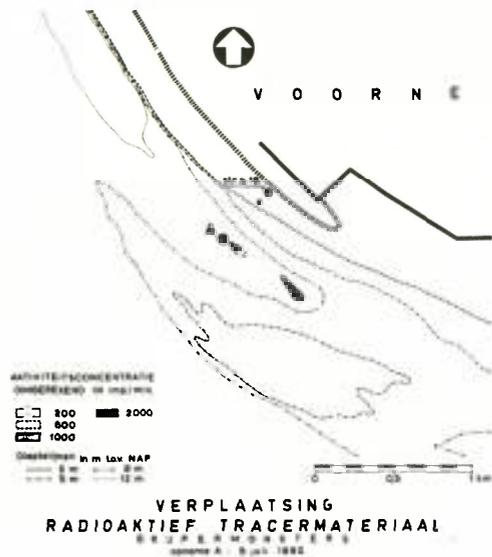


Fig. 5.5.4.1.

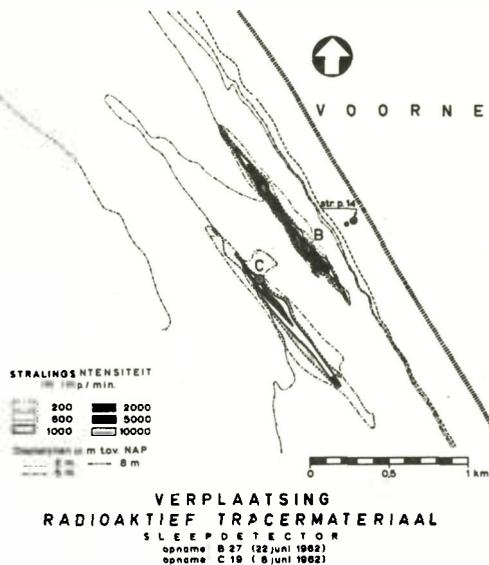


Fig. 5.5.4.2.



rayonnement mesurée est rapportée à sa longueur exprimée en mètres. La surface de section ainsi obtenue est mesurée au planimètre. L'étendue de cette surface détermine l'intensité de rayonnement qui aurait été mesurée si le traceur radio-actif présent dans la section avait été réparti sur une largeur d'un mètre, le long de l'axe de déplacement.

Pour chaque section transversale, on rapporte la surface mesurée le long de l'axe de déplacement. La surface de la figure ainsi obtenue est également mesurée au planimètre. Le résultat indique l'intensité de rayonnement du traceur radio-actif présent à l'intérieur des courbes de dispersion en admettant, pour ce traceur, une concentration sur une surface de  $1 \text{ m}^2$ .

On a déterminé ainsi le facteur I de la formule 5.2.7.

En se fondant sur les étalonnages des détecteurs (5.2.7.), on a pu fixer le coefficient d'absorption  $f_{0-x}$  pour différentes épaisseurs de couche.

En outre, on a déterminé séparément le facteur  $\alpha$  pour les deux types de détecteurs sur traîneau.

Soit  $1 \text{ m}^3$  de fond de mer sur lequel on a placé un détecteur. Celui-ci mesure une intensité de rayonnement de 1000 imp./min. Lorsque le traceur radio-actif est mélangé de manière homogène au sable jusqu'à une profondeur de 5 cm au-dessous de la surface du fond, le volume de cette couche de sable, dont la surface est de  $1 \text{ m}^2$ , est de  $0,05 \text{ m}^3$ . On peut alors déterminer la radio-activité du traceur au moyen de la formule  $A = \alpha \cdot f_{0-5} \cdot I$ . Etant donné que le volume de la couche de sable et la quantité d'activité sont connus, la concentration de l'activité peut être calculée en  $\mu\text{C}/\text{m}^3$ .

Cette opération peut être répétée pour d'autres épaisseurs de couche de sable, pour une intensité de rayonnement identique mesurée de 1000 imp./min. et pour une surface de  $1 \text{ m}^2$ .

Les résultats de ces calculs ont été exposés à la fig. 5.5.5.2. pour les deux types de détecteurs; cette figure indique le rapport

entre la concentration de l'activité et l'épaisseur de la couche de sable, pour une intensité de rayonnement de 1000 imp./min.

À l'aide des courbes ainsi calculées et tracées, on peut indiquer sur un graphique le rapport entre la concentration de l'activité et l'intensité du rayonnement en imp./min., pour chaque type de détecteur et pour différentes épaisseurs du mélange homogène de sable et de traceur radio-actif (pour le détecteur à scintillations : figure 5.5.5.3.).

La dispersion du traceur radio-actif n'a pas été mesurée uniquement à l'aide d'un détecteur. On a également prélevé des échantillons au moyen de la benne preneuse dans la zone de dispersion du traceur. Lorsque ces opérations sont simultanées, on peut déterminer de la façon suivante l'épaisseur du mélange homogène de sable et de traceur radio-actif.

En comparant les rayons de mesure choisis pour le détecteur et les points d'échantillonnage, on trouve une série de nouveaux points dont l'intensité de rayonnement en imp./min. et la concentration de l'activité en  $\mu\text{C}/\text{dm}^3$  (5.5.4.) ou en  $\mu\text{C}/\text{m}^3$  sont connues.

Pour la dispersion du traceur radio-actif mesurée au détecteur à scintillations, ces points peuvent être indiqués sur la figure 5.5.5.3. D'après leur position, on peut déterminer, d'une manière simple, à l'intérieur des courbes de dispersion, l'épaisseur moyenne du mélange homogène de sable et de traceur radio-actif.

Connaissant cette épaisseur moyenne, on peut déterminer, à l'aide de la figure 5.5.5.4., le coefficient d'absorption  $f_{0-x}$ .

Le facteur  $\alpha$  est fourni par les étalonnages des détecteurs (5.2.7.). L'importance de ce facteur est déterminée par le type de détecteur qui a servi à mesurer la dispersion du traceur radio-actif.

VERBAND TUSSEN AKTIVITEITSCONCENTRATIE IN  $\mu\text{C}/\text{m}^3$  EN STRALINGSINTENSITEIT IN  $\text{imp}/\text{min}$  BIJ VERSCHILLENDE LAAGDIKTEN BEPAALD UIT UKING VAN SLEEFDTECTOREN

Opgelet: de afleeswaarde van de stralingsintensiteit moet worden gecorrigeerd voor de absorptie van de detector

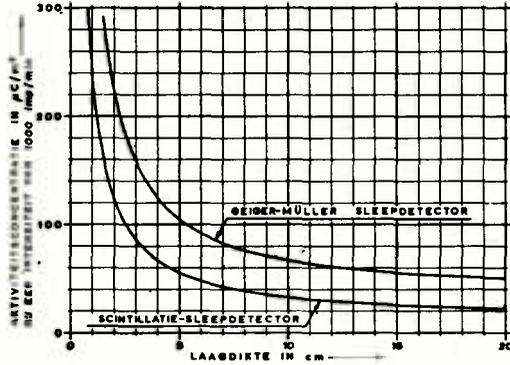


fig. 5.5.5.2.

VERBAND TUSSEN AKTIVITEITSCONCENTRATIE IN  $\mu\text{C}/\text{m}^3$  EN STRALINGSINTENSITEIT IN  $\text{imp}/\text{min}$  BIJ VERSCHILLENDE LAAGDIKTEN VAN ZIND, HOMOGEEN GEMENGD MET RADIIKTIEF TRACERMATERIAAL SCINTILLATIE - SLEEFDECTOR

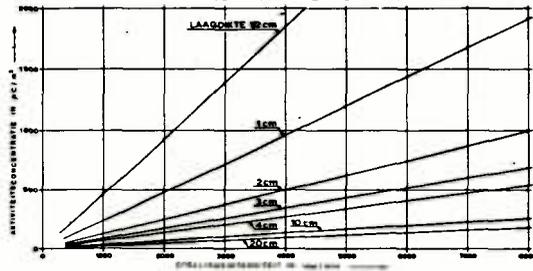


fig. 5.5.5.3.

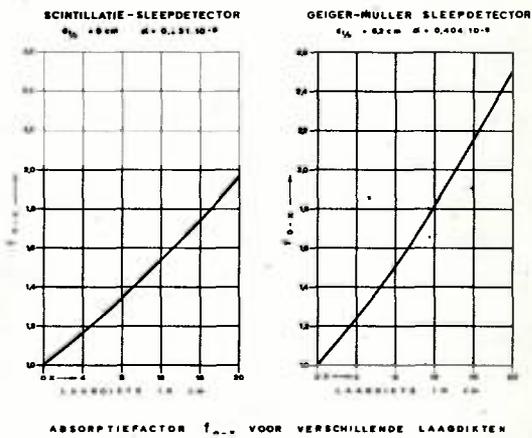


fig. 5.5.5.4.

Enfin, à l'aide de la méthode de détermination précitée des facteurs  $I$ ,  $f_{0-x}$  et  $\infty$ , on peut calculer, dans le cadre des courbes de dispersion du traceur radio-actif, l'activité (en mC) à la date de mesure.

Pour terminer, compte tenu du facteur de demi-vie du Sc-46, cette activité doit être convertie, au moyen de la figure 5.3.2.1., en activité du traceur à la date du 16 mai 1962.

Le poids de l'Ionac-C50 immergé était de 2,5 kg par lot. Le poids spécifique de ce traceur est 2,70. Le volume de la quantité immergée était donc assez considérable : 926 cm<sup>3</sup>. La radio-activité moyenne du traceur était de 270 mC par immersion (voir : 5.3.2.).

Une activité de 1 mC correspondait donc à 3,43 cm<sup>3</sup> de traceur.

Puisque l'on connaît maintenant la radio-activité en mC, la quantité de traceur qui se trouve à l'intérieur des courbes de dispersion peut être déterminée par un procédé simple.

#### 5.5.6. Détermination du débit de sable

Le sable peut être charrié de différentes manières : en roulant ou en se déplaçant par a-coups sur le fond, ou bien en flottant dans l'eau.

Le mode de charriage dépend notamment du mouvement et de la vitesse du courant.

Dans une rivière ou dans une zone à marée, la vitesse du courant va en diminuant depuis la surface de l'eau jusqu'au fond. Il n'existe pas de rapport fixe entre cette diminution et la profondeur de l'eau.

En règle générale, le mouvement et la vitesse du courant changent continuellement. S'ils peuvent rester plus ou moins constants pendant un certain temps sur le cours supérieur d'un fleuve, il n'en est plus ainsi dans la région maritime.

Suivant la direction et la vitesse du courant, le sable peut être charrié :

- a. dans une seule direction
- b. dans deux directions.

Le premier cas se présente sur le cours supérieur des fleuves, le deuxième dans la région maritime.

On peut connaître l'importance du mouvement du sable en y ajoutant un traceur qui doit avoir les mêmes propriétés de charriage que le sable.

La mesure du débit de sable dans une seule direction est relativement simple.

On peut procéder comme suit par unité de largeur du fleuve.

Soit  $Q$   $\text{dm}^3/\text{heure}$  le débit de sable.

Si l'on immerge d'une manière continue, en un certain point du cours supérieur du fleuve, une quantité de traceur de  $q$   $\text{dm}^3/\text{heure}$ , elle se mélangera au sable. Après avoir été charrié sur une certaine distance, le traceur se sera mélangé au sable de façon homogène. Si l'on mesure alors la concentration  $C$  du traceur dans le mélange à une distance suffisamment grande en aval du point d'immersion, on peut déterminer l'importance de  $Q$ .

Etant donné que  $q$  et  $C$  sont connus,  $Q$  peut être calculé à partir du rapport  $C = \frac{q}{Q}$  d'où  $Q = \frac{q}{C}$ .

Pour obtenir une valeur sûre pour  $Q$ , il faut déterminer la concentration  $C$  à plusieurs reprises en aval.

La mesure du débit de sable dans deux directions est beaucoup plus difficile.

Ce charriage dans deux directions se retrouve sur les plages de gravier anglaises, sous l'influence combinée des vagues et du courant.

Russel a établi un schéma mathématique pour le calcul du charriage du gravier dans deux directions (5.1.).

Russel s'est fondé pour cela sur l'idée suivante.

On place sur une rangée plusieurs boîtes identiques. Le contenu de chaque boîte se déverse continuellement et arbitrairement dans l'une des boîtes situées de part et d'autre de la première. Si, au début de l'opération, on dépose dans la boîte du milieu - n° 0 - une certaine quantité de traceur, cette quantité sera répartie au bout d'une période  $t$  en fractions  $p$  et  $q$  sur les boîtes latérales + 1 et - 1.

Si, au bout d'une période  $t$ , on remet la même quantité de traceur dans la boîte n° 0, le traceur continuera de se répartir entre les différentes boîtes.

Celles-ci ayant toutes le même volume, on peut dire que la quantité de traceur d'une boîte représente la concentration du traceur dans la boîte en question.

Après chaque période  $t$ , il se produit, dans chacune des boîtes, une concentration qui est indiquée sur la figure 5.5.6.1.

REPARTITION DE LA CONCENTRATION DU TRACEUR, d'après Russel

CONCENTRATIEVERDELING TRACERMATERIAAL		BUS N <sup>o</sup> .										
NA		-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
1 <sup>e</sup>	INBRENG						1					
	PERIODE					q		p				
2 <sup>e</sup>	INBRENG					q	1	p				
	PERIODE				q'	q	2pq	p	p'			
3 <sup>e</sup>	INBRENG				q'	q'	1·2pq	p	p'			
	PERIODE			q'	q'	q·3pq'	2pq	p·3p'q	p'	p'		
4 <sup>e</sup>	INBRENG			q'	q'	q·3pq'	1·2pq	p·3p'q	p'	p'		
	PERIODE		q'	q'	q·4pq'	q·3pq'	2pq·3p'q	p·4p'q	p'	p'		

Fig. 5.5.6.1.

Cette idée a été appliquée par Russel au charriage du gravier sur les plages anglaises.

Il a choisi une série de secteurs de plage contigus. Dans chaque secteur se trouve une certaine quantité de matériau, le gravier de volume  $M$ , qui est charrié dans sa totalité. Les dimensions

de chaque secteur sont choisies de manière que le volume M se répartisse sur les secteurs voisins au bout d'un temps t.

Si, au bout de chaque période t, on place une quantité de traceur m dans le secteur du milieu de manière que le traceur se mélange uniformément au gravier charrié, la concentration de traceur que l'on obtient alors est considérée comme unité de concentration du traceur entraîné dans les secteurs voisins.

La concentration du traceur, qui se sera réparti depuis le secteur médian sur les secteurs voisins pendant un certain nombre de périodes t, aura, pour chacun des secteurs de plage, la valeur indiquée à la figure 5.5.6.1.

Au bout d'un certain nombre de périodes t, la concentration - théorique - dans un secteur de plage x est de  $N_x$  suivant la figure 5.5.6.1. La quantité de traceur présente dans ce secteur est donc :  $m \cdot N_x$ . Etant donné que la quantité de gravier charrié dans ce secteur de plage est de M, la concentration du traceur est donc de :

$$\frac{m \cdot N_x}{M} .$$

Si, dans le secteur de plage x, on mesure une concentration du traceur de  $C_x$ ,  $C_x = \frac{m \cdot N_x}{M}$  .

Le débit net de gravier est pour le secteur médian :

$$Q = (p-q) \frac{M}{t} \text{ ou}$$

$$Q = \frac{p-q}{t} \cdot \frac{m \cdot N_x}{C_x}$$

On peut supposer que ce qui a été admis pour le gravier s'applique également au sable.

La détermination du débit de sable résultant du charriage dans deux directions dépend de l'importance des fractions p et q entraînées dans chacune des deux directions de charriage.

L'importance de ces fractions est inconnue; aussi, au bout de  $a$  intervalles de temps, faut-il indiquer, dans un graphique, les concentrations  $C_x$  mesurées en fonction de la distance  $x$  jusqu'au point d'immersion.

La courbe ainsi établie doit être comparée aux courbes d'une répartition théorique de la concentration d'après le figure 5.5.6.1., au bout de  $a$  intervalles de temps et pour des valeurs différentes de  $p$  et de  $q$ .

La répartition théorique de la concentration qui correspond le mieux à la répartition de la concentration mesurée, donne les valeurs de  $p$  et de  $q$ ; on peut alors calculer le débit de sable au point d'immersion.

Un exemple illustrera l'application pratique de la méthode de Russel décrite ci-dessus pour le calcul du débit de sable en cas de charriage dans deux directions.

Après 21 dépôts de traceur, on a mesuré tous les 25 m la concentration de ce traceur, de part et d'autre du point d'immersion.

On a tracé à la figure 5.5.6.2., et d'après la figure 5.5.6.1., les répartitions théoriques de la concentration au bout de 21 intervalles de temps pour une valeur de  $p = 0,5, 0,6, 0,8$  et  $1,0$ .

Dans une autre figure, on a exposé les concentrations du traceur mesurées en fonction de la distance du point d'immersion.

En comparant les représentations graphiques des répartitions mesurées et théoriques de la concentration du traceur, on a constaté que la courbe de répartition théorique de la concentration correspondait le mieux à la courbe de la répartition de la concentration mesurée, lorsque  $p = 0,6$  et  $q = 0,4$ .

L'échelle horizontale et verticale de la courbe de répartition de la concentration mesurée est adaptée de manière que les concentrations mesurées viennent coïncider le plus possible avec la courbe choisie pour la répartition théorique de la concentration.

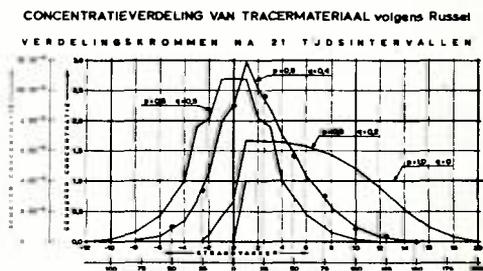


Fig. 5.5.6.2.

La figure 5.5.6.2. indique que la longueur du secteur de plage est de 10 m et que l'unité de concentration théorique  $N_x = 1$  correspond à une concentration mesurée de  $4 \cdot 10^{-4}$ .

Si l'on a déversé  $1 \text{ dm}^3$  de traceur par jour, la formule suivante s'applique au débit net de sable par jour :

$$Q = \frac{p-q}{t} \cdot \frac{m \cdot N_x}{C_x}$$

dans laquelle :  $p = 0,6$

$q = 0,4$

$t = 1$

$m = 1 \text{ dm}^3$

$\frac{N_x}{C_x} = \frac{1}{4 \cdot 10^{-4}}$

il s'ensuit que  $Q = 500 \text{ dm}^3/\text{jour}$ .

Comme nous l'avons décrit au paragraphe 5.1., la conception et l'exécution de la mesure des déplacements de sable au moyen d'un traceur radio-actif en 1962 ont été adaptées à la méthode de calcul indiquée par Russel pour le charriage de gravier dans deux directions.

On a fixé à une semaine l'intervalle de temps compris entre les dépôts de traceur aux trois points d'immersion.

Après 4 dépôts, suivis d'une interruption de 7 semaines d'immersion A, l'intervalle de temps a été fixé à deux jours.

Sur la base des résultats de mesure obtenus directement et indirectement (par calcul), on a fait différents calculs concernant le charriage du sable aux points d'immersion.

Ces calculs ont été effectués au bout de  $x$  intervalles de temps ( $x = 1, \dots, 10$ ) entre les immersions du traceur radio-actif.

On a calculé comme suit le débit de sable en un point d'immersion, en appliquant la méthode de Russel.

On est parti de la formule établie précédemment :

$$Q = \frac{p-q}{t} \cdot \frac{m \cdot N_x}{C_x}$$

L'intervalle de temps  $t$  était une semaine ou deux jours, suivant le point d'immersion auquel se rapportait le calcul.

Au bout de  $x$  intervalles de temps, on a mesuré, au moyen d'un détecteur, la dispersion du traceur radio-actif en un point d'immersion déterminé.

La quantité de traceur radio-actif présente à l'intérieur des courbes de dispersion a été déterminée de la manière indiquée au paragraphe 5.5.5.

Supposons que cette quantité ait été de  $a \text{ cm}^3$ .

D'après 5.5.5., il devrait y avoir en réalité  $x \cdot 926 \text{ cm}^3$  de traceur radio-actif.

On a constaté, en règle générale, que la quantité de traceur située à l'intérieur des courbes de dispersion représentait 20 à 90 % de la quantité totale de traceur radio-actif immergé en dernier lieu en vue de la mesure au détecteur sur traîneau.

Pour le calcul suivant la méthode de Russel, on avait supposé que seule la quantité de traceur radio-actif retrouvée avait été immergée; c'est pourquoi, pour déterminer la quantité de traceur utilisée lors de chaque immersion, on a divisé la quantité dépitée par le nombre d'immersions  $x$ .

Or avait donc déposé une quantité de traceur  $\frac{a}{x} \text{ cm}^3$  par immersion.

Il en résulte que  $m = \frac{a}{x} \text{ cm}^3$ .

D'après la méthode indiquée au paragraphe 5.5.5., on peut alors déterminer, à l'intérieur de la zone de dispersion du traceur radio-actif, l'épaisseur du mélange homogène de sable et de traceur.

Pour la mesure effectuée au détecteur à scintillations, on a indiqué à la figure 5.5.5.3. le rapport entre la concentration de l'activité en  $\mu\text{C}/\text{m}^3$  et l'intensité de rayonnement en imp./min., pour différentes épaisseurs de la couche de sable.

Une activité déposée de 1 mC correspondant à  $3,43 \text{ cm}^3$  de traceur, la concentration de l'activité indiquée à la figure 5.5.5.3. peut immédiatement être convertie en concentration du traceur rapporté à son volume.

Nous pouvons maintenant inscrire - de la manière décrite au paragraphe 5.5.5. pour la détermination du facteur I - les concentrations du traceur le long de l'axe de déplacement des courbes de dispersion du traceur radio-actif.

De cette manière, les concentrations du traceur mesurées sont notées en fonction de la distance du point d'immersion; comme il a été décrit auparavant pour la méthode de Russel, on peut alors calculer :

- a. les fractions de transport p et q
- b. le rapport  $\frac{N_x}{C_x}$ .

En effectuant les calculs suivant ce procédé pour différents intervalles de temps, on a constaté que le débit de sable en résultant avait les valeurs suivantes pour chacun des points d'immersion :

point d'immersion A : 6 - 8  $\text{m}^3/\text{marée}$

point d'immersion B : 0,2 - 0,3  $\text{m}^3/\text{marée}$

point d'immersion C : 0,4 - 1,3  $\text{m}^3/\text{marée}$ .

Pour le calcul du débit de sable en cas de charriage dans deux directions, on s'est heurté à certaines difficultés qui ont fait douter de l'exactitude des résultats.

Les difficultés essentielles provenaient de ce qui suit :

- a. Le traceur radio-actif immergé ne s'était pas mélangé immédiatement au sable du fond pendant le premier intervalle de temps.

Il est arrivé souvent qu'à la fin de cet intervalle, il restât encore une assez grande quantité de traceur au point de déversement.

Cette même particularité s'est manifestée au cours des immersions suivantes.

- b. On a retrouvé une quantité de traceur radio-actif inférieure à celle qui avait été déposée à l'intérieur d'une courbe de dispersion obtenue par mesure au détecteur sur traîneau.

Les pertes de traceur radio-actif étaient assez considérables et il est difficile de déterminer quelle fraction du traceur a disparu à la première marée montante, immédiatement après l'immersion.

On ignore, en outre, si une fraction du traceur se perd à l'extérieur de la zone de mesure au cours de l'intervalle compris entre deux immersions et, dans l'affirmative, l'importance de cette fraction.

Sur la base de ce qui précède et compte tenu de l'idée fondamentale du calcul mathématique du débit de sable dans deux directions par la méthode de Russel, on a établi un schéma mathématique légèrement modifié.

On a admis que le fond dans lequel et à la surface duquel le sable se déplaçait était également divisé en une série de secteurs. Lorsqu'on dépose le traceur dans le secteur du milieu, il se mélange au sable de façon homogène jusqu'à une certaine profondeur du secteur médian. Cette profondeur est appelée épaisseur de la couche de sable soumise au charriage. Son volume est fixé à M par secteur.

On attribue au secteur médian le numéro 0; les secteurs situés dans la direction du flux reçoivent les numéros + 1, + 2, etc., ceux dans la direction du reflux, les numéros - 1, - 2, etc.

Le traceur se déplace d'abord en direction du flux, puis en direction du reflux, etc.

Après le déversement du traceur, pendant la première marée montante, une fraction a du secteur médian est déplacée vers le secteur + 1. Dans le secteur médian - secteur 0 - il reste donc encore une fraction 1-a dont, pendant le premier reflux, une fraction b est déplacée vers le secteur - 1.

La répartition de la concentration du traceur dans les secteurs à la fin du reflux est indiquée à la figure 5.5.6.3.

### CONCENTRATIEVERDELING VAN TRACERMATERIAAL voor een tijgebied

CONCENTRATIEVERDELING TRACERMATERIAAL NA	VAK Nr.										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
INBRENG						1					
VLOED						1-a	a				
EB					b(1-a)	1-a-b+2ab	a(1-b)				
1 <sup>st</sup> GETU					q	r	p				
2 <sup>st</sup> GETU				q'	2qr	2pq+r'	2pr	p'			
3 <sup>st</sup> GETU			q'	3q'r	3pq'+3qr'	6pqr+r'	3p'q+3pr'	3p'r	p'		
4 <sup>st</sup> GETU		q'	4q'r	4pq'+6q'r'	12pq'r+4qr'	6p'q'+12pqr'+r'	12p'qr+4pr'	4p'q+6p'r'	4p'r	p'	

Fig. 5.5.6.3.

Le résultat final est qu'après une marée (fig. 5.5.6.3.), une fraction p du traceur a été déplacée dans la direction du flux et une fraction q dans la direction du reflux.

Dans le secteur médian où le traceur a été déversé, il est resté en définitive une fraction r.

On a calculé les fractions p et q pour les différentes valeurs de a et de b. Les résultats sont mentionnés à la figure 5.5.6.4.

D'après cette figure, on constate que :

- On ne peut choisir une valeur quelconque de q pour une certaine valeur de p, même si  $p+q < 1$ .
- Lorsque les fractions p et q sont établies grâce à la mesure de la dispersion du traceur, il n'en résulte pas nécessairement que les fractions a et b soient connues.

CONCENTRATIEVERDELING VAN TRACERMATERIAAL voor een tiggelied  
 BEREKENING VAN DE ONDERLINGE AFHANKELIJKHEID TUSSEN DE  
 GROOTHEDEN  $\rho$  en  $q$  BIJ VERSCHILLENDE WAARDEN VAN  $a$  en  $b$

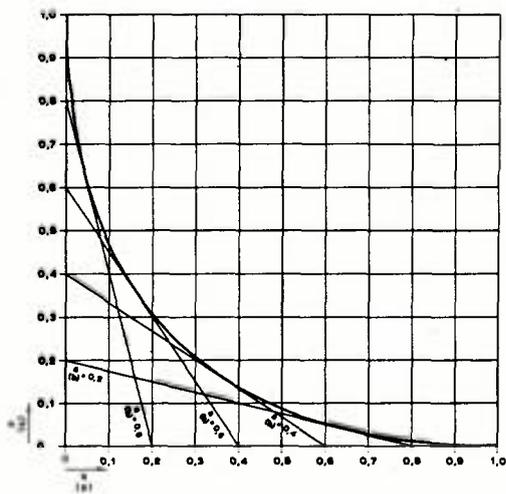


Fig. 5.5.6.4.

Chaque combinaison de p et de q peut en effet être provoquée par deux combinaisons de a et de b.

Toutefois, pour chaque combinaison de p et q,  $p-q = a-b$ .

Lorsque p et q sont connus, le déplacement de sable en résultant l'est aussi après la première marée.

Le transport à marée descendante ou à marée montante ne peut donc être déterminé séparément que si l'on détermine les fractions a et b en se fondant sur une mesure effectuée à la fin de la marée montante et à la fin de la marée descendante, immédiatement après l'immersion du traceur.

Par analogie avec la méthode de Russel, on peut déterminer alors, pour une seule immersion d'une unité de traceur, la répartition de la concentration du traceur sur une série de secteurs après chaque marée suivant la première (fig. 5.5.6.3.).

Le déplacement de sable en résultant pour le secteur médian est, par marée :

$$Q = (p-q) \cdot \frac{m \cdot N_x}{C_x}$$

où

p = la fraction de traceur déplacée dans la direction du flux, après une marée complète

q = la fraction de traceur déplacée en direction du reflux, après une marée complète,

m = la quantité de traceur immergée en une seule fois,

$N_x$  = la concentration théorique du traceur à une distance x du point d'immersion,

$C_x$  = la concentration du traceur mesurée à une distance x du point d'immersion.

Le mode de calcul du débit de sable est identique à celui qui a été décrit auparavant pour la méthode de Russel.

On a constaté, à partir de quelques calculs effectués de cette manière pour différents nombres de marées, que le débit de sable était :

au point d'immersion A :  $6 - 8 \text{ m}^3/\text{marée}$

au point d'immersion B :  $0,4 \text{ m}^3/\text{marée}$ .

En ce qui concerne le point d'immersion C, la mesure ne se prêtait pas à l'application de ce mode de calcul.

Traitement et utilisation de substances marquées

M. PETERSEN

Landesamt für Wasserwirtschaft  
Schleswig-Holstein, Kiel

Pour mesurer la migration du sable sur les côtes à brisants du Schleswig-Holstein, on a marqué 100 kg de sable marin à l'aide du scandium-46 (2-3 curies), à Francfort-sur-le-Main. Le sable marqué est versé dans une cuve fabriquée spécialement pour contenir 100 kg. Cette cuve se trouve dans un récipient de protection. Le transport s'effectue par route et voie ferrée jusqu'au lieu d'utilisation. Là, la cuve est accrochée à une traverse spéciale qui est placée sous un hélicoptère. Ce dernier enlève la cuve de sable du récipient de protection et la transporte jusqu'au lieu voulu, un récif situé à une distance de 150 à 500 mètres. Le sable marqué est déposé au niveau de l'eau.

Cette opération exige une cuve à sable, un récipient de protection et une traverse construits selon des normes spéciales. Il faut notamment respecter les prescriptions relatives à la protection radiologique et prendre les dispositions de sécurité voulues excluant toute ouverture non autorisée ou inattendue.

La cuve à sable (Fig. 1), d'un diamètre de 450 mm et d'une hauteur de 730 mm, est en tôle d'acier de qualité supérieure de 5 mm d'épaisseur. Le couvercle de la cuve a été renforcé par des nervures; il possède une garniture spéciale et une fermeture (Fig. 2) qui exclut toute ouverture imprévue. Deux câbles porteurs se trouvent au tiers supérieur de la cuve, afin d'empêcher celle-ci de basculer lorsqu'on la retire du récipient de protection (Fig. 3) ou au cours du vol (Fig. 4). Le couvercle ne peut s'ouvrir que si l'on tire fortement sur le câble basculant, par exemple lorsque l'hélicoptère prend son vol.

Le récipient de protection (Fig. 5) et son couvercle ont été pourvus de deux gaines, interne et externe, reliées entre elles par des ner-

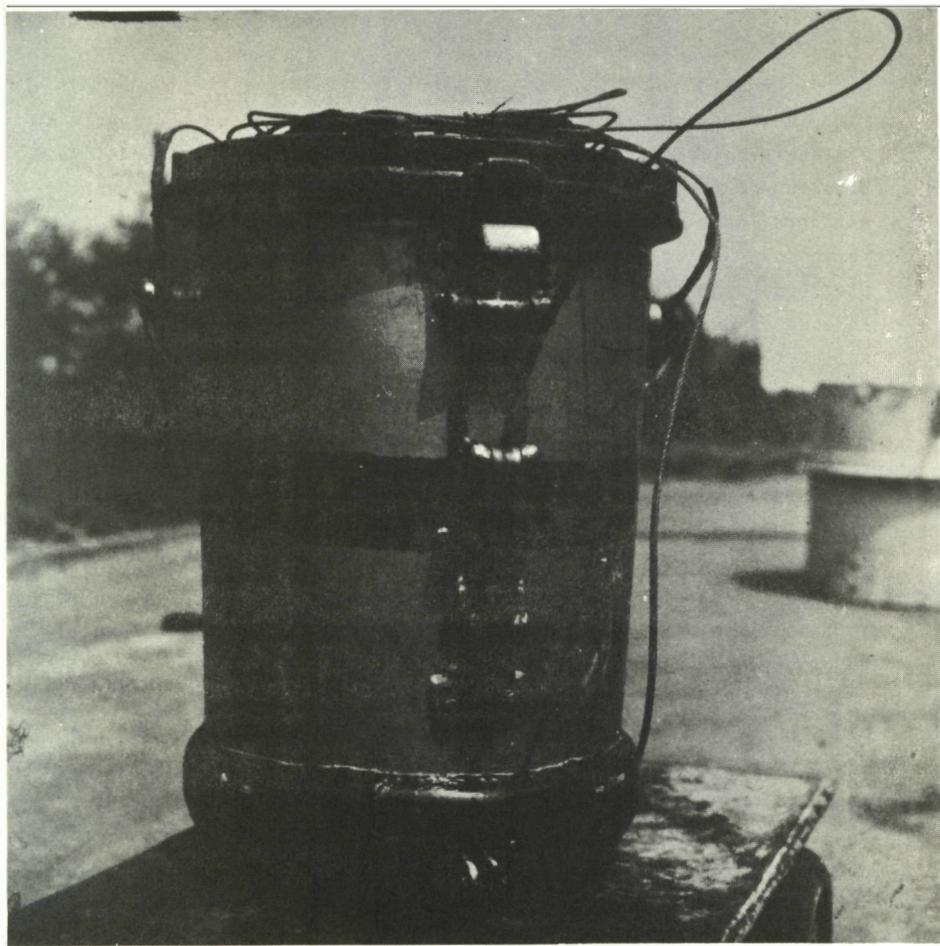


Figure 3 - La cuve contenant 100 kg de sable radio-actif est retiré, par hélicoptère, de son récipient de protection

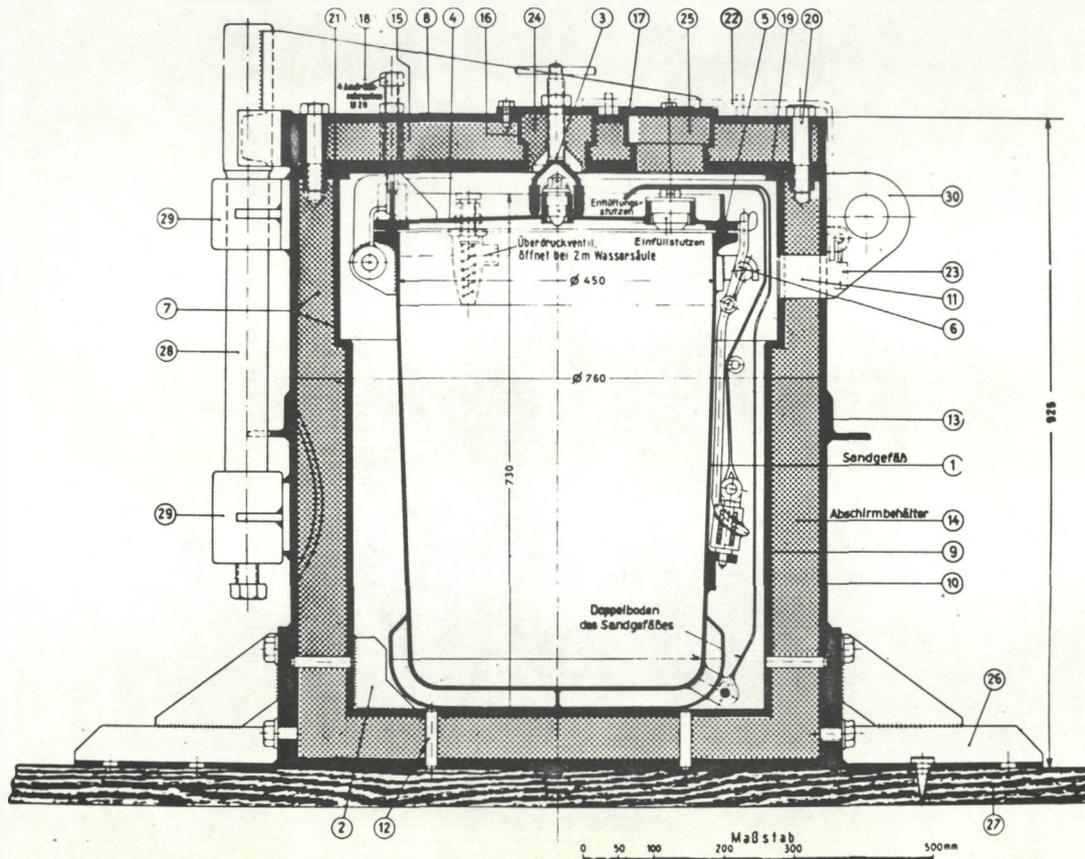


Figure 2 - Récipient de protection, avec la cuve à sable à l'intérieur, servant au transport du sable radio-actif.

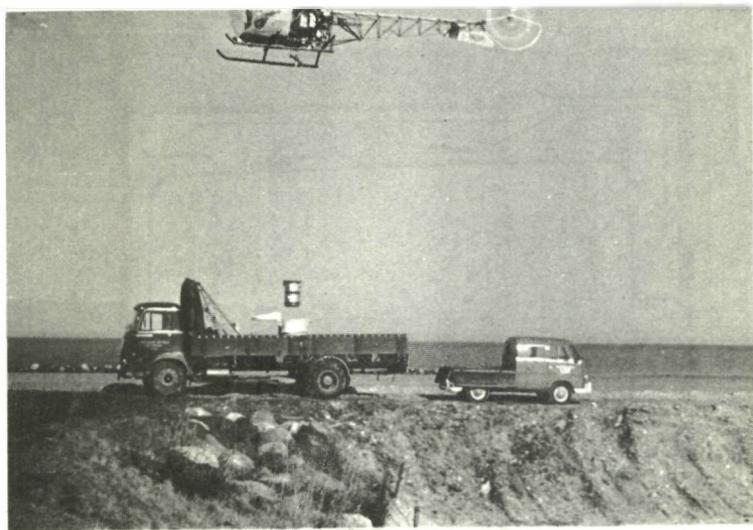


Figure 1 - La cuve à sable avec fermeture et couvercle de sécurité.



Figure 4 - Hélicoptère avec traverse et cables porteurs.

vures et des boulons d'écartement. Les espaces creux de la gaine du récipient et de son couvercle sont remplis de plomb antimonié. Le diamètre externe atteint 760 mm et la hauteur est de 925 mm. La garniture du couvercle du récipient permet une fermeture hermétique. Le système de verrouillage et la fermeture de sécurité empêchent toute ouverture soudaine. L'axe vertical et son palier tenant au récipient permettent de soulever et de faire pivoter facilement le couvercle au moment de l'ouvrir.

La traverse (Fig. 4) doit être conforme aux prescriptions de sécurité contre le vol. Celles-ci exigent qu'une charge attachée à un hélicoptère soit fixée à un câble pouvant être coupé. La traverse mesure 1 m de long et pèse 10 kg avec les deux câbles porteurs et le câble basculant. Les câbles porteurs sont accrochés dans les deux dispositifs de déclenchement aux extrémités de la traverse. La fermeture a été empruntée aux appareils de vol à voile. Le câble basculant reste solidement fixé à la traverse (milieu) au cours du vol. Il demeure lâche aussi longtemps que les câbles porteurs travaillent. En tirant sur une corde en perlon, le pilote peut ouvrir les dispositifs de déclenchement, de sorte que les câbles porteurs tombent et que toute la charge de la cuve est accrochée au câble basculant et au dispositif de fermeture : ainsi est provoquée l'ouverture de la cuve, laquelle va se vider de son contenu, le sable marqué.

Après que le sable marqué aura été déposé sur le récif, la cuve attachée au câble basculant à couvercle ouvert sera plongée dans l'eau, à plusieurs reprises, pour évacuer les grains de sable actifs qui seraient encore fixés à la cuve.

Une fois à terre, le récipient doit être soumis à un contrôle permettant de détecter d'éventuels rayonnements subsistants (Fig. 6).

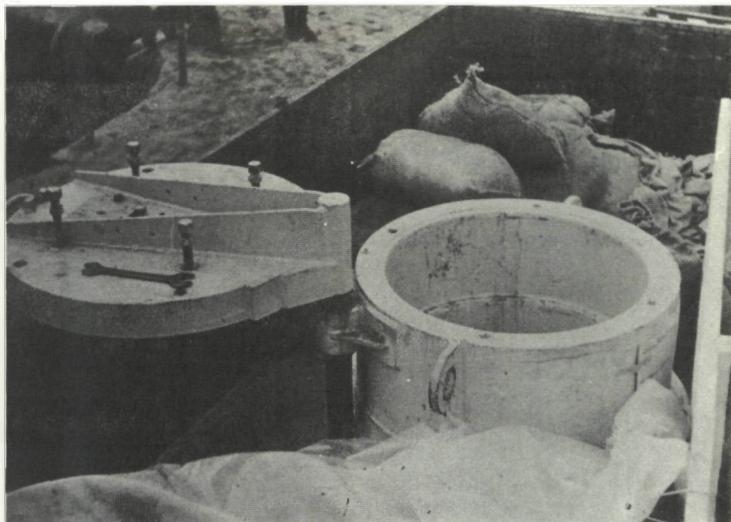


Figure 5 - Le récipient de protection ouvert



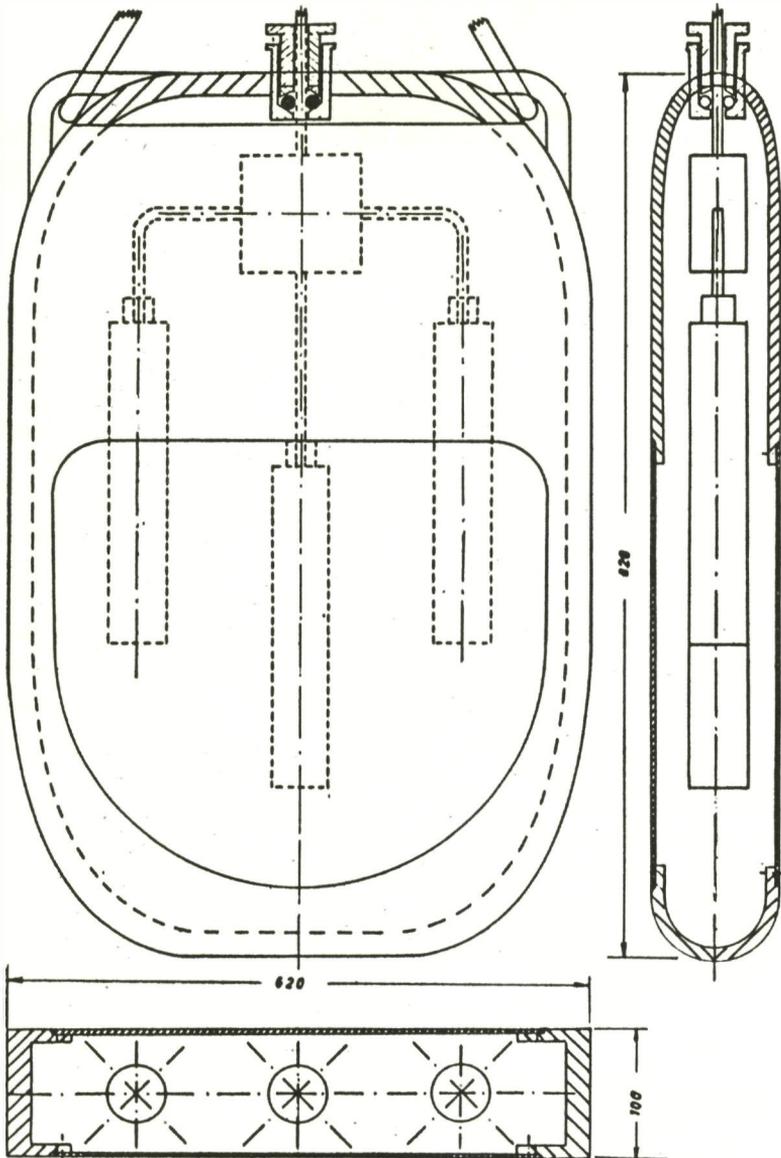
Figure 6 - La cuve vidée est soumise à un contrôle permettant de détecter les éventuels rayonnements subsistants

Technique de mesure des mouvements de sable dans  
les eaux côtières allemandes

G. MEYN

Bundesanstalt für Wasserbau  
Aussenstelle Küste

Dans son exposé intitulé "Techniques de mesure radio-isotopique du cheminement des sables dans l'Innenjade et l'Aussenjade", M. Fahse (Wasser- und Schifffahrtsamt, Wilhelmshaven) a traité de la technique de mesure des mouvements des sables appliquée dans l'embouchure de la Jade. Les mêmes instruments ont été utilisés dans d'autres eaux côtières allemandes lors des études effectuées par le Bundesanstalt für Wasserbau (1), (2), et (3). Pour accroître la sensibilité, on a construit un nouveau chariot de mesure comprenant trois sondes logées dans un caisson d'air (Fig. 1). Le caisson d'air a été prévu de manière à éviter que ne se produise autour de la sonde immergée un affaiblissement du rayonnement dû à l'absorption par l'eau. Ce système assure, en outre, la protection des sondes qui risqueraient sinon, en cas d'une étanchéité défectueuse, de devenir inutilisables à la suite d'une infiltration de l'eau. Le chariot a été traîné sur le sol à une vitesse d'environ 1 à 2 m/s. au moyen d'un câble de 35 m de long auquel a été fixé le fil d'alimentation électrique des compteurs à scintillation et de transmission des impulsions. La position du chariot a été déterminée à des intervalles de 2 à 5 minutes au moyen d'une double mesure angulaire. On a tenu compte de la distance entre les sondes et le point où la position a été déterminée. Les fluctuations de la distance ne sont pas supérieures aux erreurs commises dans la détermination de la position. Cette méthode a donné de bons résultats jusqu'à des profondeurs de 6 à 8 m. Pour pouvoir effectuer des mesures à de plus grandes profondeurs, et pour pouvoir augmenter la vitesse de traction, on travaille à la mise au point d'un appareil qui s'oppose à la poussée du chariot de mesure (3).



**Figure 1** - Chariot de mesure avec trois compteurs à scintillation

Les taux de comptage ont été fournis par un intégrateur (rate-meter) monté sur le chariot, et notés au fur et à mesure. On met actuellement au point un système d'enregistrement automatique à échelle logarithmique. Dans certains cas, une reproduction numérique des résultats peut être plus avantageuse.

Pour tous les résultats, il y a lieu de tenir compte du bruit de fond et de le déduire. Ce bruit de fond est variable et dépend de la composition du sol dans l'aire étudiée. Il convient donc, avant les essais, de l'évaluer soigneusement. Néanmoins, ce n'est qu'au moment où l'activité atteint le double du bruit de fond que la présence d'une radio-activité artificielle peut être affirmée avec la certitude requise. En cas de grandes étendues de sable pur, les conditions sont un peu plus favorables étant donné que le bruit de fond est alors faible (25 cps) et relativement constant. Par contre, les conditions sont moins favorables dans des régions où prédomine la vase, là le bruit de fond peut atteindre 100 cps. La sensibilité et la clarté des mesures sont considérablement accrues par l'analyse, dans un laboratoire fixe, des échantillons de sol prélevés. De plus, on peut alors relever le spectre  $\gamma$ , pour déceler les activités étrangères.

Lorsque des recherches sont menées dans une zone de faible étendue, la détermination de la position au moyen d'une double mesure angulaire est trop imprécise. Aussi, lors des mesures effectuées dans le canal mer du Nord-mer Baltique, on a pratiqué des coupes transversales à l'aide de jalons repérés depuis la terre. Le deuxième lieu géométrique a été obtenu en mesurant la distance au moyen d'un télémètre optique. Au lieu du lourd chariot de mesure, on a utilisé de petits paniers de protection pour les sondes de mesure.

A l'analyse des résultats des mesures, les taux de comptage, déduction faite du bruit de fond, ont été corrigés proportionnellement à la désintégration subie depuis le jour du prélèvement. En reliant les points de même activité, on obtient des isolignes qui donnent une image de la propagation du sable. Parallèlement aux mesures directes des mouvements du sable, on a mesuré la direction et l'intensité du courant en tenant compte des caractéristiques des vagues et du vent au moment des recherches.

Bibliographie

1. Schulz, H. et Ströhl, G.

Untersuchung der Sandwanderung im Bereich der deutschen Küste mit radioaktiven Leitstoffen  
Deutsche Gewässerkundl. Mitteilung., Jg. 4, 1960, H. 1

2. Schulz, H. et Meyn, G.

Sandwanderungsuntersuchungen mit radioaktiven Isotopen im deutschen Küstengebiet der Nord- und Ostsee in den Jahren 1961/62  
Deutsche Gewässerkundl. Mitteilung., Jg. 7, 1963, H. 2

3. Fahse, M.

Techniques de mesure radio-isotopique du cheminement des sables dans l'Innenjade et l'Aussenjade  
Rapport 3 de la présente réunion de travail organisée par le Bureau Eurisotop

Développement d'une installation électronique de  
mesure pour hélicoptère

W. PETERSEN  
Oberbaurat  
Staatliche Ingenieurschule, Kiel

Comme il a été dit par ailleurs, nous sommes chargés, dans le Schleswig-Holstein, d'élaborer une méthode de mesure nucléaire pour la détermination sur place de la cinétique de l'érosion et du transport des sables dans la zone de ressac. Nous avons effectué nos essais dans la mer Baltique le long de la plage de Schöneberg, près de Kiel, dans l'île de Sylt à la hauteur de Westerland et, à présent, à la hauteur de Kampen.

Nous avons, nous aussi, employé le scandium-46 comme indicateur. Il répond bien à l'objectif que nous poursuivons, car il possède une période de 84 jours parfaitement adaptée à des mesures effectuées à proximité de stations balnéaires connues.

L'obligation dans laquelle nous étions de travailler dans la zone de ressac a déterminé, pour une large mesure, la procédure suivie et le choix du dispositif électronique de mesures. En effet, nous avons dû utiliser un hélicoptère du type "Bell G 2", vu l'impossibilité, en l'occurrence, de faire remorquer le détecteur par un navire.

Nous avons été ainsi amenés à concevoir un dispositif de mesure susceptible d'être monté dans un hélicoptère et comportant une sonde (détecteur) transportable également par hélicoptère et pouvant fonctionner parfaitement au fond de la mer.

Dès le départ, nous avons eu une idée précise de l'aspect de notre appareillage et nous nous sommes rendu compte de l'importance primordiale du poids.

1. Notre sonde (détecteur) est constituée par un compteur à scintillations pourvu d'une tête de mesure gamma, c'est-à-dire d'un cristal d'iodure de sodium activé au thallium.
2. A cette sonde est raccordé l'étage collecteur faisant office de transformateur d'impédance (cathodyne).
3. Le tout est complété par une source de haute tension pour le multiplicateur, c'est-à-dire pour le multiplicateur d'électrons secondaire du compteur à scintillations et pour la tension de l'étage collecteur. Cette source donne naissance à une tension de 1200 V et se compose de 40 cellules microdynes 30 V.

Ces trois éléments sont montés dans la sonde de manière à assurer un maximum d'étanchéité. Bien que cette sonde ressemble beaucoup à l'appareil employé par les Français pour les mesures qu'ils ont effectuées au Cambodge, elle n'en constitue pas moins un développement original.

4. La sonde est reliée aux appareils de mesure, logés dans l'hélicoptère, au moyen d'un câble coaxial d'une longueur de 15 m et d'une résistance de 60 ohms. Conformément aux prescriptions, le câble est monté de manière à pouvoir, en cas de danger, être immédiatement détaché et jeté à la mer. Il est lui-même soutenu par un solide câble en nylon de 12 mm de diamètre. Pour alléger l'installation, nous avons réduit jusqu'à la limite admissible le blindage en plomb du compteur à scintillations et la structure en acier de la sonde.

Dans l'hélicoptère même sont logés :

5. Un préamplificateur
6. Le discriminateur
7. Le compteur
8. Le bloc d'alimentation
9. Un onduleur pour transformation du courant de bord de 24 V continu en 220 V alternatif.

Le pouvoir de résolution par unité de temps est de  $3.10^{-6}$  sec. et la puissance absorbée de 65 watts. C'est surtout le poids des appareils qui nous a causé les plus grandes difficultés. Nous nous sommes servis, pour les premières mesures à terre, d'appareils à lampes (Frieseke & Hoepfner) - faute de mieux à cette époque, 1961 - pesant au total 230 kg.

Contrairement aux prévisions initiales, il s'est avéré, lors des essais entrepris pour contrôler la charge admissible de l'hélicoptère, que le poids total de l'appareillage dépassait la limite de sécurité.

Nous avons été obligés de ce fait de chercher des appareils plus légers. Par un heureux hasard, les Etats-Unis venaient de lancer sur le marché les premiers appareils à transistors de ce type, fabriqués par le "Radiation Instrument Development Laboratory, Melrose Park, Ill.". Après y avoir apporté les modifications nécessaires, nous avons incorporé cet appareil à notre propre dispositif.

Le poids global de l'appareillage, sonde comprise, s'est ainsi trouvé ramené à 76,1 kg.

Au début des opérations de mesures, il nous a fallu éclaircir plusieurs points :

1. A une profondeur moyenne de 4 m, l'étanchéité et la sécurité de la sonde sont-elles assurées même dans des conditions météorologiques défavorables ou par mer agitée ?
2. Pour des mesures de ce genre, peut-on travailler par intégration ou est-il nécessaire de recourir à un discriminateur monocanal ?
3. Quelle largeur faut-il donner à la fenêtre si l'on veut assurer la meilleure stabilité possible ?
4. Quels sont les niveaux respectifs du bruit de fond de la sonde à une profondeur moyenne de 4 m et à la surface ?
5. Quelle est l'allure du spectre du bruit de fond à 4 m de profondeur ?

Ces différentes questions ont reçu les réponses suivantes :

- ad 1. Pendant plus de douze heures, la sonde a été immergée par 4 m de fond dans le port de Kiel et contrôlée au moyen d'un enregistreur. La bande de contrôle a révélé que la sonde fonctionnait parfaitement, quelle que fût la profondeur.
- ad 2. Le tracé du spectre obtenu pour le bruit de fond et les mesures par intégration ont montré la nécessité d'employer un discriminateur monocanal.
- ad 3. La position de la raie correspondant à 0,64 MeV a été contrôlée pendant plus de huit heures au moyen d'un étalon de césium-137 par réglage du seuil du discriminateur sur 0,64 MeV. La déviation enregistrée a été de l'ordre de 0,5 V. Pour les mesures à effectuer avec du scandium-46 on a estimé que la fenêtre devait avoir une largeur de 25 V (plus une marge de sécurité de 7 V).
- ad 4. Si l'on adopte une fenêtre d'une largeur de 25 V, le bruit de fond de la sonde immergée produit quelque 400 impulsions/minute, tandis qu'au-dessus de la surface de l'eau on enregistre 900 impulsions/minute. Les mesures du bruit de fond et l'étalonnage ont eu lieu moteur en marche. On n'a pas relevé d'effets parasites provenant de l'allumage.
- ad 5. Une sonde reposant à 4 m de profondeur sur le fond de la mer et travaillant uniquement par intégration a un mouvement propre d'environ 5000 impulsions/minute. Le spectre enregistré pour le bruit de fond a présenté, sous une tension de 200 KeV, un maximum de 5000 impulsions/minute en mesure par intégration.

Mentionnons encore quelques chiffres intéressants tirés de la comparaison entre le poids des appareils à lampes et celui des appareils à transistors. Le discriminateur monocanal F.H. (Frieseke & Hoepfner) à lampes pèse 37,5 kg alors que le modèle transistorisé ne pèse que 1,6 kg. Le compteur F.H. 90 pèse 35,4 kg, contre 10 kg pour le modèle transistorisé.

Nous concluons en disant que l'installation fonctionne parfaitement et que, hormis certaines améliorations possibles, il n'entre pas dans nos intentions d'en modifier le principe.

Procédé de mesure "in situ" de sédiments traceurs  
radio-actifs

J. GUIZERIX et G. GRANDCLEMENT

Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble  
Section d'Application des Radio-éléments

Une analogie avec la méthode que l'on utiliserait pour la détermination du transport de dunes de sable sous l'effet des forces éoliennes nous a conduit à imaginer la technique que nous décrivons ci-dessous.

Cette détermination pose un problème de mesure de concentration de l'élément marqueur en divers points, et donc un problème de topographie. Ces problèmes sont assez facilement résolus dans le cas de dunes de sable non immergées.

Dans le cas de sédiments immergés, de grandes difficultés sont soulevées du fait de l'enfouissement des grains actifs dans la technique utilisée jusqu'ici qui consiste à traîner, depuis une embarcation, une sonde reposant sur le fond.

Il apparaît que pour l'étude d'un certain nombre de phénomènes concernant la sédimentologie, et en particulier pour la mesure de débits massiques, on aurait intérêt à faire appel à des équipes de plongeurs spécialisés. Ces plongeurs peuvent en effet évoluer avec facilité jusqu'à des profondeurs de 30 mètres, valeur bien inférieure à celles qui intéressent nos mesures.

On considère les plongeurs ou scaphandriers comme des personnes rompues le plus souvent à de "gros" travaux de génie maritime : mais il existe des équipes de plongeurs "scientifiques". Ces équipes sont, par exemple, aptes à effectuer une topographie sous-marine, à mettre en oeuvre des carroliers, des appareils de prise de vues ou de télévision sous-marine, possèdent des "scooters" sous-marins, etc.

De telles équipes pourraient donc, en dehors des zones de déferlement, de forts courants ou de très mauvaise visibilité, apporter une contribution efficace aux problèmes de topographie et de mesures de concentration.

Pour ces mesures de concentration, un carottage intéressant les premiers décimètres de sédiment pourrait être fait. On peut aussi penser à l'utilisation de sondes à scintillations collimatées convenablement pour n'intéresser qu'une mince couche horizontale de sédiment à la mesure. Ces sondes permettraient de mesurer un gradient de concentration.

La présence d'opérateurs "in situ" permet d'imaginer différentes techniques de mise en oeuvre de telles sondes. Un tube pourrait par exemple être au préalable mis en place puis vidé par succion afin de recevoir la sonde.

On peut également concevoir que dans le cas de mesures basées sur l'emploi d'un nombre limité de grains radio-actifs, la détermination de l'enfouissement d'un grain détecté soit grandement facilitée si l'opérateur se trouve sur place.

Possibilité d'emploi d'un nombre limité de grains radio-actifs  
dans les études quantitatives de mouvements de sédiments

G. COURTOIS

Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay  
Section d'Application des Radio-éléments

Dans l'emploi de traceurs radioactifs pour l'étude des mouvements de sédiments, la tendance actuelle est d'augmenter le nombre de grains actifs pour diminuer la fluctuation statistique du nombre de grains présents sous le détecteur au moment de la mesure. Cette tendance présente certes des avantages, dont celui qui vient d'être exposé, mais comporte aussi des inconvénients :

I - CONGRES ISOACTIVES ET CENTRE DE GRAVITE - ERREURS ET INCERTITUDES

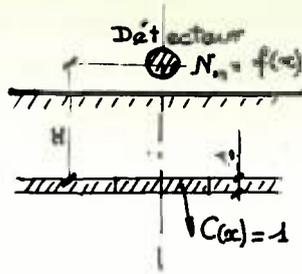
L'ensemble des mesures réalisées sur le terrain aboutit, le plus fréquemment, au tracé de courbes isoactives et à l'obtention du centre de gravité du nuage radioactif ainsi délimité d'où découle la vitesse moyenne  $V_m$  du sédiment. Mais, même en supposant nulles les fluctuations statistiques précédentes, la détermination de ce centre de gravité est généralement faussé par les deux raisons suivantes :

- 1.1. Chaque couche de traceur n'a pas le même poids pour le détecteur  
(Fig. 1a et 1b).

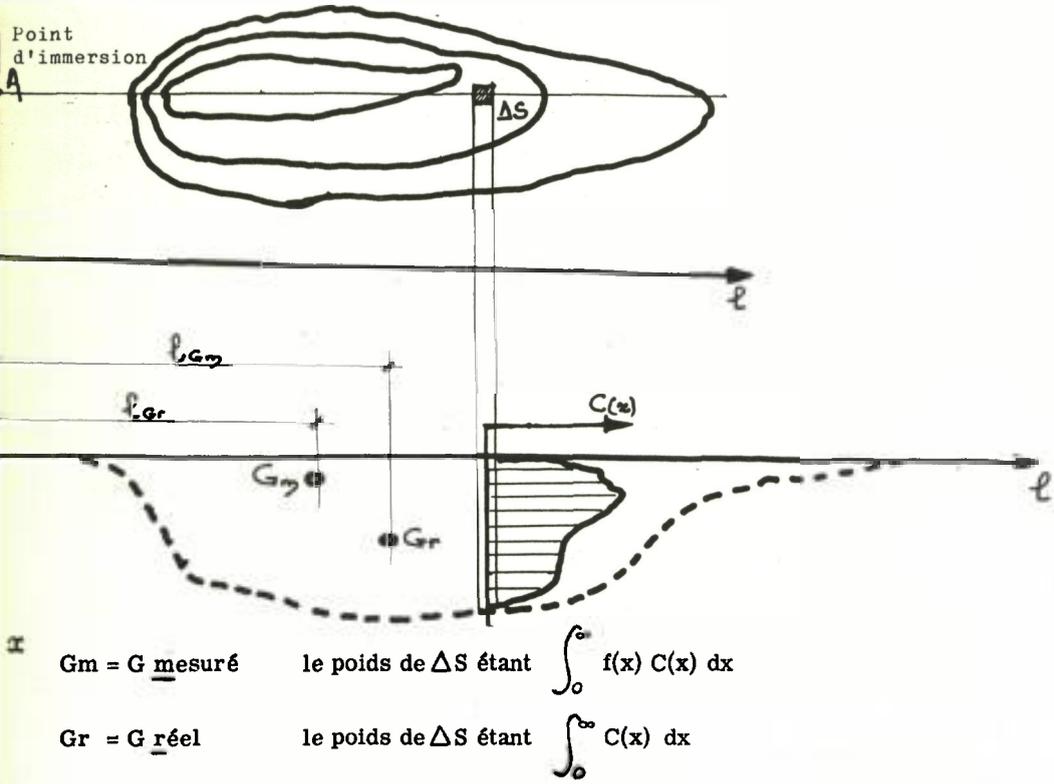
Soit  $f(x)$  le nombre de coups nets par seconde donné par une sonde détectrice, traînée sur le sédiment, lors de la détection d'une couche infinie d'épaisseur-unité et d'activité-unité par unité de surface (Fig. 1a) ;  $f(x)$  varie généralement très vite en fonction de  $x$ , du fait de la géométrie différente d'une couche à l'autre, de l'absorption, croissante avec  $x$ , des matériaux situés entre couches et sonde, enfin, de la variation du spectre énergétique reçu par le détecteur, spectre qui, lorsque  $x$  augmente, se déplace vers les basses énergies à cause du rayonnement diffusé.

Pour une couche d'épaisseur  $dx$ , située à  $x$  du compteur de concentration en traceur  $C(x)$ , le nombre élémentaire de coups mesurés est  $dN_m$  :

$$dN_m = C(x) f(x) dx$$



**Fig. 1a** - Nombre de chocs/s à la détection d'une couche infinie d'épaisseur-unité et d'activité-unité par unité de surface.



**Fig. 1b** - Les centres de gravité  $G_m$  et  $G_r$  respectivement associés aux taux de comptage  $N_m$  et  $N_r$  peuvent être fort éloignés l'un de l'autre.

**Figure 1** - Effet d'enfouissement.

et le nombre de chocs totaux, pour toutes les couches :

$$N_m = \int_0^{\infty} C(x) f(x) dx \quad (m \text{ signifie mesuré})$$

C'est à partir de cette information qu'est calculée l'abscisse du centre de gravité mesuré  $l_{cm}$ . Or l'abscisse du centre de gravité réel  $l_{cr}$  se calcule en attribuant à chaque élément de du nuage radioactif d'abscisse  $l$ , un poids  $N_l$  égal (ou proportionnel) à l'activité réellement présente sous le détecteur :

$$N_r = \int_0^{\infty} C(x) dx \quad (r \text{ signifie réel})$$

Généralement les sondes détectrices décrites dans la littérature favorisent l'enregistrement de la couche superficielle de tracer aux dépens des couches plus profondes.

Par suite,  $N_m$  et  $N_r$  diffèrent en général notablement

Ainsi, pour un ensemble de détection à scintillation récemment utilisé pour une telle application, une couche superficielle de  $1 \mu\text{Ci/m}^2$  d' $^{192}\text{Ir}$  donnait 59 chocs par seconde nets par compteur ; la même couche enfouie sous 10 cm de sable ne donnait que 20 chocs par seconde.

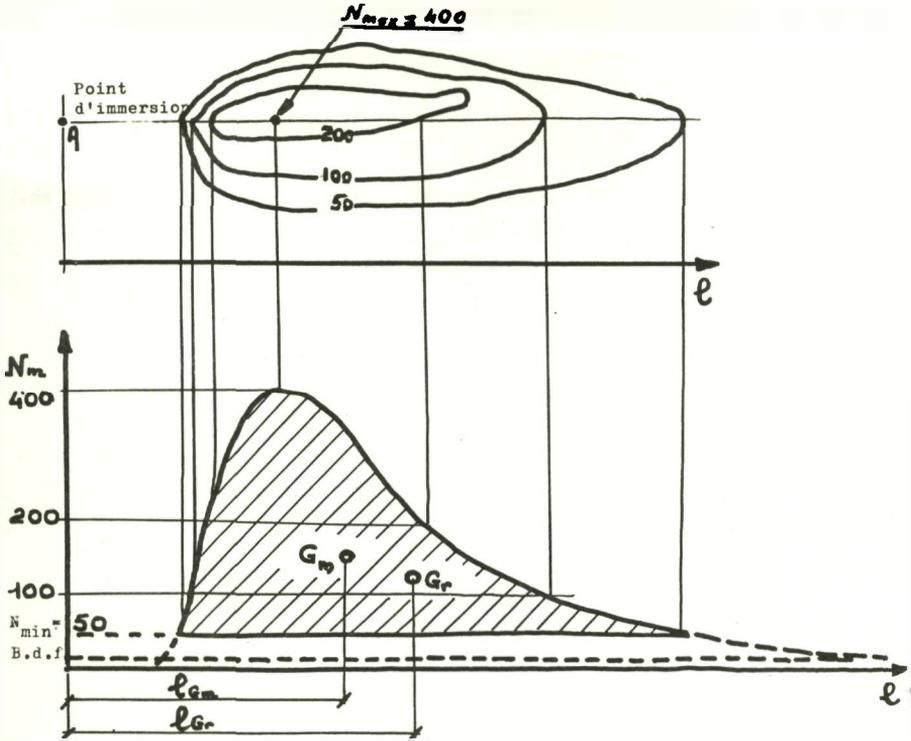
Il s'ensuit que les centres de gravité  $G_m$  et  $G_r$  associés respectivement aux taux de comptage  $N_m$  et  $N_r$  peuvent être fort éloignés l'un de l'autre (Fig. 1b).

1.2. L'importance du bruit de fond nécessite le choix d'un seuil  $N_{min}$  en dessous duquel les lectures ne sont pas considérées comme significatives

Or, l'expérience montre que les courbes de l'activité enregistrée en fonction de la distance  $l$  au point d'immersion, sont rarement symétriques.

En négligeant l'activité située en dessous du seuil  $N_{min}$ , le centre de gravité  $G_m$  mesuré peut être fort différent du centre de gravité  $G_r$  réel (Figure 2a).

Ce phénomène connu sous le nom "d'effet de queue", se rencontre fréquemment dans l'emploi de radioléments et notamment dans les mesures de débit par la méthode d'intégration : dans le cas précis, ici évoqué, il



$G_m$  = mesuré (Aire hachurée)  
 $G_r$  = réel (Aire au-dessus du B.d.f.)

Fig. 2a - La différence entre le centre de gravité  $G_m$  mesuré et le centre de gravité  $G_r$  réel peut être considérable si l'activité située en dessous du seuil  $N_{min}$  est négligé.

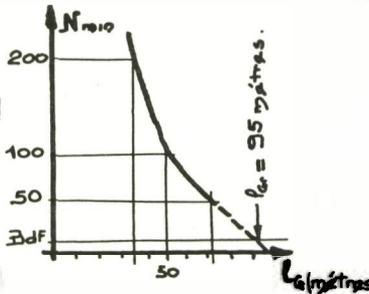


Fig. 2b - Importance du choix et influence du seuil  $N_{min}$ .

traduit l'impossibilité de recueillir des renseignements complets sur la forme et l'étendue du nuage.

Ainsi, sur un ensemble de courbes isoactives obtenues dans une récente expérience, on a constaté que la distance  $l_{Gm}$  du centre de gravité au point d'immersion était de :

35 m	calculé	sur	la	courbe	isoactive	200	cps
50 m	"	"	"	"	"	100	cps
70 m	"	"	"	"	"	50	cps

En extrapolant  $l_G = f(N_m)$  jusqu'à la valeur du bruit de fond 10 cps,  $l_{Gr}$  serait égal à 95 m (Fig. 2b). On se rend compte ainsi de l'importance du choix de  $N_{min}$  et de son influence.

Mais une telle extrapolation est délicate et le chiffre avancé avec l'emploi d'une telle méthode, doit toujours l'être avec beaucoup de précautions.

## II - MESURES QUANTITATIVES

Le besoin d'obtenir des résultats quantitatifs, concernant le débit massique charrié, se fait de plus en plus sentir, surtout en rivière. Cette nécessité aboutit au développement de nouveaux principes de mise au oeuvre des traceurs radioactifs (1), (2), (3), (4). De ces études, il ressort que la connaissance de la vitesse moyenne est insuffisante pour obtenir le débit  $Q$  de sédiment transporté.

Suivant les principes adoptés, ces nouvelles méthodes demandent :

- soit la mesure de l'épaisseur de la couche de sédiment en mouvement,
- soit la vérification que les conditions de "bon mélange" sont atteintes.

Ces conditions veulent qu'après une injection d'une masse  $M$  de traceur dans un débit  $Q$ , la masse  $\frac{\Delta M}{M}$  de traceur, transporté dans un canal élémentaire de débit  $\frac{\Delta Q}{Q}$ , soit précisément égal à ce débit relatif.

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{\Delta Q}{Q}$$

Or, jusqu'à maintenant, il ne semble pas possible d'obtenir ces renseignements par l'ajection d'un nombre important de grains. Peut-être serait-ce possible par un carottage systématique des zones radioactives. Bien que ceci ait déjà été utilisé (Cf. par exemple (5)), peu de carottiers simples existent sur le marché, d'autre part, l'utilisation de carottiers nécessite l'immersion d'activités notablement plus élevées et enfin, le carottage détruit un intérêt majeur de l'emploi des tracours radioactifs : l'obtention de résultats in situ.

### III - LA METHODE DU NOMBRE LIMITE DE GRAINS ACTIFS

#### III.1. Principe

La méthode décrite ici, permet de pallier les inconvénients précédents. Le principe de cette méthode nous a été suggéré par les résultats d'une campagne "tracours radioactifs" en galète, où la détection du déplacement de chaque unité perçue a permis d'obtenir des résultats quantitatifs (6). Elle consiste à injecter un nombre relativement restreint de grains radioactifs, nombre assez important pour assurer avant de commencer leurs positions traduisant la situation réelle du mouvement, mais assez bas pour qu'au bout d'un certain temps, un grand nombre d'entre eux soit ni suffisamment écartés les uns des autres pour pouvoir être détectés individuellement. Ce nombre dépend naturellement des conditions géographiques et sédimentologiques, mais pour donner un ordre de grandeur, 10 000 grains pourraient constituer une injection possible.

Lors de la détection d'un grain isolé par une sonde tracée sur le fond, le problème consiste à pouvoir attribuer au grain radioactif détecté, deux paramètres :

- 1) son parcours  $l_1$  par rapport au point d'injection
- 2) sa profondeur d'enfouissement  $e_1$ .

Si  $p$  grains sont ainsi paramétrés

- l'abscisse  $l_0$  du centre de gravité réel est :

$$l_0 = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^{i=p} l_i$$

- la profondeur moyenne  $e_0$  d'enfouissement est :

$$e_0 = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^{i=p} e_i$$

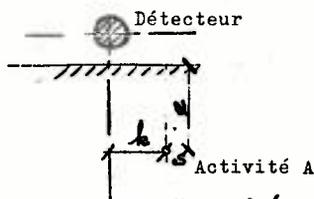
- le débit massique  $Q$  intégré sur la période de mesure

$$Q = \rho l_G c_G \quad \rho = \text{poids spécifique du matériau transporté}$$

La valeur de chaque paramètre  $l_i$  est défini de façon classique en déterminant la position de la sonde. Le problème consiste donc à déterminer la profondeur d'enfouissement d'un grain.

### III.2. Profondeur d'enfouissement d'un grain - Coordonnées réduites

Lors du passage d'une sonde détectrice au droit d'un grain, le nombre de chocs nets  $N$  reçu par le détecteur passe par un maximum qui dépend de trois paramètres :



$A$  l'activité du grain

$e$  l'enfouissement

$k$  sa distance latérale à la sonde

$$N = \psi (A, e, k)$$

#### III.2.1. L'activité du grain est connue

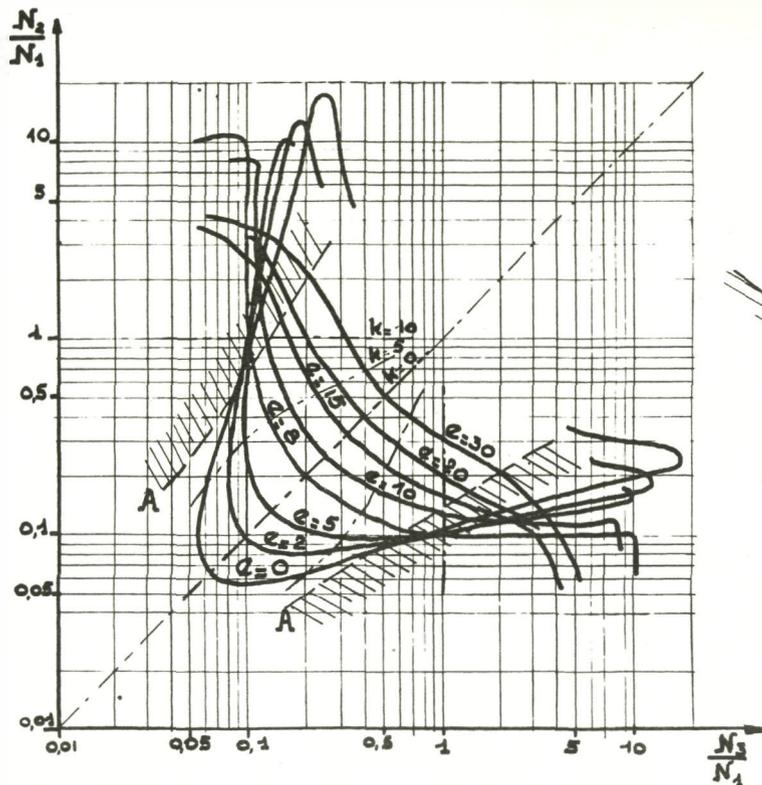
Dans ce cas, le problème est à deux paramètres et l'obtention de deux renseignements simultanés suffit à déterminer l'enfouissement  $e$ . Ces deux renseignements peuvent être  $N_1$  et  $N_2$  fournis par deux sondes détectrices rigidement liées.

#### III.2.2. L'activité du grain est inconnue

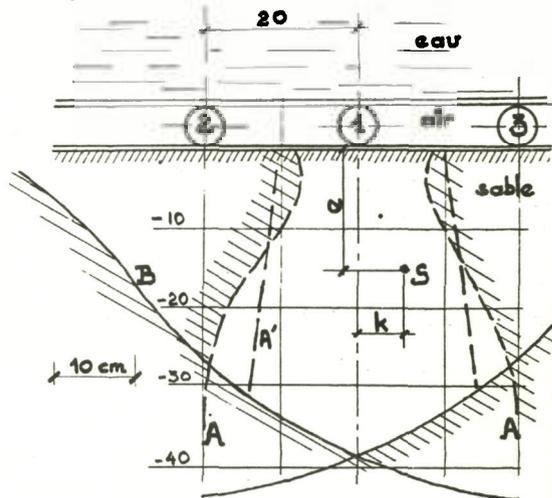
C'est le cas le plus fréquent et il convient de l'examiner plus en détail.

Dès lors, il est nécessaire d'avoir trois informations simultanées.

Pour faciliter l'exploitation de ces trois informations, il a été construit des ensembles de coordonnées réduites indépendantes de l'activité  $A$  du grain. Deux de ces ensembles sont examinés ici.



### Géométrie



S = Source  $^{192}\text{Ir}$

1-2-3 = détecteurs seuil 50KeV

Figure 3 - Mouvement de sédiment et enfouissement d'un grain.

Coordonnées réduites  $\frac{N_2}{N_1}$ ,  $\frac{N_3}{N_1}$

Dans la pratique, pour une interprétation plus aisée des résultats, il serait souhaitable que le volume ainsi défini par les courbes A et B accorde à chaque couche d'épaisseur  $\Delta e$  le même poids. Il n'en est pas ainsi dans la figure 2. Mais, nous avons constaté qu'avec une géométrie légèrement différente qui suppose les détecteurs 2 et 3 éloignés d'environ 2 cm du sol, la courbe  $\Delta$  devient quasiment en une courbe A' plus près des conditions idéales. Remarquons que la connaissance de la forme de ce volume est suffisante, même si chaque couche d'épaisseur  $\Delta e$  n'a pas la même surface ; soit en effet  $k_A = g(e)$  l'équation de A et  $p_i$  le nombre de grains détectés dans la couche  $e_i$ ,  $e_i + \Delta e_i$ , la profondeur moyenne d'enfouissement sera alors calculée par

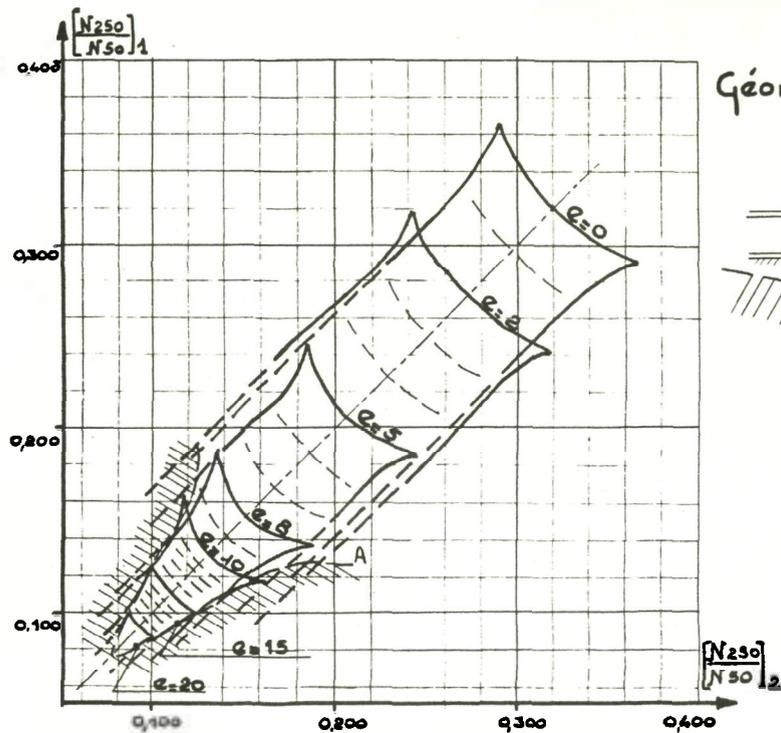
$$e_G = \frac{\sum_i \frac{p_i}{g(e_i)} e_i}{\sum_i \frac{p_i}{g(e_i)}}$$

La précision de détection de la profondeur d'enfouissement d'un grain varie avec sa position, c'est-à-dire avec  $k$ . Les calculs d'erreur ont été faits en supposant 10 % d'erreur maximum sur  $t_2$  et  $t_3$ , qui correspondent à 10 % d'erreur sur  $N_2 + N_1$  et  $N_2 + N_3$ . Dans ces conditions, pour un grain situé sur la verticale de la sonde centrale  $\dagger$  ( $k = 0$ ), l'erreur maximum commise est d'environ 0,5 cm pour  $e = 0$ , 1 cm pour  $e = 5$  cm et 5 cm pour  $e = 30$  cm. Cette erreur augmente assez rapidement; pour les faibles enfouissements, lorsque  $k$  croît. Cette erreur est une erreur maximum et est valable sur un seul grain ; s'il n'existe pas d'erreur systématique, l'erreur sur  $n$  grains détectés sera moindre.

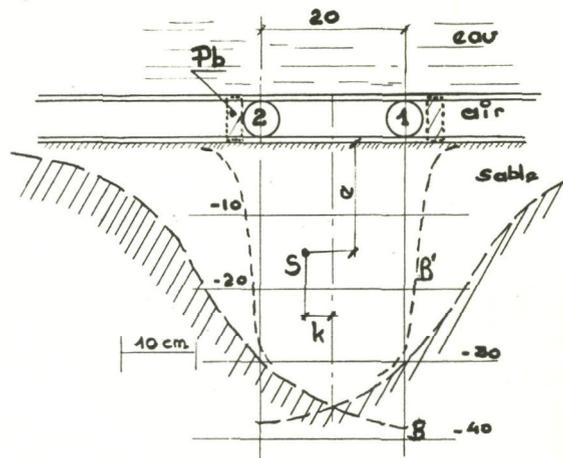
Des ensembles  $t_2, t_3$ , analogues à celui représenté figure 3, ont été étudiés pour une vingtaine de géométries différentes pour des sondes aussi bien complètement immergées qu'enfermées dans une enceinte étanche à l'eau.

$$\text{III.2.2.2. Ensemble } \Theta_2 = \left[ \frac{N_{250}}{N_{50}} \right]_1 - \left[ \frac{N_{250}}{N_{50}} \right]_2 \quad (\text{Fig. 4})$$

Soit 2 sondes détectrices à scintillation rigidement liées, 1 et 2 dans une géométrie définie, au droit d'un grain radioactif. Le nombre



### Géométrie



S = Source  $^{182}\text{Ir}$

1-2 = détecteurs seuil 50 KeV  
250 KeV

Figure 4 - Mouvement de sédiment et enfouissement d'un grain.

Coordonnées réduites

$$\begin{matrix} \frac{N_{250}}{N_{50}} \\ \frac{N_{250}}{N_{50}} \end{matrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix}$$

$$\text{III.2.2.1. Ensemble } t_2 = \frac{N_2}{N_1}, t_3 = \frac{N_3}{N_1} \quad (\text{Fig. 3})$$

Soit trois sondes détectrices, rigidement liées dans une géométrie définie, passent au droit d'un grain radioactif. Les nombres de coups nets reçus par ces sondes respectivement sont :  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ , la sonde 1 étant la sonde centrale.

$$\text{Dans ce cas, les paramètres } t_2 = \frac{N_2}{N_1} \text{ et } t_3 = \frac{N_3}{N_1}$$

sont indépendants de l'activité  $A$  du grain. Il est alors possible de tracer dans le diagramme  $t_2$ ,  $t_3$  des courbes d'isoprobabilité.

La figure 3 représente un tel diagramme tracé pour de l'Iridium-192, avec trois détecteurs à scintillation réglés à un seuil de 50 KeV dans la géométrie figurée. Il a été obtenu d'après les résultats expérimentaux d'une sonde, puis les calculs menés en supposant les trois sondes identiques, décalées de 30 cm l'une par rapport à l'autre. Sur le côté droit de la figure 3 est reportée la coupe verticale représentative de la géométrie utilisée.

Dans tout un domaine limité par la courbe A, les courbes d'isoprobabilité se chevauchent. On a considéré qu'au-delà de la courbe A, tout ensemble  $t_1$ ,  $t_2$ , donne un résultat ambigu qui ne doit pas être pris en considération. Cette courbe A, reportée sur la représentation de la géométrie, délimite en partie, le volume utile de lecture.

D'autre part, dans le cas envisagé sur la figure 3, l'activité individuelle de chaque grain a été limitée à 100  $\mu\text{Ci}$  d'<sup>192</sup>Ir. La courbe B limit de délimiter le volume utile. Au-delà de cette courbe, un des détecteurs reçoit moins de 50 cps estimés nécessaires pour avoir une lecture correcte. Cette limite de 50 cps a été choisie en fonction :

- des fluctuations statistiques
- des bruits de fond rencontrés sur le sédiments variable entre quelques chocs par seconde et 30 chocs par seconde
- d'une atténuation de la valeur du maximum enregistré, due à la constante de temps de l'appareillage, si l'on ne travaille pas en digital.

de chocs nets reçus par ces sondes aux seuils différents 50 et 250 KeV sont respectivement  $[N_{50}]_1$ ,  $[N_{250}]_1$ ,  $[N_{50}]_2$ ,  $[N_{250}]_2$

et  $\theta_2 = \frac{[N_{250}]_2}{[N_{50}]_2}$  sont indépendants de l'activité A du grain. Il est alors possible de tracer le diagramme  $\theta_1, \theta_2$  des courbes d'isoprofondeur

La figure 4 représente un tel diagramme ; il s'interprète comme précédemment et attire des remarques analogues. La courbe B définit le volume au-delà duquel un détecteur reçoit moins de 50 cps nets sur 250 KeV pour une source enfouie de 100  $\mu\text{Ci}$  d' $^{192}\text{Ir}$ . Ce nombre est de 20 cps inférieur au nombre précédent (paragraphe III.2.2.1.) car les bruits de fond relevés sur 250 KeV sont en général considérablement plus bas. Cette courbe pourra être ramené en D' dans une sonde réelle à deux détecteurs blindés légèrement sur les côtés par 1 ou 2 cm de plomb.

### III.2.2.3. Autres possibilités

Les coordonnées réduites t et  $\theta$  présentées ici ne sont pas uniques et il est possible d'en imaginer d'autres ; des combinaisons de coordonnées réduites peuvent également être envisagées et un diagramme du type  $(\theta_1, t_2)$  donne, dans certaines géométries, des résultats également encourageants.

### III.2.3. Intérêt de la méthode - Difficulté de mise en oeuvre - Premier essai.

La méthode précédente, outre l'intérêt majeur de donner la position réelle du centre de gravité en position et profondeur, information susceptible de donner le débit massique, renseigne sur les conditions dans lesquelles se fait le "bon mélange". En effet, l'injection de traceur radioactif dans une rivière se fait généralement sur la surface du lit. Par suite, la première détection aboutit à une profondeur moyenne d'enfouissement faible. Lors des détections successives, cette profondeur moyenne augmentera jusqu'au moment où les conditions de bon mélange seront atteintes. La méthode fournit donc des renseignements sur le temps et le déplacement nécessaire pour que le mouvement du traceur soit devenu représentatif du déplacement réel du sédiment.

Les principales difficultés rencontrées dans l'exploitation de cette méthode, difficultés que nous essayons actuellement de vaincre, sont les suivantes :

1) Très fortes variations du nombre de cps reçus par les détecteurs. En effet, pour une source de 100  $\mu\text{Ci}$  d' $^{192}\text{Ir}$ , suivant sa position dans le volume de détection, le nombre de cps nets reçus par les détecteurs dans la géométrie de la figure 3, varie entre 140 000 et 50. Ceci nécessite l'emploi soit d'un intégrateur logarithmique avec tout ce que cela comporte d'aléas sur la stabilité et la précision de la mesure, soit d'un système digital avec une imprimante plusieurs fois par seconde. D'autre part, à 140 000 cps, les temps morts des cristaux INA (Tl) ou de l'électronique adoptée peuvent entraîner des pertes au comptage importantes et il est envisagé d'employer des plastiques scintillants à la place de cristaux.

2) Atténuation dues à la constante de temps. Même avec l'emploi de constantes de temps faibles, les atténuations du nombre de cps maximum peuvent être considérables ; de plus, elles varient suivant la position du grain, la vitesse de passage de la sonde détectrice au-dessus du grain ; il s'ensuit que ces atténuations ne restent pas constantes et peuvent affecter fortement les valeurs des coordonnées réduites trouvées. Là aussi, l'emploi de systèmes digitaux peuvent pallier dans une certaine mesure ces inconvénients.

3) Exploitation des résultats beaucoup plus lourde que celle du procédé classique.

Un premier essai de cette méthode a été fait lors d'une récente expérience de traceur radioactif au Cambodge (7). Malgré une électronique pas encore adaptée à la méthode, et des conditions hydrologiques n'assurant qu'une faible dispersion du traceur, nous avons pu constater :

- Un certain nombre de grains étaient détectables un par un.  
C'est un fait essentiel à mettre en évidence. Ainsi, dans la figure 5 est reproduit un exemple de l'enregistrement simultané du signal de 2 sondes prises individuellement (géométrie de la figure 3). Dans la passe ainsi reproduite, 9 grains ont été détectés individuellement et leur profondeur déterminée.
- Lors de la dernière détection, les conditions de bon mélange n'étaient pas encore satisfaites.
- Les grains étaient peu enterrés sans que l'on puisse, à cause des restrictions précédentes, faire une estimation valable de cet enfouissement.

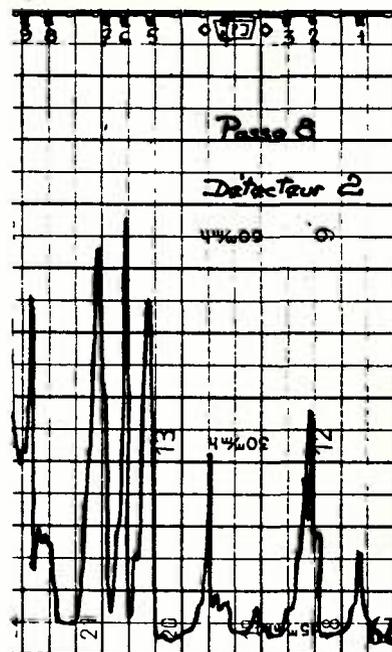
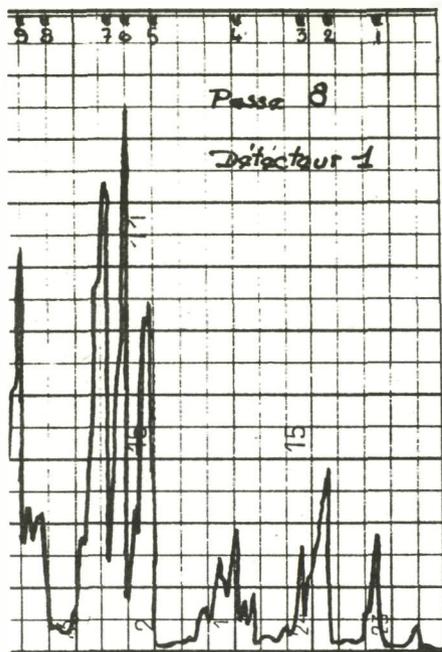


Figure 5 - Détection de grains isolés

IV - CONCLUSIONS

La méthode proposée est susceptible de fournir nombre de renseignements concernant les conditions du mélange et les débits massiques. Elle ne prétend pas remplacer la méthode classique, mais son emploi est susceptible d'apporter un complément d'informations fort utile.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - E. ERIKSSON - R. HOURS  
Report on possible applications of radioactive tracers in studies lower Mekong Basin  
International Atomic Energy Agency  
RI/10 - 24 June, 1960 (Destr. Limited)
- 2 - M.J. CRICKMORE et G.H. LEAN  
The measurement of sand transport by means of radioactive tracers  
Proceedings of the Royal Society, 266, 402-421, 1962
- 3 - M.J. CRICKMORE et G.H. LEAN  
The measurement of sand transport by the time-integration method with radioactive tracers  
Proceedings of the Royal Society, 270, 27-47, 1962
- 4 - M.J. CRICKMORE et G.H. LEAN  
Methods of measuring sand transport using radioactive tracers  
Symposium on the Applications of Radioisotopes in hydrology (AIEA-SM 58/42)
- 5 - J.J. ANLMAN - P. SANTEMA - J.N. SVASECK  
Movement of bottom sediments in coastal waters by current and waves ; measurement with the aid of radioactive tracers in the Netherlands.  
Progress report, June 1957 - Issued by Deltadient Rykwaterstaat ; Ministry of Transport and Waterstaat in Netherlands.

- 6 - H. RAMETTE et M. HEUZEL

Le Rhône à Lyon - Etude de l'entraînement des galets à l'aide de traceurs radioactifs.

La Houille Blanche - A/1962, Mai-juin 1962, 73-83

- 7 - F. ANGUENOT - J.P. CARBONNEL - G. COURTOIS - R. DANION - H. FORSBERG -  
H. HEUZEL

Emploi de radioéléments dans le transport solide par charriage du Stung Sen au Cambodge.

Rapport 10 de la présente réunion de travail organisée par le Bureau Eurisotop.

Utilisation des mesures du bruit de fond pour l'établissement  
d'une carte lithologique du fond de la mer

A. BASTIN

Assistant du Professeur Gullentops  
Institut de Géologie, Louvain

Il existe une nette différence entre le bruit de fond radio-actif naturel d'un fond maritime sableux et celui d'un fond argileux. Un enregistrement continu de ce bruit de fond permet de détecter les différences locales et de déceler les endroits intéressants, ce qui évite la nécessité de prélever un grand nombre d'échantillons sans intérêt, voire inutiles. C'est là, semble-t-il un moyen rapide et efficace de dresser la carte lithologique de la zone de la mer du Nord située en face de la côte belge, tâche à laquelle nous nous employons actuellement. Le besoin d'une carte lithologique de la région se fait sentir en effet de façon urgente, puisque la dernière carte, celle de VAN MIERLO, date de 1899. En dehors de quelques données néerlandaises, elle est la seule source d'informations disponibles sur la nature du sol en face de nos côtes. Une nouvelle carte, dressée avec des moyens plus modernes, ne présentera pas seulement un intérêt scientifique; elle aura également un intérêt pratique pour les travaux de dragage destinés à rendre les voies navigables accessibles aux navires de fort tonnage.

On effectue les mesures en traînant sur le fond une sonde à compteur à scintillations incorporé.

Le compteur, constitué par un cristal Na I de 5 x 5 cm et d'un photomultiplicateur, est logé dans une gaine étanche revêtue intérieurement de caoutchouc-mousse. Cette gaine est lestée à ses extrémités par des pièces massives. La forme de l'ensemble a été étudiée en fonction de la tâche prévue. Il s'agissait en l'occurrence de dresser la carte d'environ 2500 km<sup>2</sup> de fond de mer, la gaine devant être tirée pendant environ 5000 km. Cette même gaine doit servir encore à des essais à l'aide de traceurs et à des mesures du bruit de fond dans l'Escaut. Comme les eaux territoriales belges sont remplies de toutes sortes de débris et d'épaves provenant de

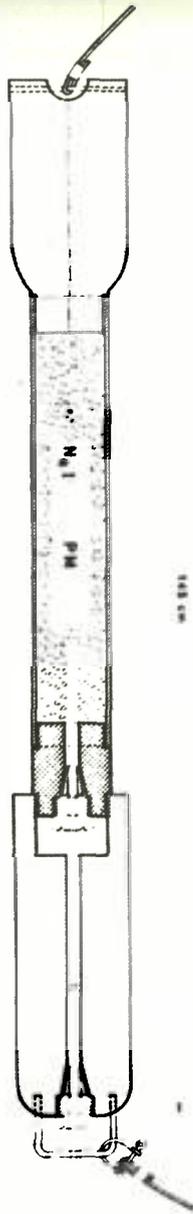


Figure 1 - Compteur muni d'un cristal NaI de 5 X 5 cm et d'un photomultiplicateur.

la dernière guerre, il faut donc éviter toutes les aspérités auxquelles elle pourrait s'accrocher. Elle doit par conséquent être robuste, résistante aux chocs et à l'usure; de plus, compte tenu des grandes distances qu'elle a à parcourir, elle doit pouvoir passer rapidement sur le fond de la mer sans quitter le sol. C'est pourquoi on a placé aux extrémités, pour absorber les chocs et l'usure, des poids massifs d'un plus grand diamètre que celui de la gaine elle-même. Le poids se trouvant à l'avant est un peu plus lourd que celui se trouvant à l'arrière, afin d'équilibrer la force de traction qui s'exerce vers le haut. A la partie arrière est accrochée une petite bouée, qui permet de retrouver et de récupérer la gaine en cas de perte. La bouée est attachée à un câble d'une longueur suffisante, afin de réduire autant que possible le vecteur de force dirigé vers le haut.

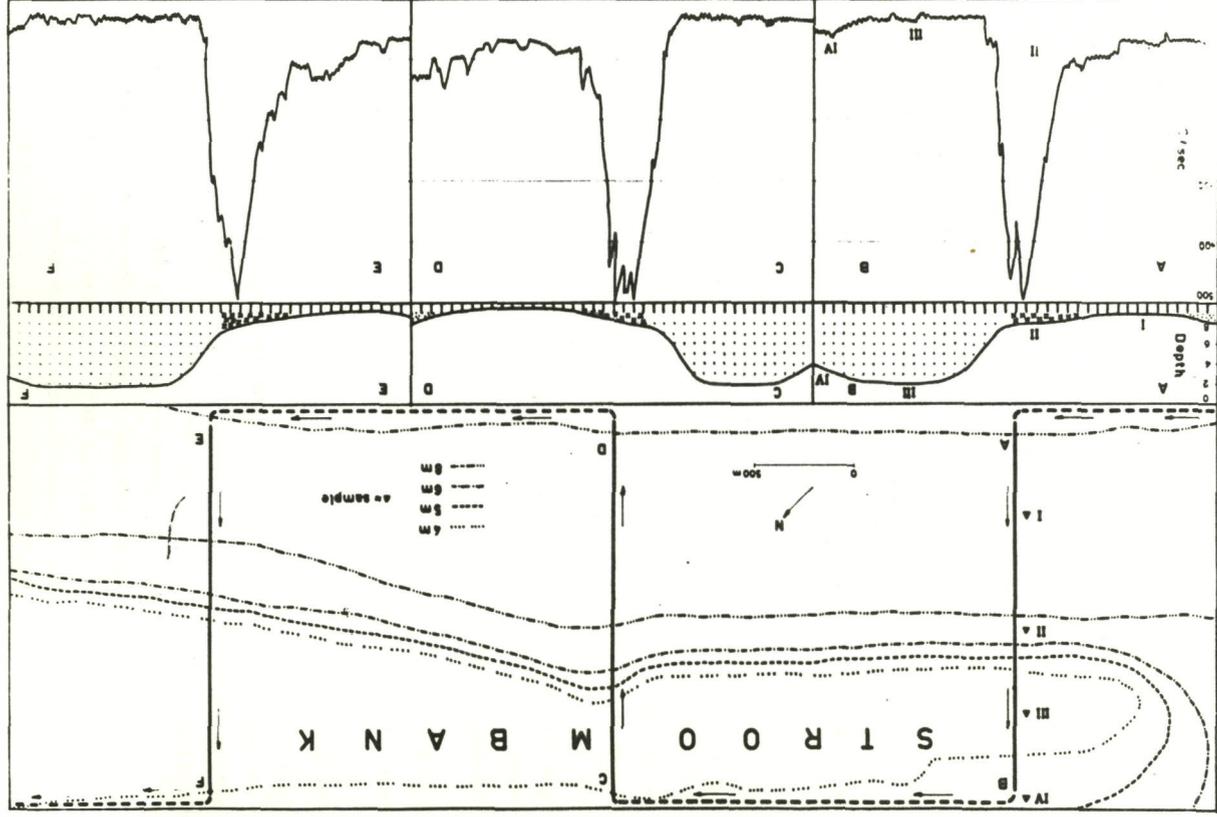
L'expérience acquise lors des mesures elles-mêmes nous a démontré l'efficacité de cette sonde. Parfois, lors de la remontée, nous constatons que la sonde portait de longues et profondes rayures, ce qui faisait supposer qu'elle avait été traînée sur des épaves. Il ne nous a pas fallu plus d'une demi-journée pour nous rendre compte que le système d'une gaine reposant sur un traîneau ou sur des skis ne pouvait être employé. Il est même arrivé que notre sonde est restée accrochée et que tout a été arraché; toutefois, nous l'avons retrouvée près de la bouée et nous avons pu la récupérer.

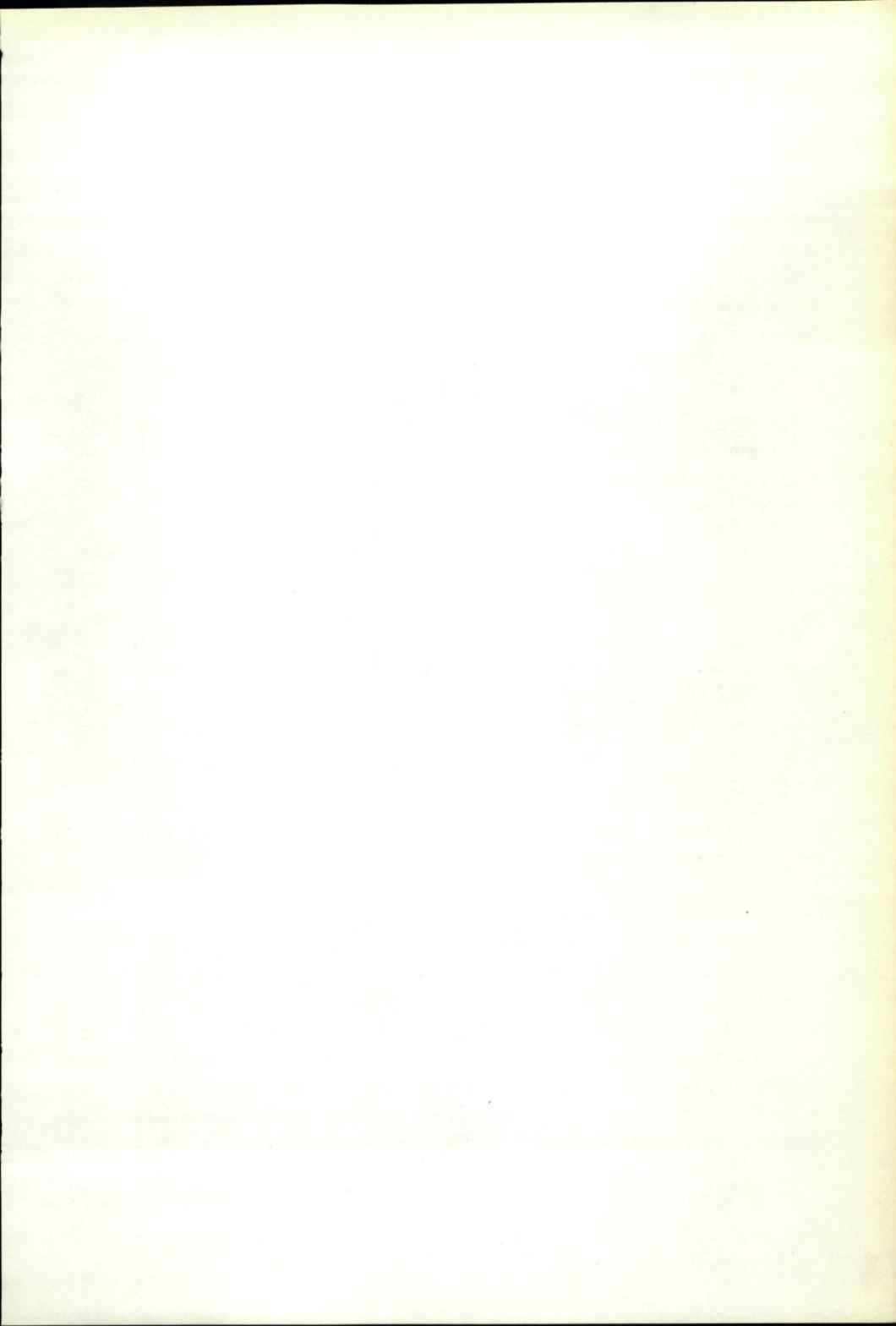
La longueur totale du câble électrique est de 100 mètres. La longueur du câble de traction a été réglée en fonction de la profondeur et de la vitesse. Si l'on lâche suffisamment le câble, on peut même atteindre une vitesse de 8 noeuds et une profondeur de 20 mètres sans que la gaine se détache. Toutefois, nous n'avons généralement pas dépassé une vitesse de 4 à 5 noeuds.

A bord du navire se trouvaient un intégrateur transistorisé avec des échelles normales allant de 0 à 10.000 c./sec ainsi qu'un enregistreur. L'ensemble fonctionnait sur deux batteries de 12 volts chacune.

En attendant que le système de navigation Decca soit mis à notre disposition, les emplacements ont été déterminés à l'aide d'angles de sextant, de telle sorte que cette année les mesures sont restées limitées

Figure 2 - Résultats extraits d'un diagramme d'enregistrement circulaire établi sur l'emplacement indiqué





D'où vient cette haute activité ?

Il y a tout d'abord un changement de géométrie dont il convient de tenir compte. En effet, sur le sable dur ou sur l'argile dure, la sonde traîne à la surface; à la vitesse à laquelle elle se déplace, elle ne peut pénétrer dans le sédiment malgré son poids. A ce moment, les seules radiations qu'elle reçoit viennent d'en dessous. Par contre, lorsqu'il s'agit de boue récente, elle pénètre dans le fond et les rayonnements la frappent de tous côtés. Les calculs ont montré que le taux d'augmentation qui en résulte ne dépasse pas un facteur 4. Nous n'approchons donc pas encore ici de ces valeurs élevées. Au Centre nucléaire de Mol, on a décelé dans des échantillons de cette boue des produits de fusion provenant des retombées de bombes atomiques, tels que du zirconium-niobium-95 et du ruthénium-rhodium-103 et -106.

Ce sont donc ces produits de fusion qui sont responsables de la haute activité des boues de formation récente et qui jouent ici le rôle de traceur. Il nous sera cependant difficile de pouvoir employer dans ces régions les mesures du bruit de fond comme base des essais ultérieurs à l'aide de traceurs. En effet, comme le montre le dessin, on enregistre en l'espace de quelques mètres, entre le sable et la vase, une augmentation atteignant un facteur 20. L'appareil est donc réglé pour pouvoir discriminer d'une manière très précise les énergies du traceur qui sera éventuellement employé.

Nous avons, lors des mesures, découvert un autre cas où les matières elles-mêmes faisaient office de traceur; il s'agit en l'espèce de matières provenant du dragage du port d'Ostende. Ces matières, constituées par un mélange de toutes sortes de substances, ont en effet un bruit de fond plus élevé que celui qui est enregistré au voisinage immédiat de l'endroit où elles sont déversées. Cet endroit a été choisi au nord d'Ostende en direction du flux, car l'hypothèse généralement admise (établie en fonction des mesures de courant et de la résultante du flux) est que les matières peuvent être déplacées ainsi vers un point plus éloigné au nord du port. En revanche, les mesures prouvent qu'aucune augmentation du bruit de fond n'est enregistrée en direction du flux, mais bien en direction du reflux par rapport au point de déversement.

L'hypothèse, admise jusqu'ici, selon laquelle les matières se déplacent devant notre côte belge en direction nord, a été également critiquée par des spécialistes néerlandais. Nous espérons que les essais à l'aide de traceurs que nous avons l'intention de réaliser devant la côte belge nous apporteront des éclaircissements sur ces problèmes fondamentaux. Comme nous l'avons déjà dit, ces renseignements n'ont pas seulement un intérêt scientifique; ils sont également extrêmement intéressants sur le plan pratique, notamment pour les travaux de dragage, la construction des ouvrages d'art et les travaux portuaires. L'Université a réussi à créer une atmosphère favorable à la recherche scientifique désintéressée, où les différents problèmes et hypothèses pourront être étudiés en toute liberté d'esprit, sans que les chercheurs soient astreints à une tâche déterminée. L'ensemble de ces recherches fournira une réserve de données scientifiques où les ingénieurs pourront venir puiser lorsqu'ils auront à établir les plans de leurs travaux.

Détermination du temps de séjour des boues activées

dans les installations d'épuration

R. KRONE

Emschergenossenschaft, Essen

La substance de base de la boue activée est un mélange de bactéries en provenance de l'eau, de l'air et du sol. Dans une boue activée normale, les bactéries sont groupées en colonies et forment des flocons plus ou moins grands d'une constitution visqueuse (zoogléés). La boue déposée est constituée pour 97 % environ par de l'eau. Lorsqu'elle est desséchée, la boue contient environ 40 % de composants minéraux.

La figure 1 donne une représentation schématique de la structure d'une installation d'épuration biologique. Les eaux résiduaires purifiées mécaniquement sont mélangées dans la cuve d'aération avec la boue activée, généralement par insufflation d'air. On enrichit en même temps l'eau avec de l'oxygène. Pendant le mélange, la boue activée extrait la majeure partie des matières organiques dissoutes dans les eaux résiduaires et les minéralise. La boue activée est ensuite séparée de l'eau par sédimentation dans une cuve de post-clarification. La boue déposée est introduite dans l'entonnoir de décantation (cône d'élutriation) par l'intermédiaire d'une "raclette" et, de là, elle est repompée dans la cuve d'aération.

Comme dans tous les phénomènes biologiques, les conditions extérieures jouent un grand rôle en ce qui concerne la boue activée. Il est notamment essentiel, si l'on veut travailler dans des conditions optimales, de connaître le temps de séjour de la boue dans les cuves d'aération et de post-clarification. Le temps de séjour dans la cuve de post-clarification est particulièrement important, la boue n'étant pas aérée pendant l'opération de post-clarification. Si la boue séjourne trop longtemps dans la cuve de post-clarification, elle perd une partie de son activité - dans ce cas l'activité est égale à la capacité d'épuration - et il lui faut plus longtemps

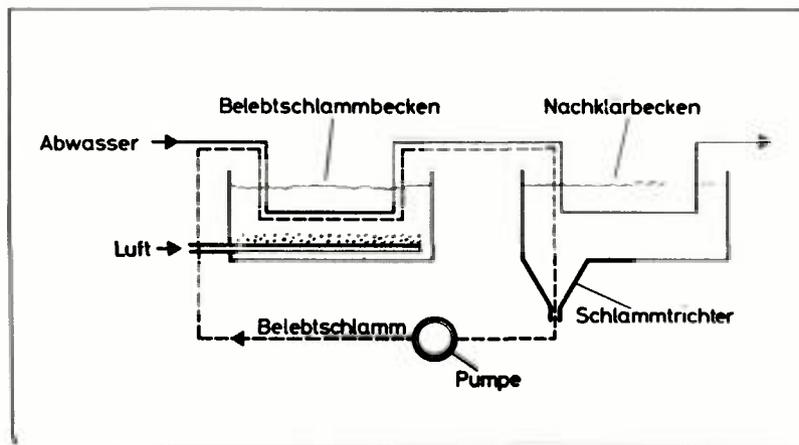


Figure 1 - Représentation schématique de la structure d'une installation d'épuration biologique.

pour se réactiver lorsqu'elle est replacée dans la cuve d'aération. Si l'on veut influencer favorablement le temps de séjour dans les cuves par des détails de construction ou d'autres artifices, il faut connaître ce temps de séjour. C'est pourquoi nous procédons actuellement, dans le cadre de nos mesures, du temps de séjour des eaux résiduaires dans les installations d'épuration, à des mesures du temps de séjour de la boue activée.

Lorsqu'on mesure le temps de séjour de la boue activée dans les cuves d'aération, on obtient des courbes qui coïncident exactement avec celles de l'eau, comme on pouvait s'y attendre, en raison de la continuité du mélange. Dans le cas de la mesure du temps de séjour de la boue activée dans la cuve de post-clarification, dont les résultats sont représentés à la figure 2, la courbe est beaucoup plus intéressante. Après introduction de la boue activée radio-active dans la conduite d'entrée de la cuve de post-clarification, l'activité augmente fortement dans l'entonnoir de décantation. Mais comme de la boue est constamment réintroduite par pompage de l'entonnoir dans la cuve d'aération, l'activité diminue, ainsi que le montre la figure 2. La courbe de diminution de l'activité est interrompue par plusieurs petits paliers, qui semblent être dus au fait que, pendant l'opération de pompage, la raclette de la cuve de post-clarification continue à introduire de la boue dans l'entonnoir de décantation. L'augmentation de l'activité au bout d'une cinquantaine de minutes est attribuée au fait que, dans l'intervalle, la boue radio-active est de nouveau passée par la cuve d'aération et est arrivée dans la cuve de post-clarification.

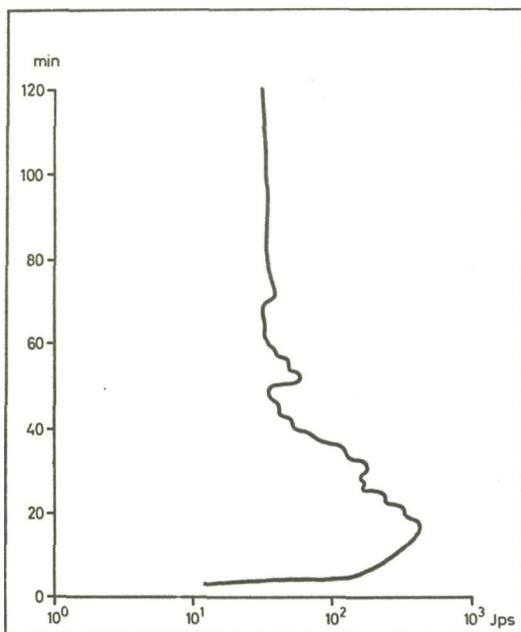


Figure 2 - Mesure du temps de séjour de la boue  
active dans la cuve de post-clarification

Mesure du débit solide des cours d'eau par charriage  
au moyen de traceurs

J. -L. CHAUVIN et J. DANION

Centre de Recherches et d'Essais de Chatou  
Département Laboratoire National d'Hydraulique

INTRODUCTION

Il y a une dizaine d'années, le Laboratoire National d'Hydraulique a commencé à utiliser les traceurs radioactifs pour l'étude des mouvements des sédiments marins.

En même temps qu'il poursuivait, en liaison avec le C.E.N. de Saclay, le perfectionnement de l'appareillage et de la technique de ces mesures, il a étendu le champ de ces applications à l'étude du charriage des cours d'eau.

Les premières mesures n'ont apporté que des renseignements qualitatifs sur l'existence, l'intensité et la direction du transport des alluvions. Dans certains cas particuliers ces résultats permettent de déterminer indirectement le débit solide d'un cours d'eau.

On conçoit cependant que, le déplacement d'un traceur étant fonction du charriage, sa mesure permette d'évaluer directement le débit solide, à condition de bien connaître les phénomènes en cause et en particulier celui de la dispersion du traceur. Les études poursuivies au Laboratoire recherchent la possibilité de mesurer ainsi directement le débit solide.

I - PROCEDES UTILISES POUR LA MESURE DU CHARRIAGE

La connaissance du débit solide d'un cours d'eau est indispensable lorsqu'on se propose de prévoir le comblement d'une retenue, l'ensablement d'une prise d'eau, l'importance des dragages pour le maintien d'un chenal, etc. Elle s'impose également toutes les fois que l'on envisage des travaux en rivière capables de modifier l'état d'équilibre du lit.

Lorsque les ouvrages sont importants, leur étude se fait en général sur modèle réduit; il est alors nécessaire de posséder des données sur le charriage afin de régler le modèle.

### I.1 Méthodes utilisées jusqu'à présent

Elles ne donnent généralement que des évaluations assez grossières du débit solide.

#### a) formules

Différentes formules semi-théoriques ont été établies à l'aide d'essais en laboratoire. Leur application aux cours d'eau, outre qu'elle représente une extrapolation osée, nécessite l'introduction de nombreux facteurs correctifs toutes les fois qu'on s'écarte des conditions idéales de l'écoulement en canal d'essais, et qu'interviennent certains facteurs tels que la présence de rides, les courbures du lit, le charriage partiel etc.

#### b) détecteur hydrophonique et nasses à matériau

Le détecteur hydrophonique posé sur le fond d'une rivière charriant des galets permet de déceler le début d'entraînement des matériaux; encore faut-il un opérateur bien entraîné pour discerner les bruits causés par les chocs des galets sur la plaque de l'hydrophone du bruit de l'appareil lui-même, mal stabilisé, glissant sur le fond.

De nombreux types de nasses ont été mis au point pour la mesure directe du débit solide. Cet appareil comporte une cage grillagée qui capte les matériaux charriés sur la largeur de son ouverture maintenue orientée vers l'amont. La durée d'une mesure étant en général limitée du fait de la capacité restreinte de la nasse, l'on peut observer des fluctuations considérables dans le temps en un même point du cours d'eau; il serait donc nécessaire de multiplier le nombre des mesures en chaque point. En outre la présence de la nasse, qui modifie localement l'écoulement, peut fausser considérablement la mesure.

La manoeuvre d'un détecteur hydrophonique ou d'une nasse est délicate. Il est également difficile d'obtenir une stabilité et une adhérence sur le fond satisfaisantes dans un écoulement rapide. Un appareil mal conçu

peut alors glisser ou draguer le fond c'est-à-dire conduire à des conclusions et résultats entièrement erronés.

### c) cubature de dépôts

Il est parfois possible de déterminer les apports solides d'un cours d'eau par comparaison de levés hydrographiques précis effectués à diverses époques, par exemple du delta formé par une rivière débouchant dans la mer ou un lac, de la retenue d'un barrage ou d'un piège à gravier artificiel destiné à stopper le transit des matériaux charriés. Cependant il peut être difficile de déterminer dans certains cas la seule contribution du phénomène de charriage dans le processus d'engrèvement de la retenue ou de formation du cône de déjection si le transport solide par suspension est lui-même important.

De toute façon, ces circonstances sont rarement rencontrées. Les résultats acquis en un lieu ne sont généralement pas valables sur un tronçon voisin du même cours d'eau de pente, granulométrie du matériau de fond et régime hydrologique différents. L'estimation des apports solides est globale par cette méthode ; elle peut porter sur une saison, une année ou même plusieurs années et ne permet pas d'établir une loi de correspondance débit liquide - débit solide.

### 1.2 Méthode des traceurs

La méthode consiste à placer sur le fond du cours d'eau des grains dont les caractéristiques physiques (densité, granulométrie ...) sont identiques à celles des sédiments naturels, qui se déplacent par conséquent suivant les mêmes lois, mais qu'un marquage préalable permet de suivre dans leurs déplacements.

Différents procédés de marquage (peinture ordinaire ou luminescente ...) peuvent être imaginés, mais c'est sans conteste l'emploi de la radioactivité qui permet de retrouver le plus facilement les grains sous l'eau lorsqu'ils se sont déplacés.

L'emploi de traceurs ne présente aucun des inconvénients des autres méthodes. En particulier leur déplacement reproduit fidèlement, sans

le fausser, le déplacement des grains non marqués des alluvions naturelles.

Cependant l'interprétation des mesures du cheminement des traceurs est assez délicate, et les premières expériences n'ont pu donner que des indications qualitatives sur le charriage.

## II ETUDES QUALITATIVES

Les traceurs radioactifs indiquent les zones soumises au charriage selon le régime du cours d'eau, le processus de déformation des seuils et des mouilles en cours de crue, les vitesses de progression des dunes les plus importantes etc. Si les conditions hydrauliques homologues correspondant aux périodes d'observation sont reproduites sur modèle, il est possible de vérifier la similitude d'évolution des fonds.

A l'occasion de l'étude de l'amélioration des conditions de navigabilité du Niger sur le tronçon Koulikoro-Ségou, à l'aide de panneaux déflécteurs, étude menée par le Laboratoire sur place et sur modèle, une campagne de mesures par traceurs radioactifs a été effectuée au cours d'un étiage et d'une crue du fleuve. Le traceur utilisé était du verre broyé ajusté à la granulométrie et à la densité du matériau naturel, contenant un faible pourcentage de tantale-182, émetteur de rayons gamma durs, dont la période est de 111 jours.

Ces essais furent repris sur le modèle construit au Laboratoire avec deux types de traceurs, luminescents et radioactifs. Le matériau de fond mobile (noyau d'abricot broyé) était marqué en surface par de la peinture lumineuse ou irradié en pile atomique. Il est en effet possible d'activer les éléments minéraux contenus dans ce matériau ; on obtient en particulier du manganèse-56 et du sodium-24, émetteurs gamma durs, de périodes respectives 2,6 et 15 heures.

Les résultats et les conditions de réalisation de ces mesures sur le Niger ont déjà été exposés ( (1) à (5) ); de même l'appareillage, la technique d'immersion et de détection ont fait l'objet de plusieurs communications (dont (6) et (7) ) auxquelles il sera possible de se référer.

Les traceurs peuvent ainsi apporter des précieux renseignements pour l'étalonnage d'un modèle, phase délicate de la plus grande importance

par laquelle il convient de vérifier si le modèle est la reproduction fidèle du prototype en ce qui concerne les lignes d'eau et l'évolution du lit. Il n'est possible d'étudier sur le modèle les incidences de l'aménagement projeté qu'une fois cette assurance acquise.

Signalons enfin qu'une campagne de mesures par traceurs radioactifs fut aussi réalisée par le Laboratoire sur la Loire, à Ancenis, pour déterminer la mobilité des fonds et les possibilités de correction d'un chenal navigable à l'aide d'un système mobile de panneaux de surface.

### III ETUDES QUANTITATIVES

#### III.1 Méthode indirecte

Une méthode de calcul indirecte du débit solide des cours d'eau charriant des galets a été mise au point à la suite de la campagne de mesures par traceurs radioactifs effectuée sur le Rhône en aval de Lyon (8) dans le cadre des études confiées au Laboratoire par la Compagnie Nationale du Rhône pour l'aménagement de la Chute de Pierre Bénite.

Pour les matériaux de cette granulométrie la formule de Meyer-Peter (9) donne des résultats satisfaisants, du moins quand le charriage est total c'est-à-dire affecte l'ensemble des éléments constitutifs du fond, fins et grossiers.

La formule de Meyer-Peter a pour expression :

$$g = k (\tau - \tau_0)^{3/2}$$

en désignant par :

$g$  : le débit solide, pesé sous l'eau, par unité de largeur,

$k$  : une constante avec dimensions,

$\tau$  : la force tractrice exercée par l'écoulement sur le fond,

$\tau_0$  : la force tractrice critique correspondant au début de charriage des matériaux.

Cette force tractrice limite  $\tau_0$  est de la forme :

$$\tau_0 = A \bar{\omega} d_m$$

A : étant un paramètre avec dimensions,

$\bar{\omega}$  : le poids spécifique sous l'eau du matériau,

$d_m$  : le diamètre moyen du mélange de matériaux de fond.

Le fait de définir le début d'entraînement des matériaux par cette force tractrice moyenne est sans grande conséquence si le transport solide est important, c'est-à-dire la différence  $\tau - \tau_0$  notable. Par contre, au voisinage du début d'entraînement ou dans le domaine de charriage partiel, si la granulométrie du matériau est étendue, on peut commettre des erreurs considérables en adoptant un tel mode de calcul global.

Un calcul fractionné par tranches granulométriques semble cependant possible : supposons que le débit solide  $g_i$  d'une certaine classe  $i$  de matériau limitée par les diamètres moyens de galets  $d_i, d_{i+1}$  ait pour expression, sur la largeur  $l$  du cours d'eau :

$$g_i = n_i \int_0^l k (\tau - \tau_{0i})^{3/2} dx$$

$n_i$  étant le pourcentage en poids des galets de la  $i^{\text{ème}}$  classe, déterminé sur la courbe granulométrique moyenne du matériau de fond,

$\tau_{0i}$  : la force tractrice critique correspondant à la  $i^{\text{ème}}$  classe de matériau.

Le débit total est donc, pour l'ensemble du matériau de fond :

$$G = \sum_i g_i = \sum_i n_i \int_0^l k (\tau - \tau_{0i})^{3/2} dx$$

Les données acquises dans le domaine du charriage partiel lors de l'étude sur modèle de la chute de Valabres sur le Tinée à Isola (10) avaient permis de vérifier l'exactitude de cette méthode.

Sur modèle il est relativement aisé de déterminer ces forces tractrices critiques  $Z_{oi}$ , par approximations successives, pour obtenir les débits solides partiels mesurés. Nous avons vu par contre que sur une rivière le détecteur hydrophonique permet de déceler le charriage mais sans distinction de la granulométrie des galets mis en mouvement. L'originalité de la campagne de mesures réalisée sur le Rhône en aval de Lyon consistait à utiliser des matériaux marqués par des isotopes radioactifs dont il était possible de déterminer le début d'entraînement comme le cheminement sur le fond.

Les galets marqués se répartissent en trois catégories d'importances numériques inégales (Fig. 1) : 30, 125, 250, les petites galets étant les plus nombreux. Ces galets ont été marqués par inclusion d'un élément de tantale-182 activé dans un orifice obturé ensuite par de la paraffine. Les trois lots de traceurs ont été immergés dans le Rhône en eaux moyennes, aux points repérés par A, B et C sur la figure 2 : les plus gros galets au point amont A, les galets moyens en C à l'intérieur de la courbe où le charriage est moins important et les plus petits galets au point B, dans la mouille.

Trois détections ont été effectuées par la suite : en basses eaux, peu de temps après l'immersion des traceurs, puis après une crue de  $2\ 700\ m^3/s$  et enfin après une crue de  $3\ 200\ m^3/s$ . Ces débits croissants ont permis de déterminer la force tractrice de début d'entraînement des trois catégories de galets utilisées et mis en évidence la variation du coefficient d'entraînement A des matériaux avec leur diamètre ; pour le cas particulier du Rhône en aval de Lyon ce coefficient varie sensiblement en fonction inverse du diamètre et tend vers une limite de 0,02 pour les plus gros galets.

Cette méthode de calcul a donné des résultats encourageants. Elle est d'un emploi relativement simple, mais sa précision est évidemment liée à celle de la formule de charriage utilisée dont on ne fait que préciser par l'expérience certains paramètres.

Elle n'est valable par contre que pour des cours d'eau de régime hydrologique régulier, exempts de crue subites et violentes qui balayent les fonds et dispersent brutalement le traceur.

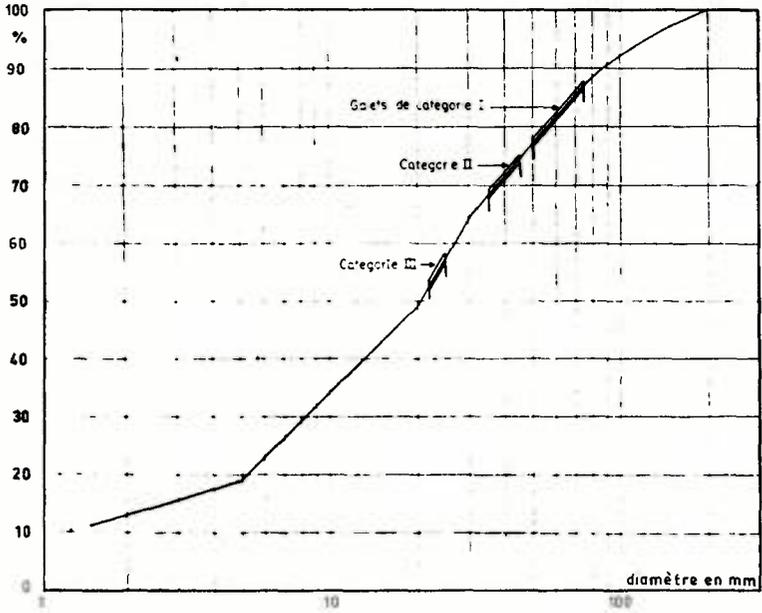


Figure 1 - Courbe granulométrique du Rhône à Pierre-Bénite.

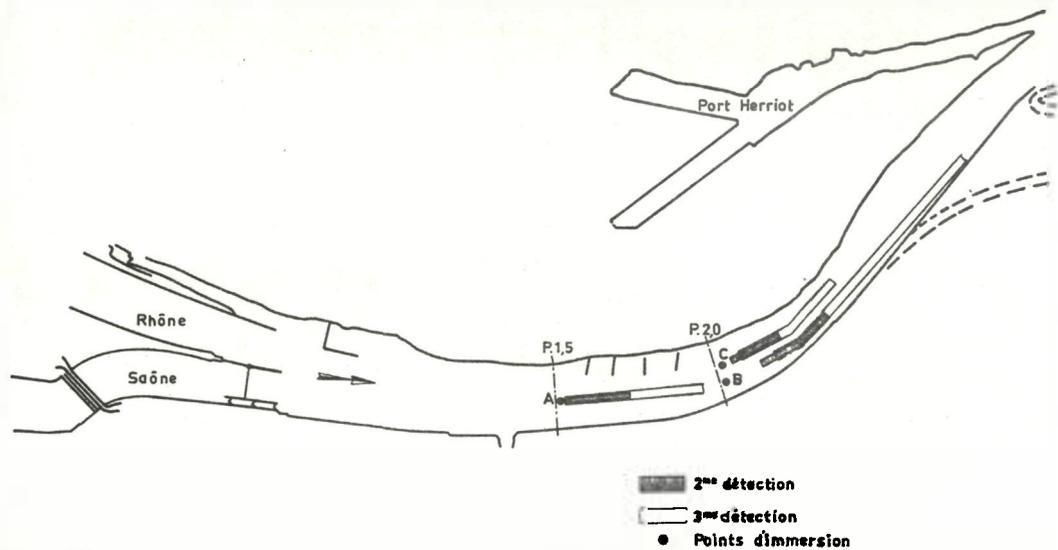


Figure 2 - Points d'immersion et zones de dispersion des galets.

Une campagne de mesures analogue vient d'être achevée également sur le Rhône en aval d'Avignon. Il n'est cependant pas possible de faire état pour encore des résultats obtenus.

### III.2 Méthodes directes

#### Résultats de l'étude expérimentale en Laboratoire.

En principe, il devrait être possible de transposer à la mesure du débit solide les différentes méthodes utilisées couramment pour la mesure des débits liquides à l'aide de traceurs injectés :

- soit de façon continue (méthode de dilution)
- soit instantanément (méthode d'intégration et méthode dite " du centre de gravité").

La méthode de dilution, qui nécessite de grandes quantités de traceurs et des campagnes de mesures longues et coûteuses, semble avoir pour l'étude du charriage un champ d'application plus restreint que les méthodes utilisant une injection instantanée.

L'étude expérimentale menée au Laboratoire s'est limitée à ce deuxième type de méthodes. Des essais effectués dans un canal à fond mobile permettent d'étudier la dispersion d'un lot de grains marqués, immergés initialement en une seule fois. Il est possible de chercher ensuite comment interpréter ces détections pour en déduire le débit solide, et de comparer les résultats avec le débit solide mesuré directement.

Trois séries d'essais ont été effectuées dans un canal long de 45 m, large de 1,5 m, avec trois types de matériau de fond : du galet naturel concassé à deux granulométries et du noyau d'abricot broyé.

Les caractéristiques d'écoulement étaient choisies de telle sorte que le charriage se fasse avec dunes ou rides. Les dunes sont des ondulations du lit de grandes longueurs d'onde, espacées assez régulièrement; la face amont d'une dune est de faible pente tandis que la face aval est abrupte. Les rides se présentent sous l'aspect de petites ondulations fortement cambrées, en forme de croissants, imbriquées les unes dans les autres. Les processus de progression de ces deux types d'ondulation sont identiques :

les grains de matériau arrachés sur le dos d'une ondulation s'accablent au pied de celle-ci, et ainsi l'ondulation semble se translater en bloc vers l'aval ; à un instant donné, seules les particules superficielles du lit participent au charriage ; les grains de matériau enfouis restent en place jusqu'à ce que, l'ondulation ayant progressé, ils soient mis à découvert.

Le traceur était constitué par un échantillon du matériau de fond, marqué en surface par de la peinture lumineuse ; ce traitement n'affecte aucunement les caractéristiques géométriques et physiques des particules (granulométrie, poids spécifique, vitesse de chute en eau calme).

Le tableau 1 ci-après donne les caractéristiques principales de ces essais et des matériaux de fond utilisés.

Pour ces premiers essais, les traceurs lumineux furent préférés aux traceurs radioactifs en raison des facilités d'utilisation qu'ils présentent en laboratoire. Il s'agissait en effet d'étudier le déplacement des grains marqués, indépendamment du mode de marquage utilisé.

La détection des traceurs de surface était effectuée par photographie des fonds du canal en lumière ultraviolette. Pour déterminer la concentration en traceurs dans la couche de matériau en mouvement des carottages furent réalisés à l'aide de tubes à mince paroi ; la hauteur "active" des carottes contenant des particules marquées était notée sur le champ tandis que le comptage des grains de traceurs dans la carotte active était effectué ultérieurement.

La comparaison, qualitative seulement, des concentrations verticales moyennes et des concentrations superficielles ne fait pas apparaître de corrélation particulière entre les répartitions des traceurs en profondeur et en surface.

Les figures 3 et 4 indiquent, à titre d'exemple, les répartitions longitudinales de traceurs obtenues après divers temps d'essai. Les fluctuations observées au voisinage de la source de traceur sont importantes, plus spécialement dans le cas d'un lit avec dunes (Fig. 3), car

TABLEAU 1

## Caractéristiques moyennes des essais et des matériaux de fond

Série d'essais n°	400	422	430
Immersion de traceurs n°	1 et 2	3	4
Matériau de fond	galet concassé	noyau d'abricot	galet concassé
diamètre moyen du matériau (mm)	0,52	2,72	0,30
Poids spécifique du matériau (g/cm <sup>3</sup> )	2,61	1,33	2,61
Débit liquide (l/h)	360	300	360
Pente de la ligne d'énergie	$0,32 \times 10^{-3}$	$0,22 \times 10^{-3}$	$0,23 \times 10^{-3}$
hauteur d'eau moyenne (cm)	51,2	50,9	59,7
Débit solide (l/h)	20	71	4,5
Longueur d'onde moyenne des dunes ou rides (cm)	110 (dunes)	170 (dunes)	24 (rides)
Amplitude moyenne des dunes ou rides (cm)	4,0	2,9	1,9

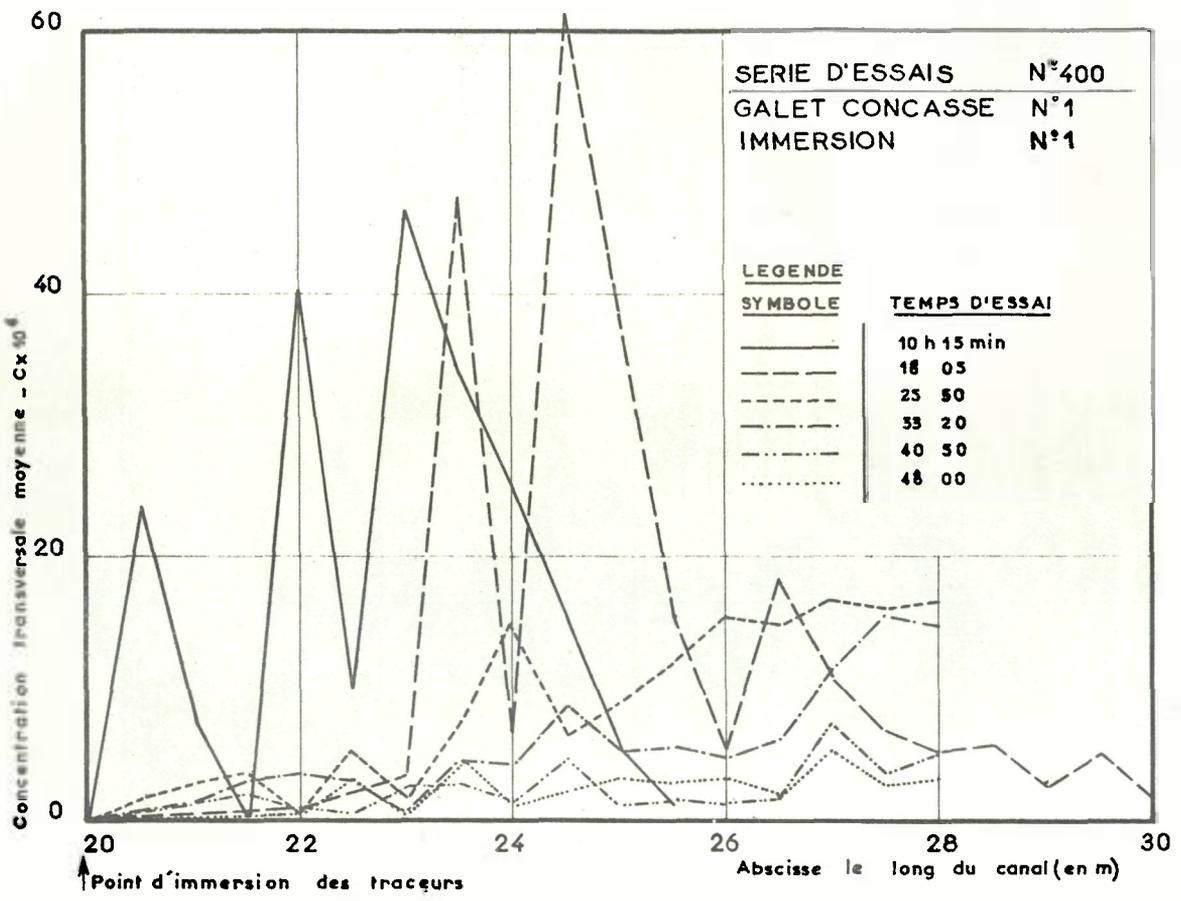


Figure 3 - Dispersion longitudinale des traceurs.

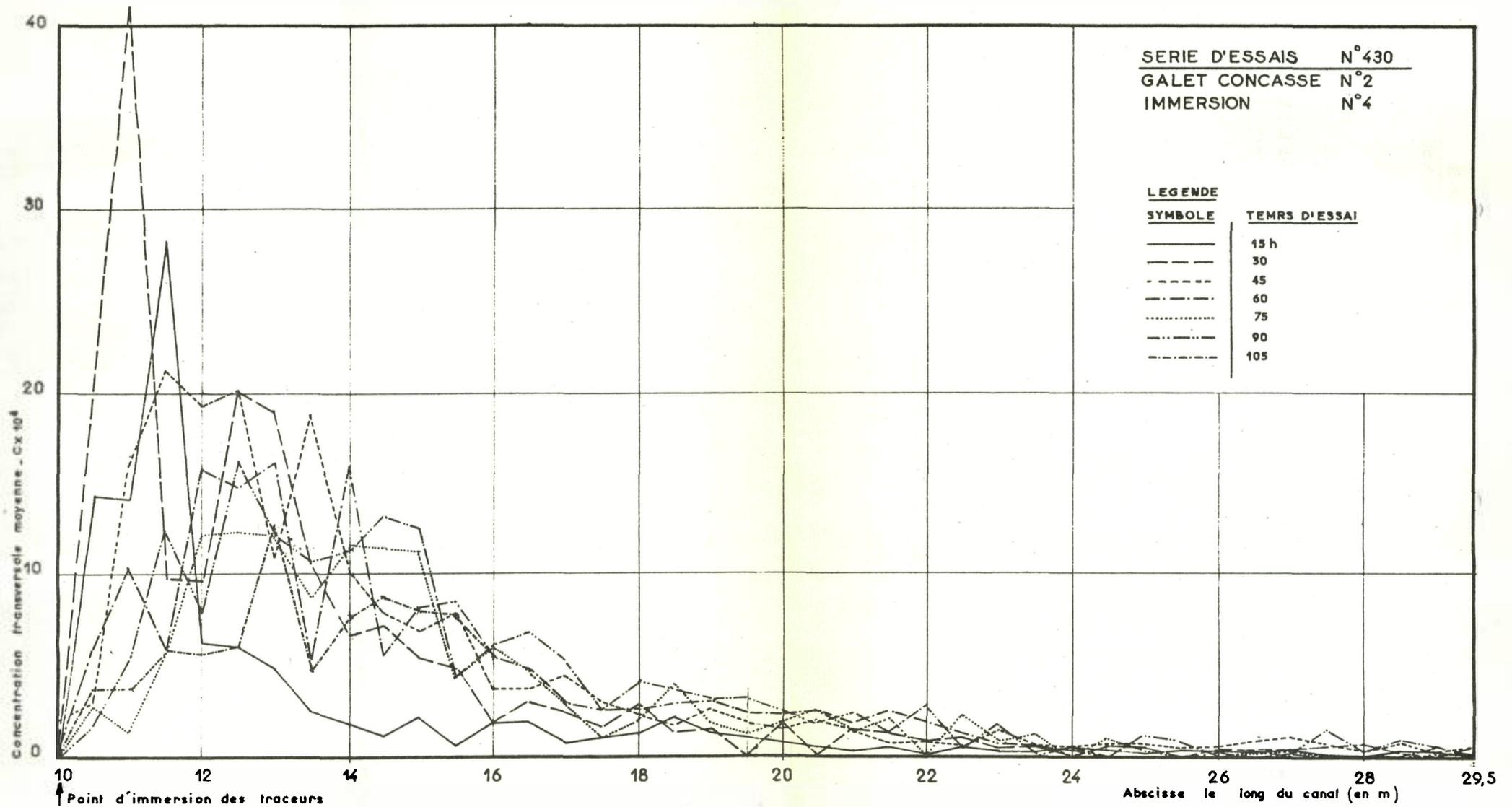


Figure 4 - Dispersion longitudinale des traceurs.

l'homogénéité du mélange en traceur est loin d'être réalisée tant longitudinalement que transversalement au voisinage de la source de traceurs : longitudinalement, les grandes longueurs d'ondes des dunes ne sont pas favorables à un brassage rapide des traceurs dans la couche de matériaux charrié ; et puisque les dunes ne présentent pas un front rectiligne transversal mais sont toujours plus ou moins déformées, l'on note de fortes concentrations au pied d'une dune où s'accablent les particules marquées alors qu'en un point voisin du même profil de canal correspondant au dos d'une dune il n'y a que quelques particules de traceur en surface.

A la suite de ces premiers essais ont été examinées les possibilités d'applications de la méthode du centre de gravité, dérivée de la méthode d'Allen pour la mesure des débits liquides, et de la méthode d'intégration dans le temps dénommée également méthode de numération totale. La première méthode interprète la progression du nuage de traceurs tandis que la deuxième est basée sur l'évolution dans le temps des concentrations en traceur dans un profil donné.

### III.2.1 Méthode du centre de gravité

La vitesse de progression du centre de gravité du nuage de traceur est la vitesse moyenne des particules marquées, elle-même égale à celle de l'ensemble des grains naturels entraînés par le courant. Si l'on connaît l'épaisseur moyenne de matériau charrié, sa mesure permet de calculer le débit solide.

Malgré les irrégularités observées sur les répartitions longitudinales en traceurs, la progression de ce centre de gravité (Fig. 5 et 6 \*) est assez régulière.

La vitesse du centre de gravité calculée entre deux détections consécutives peut différer nettement de la vitesse moyenne correspondant à la série d'essais complète. Il est donc nécessaire de multiplier les détections.

---

(\*) Le point d'immersion des traceurs n'a pas été retenu pour le calcul de cette vitesse  $V_g$  car le mode d'immersion utilisé, par plaques superficielles, avait été à l'origine d'une rapide dispersion anormale des traceurs dès la reprise des essais.

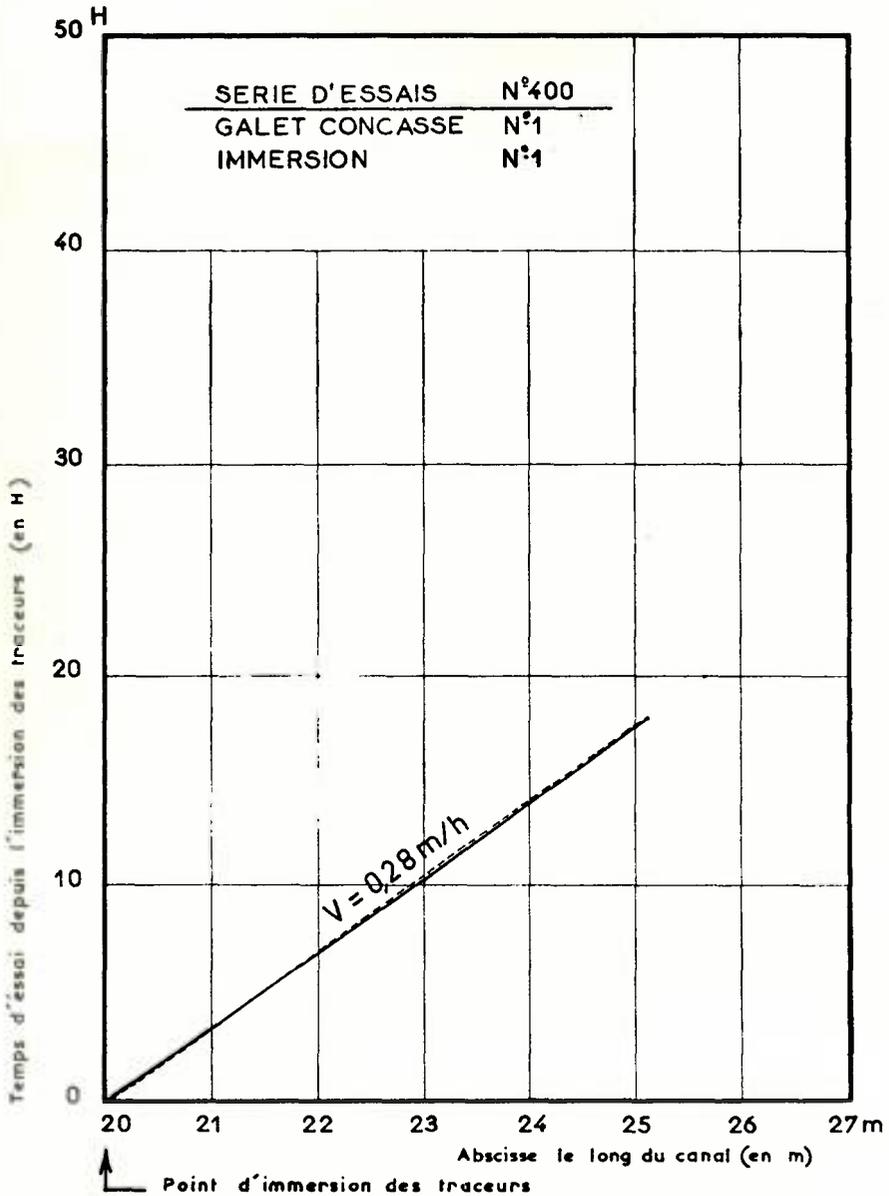


Figure 5 - Progression du centre de gravité du nuage de traceurs.

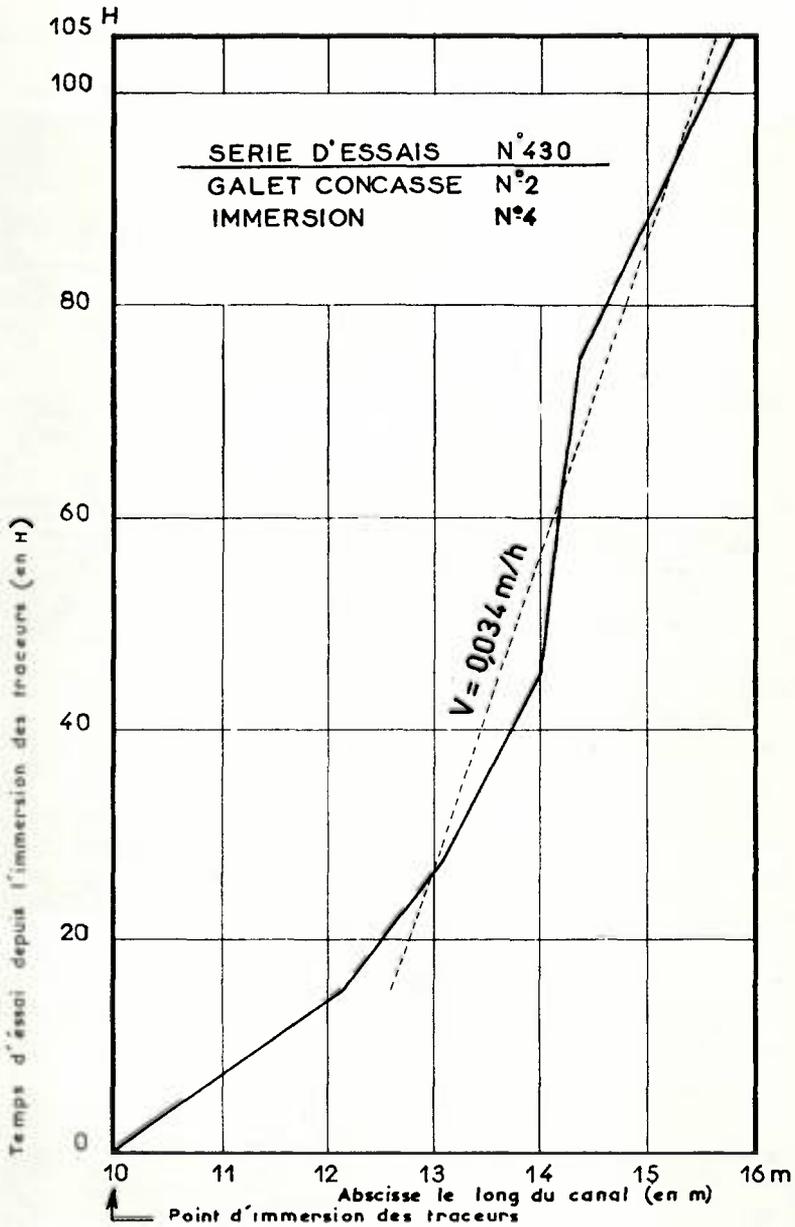


Figure 6 - Progression du centre de gravité du nuage de traceurs.

Le calcul du débit solide à partir de cette vitesse suppose que l'on connaisse ou puisse déterminer l'épaisseur de charriage. Il est en fait difficile de définir l'épaisseur à prendre en compte car, dans le cas d'un transport solide avec des rides ou dunes, les ondulations du fond ne sont pas régulièrement réparties.

L'amplitude des rides ou dunes, déterminée entre crêtes et creux successifs, diffère peu de l'amplitude moyenne calculée à partir d'un relevé de fonds complet du canal. Cette amplitude moyenne permettrait de caractériser l'épaisseur moyenne de la couche de matériau participant au charriage si crêtes et creux successifs étaient régulièrement distribués de part et d'autre de la droite moyenne des fonds. Mais ces ondulations d'aspect uniforme se superposent en fait à un système d'ondulations du lit plus importantes (d'amplitude moyenne double environ) et de caractéristiques très irrégulières échappant à toute analyse statistique. L'amplitude moyenne des rides et dunes est donc bien plus faible que l'amplitude maximum définie entre crêtes et creux extrêmes correspondant à la hauteur maximum de brassage du matériau.

L'épaisseur de la couche de matériau en mouvement à considérer est donc supérieure à l'amplitude moyenne des rides ou dunes. Le débit solide calculé avec ce paramètre est d'ailleurs systématiquement plus faible que le débit solide réellement mesuré (Tableau 2).

Les nombreux carottages effectués dans le matériau de fond font apparaître une certaine hauteur moyenne de matériau en mouvement malgré l'importante dispersion signalée précédemment. La figure 7 indique, à titre d'exemple, les résultats obtenus pour l'immersion de traceurs n° 1 ; la hauteur "active" moyenne des carottes contenant des traceurs évolue peu d'un profil à l'autre, à distance suffisante du point d'immersion des traceurs pour que le brassage vertical ait pu être réalisé ; d'autre part les résultats varient peu d'une détection à l'autre.

Les hauteurs actives maximales notées correspondent à l'amplitude maximale des ondulations irrégulières du lit mentionnées auparavant.

Dans le cas d'un transport solide avec dunes, les débits solides calculés en adoptant pour épaisseur moyenne de la couche de matériau en mouvement la hauteur active moyenne des carottes sont en assez bon accord avec les débits solides mesurés.

TABLEAU 2

Méthode du centre de gravité - Résultats

Série d'essais n°	Immersion n°	Transport solide avec	Amplitude moyenne des rides ou dunes $H_1$ (cm)	hauteur active moyenne des carottes $H_2$ (cm)	Vitesse du centre de gravité du nuage de traceurs $V_G$ (cm/h)	débit solide calculé l/h		débit solide mesuré l/h
						par $H_1 V_G$	par $H_2 V_G$	
400	1	dunes	4,0	5,0	28	17	21	20
	2	dunes	4,0	5,3	18	11	14	20
422	3	dunes	2,9	9,3	56	24	78	71
430	4	rides	1,9	3,3	3,4	1	1,7	4,5

Les essais correspondant aux immersions n°s 1 et 2, bien qu'ayant été menés simultanément, conduisent à des résultats très différents. L'écart entre les vitesses  $V_G$  calculées dans les deux cas semble être dû à un léger basculement des fonds ayant entraîné un exhaussement des fonds en amont ; une certaine quantité de traceurs de l'immersion n° 2 effectuée en amont aurait donc été enfouie et cessé de participer au charriage, faussant de ce fait la courbe de distribution longitudinale des traceurs en mouvement.

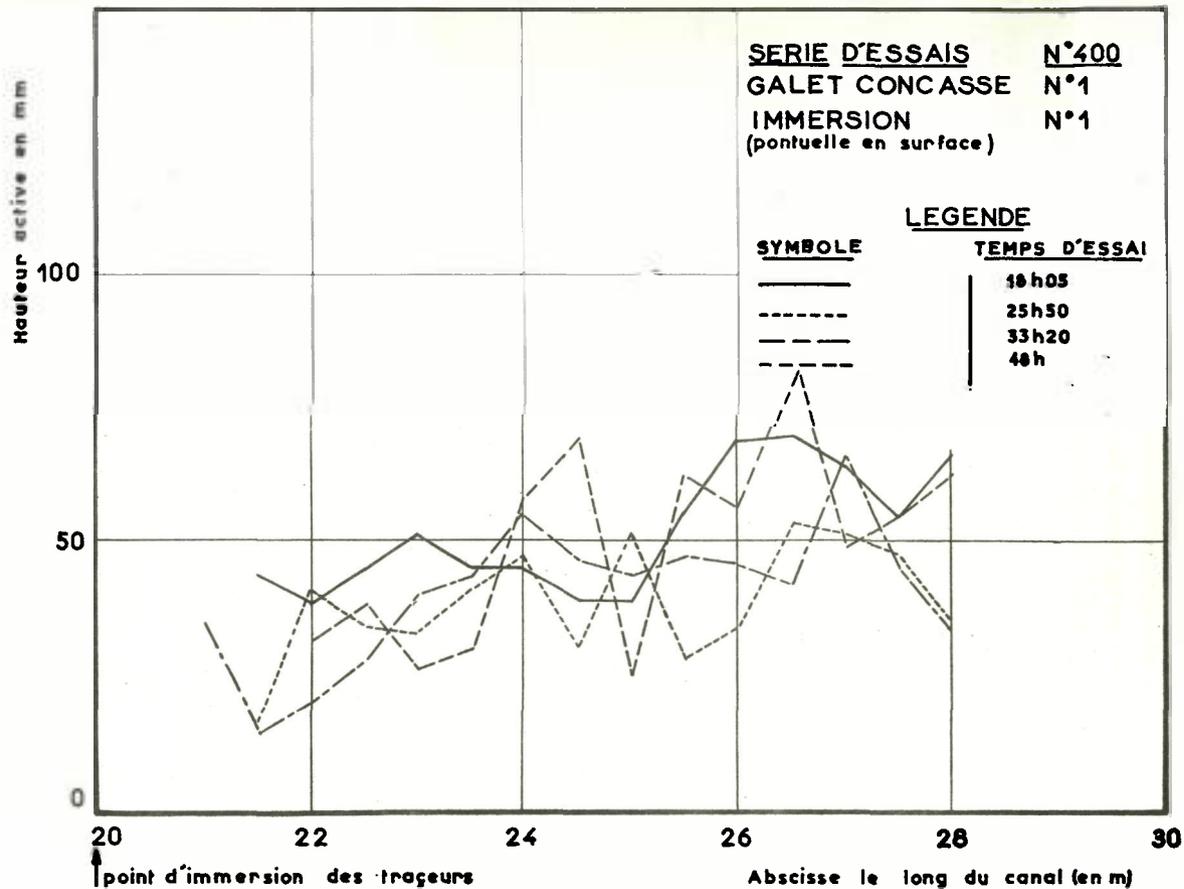


Figure 7 - Hauteur de carottes contenant des traceurs.

Pour l'immersion n° 4, avec rides, le débit solide calculé diffère beaucoup du débit solide réel. Un basculement important des fonds observé au cours de ces essais, avec exhaussement en amont, en est la cause. L'axe de basculement est situé vers le profil X = 21 m. Comme le centre de gravité des traceurs n'avait pas encore atteint ce profil en fin d'essais, de nombreux grains marqués ont dû se trouver immobilisés en dessous de la couche de matériau en mouvement.

Pour les raisons indiquées précédemment, l'adoption de l'amplitude moyenne des dunes ou rides comme épaisseur caractéristique de charriage conduit à une estimation par défaut du débit solide.

### III.2.2 Méthode d'intégration

En un profil suffisamment éloigné du profil d'immersion des traceurs, pour que les conditions de bon mélange soient satisfaites, la masse de traceur M détectée au passage du nuage de particules marquées a pour expression :

$$M = Q_S \int_0^{\infty} C dt$$

$Q_S$  étant le débit solide

C la concentration moyenne en traceurs dans le profil considéré, au temps t.

Et puisque M est la masse de traceur injectée connue, en supposant la saignée d'injection superficielle, c'est-à-dire pratiquée dans la couche de charriage, le débit solide est donné par :

$$Q_S = \frac{M}{\int_0^{\infty} C dt}$$

La vérification de la méthode d'intégration a été effectuée en plusieurs profils transversaux du canal pour lesquels il était possible de calculer l'intégrale  $\int_0^{\infty} C dt$ , c'est-à-dire dans les profils où la presque totalité du traceur était déjà passée. Du fait de la lente progression du

TABLEAU 3

## Méthode d'intégration - Résultats

Série d'essais n°	Immersion n°	Distance du profil de mesure considéré au point d'immersion des traceurs (m)	Q solide calculé l/h	Q solide mesuré l/h
400	1  (dunes)	4	8,2	20
		4,5	4,6	
		5	6,9	
		5,5	12,3	
		6	13,0	
		6,5	8,2	
			<u>Moyenne 8,9</u>	
400	2  (dunes)	1,5	14,0	20
		2	19,9	
		2,5	11,5	
		3	7,4	
		3,5	23,0	
		4	11,8	
4,5	20,4			
			<u>Moyenne 15,4</u>	
422	3  (dunes)	1	364	71
		1,5	69	
		2	228	
		2,5	53	
			<u>Moyenne 178</u>	
430	4  (rides)	1	5,2	4,5
		1,5	5,4	
		2	6,2	
		2,5	3,3	
			<u>Moyenne 5,0</u>	

point de concentration maximale, l'on s'est trouvé limité à quelques profils proches de la zone d'immersion des traceurs.

Comme le montre le tableau 3, les résultats obtenus par cette méthode ne sont satisfaisants que pour le transport solide avec rides (immersion n° 4). Le brassage du matériau de fond est en effet particulièrement énergique avec ce mode de charriage. Compte tenu de la précision propre à la mesure directe du débit solide l'on peut considérer ces résultats comme très valables.

Pour les trois autres immersions, correspondant à un transport solide avec dunes, les débits solides calculés diffèrent beaucoup des débits solides mesurés. Cette divergence tient à deux raisons majeures :

- les profils de mesure considérés sont trop proches des profils d'immersion des traceurs. Le mélange en traceur est donc loin d'être réalisé sur un parcours aussi limité,
- la courbe d'évolution dans le temps de la concentration en un profil donné doit nécessairement comporter des dents de scie en raison même du mode de charriage discontinu par dunes. Des détections fréquentes sont donc indispensables pour pouvoir déterminer l'allure moyenne de cette courbe alors que quelques détections espacées ne permettent pas de déceler avec certitude le passage du centre de gravité du nuage et peuvent entraîner de grandes erreurs.

S'il était possible de détecter le passage du nuage de traceurs de façon continue - par des sondes enfouies dans le fond, par exemple, pour des traceurs radioactifs - la méthode serait sans doute susceptible de meilleurs résultats.

#### IV PROCESSUS DE DISPERSION DE TRACEURS SUR UN LIT PLAT DE GRANULOMETRIE UNIFORME

Les essais en cours au laboratoire dans un long canal vitré (41 m) de faible largeur (0,25 m) ont pour but de déterminer le processus de dispersion de traceurs dans le cas le plus simple d'un lit plat.

Ce processus fondamental correspond sensiblement au phénomène de migration de traceurs sur des fonds constitués de matériaux grossiers, de galets, qui en général présentent un fond régulier exempt de dunes et rides.

Pour des facilités de détection et de comptage des grains, le matériau fut choisi de granulométrie uniforme. Ce matériau est du styvarène lustreux de 3 mm de diamètre moyen dont le poids spécifique est de  $1,06 \text{ g/cm}^3$ .

Les essais sont trop peu avancés pour qu'on puisse en interpréter les résultats. Par contre, le phénomène étant plus simple que dans le cas de rides ou de dunes, il est plus facile de rechercher la loi théorique à laquelle devrait obéir la dispersion du traceur.

#### IV.1 Début d'entraînement de traceurs

Si le régime d'écoulement est permanent et uniforme le fond reste inchangé. Les apports solides d'amont compensent exactement les érosions c'est-à-dire que, en moyenne, le nombre de grains arrachés de l'unité de surface par unité de temps est égal au nombre de grains se déposant sur cette même surface durant ce temps.

Les forces agissant sur un grain de matériau non cohésif reposant sur d'autres grains sont celles de gravité, de portance et traînée exercées par le fluide, et de réaction de contact des grains voisins. Une particule donnée sera entraînée si la vitesse instantanée  $u$  de l'écoulement au niveau de cette particule est supérieure à une certaine vitesse critique  $u_c$ . La vitesse  $u$  sur le fond est soumise à des fluctuations turbulentes dont la courbe de répartition suit une loi normale de Laplace Gauss (11), (12). La vitesse instantanée sur le fond peut, en écoulement turbulent, être de 3 à 4 fois supérieure à la vitesse moyenne.

La probabilité d'entraînement d'un grain est donc la probabilité pour que la vitesse sur le fond soit supérieure à la vitesse critique  $u_c$ . Celle-ci n'est valable que pour un grain déterminé à un instant donné ; elle peut varier notablement avec la position de repos de la particule sur le fond c'est-à-dire selon les réactions des particules voisines.

On peut admettre néanmoins que pour un lit constitué de particules identiques tous les grains ont la même probabilité d'entraînement dans l'unité de temps si cette base de temps est suffisamment grande eu égard à la période moyenne des pulsations turbulentes de l'écoulement.

La répartition initiale de traceur déposé sur le fond est supposée uniforme, la densité étant de  $n$  grains par unité de surface.  $N$  désignant par ailleurs le nombre de grains, marqués ou non, par unité de surface du lit et  $A$  le nombre de particules arrachées par unité de temps à l'unité de surface, il y a  $C_N^A$  possibilités de prélever  $A$  particules de l'unité de surface par unité de temps. Si  $z$  est le nombre de grains marqués entraînés, le nombre de prélèvements différents de composition ( $z$  particules marquées,  $A - z$  particules non marquées) qu'il est possible de réaliser est  $C_n^z C_{N-n}^{A-z}$ . La fréquence théorique de tels prélèvements est donc

$C_n^z C_{N-n}^{A-z} / C_N^A$ . La moyenne de cette loi de distribution hypergéométrique est  $A \frac{n}{N}$ , ce qui revient à supposer une répartition des  $A$  particules

entraînées entre les deux catégories de grains marqués et non marqués proportionnellement à leur nombre.

Le nombre élémentaire de particules marquées  $dp$  entraînés par unité de surface pendant le temps  $dt$  est donc :

$$\text{au temps } t = 0 \quad dp = A \frac{n}{N} dt$$

(injection du traceur)

$$\text{et à un temps } t \text{ quelconque : } dp = A \frac{n-p}{N} dt$$

$p$  désignant le nombre de particules de traceur déjà entraînés,

On obtient par intégration :

$$p = n \left( 1 - e^{-\frac{A}{N} t} \right)$$

L'injection de traceur peut être quasi instantanée mais l'émission de traceur sera progressive.

Comme la méthode du centre de gravité exposée précédemment n'est valable que si la masse totale de traceur injectée participe au charriage, il peut donc être nécessaire de poursuivre les détections fort longtemps dans le cas d'un lit constitué de galets peu mobiles.



La distribution des matériaux correspond à une loi binomiale.

La densité de distribution des particules parvenues au temps  $t = m\theta$  dans le profil d'abscisse  $x = (m + kb)\lambda - b$  étant un nombre entier inférieur ou égal à  $m - a$

a donc pour expression :  $\alpha = C_m^b (1-a)^b a^{m-b}$

$$\alpha = \frac{(m + kb)\lambda}{t = m\theta} = \frac{C_m^b (1-a)^b a^{m-b}}{t = m\theta}$$

Après un temps d'essai suffisamment long, tel que  $m\theta(1-a) > 20$  environ, cette fonction de distribution discontinue peut être assimilée à la fonction de distribution gaussienne :

$$\alpha = \frac{e^{-\frac{[b - m(1-a)]^2}{2ma(1-a)}}}{\sqrt{2\pi ma(1-a)}}$$

Après transformations, l'on obtient pour densité de distribution des particules émises en  $x = 0$  au temps  $t = 0$  :

$$\alpha(x, t) = \frac{\mu}{\sqrt{2\pi\sigma^2 t}} e^{-\frac{(x - \bar{v}t)^2}{2\sigma^2 t}}$$

avec  $\mu = k\lambda$

$$\sigma^2 = k^2 \frac{\lambda^2}{\theta} a(1-a)$$

$$\bar{v} \text{ vitesse moyenne d'ensemble des particules } * = \frac{\lambda}{\theta} [1 + k(1-a)]$$

Cette loi de distribution est en tous points semblable à l'équation de diffusion des solutions salines en milieu turbulent :

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{(x - \bar{v}t)^2}{4Dt}}$$

avec  $C$  concentration saline au temps  $t$  dans le profil  $x$

$C_0$  concentration saline au temps  $t = 0$  dans le profil d'injection, choisi comme origine des  $x$

$\bar{v}$  vitesse moyenne de l'écoulement

$D$  coefficient de diffusion turbulente.

Il est alors possible de déterminer à un instant donné  $t$  et dans un profil donné d'abscisse  $x$  la densité de distribution  $C$  résultant des

(\*) En effet, durant le temps  $\theta$ , la fraction  $a$  progresse de  $\lambda$ , la fraction  $1 - a$  progresse de  $(k+1)\lambda$ ; donc le barycentre se déplace de  $[1 + k(1-a)]\lambda$ .

émissions continues de traceurs\* réalisées selon la loi exponentielle trouvée précédemment :

$$p = n \left( 1 - e^{-\frac{\lambda}{N} t} \right)$$

Prenant  $\tau$  pour variable de temps auxiliaire, la densité de distribution  $C(x, t)$  est la somme des densités de distribution élémentaires  $dC$  correspondant aux particules émises aux temps  $\tau$  antérieurs au temps  $t$  considéré.

Au temps  $\tau$ , le nombre de grains émis pendant l'intervalle  $d\tau$  est :

$$dp = A \frac{n}{N} e^{-\frac{\lambda}{N} \tau} d\tau$$

La densité de distribution élémentaire de ces particules au temps  $t$  est :

$$dC = A \frac{n}{N} e^{-\frac{\lambda}{N} \tau} \cdot \mu \frac{e^{-\frac{[x - \bar{v}(t - \tau)]^2}{2\sigma^2(t - \tau)}}}{\sqrt{2\pi\sigma^2(t - \tau)}} d\tau$$

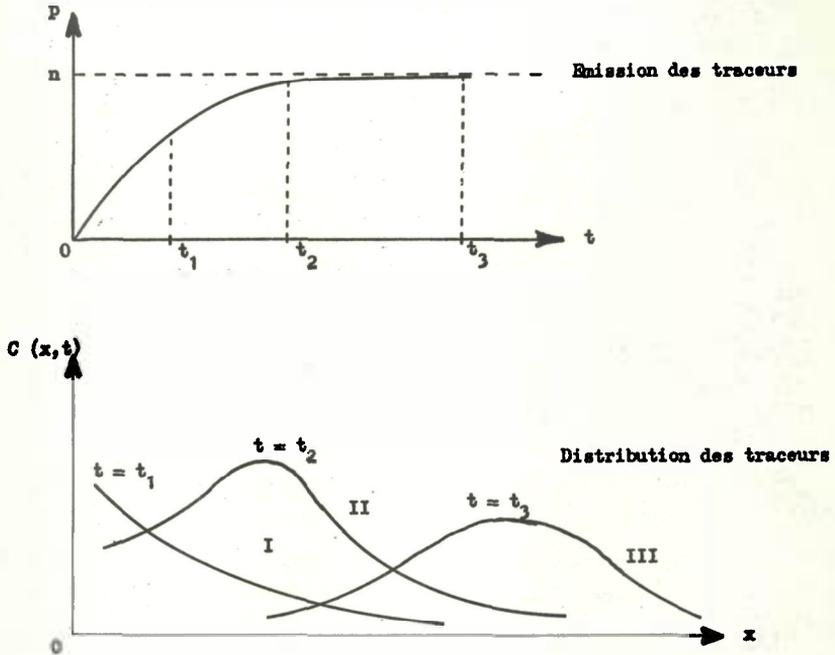
La distribution au temps  $t$  de l'ensemble des traceurs partis de la zone d'injection a donc pour expression :

$$C(x, t) = A \frac{n}{N} \mu \int_0^t \frac{e^{-\frac{\lambda}{N} \tau} e^{-\frac{[x - \bar{v}(t - \tau)]^2}{2\sigma^2(t - \tau)}}}{\sqrt{2\pi\sigma^2(t - \tau)}} d\tau$$

Cette intégrale ne peut être calculée et n'appartient à aucun type classique tabulé ; mais elle peut être traitée aisément par un calculateur électronique.

(\*) L'injection est supposée de surface unité.

Les trois aspects particuliers de la courbe de distribution sont indiqués sur le schéma ci-après.



Si le temps écoulé depuis l'injection des traceurs est faible ( $t = t_1$ ) la plupart des particules marquées n'ont pas encore bougé ; la courbe de distribution des traceurs est du type I.

Quand la presque totalité des traceurs est émise ( $t = t_2$ ) l'on obtient une courbe du type II.

Le temps d'essai augmentant ( $t = t_3$ ), la courbe de distribution (III) tend vers une courbe de Gauss comme il est aisé de le vérifier à partir de l'expression de  $C(x, t)$ , puisque si  $t \rightarrow \infty$   $t - \tau \approx t$ .

Des distributions longitudinales du type I et II ont été obtenues en canal d'essai ; pour obtenir une courbe du type III il serait nécessaire de disposer d'un canal de très grande longueur.

#### Remarque

Ce schéma théorique de la dispersion des grains dans un cas simple et idéal se modifie sensiblement en pratique lorsque les circonstances sont plus complexes :

- a) si la granulométrie n'est pas uniforme, on ne peut plus admettre que la probabilité de départ est la même pour tous les grains. Cette probabilité est alors plus ou moins liée avec la vitesse de migration des grains. Dans certains cas (charriage partiel), la probabilité de départ peut être pratiquement nulle pour les grains les plus gros,
- b) dans le cas où les fonds ne sont pas rigoureusement stables, le phénomène change considérablement. Si le lit s'érode, tous les grains partent de la zone d'immersion au bout d'un temps fini ; s'il s'exhausse, certains grains sont enfouis avant d'avoir pu être entraînés, et une partie du traceur est perdue,
- c) dans un lit comportant rides ou dunes, l'émission des grains n'est pas régulière ; elle se produit par bouffées au passage des ondulations,
- d) enfin dans un cours d'eau naturel, la présence de courbures provoque une dispersion transversale, et la non-permanence du débit rend le phénomène irrégulier.

#### V CONCLUSION

Les processus de dispersion de traceurs dans un écoulement et dans la couche de matériaux charriés diffèrent par deux points essentiels : les traceurs liquides sont entraînés par l'écoulement dès leur injection alors que des particules marquées pour la mesure du transport solide ne peuvent être toutes entraînées à la fois ; d'autre part, les limites d'un écoulement sont parfaitement déterminées tandis que l'épaisseur de la couche du matériau de fond en mouvement est mal définie.

La dispersion des grains marqués est influencée en outre par une multitude de facteurs qui compliquent considérablement son étude théorique.

Les essais en canal déjà réalisés montrent notamment l'importance de la stabilité du lit et du régime d'équilibre des fonds sur la précision des méthodes d'évaluation du débit solide. Il sera donc nécessaire de poursuivre de nombreux essais en laboratoire et en nature.

Néanmoins, outre les mesures indirectes de charriage en nature à l'aide de traceurs, les expériences de laboratoire ont déjà montré qu'il était possible, moyennant certaines précautions, d'obtenir une évaluation relativement approchée du débit solide par la méthode d'intégration ou par celle du centre de gravité.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 J. CHABERT - Etude sur place et sur modèle de l'amélioration des conditions de navigabilité du Niger  
VIème Congrès Italien d'Hydraulique et de Constructions Hydrauliques  
Padoue 1959
  
- 2 J. CHABERT et M. REMILLIEUX - Etude de l'amélioration des conditions de navigabilité du Niger dans la République du Mali  
Mémoires et Travaux de la Société Hydrotechnique de France - n° II - 1960
  
- 3 G. COURTOIS - P. JAFFRY et M. HEUZEL - Emploi de traceurs radioactifs pour l'étude du transport solide dans les cours d'eau  
Conference Proceedings, International Atomic Energy Agency, "Radioisotopes in the Physical Sciences and Industry", Copenhagen 1960
  
- 4 P. JAFFRY et M. HEUZEL - Emploi de traceurs radioactifs pour l'étude du transport solide dans les cours d'eau - Association Internationale d'Hydrologie Scientifique - Helsinki - 1960
  
- 5 M. ROUSSELOT et J. CHABERT - Rapport SI-5  
XXème Congrès International de Navigation  
Baltimore U.S.A. - 1961
  
- 6 R. HOURS et P. JAFFRY - Application des isotopes radioactifs à l'étude des mouvements des sédiments et des galets dans les cours d'eau et en mer  
La Houille Blanche n° 3 - 1959
  
- 7 P. JAFFRY et R. HOURS - L'étude du transport littoral par la méthode des traceurs radioactifs  
Cahiers Océanographiques du Comité Océanographique et d'Etude des Côtes  
Vol. IX - n° 7
  
- 8 M. RAUSTTE et M. HEUZEL - Le Rhône à Lyon - Etude de l'entraînement des galets à l'aide de traceurs radioactifs - Mémoires et Travaux de la Société Hydrotechnique de France - n° 1 - 1962

- 9 E. MEYER-PETER et R. MULLER - Formulas for bed load transport  
2ème réunion de l'Association Internationale de Recherches pour Travaux  
Hydrauliques  
Stockholm 1948
- 10 A. NIZERY et G. BRAUDEAU - Variation in grain size distribution of bed load in a river  
section  
Proceedings Minnesota International Hydraulics Convention  
Minneapolis 1953
- 11 A. KALINSKE - Movement of sediment as bed load in rivers  
Transactions American Geophysical Union - Vol 28 - n° 4. 1947
- 12 M. VELIKANOV - Dynamique des écoulements à surface libre  
Leningrad 1949
- 13 M.A. EINSTEIN - The bed load function for sediment transportation in open channel  
flows - 1950
- 14 W. KRUMBEIN - Settling velocity and flume behavior of non spherical particles  
Transactions American Geophysical Union - 1943

Détermination de la pénétration d'un cours d'eau dans  
la mer ou dans un lac

J. GUIZERIX et G. GRANDCLEMENT  
Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble  
Section d'Application des Radio-éléments

Nous pensons qu'il est opportun de rappeler, dans le cadre de cette réunion, l'importance des travaux présentés par E.SOMER au Symposium sur les Applications des Radio-éléments de courte période, à Vienne, en novembre 1962. Ces travaux qui s'inscrivent dans le cadre d'études des rejets d'effluents ont marqué dans ce domaine le passage d'une période pendant laquelle les essais conduisaient à des informations qualitatives à une nouvelle période d'informations quantitatives. Assurément les données qualitatives sur la zone de migration d'effluents avaient et continueront à avoir un intérêt, mais la précision apportée par des résultats quantitatifs marque un net progrès dans la solution de ce problème.

Cette situation, en hydrologie de surface, ne manque pas de nous faire penser aux travaux que poursuivront certains chercheurs en sédimentologie et qui conduiront à la connaissance de débits de matières solides.

E.SOMER applique une méthode chère aux électroniciens, peut-être sans en être tout à fait conscient. Une injection ponctuelle d'activité est faite au point de rejet d'effluent existant ou projeté (fonction delta). La connaissance des variations de concentration d'activité en un point quelconque permet de calculer la concentration de l'effluent en ce point pour un rejet permanent (fonction de transfert). La généralisation de cette méthode permet d'obtenir la même information pour un régime quelconque de rejet.

La méthode que nous proposons est une application de ce type de mesure au problème de la détermination de la pénétration d'un cours d'eau dans la mer ou dans un lac.

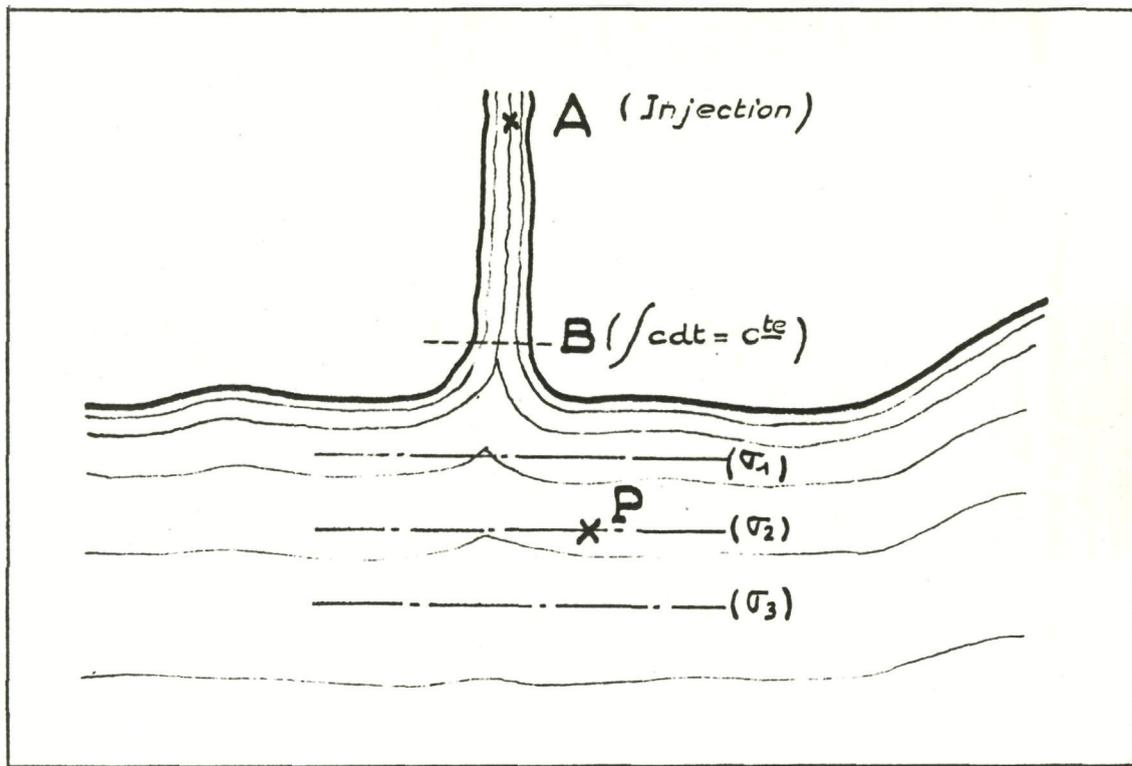


Figure 1 - Injection ponctuelle de solution active réalisée au point A du fleuve, telle que la condition de bon mélange dans la section B du fleuve soit réalisée.

Elle devient intéressante au regard des méthodes basées sur une courantométrie classique lorsque les vitesses deviennent faibles. Une injection ponctuelle de solution active est réalisée en un point A du fleuve telle que la condition de bon mélange dans la section B du fleuve avant son embouchure soit réalisée :

(Fig. 1)

$$\int_0^T C dt = \text{constante}$$

C : concentration ponctuelle et instantanée du traceur dans la section B

T : temps minimum nécessaire pour que toutes les particules actives passent dans la section de mesure B

Soit un point P dans la mer ou le lac; on désire connaître la concentration  $C_p$  en ce point due au marquage hypothétique uniforme de l'eau du fleuve à une concentration  $C_0$  (régime permanent).

Ecrivons qu'une variation différentielle de la concentration  $C_p$  est due à la somme des variations différentielles des débits d'activité dans les tubes de courant de la section B.

$$dC_p = \frac{C_0 q_1 C_1(t) dt}{A_1} + \frac{C_0 q_2 C_2(t) dt}{A_2} + \dots + \frac{C_0 q_i C_i(t) dt}{A_i}$$

$q_i$  : débit du tube de courant d'indice  $i$   
 $C_i(t)$  : variation de concentration en P due à l'activité  $A_i$  ayant traversée le tube de courant  $i$

Or nous avons :

$$\frac{\int_0^T C dt}{T} = \bar{C} = \text{constante}$$

et :  $A_i = q_i C T$

$$d'où : C_p = \frac{C_0}{\bar{C} T} \sum_{t=0}^{t_{\infty}} \sum_{i=1}^{i=n} C_i(t) dt$$

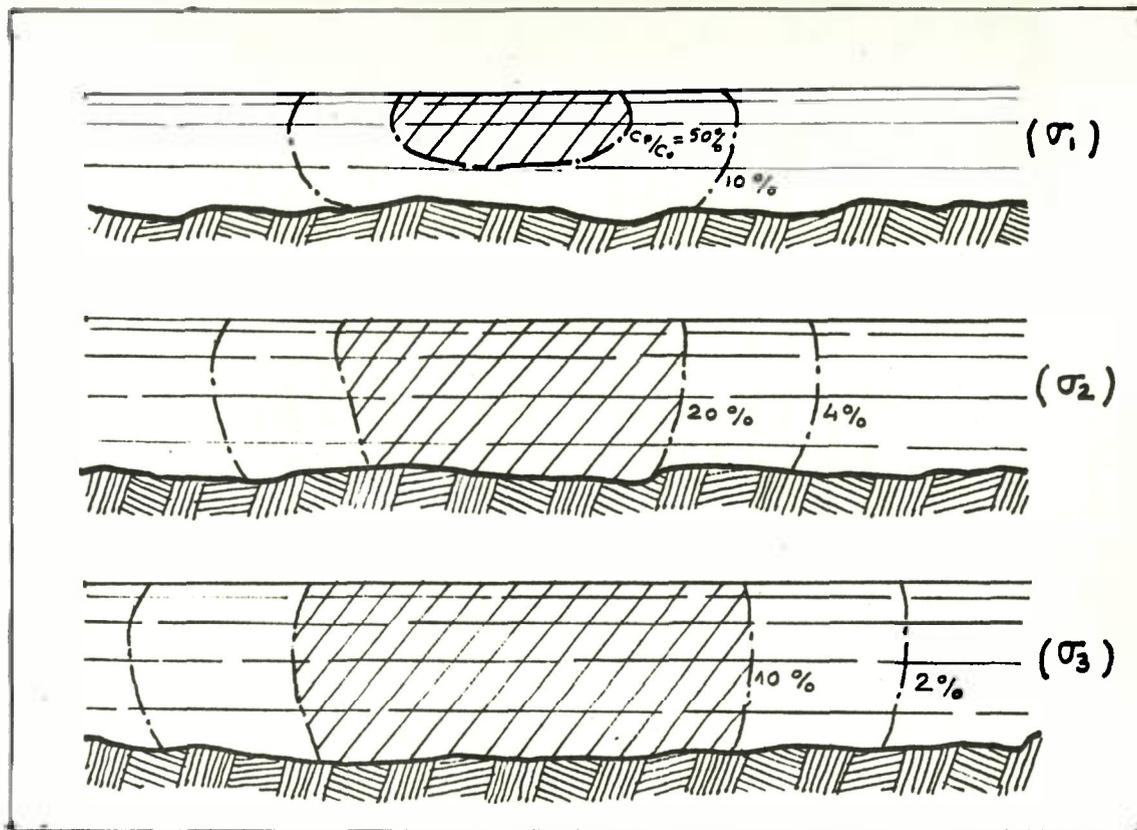


Figure 2 - Détermination des courbes d'isoconcentration de l'eau de la rivière dans l'eau de mer.

La sommation des concentrations liées aux divers tubes de courant est directement faite dans une sonde de détection placée en P. Il vient :

$$\frac{C_p}{C_o} = \frac{\int_0^{\infty} C_p(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt}$$

L'intégrale  $\int_0^{\infty} C(t) dt$  est également déterminée par exemple à l'aide d'une sonde de détection placée dans la section B.

Si des mesures de variation de concentrations sont effectuées dans des sections telles que  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ... on peut déterminer dans ces sections les courbes d'isoconcentration de l'eau de la rivière dans l'eau de mer, et, par conséquent, on peut préciser la pénétration du cours d'eau dans la mer (Fig. 2).

En pratique la mesure sur une base telle que  $\sigma$  est faite en balayant cette section avec une sonde immergée depuis une embarcation. Un problème de repérage se pose. E.SOMER le résoud en mer à l'aide d'un système de navigation D.E.C.A. Nous avons utilisé sur un lac un câble portant tous les 10 m un flotteur-repère et amarré sur les rives.

### Conclusion

Nous avons tenu à mettre en relief l'intérêt de la méthode de E.SOMER.

Nous pensons que l'application de cette méthode, plus sans doute que celle de l'exemple cité, devrait trouver en sédimentologie un champ d'application fructueux.

Détermination quantitative des mouvements de sable

G. SCHULZE-PILLOT

Isotopen Laboratorium  
 Farbwerke Hoechst AG., Francfort-sur-le-Main

1. Détermination de la quantité de sable transportée, compte tenu du fractionnement des grains dans le cas de grains marqués superficiellement

Lors de l'étude des mouvements de sable au moyen de marquage radio-actif, on détermine la quantité de sable transportée à partir de l'équation d'activité spécifique de l'échantillon de sable,

$$(1) \quad a_p = \frac{a_o \cdot g_m}{g_p}$$

comme étant :

$$(2) \quad g_m = g_p \cdot \frac{a_p}{a_o}$$

Dans ces équations :

- $a_p$  = l'activité spécifique de l'échantillon de sable
- $a_o$  = l'activité spécifique du sable marqué
- $g_m$  = le poids du sable marqué contenu dans l'échantillon
- $g_p$  = le poids global du sable de l'échantillon

La détermination de la quantité de sable transportée d'après l'équation (2) est valable à la condition que l'activité spécifique  $a_o$  du sable marqué reste constante pendant le mouvement. Cette condition n'est toutefois remplie, lors de l'emploi de sable marqué superficiellement, que si la répartition des grains du sable marqué n'est pas modifiée par le mouvement. Etant donné que lors du marquage superficiel, l'activité spécifique des grains décroît conformément au rapport surface-volume, à mesure qu'augmentent leurs dimensions, l'activité spécifique moyenne est fonction de la répartition des grains.

Si, lors du mouvement, le sable marqué est fractionné, de façon que, par exemple, ce soient les grains de petites dimensions qui sont transportés de préférence, le barycentre de la répartition par tailles se déplace vers les grains de moindre dimension. De ce fait, l'activité spécifique moyenne du sable marqué passe de  $a_0$  à une valeur  $a'$ , de sorte que, conformément à l'équation (1), l'activité spécifique de l'échantillon passe elle aussi à une nouvelle valeur  $a'_p$ . On a alors, d'après l'équation (2), une valeur trop élevée pour la quantité de sable marqué contenue dans l'échantillon :

$$\varepsilon_m' = \varepsilon_p \cdot \frac{a_p'}{a_0}$$

Dans cette équation, le numérateur représente l'activité spécifique  $a_p'$  mesurée dans l'échantillon, tandis qu'on est obligé de prendre pour dénominateur l'activité spécifique  $a_0$  du sable marqué mesurée avant mélange, étant donné qu'il n'est pas techniquement possible de déterminer une modification de l'activité spécifique moyenne du sable marqué due au fractionnement, ni, par conséquent, d'en tenir compte lors du calcul de la quantité de sable transportée. Si ce sont en revanche les grains de grande dimension qui sont transportés de préférence, on obtiendra une valeur trop petite pour la quantité de sable marqué contenue dans l'échantillon.

Afin d'exclure ces erreurs dues au fractionnement des grains lors du mouvement du sable, il convient de procéder à la détermination de la quantité de sable marqué d'après l'équation (2) séparément pour chaque catégorie de grains. Les différentes valeurs de l'équation (2) sont maintenant réduites à une fraction  $i$

$$(2a) \quad \varepsilon_{m,i} = \varepsilon_{p,i} \cdot \frac{a_{p,i}}{a_{0,i}}$$

et la quantité totale de sable marqué contenue dans l'échantillon est obtenue en additionnant toutes les fractions :

$$\varepsilon_m = \sum_i \varepsilon_{m,i}$$

Les valeurs  $a_{p,i}$  et  $a_{o,i}$  ne représentent des valeurs moyennes de l'activité spécifique de l'échantillon et du sable marqué mélangé que pour des intervalles limités. Ces intervalles doivent être choisis suffisamment réduits pour que d'éventuelles modifications de la répartition des grains ne puissent influencer sensiblement sur les valeurs moyennes de l'activité spécifique dans les différents intervalles. Il s'ensuit que l'écart des intervalles est donné par les limites d'erreur admissibles de la méthode de détermination considérée dans son ensemble. Ces intervalles deviennent relativement plus serrés à mesure que diminuent les dimensions des grains, l'activité spécifique des grains marqués superficiellement augmentant brusquement ( $D^{-1}$  pour des grains de forme sphérique) à mesure que diminuent les dimensions des grains.

Il résulte de l'équation (2a) que la détermination de la quantité de sable transportée dans les différentes catégories de grains est indépendante de la répartition des grains du sable inactif auquel s'est mélangé le sable marqué. Le produit  $g_{p,i} \cdot a_{p,i}$  représente l'activité contenue dans la fraction  $i$  de l'échantillon. Cette activité reste constante lorsque l'on modifie la répartition des grains du sable inactif, c'est-à-dire la proportion de sable inactif dans la fraction  $i$ .

En conclusion, on constate qu'il est possible de déterminer, à l'aide de sable marqué superficiellement, les quantités de sable transportées lors du mouvement. A cet effet, il y a lieu de prélever un échantillon pour chaque point de mesure et de déterminer séparément, pour les différentes catégories de grains, l'activité spécifique du sable. A partir du rapport existant entre l'activité spécifique de l'échantillon et du sable marqué mélangé, on obtient les quantités de sable marqué contenues dans les différentes fractions et, par conséquent, la répartition des grains de sable marqué au point de prélèvement. Une comparaison de cette répartition avec celle du sable marqué mélangé indique les types de grains qui sont transportés de préférence. En additionnant les différentes fractions, on obtient la quantité globale de sable marqué transportée au point de prélèvement.

Etant donné qu'il est tenu compte, dans la fraction la plus réduite, des particules fines dues au frottement provoqué par la migration, on exclut ainsi, lors de la détermination de la quantité de sable transportée, toute erreur qui pourrait provenir de l'activité spécifique plus élevée de ces particules. Les résultats de cette méthode sont eux aussi indépendants de la répartition des grains de sable inactif auquel s'est mélangé le sable marqué.

Le prélèvement d'échantillons de sable semble être en tout cas indispensable à une détermination quantitative du sable transporté, étant donné que la répartition du sable marqué dans le fond du lit n'est pas connue en détail et que, par conséquent, une mesure effectuée par simple application du compteur ne peut donner un résultat quantitatif.

## 2. Incidence de la quantité de sable marqué sur la précision de mesure

La quantité de sable transportée lors du mouvement est calculée à partir de l'activité spécifique des échantillons. Les limites d'erreurs de ces mesures d'activité sont déterminées par deux fluctuations statistiques indépendantes l'une de l'autre. La première découle de la statistique de désintégration radio-active. Elle est exprimée par l'écart-type relatif  $\sigma_A$  du taux d'activité mesuré :

$$\sigma_A = \frac{1}{\sqrt{n}}$$

n étant le nombre total d'impulsions comptées lors de la mesure. La seconde fluctuation est due, lors de la dilution du sable marqué dans le sable inactif, à la répartition statistique des grains de sable marqué parmi les grains inactifs. De même que pour la statistique de désintégration radio-active, on peut exprimer cette fluctuation, lorsque le nombre de grains n'est pas trop petit, sous forme d'écart-type relatif :

$$\sigma_K = \frac{1}{\sqrt{k}}$$

k représentant le nombre de grains marqués contenu dans l'échantillon de mesure.

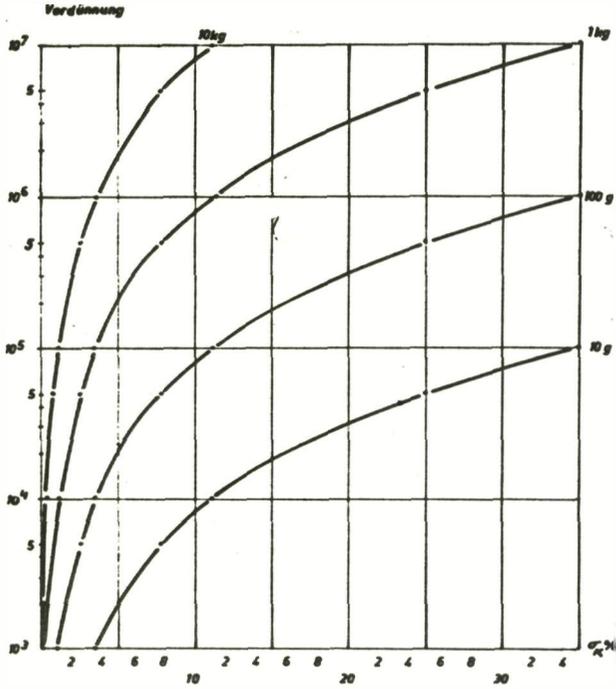
Ces deux fluctuations donnent ensemble la fluctuation globale suivante :

$$\sigma = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_K^2}$$

Sur la base de cette relation, on peut calculer pour des valeurs données de  $\sigma$  et de  $\sigma_A$ , à partir de  $k = 1/k^2$ , le nombre nécessaire de grains marqués dans l'échantillon de mesure et l'on obtient, avec  $K$ , le nombre total des grains de l'échantillon précité, le taux maximal de dilution  $V_{\max} = K/k$ , qui peut être déterminé avec la précision voulue. La figure 1 montre  $V_{\max}$  fonction de  $\sigma_K$  pour des échantillons effectifs de 10 g à 10 kg. Par échantillon effectif, on entend l'échantillon corrigé de l'auto-absorption et des pertes d'angle solide.

Aux fins de programmation expérimentale, on peut évaluer, à partir du taux maximal de dilution  $V_{\max}$ , en supposant un mélange idéal du sable marqué avec le sable inactif, pour une zone de dispersion d'une superficie et d'une profondeur déterminées, la quantité minimale de sable marqué indispensable pour déterminer avec la précision de mesure voulue l'activité spécifique des échantillons et, partant, la quantité de sable transportée.

Les formules indiquées donnent en outre les limites d'erreur pour la détermination de la quantité de sable transportée, sur la base de l'activité spécifique des échantillons, le taux de dilution résultant en première approximation de la mesure de l'activité.



**Figure 1** - Taux maximal de dilution en fonction de la fluctuation  $\sigma_K$  pour des échantillons de différents volumes.

Résultats de l'enquête du Commissariat français à l'énergie  
atomique sur la portée économique des  
substances radio-actives

G. ROBIN

Société L'Atome Industriel, Paris

La Société L'Atome Industriel a effectué en 1962 une enquête sur l'utilisation des radio-éléments dans la recherche et l'industrie. Cette enquête avait donc une portée très générale et elle a recensé plus d'un millier d'applications très diverses des radio-éléments. Parmi toutes ces applications en France, nous avons trouvé 176 applications de traceurs radio-actifs. Ce nombre est probablement inférieur à la réalité, car un recensement n'est jamais complet à cent pour cent. Sur ce nombre, seulement une petite quantité d'opérations ont concerné l'hydrologie et la sédimentologie, et malheureusement, nous n'avons pas pu faire la distinction entre les deux à cette époque. Il s'agit d'une dizaine d'applications qui ont été effectuées jusqu'à la fin de 1961 et probablement pour moitié il s'agissait de transport de solides dans l'eau. Ces applications ont été d'ailleurs pour la totalité effectuées par le laboratoire d'hydraulique de l'E.D.F. et le Commissariat à l'énergie atomique.

D'après les renseignements qui nous ont été communiqués, il faut évidemment distinguer plusieurs cas : il y a le cas des travaux fluviaux, portuaires ou maritimes et dans ce cas, on peut dire que le coût des expériences avec traceurs radio-actifs ne représente que 1 à 5 % du coût de l'étude générale qui peut comprendre la construction de modèles réduits. Il s'agit en général de travaux de très grande ampleur, mettant en jeu des sommes considérables et le coût de l'étude par modèle réduit ou par traceur n'est évidemment qu'une faible partie du coût d'exécution des travaux. La rentabilité de ces études est donc assez facile à obtenir puisque dans les cas qui nous ont été cités, par exemple, le port de Bayonne, les projets ont été modifiés en fonction des résultats des études hydrauliques qui ont été faites, et des économies considérables ont été obtenues sur le coût des travaux.

L'emploi des traceurs radio-actifs dans la nature entraîne l'emploi de moyens de transport, des bateaux ou des hélicoptères, de personnel, qui sont également entraînés par les autres méthodes. La part de la radio-activité là-dessus, c'est-à-dire l'appareillage de détection et le prix des traceurs, est à peu près négligeable par rapport à toutes les autres dépenses entraînées par le déplacement d'une équipe et par tous les travaux de relevé hydrographique et topographique qui sont nécessaires. Dans les études sur modèle réduit, il est probable que l'emploi des traceurs radio-actifs pourrait également permettre certaines économies, en particulier, s'il s'agit de faire des mesures en continu. Cependant, dans la plupart des cas, on a constaté que le prix de revient des différentes méthodes radio-actives ou non est à peu près du même ordre de grandeur.

Il y a une catégorie d'applications de traceurs radio-actifs extrêmement différente, c'est l'application à l'étude du transport des matières solides dans des installations industrielles.

Le seul exemple qui ait été traité ici à cette réunion c'est celui des installations de purification d'effluents. En France, il n'y a pratiquement pas eu d'application de ce genre bien que des problèmes aient été posés par plusieurs industriels. En particulier, le problème de l'étude du fonctionnement d'un filtre continu en sucrerie. Des problèmes de cette nature sont certainement susceptibles d'être traités de façon très avantageuse au moyen de traceurs radio-actifs.

Le coût de ces essais n'est en effet pas extrêmement élevé. Il faut compter déplacer deux ou trois spécialistes pendant une durée de quelques jours ou une semaine au plus pour les essais. Le prix du traceur radio-actif lui-même est encore négligeable. On devrait développer ce genre d'application car les résultats qui sont obtenus, en quelques jours d'essai, sont certainement susceptibles de remplacer des mesures beaucoup plus longues et beaucoup plus difficiles par les méthodes classiques.

Si ces applications sont cependant peu répandues, c'est probablement moins pour des raisons économiques, que par suite d'un certain manque de spécialistes et d'un manque d'informations sur les possibilités de ces méthodes.

Et c'est en ce sens-là que, les réunions comme celle à laquelle nous participons peuvent être extrêmement utiles car elles servent à la diffusion des connaissances et elles permettent d'envisager de nouvelles applications.

Risques inhérents à l'utilisation des radio-isotopes,  
et mesures de protection requises

M. PETERSEN  
Landesamt für Wasserwirtschaft  
Schleswig-Holstein, Kiel

L'utilisation des nuclides comporte toujours un risque. Il est toujours possible, en se conformant aux mesures de protection requises et en examinant dans chaque cas quelles sont les précautions à prendre, de ramener ce risque à des proportions raisonnables.

Le présent rapport vise à faire connaître les mesures qui ont été prises lors de l'utilisation de sable naturel marqué au scandium-46 pour déterminer les mouvements de sables le long des côtes exposées au ressac. Au cours de cet exposé, il ne sera pas question des opérations en cours au laboratoire radiochimique de Farbwerke Hoechst à Francfort-sur-le-Main.

Lors de l'ouverture du container de protection, lors de la pose du câble porteur et du câble basculeur, lors de l'extraction de la cuve à sable du container et, enfin, lors du survol de l'eau ou de la terre, par vent soufflant dans la direction de la terre, des rayonnements peuvent se produire par suite de circonstances imprévues. C'est pourquoi il faut interdire l'accès du terrain à toute personne étrangère. Les personnes participant directement aux différents travaux ne doivent pas s'exposer inutilement à un danger et doivent donc rester à une distance adéquate de la source de rayonnements. Signalons en outre que ces personnes doivent être munies de plaquettes de protection contre les rayonnements et de dosimètres de poche.

En ce qui concerne les critères qui ont été appliqués lors de la conception et de la fabrication de la cuve à sable et du container de protection destinés au transport de sable marqué, nous renvoyons aux observations de l'auteur, au rapport 7. Les personnes responsables du transport auront intérêt à se munir d'un certain nombre de sacs remplis

de sable qui pourront s'avérer utiles en cas d'accidents de transport et lors du déchargement de la cuve à sable au lieu d'utilisation.

Pour pouvoir apprécier les effets de l'apport de sable marqué sur les baigneurs ou sur les habitants des côtes, nous avons prié l'Institut de biophysique de l'Université de la Sarre à Hambourg de procéder à une expertise. Le Prof. H. Muth est parvenu aux conclusions suivantes :

- Le poids spécifique du sable est de 2,6. 100 kg de sable remplissent un volume de 38,5 l. Le sable apporté se répartira relativement vite sur le sol de la mer. Si l'on part cependant de l'hypothèse extrêmement théorique que l'activité globale de 3 curies de  $Sc^{46}$  agit comme source ponctuelle, la dose à une distance de 2,5 m dans l'eau serait d'environ 0,24 milliroentgen par heure. Comme la profondeur de l'eau est généralement d'environ 3 m, il est possible que les organes les plus radiosensibles (gonades) d'un baigneur qui nage à cet endroit soient exposés à une dose de rayonnement de 0,24 mr/h, c'est-à-dire à une activité d'environ  $0,07 /^{ur}/s$  (microroentgen par seconde). Cette valeur représente environ 1/10 de la dose maximale admissible fixée pour les personnes professionnellement exposées aux radiations, par le décret allemand sur la protection contre les radiations et les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique.

Dans le cas de la méthode d'étude en préparation et compte tenu de l'activité délivrée par le  $Sc^{46}$ , on peut considérer comme exclu tout risque d'irradiation pour les baigneurs ou autres personnes. La dose délivrée par le radionuclide dans l'eau de mer est extrêmement faible et peut donc être négligée. Ce fait est une des conditions requises pour son utilisation technique. Il est également exclu qu'après les expériences en cours, des quantités dangereuses de  $Sc^{46}$  puissent pénétrer dans l'organisme des baigneurs ou autres personnes qui auraient absorbé de l'eau de mer.

Par suite du fond naturel de radiations, les gonades de l'être humain reçoivent une dose d'environ  $11 /^{ur}/h$ . Tout être humain est

exposé à cet effet durant son existence. La valeur de  $5 \text{ }^{46}\text{Sc}/\text{h}$  pour l'activité de 3 curies de  $\text{Sc}^{46}$  derrière 2,50 m d'eau est donc considérablement inférieure à la valeur du fond naturel de radiation. Le Prof. H.Muth conclut son expertise par ces mots : "Les études peuvent donc être effectuées sans danger pour les baigneurs, même au cours de la saison des bains."

Si toutefois l'on déconseille pourtant d'effectuer les études pendant la saison des bains, cela tient au fait que :

1. les mouvements de sables sont relativement peu importants au cours des mois d'été, en raison de la faiblesse des vents;
2. le décollage et l'atterrissage de l'hélicoptère peut faire courir un risque aux nombreuses personnes venues chercher le repos sur les plages.

#### Dispositions concernant l'emploi des radio-isotopes

L'emploi des radio-isotopes implique l'observation des prescriptions en vigueur.

Dans la République fédérale d'Allemagne, la loi atomique est entrée en vigueur le 1er janvier 1960 (1). Cette loi, et particulièrement le premier décret sur la protection contre les radiations du 24 juin 1960 (2), règle le problème de la protection contre les radiations. Les normes d'Euratom, ainsi que les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique, de l'Agence internationale de l'énergie atomique et du Bureau international du travail, ont été prises en considération dans ces textes (3).

Pour la préparation des mesures de sable marin marqué par des radio-isotopes le long des côtes à brisants, deux autorisations ont dû être demandées :

1. l'autorisation de manipuler du scandium-46, en vue du marquage par la firme Farbwerken Hoechst, a été demandée au Ministre du Travail, de la Prévoyance sociale et de la Santé publique du

Land de Hesse par le fournisseur;

2. l'autorisation d'acquérir, de transporter et d'utiliser du scandium-46 non scellé, d'une activité totale de 2 à 3 curies, appliqué et réparti sur 100 kg de sable marin, a été demandée au Ministre du Travail, des Affaires sociales et des Réfugiés du Land de Schleswig-Holstein à Kiel.

Les deux autorisations ont été octroyées temporairement. Les personnes responsables de la protection contre les radiations, au sens du décret sur la protection contre les radiations, sont citées nommément dans les autorisations. Les autorisations comprennent les conditions suivantes :

- Ad. 1. En vue d'assurer le respect des prescriptions légales en matière de garantie, la responsabilité des établissements Farbwerke Hoechst envers le Land de Hesse est engagée jusqu'à concurrence d'une somme déterminée.

Les obligations imposées se rapportent aux travaux faits dans le laboratoire radiochimique, de telle sorte qu'une communication à ce propos est superflue.

- Ad. 2. Le Land de Schleswig-Holstein est responsable de l'exécution des études et n'est pas astreint à la garantie aux termes de la loi atomique.

L'autorisation était subordonnée aux obligations suivantes :

1. dans tous les travaux, il faut se conformer au principe suivant lequel aucune personne ne doit être exposée à une dose d'irradiation plus élevée que ne le permettent la nature et l'étendue de l'autorisation;
2. dans les travaux qui impliquent l'utilisation de matières radioactives non scellées, il faut observer les "Directives pour la protection contre les radiations ionisantes lors de l'emploi et du stockage de matières radio-actives non scellées" (Union professionnelle des industries chimiques, directive n° 19, Protection contre les rayonnements, 1961, éditions Chemie GmbH, Weinheim, Bergstr.) ainsi que les "Mesures de sécurité en cas de manipula-

tion des radio-isotopes" (Recueil de publications du Ministère fédéral de l'énergie nucléaire, Protection contre les rayonnements, n° 14, éditions Gersbach & Fils, Munich);

3. l'accès des postes de travail est interdit à toute personne étrangère;
4. afin que l'expérience puisse se dérouler dans les conditions prévues, il y a lieu de pratiquer, avant le prélèvement du sable activé, un essai à blanc dans des conditions techniques similaires sur du sable normal;
5. pour réduire l'exposition aux rayonnements, le retrait du câble porteur hors du récipient protecteur en plomb doit se faire avec des instruments appropriés, manipulés à distance;
6. durant l'essai sur du sable activé, aucune personne ne doit se trouver dans la direction du vent, derrière le récipient, où elle serait exposée à des projections de sable;
7. le récipient destiné à recevoir le sable doit être conçu de telle manière que le déclenchement du verrouillage du couvercle provoque son ouverture immédiate sous l'eau;
8. le récipient, vidé et rincé, n'est pas chargé immédiatement sur le camion, mais déposé à un endroit approprié, où un expert vérifiera s'il contient encore du sable radio-actif;
9. le cas échéant, le nettoyage du récipient doit être assuré uniquement par un expert en protection contre les radiations, qui observe les mesures de sécurité requises;
10. l'emplacement où le sable marin activé est apporté doit être signalé par une balise recouverte d'une couche de peinture lumineuse bien reconnaissable;
11. les matières radio-actives, manipulées en vertu de cette autorisation, doivent faire l'objet d'une surveillance continue destinée à empêcher tout prélèvement et toute manipulation par des personnes étrangères.

Après la fin des travaux et après chaque journée de travail, les matières radio-actives devront être placées dans un lieu sûr, à l'abri de l'incendie et des voleurs.

Elles ne devront pas être conservées dans des locaux où sont manipulées des matières explosives ou aisément inflammables ou qui sont exposées à des risques d'incendie et d'explosion.

Le sable radio-actif marqué est livré franco lieu d'utilisation, c'est-à-dire jusqu'à proximité de la plage.

Le physicien responsable délégué par le fournisseur dirige les opérations de marquage du sable, accompagne le transport et remet la cuve de sable au chef des recherches, après avoir ouvert le couvercle du récipient de protection et disposé les deux câbles porteurs et le câble basculeur, de telle manière qu'aucune confusion ne soit possible lors de l'accrochage du câble dans la traverse située au-dessous de l'hélicoptère suspendu (voir observations de l'auteur au rapport 16).

#### Bibliographie

- (1) Loi sur l'application pacifique de l'énergie nucléaire et la protection contre ses dangers (loi atomique) du 23 décembre 1959, Bundesgesetzblatt I, p. 814, 1960
- (2) Premier décret sur la prévention des dommages causés par le rayonnement des matières radio-actives (premier décret sur la protection contre les radiations) du 24 juin 1960, Bundesgesetzblatt I, p. 430, 1960
- (3) Questions de droit concernant la protection contre les radiations, P. Gieseke, Droit atomique, 3/4; p. 68-81, 1961

Marquage radio-actif des boues

Premiers résultats du marquage superficiel  
à l'aide de l'or-198, selon la méthode de M. Petersen

G. ANTIER, A. CAILLOT, G. COURTOIS, B. JEANNEAU

Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay  
Section des Applications des Radio-éléments

I - INTRODUCTION

En 1962, M. Petersen présentait une méthode de marquage superficiel des matières pulvérulentes au moyen de l'or-198 (1). Selon ce procédé, l'or, utilisé sous forme de chlorure, est réduit en métal au contact de la surface de la substance à marquer, préalablement traitée par le chlorure stanneux. La fixation serait alors quantitative et la remise en solution de l'ordre de 1 ‰ pour des concentrations de  $10^{-3}$  à  $8.10^{-5}$  mg d'or par mg de substance (dans les cas envisagés par l'auteur: poudre d'aluminium ou ciment). Dans certains cas difficiles (faible surface spécifique ou pas de réactivité au chlorure stanneux), la méthode semble être en défaut et Campbell préconise alors un prétraitement à l'argent, l'argent étant lui-même déplacé par l'or dans une phase ultérieure (2). Dans son article, Petersen décrit quelques applications industrielles de son procédé, mais dans la discussion qui suivit, Watt met en évidence des difficultés d'application notamment dans le traitement du quartz.

Nous avons voulu utiliser la méthode de Petersen pour le marquage radio-actif des boues; le présent rapport décrit le résultat de nos expériences dans ce domaine.

II - SEDIMENTS UTILISES

II.1 - Origine et nature

Les expériences ont été menées sur des sédiments prélevés dans la Gironde, au large de Saint-Christoly.

Ces sédiments contiennent d'assez fortes proportions d'éléments colloïdaux, argileux, sensibles aux phénomènes de floculation. Cependant dans les études qui suivent, les phénomènes de floculation n'ont pas été étudiés systématiquement, et l'on a, autant que possible, traité les sédiments dans l'état de floculation dans lequel on les rencontre dans la nature.

En dehors de la fraction argileuse, on peut trouver dans ces boues, une fraction non négligeable en grains de silice.

## II.2 - Densité

1) Méthode de détermination par pesée d'éléments de volume connu, avant et après dessiccation (24 heures à 110° C).

2) Analyse d'un seul échantillon homogène:  $d_{\text{moy}} = 2,58$  (5 mesures).  
Valeurs extrêmes: 2,55 et 2,62.  
Déviation standard estimée: 0,03.

3) Analyse de divers échantillons, d'un prélèvement de 5 kg, ayant subi une sédimentation pendant le transport:  $d_{\text{moy}} = 2,58$  (4 mesures).  
Valeurs extrêmes: 2,47 et 2,70.  
Déviation standard estimée: 0,07.

## II.3 - Granulométrie

### II.3.1 - Méthode de détermination

1) Fractionnement en 2 parties par tamisage en voie liquide, sur tamis 17 AFNOR (maille 40 $\mu$ ).

2) Pour la fraction supérieure à 40 $\mu$ , le tamisage est fait à sec sur tamis no. 21 (100 $\mu$ ) à 17 (40 $\mu$ ).

3) Pour la fraction inférieure à 40 $\mu$ , a été appliquée une méthode de sédimentation, celle de Cassagrande, basée sur l'utilisation de la loi de Stokes, l'appareillage de mesure sélectionné étant un hydromètre de Bouyouses (3).

### II.3.2 - Résultats

La moyenne des résultats enregistrés fait l'objet des courbes des figures 1 et 2.

La courbe granulométrique (Fig. 1) est tracée sur un papier Gaussien. Elle met en évidence trois familles de sédiments:

- portion  $< 15 \mu$  : argiles  
 proportion massique: 60%  
 diamètre moyen des particules:  $7,5 \mu$   
 écart type de ce diamètre:  $5 \mu$
- portion comprise entre  $15$  et  $40 \mu$  : sablons  
 proportion massique: 22%  
 diamètre moyen des particules:  $26 \mu$   
 écart type de ce diamètre:  $8 \mu$
- portion supérieure à  $40 \mu$  : sables fins  
 proportion massique: 18%  
 diamètre moyen des particules:  $78 \mu$   
 écart type de ce diamètre:  $15 \mu$

Par la figure 2, a été vérifiée la théorie de Rosin - Rammler - Benneth (3), selon laquelle la fraction massique Cd, des particules de diamètre équivalent, inférieure à "d", est:

$$C_d = 1 - e \left( - \frac{d}{d_0} \right)^n \quad \text{do et } n = \text{constantes}$$

caractéristiques du sédiment.

Fonction dont la représentation est une droite dans le système adopté ( $\log - \log (1 - C_d)$ ,  $\log \frac{d}{d_0}$ ).

On trouve alors:  $d_0 =$  indice de grosseur des grains =  $18 \mu$   
 $n =$  indice de dureté des grains = 4

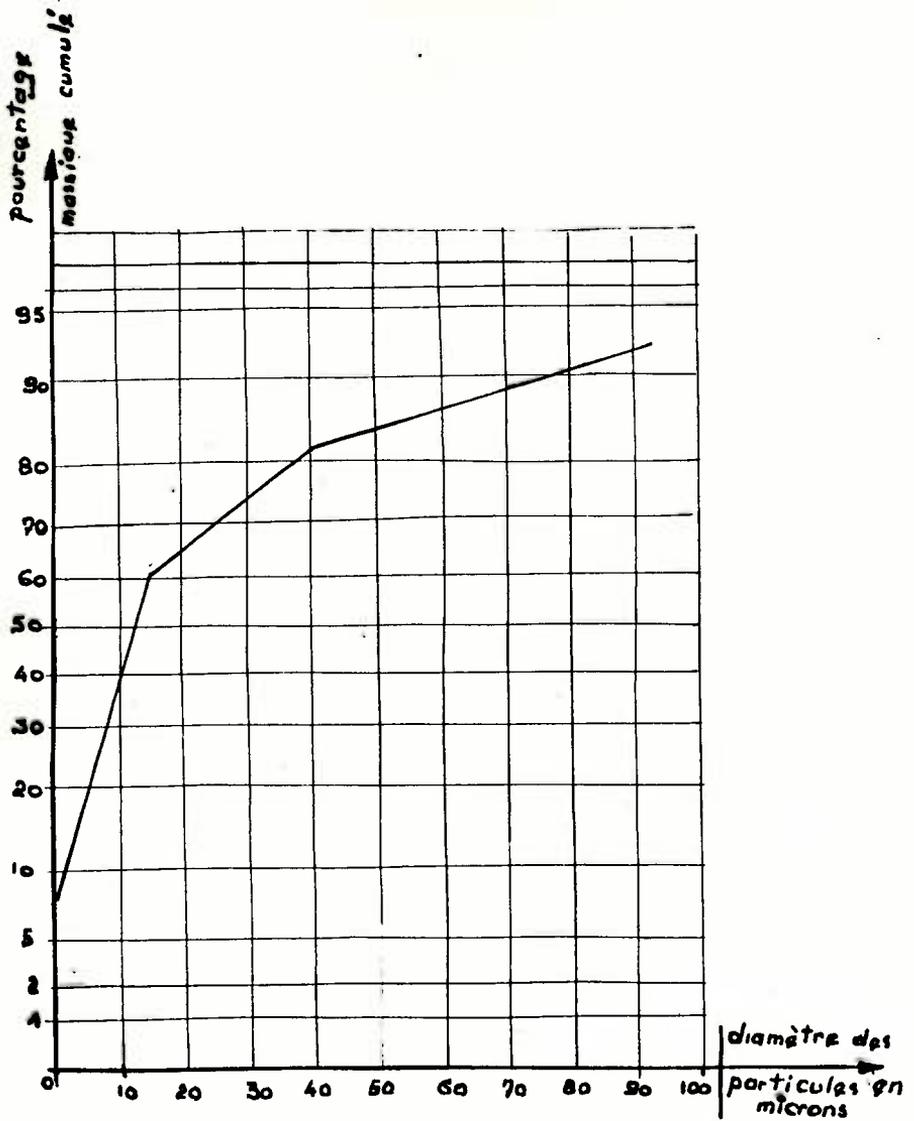


Figure 1 - Courbe granulométrique - Représentation Gaussienne.

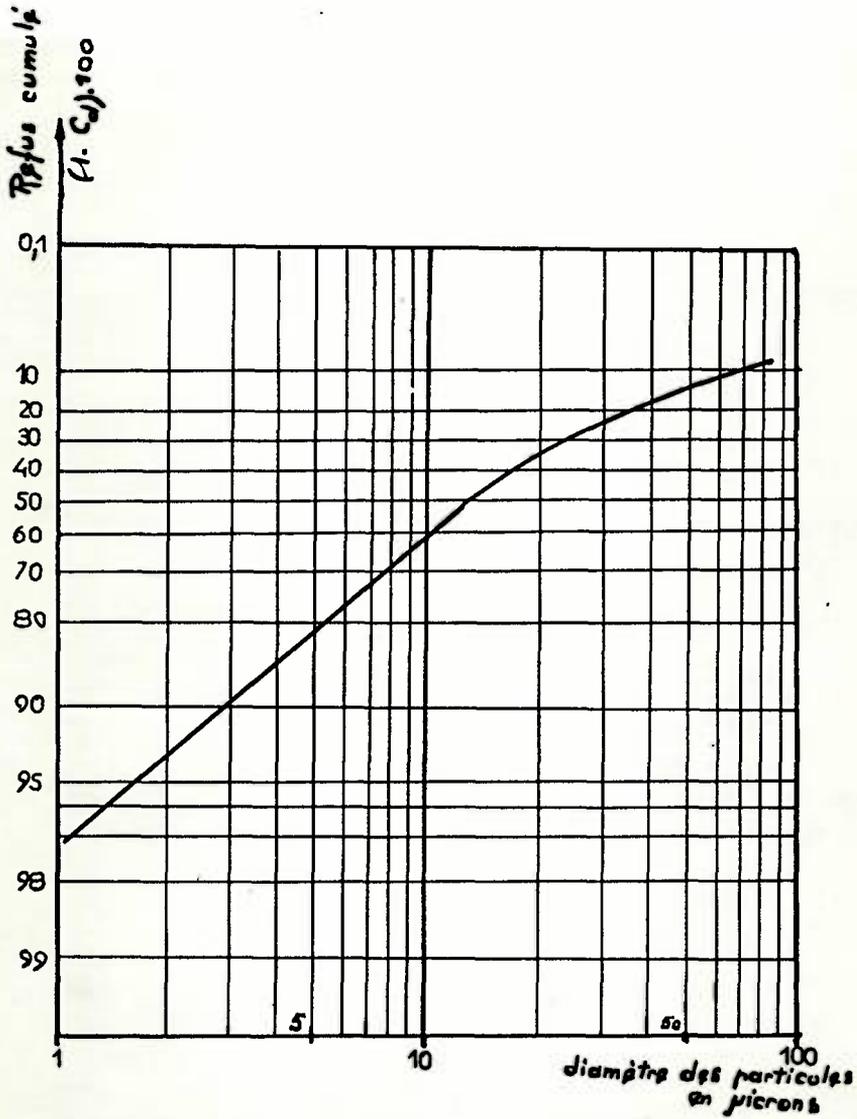


Figure 2 - Courbe granulométrique.  
Représentation Rosin - Rammler - Bennet.

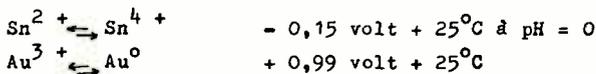
### III - MARQUAGE DE LA BOUE PAR L'OR-198

#### III.1 - Principe et méthode d'analyse

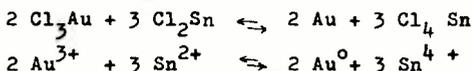
La méthode préconisée par Petersen consiste à faire subir, au matériau à marquer, un prétraitement au chlorure stanneux, avant de le mettre en présence de chlorure d'or.

L'ensemble des opérations a pour but de réduire l'or trivalent en or métallique, colloïdal par de l'étain.

Selon les réactions :



ou encore :



On a étudié successivement la fixation du chlorure d'étain puis la rétention de l'or sur les boues ainsi traitées. Pour ce faire, la méthode expérimentale a consisté à agiter un poids défini de boue dans un volume connu de solution contenant des quantités déterminées et variables d'étain radio-actif et d'or radio-actif. Des fractions prélevées dans le temps sont centrifugées, une aliquote de la phase claire surnageante est comptée au moyen d'un ensemble de détection à scintillation. La diminution d'activité de la solution fournit alors la fraction fixée par le sédiment. Toutes les expériences ont été effectuées à la température ambiante du laboratoire.

Des difficultés ont surgi lors du prélèvement des échantillons de boues dont la distribution granulométrique était identique à celle du sédiment introduit. Par suite, il a été impossible de faire un bilan valable entre l'activité introduite au début d'une expérience et celle retrouvée après rétention dont le taux n'a donc pu être établi directement par mesure de l'activité de la phase solide. Mais, comme la plupart des expériences conduisaient à des taux de rétention élevés, la diminution d'activité de la phase liquide était importante et cette mesure fournissait une bonne estimation du pouvoir de rétention.

### III.2 - Etude du traitement à l'étain

La fixation sur les boues précédentes de l'étain stanneux, sous forme de chlorure hydraté  $\text{Cl}_2 \text{ Sn}, 2 \text{ H}_2\text{O}$ , a été étudiée à l'aide du radio-isotope  $^{113}\text{Sn}$  (118 jours de période, émetteur  $\gamma$  de 392 KeV).

#### III.2.1 - Influence du temps d'agitation et de la concentration en $\text{Cl}_2 \text{ Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$ sur le rendement de fixation

L'influence du temps d'agitation a été étudiée sur des solutions à teneur en boue constante: 10 g/l. L'agitation était constante et entretenue par un agitateur magnétique. Le pH de la solution était maintenu à 1.

Sur la figure 3 a été porté le rendement de fixation en fonction du temps d'agitation pour 4 solutions de concentrations initiales différentes en  $\text{Cl}_2 \text{ Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$  : 5 mg/cc, 0,5 mg/cc, 0,05 mg/cc et 0,0065 mg/cc. Il n'a pratiquement pas été constaté de fixation pour une solution initiale à 50 mg/cc.

Le rendement de fixation est défini par R % :

$$R \% = 100 \frac{\text{poids de } \text{Cl}_2 \text{ Sn}, 2\text{H}_2\text{O} \text{ sur la boue après fixation}}{\text{poids de } \text{Cl}_2 \text{ Sn}, 2\text{H}_2\text{O} \text{ initialement en solution}}$$

L'examen de la figure 3 montre que:

- Le rendement de fixation est d'autant plus élevé que le temps d'agitation est grand. Même pour des temps d'agitation de 20 minutes, les conditions d'équilibre ne sont pas atteintes.

- Le rendement de fixation croît lorsque la teneur initiale en  $\text{Cl}_2 \text{ Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$  diminue, mais ceci dans un certain domaine seulement.

Sur la figure 4 a été porté le rendement de fixation en fonction de la teneur initiale en  $\text{Cl}_2 \text{ Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$ ; on constate alors que chaque courbe obtenue pour un temps d'agitation donné passe par un maximum. Ce maximum se déplace vers les faibles concentrations lorsque le temps d'agitation augmente, ce qui suggère l'explication suivante:

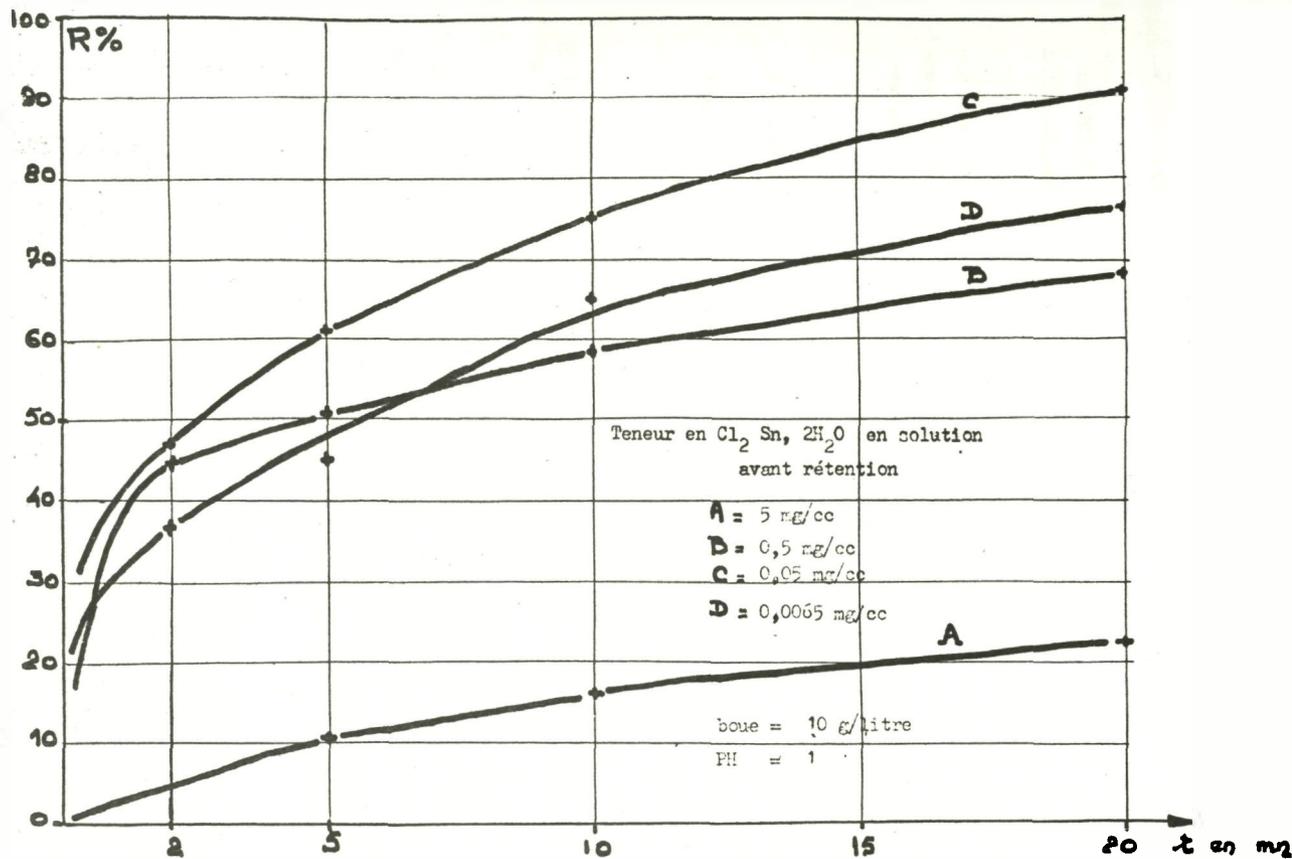


Figure 3 - Fixation du  $\text{Cl}_2 \text{ Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$ .

Rendement de fixation en fonction du temps d'agitation t.

Boue : 10 g/l

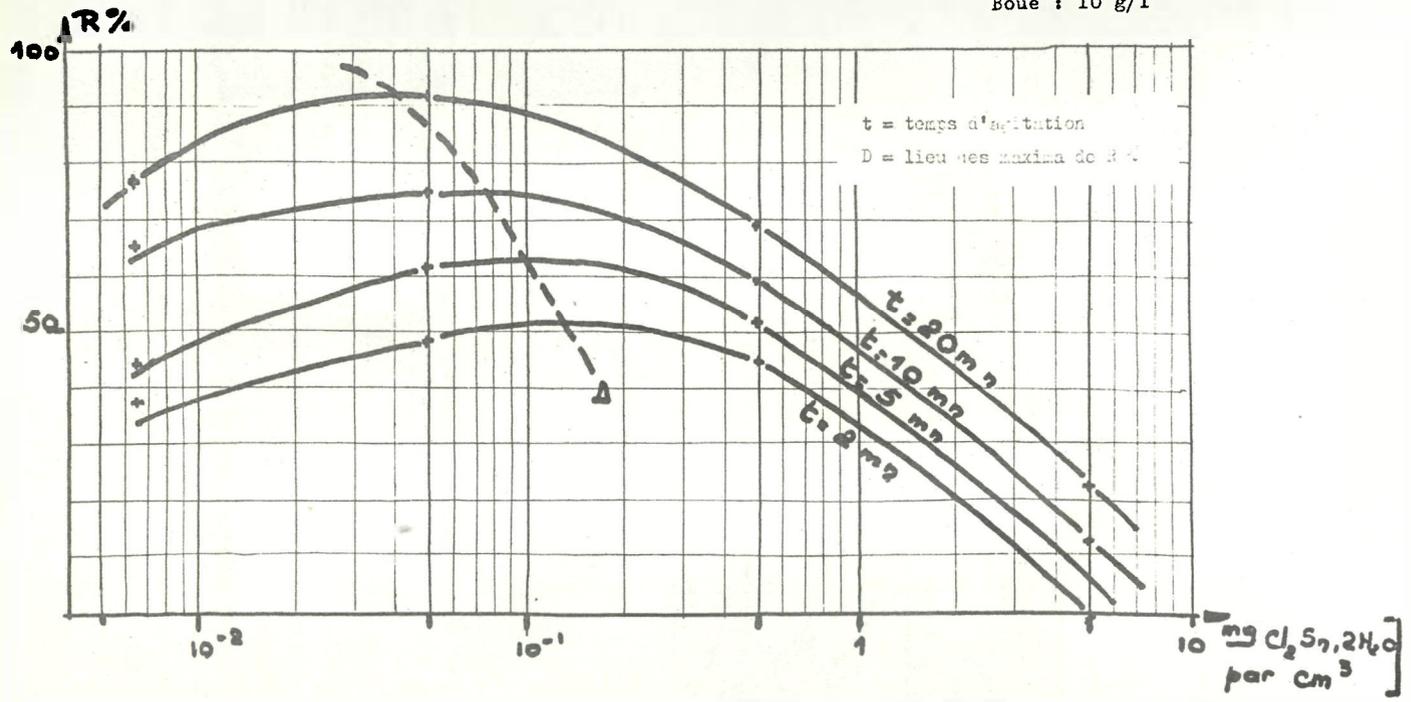
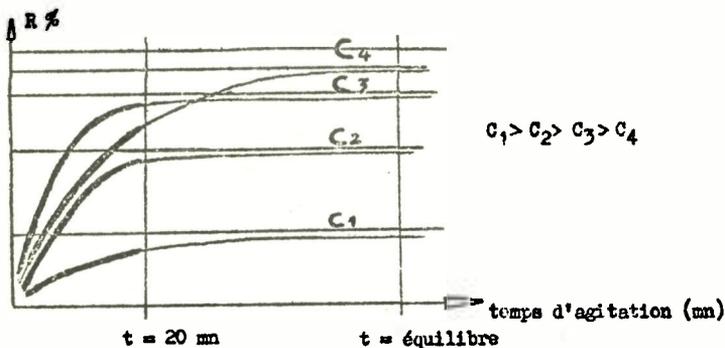


Figure 4 - Fixation de  $\text{Cl}_2\text{Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$ .

Rendement de fixation  $R\%$  en fonction de la teneur initiale de  $\text{Cl}_2\text{Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$ .

Il semble logique, par la théorie des entraîneurs, de compter sur une rétention d'autant plus grande que la concentration initiale est faible. Il se peut alors que la vitesse de réaction également soit d'autant plus petite que la concentration initiale est faible.

Dans une telle hypothèse, que l'on se propose de contrôler ultérieurement, le pouvoir de rétention, à l'équilibre, augmenterait lorsque la concentration initiale diminue: phénomène qui pourrait apparaître différemment pour un temps d'agitation inférieur au temps d'équilibre. Le schéma ci-dessous explicite l'allure du phénomène dans une telle hypothèse.



$RC_3 > RC_4$  pour  $t = 20$  min  
 $RC_4 > RC_3$  pour  $t > t$  équilibre

### III.2.2 - Influence de la concentration en boue sur le rendement de fixation. Isothermes d'adsorption.

Augmenter la concentration en boue dans la solution, c'est accroître la surface de rétention, donc, à priori, augmenter cette rétention; encore faut-il que les solutions de boue ainsi formées ne soient pas trop concentrées, car dès lors l'attraction des particules entre elles modifie la granulométrie et les propriétés physico-chimiques jusqu'à atteindre les phénomènes de thixotropie. Pour ces raisons, dans les expériences suivantes, on n'a jamais dépassé une concentration de 80 g de boue par litre de solution.

L'étude de l'influence de cette concentration sur le rendement de fixation a été faite pour différents temps d'agitation, et pour chaque temps d'agitation, pour différentes concentrations initiales en  $\text{Cl}_2 \text{ Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$  : 5 mg/cc, 0,5 mg/cc et 0,05 mg/cc.

Les résultats des expériences font l'objet des trois diagrammes de la figure 5. On constate également, pour un temps d'agitation donné et une concentration initiale en  $\text{Cl}_2 \text{ Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$  donnée, un maximum de fixation pour une certaine teneur en boue, donc pour une certaine surface offerte. On ne peut pas, pour l'instant, trouver d'explication satisfaisante à ce phénomène qui devra être réétudié.

La figure 5 c montre que pour obtenir des rendements de fixation élevés (80%), il convient de travailler avec des concentrations initiales en  $\text{Cl}_2 \text{ Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$  inférieures à 1 mg/cc, des teneurs en boue supérieures à 20 g/l, et un temps d'agitation de l'ordre de 20 minutes. On peut également utiliser des teneurs en boue de l'ordre de 10 g/l, si la concentration initiale en  $\text{Cl}_2 \text{ Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$  est inférieure à 0,1 mg/cc.

A partir des résultats précédents on peut essayer de tracer les isothermes d'adsorption. Il s'agit de courbes du type: concentration en poids de  $\text{Cl}_2 \text{ Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$  sur la boue en fonction de la concentration en poids de  $\text{Cl}_2 \text{ Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$  dans la solution, à l'équilibre. De telles isothermes sont tracées sur la figure 6, pour différentes teneurs en boue et pour un temps d'agitation de 20 minutes. Ces isothermes apparaissent du type Freundlich (voir III.3.3), mais il importe de souligner que l'équilibre n'étant pas encore atteint, il faudrait, en toute rigueur, avoir opéré sur des temps d'agitation beaucoup plus importants pour pouvoir parler d'isotherme.

La figure 7 montre le rendement de fixation en fonction du poids de  $\text{Cl}_2 \text{ Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$  fixé par mg de boue.

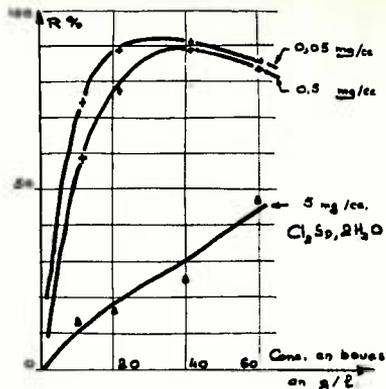


Fig. 5a - t = 10 min

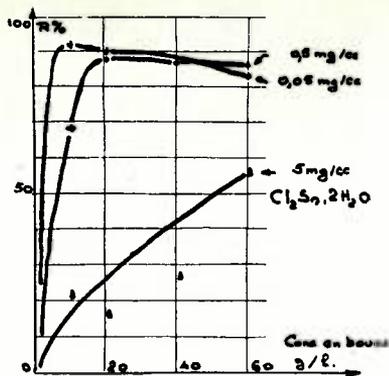


Fig. 5b - t = 20 min

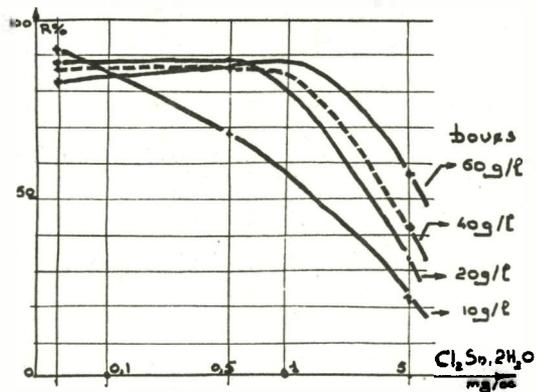


Fig. 5c - t = 20 min

t = temps d'agitation

**Figure 5 - Fixation de  $\text{Cl}_2\text{Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$ .**  
Influence de la concentration en boue.

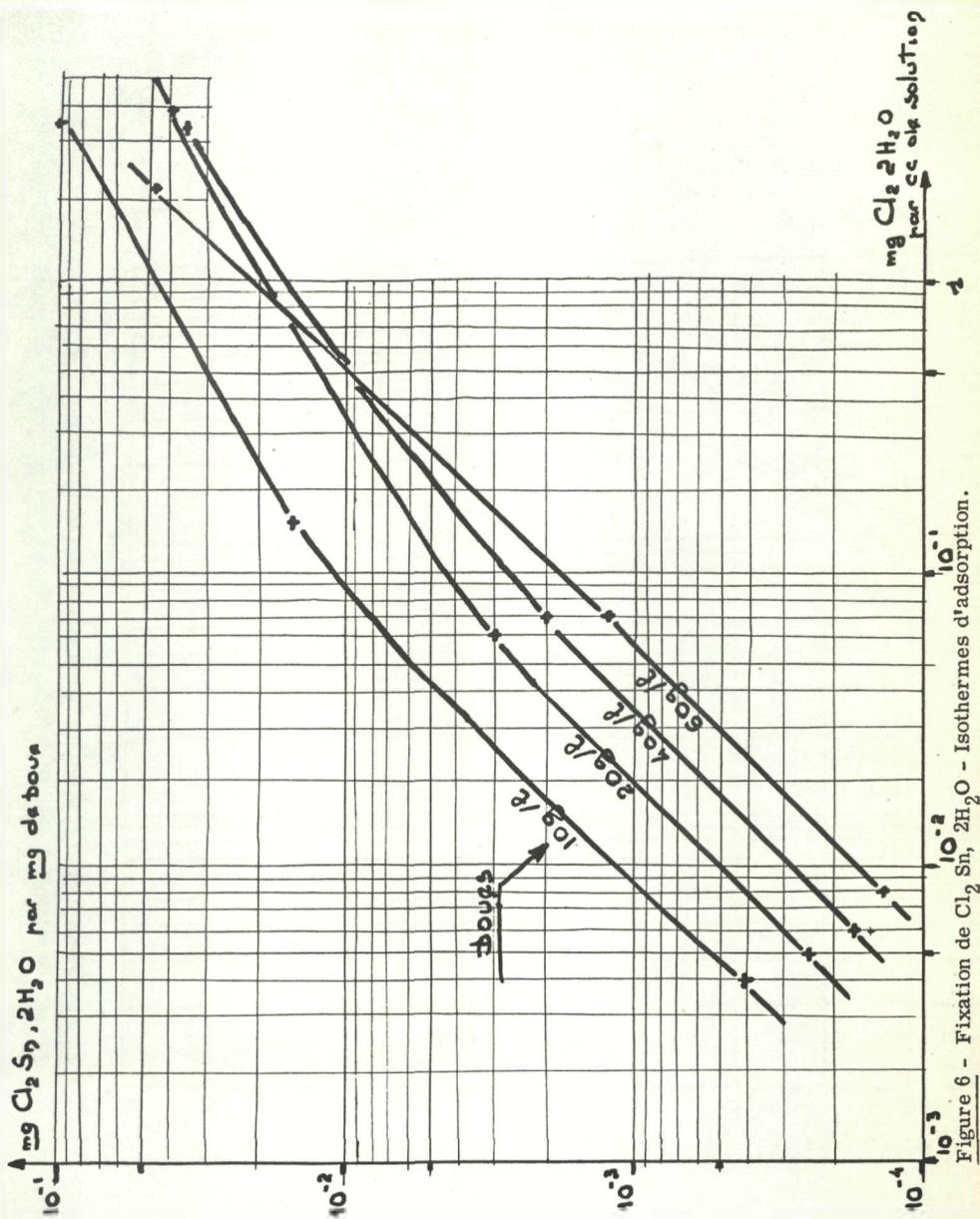


Figure 6 - Fixation de  $\text{Cl}_2 \text{Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$  - Isothermes d'adsorption.

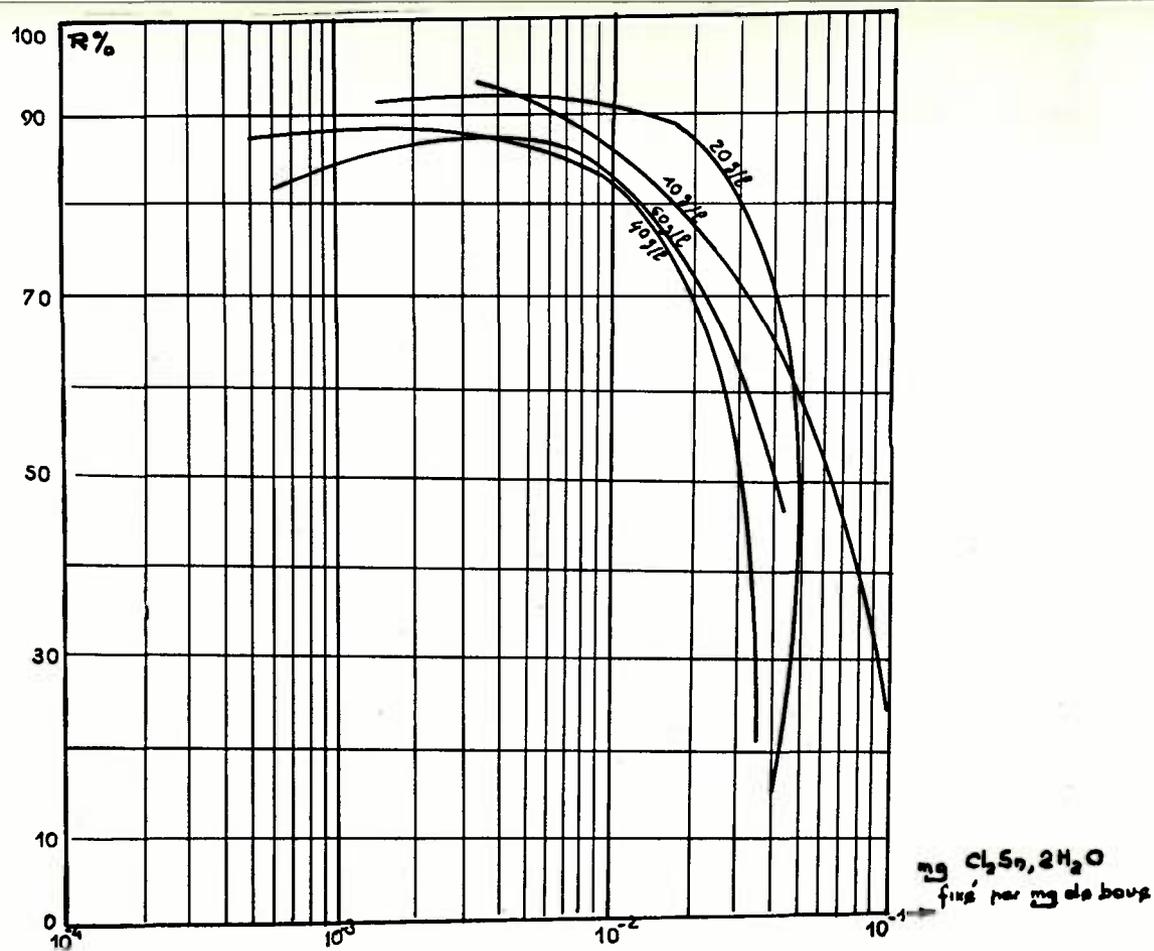


Figure 7 - Fixation de  $\text{Cl}_2\text{Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$  - Rendement de fixation en fonction du poids de  $\text{Cl}_2\text{Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$  fixé.

### III.2.3 - Solidité de la fixation du chlorure stanneux

Sur les boues, préalablement traitées pendant 20 minutes avec des solutions contenant initialement  $5 \cdot 10^{-1}$  mg/cc et  $5 \cdot 10^{-2}$  mg/cc de  $\text{Cl}_2 \text{Sn}$ ,  $2\text{H}_2\text{O}$ , on a contrôlé la solidité du dépôt par 2 lavages successifs avec une violente agitation (appareil Turbula), d'une durée de 10 minutes chacun.

Dans ces conditions on a constaté que la perte d'activité des boues était inférieure à 1 % prouvant que la rétention définitive est très bonne.

### III.3 - Etude de la fixation de l'or sur les boues traitées à l'étain

De la même manière que précédemment, la fixation de l'or radioactif a été étudié pour des boues préalablement traitées au chlorure d'étain, ayant adsorbé entre  $7 \cdot 10^{-4}$  et  $110 \cdot 10^{-4}$  mg de  $\text{Cl}_2\text{Sn}$ ,  $2\text{H}_2\text{O}$  par mg de boue. Ce domaine a été limité à ces valeurs, un peu arbitrairement, pour ne pas rendre l'étude trop longue. Cependant, d'après les constatations précédentes, on voit que dans ce domaine le rendement et la qualité de la fixation sont bons pour des temps d'agitation raisonnables (Fig. 6 et 7).

#### III.3.1 - Rendement de fixation

Les conditions expérimentales étant les mêmes que précédemment (agitation constante et  $\text{pH} = 1$ ), les rendements de fixation ont été déterminés pour différents temps d'agitation et différentes concentrations initiales en or.

Les résultats obtenus font l'objet des courbes des figures 8 et 9 et attirent les remarques suivantes :

- Le rendement de fixation est d'autant plus élevé que le temps d'agitation est grand. Il semble que la réaction de déplacement de l'étain par l'or soit plus rapide que la réaction de fixation de l'étain, car dans l'ensemble, au bout de 20 minutes, le palier est généralement atteint.

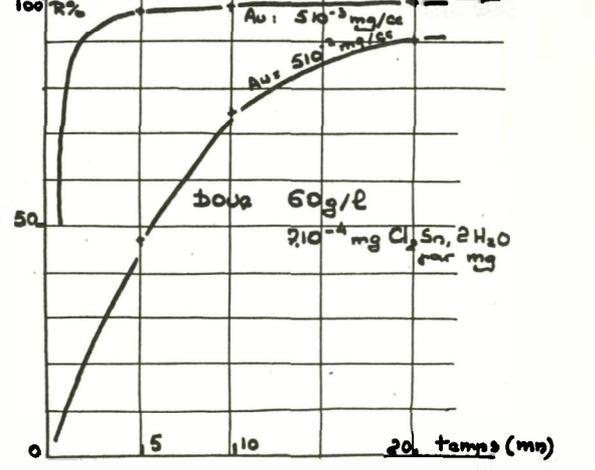
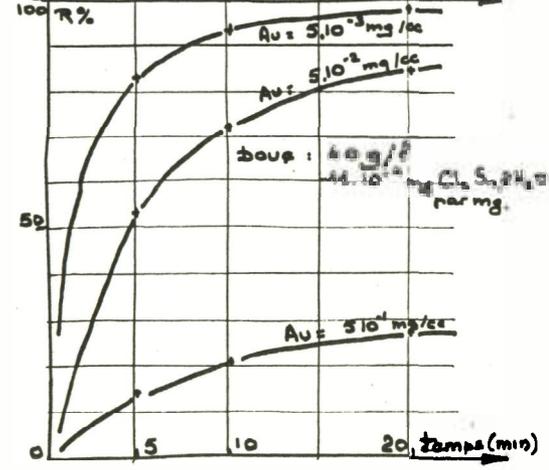
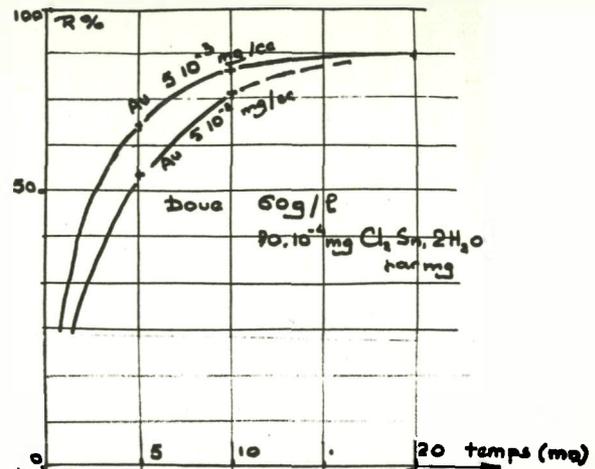
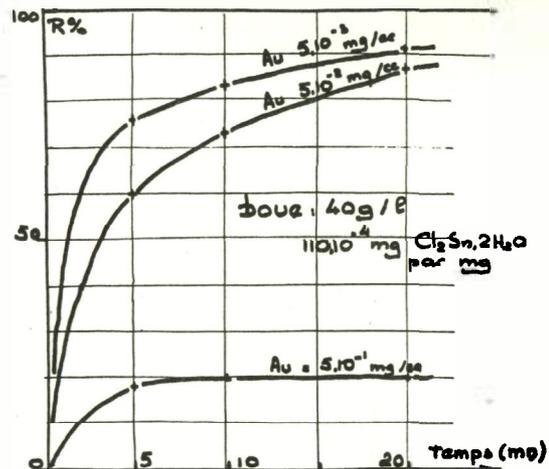
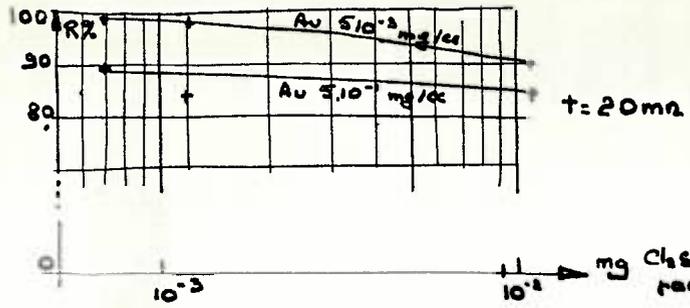


Figure 8 - Fixation de l'or. Influence du temps d'agitation.



mg $\text{Cl}_2 \text{ Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$ par mg de boue	$1,110^{-3}$	$1,110^{-4}$	$0,710^{-4}$
pooids de boue par litre	40 g	40 g	60 g

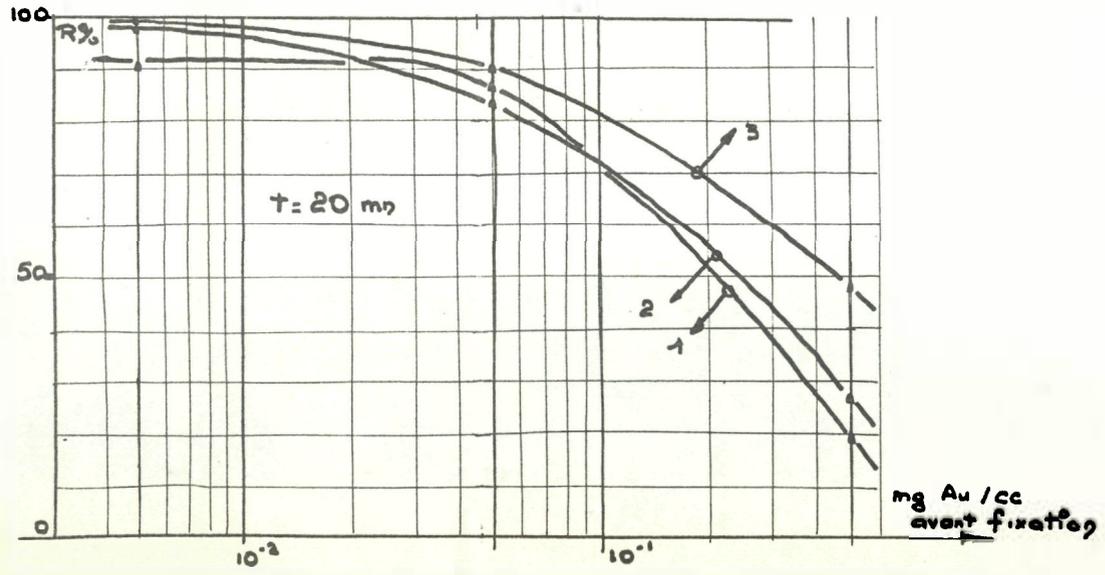


Figure 9 - Rendement de fixation de l'or. Influence de la teneur initiale en Au et  $\text{Cl}_2 \text{ Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$ .

- Le rendement de fixation croît lorsque la teneur en or diminue, la fixation étant élevée pour des teneurs en or inférieures à 0,5 mg/cc; il croît légèrement lorsque la quantité de  $\text{Cl}_2$ , Sn,  $2\text{H}_2\text{O}$  fixée initialement diminue.

La figure 10 donne la courbe du rendement de fixation en fonction de la quantité d'or fixée, pour les différents systèmes étudiés.

### III.3.2 - Influence du pH

Le pouvoir de rétention de la boue atteint son maximum lorsque le pH est faible, l'importance du pH étant fondamentale dans la formation des colloïdes sur laquelle semble reposer ces mécanismes d'adsorption.

La boue, traitée au préalable à l'étain, donne pour des teneurs en boue de 40 à 60 g/l, des solutions de pH variant entre 5 et 7. Si la quantité de chlorure d'or ajoutée est insuffisante pour acidifier cette solution, on constate une diminution très nette du rendement de fixation : ainsi est-il de 72% pour une concentration initiale en or de  $3.10^{-3}$  mg/cc à pH = 5 après une agitation de 2 heures, et de 85% après 20 minutes pour les mêmes conditions à pH = 1.

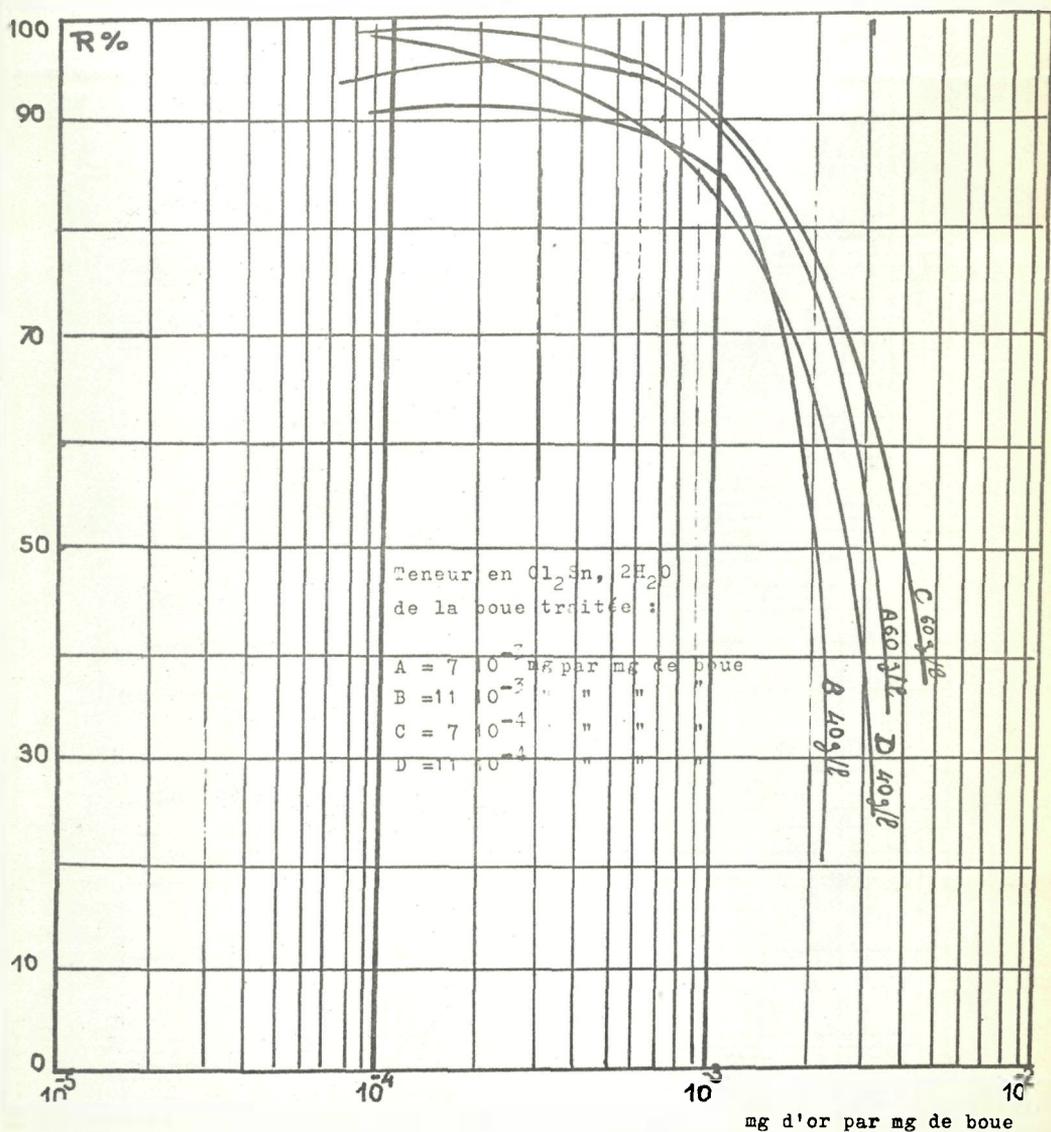
### III.3.3 - Isothermes d'adsorption

De même que pour l'étain, les isothermes d'adsorption ont été tracées (Fig. 11) pour un temps d'agitation de 20 minutes; les conditions d'équilibre sont presque atteintes après ce temps d'agitation.

Sur un diagramme log-log, ces isothermes possèdent une partie droite, représentative de l'équation de Freundlich :  $q = K C$

$q$  = quantité de soluté fixée par unité de masse de la phase solide,

$C$  = concentration à l'équilibre du soluté dans la phase liquide



**Figure 10** - Fixation de l'or. Rendement de fixation en fonction du poids d'or fixé.

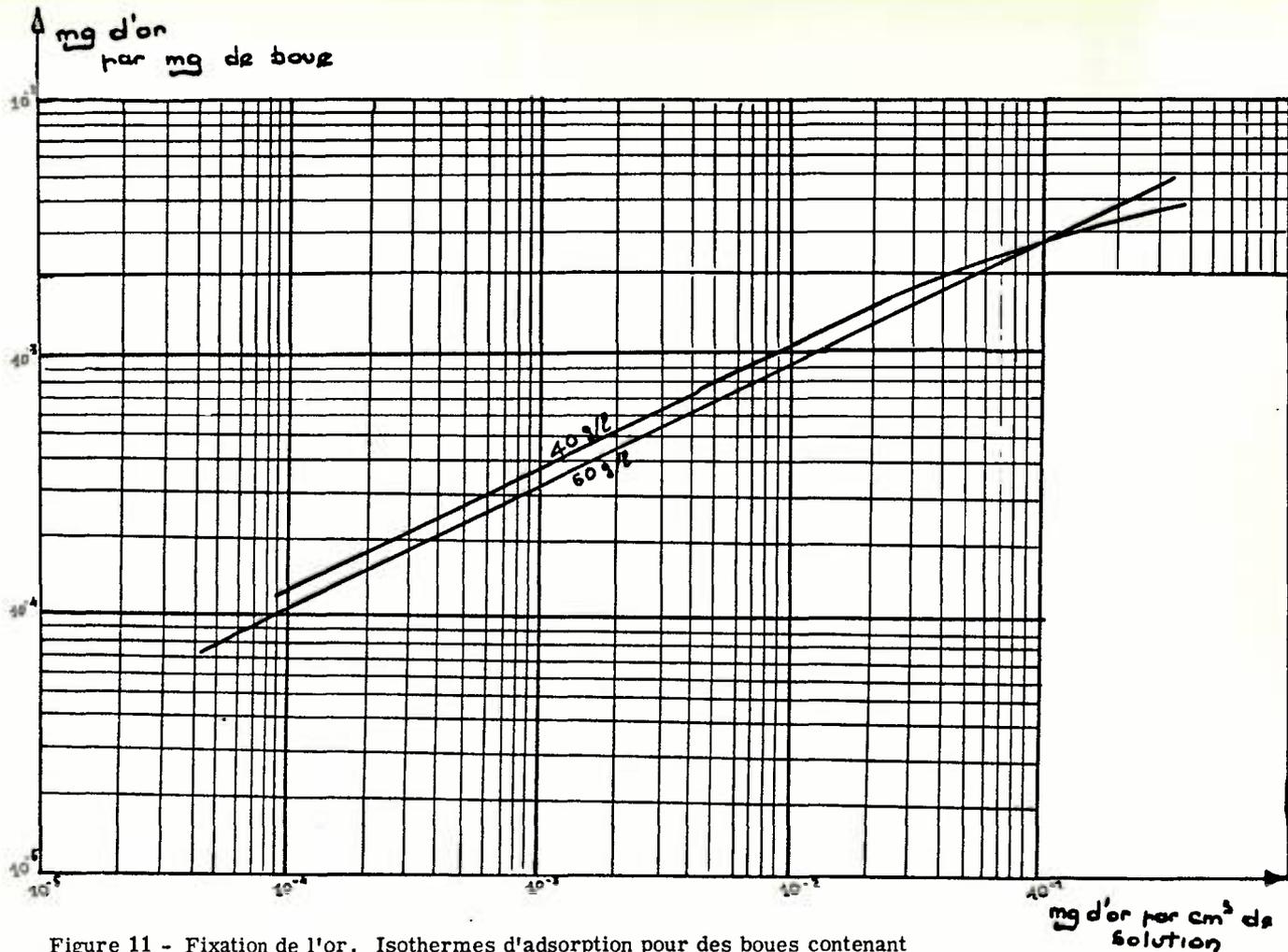


Figure 11 - Fixation de l'or. Isothermes d'adsorption pour des boues contenant  $7 \cdot 10^{-4}$  et  $11 \cdot 10^{-4}$  mg de  $\text{Cl}_2$ , Sn,  $2\text{H}_2\text{O}$  par mg de boue.

$K, n$  = constantes caractéristiques du système,  
 $n$  est ici très voisin de 2, conformément aux systèmes classiques,  
 ( $n$  généralement compris entre 1 et 5).

Dans le cas de la fixation de l'étain (Fig. 6), seules  
 les solutions contenant 60 g/l de boue semblent suivre cette loi;  
 $n$  est alors voisin de 1.

#### III.3.4 - Solidité de la fixation de l'or

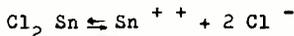
Le même test de solidité a été mis en oeuvre. La remise  
 en solution a été, dans tous les cas, inférieure à 0,5 %.

### IV - ESSAIS D'INTERPRETATION DES RESULTATS. CONSIDERATIONS SUR LE MECANISME DE FRACTION

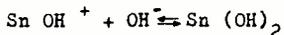
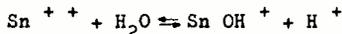
Des tentatives ont été faites pour essayer de déterminer les mécanismes de formation. Nous proposons aux lecteurs les mécanismes suivants:

#### IV.1 - Fixation de l'étain sur la boue

Le chlorure d'étain stanneux en solution acide,

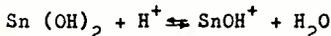


subit une forte hydrolyse pour donner un hydroxyde  $\text{Sn}(\text{OH})_2$ ,



Cet hydroxyde se présente sous forme gélatineuse, ce qui facilite son adsorption par le sédiment.

Dans le milieu HCl de la réaction, cet hydroxyde amphotère donne l'oxyde stanneux  $\text{SnO}$ ,



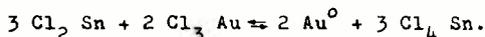
soluble dans la solution chlorhydrique pour redonner  $\text{Cl}_2 \text{ Sn}$  :



Ainsi s'établit un équilibre entre l'étain adsorbé par le sédiment sous forme d'hydroxyde et l'étain en solution  $\text{Cl}_2\text{Sn}$ . Mais pour la réaction oxydo-réduction, tout se passe comme si  $\text{Cl}_2\text{Sn}$  était resté en solution.

#### IV.2 - Fixation de l'or sur le sédiment

Le chlorure stanneux est réduit par le chlorure d'or  $\text{Cl}_3\text{Au}$  suivant la réaction:



Selon Guéron (4), à  $\text{pH} = 0,2$ , 94 % de  $\text{Cl}_4\text{Sn}$  sont hydrolysés en oxyde stannique hydraté ou acide  $\alpha$  stannique :  $\text{Sn}(\text{OH})_4$  colloïdale (pourpre de Cassius) qui est adsorbé par les gels stanniques.

Les gels ainsi formés vont se fixer sur la surface des particules de grandes tailles par rapport à eux, les formes électrostatiques empêchant leur rapprochement et assurant leur stabilité.

Le pouvoir d'adsorption des boues se trouve alors accru du pouvoir bien connu d'adsorption des colloïdes.

Il ne faut pas oublier que le procédé Petersen est valable pour tout produit en poudre, suspension, ne possédant pas, de par lui-même, un pouvoir de rétention quelconque du fait de sa structure : poudre d'aluminium, chlorure de calcium, etc. Dans notre cas, la formation de  $\text{Sn}(\text{OH})_4$  colloïdal vient renforcer le pouvoir naturel d'adsorption des boues, surtout valable dans leurs phases argileuses.

Il y a donc lieu de penser que ce pouvoir de renforcement pourra se faire sentir sur toutes les particules, argileuses ou non: le traitement à l'étain aurait alors pour effet de répartir l'activité sur toutes les particules, sans trop défavoriser les plus grosses.

Les considérations précédentes semblent être appuyées par l'expérience suivante: si une boue, traitée par de l'étain radioactif, est mise en présence d'une solution d'or inactif, on ne constate pas de remise en solution d'activité: l'étain reste donc fixé sur la boue.

L'ensemble de ce mécanisme attire l'attention sur un certain nombre de remarques:

a) Etant donné que tout semble se passer comme si  $\text{Cl}_2 \text{ Sn}$  restait en solution, il n'est pas nécessaire de traiter longuement et séparément la boue avec une solution de  $\text{Cl}_2 \text{ Sn}$ , mais seulement d'introduire ensemble les chlorures d'étain et d'or dans des conditions permettant de fabriquer, dans le milieu, de l'or colloïdal qui sera adsorbé directement par le sédiment.

b) L'emploi de l'étain peut même être supprimé s'il est possible de mettre en contact le matériau à marquer avec une solution d'or colloïdal préformée. Les quelques essais effectués dans ce sens semblent positifs, mais doivent être poursuivis.

c) Cependant le traitement à l'étain s'est révélé nécessaire lors d'opérations de marquage sur le terrain, effectuées dans des containers métalliques. On évite ainsi la réduction de l'or sur les parois d'acier grâce à la plus grande affinité de l'or (+ 0,99 volt) pour l'étain (- 0,14 volt) que pour le fer (+ 0,77 volt).

#### V - CONCLUSIONS

La présente étude des principaux aspects de la méthode de Petersen appliquée au marquage radio-actif des boues, met en évidence les conditions expérimentales de traitement:

- Traitement au  $\text{Cl}_2 \text{ Sn}$ ,  $2\text{H}_2\text{O}$ , à froid, pendant un temps égal à au moins 20 minutes sous faible agitation (un bullage d'air comprimé est suffisant) à pH voisin de 1. La concentration initiale en  $\text{Cl}_2 \text{ Sn}$ ,  $2\text{H}_2\text{O}$  dans la solution doit être inférieure à 0,1 mg par  $\text{cm}^3$  de solution.

- Traitement au  $\text{Cl}_3 \text{ Au}$ , à froid, pendant 20 minutes environ, sous faible agitation, à pH voisin de 1. La concentration en or doit être inférieure à 0,05 mg par mg de boue.

- Les solutions traitées doivent contenir entre 20 et 60 g de boue par litre.

Dans ces conditions les rendements de fixation sont supérieurs à 90% (et même 95% pour l'or) et la remise en solution, après agitation violente, est inférieure à 1%.

Nous envisageons de compléter ce travail par les recherches suivantes:

- Etude plus complète du mécanisme de fixation avec recherches sur l'influence du pH.
- Etude de la relation existant entre l'activité introduite et la masse de chaque fraction granulométrique (marquage en surface ou proportionnel à la masse, etc.).
- Etude plus complète sur les isothermes d'adsorption, en cherchant notamment les conditions réelles d'équilibre (temps d'agitation porté à 1 heure, voire plus).
- Comparaison des résultats obtenus sur diverses boues.

#### BIBLIOGRAPHIE

1. PETERSEN, B.R.

Radioactive surface labelling of powdered materials by means of gold-198

Production and use of short-lived radioisotopes from reactors, Proceedings of a Seminar, I.A.E.A., Vienna, 5-9 November, 1962, Vol. 1, 269-274

2. CAMPBELL, B.L.

An improved technique for labelling sand with Au<sup>198</sup>

I.J.A.R.I., 14, 5, July 1963, 286-287

3. RAFFINCT

Granulométrie

Technique de l'ingénieur - Analyses et mesures, P 550/1 - 550/12

4. GUERON

Analytical Chemistry, 11, 3, 225-326

Proposition concernant les conditions particulières d'emploi (1)  
des radio-éléments artificiels pour étudier  
les mouvements de sédiments

G. COURTOIS et R. HOURS

Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay  
Section d'Application des Radio-éléments

L'emploi des radioéléments pour des études de mouvements de sédiments (2) dans les cours d'eau et en mer est astreint aux conditions suivantes:

I - PREPARATION DES SEDIEMENTS MARQUES

Les sédiments marqués doivent être préparés par l'un des procédés suivants:

I.1 - Incorporation

- a) Les radioéléments sont incorporés dans les sédiments par un trou foré dans ceux-ci et ultérieurement bouché (ciment).
- b) Les radioéléments sont englobés dans une matière simulant le sédiment (brai chargé, par exemple).

Dans les deux cas s'appliquant plus particulièrement au marquage des galets, les radioéléments doivent être incorporés de façon qu'on puisse les considérer comme des sources scellées.

I.2 - Fixation en surface

- a) Par traitement physique ou chimique  
Les radioéléments sont fixés à la surface des sédiments. Cette fixation peut se faire par différents procédés: trempage et cuisson, encollage.
- b) Par adsorption  
Le radioélément est adsorbé dans une résine échangeuse d'ions.

(1) - Voir annexe 1: Conditions particulières d'emploi.

### I.3 - Activation

Les sédiments radioactifs sont constitués :

a) par un verre contenant un élément activable volontairement ajouté. Ce verre préalablement broyé à la granulométrie convenable est activé dans un réacteur nucléaire.

Les radioéléments dus à la présence d'isotopes activables autres que ceux désirés doivent être pris en considération dans l'application du présent règlement.

b) par des échantillons de sédiments activés par irradiation. Des analyses doivent alors être effectuées pour s'assurer que les radioéléments obtenus satisfont aux exigences définies dans le présent règlement.

## II - CONDITIONS GENERALES D'EMPLOI DES RADIOELEMENTS EN SEDIMENTOLOGIE

### II.1 - Forme chimique des radioéléments

Les isotopes radioactifs utilisés doivent l'être sous forme insoluble dans la limite définie au paragraphe II.4 pour le test de solidité.

### II.2 - Nature des radioéléments

Elle doit être choisie comme ayant l'énergie de rayonnement et la période la plus faible possible, compatibles avec les résultats à atteindre.

La période des radioéléments utilisés doit rester inférieure à 130 jours.

Les radioéléments recommandés font l'objet du tableau ci-après :

Nature	Période	Rayon. t utilisé	Energie d'émission (MeV)		Energie effective* GI (MeV)	K** constante de 1 dose
			$\beta$	$\gamma$		
<sup>198</sup> Au	2,7 j	$\gamma$	0,96	0,41	0,38	0,24
<sup>140</sup> (Ba+La)	12,8 j	$\gamma$	0,5 à 1,1	0,5 à 1,6	0,63	0,80
<sup>51</sup> Cr	28 j	$\gamma$		0,32	0,01	0,02
<sup>95</sup> (Zr+Nb)	65 j	$\gamma$	0,16-0,38	0,72-0,76	0,16	0,80
<sup>192</sup> Ir	75 j	$\gamma$	0,5 - 0,6	0,3 à 0,6	0,42	0,50
<sup>46</sup> Sc	85 j	$\gamma$	0,36	0,9 - 1,1	0,40	1,1
<sup>182</sup> Ta	111 j	$\gamma$	0,5	0,07 à 1,2	0,38	0,61
<sup>32</sup> P	15 j	$\beta$	1,7		0,69	

\* L'énergie effective est donnée pour le tractus gastro-intestinal (T.G.I.), gros intestin (G.I.).

\*\* La constante de dose K est égale au débit de dose horaire en roentgen/heure à 1m pour 1 curie. Pour les couples <sup>140</sup>(Ba+La) et <sup>95</sup>(Zr+Nb), K est donné pour 1 Ci de chaque élément.

### II.3 - Activité des radiocléments (3,4)

#### II.3.1 - Activité des sables, sabiers, graviers.

##### II.3.1.1 - Activité maximum admissible par grain

Aucun grain immergé ne devra avoir une activité supérieure à  $q$  max:

$$q \text{ max} = \frac{15.8}{E} \quad q \text{ en } \mu\text{Ci}$$

E étant l'énergie effective en MeV du radio-traceur utilisé pour le gros intestin du tractus gastro-intestinal TGI(GI).

Pour les radiocléments recommandés, la norme précédente conduit à:

(3) Voir annexe 3: Activité des radiocléments.

(4) Voir annexe 4: Risques encourus et probabilités.

q max en  $\mu\text{Ci}$ 

	$^{198}\text{Au}$	$^{140}(\text{Ba}+\text{La})$	$^{51}\text{Cr}$	$^{95}(\text{Zr}+\text{Nb})$	$^{192}\text{Ir}$	$^{46}\text{Sc}$	$^{182}\text{Ta}$	$^{32}\text{P}$
q max	36	14,2	158	40	38	40	41,5	23

Pour les autres radioéléments, les énergies effectives pourront être extraites du tableau V du rapport du Comité II sur la dose admissible en cas d'irradiation interne (Recommandations de la C.I.P.R., 1959).

### II.3.1.2 - Activité totale maximum admissible

Pour les grains d'activité individuelle inférieure à  $\frac{q_{\text{max}}}{10}$  l'activité totale maximum admissible est de:

$$2,5 \cdot 10^5 \cdot f \cdot q_{\text{max}} \quad \text{en } \mu\text{Ci}$$

f étant leur proportion en poids.

Pour les grains d'activité individuelle  $\geq \frac{q_{\text{max}}}{10}$  comprise entre q max et  $\frac{q_{\text{max}}}{10}$ , l'activité totale maximum admissible est de:

$$2,5 \cdot 10^4 \cdot p \cdot (q_{\text{max}})^2 \quad \text{en } \mu\text{Ci}$$

p étant leur proportion en poids.

L'activité totale admissible est donc:

$$a = q_{\text{max}}$$

$$A = 2,5 \cdot 10^5 \cdot f \cdot q_{\text{max}} + 2,5 \cdot 10^4 \cdot \sum p = (q_{\text{max}})$$

$$a = \frac{q_{\text{max}}}{10}$$

Pour les radioéléments recommandés, la norme précédente conduit à:

A en Ci

	<sup>198</sup> Au	<sup>140</sup> (Ba+La)	<sup>51</sup> Cr	<sup>95</sup> (Zr+Nb)	<sup>192</sup> Ir	<sup>46</sup> Sc	<sup>182</sup> Ta	<sup>32</sup> P
$\Gamma=1$ $q=0$	9	5,5	40	10	9,5	10	10,4	5,6
$\Gamma=0$ $p=1$ pour $a=q_{max}$	0,9	0,35	0,4	1	0,95	1	1,04	0,56

II.3.2 - Activité des galetsII.3.2.1 - Activité maximum admissible par galet

Aucun galet immergé ne devra avoir une activité supérieure à:

$$q \text{ max} = \frac{42}{k} e^{-\mu p} \quad q \text{ en } \mu\text{Ci}$$

k étant la constante de dose en Roentgen/h.

$\mu$  le coefficient d'absorption linéaire du rayonnement du radioélément envisagé dans l'eau, en  $\text{cm}^{-1}$ .

Pour les radioéléments recommandés, la norme précédente conduit à:

q max en  $\mu\text{Ci}$ 

	<sup>198</sup> Au	<sup>140</sup> (Ba+La)	<sup>51</sup> Cr	<sup>95</sup> (Zr+Nb)	<sup>192</sup> Ir	<sup>46</sup> Sc	<sup>182</sup> Ta
q max $\mu\text{Ci}$	530	70	6875	120	270	77	140

II.3.2.2.- Activité maximum totale admissible

L'activité maximum totale admissible est de:

$$A = 10^{-2} \quad q \text{ max} \quad A \text{ en Ci}$$

$$q \text{ max en } \mu\text{Ci}$$

Pour les radioéléments recommandés, la norme précédente conduit à:

A max on Ci

	$^{198}\text{Au}$	$^{140}(\text{Ra}+\text{La})$	$^{51}\text{Cr}$	$^{95}(\text{Zr}+\text{Nb})$	$^{192}\text{Ir}$	$^{46}\text{Sc}$	$^{182}\text{Tm}$
A max Ci	5,3	0,7	68,7	1,2	2,7	0,77	1,4

II.4 - Test de solidité

Le radiodéchet ne doit pas pouvoir être remis en solution ou dispersé par érosion dans les conditions naturelles d'emploi.

A cette fin, le sédiment marqué doit subir un test de solidité. Ce test doit intervenir sur le sédiment prêt à être immergé.

Seront considérés comme satisfaisant a priori à ce test de solidité les sédiments marqués par les procédés I.1, I.3 et I.4.

Le test témoin est le suivant:

une aliquote de 10 grammes de sable marqué est mise dans 50cc d'eau salée ou non suivant l'emploi futur. Le récipient est soumis pendant 10 minutes à un mouvement excentrique bi-dimensionnel fournissant 200 secousses par minute environ.

Les 50cc d'eau sont alors filtrés et le filtrat et le filtre sont comptés dans des conditions géométriques très rigoureusement définies permettant la comparaison avec l'activité des 10 grammes de sable.

La même expérience est répétée 3 fois avec le même échantillon de sable, mais une quantité nouvelle d'eau.

L'activité totale remise en solution et celle, mise en suspension et retenue sur les filtres doivent chacune être alors inférieures à 1% de l'activité initiale.

### II.5 - Zone d'étude et campagne d'immersion (5)

L'ensemble des conditions précédentes et plus particulièrement les conditions concernant les activités définies en II.3 s'entendent pour une zone d'étude déterminée et une campagne d'immersion donnée.

Une zone d'étude est définie par une région géographique incluant tous les points d'immersion et les zones de détection sur lesquelles le signal moyen de l'appareillage reste supérieur à 5 fois le mouvement propre relevé avant les immersions, avec le même appareillage.

Une campagne d'immersion est définie par le temps s'écoulant entre la première et la dernière immersion sur une zone d'étude.

Sur une zone d'étude, une campagne:

- 1) ne pourra pas être inférieure à 1 mois,
- 2) sera terminée dans les limites de la condition 1 précédente:

- lorsque l'activité totale maximum permise aura été immergée,

- ou lorsque 3 périodes du radioélément se seront écoulées après une immersion qui sera alors la dernière de la campagne.

Deux campagnes distinctes ne pourront pas être séparées par moins de 3 périodes du radioélément immergé.

### III - CONDITIONS PARTICULIERES D'EMPLOI DES RADIOELEMENTS EN SEDIMENTOLOGIE, EN RELATION AVEC LES LIEUX D'UTILISATIONS

III.1 - En mer ou en rivière par des profondeurs et dans des lieux dont le relief exclut le retour des sédiments sur des bancs ou plages et si, de plus, ces lieux ne sont pas pêchés par traçage :  
pas de conditions particulières.

(5) Voir annexe 5: campagne d'immersion.

III.2 - En mer ou en rivière par des fonds et dans des lieux permettant les retours des sédiments sur les plages ou bancs du voisinage, sans que pour cela ils ne découvrent :

a) dans une zone draguée pour améliorer un chenal ou pour récupérer des matériaux de construction.

b) dans des zones pêchées au chalut ou avec des filets raclant le fond :

pas de conditions spéciales d'immersion, mais mesures suivantes à prendre :

- interdiction de pêche sur une zone multipliant par 10 le mouvement propre de l'appareil de détection.

- contrôle de la radioactivité des plages ou bancs du voisinage pendant 2 fois la période du radionucléide utilisé.

- installation d'une zone surveillée lorsque le mouvement propre de l'appareillage sur ces plages et bancs est égal à 10 fois le mouvement propre de l'appareil de détection, pris sur un terrain sablonneux.

III.3 - En mer par fond inférieur à celui où un baigneur peut avoir pied à marée basse, sur les plages, bancs et dunas, en rivière par fond inférieur à ceux où les baigneurs ont pied, lorsqu'il y a risque de voir le sol asséché par étiage, dans les lieux découverts en zones draguées :

L'immersion doit être menée de façon à ne pas dépasser sur la zone d'immersion un débit de dose moyen de 2,5 mR/h aux pieds sans atteindre une dose maximum de 25 mR/h.

Le débit de dose moyen à 1 mètre du sol ne doit pas dépasser 0,25 mR/h sans atteindre localement un maximum de 2,5 mR/h.

Mesures à prendre

- Interdiction d'accès durant l'immersion et sur toute zone donnant un débit de dose égal au 1/100 des débits de dose précédents.

- Installation d'une zone surveillée lorsque le mouvement propre de l'appareillage de détection sur ces zones est égal à 10 fois le mouvement propre du même appareillage pris sur un terrain sablonneux.

III.4 - Zone d'ostréiculture ou de récoltes systématiques de coquillages.

Interdiction d'emploi des radioéléments.

ANNEXE ICONDITIONS PARTICULIERES D'EMPLOI

Les "conditions particulières d'emploi" (C.P.E.) sont les conditions que doit suivre normalement l'utilisateur.

Elles permettent l'examen accéléré des demandes de fourniture de radioéléments lorsque l'utilisateur prouve qu'il respecte ces conditions.

Elles jouent le rôle de règlement vis-à-vis des organismes extérieurs (Municipalités, Préfets, Ponts et Chaussées, Phares et Balises, Eaux et Forêts, etc.) qui régissent l'exploitation, l'organisation, la protection des sites et des populations sur les lieux d'expériences.

Elles n'excluent pas l'emploi des radioéléments en dehors de ces conditions, mais, dans ce cas, des dérogations devront être obtenues auprès de la Commission interministérielle des radioéléments artificiels et du Service central de protection contre les rayonnements ionisants. Il est alors nécessaire d'introduire auprès de ces organismes, au moins un mois avant la manipulation des radioéléments, un dossier donnant les raisons pour lesquelles les C.P.E. ne peuvent pas être respectées.

ANNEXE 2NOMENCLATURE DES SEDIMENTS

Dans ce qui suit, sera adoptée la nomenclature suivante :

- Vases : sédiments de diamètre inférieur à 60  $\mu$   
Sables : sédiments de diamètre compris entre 60  $\mu$  et 2 mm  
Graviers : sédiments de diamètre compris entre 2 mm et 2 cm  
Galets : sédiments de diamètre supérieur à 2 cm

Cette nomenclature est inspirée de celle de la British Standard Institution (B.S.).

Référence :

Methods of testing soils for civil engineering purposes  
B.S. 1377, 1961, p. 45.

ANNEXE 3ACTIVITE DES RADIOELEMENTS

Les formules données dans les C.P.E. concernant les activités sont déduites de considérations exposées dans la présente annexe.

Les bases des calculs qui suivent sont extraites du Rapport du Comité II sur la dose admissible en cas d'irradiation interne (Recommandations de la C.I.P.R. 1959).

Il a été admis que les personnes, pouvant encourir un risque du fait de l'immersion de sédiment marqué, faisaient partie de la catégorie B (c) : "Individus du public habitant au voisinage de zones contrôlées".

Cette catégorie est ainsi définie dans le précédent rapport.

I - PROBLEME DE L'ACTIVITE INDIVIDUELLE DES GRAINS

(relatif au paragraphe II - 3 - 1 - 1 des C.P.F.)

Pour les vases, sables, graviers, le risque retenu pour déterminer les activités à mettre en jeu, a été le risque somatique d'irradiation interne par ingestion de particules sédimentaires. Le calcul qui suit est donc basé sur le séjour d'un grain marqué dans le tractus gastro-intestinal.

Conformément aux consignes données dans le Rapport II, il a été considéré que la dose maximale annuelle pour un organe isolé d'une personne de la catégorie B (c) était de 1,5 rem.

Il a été admis que, compte tenu de la très faible probabilité (voir Annexe 4) pour que soit reçue cette dose, elle pouvait l'être en une seule fois.

Pour les grains radioactifs, l'organe critique considéré est le tractus gastro-intestinal (TGI) ou une partie de celui-ci : estomac (E), intestin grêle (IG), gros intestin supérieur (GIS) ou gros intestin inférieur (GII). Reprenant le calcul développé dans le rapport du Comité II, en IV-5, la dose R reçue par un organe critique du TGI, lors du passage d'un grain d'activité  $q(\mu\text{Ci})$  d'un radioélément d'énergie efficace E (Rcv) est :

$$R_{\text{max}} = \frac{3,7 \cdot 10^4 \times 84.000 \times \mathcal{C} \times q \times E \times 1,6 \cdot 10^{-6}}{2 \times 100 \times m} \quad (1)$$

équation dans laquelle  $\mathcal{C}$  est le temps de séjour, en jours, du radioélément dans l'organe critique,  $m$  la masse du contenu de la fraction considérée.

Le facteur  $3,7 \cdot 10^4 \times 84.000 \times \mathcal{C} \times q$  donne le nombre total de désintégrations de l'activité  $q$  pendant le temps  $\mathcal{C}$ .

Le facteur  $E \times 1,6 \cdot 10^{-6}$  transforme l'énergie en ergs

$\frac{E \times 1,6 \cdot 10^{-6}}{100 \text{ m}}$  transforme l'énergie en rcm

Le facteur  $\frac{1}{2}$  exprime que la dose délivrée à la paroi de TGI n'est égale en moyenne qu'à la moitié de la dose délivrée à son contenu.

Pour une dose reçue de 1,5 rcm, l'équation (1) fournit l'activité  $q$  maximum admissible donnée par :

$$q(\mu\text{Ci})_{\text{max}} = \frac{6 \cdot 10^{-2} \times m}{E \times \mathcal{C}} \quad (2)$$

La formule (2) a été utilisée pour le calcul de l'activité maximum admissible individuelle d'un grain, pour les radioéléments recommandés dans le règlement. En pratique, le temps de séjour  $\mathcal{C}$  est beaucoup plus grand pour le GI que pour les autres fractions du TGI et il s'avère que le GI est l'organe critique dans tous les cas. Le calcul a été mené pour :

le GI total (GII + GIS) avec les hypothèses suivantes :

$$m = m_{\text{GII}} + m_{\text{GIS}} = 150 \text{ g} + 135 \text{ g} = 285 \text{ g}$$

$$\mathcal{C} = \frac{10}{24} + \frac{8}{24} = \frac{20}{24}$$

La formule (2) devient :

$$(q_{\text{Pu}})_{\text{max}} = \frac{15,6}{E} \text{ (MeV)} \quad (3)$$

Les résultats sont exposés dans le règlement.

NOTE 1 - On peut considérer aussi que le GII est l'organe critique, avec les hypothèses suivantes :

$$E_{\text{GII}} = 150$$

$$\bar{E} = \frac{8}{2}$$

La formule (2) devient alors :

$$(q_{\text{Pu}})_{\text{max}} = \frac{12}{E} \text{ (MeV)} \quad (3')$$

On obtiendrait alors :

	$^{198}\text{Au}$	$^{192}\text{Ir}$	$^{140}(\text{Ba}+\text{La})$	$^{51}\text{Cr}$	$^{46}\text{Sc}$	$^{182}\text{Ta}$	$^{95}(\text{Zr}+\text{Nb})$	$^{32}\text{P}$
$q_{\mu\text{Ci}}$ selon (3') organe critique GII	27	28,5	10,7	120	30	31,5	30	17,5

NOTE 2 - Nulle part n'intervient la décroissance du radio-élément, ce qui suppose l'ingestion du grain le jour de son immersion, hypothèse fortement improbable, mais qui va dans le sens de la sécurité.

## II - PROBLEME DE L'ACTIVITE TOTALE DES GRAINS

Pour déterminer les activités totales maximum admissibles, on doit tenir compte :

- 1) des impératifs techniques
- 2) des risques encourus et de leurs probabilités.

En ce qui concerne le premier point, on peut considérer que beaucoup de problèmes pourront être résolus par l'emploi d'une dizaine de Ci de  $^{46}\text{Sc}$ . Le  $^{46}\text{Sc}$  est un élément fréquemment cité dans la littérature pour ce genre d'application; certes des activités notablement plus élevées de cet isotope ont déjà été utilisées\*, mais elles correspondent à des cas assez rares pour lesquels il ne serait pas gênant de demander des dérogations spéciales.

En conséquence, quelles que soient les autres considérations, il est inutile d'autoriser l'emploi de plus d'une dizaine de Ci de  $^{46}\text{Sc}$ .

Ceci correspondrait à l'emploi de  $2,5 \cdot 10^5$  grains d'activité q max. Puisque q max a été calculé pour différents radioéléments, l'activité maximum totale qu'il sera permis d'utiliser est :

$$A_{\text{max}} = 2,5 \cdot 10^5 \cdot q_{\text{max}}$$

expression qui fournit la première ligne du tableau du paragraphe II-3-1-2 du règlement.

Cependant, on doit considérer que l'injection d'un grain d'activité maximum entraîne du point de vue somatique un risque maximum; il convient donc, autant qu'il se peut, de diminuer la probabilité de ce risque, en réservant l'emploi de l'activité totale maximum A max au cas où il est possible d'utiliser une activité individuelle moindre.

Dans ces conditions, il semble normal de n'autoriser l'activité A max que pour le grain d'activité inférieure à  $\frac{q_{\text{max}}}{10}$ , et de n'autoriser  $\frac{A_{\text{max}}}{10}$  que pour les grains d'activité maximum q max.

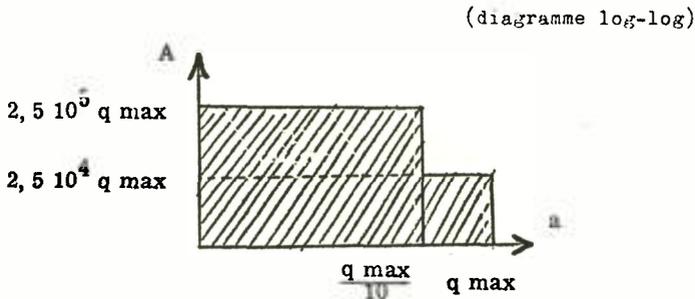
\* Voir par exemple :-Putman et Smith, "Emploi de  $^{29}\text{Ci}$  dans la Tamise", I.J.A.R.I., 1(1956), 24-32  
-Ranandani et Gole, "Emploi de  $^{17}\text{Ci}$  dans le port de Bombay", XXe Congrès Intern. de Navigation, S II 5, p. 81

Une telle proposition peut paraître arbitraire; cependant elle aboutit à une loi "Activité totale - Activité individuelle", qui a une certaine signification physique (voir Annexe 4).

Ceci revient à autoriser l'immersion d'un maximum de  $2,5 \cdot 10^4$  grains lorsque tous les grains ont l'activité maximum, et  $2,5 \cdot 10^6$  grains lorsque tous les grains ont une activité de  $\frac{q_{\max}}{10}$ .

Le problème consiste à joindre dans un système A, a, les deux points de référence ( $A = 2,5 \cdot 10^4 \times q_{\max}$ ,  $a = q_{\max}$  et  $A = 2,5 \cdot 10^6 \times \frac{q_{\max}}{10}$  et  $a = \frac{q_{\max}}{10}$ ). Deux solutions ont été envisagées :

a) Solution "discontinue" dans laquelle on passe brusquement de  $A = 2,5 \cdot 10^4 q_{\max}$ , si l'activité individuelle "a" des grains est comprise entre  $q_{\max}$  et  $\frac{q_{\max}}{10}$ , à  $A = 2,5 \cdot 10^5 q_{\max}$ , si tous les grains ont une activité inférieure à  $\frac{q_{\max}}{10}$ . Le graphique représentatif de  $A = f(a)$  serait le suivant :



Cette solution a l'avantage d'être simple et de pouvoir s'exprimer assez facilement dans le règlement. Du point de vue des impératifs techniques elle apparaît satisfaisante et moins "large" que la solution "continue" exposée plus loin. Par contre, elle est illogique.

Le règlement concernant ce point pourrait alors être ainsi rédigé :

Activité maximum totale admissible

L'activité maximum totale admissible est de :

$2,5 \cdot 10^5 p_1 q_{\max}$ , pour les grains d'activité individuelle inférieure

$$A \frac{q_{\max}}{10}$$

$2,5 \cdot 10^4 p_2 q_{\max}$ , pour les grains d'activité individuelle comprise

entre  $q_{\max}$  et  $\frac{q_{\max}}{10} p_1$  et  $p_2$  étant les proportions de chacune des deux catégories.

b) Solution "continue" dans laquelle les deux points précédents :

$$A = 2,4 \cdot 10^4 q_{\max} \text{ avec } a = q_{\max}$$

et

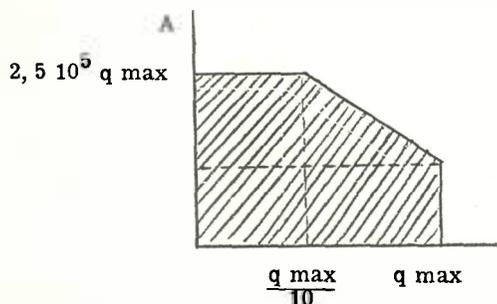
$$A = 2,4 \cdot 10^5 q_{\max} \text{ avec } a = \frac{q_{\max}}{10}$$

sont reliés par la loi continue :

$$A(a) = \frac{2,5 \cdot 10^4 (q_{\max})^2}{a}$$

Le graphique représentatif de  $A = f(a)$  serait le suivant :

(diagramme log-log)



Cette solution, plus logique que la précédente, tient compte du fait que les grains les plus actifs sont les plus dangereux (risque individuel sonatique).

Dans une telle loi, l'activité totale diminue lorsque l'activité individuelle augmente; dès lors, le nombre de grains actifs diminue fortement, ce qui correspond à une probabilité moindre d'une ingestion par un individu. Nous avons d'ailleurs fait une étude détaillée des résultats et conséquences de cette loi, pour le cas le plus général, puis appliquée à un cas particulier. Cette étude, donnée dans l'Annexe 4, permet de se rendre compte des risques encourus et de leurs probabilités; elle peut servir de base à la préparation des examens de dossiers lorsque, par exception, les activités mises en jeu doivent sortir des normes précédentes.

### III - PROBLEME DE L'ACTIVITE INDIVIDUELLE DES GALETS

Pour les galets, le risque retenu pour déterminer les activités à notre en jeu, a été le risque somatique d'irradiation dû à la présence d'un galet dans la poche d'un individu, l'organe critique d'irradiation étant les gonades.

Conformément aux consignes données dans le Rapport II, on a considéré que la dose maximale annuelle pour les gonades d'une personne de la catégorie B (c) était 0,5 rem.

Il a été admis, compte tenu de la très faible probabilité pour que soit reçue cette dose, qu'elle pouvait l'être en une seule fois.

On a supposé que la zone irradiée était située à 10 cm de la source, le rayonnement subissant une absorption négligeable dans le galet, mais une certaine absorption dans les tissus humains.

Dans ces conditions, la dose reçue pendant une irradiation de  $\tau$  heures par  $q$   $\mu\text{Ci}$  d'un radioélément de constante de dose  $k$  en roentgen/heure/ 1 m/Curie est :

$$R = 10^{-4} k q \tau e^{-\mu x}$$

L'efficacité biologique relative du rayonnement  $\gamma$  a été prise égale à 1.

Pour une dose reçue de  $0,5 \text{ rad}$

$$q_{\mu\text{Ci}} = \frac{0,7 \cdot 10^4}{k \cdot 2} e^{-10 \mu} \quad (5) \quad \mu \text{ en cm}^{-1}$$

Le calcul a été mené pour un temps d'irradiation qui semble raisonnable : 120 heures correspondant soit à 15 jours à 8 heures par jour, soit à 10 jours à 12 heures par jour.

La formule (5) devient :

$$(q_{\mu\text{Ci}})_{\text{max}} = \frac{42}{k} \cdot 10 \mu \quad (6)$$

Les résultats sont exprimés dans le règlement.

#### IV - PROBLEME DE L'ACTIVITE TOTALE ADMISSIBLE EN GALETS

La plus grande partie des expériences de galats pouvant se faire avec 10.000 unités sédimentaires, nous proposons que l'activité totale admissible soit égale à :

$$A_{\mu\text{Ci}}_{\text{max}} = 10.000 (q_{\mu\text{Ci}})_{\text{max}}$$

ce qui entraîne le règlement.

ANNEXE 4LES RISQUES ENCOURUS ET LEURS PROBABILITES

Il a semblé utile d'examiner les risques encourus et leurs probabilités dans le cas de rejet de sable actif sur une plage fréquentée.

Pour cela nous avons voulu regarder les conséquences de la loi choisie dans le règlement pour relier l'activité totale admissible à l'activité individuelle des grains.

I - LA LOI "ACTIVITE TOTALE - ACTIVITE INDIVIDUELLE"I. 1 - La loi

Dans le règlement, la loi reliant l'activité totale admissible A à l'activité individuelle des grains "a" est :

$$A = \frac{2,5 \cdot 10^4 (a_{\max})^2}{a} \quad (1)$$

Dans une telle loi, l'activité totale diminue lorsque l'activité individuelle augmente; le nombre des grains actifs injectés diminue plus vite que n'augmente leur activité individuelle, et plus vite également diminue la probabilité d'ingestion d'un grain actif par un individu, qui ne croît la dose qu'il est susceptible de recevoir. Ceci semble a priori un bon élément de sécurité et fournit les raisons du choix de cette loi.

I. 2. - Signification de cette loi

Si N est le nombre de grains injectés, (1) s'écrit :

$$N a \times a = 2,5 \cdot 10^4 (a_{\max})^2 \quad (2)$$

En première approximation, lorsque le rejet de grains actifs sur la plage n'est pas important, la probabilité d'ingérer un grain actif d'activité "a" est la seule à considérer et est proportionnelle à N :

$$p_a = p_1 = kN \quad k = \text{cte}$$

La loi (2) devient :

$$a \times a \times p(a) = \text{cte} \quad (3)$$

Si  $d(a)$  est la dose reçue par l'ingestion de l'activité "a", on a :

$$d(a) \times d(a) \times p(a) = \text{cte} \quad (3')$$

$d(a) \times p(a)$  est le produit de la dose reçue par sa probabilité de la voir reçue. C'est donc l'évaluation d'un risque, évaluation généralement faite par le produit de l'effet (ici la dose) par la probabilité de voir cet effet se réaliser.

Dire que  $d(a) \times d(a) \times p(a) = \text{cte}$ , c'est dire que le risque est constant si on attribue une efficacité biologique de dose proportionnelle à cette dose.

$$\begin{array}{ccccc} \frac{d(a)}{\downarrow} & \times & \frac{d(a)}{\downarrow} & \times & \frac{p(a)}{\downarrow} = K_0 \text{ ct} \\ \text{(effet biologique de dose)} & & \text{(effet physique)} & & \text{(probabilité de l'effet) = } K_0 \text{ ct} \end{array}$$

Nous utilisons ici le terme "effet biologique" par analogie avec le terme classique "efficacité biologique relative EBR", qui ne s'applique qu'à l'effet biologique d'un rayonnement de nature donnée.

### 1.3. - Généralisation de la loi

De la formule (1) il ressort que l'activité maximum admissible totale tend vers l'infini lorsque l'activité individuelle tend vers zéro.

Mais lorsque l'activité individuelle tend vers zéro, le nombre de grains actifs tend vers l'infini; la probabilité d'ingérer un grain,

et un seul, n'est plus seule significative et l'on doit tenir compte des probabilités d'ingérer 2, 3... j grains actifs.

La probabilité d'ingérer 2 grains et 2 seulement étant  $p_2$ , d'ingérer j grains et j grains seulement étant  $p_j$ , le risque moyen est alors proportionnel à :

$$p_1 a^2 + p_2 (2a)^2 + \dots + p_j (j a)^2 \dots = \sum_{j=1}^{j=\infty} (j a)^2 p_j$$

$$\sum_{j=1}^{j=\infty} (j a)^2 p_j$$

est la moyenne théorique d'ordre 2 de l'activité ingérée.

On désire maintenir ce risque moyen constant et la loi généralisée s'écrit :

$$a^2 \sum_{j=1}^{j=\infty} j^2 p_j = K_0$$

Cette loi généralisée va être appliquée au cas général d'un rejet sur une plage et sera traitée avec valeurs numériques dans un cas particulier.

## II - REJET DE SABLE RADIOACTIF. CAS GENERAL

### II.1 - Notations et probabilités

Dans ce qui suit, les notations suivantes seront utilisées :

- a = activité individuelle des grains
- A = activité totale maximum admissible
- N = nombre de grains actifs injectés
- n = nombre de grains actifs rejetés par  $m^3$  de plage
- v = nombre total de grains par  $m^3$  de plage

- $c = \frac{n}{N}$  = taux de rejet volumique supposé constant dans une expérience donnée (égal à la fraction de l'activité totale rejetée par  $m^3$  de plage)  
 $q$  = nombre total de grains actifs et inactifs ingérés par individu et par an  
 $\alpha$  = nombre de personnes fréquentant la plage.

Dans ces conditions, les probabilités pour une personne d'avoir ingéré 0, 1, 2... j grains actifs\*, sont respectivement  $p_0, p_1, p_2 \dots p_j$  :

$$\begin{aligned}
 p_0 &= \left(1 - \frac{n}{N}\right)^q \\
 p_1 &= \left(1 - \frac{n}{N}\right)^{q-1} \frac{qn}{N} \\
 p_2 &= \left(1 - \frac{n}{N}\right)^{q-2} \left(\frac{n}{N}\right)^2 \frac{q^2}{2} \\
 &\vdots \\
 p_j &= \left(1 - \frac{n}{N}\right)^{q-j} \left(\frac{n}{N}\right)^j \frac{q^j}{j!}
 \end{aligned}$$

Nous sommes en présence d'une distribution binomiale, qui tend vers une loi de Poisson si j est petit devant q et  $\frac{n}{N}$  petit. En effet :

$$\begin{aligned}
 \left(1 - \frac{n}{N}\right)^{q-j} &= \left(1 - \frac{n}{N}\right)^{\frac{j}{N}} \frac{n(q-j)}{N} \sim e^{-\frac{n(q-j)}{N}} \sim e^{-\frac{ng}{N}} \\
 \frac{q^j}{j!(q-j)!} &\sim \frac{q^j}{j!}
 \end{aligned}$$

et

$$p_j \sim \frac{e^{-\frac{ng}{N}}}{j!} \times \frac{\left(\frac{ng}{N}\right)^j}{j!} = \frac{e^{-k} k^j}{j!} \quad \text{avec } k = \frac{ng}{N}$$

La probabilité est donc donnée par une loi de Poisson de valeur moyenne k qui est le nombre moyen de grains actifs ingérés par individu et par an.

\* En un an.

II.2 - Allure de la courbe "Activité totale - Activité individuelle" (Fig. 1)

II.2.1 - Calcul de  $K_0$

$K_0$  est calculé pour le point de référence correspondant à l'utilisation de l'activité individuelle maximum permise  $a_{\max}$ .

$$a = a_{\max} \quad N = 2,5 \cdot 10^4$$

Nous admettons que, dans tous les cas, pour ce point :

$$k = \frac{nq}{\sqrt{\quad}} \leq \frac{1}{1000}$$

Cette hypothèse est justifiée par le faible nombre de grains utilisés et par la valeur de  $10^{-6}$  trouvée pour le cas particulier traité dans la partie III (voir plus loin). L'exemple donné en III est basé sur des conditions d'ingestion déjà rigoureuses et il semble improbable que, par rapport à cet exemple,  $k$  puisse être multiplié par un facteur 1000 pour ce point de référence.

Dans ces conditions :

$$p_1 \sim k \leq \frac{1}{1000}$$

$$p_2 \sim \frac{k^2}{2} \leq \frac{10^{-6}}{2}, \text{ etc.}$$

et seule intervient la probabilité de manger un grain et un seul.

$$\begin{aligned} K_0 &= a^2 \times p_1 = \frac{nq (a_{\max})^2}{\sqrt{\quad}} \\ &= \frac{2,5 \cdot 10^4 \text{ cq } (a_{\max})^2}{\sqrt{\quad}} \end{aligned}$$

Cette constante  $K_0$  correspond au point  $Q_0$  de la courbe. Pour ces conditions :

$$\begin{aligned} &\frac{2,5 \cdot 10^4 \text{ cq}}{\sqrt{\quad}} \times \alpha \text{ personnes mangeront 1 grain, recevront } 1,5 \text{ rem} \\ &\frac{1}{2} \left( \frac{2,5 \cdot 10^4 \text{ cq}}{\sqrt{\quad}} \right)^2 \times \alpha \text{ personnes mangeront 2 grains, recevront } 3 \text{ rem} \\ &\frac{1}{j!} \left( \frac{2,5 \cdot 10^4 \text{ cq}}{\sqrt{\quad}} \right)^j \times \alpha \text{ personnes mangeront } j \text{ grains, recevront } 1,5j \text{ rem} \end{aligned}$$

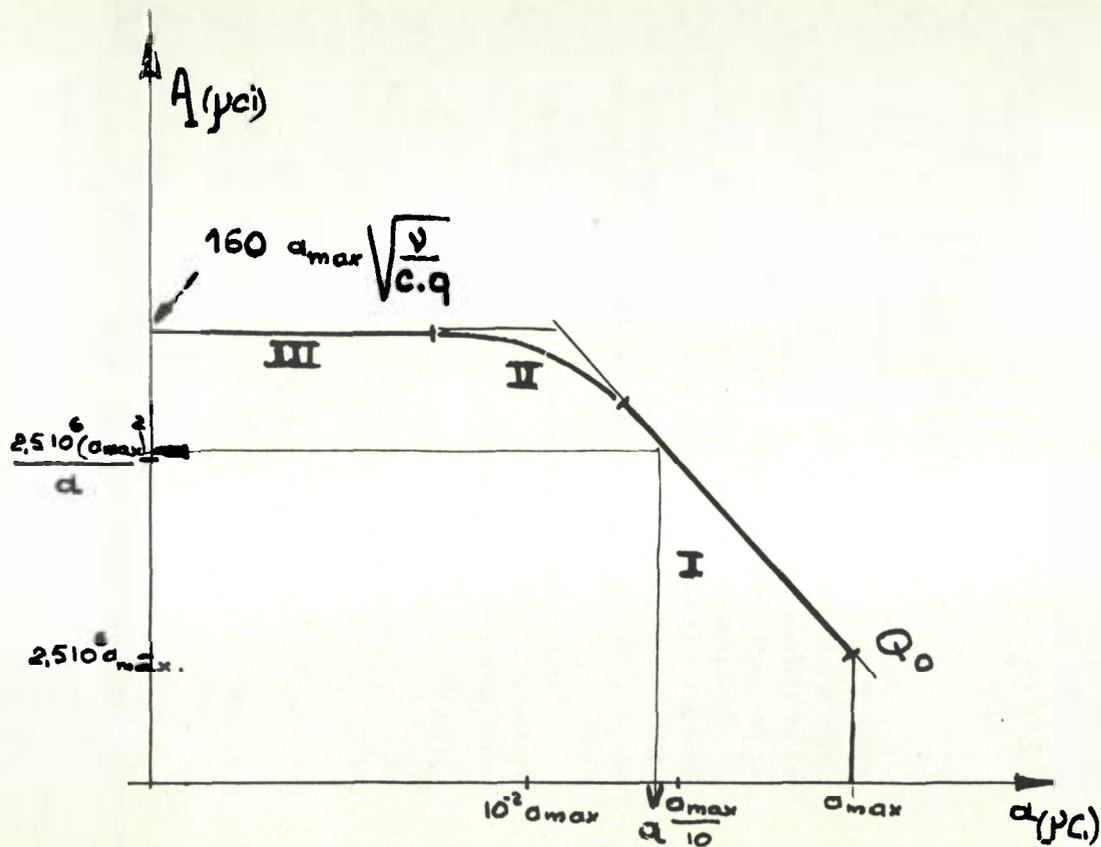


Figure 1 - Allure de la fonction  $A = f(a)$ .

### II.2.2 - Partie I de la courbe (Fig. 1)

Faisons maintenant croître  $N$ , en même temps que croît  $n$ . Tant que  $k$  reste bien inférieur à 1, les probabilités  $p_2, p_3 \dots p_j$  restent négligeables devant  $p_1$  équivalent à  $k$ .

Dès lors :

$$a^2 \sum j^2 p_j = a^2 p_1 = \frac{a^2 c N q}{\gamma} = K_0 = \frac{2,5 \cdot 10^4 c q (a_{\max})^2}{\gamma}$$

$$aN = A = \frac{2,5 \cdot 10^4 (a_{\max})^2}{\gamma}$$

L'activité totale  $A$  est alors une fonction inverse de  $a$ . Sur un diagramme  $\log A, \log a$ , la fonction est représentée par une droite de pente  $-1$  (partie I de la courbe).

Remarquons que dans cette première partie de la courbe cette activité est indépendante du taux de rejet, de la granulométrie de la plage et du nombre de grains ingérés par an par personne. Elle ne dépend que de l'activité individuelle des grains.

Par rapport au point précédent (point  $Q_0$ ), pour des grains d'activité 10 fois plus faible, par exemple 100 fois plus de personnes mangeront 1 grain et recevront 0,15 rem, mais :

$$\frac{1}{10!} \left( \frac{cNq}{\gamma} \right)^{10} \quad \alpha \text{ personnes mangeront 10 grains et recevront 1,5 rem.}$$

Ce nombre est considérablement plus bas que pour le point  $Q_0$ . Si par exemple :

$$k = 10^{-4} \text{ en } Q_0 = p_1 = p(1,5 | \text{rem}), \text{ maintenant}$$

$$k = 10^{-2} \quad \frac{k^{10}}{10!} = \frac{10^{-20}}{3,6 \cdot 10^6} = p(1,5 \text{ rem})$$

### II.2.3 - Partie III de la courbe

Considérons le cas où le nombre  $N$  de grains injectés a suffisamment augmenté pour que :

$$k = \frac{cNq}{\gamma} \gg 1$$

On doit tenir compte alors de toutes les probabilités  $p_1, p_2 \dots p_j$  :

$$a^2 (\sum j^2 p_j) = \frac{2,5 \cdot 10^4 \cdot c \cdot q \cdot (a_{\max})^2}{\rho}$$

$$\sum j^2 p_j = \overline{j^2}$$

Pour calculer  $\overline{j^2}$ , nous utiliserons la formule :

$$\overline{f(x)} = f(\overline{x}) + \frac{x - \overline{x}}{1!} f'(\overline{x}) + \frac{(x - \overline{x})^2}{2!} f''(\overline{x}) + \dots$$

Le terme  $(x - \overline{x})$  est nul par définition.

Dans notre cas  $f(x) = x^2$  et le développement limité s'arrête au 3e terme  $f''_x = 2$ ; comme  $\overline{(j - \overline{j})^2}$  représente la variance d'une distribution de Poisson, qui est égale à la valeur moyenne de la variable, on a :

$$\overline{(j - \overline{j})^2} = \overline{j} \text{ et}$$

$$\overline{j^2} = (\overline{j})^2 + \overline{j} = k^2 + k$$

Remarque

$\overline{j^2}$  peut se calculer directement. En effet :

$$\overline{j^2} = \sum j^2 p_j = \sum \frac{e^{-k} k^j}{j!} j^2 = e^{-k} \sum \frac{k^j \cdot j}{(j-1)!}$$

Or, on peut écrire :

$$\begin{aligned} \sum \frac{j k^j}{(j-1)!} &= \sum \frac{k^j}{(j-1)!} + \frac{(j-1)k^j}{(j-1)!} \\ &= k \sum \frac{k^{j-1}}{(j-1)!} + k^2 \sum \frac{k^{j-2}}{(j-2)!} \\ &= k e^k + k^2 e^k \\ &= e^k (k + k^2) \end{aligned}$$

donc

$$\overline{j^2} = e^{-k} \times e^k (k + k^2) = k + k^2$$

#### Conclusion

$\overline{j^2}$  est équivalent à  $k^2$  quand  $k$  est élevé.

Il vient alors :

$$a^2 k^2 = (aN)^2 \times \frac{c^2 q^2}{\sqrt{2}} = \frac{2,5 \cdot 10^4 c q (a_{\max})^2}{\sqrt{2}} = K_0$$

et l'activité totale :

$$A_{\mu Ci} = 160 a_{\max} \sqrt{\frac{q}{c q}}$$

L'activité totale est constante, puisque indépendante de l'activité individuelle : elle dépend maintenant du taux de rejet  $c$ , de la granulométrie caractérisée par  $\sqrt{q}$  et du nombre de grains ingérés  $q$ , ou plus exactement de la fraction  $\frac{q}{\sqrt{q}}$  de sable ingéré.

Dans cette ré  
par la majeure parti  
correspond à l'inges  
stante.

Pour calculer  
il faut déterminer l  
pond à l'absorption  
 $a_{\max}$ . Ce nombre d'é  
voir 1,5 rem ou plus  
ceptibles de recevoi  
leurs de plusieurs c  
celles calculées pou

#### II.2.4. - Par

Pour cette ré

0,1

La seule faç  
calcul exact suivan  
Les risques  
répartition.

Le tableau c  
sommés  $\sum j^2 p_j$  pour  
0,5 , 0,8 , 0,9 , 1

### III - REJET DE SABLE RADIOAC

Les considérations  
concret, défini par des hypc

#### III.1. - Hypothèses

Nous supposons un r

- sur une plage de s  
de 0,25 mm de diamètre, corn

- cette plage est 1

loi

0  
5  
1

de Poisson de valeur moyenne = k

1	2		3		5		10	
$j^2 p_j$	$p_j$	$j^2 p_j$	$p_j$	$j^2 p_j$	$p_j$	$j^2 p_j$	$p_j$	$j^2 p_j$
	0,15		0,05		0,007			
0,370	0,27	0,270	0,15	0,150	0,034	0,034	0,0005	
0,740	0,27	1,080	0,22	0,880	0,084	0,336	0,0023	0,009
0,540	0,18	1,620	0,27	1,980	0,140	1,260	0,0076	0,069
0,240	0,09	1,440	0,17	2,720	0,175	2,800	0,0189	0,302
0,068	0,04	1,000	0,10	2,500	0,175	4,375	0,0378	0,945
0,012	0,01	0,360	0,05	1,800	0,146	5,256	0,0631	2,272
0,005	0,005	0,147	0,02	0,980	0,104	5,200	0,0900	4,41
<u>1,975</u>	0,0009	0,058	0,008	0,510	0,065	4,160	0,1126	7,17
	0,0002	0,016	0,0027	0,220	0,036	2,920	0,1251	10,12
		$\Sigma = 6,0$	0,0008	0,080	0,018	1,800	0,1251	12,51
			0,0003	0,036	0,008	0,968	0,1157	13,75
				$\Sigma = 11,87$	0,0034	0,489	0,0948	13,65
					0,0013	0,220	0,0729	12,32
					0,0005	0,098	0,0521	10,21
					0,0002	0,045	0,0347	7,80
					0,0001	0,025	0,0217	5,50
						$\Sigma = 30,0$	0,0128	3,69
							0,0064	2,07
							0,0037	1,33
								$\Sigma = 109$

4 mois de l'année; ces personnes mangent 5 g de sable par jour, soit 600 g par an correspondant à  $q = 4 \cdot 10^7$  grains ingérés par an. Tous ces grains sont prélevés sur des zones de rejet après une immersion au large;

- la probabilité de rejet de grains actifs au  $m^3$  est de  $c = 10^{-7}$  constante quel que soit le nombre de grains actifs injectés. Le traceur utilisé est du  $^{46}\text{Sc}$ .

Ces hypothèses, bien que plausibles, sont déjà par elles-mêmes peu probables, en effet :

- elles ne tiennent pas compte de la décroissance du radioélément, bien que presque toutes les expériences réelles aient lieu en hiver, moment des crues de rivières et des travaux possibles sur les plages maritimes;

- elles supposent l'absorption journalière de 5 g de sable par 10.000 individus, ce qui semble bien improbable.

A partir de ces hypothèses, nous allons examiner les risques moyens de la population et les risques individuels maxima lorsque, partant d'une injection de  $2,5 \cdot 10^4$  grains actifs de  $40 \mu\text{Ci}$  chacun, on fait croître le nombre de grains actifs injectés en diminuant leur activité spécifique suivant la relation :

$$\sum (ja)^2 \times p_j = K_0$$

### III.2. - Injections de grains actifs

#### III.2.1. - Injection de $N = 2,5 \cdot 10^4$ grains actifs de $40 \mu\text{Ci}$ $A = na = 1 \text{ Ci}$

$$n = cN = 2,5 \cdot 10^{-3} \quad (\text{en moyenne 1 grain rejeté par } 400 \text{ m}^3)$$

$$k = \frac{nq}{v} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3} \times 4 \cdot 10^7}{10^{11}} = 10^{-6} \sim p_1$$

Ceci justifie l'hypothèse précédemment faite en

III.2.1. selon laquelle :

$$k_0 = 40^2 \times 10^{-6} = 16 \cdot 10^{-4}.$$

Risques

En moyenne  $p_1 \alpha = 10^{-2}$  personnes mangeront 1 grain et recevront 1,5 rem en un an soit, si l'expérience était renouvelée tous les ans avec la même hypothèse : en moyenne 1 seule personne de la population aura mangé 1 grain actif en 100 ans.

La probabilité  $p_2 \sim (p_1)^2/2 \neq 10^{-12}$ , d'où  $p_2 \alpha = 10^{-8}$  personnes mangeront 2 grains et recevront 3 rem, soit 1 personne recevant 3 rem en 1 an une fois tous les  $10^8$  ans.

III.2.2. - Injection de  $N = 2,5 \cdot 10^6$  grains

$$p_1 = k = 10^{-4}$$

permet une activité individuelle  
et une activité totale

$n = 4 \mu\text{Ci}$
$A = 10 \text{ Ci}$

Risques

En moyenne :

1 personne mangera 1 grain actif et recevra 0,15 rem en 1 an,  
1 personne mangera 2 grains tous les  $10^4$  ans et recevra  
0,3 rem en 1 an.

$k$  reste inférieur à 0,1 tant que  $N < 2,5 \cdot 10^9$  grains,  
d'où :

III.2.3. - Injection de  $N = 2,5 \cdot 10^7$  grains

$$k = 0,1$$

Selon le tableau précédent :  $p_1 = 0,09$ ,  $p_2 = 0,0045$ ,  
 $p_3 = 0,0002$ ,

$$\text{et } \sum_j j^2 p_j = 0,1103,$$

ce qui permet une activité individuelle  
et une activité totale

$n = 0,12 \mu\text{Ci}$
$A = 292 \text{ Ci}$

Risques

En moyenne :

900 personnes mangeront 1 grain et recevront 4,5 mrems en 1 an  
 45 personnes mangeront 2 grains et recevront 9 mrems en 1 an  
 2 personnes mangeront 3 grains et recevront 13,5 mrems  
 en 1 an  
 1 personne mangera tous les  $3.10^{72}$  ans 34 grains et recevra  
 1,5 rem par an.

III.2.4. - Injection de  $N = 2,5 \cdot 10^{10}$  grains

$k = 1$

Selon le tableau (Annexe 3, I, Note 1) :

$$\sum_j j^2 p_j = 1,975$$

ce qui permet une activité individuelle  
 et une activité totale

$\bar{n}$	=	0,028 $\mu$ Ci
$\bar{A}$	=	700 Ci

Risques

En moyenne :

3700 personnes mangeront 1 grain et recevront 1 mrem en 1 an  
 1875 personnes mangeront 2 grains et recevront 2 mrems  
 en 1 an  
 1 personne mangera 7 grains et recevra 7 mrems en 1 an  
 1 personne mangera tous les  $10^{250}$  ans 144 grains et  
 recevra 1,5 rem.

III.2.5. - Injection de  $2,5 \cdot 10^{12}$  grains

soit  $25 \text{ m}^3$ , ( $k = 100$ ).

$$\sum_j j^2 \times p_j = 10^4 + 50 \neq 10^4$$

ce qui permet une activité individuelle  
 et une activité totale

$\bar{n}$	=	$4 \cdot 10^{-4} \mu$ Ci
$\bar{A}$	=	1000 Ci

Risques

En moyenne :

Toutes les personnes mangeront 100 grains et recevront

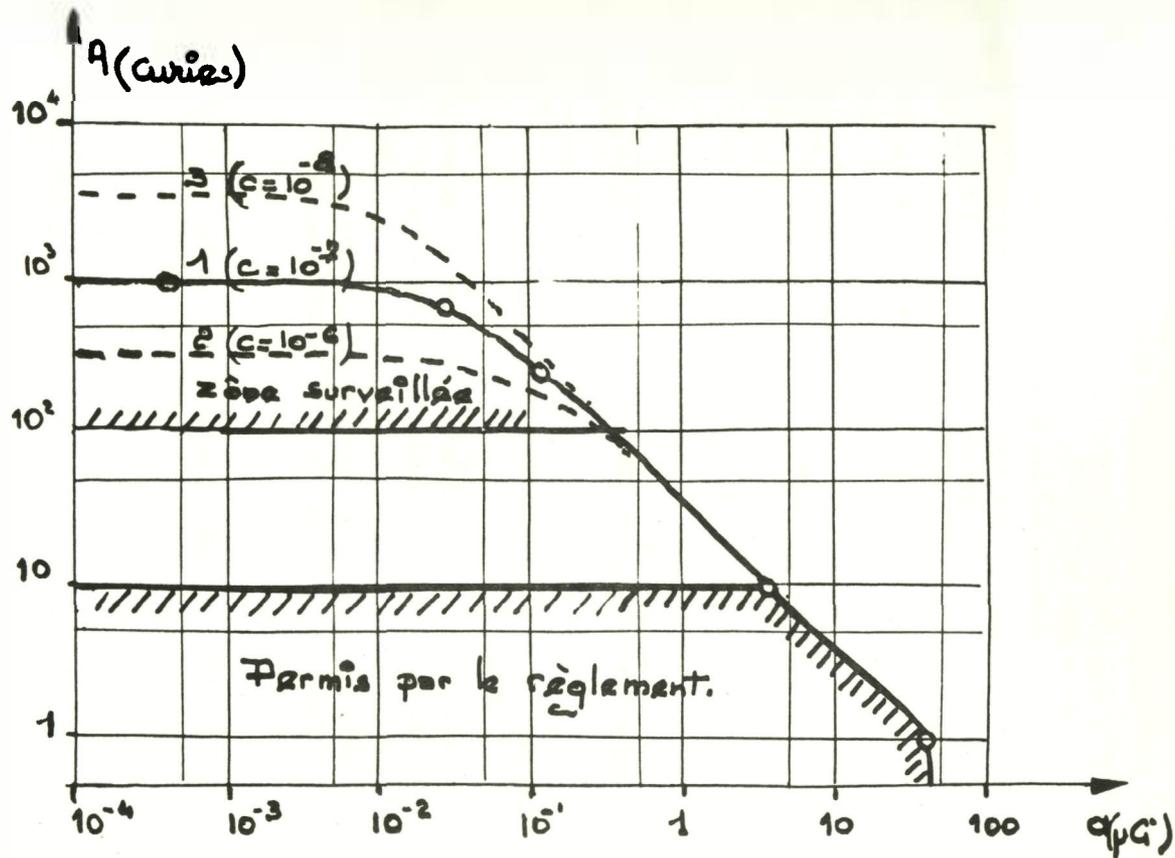


Figure 2 - Cas concret  $A = f(a)$ .

1,5 mrem en 1 an

1 seule personne mangera 137 grains et recevra 2 mrems en 1 an.

La probabilité de recevoir 1,5 rem est humainement nulle en 1 an.

### III.3. - Récapitulation

L'ensemble des calculs précédents est explicité dans les Figures 2, 3 et 4. La Figure 2 représente l'activité totale permise A en fonction de l'activité individuelle "a".

Les courbes pointillées de ces figures sont représentatives des calculs précédents :

- courbe 3 en supposant un rejet 10 fois plus faible  $c = 10^{-8}$
- courbe 2 en supposant un rejet 10 fois plus fort  $c = 10^{-6}$ .

De plus, le règlement prévoit la mise en place d'une zone surveillée pour un signal de l'appareillage égal à 5 fois le mouvement propre avant rejet. En pratique, ceci aura lieu pour une activité de l'ordre de  $10 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$ , soit avec un rejet de  $10^{-7}$  pour une injection de 100 Ci totaux.

Il est bon de constater qu'au moment de l'installation de cette zone, le risque d'irradiation totale pour les personnes couchées sur la plage n'est pas nul. Il correspond approximativement à une dose de 15 mrems totaux par an pour les personnes couchées 8 heures par jour sur la plage pendant 4 mois de l'année.

Cette installation d'une zone surveillée est représentée sur la Figure 2, sur laquelle sont également portées les activités permises par le règlement actuel.

La Figure 3 représente le nombre moyen de rems reçus par personne et par an (risques génétiques) en fonction de l'activité individuelle des grains. \*

---

\* Il s'agit seulement des doses reçues par ingestion.

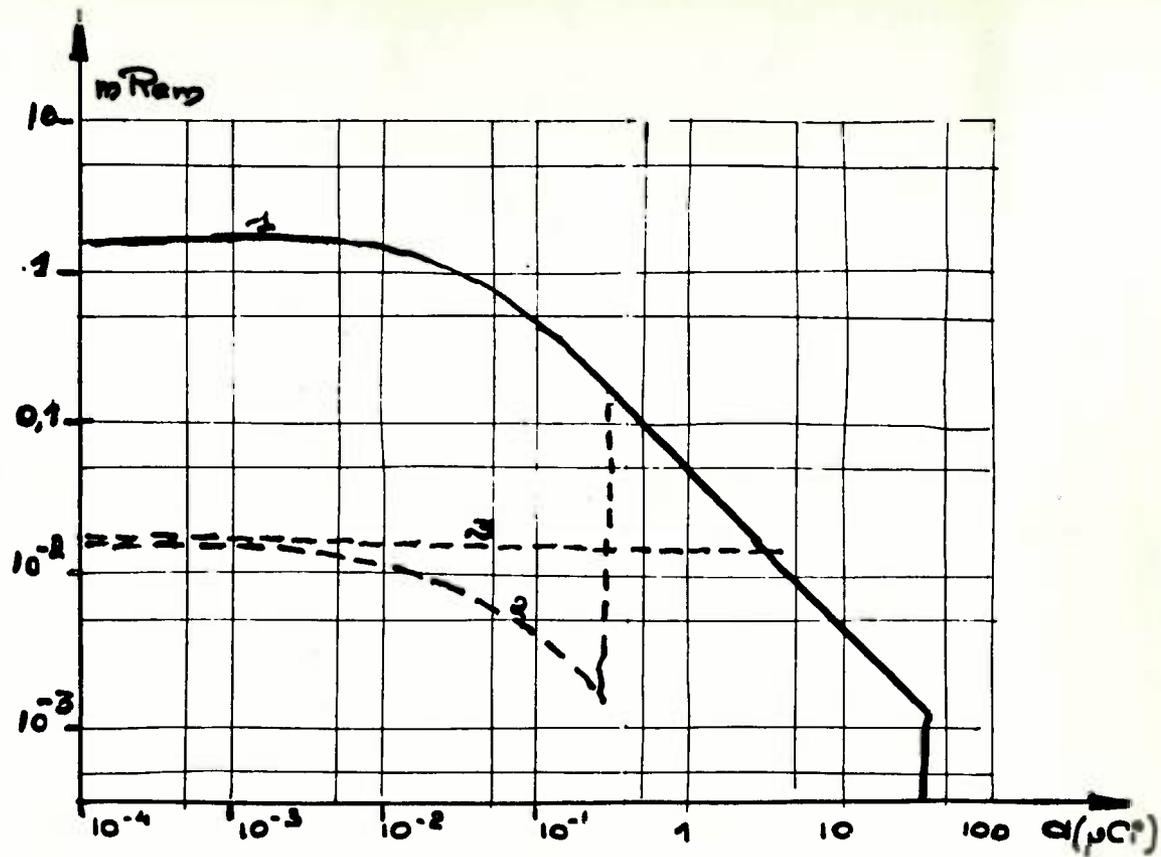


Figure 3 - Risque moyen par personne.

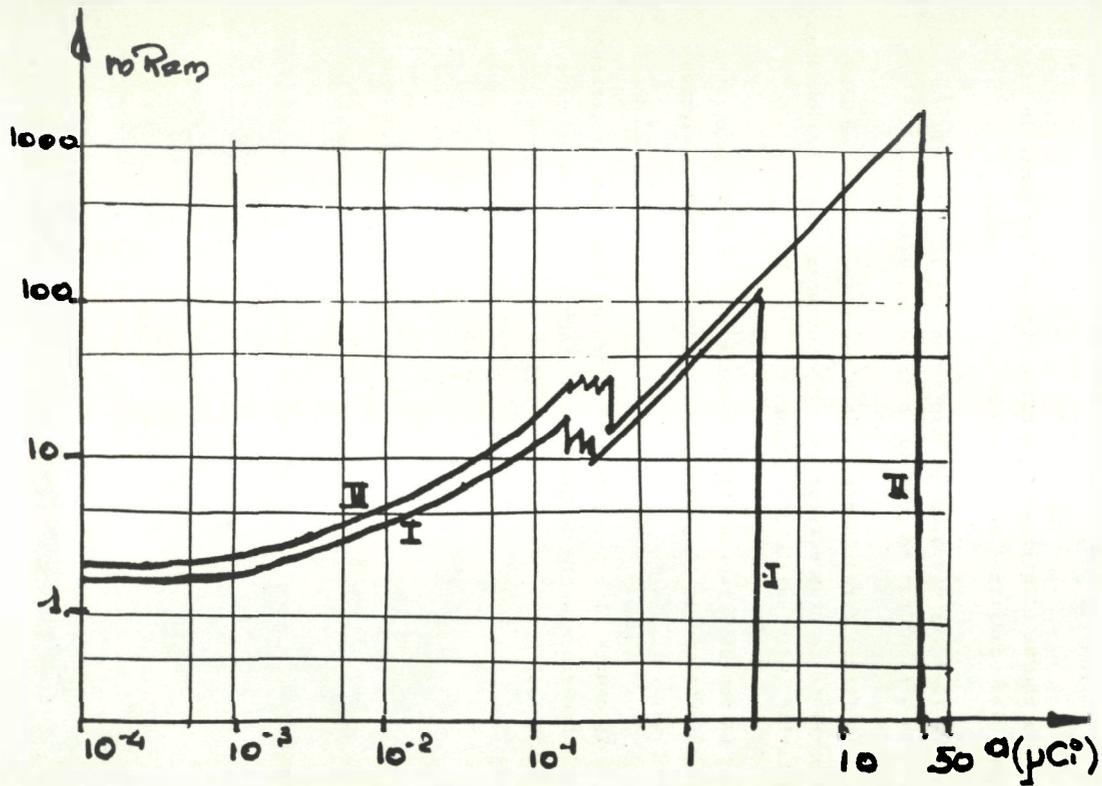


Figure 4 - Risque moyen pour la personne la plus défavorisée.

La courbe pointillée 2 de cette figure représente le même risque moyen après l'installation de la zone surveillée précédente supposée d'efficacité 90%.

La courbe pointillée 3 de cette figure représente le risque moyen pour les conditions adoptées dans le règlement.

On voit que ces risques moyens restent faibles. Il se peut même qu'ils n'aient pas de sens du point de vue génétique.

La figure 4 représente la dose reçue en moyenne, en 1 an, par la personne la plus défavorisée (risques somatiques) en fonction de l'activité individuelle des grains.\*

La courbe I représente cette dose en 1 an pour la personne la plus défavorisée de la population considérée, supposée exposée pendant 1 an.

La courbe II représente cette dose en 1 an pour la personne la plus défavorisée de la population considérée, supposée exposée pendant 100 ans.

---

\* Il s'agit seulement des doses reçues par ingestion.

ANNEXE 5CAMPAGNE D'IMMERSION

- 1er point du règlement :

Une campagne ne pourra pas être inférieure à 1 mois.

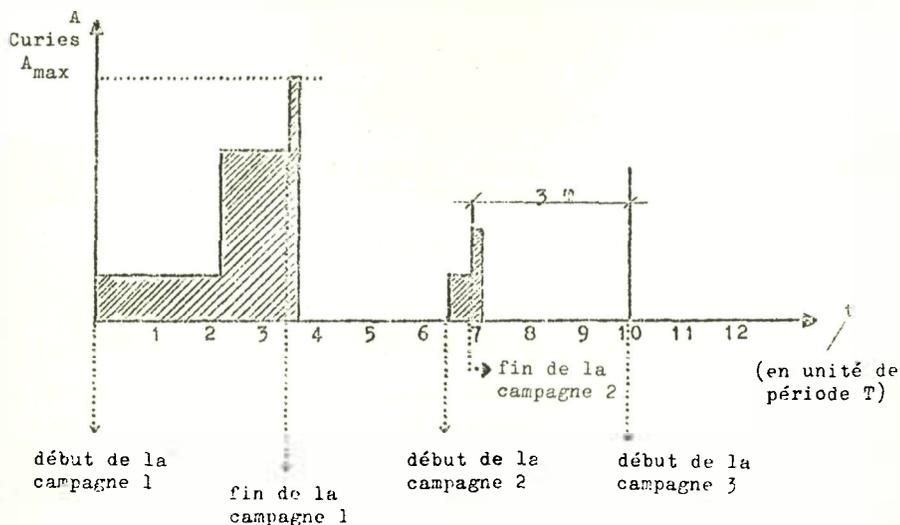
Le point 1 précédent (campagne supérieure à 1 mois) est proposé pour éviter la possibilité d'immersion quasi continue, d'émetteurs de courtes périodes, tel que l'or-198. En effet, sans cette condition, et compte tenu de la condition 2, il serait alors possible d'immerger environ 9 Ci d'or toutes les semaines, ce qui nous semble excessif et inutile.

- 2e point du règlement :

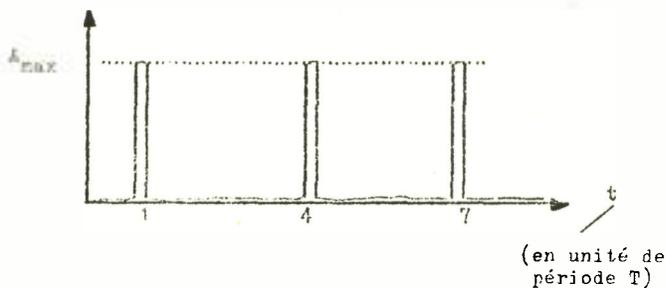
Une campagne sera terminée dans les limites de la condition 1 précédente :

- a) lorsque l'activité totale maximum permise aura été immergée;
- b) ou lorsque 3 périodes du radioélément se seront écoulées, après une immersion qui aura alors été la dernière de la campagne.

Ce point 2 conduit à deux possibilités concernant les campagnes. Le schéma ci-après explicite ces deux possibilités :



Le cas le plus défavorable permis par ce règlement serait l'immersion, exactement toutes les 3 périodes, de l'activité  $A_{max}$  admise, suivant le schéma ci-dessous :



Dans ces conditions, l'activité totale présente sur la zone d'immersion, juste après la deuxième immersion, est :

$$A = A_{\max} + \frac{A_{\max}}{8} = 1,125 A_{\max}$$

et à la fin de la n-ième immersion :

$$A = A_{\max} \left[ 1 + \frac{1}{8} + \left(\frac{1}{8}\right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{8}\right)^n \right] = A_{\max} \left[ \frac{1 - \left(\frac{1}{8}\right)^{n+1}}{1 - \frac{1}{8}} \right]$$

Cette activité totale tend vers  $\frac{A_{\max}}{1 - \frac{1}{8}} = 1,142$ . Soit 14% de plus que  $A_{\max}$ .

Ceci semble raisonnable.

## LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

- |  |   |   |
|--|---|---|
| 1) ALLEN, F.H.<br>GRINDLEY, J.                     | Radioactive tracers in<br>the Thames Estuary  | Dock & Harbour<br>Authority<br>Vol. 37, p. 302<br>1957  |
| 2) AJBULATOW, N.<br>BOLDYREV, V.<br>GRIESSELER, H. | Das Studium der Sediment-<br>bewegung in Flüssen und<br>Meeren mit Hilfe von lumi-<br>neszierenden Farbstoffen u.<br>radioaktiven Isotopen<br>(Literaturübersicht). | Peterm.Geogr.Mitt.<br>105. Jg.H.3, S.177-<br>186; H.4, S.254-263<br>1961  |
| 3) AMANO, R.<br>HAMADA, T.                         | Siltation in estuary and<br>coastal Water - Part II.<br>The modern experiment of<br>littoral drift by radio-<br>isotopes.   | XIXème Congrès<br>International de<br>Navigation. Section II -<br>Communication III.<br>Londres, 1957.  |
| 4) ARLMAN, J.J.<br>SANTEMA, P.<br>SVASEK, J.N.     | Movement of bottom sediment<br>in coastal water by currents<br>and waves; measurements with<br>the aid of radioactive<br>tracers in the Netherlands.                | Progress Report,<br>juin 1957.<br>Deltadienst Rijks-<br>waterstaat. Netherland.<br>Beach Erosion Bord.<br>Technical Memorandum<br>no. 105, mars 1958. |
| 5) ARLMAN, J.J.<br>SVASEK, J.N.<br>VERKERK, B.     | Die Anwendung von radioaktiven<br>Isotopen zum Studium des Sand-<br>transportes durch strömendes<br>Wasser.   | Philips' Technische<br>Rundschau 21, Nr.6,<br>153 [1959/60].  |
| 6) ARLMAN, J.J.<br>SVASEK, J.N.<br>VERKERK, B.     | The Use of Radioactive<br>Isotopes for the Study of<br>Littoral Drift - Importance<br>of Accurate Investigation<br>of Coastal Currents.                             | The Dock & Harbour<br>Authority<br>1960   |
| 7) BIJKER, E.W.<br>WILSON, B.W.                    | Het XX <sup>e</sup> Int. Scheepvaar-<br>kongres, 11-19 Sept.1961,<br>Baltimore....<br>Gebruik van moderne tech-<br>nicken als radioisotopen<br>en luminoforen.      | De Ingenieur Nr.14,<br>201-202<br>1962  |
| 8) BOSCH, J.                                       | Methoden u. Geräte zur<br>Messung der Radioaktivität<br>in Wasser u. Abwasser   | Berichte d. Abwasser-<br>techn. Vereinigung,<br>H.11, 1960.   |

- 9) EUCHNER, W. Kontinuierliche Messung radioaktiver Substanzen in Wasser. Atompraxis, 3, H.10, S.405-407, 1957.
- 10) CALDWILL, J.M. Development tests of a radioactive sediment density probes. Beach Erosion Board, Technical Memorandum No. 121, 1960.
- 11) CHADERT, J. Etude sur place et sur modèle de l'amélioration des conditions de navigabilité du Niger. VIème Congrès Italien d'Hydraulique et de Constructions Hydrauliques. Padoue - Mai 1959.
- 12) CHABERT, J. JAFFRY, P. COURTOIS, G. HOURS, H. Etude du débit solide de charriage dans les rivières alluvionales au moyen de traceurs radioactifs. A.I.E.A. Colloque sur les applications des radioéléments en hydrologie. Tokyo, 5-9 mars 1963.
- 13) CHADERT, J. REMILLIEUX, M. Etude de l'amélioration des conditions de navigabilité du Niger dans la République du Mali. La Houille Blanche - no. spécial B - 1960.
- 14) COURTOIS, G. JAFFRY, P. HEUZEL, M. Emploi de traceurs radioactifs pour l'étude du transport solide dans les cours d'eau. Conférence sur l'emploi des radioisotopes dans les sciences physiques et l'industrie. A.I.E.A. Copenhague. Septembre 1960.
- 15) CHRIST, W. Kernphysikalische u. kernchemische Probleme auf dem Gebiet der Wasserwirtschaft. WaWi-Wa-Techn. 6.Jg. H.7, S.211-216. 1956.
- 16) DA CONCEICAO CORDEIRO, S. Promemorização sobre os ensaios em grande escala do estudo do movimento das areias do mar utilizando Ag 110. Comunicação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1ª Reunião de técnicos portugueses de energia nuclear. Lisbonne, janvier 1958.
- 17) DAVIDSSON, J. Investigation of sand movements using radioactive sand. Lund: studies in geography. Série A, Phys.Geog. no. 12, 1958. Reprinted from Svensk Geografisk. Arsbok 33. Lund, 1957.
- 18) FOREST, G. Observations du charriage littoral au moyen d'éléments radioactifs. Journal de la Marine Marchande. No. spécial "Nouveautés Techniques Maritimes 1957" Paris, 1957.

- 19) FOREST, G.  
JAFFRY, P.      Emploi des traceurs radioactifs dans l'étude des mouvements de sédiments sous l'action de la houle et des courants.      7ème Congrès de l'Association Internationale de Recherches Hydrauliques. Communication no. D 16 - Lisbonne 1957.
- 20) GERMAIN, J.  
FOREST, G.  
JAFFRY, P.      Utilisation des traceurs radioactifs pour l'étude des mouvements de sédiments marins.      6th Conference on Coastal Engineering Gainesville - Florida - U.S.A. Décembre 1957.
- 21) GIBERT, A.      Essai sur la possibilité d'utiliser Ag 110 dans l'étude du transport du sable par la mer.      Ministerio das Obras Publicas - Laboratoric Nacional da Engenharia Civil, Publication no. 63, Coimbra, 1955 - Gazeta de Fisica - janvier 1955.
- 22) GIBERT, A.  
VASCONCELOS  
PINHEIRO, J.F.      Marcação do areias com prata radioactiva et sua identificação em amostras empobrecidas na razão de  $1.10^6$ .      Bol. da Ordem das Engenharia, Vol. IV, février 1955.
- 23) GIBERT, A.      Emploi de Ag 110 dans l'étude du transport du sable par la mer.      7ème Congrès de l'Association de Recherches Hydrauliques, Communication no. D 35. Lisbonne, 1957.
- 24) GIBERT, A.  
CORDEIRO, S.      Tracing sand movement under sea with radioactive silver 110 Ag.      2ème Conférence Internationale. Communication no. P/1820 Genève, septembre 1956.
- 25) GIBERT, A.  
CORDEIRO, S.      A general method for sand labeling with radioactive nuclides.      Internat. Jour. Appl. Radiation and Isotopes 12, no. 1, 41-45 (1962).
- 26) GOLDBERG, E.D.  
ITMAN, D.L.      Neutron Irradiated Quartz as a tracer of sand movements.      Bulletin of the Geol. Society of America, Vol. 66, 611 (1955).
- 27) GOL'DIN, M.L.      An automatic contactless device for measuring liquid pulp density.      Tsentye Metally, 31, no. 6, 52-56 (1958).
- 28) GRIESSEIER, H.      Über die Möglichkeiten eines unmittelbaren Studiums der litoralen Materialbewegungen mit Hilfe von Indikatoren.      Geol. Beitr. z. Geophys. 68, 150-160, 1959.

- 29) GRIESSEIER, H. Luminophoren und Radioisotope in Dienste der Küstenforschung. Forsch.u.Fortschr. 36.Jg., H.11, S. 326 - 330 1962.
- 30) GRIESSEIER, H. Zur Anwendung von Radioisotopen beim Studium der literarischen Materialbewegungen. Acta Hydrophysica, Bd. VI., H. 3 S. 163-186, 1960.
- 31) HOURS, R. NESTEROFF, W.D. ROMANOVSKY, V. Utilisation d'un traceur radioactif dans l'étude de l'évolution d'une plage. Comptes rendus de l'Académie des Sciences Tome 240, pages 1798-99 Paris, 2 mai 1955.
- 32) HOURS, R. NESTEROFF, W.D. ROMANOVSKY, V. Méthode d'étude de l'évolution des plages par traceurs radioactifs. Travaux du Centre de Recherches et d'Etudes Océanographiques - Volume 1, no. 11, novembre 1955.
- 33) HOURS, R. Application des radioéléments au Génie Civil. Journées d'Information sur les Applications Industrielles des Radioéléments et des Rayonnements. Conservatoire Nationale des Arts et Métiers Paris, février 1958.
- 34) HOURS, R. JAFFRY, P. Application des isotopes radioactifs à l'étude des mouvements des sédiments et des galets dans les cours d'eau et en Mer. La Houille Blanche, Nr. 3 1959.
- 35) HULL, D.E. The Total Count Technique. A new principle in flow measurement. Int.J.appl.radiation and isotopes 4 (1958).
- 36) HYDRAULICS RESEARCH STATION Radioactive tracers in the Thames Estuary. HRS/PLA, Paper 20 Wallingford (England) 1956.
- 37) HYDRAULICS RESEARCH STATION Radioactive tracers for the detection of offshore beach movements. Report of a pilot experiment at Poole in 1955. HRS paper Wallingford, 1957.
- 38) HYDRAULICS RESEARCH BOARD Detection of offshore beach movements with radioactive tracers. Hydraulics Research 1956, Her Majesty's Stationery Office. Londres, 1957.

- 39) INMAN, D.L.  
CHAMBERLAND, T.K. Experiment with radioactive sand as a tracer of beach sand movement. 2ème Conférence Internationale. Communication no. P/2357 Genève, septembre 1958.
- 40) INOSE, S.  
KATO, M.  
SHIRAIISHI, N.  
SMIRAIISHI, H.  
SATO, S. The Field experiment of littoral drift using radioactive glass sand. Proc. of Int. Conf. in Geneva, Vol 15, 1955.
- 41) INOSE, S.  
SMIRAIISHI, H. The measurement of littoral drift by radioisotopes. The Dock & Harbour Authority, S. 284-288, Vol. XXXVI, no. 434 1956
- 42) JAFFRY, P.  
HEUZEL, M. Emploi de traceurs radioactifs pour l'étude du transport solide dans les cours d'eau Association Internationale d'Hydrologie Scientifique - Publication no. 52 Helsinki 1960.
- 43) JAFFRY, P.  
HOURS, R. L'étude du transport littoral par la méthode des traceurs radioactifs. Cahiers oceanographiques du C.O.E.C. XI, 7, 1959.
- 44) KIDSON, D.  
SMITH, D.B.  
STEERS, J.A. Drift experiments with radioactive pebbles. Nature, Vol. 178, no. 4527, 1956.
- 45) KLEIN, H.A. Beobachtung des Schlicktransportes in einem Tidefluß mit Hilfe radioaktiver Leitstoffe (Oste-Messungen 1959). Die Wasserwirtschaft, 50 Jg., H.4, S.95-101 1960.
- 46) KLEIN, H.A. Messung u. Überwachung der Radioaktivität im Elbewasser. Die Wasserwirtschaft, 47. Jg., S.249 - 252, 1957.
- 47) KLEIN, H.A. Über die Schwebstoffbewegung in einem Tidefluß auf Grund von Messungen mit radioaktiven Leitstoffen. Assemblée Générale de Helsinki. Commission des eaux de surface - publication no. 51. 1960 (Union Géodésique et Géophysique Internationale).
- 48) LÜDERS  
HENSEN  
KLEIN  
KRAMER  
MAGENS  
PETERSEN  
SCHULZ  
STRÖHL Methoden zur Bestimmung d. Sand u. Schlickbewegungen entlang den Küsten, i.d. Flußmündungen u.d. Tideflüssen. Anwendung moderner Mittel wie radioaktive Isotope, Luminofore, u.s.w. Dt. Bericht z. XX. Internat. Schiffahrtskongress Baltimore 1961.

- 49) MONTENS, A. Die Verwendung von Radioisotopen in der Hydrologie und Hydraulik - II. Teil. Atompraxis 5, 182 [1959].
- 50) MORRA, R.H.J. De Zandbeweging in het Getijge-Zuidwest-Nederland. Rapport Deltacommissie, Bijdrage IV.6, S.329 - 380, 1961. OUDSLOORN, H.M. SVASEK, J.N. DE VOSBIEDE, F.J.
- 51) PETERSEN, B.R. Some radioactive surface labelling methods. Ingeniøren 4, 99-102 [1960].
- 52) PETERSEN, M. Das deutsche Schrifttum über Seebuhnen an sandigen Küsten. Die Küste, 9, S. 1 - 65. 1961.
- 53) PUTMAN, J.L. Neue Entwicklung in der industriellen Anwendung von radioaktiven Isotopen (auch:) Bewegung von Sand u. Schlamm. Atompraxis 3, 2, S.55 1957.
- 54) PUTMAN, J.L. Radioaktive Tracer Techniques for Sand and Silt Movements under Water. Intern. J. Appl. Radiation and Isotopes 1 24 [1956]. SMITH, D.B.S.
- 55) PUTMAN, J.L. Thames siltation investigation preliminary experiment on the use of radioactive tracer for indicating mud movements. Proceeding of Int. Conference in Geneva, Vol. 15, 1955. SMITH, D.B. WELLS, R.M.
- 56) PUTMAN, J.L. Thames Siltation investigation - preliminary experiments of the use of radioactive tracers for indicating mud movements. Publication A.E.R.E./IK 1576 - Harwell, décembre 1954. SMITH, D.D. WELLS, H.M. ALLEN, F. ROWAN, G.
- 57) RAMETTE, M. Le Rhône à Lyon - Etude de l'entraînement des galets à l'aide de traceurs radioactifs. Mémoires et Travaux de la Société Hydro-technique de France, no. 1 - 1962 et La Houille Blanche - Numéro Spécial A - 1962 - mai-juin 1962. HEUZEL, M.
- 58) REID, W.J. Coastal experiments with radioactive tracers - Recent work on the Coast of Norfolk. The Dock and Harbour Authority - Vol. XXXIX, no. 453 - juillet 1956.
- 59) RUSSEL, R.C.H. The use of tracers for the measurement of littoral drift. Coastal Engineering Proceedings of the 7th Conf. Vol. 1, 418-444, 1961.

- 60) ROUSSELOT, M.  
CHABERT, J. Rapport SI-5  
XXème Congrès Inter-  
national de Navigation  
Baltimore U.S.A., 1961.
- 61) SCHULZ, H.  
STRÖHL, G. Untersuchung der Sandwande-  
rung im Bereich der deut-  
schen Küste mit radioaktiven  
Leitstoffen. Deutsche Gewässerkundl.  
Mitteilungen, Jg. 4, 1,  
17-27 (1960).
- 62) SCHULZ, H. Die Verwendung radioaktiver  
Leitstoffe zur Untersuchung  
der Sand- u. Schlickwanderung  
in Ästuarien u. Küstengewässern Deutsche Gewässer-  
kundl. Mitteilungen  
1960, Sonderheft.
- 63) SCHULZ, H.  
MEYN, G. Sandwanderungsuntersuchungen  
mit radioaktiven Isotopen in  
deutschen Küstengebiet der  
Nord- u. Ostsee in den Jahren  
1961/1962. Deutsche Gewässer-  
kundl. Mitteilung,  
Jg. 7, 1963.  
H. 2
- 64) SMITH, D.B.  
EAKINS, J.D. Radioactive methods for la-  
belling and tracing sand  
pebbles in investigation of  
littoral drift. Conférence Inter-  
nationale sur les  
radioisotopes dans  
la recherche scienti-  
fique - UNESCO/NS/RIC/  
63 - Paris, sept.1957.
- 65) SONS, E. Die Anwendung radioaktiver  
Isotope bei der Verfolgung  
von Abwassereinleitungen in  
Seen u. Küstengewässern. Atompraxis 3,4  
8/9, S. 306-309,  
1957.
- 66) STARODUTSEV, S.V.  
LODANOV, E.M. New gages for hydraulic  
works. P.192-203. Hidro-  
mekhaniztsiaia Zem-  
lianykh Rabot,  
Moscow, Gosdarstvennoe  
Energeticheskoe  
Izdatel'stvo, 1959.
- 67) STEERS, J.A.  
SMITH, D.B. Detection of movements of  
pebbles on the seafloor  
by radioactive methods. Geographical Journal.  
Vol.122, part. 3,  
septembre 1956.
- 68) SVASEK, N.J.  
ENGEL, H. Use of a radio-active tracer  
for the measurement of sedi-  
ment transport in the Nether-  
lands. Coastal Engineering -  
Proceedings of the 7th  
Conference, Vol.1,  
S. 445-454, 1961.
- 69) VERA-CRUZ, D. Transporte solido em costas  
arenosas, tecnicas utiliza-  
das no seu estudio empre -  
do de radioisotopes e de  
luminescentes. Tecnica 34, no. 290,  
387-394, mar 1959.

CAHIER D'INFORMATION  
DU BUREAU EURISOTOP

Déjà parus

- 1 - Bureau Eurisotop
- 3 - Isotopes et rayonnements dans l'industrie et la technique
- 4 - Technisch- wirtschaftliche Studien über zwei Fälle der Füllstandregelung durch Radioisotope im Kraftwerk
- 5 - L'Analyse par activation  
- Bibliographie comparée
- 6 - Isotopentechnik und Textilindustrie  
- Literaturnachweis
- 7 - Emploi de traceurs radio-actifs pour la détermination du mouvement de substances solides dans l'eau  
- Volume I : Résumés des rapports et discussions
- 8 - Emploi de traceurs radio-actifs pour la détermination du mouvement de substances solides dans l'eau  
- Volume II : Rapports présentés à la réunion de travail

A paraître

- 2 - Statistiques de la production et de l'utilisation des radio-isotopes dans la Communauté européenne
- 10 - Füllstandregelung durch Radioisotope bei der Mineralwolle-Erzeugung

En préparation

- 9 - L'emploi des radio-isotopes dans l'industrie textile

BUREAU EURISOTOP - EURATOM  
Rue Belliard , 51 - Bruxelles