

EUR 3130.f

Vol. I

COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE - EURATOM

**ETUDE DU CHARRIAGE D'UN ECOULEMENT
PAR TRACEURS RADIOACTIFS**

Partie 1 : Essais en canal

Partie 2 : Discussion des résultats

par

**J. DANION
(EDF)**

1966

LIBRARY COPY



Rapport établi par l'Electricité de France (EDF)
Centre de Recherches et d'Essais de Chatou

Contrat Euratom N° 019-62-12 IRAF

AVERTISSEMENT

Le présent document a été élaboré sous les auspices de la Commission de la Communauté Européenne de l'Energie Atomique (EURATOM).

Il est précisé que la Commission d'EURATOM, ses contractants, ou toute personne agissant en leur nom :

ne garantissent pas l'exactitude ou le caractère complet des informations contenues dans ce document, ni que l'utilisation d'une information, d'un équipement, d'une méthode ou d'un procédé quelconque décrits dans le présent document ne porte pas atteinte à des droits privatifs;

n'assument aucune responsabilité pour les dommages qui pourraient résulter de l'utilisation d'informations, d'équipements, de méthodes ou procédés divulgués dans le présent document.

Ce rapport est vendu dans les bureaux de vente indiqués en 4e page de couverture

au prix de FF 10,- FB 100,- DM 8,- Lit. 1250,- Fl. 7,25

Prière de mentionner, lors de toute commande, le numéro EUR et le titre qui figurent sur la couverture de chaque rapport.

Imprimé par SMEETS
Bruxelles, octobre 1966

Le présent document a été reproduit à partir de la meilleure copie disponible.

EUR 3130.f

Vol. I

COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE - EURATOM

**ETUDE DU CHARRIAGE D'UN ECOULEMENT
PAR TRACEURS RADIOACTIFS**

Partie 1 : Essais en canal

Partie 2 : Discussion des résultats

par

**J. DANION
(EDF)**

1966



Rapport établi par l'Electricité de France (EDF)
Centre de Recherches et d'Essais de Chatou

Contrat Euratom N° 019-62-12 IRAF

RESUME

Deux séries d'essais ont été réalisées en canal de laboratoire pour l'étude particulière de la méthode de mesure du transport solide d'un écoulement, dite du centre de gravité.

Les conditions d'écoulement ont été choisies pour obtenir un charriage avec dunes, sans saltation, en utilisant comme matériau de fond un polystyrène en granulés spécialement traité. Le marquage en surface de ce matériau par de l'or 198 n'affectait aucunement le comportement dynamique des particules.

La progression du traceur était suivie à intervalles de temps réguliers, sans interruption de l'écoulement, par une sonde à scintillation se déplaçant à vitesse constante au-dessus du plan d'eau dans l'axe du canal.

La vitesse moyenne du nuage de traceur peut être déterminée avec précision, mais la mesure de l'épaisseur moyenne de charriage à prendre en compte pour le calcul du transport solide reste malaisée et imprécise. Diverses méthodes sont exposées pour déterminer ce paramètre et les résultats sont comparés pour plusieurs séries d'essais.

En particulier, le débit solide calculé en prenant pour limite inférieure du charriage le creux d'ondulation le plus profond est sensiblement plus élevé que le débit solide réel.

ETUDE DU CHARRIAGE D'UN ECOULEMENT PAR TRACEURS RADIOACTIFS (*)

TABLE DES MATIERES

Partie 1 : ESSAIS EN CANAL

INTRODUCTION	5
1. INSTALLATION EXPERIMENTALE	6
1.1 Canal d'essai	6
1.2 Matériau de fond	7
2. ESSAIS ET ETUDES PRELIMINAIRES	8
2.1 Choix et détermination des conditions d'essais	8
2.2 Essais pilotes avec traceurs luminescents	10
2.3 Préparation du traceur radioactif	12
2.4 Appareillage de détection des traceurs radioactifs	14
3. ESSAIS AVEC TRACEURS RADIOACTIFS (N° 319 et 321)	
CARACTERISTIQUES ET RESULTATS	18
3.1 Déroulement des essais	18
3.2 Caractéristiques des essais	19
3.3 Aspect général des courbes de détection	21
3.4 Progression du centre de gravité du lot de particules marquées	22
3.5 Etalement du nuage de traceur	26
3.6 Evolution du taux de comptage maximum	27
3.7 Caractéristiques des dunes	29
3.8 Calcul du débit solide	30
3.9 Bilan d'activité le long du canal	34
4. CONCLUSION	36
NOTATIONS DES ANNEXES I ET II	37
ANNEXE I - CENTRE DE GRAVITE DU NUAGE DE TRACEUR A UN INSTANT	
DONNE	38
1. Définitions	38
2. Calcul de $\int N'dx$	38
3. Calcul de $\int x N'dx$	40
4. Calcul de x'_G	41
5. Bilan d'activité le long du canal	42
ANNEXE II - CALCUL DU DEBIT SOLIDE PAR LA METHODE D'INTEGRA- TION DANS L'ESPACE	43
FIGURES 1 à 11	46-53

(*) Manuscrit reçu le 12 mai 1966

PARTIE 2 : DISCUSSION DES RESULTATS

1. INTRODUCTION	55
2. LA METHODE DU CENTRE DE GRAVITE	55
3. LES CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DU FOND	56
4. CALCUL DU DEBIT SOLIDE, CONSIDERANT LES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES ET DYNAMIQUES DES ONDULATIONS DU FOND	59
5. DETERMINATION DE L'EPaisseur DE LA COUCHE DE CHARRIAGE POUR LA METHODE DU CENTRE DE GRAVITE	60
5.1 Considérant l'enveloppe des ondulations	60
5.2 Considérant le creux d'ondulation le plus profond	61
5.3 Considérant un niveau de charriage au-dessus du creux le plus profond.	62
5.4 Mesure directe de l'épaisseur de charriage par carottages	62
6. RESULTATS D'ESSAIS EN CANAL AVEC TRACEURS	63
6.1 Avec la vitesse moyenne des ondulations	65
6.2 Avec le creux le plus profond	65
6.3 Avec un niveau de charriage au-dessus du creux le plus profond	66
6.4 Par carottages	67
7. CONCLUSION	68
NOTATIONS	69
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	70

INTRODUCTION.-

Dans le cadre de l'étude générale consacrée à la mesure du débit solide des cours d'eau, par charriage, à l'aide de traceurs radioactifs, de nouveaux essais ont été effectués au mois de juillet 1964 en canal de laboratoire.

Les essais précédents* avaient été réalisés avec des traceurs luminescents, mieux adaptés à la phase préliminaire de l'étude. En effet, cette technique permettait une approche du problème avec des moyens assez simples alors que l'utilisation de traceurs radioactifs nécessitait un appareillage de détection spécialement adapté et une étude particulière du mode de marquage des particules du fond mobile.

Cependant, comme il n'est possible de suivre la progression de grains luminescents que par carottages dans la couche de matériau charrié, c'est-à-dire point par point, cette méthode ne pouvait fournir qu'une information discontinue du phénomène de dispersion du traceur le long du canal - phénomène lui-même discontinu puisque le matériau charrié progresse par déformation des ondulations du lit, rides ou dunes.

Les essais avec traceurs luminescents ayant ainsi permis de définir le problème, il était souhaitable de poursuivre l'étude avec des traceurs radioactifs, susceptibles de fournir une information continue.

Le changement radical de méthode exigeait des études technologiques préliminaires assez longues qui ont été effectuées par la Section d'Application des Radioéléments du Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay. Qu'il nous soit permis d'exprimer ici notre reconnaissance envers ce Service pour son étroite collaboration à cette étude.

Les essais faisant l'objet de la présente note ont porté seulement sur le mode de charriage avec dunes, sans saltation. D'autres essais sont

* Voir rapports : LNH n° T 529 A du 6.11.1962 et EURATOM 1837 f - 1963
n° HyFl. 32 du 20.6.1963 par J.L. CHAUVIN et J. DANION

envisagés dans les domaines de charriage avec lit plat, rides, et dunes avec sal-tation.

1.- INSTALLATION EXPERIMENTALE.-

1.1.) Canal d'essai

Les essais ont été effectués dans un canal fixe (figure 1), à parois vitrées, monté sur piliers à 1,5 m du sol. Il est large de 0,25 m et long de 43 m.

Le canal est alimenté par une pompe centrifuge, munie d'un by-pass pour les fonctionnements à faibles débits. Un déversoir triangulaire étalonné permet de mesurer le débit à l'amont. Grâce à un dispositif de tranquillisation, la distribution transversale des vitesses d'écoulement est symétrique à l'entrée du canal.

La hauteur d'eau de régime uniforme est réglée en aval par une vanne basculante ; une autre vanne, du type "guillotine", est utilisée pour la mise en route des essais et les arrêts afin de ne pas avoir à modifier le réglage de la première vanne.

Les cotes de plan d'eau sont mesurées par 5 pointes limnimétri-ques munies de vernier au 1/20^{ème} de mm, et espacées de 7,5 m.

La zone d'étude à fond mobile avait une longueur de 33 m, hors le domaine d'influence de la vanne aval; le fond était réglé à la pente voulue à l'aide de profils de tôle réglables, disposés tous les mètres.

Des rails horizontaux, solidaires des parois du canal, servent de chemin de roulement pour divers dispositifs de mesure mobiles. Un premier chariot, muni d'une pointe limnimétrique, est utilisé pour relever le profil longi-tudinal du fond. Un deuxième, automoteur, pouvant se déplacer à vitesse constante réglable sur toute la longueur du canal, a été réalisé pour effectuer en cours d'essais des détections continues des particules actives du fond : la sonde et le

chaîne complète de détection sont portées par le chariot ; des taquets fixés tous les mètres sur l'un des rails déclenchent le toppeur de l'enregistreur pour un repérage précis des distances. Pour des essais avec traceurs luminescents un autre chariot de détection était utilisé, comportant une rampe à rayons ultraviolets et un appareil photographique à armement automatique.

L'alimentation de l'écoulement en matériau solide est effectuée manuellement en amont. Le matériau charrié s'accumule en aval du profil de tôle limitant la zone à fond mobile de début d'essai. Il est siphonné dans une capacité jaugée à intervalles de temps réguliers ; au cours de cette opération, un débit liquide correspondant à celui prélevé par le siphon est injecté au même emplacement pour éviter tout remous d'abaissement du plan d'eau.

1.2.) Matériau de fond :

Le matériau utilisé pour les essais décrits par la suite est un polystyrène transparent en granulés, d'une densité de 1,055, c'est-à-dire n'absorbant pas le rayonnement γ plus que l'eau. Les grains, obtenus par tronçonnage de joncs, sont des éléments cylindriques circulaires (longueur moyenne 3,5 mm, diamètre moyen 3 mm). La granulométrie est pratiquement uniforme (figure 2).

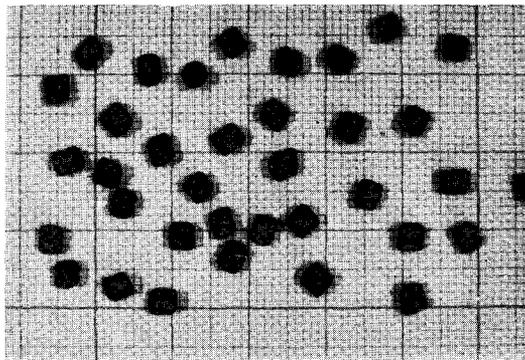
La vitesse de chute moyenne de grains isolés dans une eau calme à 20° C est 4,3 cm/s; l'écart type n'est que de 0,3 cm/s pour un échantillon de 60 grains. Cette faible dispersion est un indice d'uniformité des particules.

Ce matériau ne peut être utilisé à l'état brut car des phénomènes de tension superficielle entre grains mouillés perturbent son comportement, tout particulièrement lors de la mise en eau du canal d'essai. Il doit donc être traité avant utilisation.

Les agents mouillants et détergents ne permettent pas d'éliminer cet inconvénient. Deux autres procédés ont été utilisés pour modifier l'état de surface du matériau, jugée trop lisse :

- a) par voie chimique : un solvant (acétate d'amyle) ramollit superficiellement le grain qui est ensuite enrobé de sciure de bois très fine,
- b) par voie mécanique : le matériau est brassé énergiquement avec du sable qui dépolit la surface du grain.

Ce dernier procédé, plus simple, est actuellement utilisé exclusivement. Ce traitement a pour effet secondaire bénéfique d'arrondir les arêtes de tronçonnage des grains (photo 1).



Photographie 1

Matériau de fond (grandeur nature)

2.- ESSAIS ET ETUDES PRELIMINAIRES.-

2.1.) Choix et détermination des conditions d'essai :

Les conditions hydrauliques d'essai recherchées devaient satisfaire un certain nombre de critères imposés par les facilités expérimentales, un bon fonctionnement de la sonde de détection et les caractéristiques du canal d'essai :

- hauteur d'eau maximale 0,15 m,
- pente du fond $0,25$ à $0,75 \times 10^{-3}$,
- débit solide maximal 20 l/h,
- amplitude moyenne maximale des dunes 4 cm.

D'autre part le mode de charriage désiré devait correspondre à un début de formation de dunes sans saltation ; les particules charriées n'acquiescent pas alors de vitesse suffisante pour passer sur la dune aval et éviter l'enfouissement au pied de la dune sur laquelle elles progressent ; le plus long trajet d'un grain entre deux périodes d'enfouissement ne saurait donc excéder la longueur d'onde d'une dune.

Les conditions approximatives d'essai ($Q = 4 \text{ l/s}$, $h \sim 10 \text{ cm}$, pente $0,25 \times 10^{-3}$) étant obtenues par tâtonnements successifs, il était nécessaire de déterminer avec précision des régimes de débits, liquide et solide, qui soient uniformes et permanents - uniformes, c'est-à-dire identiques sur toute la longueur du canal - permanents, c'est-à-dire stables dans le temps. En effet, tout déséquilibre entre le débit solide recueilli en aval et celui d'alimentation entraîne un basculement des fonds, c'est-à-dire un changement de pente : dans ce cas, le régime évolue lentement vers un état d'équilibre tel que le débit solide soit, sur l'ensemble du canal, égal au débit solide d'alimentation ; le régime d'écoulement résultant n'est plus uniforme et, si le fond présente des ondulations, celles-ci n'ont plus les mêmes caractéristiques moyennes sur toute la longueur du canal. Pendant la phase évolutive il y a donc érosion ou comblement en certaines zones, par exemple exhaussement des fonds en aval si l'alimentation solide est trop faible. Lors d'essais avec traceurs à ce stade, des particules marquées seraient en conséquence enfouies définitivement. Aussi, l'on conçoit la nécessité d'une détermination précise d'un régime uniforme permanent.

Le problème paraît simple à première vue puisqu'il suffit en principe de déterminer le débit solide correspondant à un certain régime d'écoulement uniforme. Mais en fait, ce régime d'écoulement ne peut être fixé exactement a priori car, pour un débit liquide et une pente donnés, la hauteur d'eau de régime uniforme dépend de la rugosité du fond - c'est-à-dire essentiellement des caractéristiques des ondulations du lit qui sont elles-mêmes fonction des conditions hydrauliques.

Ces derniers essais ont à eux seuls exigé plus de 60 heures. Un relevé complet des fonds était effectué toutes les 7 heures les premiers temps, puis toutes les 14 heures, afin de contrôler leur évolution. Le régime uniforme permanent ainsi défini avait pour caractéristiques principales :

- pente $0,25 \times 10^{-3}$,
- hauteur d'eau moyenne 0,11 m,
- débit liquide 3,9 l/s,
- débit solide 13,5 l/h.

2.2.) Essais pilotes avec traceurs luminescents :

Les essais avec traceurs luminescents étaient en quelque sorte des essais pilotes destinés à guider les essais ultérieurs avec traceurs radioactifs.

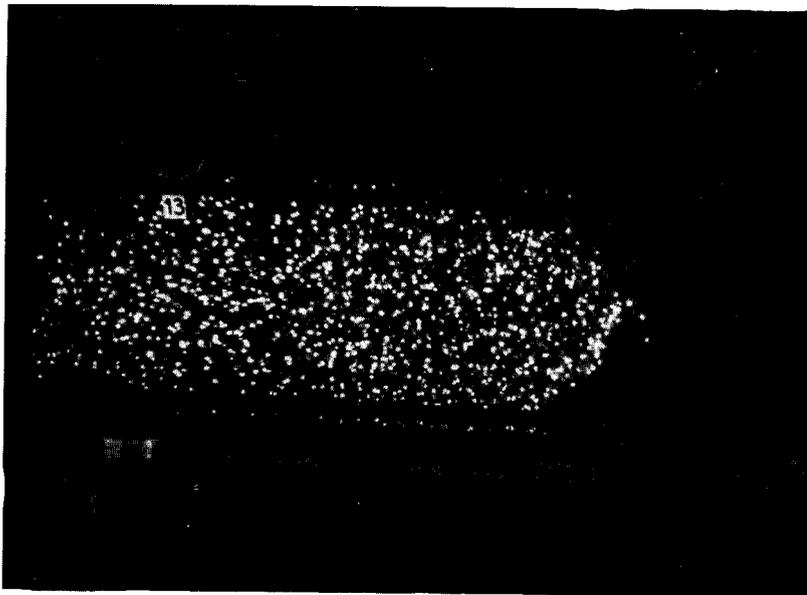
Pour les raisons exposées précédemment, cette technique ne permettait pas une étude quantitative précise de la migration du traceur, mais elle pouvait cependant fournir des informations utiles sur l'étalement longitudinal des particules marquées et leur distribution superficielle transversale.

Le lot de traceur était marqué par de la peinture luminescente rouge. Ce procédé, très satisfaisant pour des grains de sable naturel (densité 2,65), affecte légèrement le comportement dynamique de grains plus légers, tels ceux de polystyrène, dont il accroît sensiblement la densité. Le traceur ne simulait donc pas exactement le milieu à étudier.

Ces essais ont été poursuivis pendant 6h 30 mn. L'écoulement était interrompu toutes les 2h 10 mn ; les fonds étaient mis à sec. Une couverture photographique de l'ensemble du canal était réalisée en lumière ultraviolette pour faire apparaître les grains de surface luminescents. La détection des particules enfouies était effectuée par carottages dans le corps des dunes. Pour perturber le fond le moins possible les carottes prélevées doivent être de faible section ($2,55 \text{ cm}^2$) ; comme, d'autre part, l'épaisseur de la couche de matériau charrié est restreinte, le volume utile des échantillons est très faible ; le nombre de particules marquées est de ce fait très limité dans ces carottes. Les fluctuations

statistiques propres à cette méthode sont donc importantes et réduisent les possibilités d'étude quantitative exacte du problème.

Par observation directe de la progression du lot de traceur on a constaté que le front aval du nuage de grains marqués restait raide, même après un temps d'essai important (photo 2). En effet, le lent étalement vers l'aval ne peut se faire que par dédoublement et dissociation de dunes puisque les particules ne peuvent sauter d'une dune à l'autre dans le régime de charriage sans saltation adopté.



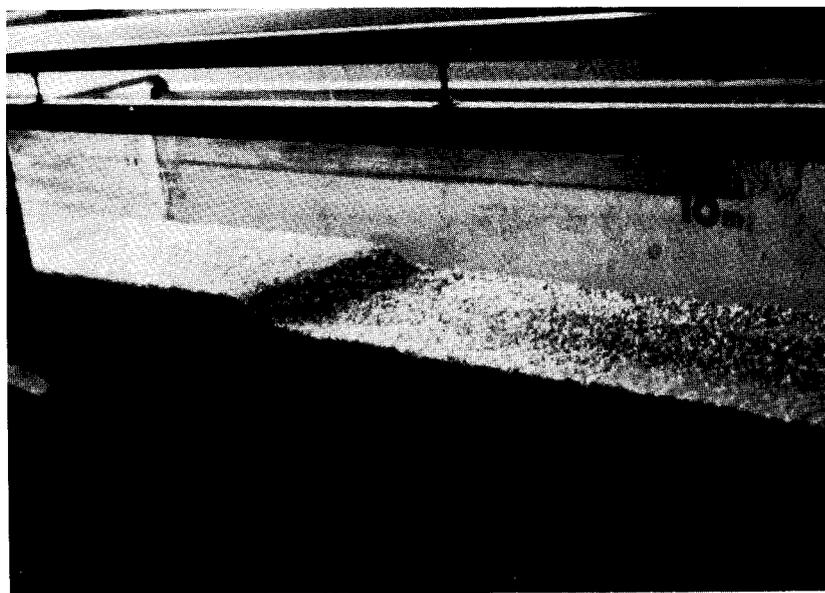
→ sens de l'écoulement

Photographie n° 2

Front aval du nuage de traceurs lumineux

Dans un canal de faible largeur, tel celui utilisé, il est pratiquement impossible d'obtenir un écoulement bidimensionnel par suite des effets de paroi ; le charriage n'est donc pas uniforme sur toute la largeur de l'écoulement.

Par comptage des particules superficielles marquées dans la zone de forte concentration de la première détection, il a été constaté que la distribution transversale était parfaitement symétrique, comme escompté, et proche d'une loi parabolique (figure 3). Puisque les dunes ne présentent pas de déformations latérales notables (photo 3), on peut admettre une même loi de distribution transversale en surface et dans le corps des dunes.



→ Sens de l'écoulement

Photographie n° 3

Aspect typique d'un front de dune

2.3.) Préparation du traceur radioactif :

Comme le polystyrène est une substance chimique de synthèse sans grande affinité avec d'autres composés, le marquage en surface de ce matériau présente certaines difficultés.

L'étude systématique de diverses possibilités a été effectuée au Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay, utilisant l'or 198 comme élément radioactif en raison de sa courte période (2,7 jours) qui permet des essais rapprochés.

C'est un émetteur gamma dont 98,6 % des désintégrations correspondent à l'énergie de rayonnement 0,41 MeV.

2.3.1.) Emploi de l'or colloïdal

L'immersion directe des grains de polystyrène dans une solution d'or colloïdal ne permet pas d'obtenir une rétention durable du radioélément. L'activité déposée sur le matériau n'est pas stable et disparaît au premier lavage.

2.3.2.) Emploi du chlorure d'or Cl^3Au

a) par traitement direct

Comme précédemment, la fixation du produit radioactif est nulle.

b) par évaporation forcée (sous vide
(par chauffage à 60° C
(par chauffage à 40° C et sous vide.

Ces trois procédés permettent de fixer sur les grains environ 50% de l'activité d'une solution contenant initialement 0,1 mg d'or par gramme de matériau à traiter. Ils n'ont pas été retenus cependant, car le marquage obtenu n'était pas uniforme; d'autre part, les deux dernières méthodes modifiaient par chauffage le poids spécifique des grains.

c) procédé Petersen*

Par cette méthode, l'or du chlorure Cl^3Au est réduit sous forme métallique à l'état colloïdal sur la surface du matériau à marquer traité auparavant au chlorure stanneux Cl^2Sn , selon la réaction :



Le chlorure stannique Cl^4Sn subirait une hydrolyse pour donner l'hydroxyde stannique $(\text{HO})^4\text{Sn}$ qui servirait de support à l'or colloïdal.

Le taux de fixation du chlorure stanneux sur le matériau est maximum à PH = 4 et pour une solution initiale de chlorure stanneux à 5 mg d'étain/g de grains, d'après des essais préliminaires effectués avec un chlorure stanneux radioactif.

* B.R. Petersen - Some radioactive surface labelling methods
Ingenjören - 4 - 99 - 102 - 1960.

Les phases successives du marquage sont donc :

- traitement préalable par une solution de potasse à 10 % pendant 20 minutes, pour nettoyer les grains,
- décantation et lavage des grains,
- traitement par solution de chlorure d'étain,
- traitement par solution de chlorure d'or radioactif,
- lavage.

Le rendement de fixation de l'or radioactif est en moyenne de 45 % ; le marquage est par ailleurs plus homogène que par les autres méthodes. Aussi ce dernier procédé fut retenu pour la préparation du traceur radioactif.

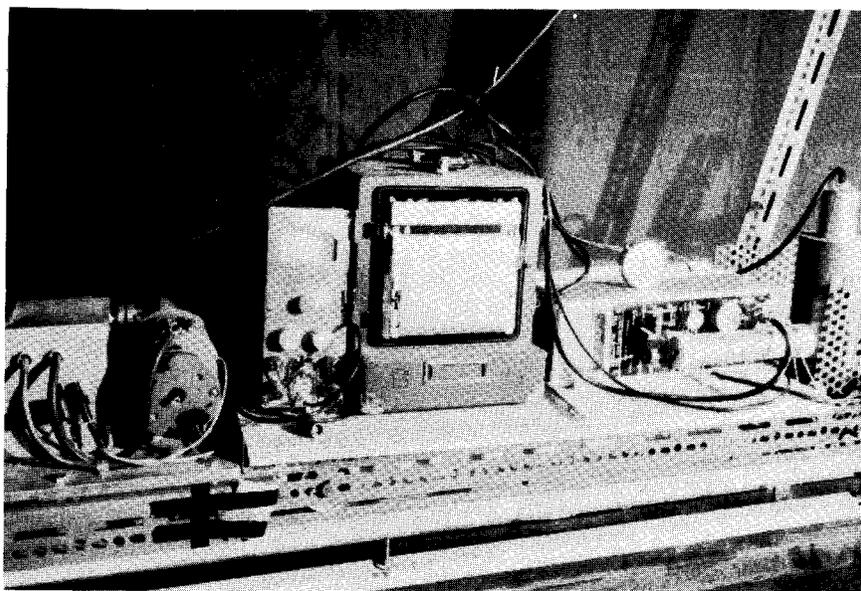
Les grains marqués pouvaient être supposés se comporter comme les autres particules du fond puisque leur forme et leur poids volumique n'étaient pas affectés par le traitement; ainsi, la vitesse de chute moyenne en eau calme à 20° C des grains marqués utilisés pour le premier essai en canal (n° 319) était 4,8 cm/s (écart type de 0,6 cm/s pour 60 grains) - et pour le deuxième essai (n° 321) : 4,7 cm/s, avec le même écart type que précédemment pour 60 grains. La vitesse de chute moyenne des particules du fond était, rappelons le : 4,8 cm/s, avec $\sigma = 0,3$ cm/s.

2.4.) Appareillage de détection des traceurs radioactifs :

L'appareillage de détection monté sur le chariot automoteur (photo 4) comprenait :

- une sonde cylindrique verticale, collimatée, en acier inoxydable, (type S P P 3 de la société S R A T) à cristal scintillateur d'iodure de sodium activé au thallium (dimension 1^{1/2}" x 1"),
- un intégrateur (de même marque que la sonde), à circuits électroniques transistorisés, avec alimentation autonome, comportant : 12 seuils d'énergie de 50 keV à 2 MeV, 6 gammes de constantes d'intégration de 0,12 s à 12 s, 6 gammes de sensibilité du taux de comptage de 0-50 chocs par seconde à 0 - 15 000 c/s,

- un intégrateur de puissance (S R A T) en parallèle avec le premier, car le signal de sortie de celui-ci était insuffisant pour attaquer directement l'enregistreur,
- un enregistreur (CdC) du type galvanométrique, l'inscription se faisant sur papier métallisé à claquage, entraîné par un mouvement d'horlogerie à remontage automatique (10 vitesses de déroulement possibles).



Photographie n° 4

Appareillage de détection des traceurs radioactifs

Centrée dans l'axe du canal, la sonde balaye la tache active à vitesse constante, à une certaine distance au-dessus du plan d'eau (distance moyenne fond-base du collimateur : 27 cm).

La sonde idéale donnerait un signal de réponse élémentaire dN (chocs/seconde) constant pour toute activité unité, supposée ponctuelle, de la surface détectée S sur le fond, et un signal de réponse nul pour toute activité extérieure à cette surface ; pour une analyse fine du problème, la surface détectée S devrait être aussi faible que possible. D'autre part, la variation de distance source - détecteur, due à l'enfouissement des grains marqués et à la pente du fond, ne devrait pas entraîner de variation appréciable de la grandeur du signal. Enfin, celui-ci

devrait être élevé par rapport au bruit de fond, en utilisant des activités aussi faibles que possible pour des raisons de sécurité.

Dans la pratique, il est impossible de satisfaire tous ces points, car certains sont plus ou moins contradictoires. Ainsi, avec une collimation de sonde très poussée permettant de ne détecter qu'une surface très limitée, il est nécessaire d'augmenter l'activité en jeu.

Le problème était d'autant plus difficile à résoudre dans le cas présent que la distance sonde-fond mobile, imposée par la présence d'entretoises à la partie supérieure du canal, était assez importante.

Un premier collimateur, comportant un orifice circulaire, n'a pas donné les résultats escomptés. Deux types de collimateurs à fente ont été retenus par la suite (schéma 1) :

- le premier collimateur consiste en une seule brique de plomb (hauteur 5 cm) comportant une fente verticale, large de 1 cm, transversale au canal,
- le deuxième collimateur comprend deux briques de plomb superposées de mêmes dimensions, les largeurs de fente étant respectivement 0,5 cm et 1 cm pour les briques inférieure et supérieure. En multipliant ainsi le nombre de réflexions dans le collimateur le rayonnement parasite latéral est partiellement éliminé et le pouvoir de résolution se trouve augmenté.

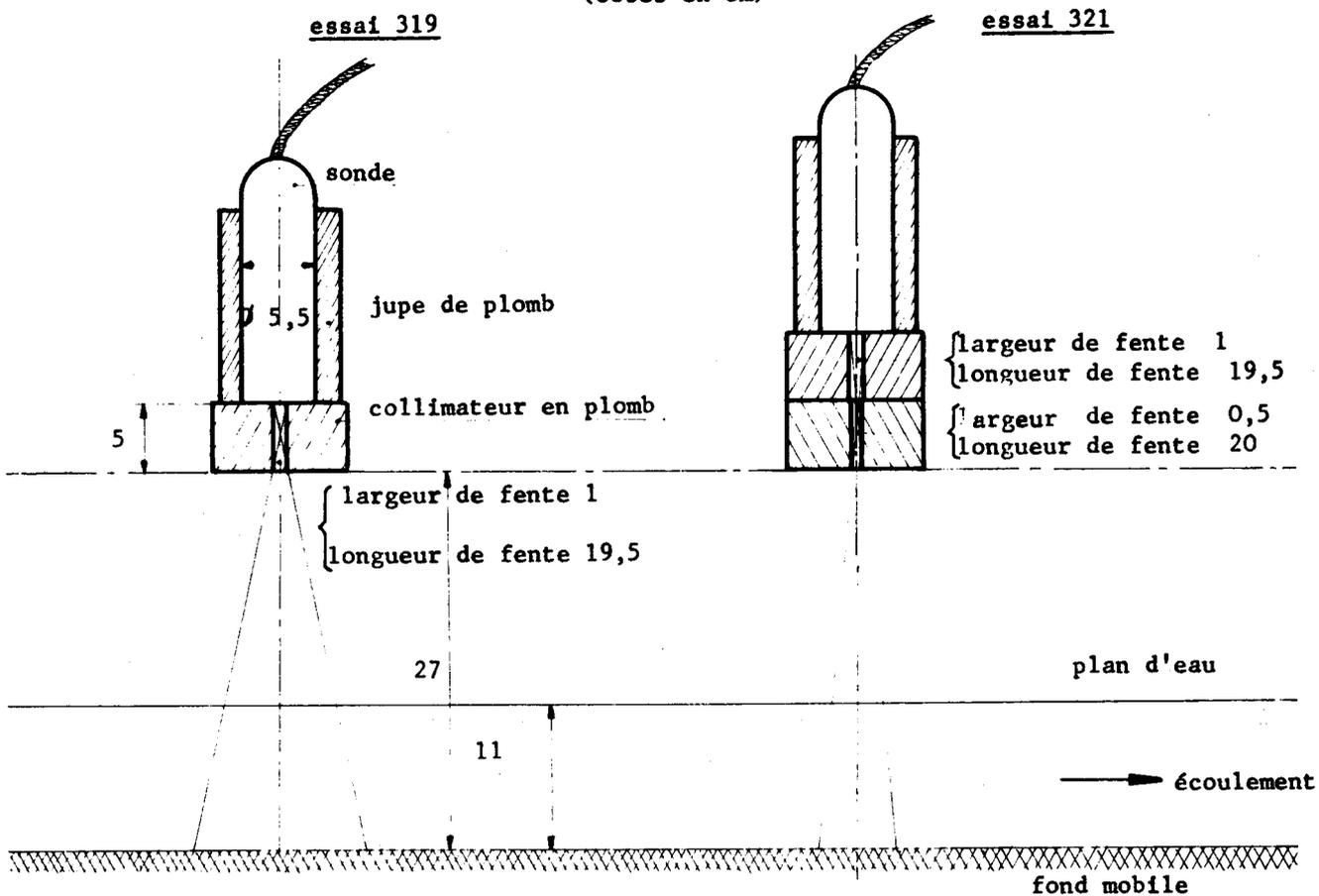
Au-dessus d'un fond présentant une activité superficielle uniforme la réponse de la sonde restait pratiquement la même avec ces deux collimations quand la variation de distance sonde-fond était de l'ordre de grandeur de celle rencontrée lors des essais en canal ; en effet, la surface détectée sur le fond, c'est-à-dire l'activité, augmentant avec la distance sonde-fond, les deux effets se compensent approximativement.

Par ailleurs, le corps de la sonde était protégé du rayonnement diffusé par une jupe de plomb.

SCHEMA 1

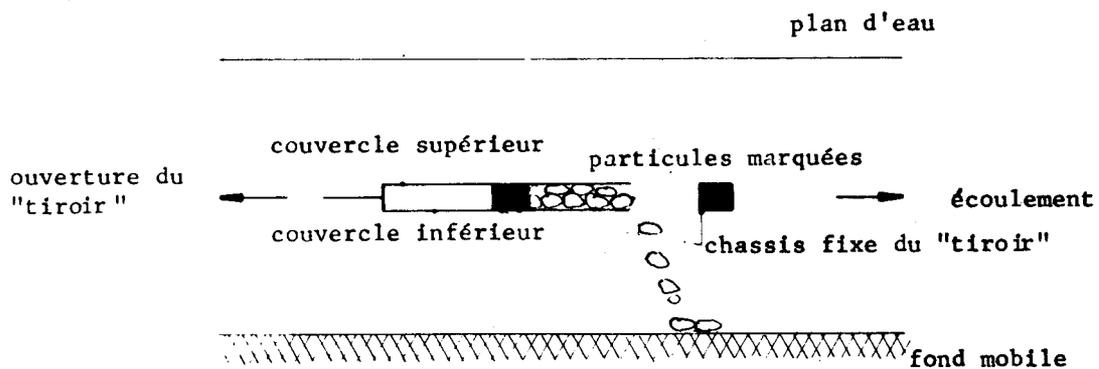
SCHEMAS DES COLLIMATEURS DE SONDE

(cotes en cm)



SCHEMA 2

SCHEMA DE PRINCIPE DU DISPOSITIF D'INJECTION



3.- ESSAIS AVEC TRACEURS RADIOACTIFS (n° 319 et 321).-

CARACTERISTIQUES ET RESULTATS

Deux essais en canal de caractéristiques hydrauliques identiques ont été effectués à trois semaines d'intervalle. Le deuxième essai (n° 321) devait permettre de s'assurer de la fidélité des résultats obtenus lors du premier, car on pouvait craindre, les dunes n'ayant pas des caractéristiques géométriques et cinématiques identiques et constantes, que la dispersion du traceur ne soit influencée par la nature des dunes rencontrées lors de l'injection.

3.1.) Déroulement des essais :

Partant d'un fond plat réglé à la pente uniforme voulue ($0,25 \times 10^{-3}$), l'écoulement était maintenu pendant quelques heures jusqu'à obtention du régime uniforme permanent avec dunes défini précédemment. Puis l'injection de traceur était effectuée sur le dos d'une dune, en amont du canal (à 3,7 m de l'alimentation) resté en eau, mais sans écoulement.

Le dispositif d'injection consiste en une sorte de tiroir fermé contenant le lot marqué, dont les faces supérieure et inférieure seules peuvent glisser entre des supports fixes ; descendu au voisinage du fond, il permet de répandre une couche d'épaisseur uniforme (1 cm) sur une longueur maximale de 20 cm ; l'injection était limitée à une largeur de 22 cm pour éviter au départ des effets parasites de paroi*.

Le tableau I ci-après donne les caractéristiques principales des lots de traceur utilisés pour les deux essais.

TABLEAU I
Caractéristiques des lots de traceurs injectés

Essai n°	319	321
Nombre approximatif de grains	6 250	10 000
Activité approximative en mCi	5	15

* largeur du canal : 25 cm.

L'injection faite, le temps nécessaire pour retrouver le régime uniforme précédent ne demandait pas plus de 5 minutes à compter de l'instant d'observation du début de charriage ; aussi l'erreur sur l'instant initial d'essai résultant de ce court régime transitoire peut être considérée comme négligeable.

Les deux essais avec traceurs radioactifs (n° 319 et 321) ont été poursuivis sans interruption pendant 9 h 55 mn et 8 h 10 mn respectivement.

Toutes les demi-heures environ, une détection de la tache active était effectuée d'amont vers l'aval, sans interrompre l'essai, à vitesse pratiquement constante (1er essai: 2,70 cm/s, 2ème essai: 2,63 cm/s). Les distributions de traceur ainsi obtenues ne correspondent donc pas exactement à la distribution réelle des particules marquées à un instant donné ; mais il sera montré par la suite que les résultats ne sont pas faussés néanmoins.

Les deux types de collimateur à fente décrits au paragraphe 2.4. ont été utilisés successivement pour les deux séries d'essais.

3.2.) Caractéristiques des essais :

La ligne d'eau était relevée en cours d'essai toutes les heures aux 5 points linéaires réparties sur le tronçon de canal à fond mobile. Elle est restée stable pendant toute la durée des expériences et garda une pente peu différente de la pente initiale ($0,25 \times 10^{-3}$) : ainsi la pente superficielle moyenne de l'essai 319 ne s'en écartait que de 3 % et celle de l'essai 321 de 0,4 % seulement. D'autre part, le décalage vertical entre les lignes d'eau moyennes des deux essais n'a pas dépassé 0,35 mm.

Le fond moyen, nécessaire pour calculer la hauteur d'eau moyenne, ne peut être défini avec une précision rigoureuse dans le cas d'un lit comportant des ondulations, même sur un tronçon de grande longueur (30 m dans le cas présent). La droite moyenne des moindres carrés correspondant aux crêtes et creux des dunes permet bien de caractériser un fond moyen à un instant donné, mais la formation d'une nouvelle dune isolée d'amplitude élevée peut modifier sensiblement la pente ;

plusieurs relevés complets des fonds en début et fin d'essai ont permis cette constatation alors que, cependant, le régime était parfaitement uniforme et permanent.

Les caractéristiques principales des essais sont indiquées au tableau II.

TABLEAU II
CARACTERISTIQUES DES ESSAIS 319 - 321

Pente du fond et de la ligne d'eau, $J = 0,25 \times 10^{-3}$		
Débit liquide, $Q = 3,9 \text{ l/s}$		
Hauteur d'eau moyenne, $h = 10,9 \text{ cm}$		
Vitesse moyenne de l'écoulement, $V = 14,3 \text{ cm/s}$		
Nombre de Froude*, $Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} = 0,14$		
Rugosité globale de Strickler, $k = 60,3 \text{ (S.I.)}$		
Rugosité Strickler propre au fond**, $k_f = 46,5 \text{ (S.I.)}$		
Nombre de Reynolds de l'écoulement*, $Re = \frac{V R_f}{\nu} = 11\ 600$		
Vitesse de frottement sur le fond, $u_* = \sqrt{g R_f J} = 1,45 \text{ cm/s}$		
Nombre de Reynolds autour du grain*, $Re^* = \frac{u_* d_m}{\nu} = 41,3$		
Force tractrice sur le fond*, $\tau = \bar{\omega} R_f J = 2,13 \text{ dynes/cm}^2$		
Coefficient d'entraînement*, $\psi = \frac{\tau}{\bar{\omega}' d_m} = 0,13$		
Débit solide*** (recueilli en aval - essai 319 : 13,31 - essai 321 : 13,59 (l/h) (injecte en amont 13,61 13,25 moyenne des deux essais : 13,45		

- * g = accélération de la pesanteur
 R_f = rayon hydraulique propre au fond après correction des effets de paroi
 ν = viscosité cinématique de l'eau
 d_m = diamètre moyen du matériau de fond
 $\bar{\omega}^m$ = poids volumique de l'eau
 $\bar{\omega}'$ = poids volumique sous l'eau du matériau de fond
- ** après correction des effets de paroi selon la formule de Mulhöfer-Einstein
- *** sur la largeur totale du canal (0,25 m).

Ces résultats montrent en particulier que le débit solide recueilli en aval du canal différait peu du débit solide d'alimentation et variait peu d'un essai à l'autre. L'écart entre ces divers débits solides n'a pas dépassé 2,5 %.

On peut donc admettre comme uniformes et permanents les régimes d'écoulement et de charriage obtenus pour les deux séries d'expériences.

3.3.) Aspect général des courbes de détection :

Du grand nombre de détections complètes réalisées (18 pour l'essai 319 et 14 pour l'essai 321) deux courbes d'enregistrement* seulement ont été présentées pour chaque série d'essais (figure 4) ; elles correspondent, pour les deux séries, à des temps d'écoulement avec traceur très voisins et sont donc directement comparables.

Le temps d'essai T_G indiqué correspond à l'instant de passage de la sonde au droit du centre de gravité G de la courbe obtenue, en prenant pour origine des temps le début des essais avec traceurs radioactifs. Les abscisses le long du canal sont rapportées au profil moyen d'injection. Sur cette figure ont été mentionnées également les positions des crêtes de dunes rencontrées en cours de détection.

Les courbes de détection homologues sont sensiblement différentes, plus particulièrement en début d'expérience. Ainsi, après 1h 20 mn d'écoulement le traceur de l'essai 321 est très étalé, tandis que celui de l'essai 319 est resté concentré dans le corps d'une seule dune. Ces deux premières courbes montrent aussi que la totalité du traceur a quitté la zone d'injection et que le front aval du nuage actif est très raide, tout comme avec les traceurs luminescents.

Les deux autres courbes représentées sur la figure 4 correspondent à un temps d'essai plus important (7h35 mn). La situation précédente s'est en quelque sorte inversée puisque le lot de traceur 319 est maintenant le plus étalé.

*ramenées à une même échelle de taux de comptage, et après corrections de pertes au comptage de l'appareillage de détection.

Pour cet essai, les pics de taux de comptage ne sont pas aussi marqués que pour l'essai 321 car la sonde avait un pouvoir de résolution moindre. Le front aval du nuage actif est resté raide. La queue amont est assez étalée mais correspond en fait à une faible activité c'est-à-dire à quelques grains enfouis seulement ; ceux-ci ne sont d'ailleurs pas enfouis définitivement puisque l'aspect de cette zone évolue d'un essai à l'autre.

En conclusion, les courbes de détection des deux essais présentent des différences marquées, même après un temps d'essai important. Le phénomène de dispersion des particules marquées semble dépendre dans une certaine mesure des caractéristiques des dunes rencontrées en début d'essai dans la zone d'injection.

3.4.) Progression du centre de gravité du lot de particules marquées :

Moyennant certaines hypothèses qui seront explicitées en détail ultérieurement, au paragraphe 3.8 consacré au calcul du débit solide, la vitesse du centre de gravité du traceur correspond à la vitesse moyenne des particules charriées

Mais, en fait, les courbes de détection $N(x)$ obtenues par balayage du canal sans arrêt de l'écoulement ne sont pas, après corrections, l'image exacte de la distribution des particules marquées du fond à un instant donné. Cette différence tient à deux raisons essentielles :

a) pour un passage direct du taux de comptage mesuré à la distribution discontinue du traceur le long du canal il faudrait une sonde de réponse "carrée" à pouvoir de résolution élevé.

Même collimatée, une sonde ne réunit pas ces conditions. Aussi, le taux de comptage n'est pas nul dans le creux des plus grandes dunes puisque la sonde détecte en même temps les particules actives des zones voisines. Pour cette même raison, les pics de taux de comptage sont toujours légèrement décalés en amont par rapport aux crêtes des dunes.

Néanmoins, malgré ces différences de forme, la distribution du traceur et la courbe d'évolution du taux de comptage, sans écoulement, ont même abscisse de centre de gravité si la réponse dynamique de la sonde (sonde mobile) diffère peu de la réponse statique (sonde fixe). S'il n'en est pas ainsi, il y a un décalage constant entre les deux centres de gravité ; ce qui, d'ailleurs, ne constitue pas une gêne puisque seule la vitesse du centre de gravité intervient dans le calcul du débit solide.

Vu la longueur des calculs, la démonstration complète de ce point particulier est donnée en annexe I.

Dans le cas des essais 319 et 321, il a été vérifié par un passage de la sonde au-dessus d'une source ponctuelle axiale que la déformation de la courbe de réponse statique n'était pas sensible à la vitesse de détection adoptée (2,7 cm/s).

b) les détections sont effectuées en cours même d'essai sans arrêt de l'écoulement. Aussi les particules marquées continuent leur progression avant que la sonde ne les atteigne. De ce fait, les courbes de détection "avec écoulement" se trouvent déformées vers l'aval par rapport à celles de détection "sans écoulement".

Cette difficulté n'est cependant qu'apparente.

Supposons que la sonde commence la détection au profil x_0 , au temps t_0 , avant d'aborder la tache active. Progressant à la vitesse V , elle sera à l'instant t en $x = x_0 + V(t - t_0)$ et détectera les particules qui, à l'instant t_0 , se trouvaient plus en amont de la quantité $v(t - t_0) = \frac{v}{V}(x - x_0)$, si l'on désigne par v la vitesse moyenne des particules marquées ; on peut en effet négliger l'étalement du nuage de traceur pendant la courte durée d'une détection complète et supposer une progression en bloc des particules à vitesse constante.

La distribution de traceur détectée "avec écoulement" se déduit donc de la distribution réelle à l'instant t_0 par une affinité de rapport $(1 + \frac{v}{V})$, en prenant x_0 pour nouvelle origine des abscisses.

Si x_{G0} est l'abscisse du centre de gravité de la distribution à l'instant t_0 , on obtiendra donc pour une détection "avec écoulement" un centre de gravité en $x_G = x_{G0} + (x_{G0} - x_0) \frac{v}{V}$. La sonde parvient en ce profil au temps :

$$T_G = t_0 + \frac{x_G - x_0}{v} \approx t_0 + \frac{x_{G0} - x_0}{v}$$

A cet instant T_G , le centre de gravité du traceur est par ailleurs en :

$$x_{G0} + v (T_G - t_0) = x_{G0} + (x_{G0} - x_0) \frac{v}{v} = x_G$$

En d'autres termes, l'abscisse x_G du centre de gravité de la distribution "avec écoulement" correspond à celle du centre de gravité du traceur à l'instant T_G de passage de la sonde détectrice au profil x_G .

Pour résumer les deux points : il est donc possible de déterminer le centre de gravité du lot de traceur à un instant donné, par une détection effectuée sans interrompre l'écoulement.

Sur les figures 5 et 6 ont été portés les résultats des essais 319 et 321. La progression du centre de gravité est régulière bien que le charriage par dunes soit essentiellement discontinu et dans l'ensemble les deux essais donnent des résultats peu différents (tableau III).

TABLEAU III

VITESSE MOYENNE DU CENTRE DE GRAVITE DU LOT DE PARTICULES MARQUEES

	Essai 319	Essai 321
en début d'essai	3,35 m/h	2,55 m/h
en fin d'essai	2,70 m/h	2,85 m/h
moyenne d'essai	2,60 m/h	2,70 m/h

En ce qui concerne le premier essai (figure 5), la vitesse moyenne du centre de gravité est importante en début d'essai, puis diminue sensiblement et se stabilise à nouveau en fin d'essai. Prolongé jusqu'à un temps d'essai nul le premier tronçon de la courbe $x_G (T_G)$ fait apparaître un décalage initial aval du traceur de 90 cm par rapport au profil moyen d'injection ; le lot de traceur déposé sur le dos de la dune est en effet rapidement balayé par l'écoulement dès la reprise de l'essai et vient s'accumuler au pied de la dune, située dans le cas présent à 70 cm du profil moyen d'injection.

On retrouve un décalage du même ordre pour le deuxième essai (fig.6). Le graphique de progression du centre de gravité présente deux tronçons rectilignes avec une légère brisure à mi-temps d'essai.

Aucune anomalie ne fut relevée en cours d'essai, qui puisse expliquer ce changement de vitesse après 4 heures d'écoulement. Comme par ailleurs, celle-ci n'est pas nécessairement plus forte dans la deuxième moitié d'essai il

semble possible d'éliminer toute cause d'erreur systématique et l'on peut supposer que cette évolution est due avant tout à la nature même du phénomène de charriage. Si par exemple de nombreuses particules marquées restent profondément enfouies après le passage d'une dune d'amplitude élevée, il leur faudra attendre le passage d'une nouvelle dune d'amplitude équivalente pour reprendre leur progression ; la vitesse d'ensemble du traceur est alors très affectée par l'immobilisation prolongée de ces particules.

Il serait donc intéressant de pouvoir effectuer de tels essais dans un canal de très grande longueur pour étudier les variations cycliques éventuelles de la vitesse moyenne du centre de gravité.

3.5.) Étalement du nuage de traceur :

Le lot de traceur ne se déplace pas en bloc et s'étale en progressant vers l'aval.

Il n'existe en fait aucun critère rigoureux pour caractériser la longueur de la tache active. Les deux définitions adoptées sont essentiellement subjectives ; elles reposent respectivement sur la valeur du taux de comptage maximum et l'aire $\int N dx$ de la courbe de détection.

3.5.1.) considérant le taux de comptage maximum :

Prenant pour critère le taux de comptage maximum N_{max} , la longueur de la tache active est définie par la distance séparant les deux points extrêmes de la courbe de détection qui correspondent au taux de comptage $0,1 N_{max}$.

Ces points caractéristiques sont presque symétriques par rapport au centre de gravité de la distribution comme le montrent les figures 5 et 6.

L'étalement ainsi défini croît rapidement au début de l'essai 319 (figure 7 a), linéairement avec le temps ; un changement brutal de pente se produit après 4 h d'essai. Pour l'essai 321, l'étalement est rapide dès les premiers instants d'écoulement ; il reste stationnaire pendant 4 h, puis augmente brusquement à raison de 1 m/h, valeur qui correspond par ailleurs à l'allongement horaire

moyen du lot de traceur 319 pour la durée totale de cette expérience.

Cette définition de l'étalement n'est pas très satisfaisante cependant puisqu'elle ne prend en compte qu'un point particulier de la courbe de détection dont la grandeur peut présenter des fluctuations importantes (figure 8 a).

3.5.2.) considérant la surface totale de la courbe de détection :

La surface totale de la courbe de détection est un critère sans doute plus valable que le précédent car il fait intervenir implicitement toutes les particularités de la courbe.

La longueur de la tache active est définie par la distance séparant les deux profils qui partagent la courbe de détection en deux aires 0,1 S et 0,9 S.

Les résultats obtenus avec cette nouvelle définition sont très proches de ceux obtenus en considérant le N_{\max} (figures 5, 6 et 7 b). Le taux horaire moyen d'allongement n'est cependant que 0,75 m/h contre 1 m/h précédemment ; cet écart n'est pas surprenant puisque les définitions d'allongement adoptées sont entièrement différentes.

Néanmoins, quelle que soit la définition de longueur de tache active, on arrive à des résultats peu différents. Il convient de noter également que les points expérimentaux ne présentent pas une dispersion très marquée que laisserait supposer une distribution discontinue en dents de scie.

3.6.) Evolution du taux de comptage maximum :

Le taux de comptage maximum est un point particulier facile à suivre dans sa progression.

On pourrait craindre a priori, que cette progression soit très irrégulière du fait de la nature discontinue du phénomène.

3.6.1.) progression du N_{\max}

En réalité les résultats (figure 8 b) montrent une continuité remarquable du déplacement. La progression du N_{\max} de l'essai 319 présente deux tronçons pratiquement rectilignes séparés par une légère inflexion à mi-temps d'essai, tout comme pour le centre de gravité. D'autre part, la vitesse de progression du N_{\max} de l'essai 321 est constante, en moyenne, pendant toute la durée des expériences (tableau IV).

TABLEAU IV

VITESSE DE PROGRESSION DU TAUX DE COMPTAGE MAXIMUM

	Essai 319	Essai 321
Vitesse en début d'essai	3,6 m/h	
Vitesse en fin d'essai	3,0 m/h	
Vitesse moyenne	3,0 m/h	2,6 m/h

Si l'on compare cette vitesse à celle du centre de gravité on constate que pour le premier essai le N_{\max} progresse plus rapidement que le centre de gravité (de 15 %) ; pour l'essai 321 les deux vitesses sont peu différentes.

En admettant même que le point d'activité maximum soit caractéristique de la progression des particules marquées, ce choix ne serait pas très judicieux car, après un temps d'essai important, le maximum ne se détache pas nettement des pics voisins quand le lot de traceur s'est partagé entre plusieurs dunes consécutives (figure 4b).

3.6.2.) Décroissance du N_{\max}

Les points portés sur la figure 8 a correspondent aux taux de comptage mesurés, corrigés de la décroissance du radioélément (période 2,7 jours) et des éventuelles pertes au comptage.

La décroissance du N_{\max} ne suit pas une même loi pour les deux essais. Elle est pratiquement exponentielle pour l'essai 321, plus rapide que selon cette loi pour l'essai 319.

Cette divergence marquée entre les deux essais n'a cependant rien d'étonnant car les activités injectées étaient différentes et les sondes utilisées n'avaient pas la même collimation. Aussi, pour être valable, cette comparaison devrait porter non sur les taux de comptage mais sur les activités détectées par longueur L de canal, rapportées aux activités injectées.

3.7.) Caractéristiques des dunes :

Trois relevés complets du fond ont été effectués au cours de ces essais avec traceurs radioactifs, pour déterminer en particulier les caractéristiques des dunes.

L'histogramme des amplitudes de dunes, mesurées entre crêtes et creux successifs, n'est pas symétrique (figure 9 a) et il y a peu de dunes dans les classes inférieures au mode. L'amplitude maximale observée est 4,0 cm. L'amplitude moyenne est 2,0 cm.

Mais les crêtes et creux consécutifs ne sont pas répartis symétriquement de part et d'autre du fond moyen défini par la droite des moindres carrés de ces points singuliers. Il n'a pas été observé cependant de trains de dunes ou de "macrodunes", c'est-à-dire de ces dunes importantes sur le dos desquelles progressent des dunes de moindre amplitude. Sur certains tronçons de canal le fond peut s'abaisser graduellement par une cascade de dunes si bien que la dénivellation maximale entre crêtes et creux n'est pas liée directement à l'amplitude maximale des dunes.

Déterminant pour chaque crête et creux de dune la distance au fond moyen, on obtient les distributions cumulatives représentées sur la figure 9 b. L'écart maximum au fond moyen est de 2,5 cm pour les crêtes comme pour les creux. L'écart moyen est de 1,05 cm pour les crêtes, 1,25 cm pour les creux ; c'est-à-dire que l'écart entre crête moyenne et creux moyen est 2,3 cm.

Par ailleurs, la longueur d'onde moyenne des dunes déterminée à partir de ces trois profils en long du fond est 1,25 m.

Au cours de la série d'essai 321, des relevés de fond schématiques à main-levée ont été effectués lors de 13 détections, tout en suivant la sonde dans sa progression. Ces profils de fond non instantanés ne sont donc qu'approximatifs, sans la moindre utilité pour déterminer les amplitudes de dunes. Mais, comme les caractéristiques des dunes évoluent peu en général d'une relevé à l'autre, la concordance entre deux profils en long consécutifs est satisfaisante sur des tronçons de canal longs de 7 m à 18 m, dans les cas les plus favorables. La vitesse moyenne des dunes a été calculée à partir du décalage de profils requis pour obtenir cette superposition ; elle est de 3,7 m/h, avec un écart type de 0,5 m/h seulement.

3.8.) Calcul du débit solide :

Le débit solide a été calculé par 3 méthodes différentes : théoriquement, considérant la vitesse moyenne des dunes, et à partir de la vitesse moyenne du traceur radioactif.

3.8.1.) calcul théorique :

La formule de charriage de Meyer Peter* généralisée adoptée a pour expression :

$$g''_s = \frac{g^{1/2}}{K^{3/2} \bar{\omega}^{1/2}} (\tau - \tau_0)^{3/2}$$

avec :	g''_s	débit solide, en poids sous l'eau de matériau charrié par unité de temps et unité de largeur d'écoulement
	g	accélération de la pesanteur
	K	constante sans dimensions de Meyer-Peter = 0,25
	$\bar{\omega}$	poids volumique de l'eau
	τ	force tractrice effective de l'écoulement sur une surface de fond unité

* Meyer Peter - Muller-Formulas for bed load transport - Congrès A.I.R.H. Stockholm 1948.

τ_0 force tractrice critique correspondant au début d'entraînement du matériau.

D'après des essais antérieurs effectués en canal avec ce même matériau sur fond plat, le coefficient d'entraînement critique $\psi_0 = \frac{\tau_0}{\bar{\omega} d_m}$ vaut 0,028*. Meyer Peter indique 0,03 pour le début d'entraînement et prend 0,047 pour le calcul du débit solide.

La force tractrice effective de l'écoulement est d'autre part définie part:

$$\tau = \bar{\omega} R_f J', \text{ avec } J' = J \left(\frac{k_f}{k_m} \right)^{3/2}$$

k_m désignant la rugosité Strickler du matériau. Le terme correctif $\left(\frac{k_f}{k_m} \right)^{3/2}$ sur la pente J de la ligne d'énergie tient compte du fait que l'écoulement dissipe son énergie sur le fond de deux façons : pour vaincre les résistances de frottement et pour transporter le matériau.

Le coefficient de Strickler des grains k_m vaut 74,5 d'après un essai antérieur sur fond plat réalisé à un nombre de Reynolds d'écoulement très proche de celui des essais 319 - 321. On ne peut le calculer par la formule classique de Meyer Peter $k_m = \frac{26}{d_{90}^{1/6}}$ puisque le régime d'écoulement n'est pas

pleinement turbulent et correspond à la zone de transition d'écoulement hydrauliquement lisse à rugueux, la harpe de Nikuradse permet de déterminer dans ce cas le coefficient universel de pertes de charge $\lambda = \frac{8g}{k_m^2}$ et le coefficient de Strickler k_m qui, tous calculs faits, est identique à celui résultant des essais en canal.

Avec toutes ces corrections, on obtient pour débit solide des essais 319 et 321 : $Q_s = 11,75 \text{ l/h}$, sachant que l'indice de vides du matériau de fond est 0,5.

* Voir notations tableau II.

Un résultat en aussi bon accord avec le débit solide réel (13,45 l/h) est assez surprenant puisque la formule de Meyer Peter a été établie dans sa forme originale ($\psi_0 = 0,047$) exclusivement pour les écoulements pleinement turbulents et des granulométries étendues de matériau de fond.

3.8.2.) Considérant la vitesse moyenne des dunes

Si les dunes étaient toutes identiques (longueur d'onde Λ , amplitude h_m) et progressaient à la même vitesse V_m , le débit solide aurait pour expression :

$$Q_s = 1 \frac{h_m}{2} V_m$$

en désignant par l la largeur du canal.

Si, hypothèse très hardie, on assimile le fond des essais 319-321 à ce fond parfait, avec les caractéristiques moyennes des dunes indiquées au paragraphe 3.7. ($h_m = 2,0$ cm, $V_m = 3,7$ m/h), le débit solide calculé est $Q_s = 9,25$ l/h

L'imprécision de cette méthode est évidente et tient à la nature même des hypothèses.

3.8.3.) Considérant la vitesse moyenne du lot de traceur :

Les principes de la méthode d'intégration dans l'espace pour le calcul du débit solide sont exposés en annexe II.

Dans ces calculs, l'écoulement est supposé de largeur unité, permanent et uniforme. Pour l'injection, on remplace le matériau de fond par le traceur dans une saignée transversale de largeur L , centrée sur $x = 0$, descendant en-dessous du niveau de charriage. Si $m(t)$ désigne le volume du traceur émis par la tranche d'injection pendant le temps t d'essai et x_G l'abscisse du centre de gravité de la distribution des traceurs émis, le débit solide a pour expression :

$$q_s = \frac{m(t)}{L} \frac{x_G}{t}$$

Quand, sans attendre un temps infini, le volume limite m est pratiquement atteint :

$$q_s = \frac{m}{L} \frac{x_G}{t}$$

Et si la durée de cette phase transitoire est courte par rapport à la durée d'essai : $\frac{x_G}{t} \simeq \frac{d x_G}{dt} = V_G$ (vitesse moyenne du lot de traceur)

Quand la saignée d'injection couvre plusieurs ondulations du lit, $\frac{m}{L}$ correspond à l'épaisseur moyenne e_m de matériau charrié se déplaçant à la vitesse V_G ; d'où l'expression du débit solide pour un écoulement de largeur unité :

$$q_s = e_m V_G$$

Le mode d'injection adopté pour les essais 319 et 321 est donc très différent de celui que voudrait la stricte application de cette méthode. Un lot de traceur injecté en surface a certainement les premiers temps une vitesse moyenne supérieure à celle d'un lot injecté dans la masse d'une dune ; mais comme les temps d'enfouissement des particules des deux lots sont du même ordre par la suite les deux vitesses ne peuvent différer sensiblement, surtout avec le régime de charriage par dunes pour lequel le brassage des diverses couches de matériau est énergique. La formule précédente de calcul du débit solide reste donc valable.

La difficulté majeure de la méthode est de déterminer l'épaisseur moyenne de charriage $e_m = \frac{m}{L}$, c'est-à-dire la surface sur une longueur L de la couche de matériau charrié, rapportée à cette longueur L . Mais alors que le profil de fond est bien défini il n'en est pas de même de la limite inférieure de charriage.

Une première méthode consisterait à adopter pour cette limite la parallèle au fond moyen, passant par le creux de dune le plus profond. On risque cependant d'accorder une trop grande importance à cette dune exceptionnelle de très faible probabilité et d'existence éphémère.

Aussi, il semble judicieux d'adopter un niveau limite de charriage légèrement supérieur, défini par exemple par "l'écart 90%" des creux de dunes au fond moyen (paragraphe 3.7. - figure 9 b) - soit 2 cm pour les essais 319 et 321. Avec cette définition - assez subjective, il faut le reconnaître - le planimétrage de la couche de matériau charrié conduit pour les trois relevés de fond des essais 319 - 321 à une épaisseur moyenne équivalente de charriage de 1,9 cm. La vitesse moyenne du traceur étant d'autre part $V_G = 2,65$ m/h, le calcul du débit solide sur la largeur l du canal donne $Q_s = l e_m V_G = 12,60$ l/h - valeur très proche du débit solide réel 13,45 l/h.

On pourrait également supposer, en première approximation, que la couche de charriage est composée de dunes, toutes identiques, dont crêtes et creux seraient définis par "les écarts 90%" au fond moyen. Ces dunes auraient une amplitude de 4,0 cm (figure 9b), et la couche uniforme équivalente aurait une épaisseur de 2 cm. Le débit solide serait alors $Q_s = 13,25$ l/h. Ce résultat est en bon accord avec le débit mesuré bien que cette méthode soit moins valable que la précédente.

3.9.) Bilan d'activité le long du canal :

Si les détections du traceur radioactif le long du canal étaient effectuées sans écoulement, les aires $\int N'dx$ des diverses courbes de détection seraient identiques d'après le calcul reporté en annexe I, paragraphe 5. Les détections sont en fait réalisées sans interrompre l'écoulement. Mais il a été montré au paragraphe 3.4. que les deux types de courbes de détection sont affines dans le rapport $(1 + \frac{v}{V})$, v désignant la vitesse moyenne des particules du fond (2,65 m/h) et V la vitesse de la sonde balayant le canal (2,65 cm/s) ; le rapport des aires est donc également $(1 + \frac{v}{V}) \simeq 1,03$. Puisque cette correction est constante les

aires $S = \int N dx$ des courbes de détection "avec écoulement" devraient aussi être identiques.

En réalité, l'aire S diminue, après corrections de décroissance d'activité du traceur (figure 10). Cette diminution est rapide pendant les 4 premières heures de l'essai 319 ; puis l'aire S se stabilise autour de 13 000 c. m/s. Pour l'essai 321, la décroissance est par contre régulière et faible (4,5 % en moyenne pour la durée totale de l'essai) ; aucun équilibre ne semble atteint.

Ce calcul de l'annexe I montre également qu'il est possible de faire le bilan de l'activité distribuée le long du canal, connaissant la réponse de la sonde et la distribution transversale relative du traceur.

Si, en particulier, la sonde est étalonné avant l'essai en prenant comme source un échantillon du lot de traceur qui doit être utilisé, on peut alors déterminer indirectement le nombre de grains marqués injectés ; pour l'essai 319 l'aire S limite (13 000 c. m/s) conduit au chiffre de 8 550 grains injectés - qui diffère notablement du nombre de grains réellement utilisés (6 250). Une telle imprécision (écart de 35 %) peut être due au fait que la distribution transversale relative $b(Y)$ du traceur a été supposée identique en tout point du canal.

Ce bilan d'activité ne peut être établi à partir de la courbe de détection $N(t)$ obtenue par une sonde fixe au passage du nuage de traceur ; il faudrait pour cela disposer d'une sonde qui puisse mesurer directement la concentration volumique du traceur dans le matériau de fond.

Seule la première partie de la courbe $N(t)$ représentée sur la figure 11 a été obtenue directement, la sonde maintenue dans le profil situé à

11,7 m de la bande d'injection du traceur ; la majeure partie de la courbe a été reconstituée en utilisant les taux de comptage mesurés en ce profil lors des détections ultérieures et, entre ces points, les courbes de détection elles-mêmes, restituées en supposant qu'elles se déplaçaient sans déformation à la vitesse moyenne des dunes. Une sonde fixe aurait ainsi reçu pendant le temps de passage du nuage de traceur (3 heures environ) le nombre de chocs approximatif : $\int Ndt \approx 19.10^6$.

4.- CONCLUSION.-

Les deux séries d'essais réalisées en canal avec des traceurs radioactifs dans des conditions d'écoulement identiques ont donné des résultats très concordants.

Comme les activités de traceur et les collimations de sonde n'étaient pas les mêmes pour les deux expériences, les courbes de détection homologues ne sont pas directement comparables.

Mais les centres de gravité des deux lots de traceur ont progressé régulièrement à la même vitesse moyenne. Les fluctuations de vitesse à longue période observées semblent dues à la nature discontinue du charriage par dunes.

La difficulté principale de la méthode du centre de gravité, pour le calcul du débit solide, vient de la détermination de l'épaisseur moyenne de la couche de matériau charrié qui nécessite un levé précis des fonds sur un long tronçon homogène.

Des essais similaires sont envisagés pour les autres domaines de charriage : dunes avec saltation, rides, fond plat-afin de préciser les conditions générales d'application de cette méthode de mesure du débit solide.

NOTATIONS DES ANNEXES I et II

- $a(X,Y)$, $a(X,Y,t)$ activité du fond par unité de surface
 $a_0(X)$ activité du fond par unité de surface dans l'axe du canal
 A activité totale du traceur
 $b(Y)$ distribution transversale relative du traceur
 $C(x,t)$ distribution relative du traceur émis $m(t)$ au temps t
 $f(i,j)$ réponse dynamique de la sonde à une activité unité en i, j
 $F(Y) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(i,j) di$
 $H(x, \xi, t)$ fonction auxiliaire d'intégration
 i, j coordonnées liées à la sonde, supposée axiale (i longitudinalement,
 j transversalement).
 l largeur du canal
 L largeur de la saignée d'injection du traceur
 $m(t)$ volume du traceur émis après le temps t d'essai
 n nombre de chocs reçus par la sonde au cours d'une détection "spatiale"
 $N'(x)$ taux de comptage mesuré en x , sans écoulement
 q_s débit solide (volume) par unité de largeur d'écoulement
 t temps d'essai depuis l'injection des traceurs
 V vitesse de la sonde
 x abscisse de la sonde de détection
 x_G centre de gravité de la distribution du traceur
 x'_G centre de gravité de la courbe de détection $N'(x)$
 X, Y coordonnées relatives au canal (X longitudinalement,
 Y transversalement,
axe du canal $Y = 0$)
 ξ abscisse auxiliaire comptée depuis le profil X de mesure du débit solide

ANNEXE I*

CENTRE DE GRAVITE DU NUAGE DE TRACEUR A UN INSTANT DONNE

1.- DEFINITIONS.-

L'abscisse du centre de gravité de la courbe de détection $N'(x)$ obtenue sans écoulement après un temps donné d'essai est définie par :

$$x'_G = \frac{\int x N' dx}{\int N' dx} \quad (1)$$

et celle du nuage de traceur par :

$$x_G = \frac{\iint X a (X, Y) dX dY}{\iint a (X, Y) dX dY}$$

ou encore

$$x_G = \frac{1}{A} \iint X a (X, Y) dX dY \quad (2)$$

2.- CALCUL DE $\int N' dx$.-

2.1.) Si l'on néglige la constante de temps de l'appareillage de détection, le nombre élémentaire dn de chocs reçus par la sonde pendant le temps dt est :

$$dn = N' dt$$

* Notations page 37

et puisque $dx = V dt$

$$dn = \frac{1}{V} N' dx \quad (3)$$

Le nombre total de chocs reçus au cours d'une détection complète est donc :

$$n = \frac{1}{V} \int N' dx \quad (4)$$

2.2.) Il est possible de calculer directement l'expression de n , connaissant la distribution du traceur $a(X, Y)$, le long du canal et la réponse dynamique $f(i, j)$ de la sonde.

Supposons que la détection commence au profil x_0 au temps t_0 .

La sonde sera au temps t en :

$$x = x_0 + V (t - t_0),$$

et recevra pendant le temps dt le nombre élémentaire de chocs :

$$dn = dt \iint a(X, Y) f(i = X - x, j = Y) dX dY$$

ou $dn = \frac{1}{V} dx \iint a(X, Y) f(i = X - x, j = y) dX dY \quad (5)$

Le nombre total de chocs reçus au cours d'une détection complète est alors :

$$n = \frac{1}{V} \int dx \iint a(X, Y) f(i = X - x, j = Y) dX dY$$

En intégrant d'abord par rapport à x, prenant i comme nouvelle variable :

$$n = \frac{1}{V} \iint a(X, Y) dX dY \int f(i, j = Y) di$$

Les limites d'intégration de f sont pratiquement $-\infty, +\infty$ pour une détection complète de la tache active

$$\text{En posant } F(Y) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(i, j = Y) di \quad (6)$$

$$n = \frac{1}{V} \iint a(X, Y) F(Y) dX dY \quad (7)$$

2.3.) Par comparaison des équations (4) et (7)

$$\int N' dx = \iint a(X, Y) F(Y) dX dY \quad (8)$$

3.- CALCUL DE $\int x N' dx$.

En tenant compte des équations (3) et (5) :

$$\int x N' dx = V \int x dn = \int x dx \iint a(X, Y) f(i = X - x, j = Y) dX dY$$

Intégrant d'abord par rapport à x comme précédemment :

$$\begin{aligned} \int x N' dx &= \iint a(X, Y) dX dY \int_{-\infty}^{+\infty} (X - i) f(i, j = Y) di \\ &= \iint X a(X, Y) F(Y) dX dY - \iint a(X, Y) dX dY \int_{-\infty}^{+\infty} i f(i, Y) di \quad (9) \end{aligned}$$

4.- CALCUL DE x'_G

Les expressions (8) et (9) se simplifient si l'on admet que la distribution transversale relative du traceur $b(Y)$ est la même en tout point du canal, c'est-à-dire si :

$$a(X, Y) = a_0(X, Y=0) b(Y)$$

$a_0(X)$ désignant l'activité du fond par unité de surface dans l'axe du canal

$$\begin{aligned} \text{Quant à (8)} \quad \int N' dx &= \iint a(X, Y) F(Y) dX dY \\ &= \iint a_0(X) b(Y) F(Y) dX dY \\ &= \int a_0(X) dX \quad x \quad \int_{-l/2}^{+l/2} b(Y) F(Y) dY \quad (10) \end{aligned}$$

l étant la largeur du canal.

Et pour l'équation (9)

$$\begin{aligned} \int x N' dx &= \int x a_0(X) dX \quad x \quad \int_{-l/2}^{+l/2} b(Y) F(Y) dY \\ &= \int a_0(X) dX \quad x \quad \int_{-l/2}^{+l/2} b(Y) dY \int_{-\infty}^{+\infty} i f(i, Y) di \quad (11) \end{aligned}$$

De son côté, l'abscisse du centre de gravité du nuage de traceur devient :

$$x_G = \frac{\iint x a(X, Y) dX dY}{\iint a(X, Y) dX dY} = \frac{\int x a_0(X) dX}{\int a_0(X) dX}$$

L'abscisse du centre de gravité de la courbe $N(x)$ est alors :

$$x'_G = \frac{\int x N' dx}{\int N' dx} = x_G - \frac{\int_{-l/2}^{+l/2} b(Y) dY \int_{-\infty}^{+\infty} i f(i, Y) di}{\int_{-l/2}^{+l/2} b(Y) \int_{-\infty}^{+\infty} f(i, Y) di} \quad -(13)$$

d'où

$$\boxed{x'_G = x_G + \xi}$$

Comme on peut admettre que $b(Y)$ ne varie pas pour une même série d'expériences, le décalage entre les deux centres de gravité est constant.

Si, cependant, la réponse statique de la sonde n'est guère déformée en fonctionnement dynamique, les courbes $f(i, j)$ restent pratiquement symétriques par rapport à l'axe $i = 0$. L'intégrale $\int_{-\infty}^{+\infty} i f(i, Y) di$ est alors nulle et les deux centres de gravité sont confondus.

5.- BILAN D'ACTIVITE LE LONG DU CANAL.-

L'activité totale A le long du canal est donnée par :

$$A = \iint a(x, Y) dx dY = \int a_0(x) dx \times \int_{-l/2}^{+l/2} b(Y) dY$$

Et revenant à l'expression (10) de $\int_{-l/2}^{+l/2} N' dx$:

$$\begin{aligned} \int N' dx &= \int a_0(x) dx \times \int_{-l/2}^{+l/2} b(Y) F(Y) dY \quad (10) \\ &= A \frac{\int_{-l/2}^{+l/2} b(Y) f(Y) dY}{\int_{-l/2}^{+l/2} b(Y) dY} \end{aligned}$$

L'aire $\int N' dx$ des courbes de détection est donc constante.

ANNEXE II*

CALCUL DU DEBIT SOLIDE
PAR LA METHODE D'INTEGRATION DANS L'ESPACE**

Soit un écoulement permanent et uniforme de largeur unité.

L'injection de traceur est réalisée sur la largeur totale de l'écoulement dans une saignée de largeur L centrée sur $x = 0$ (schéma 1), en remplaçant le matériau de fond par le traceur jusqu'à une profondeur que les creux des dunes les plus importantes ne peuvent atteindre.

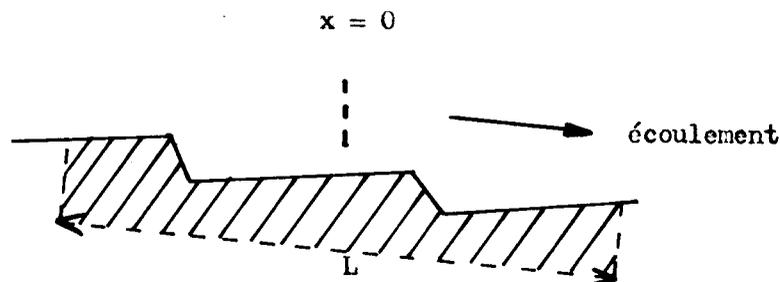


Schéma 1

Après un temps d'essai t , le volume de traceur $m(t)$ a quitté la zone d'injection et s'est dispersé le long du canal selon la loi de distribution relative $C(x, t)$. Il en résulte que $\int_0^{\infty} C(x, t) dx = 1$.

Le volume de traceur ayant franchi le profil X (schéma 2) est donc $m(t) \int_X^{\infty} C(x, t) dx$

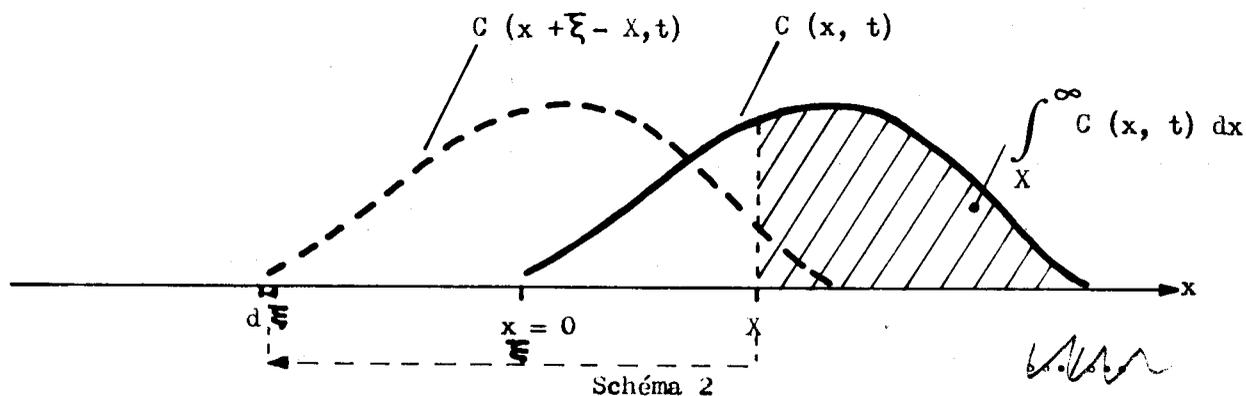


Schéma 2

* Notations page 37

** d'après Crickmore et Lean. The measurement of sand transport by means of radioactive tracers. Proc. of the Royal Society - n° 1 326 - March 1962.

On supposera que les lois d'émission et de distribution sont valables pour toute bande du fond de largeur L , centrée sur le profil ξ (schéma 2) la loi de dispersion $C(x, t)$ devenant $C(x + \xi - X, t)$. On admettra aussi qu'à la limite le volume de matériau $\frac{m(t)}{L} d\xi$ est émis par toute tranche $d\xi$ pendant le temps t et suit cette loi de distribution.

Le volume de matériau $q_s t$ ayant passé le profil X pendant le temps t est la somme des volumes élémentaires de matériau, parvenus en X , émis par toutes les bandes $d\xi$ situées en amont du profil X :

$$q_s t = \frac{m(t)}{L} \int_0^{\infty} d\xi \int_X^{\infty} C(x + \xi - X, t) dx$$

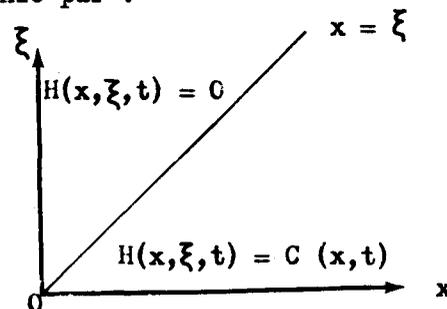
Posant $u = x + \xi - X$,

$$q_s t = \frac{m(t)}{L} \int_0^{\infty} d\xi \int_{\xi}^{\infty} C(u, t) du$$

ou encore
$$q_s t = \frac{m(t)}{L} \int_0^{\infty} d\xi \int_{\xi}^{\infty} C(x, t) dx$$

Soit la fonction auxiliaire $H(x, \xi, t)$ définie par :

$$\begin{cases} H(x, \xi, t) = 0 & \text{si } x < \xi \\ H(x, \xi, t) = C(x, t) & \text{si } x > \xi \end{cases}$$



t. Ben

Il vient

$$\begin{aligned} q_s t &= \frac{m(t)}{L} \int_0^{\infty} d\xi \int_0^{\infty} H(x, \xi, t) dx \\ &= \frac{m(t)}{L} \int_0^{\infty} dx \int_0^{\infty} H(x, \xi, t) d\xi \\ &= \frac{m(t)}{L} \int_0^{\infty} dx \int_0^x C(x, t) d\xi \\ &= \frac{m(t)}{L} \int_0^{\infty} x C(x, t) dx \end{aligned}$$

d'où

$q_s = \frac{m(t)}{L} \cdot \frac{x_G}{t}$
--

x_G étant l'abscisse du centre de gravité de la courbe de distribution du traceur.

FIGURES

- 1 Schéma du canal
- 2 Courbe granulométrique du matériau de fond
- 3 Distribution superficielle transversale relative des traceurs luminescents
- 4 Courbes types de détection a) en début d'essai
b) en fin d'essai
- 5 Progression du centre de gravité et des points caractéristiques
 $x_{0,1} N_{\max}$ et $x_{0,1} S$ - Essai 319
- 6 Progression du centre de gravité et des points caractéristiques
 $x_{0,1} N_{\max}$ et $x_{0,1} S$ - Essai 321
- 7 Etalement du nuage de traceur a) considérant N_{\max}
b) considérant $S = \int N dx$
- 8 a) décroissance du taux de comptage maximum N_{\max}
b) progression du taux de comptage maximum N_{\max}
- 9 a) histogramme des amplitudes de dunes
b) distribution cumulative des distances des crêtes et creux de dunes au fond moyen } essais 319-321
- 10 Evolution de $S = \int N dx$
- 11 Evolution du taux de comptage à 11,7 m de l'injection - Essai 319

SCHÉMA DU CANAL D'ESSAI

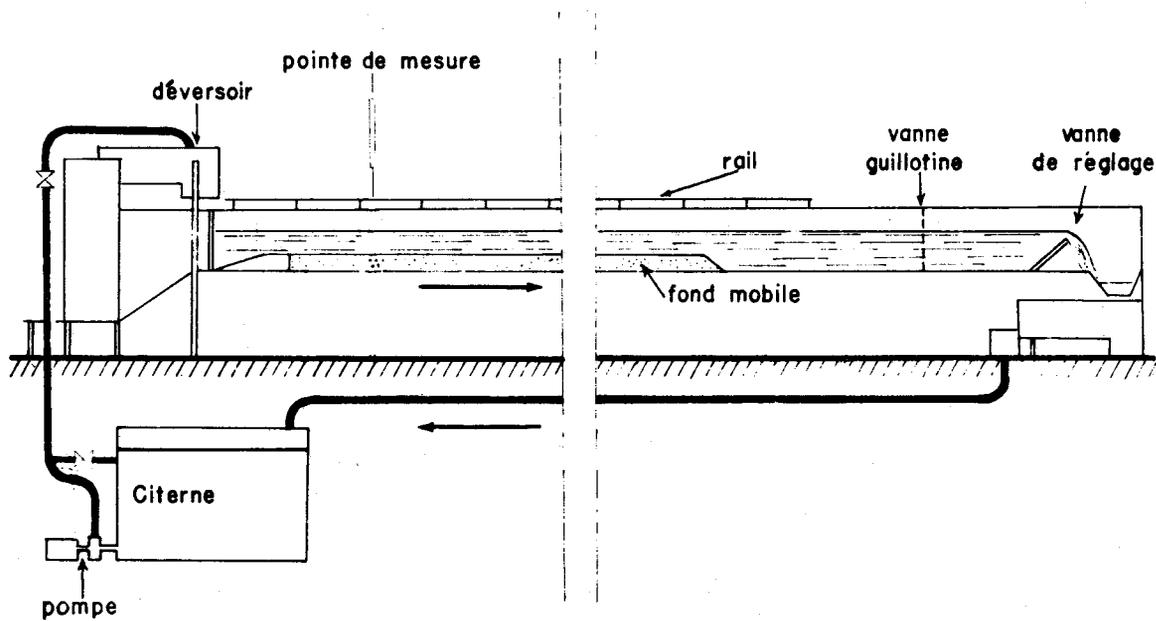


Fig.1

COURBE GRANULOMÉTRIQUE DU MATÉRIAU DE FOND

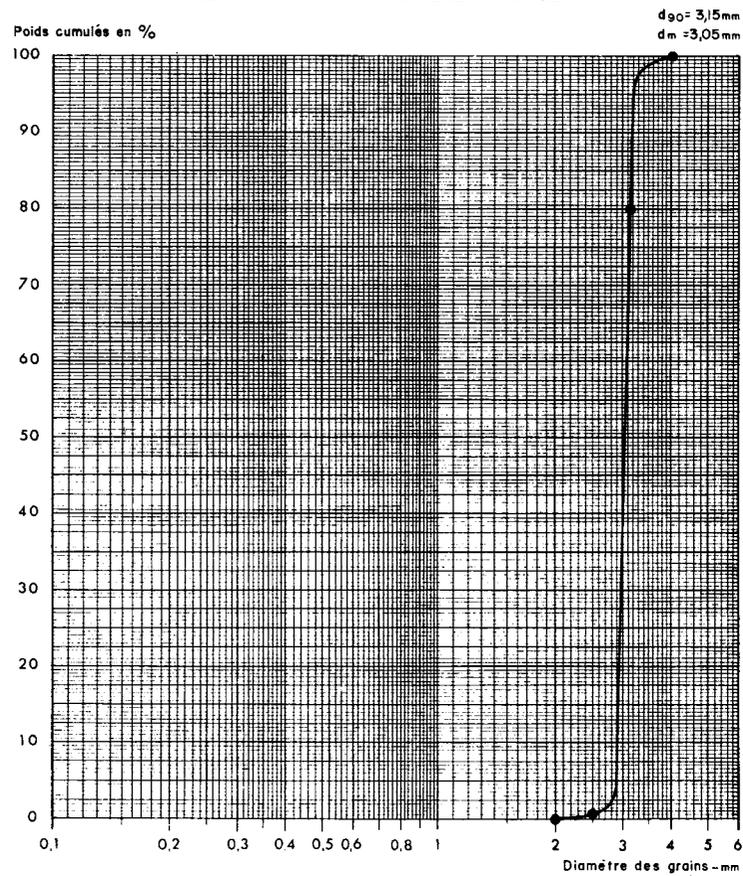


Fig-2

DISTRIBUTION SUPERFICIELLE TRANSVERSALE RELATIVE DES TRACEURS LUMINESCENTS

par bandes longitudinales larges de 5 cm

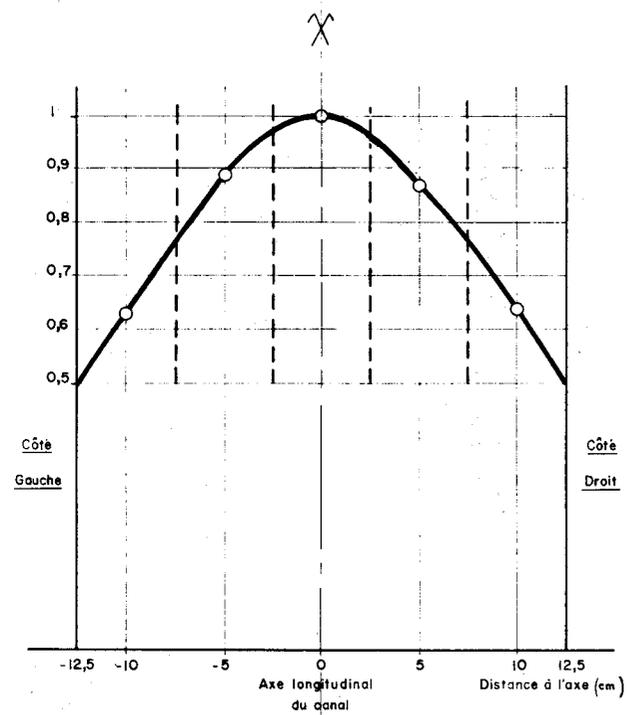
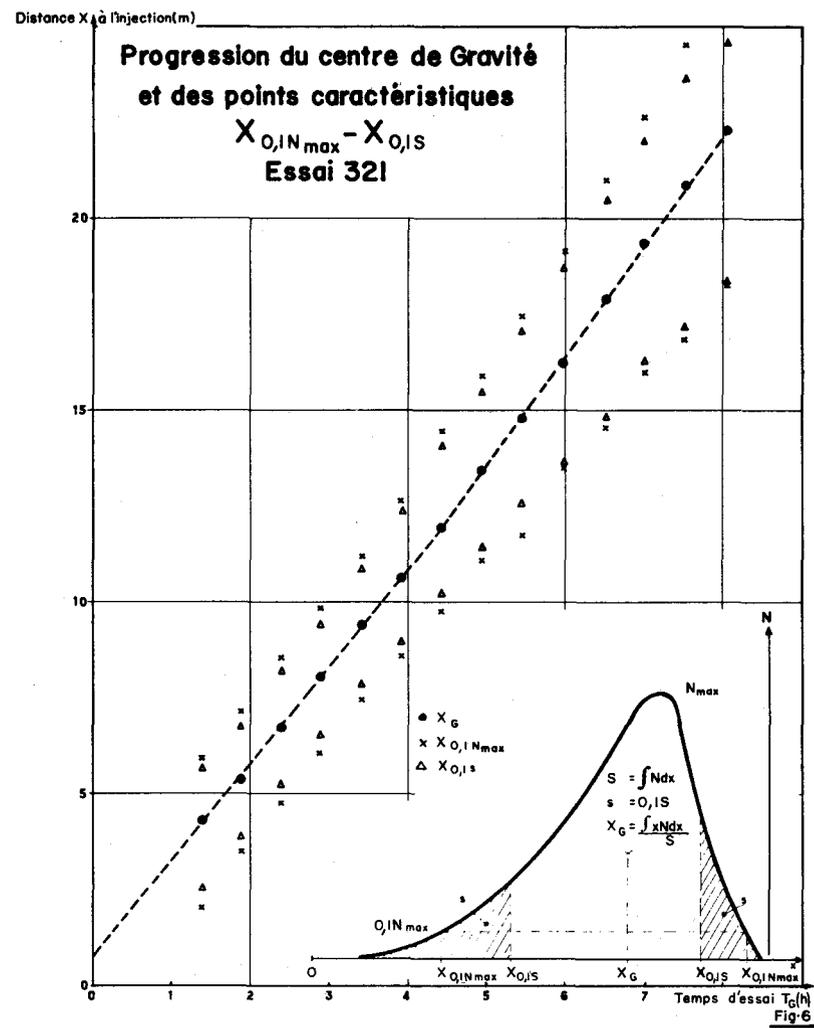
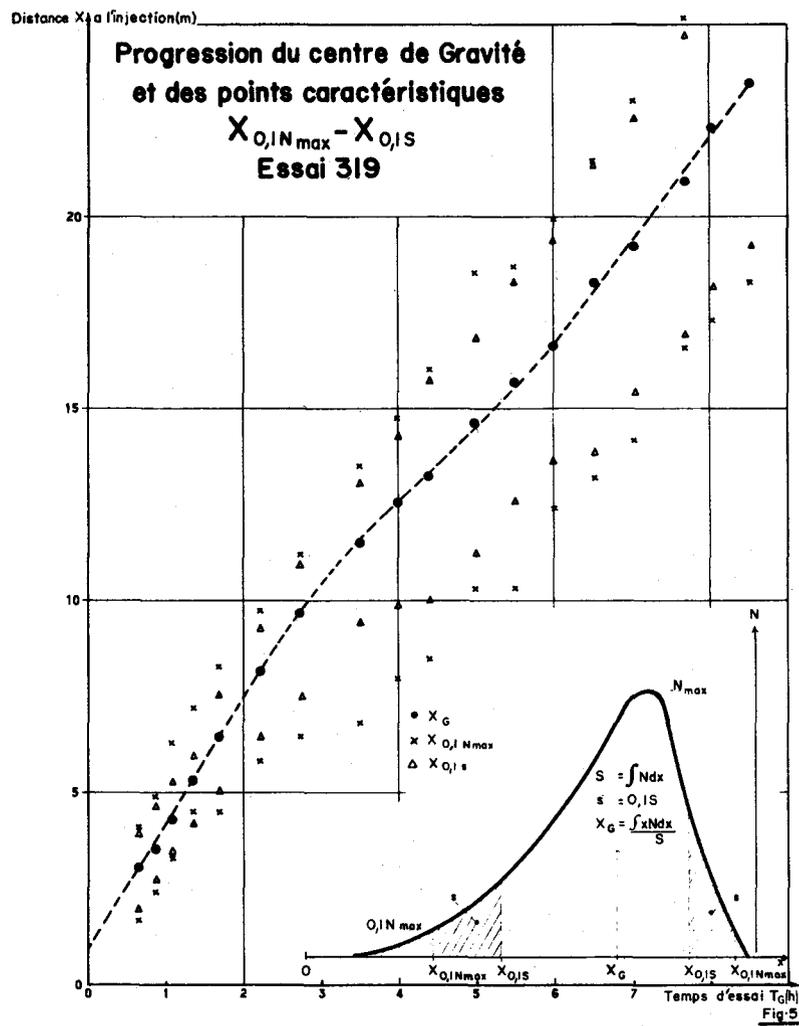


Fig-3



Etalement du nuage de traceur

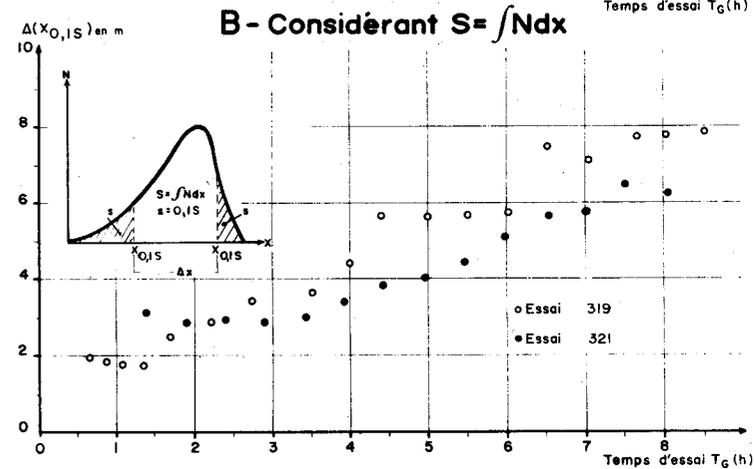
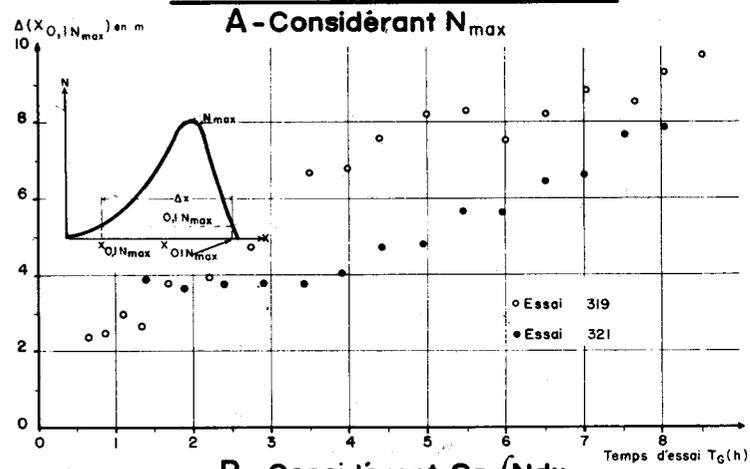
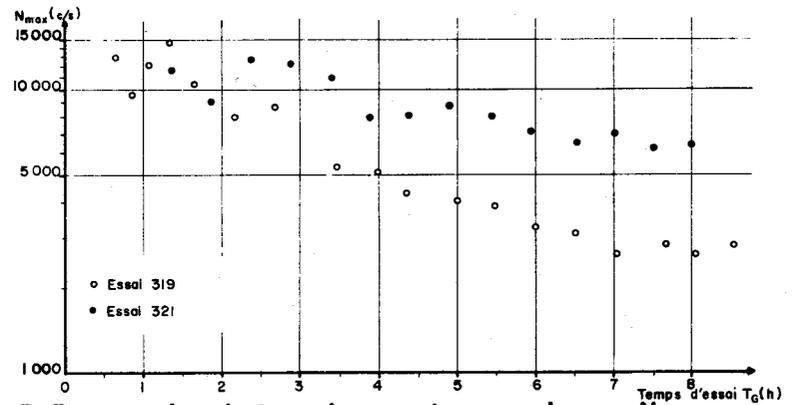


Fig-7

A - Décroissance du taux de comptage maximum - N_{max}



B - Progression du taux de comptage maximum - N_{max}

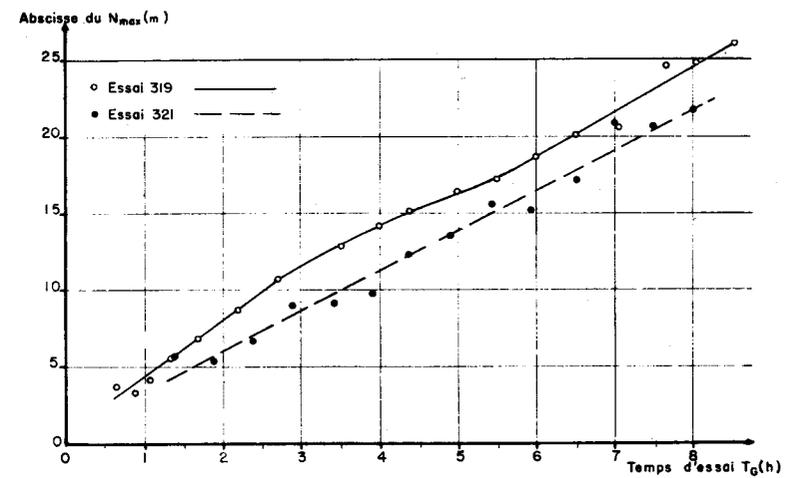
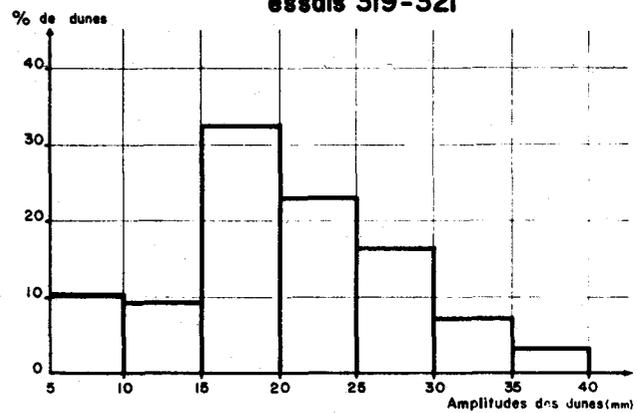


Fig-8

**A-Histogramme des amplitudes de dunes
essais 319-321**



**B-Distribution cumulative des distances des
crêtes et creux de dunes au fond moyen
essais 319-321**

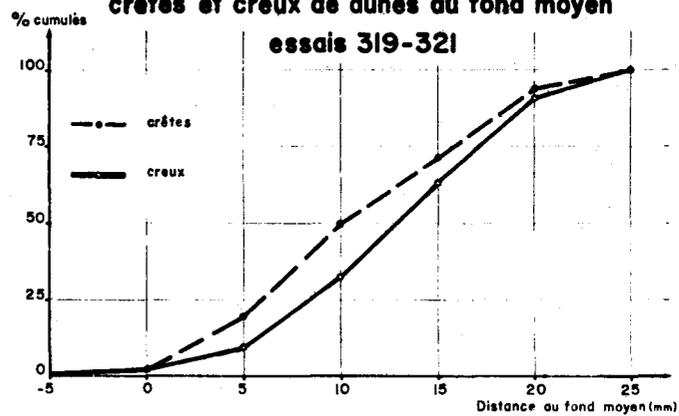


Fig 9

ÉVOLUTION de $S = \int Ndx$

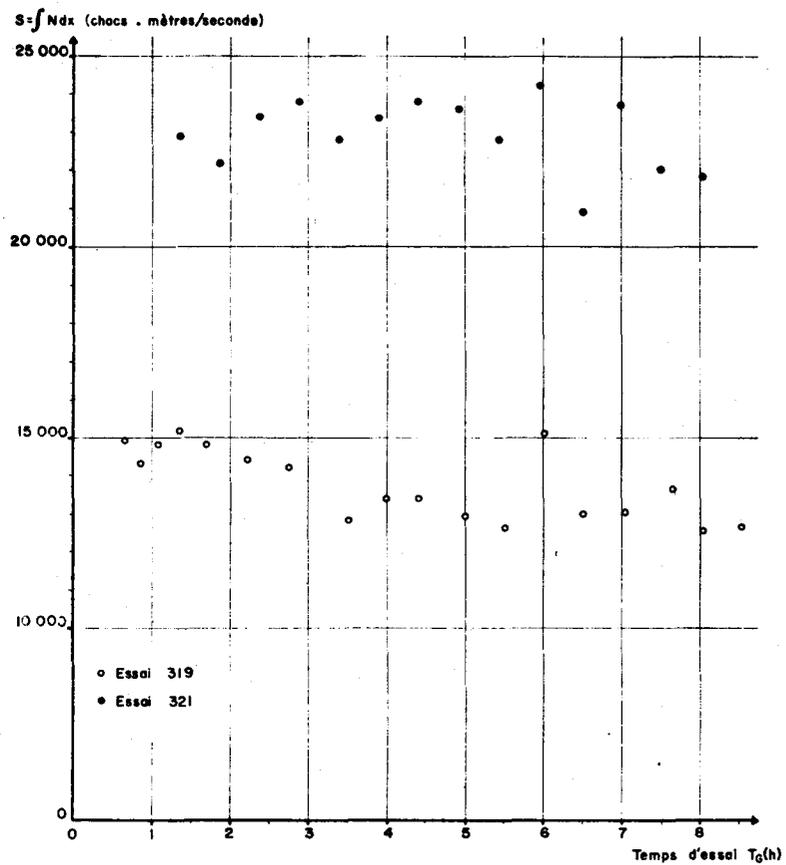


Fig-10

ÉVOLUTION DU TAUX DE COMPTAGE
À 11,7m DE L'INJECTION
Essai 319

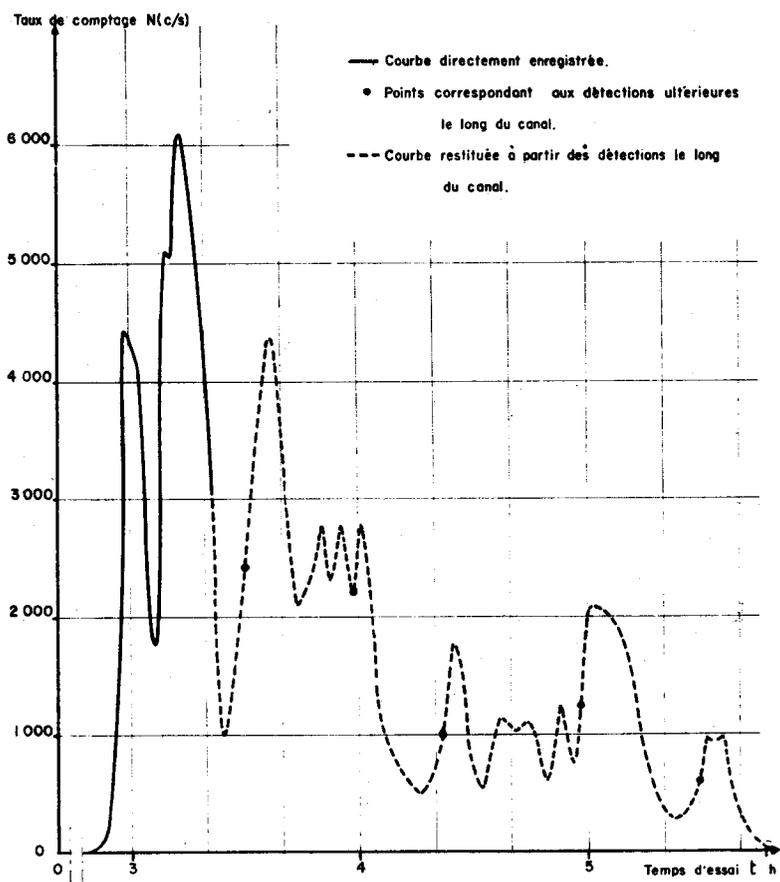


Fig. 11



1 - INTRODUCTION -

Deux méthodes principales peuvent être distinguées pour l'étude du transport solide d'un écoulement, par injection instantanée de traceur - radioactif ou luminescent - sur le fond : ce sont celles du centre de gravité (ou d'intégration dans l'espace) et d'intégration dans le temps. Comme elles ont déjà été présentées et discutées abondamment (1, 2, 3), leurs principes seuls seront rappelés brièvement.

Dans la deuxième méthode, d'intégration dans le temps, une sonde fixe détecte en aval de la zone d'injection l'évolution de la concentration C en traceur dans la couche de matériau charrié pendant tout le temps de passage du traceur en ce profil. On démontre que le débit solide massique Q_s a pour expression :

$$Q_s = \frac{M}{\int_0^{\infty} C dt} \quad , \quad (I)$$

en désignant par : M , la masse de traceur injecté,

t , la variable temps.

Cette méthode, classique en hydrologie pour la mesure de débits liquides, se heurte ici à des restrictions qui en limitent la portée (2) ; d'autre part le temps de passage, habituellement important, de la totalité du traceur injecté constitue la difficulté majeure.

Aussi la méthode du centre de gravité semble mieux adaptée à l'étude du débit solide de cours d'eau à charriage modéré.

2 - LA METHODE DU CENTRE DE GRAVITE -

Elle consiste à déterminer par des détections successives la position x du centre de gravité du nuage de traceur à divers instants t . La vitesse moyenne V des particules charriées est alors :

$$V = \frac{dx}{dt} \quad ,$$

et le débit solide volumique Q est donné par :

$$Q = SV \quad , \quad (2)$$

en désignant par :

$S = L.e$, la section de transport solide,

L , la largeur de l'écoulement,

e , l'épaisseur moyenne de la couche de matériau de fond en mouvement.

La simplicité de cette méthode n'est cependant qu'apparente.

En ce qui concerne la vitesse V , deux causes d'erreur fondamentales sont inhérentes aux traceurs radioactifs : l'effet de seuil dû à la radioactivité naturelle des sédiments et l'effet d'enfouissement des particules marquées, détectées moins aisément en profondeur (voir (4)). D'autre part la vitesse V ainsi calculée ne correspond à la vitesse moyenne des particules charriées que si tout le lot de traceurs a quitté la zone d'injection (5).

Diverses méthodes ont été proposées pour la détermination de l'épaisseur moyenne e de charriage - soit directes par relevés de profils du fond ou carottages dans la couche de charriage - soit indirectes, par le bilan quantitatif de traceur injecté, si l'on connaît sa concentration dans la couche de charriage (6).

Chaque procédé a ses difficultés propres et l'interprétation des résultats est délicate, tout particulièrement sur les cours d'eau naturels puisque les conditions d'écoulement ne sont généralement ni uniformes, ni permanentes.

Seuls les problèmes liés aux méthodes directes seront examinés dans ce qui suit, au vu de résultats d'essais en canal de laboratoire, dans le cas le plus simple d'un régime d'écoulement uniforme et permanent, supposant d'autre part le centre de gravité du nuage de traceur déterminé sans erreur.

Cette étude repose essentiellement sur l'analyse des caractéristiques morphologiques du fond mobile.

3 - LES CARACTERES MORPHOLOGIQUES DU FOND -

Selon la nature des sédiments constituant le fond et le régime d'écoulement, on obtient diverses configurations du lit : celui-ci peut être plat

ou couvert d'ondulations appelées rides ou dunes*

Le lit plat n'est possible qu'avec des sables relativement grossiers ($\lambda > 0,6$ mm) et pour un charriage modéré ; il est exceptionnel sur les cours d'eau naturels.

Les deux types d'ondulations rencontrés habituellement, rides ou dunes, présentent un profil schématiquement triangulaire en coupe longitudinale dans le sens de l'écoulement ; la face aval est courte, raide, alors que la pente de la face amont est faible.

Pour certains auteurs, tels Simons et Richardson (7), rides et dunes se différencient par leur longueur d'onde ; celle des rides ne dépasserait pas 0,5 m approximativement. Le deuxième critère distinctif qu'ils considèrent est l'aspect de la surface libre de l'écoulement : parfaitement lisse avec un fond de rides (sauf pour de très faibles hauteurs d'eau), légèrement perturbée en aval des dunes par un faible bouillonnement. Cette classification semble arbitraire et une distinction basée sur les caractères morphologiques des ondulations est souhaitable.

Tout d'abord il apparaît que la cambrure, définie par le rapport de la hauteur d'ondulations à la longueur d'onde, est plus importante pour les rides que pour les dunes, sans qu'il soit possible cependant de préciser à présent une valeur limite de ce paramètre. Les deux types d'ondulations diffèrent plus nettement par leur forme en plan : les dunes sont grossièrement bidimensionnelles, c'est à dire que leur profil longitudinal se conserve transversalement à l'écoulement et que leur front est assez rectiligne ; les rides, par contre, sont caractérisées par trois dimensions et présentent schématiquement l'aspect de croissants imbriqués dont le sommet est orienté vers l'aval.

Cependant les ondulations successives ne sont pas identiques, même si l'écoulement est uniforme. Elles constituent un système qui peut être :

* Le cas des antidunes, obtenues seulement pour des écoulements très torrentiels (nombre de Froude $FR \gg 1$) sera volontairement passé sous silence.

- simple : Les crêtes et creux sont distribués assez régulièrement de part et d'autre du fond moyen* (fig 1-a),
- ou composé : les crêtes et creux ne présentent plus l'aspect ordonné précédent (fig 1-b). Dans certains cas, plusieurs familles d'ondulations, rides et dunes, (jusqu'à 3 ou 4) peuvent se superposer (fig 1-c) ; des dunes, elles mêmes ridées, se développent alors sur le dos des plus longues ondulations, appelées mésoformes ou macrodunes, qui peuvent même atteindre sur certains cours d'eau une hauteur de plusieurs mètres.

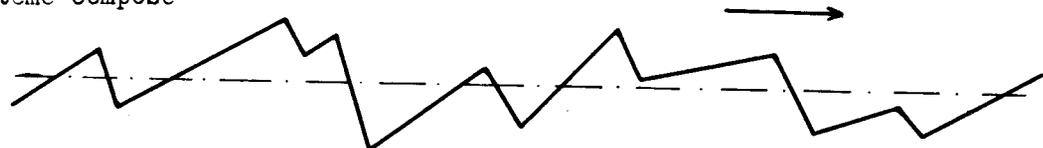
Figure 1

Aspects schématiques d'un lit avec ondulations
(coupes longitudinales)

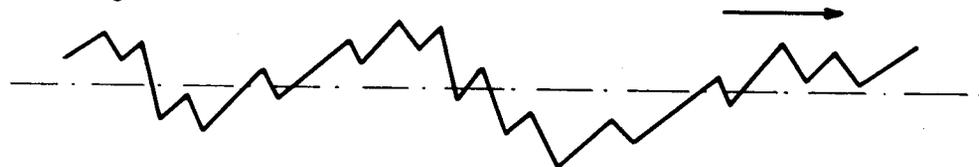
1 - a système simple



1 - b système composé



1 - c système composé mixte



* Le fond moyen étant défini par la droite des moindres carrés des crêtes et creux successifs, par analogie avec la droite de tendance des séries chronologiques en statistique.

Il convient de noter que l'étude de ces caractéristiques morphologiques n'a guère quitté le stade descriptif en raison de la complexité des systèmes rencontrés et faute, semble-t-il, de données assez nombreuses pour une étude statistique valable.

Quel que soit l'aspect du fond, plat ou ondulé, seules les particules exposées en surface peuvent être entraînées par l'écoulement. Le processus de charriage est uniforme sur un fond plat et discontinu dans le cas d'un lit ondulé.

Il est le même cependant que le fond soit couvert de rides ou de dunes. Les particules sont arrachées sur le dos de l'ondulation ; elles glissent et roulent sur le fond pour retomber au pied de la dune ou ride si l'écoulement n'est pas trop rapide. Le talus aval de l'ondulation s'engraisse donc au détriment de la partie amont et le mouvement général de translation vers l'aval s'accompagne d'un brassage du matériau au sein de la dune. Si les vitesses d'écoulement au voisinage du fond sont importantes, certaines particules cheminent au delà de la crête de dune, perdent le contact avec le fond et retombent plus en aval, échappant ainsi à l'enfouissement au pied de l'ondulation dont elles sont issues. Le dernier mode de transport, prépondérant avec des sédiments très fins, s'apparente à la saltation.

La distribution longitudinale de traceurs injectés sur le fond dépend donc essentiellement du type de charriage ; elle présente un front aval assez raide si la saltation est négligeable, très allongé si ce dernier mode de transport est important.

4 - CALCUL DU DEBIT SOLIDE, CONSIDERANT LES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES ET DYNAMIQUES DES ONDULATIONS DU FOND -

Comme les mésoformes définies précédemment progressent par déformation des ondulations élémentaires, le transport solide résulte de la migration de ces dernières.

Si h_m désigne la hauteur moyenne, entre crêtes et creux successifs, de ces ondulations supposées de profil longitudinal triangulaire, et v_m leur vitesse moyenne de progression, le débit solide d'un écoulement de largeur L a pour expression

$$Q = L \frac{h_m}{2} v_m \quad (3)$$

Cette formule n'est qu'approchée puisque la quantité $(hv)_m$ qu'il conviendrait d'utiliser n'est pas nécessairement égale à $h_m v_m$. Elle n'est évidemment valable, d'autre part, que si la saltation est négligeable, quand les particules ne peuvent progresser qu'au sein des ondulations.

Il se peut cependant que la saltation, importante au niveau d'ondulations élémentaires, soit négligeable à l'échelle des macrodunes de grande hauteur (sur des fleuves alluvionnaires tels le Niger ou l'Oubangui par exemple) et la formule (3) reste alors valable en considérant les mésoformes. Mais la vitesse de ces ondulations ne peut être en général déterminée avec grande précision - soit que la dune se déforme en progressant - soit que le déplacement, très limité, ne puisse être mesuré avec l'exactitude voulue. Ces restrictions enlèvent donc pratiquement tout intérêt à la méthode.

5 - DETERMINATION DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DE CHARRIAGE POUR LA MÉTHODE DU CENTRE DE GRAVITE -

Certaines difficultés de cette méthode ont été rappelées après le bref exposé de son principe au paragraphe 2.

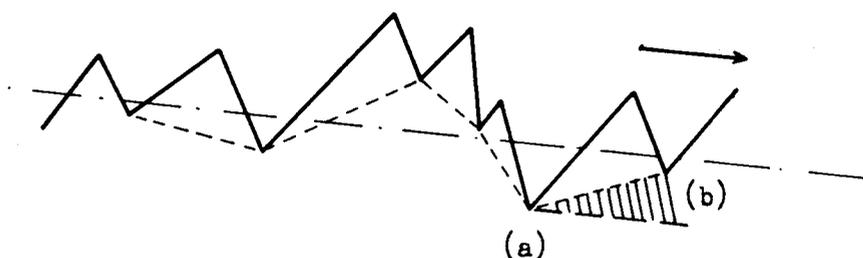
Le paramètre le plus délicat à déterminer est certainement l'épaisseur moyenne e de la couche de matériau charrié.

Alors qu'il est relativement aisé de relever le profil du fond avec une bonne précision, même sur les cours d'eau naturels avec les sondeurs modernes à ultrasons, il n'est guère facile de déterminer la limite inférieure de charriage dans le lit mobile.

5 - 1 Considérant l'enveloppe des ondulations.

Le niveau limite de charriage ne peut être défini de toute évidence par l'enveloppe des creux des ondulations puisque, comme le montre la figure 2 ci-après, un creux tel que (a) balayera également dans sa progression la zone hachurée (b).

Figure 2



5 - 2 Considérant le creux d'ondulation le plus profond.

Si ce creux (a) de la figure 2, que nous supposons être le plus profond pouvant exister, a balayé toute la zone d'étude du charriage par traceurs, le niveau limite de charriage est bien défini par la parallèle au fond moyen passant par ce creux.

Mais dans la pratique, rides et dunes se déforment en progressant et le creux extrême considéré précédemment n'a habituellement qu'une existence très limitée, c'est à dire ne peut intéresser qu'un court tronçon longitudinal de fond. Quand ce creux se forme dans la zone des traceurs, il laisse dans son sillage des particules marquées profondément enfouies qui ne pourront à nouveau participer au charriage que si une ondulation de creux aussi profond les met à découvert. Du fait de ce stockage plus ou moins accidentel la vitesse du centre de gravité des traceurs ne correspond plus à la vitesse moyenne des particules charriées. Aussi l'on ne peut dire en général le sens de l'erreur commise en calculant le débit solide par la formule (2) puisque les deux paramètres e et V , l'un est surestimé, l'autre sous-estimé -sauf néanmoins dans 2 cas limites :

1er cas.

Si un lot important de traceurs est enfoui peu de temps après son injection la vitesse du centre de gravité mesurée est bien plus faible que la vitesse moyenne des sédiments transportés. A priori, bien que la valeur de e adoptée soit trop forte, le débit solide calculé par la formule (2) est sous-estimé.

De ce fait, il importe d'injecter le traceur dans un tronçon de lit de caractéristiques de fond aussi uniformes que possible, en dehors de toute zone présentant des creux d'ondulations accentués.

2eme cas.

Si le creux exceptionnel ne se présente qu'après un temps d'essai notable la vitesse du lot de traceurs correspond pratiquement à la vitesse moyenne des particules charriées. En effet la concentration en traceur dans la couche de charriage est alors faible et peu de particules marquées risquent d'être immobilisées dans le sillage de ce creux.

En d'autres termes, la vitesse du lot de traceurs injectés peut ne pas être significative de la vitesse moyenne des sédiments lors des premières détections et il convient de laisser aux particules marquées un temps suffisant pour passer par les divers états possibles des sédiments de la couche de charriage.

Cette condition étant supposée satisfaite, il n'en reste pas moins qu'en adoptant pour niveau limite de charriage celui défini par le creux le plus profond on accorde un trop grand crédit à un phénomène local et éphémère. La formule (2) donne alors un débit solide par excès.

5 - 3 Considérant un niveau de charriage au-dessus du creux le plus profond.

Il ressort des considérations précédentes qu'il convient d'adopter pour niveau limite de charriage un niveau supérieur à celui du creux le plus profond.

Le choix d'un niveau particulier ne peut être fixé cependant que par l'expérience après de nombreux essais portant sur une gamme variée de configurations du lit.

Il sera montré par la suite, au paragraphe 6, que le débit solide calculé est en bon accord avec le débit solide mesuré pour certains essais en canal avec traceurs en prenant pour limite de charriage le niveau moyen des creux de macrodunes ou le 9ème décile de la distribution cumulative des distances des divers creux au fond moyen.

5 - 4 Mesure directe de l'épaisseur de charriage par carottages.

Cette méthode directe consiste à prélever des échantillons de fond dans la zone de dispersion du traceur injecté. Leur analyse ultérieure permet de déterminer l'épaisseur locale de la couche de charriage, si du moins les particules marquées ont

eu le temps et la possibilité de se mélanger au sédiment dans les diverses couches en mouvement.

Il importe donc de n'effectuer ces carottages qu'à une certaine distance de l'injection - au delà de la longueur dite de "bon mélange".

Un nombre limité de carottages en des points singuliers, dans des creux profonds ou sur des ondulations importantes, risque de conduire à des conclusions erronées ; aussi de nombreux prélèvements sont indispensables pour obtenir une information statistique valable.

Cette méthode est également soumise aux restrictions exposées au paragraphe 5-2 si des échantillons de fond sont prélevés dans le sillage d'un creux exceptionnel.

En conclusion ce procédé, qui à première vue serait le plus exact puisque ne nécessitant pas de relevé précis du profil longitudinal du fond, se heurte à des difficultés de principe. Les problèmes pratiques ne sont pas moins nombreux, car il est malaisé de prélever des échantillons de fond satisfaisants dans un lit de sable ; la mise en oeuvre des divers appareils réalisés à cette fin est d'autre part délicate en eau profonde et sur des rivières à fort courant.

6 - RESULTATS D'ESSAIS EN CANAL AVEC TRACEURS -

Plusieurs séries d'essais ont été réalisées en canal de laboratoire, utilisant des traceurs luminescents ou radioactifs.

Les détails en sont présentés dans deux notes : (8) en ce qui concerne les traceurs luminescents, et (5) pour les traceurs radioactifs.

Seules les caractéristiques principales de ces essais ont été rappelées au tableau I ci-après.

T A B L E A U I
CARACTERISTIQUES GENERALES DES ESSAIS

Traceurs	<u>Luminescents</u> (8)			<u>Radioactifs</u> (5)
	400	422	430	329 et 321
Essai n°	400	422	430	329 et 321
Largeur de canal (m)	1,5	1,5	1,5	0,25
Matériau de fond	galet concassé	noyau d'abricot broyé	galet concassé	polystyrène
Diamètre moyen du matériau (mm)	0,52	2,72	0,30	3
Densité du matériau	2,61	1,33	2,61	1,05
Débit liquide (l/s)	380	300	360	3,9
Pente de la ligne d'énergie	$0,32 \times 10^{-3}$	$0,22 \times 10^{-3}$	$0,23 \times 10^{-3}$	$0,25 \times 10^{-3}$
Hauteur d'eau moyenne (cm)	51,2	50,9	59,7	10,9
Débit solide (l/h)	20	71	4,5	13,45
Longueur d'onde moyenne des dunes ou rides (cm)	110 (dunes)	170 (dunes)	24 (rides)	125 (dunes)
Hauteur moyenne des dunes ou rides (cm)	4,0	2,9	1,9	2,0
Vitesse du centre de gravité du nuage de traceurs (cm/h)	28 et 18	56	3,4	265

Les traceurs luminescents étaient détectés par carottages dans le fond mobile ; il était donc nécessaire d'interrompre les essais et de vider le canal. Deux lots de traceurs ont été utilisés simultanément pour l'essai 400 sur deux tronçons distincts du canal.

Les traceurs radioactifs étaient par contre détectés sans interruption d'essai par une sonde se déplaçant au-dessus du plan d'eau à vitesse constante ; les particules marquées enfouies pouvaient être détectées en raison de la faible absorption du rayonnement γ par le matériau de fond utilisé (densité 1,05). Les essais 319 et 321 correspondent à des conditions hydrauliques identiques, la seule différence venant du lot de traceur injecté (activité, nombre de grains) et de la collimation de la sonde.

Les processus d'essais et de mesures n'étant donc pas identiques, il n'a pas toujours été possible de tester pour chaque série d'expériences toutes les méthodes de calcul du débit solide discutées précédemment.

6 - 1 Avec la vitesse moyenne des ondulations. (cf parag. 4)

La vitesse moyenne de déplacement des dunes n'a été déterminée que pour l'essai 321 avec traceurs radioactifs, par comparaison de relevés de fond schématisés à main levée. La superposition décalée des profils consécutifs conduit à une vitesse moyenne des dunes de 3,7 m/h; la hauteur moyenne des dunes étant d'autre part 2,0cm, il y correspond un débit solide de 9,25 l/h, soit 69 % du débit solide réel.

La précision est donc assez médiocre bien que le phénomène de saltation fut pratiquement négligeable ; il semble que cet écart vienne de la non-uniformité des dunes c'est à dire de l'erreur de principe admise au départ en adoptant $h_m v_m$ au lieu de $(hv)_m$ dans la formule (3).

6 - 2 Avec le creux le plus profond. (cf parag. 5-2)

Il a été vu que cette méthode doit normalement donner un débit solide par excès si le traceur ne reste pas immobilisé dans le sillage d'un creux exceptionnel en début d'essai.

Les résultats obtenus par ce procédé sont indiqués au tableau II.

T A B L E A U II

Essai	e avec le creux le plus profond (cm)	V (cm/h)	$\frac{Q_{\text{calculé}}}{Q_{\text{mesuré}}} \times 100$ (%)
400-1	8,3	28	175
2		18	110
422	5,2	56	62
319-321	2,4	265	118

Le dépassement est faible (18 %) pour les essais 319-321, assez élevé en moyenne (42 %) pour les essais 400-1 et 400-2. Il semble qu'en ce qui concerne ces dernières expériences une lente évolution de la pente du fond en cours d'essai avec exhaussement des fonds en amont soit à l'origine de la différence importante de vitesse de traceur observée en amont du canal (18 cm/h) et en aval (28 cm/h); il n'en reste pas moins que le débit solide calculé est trop élevé dans les deux cas.

Le charriage calculé pour l'essai 422 est par contre bien trop faible (de 38 %) sans que l'on puisse en définir la cause exacte.

6 - 3 Avec un niveau de charriage au-dessus du creux le plus profond.

(cf-parag. 5. 3)

Le choix du niveau de charriage à prendre en compte est évidemment subjectif et exigerait de longues et nombreuses expériences.

a) On obtient une bonne précision pour les essais 319 et 321 en prenant pour niveau limite de charriage le 9ème décile de la distribution cumulative des distances des creux de dunes au fond moyen ; cette valeur particulière (2 cm) donne une

épaisseur moyenne de charriage de 1,9 cm et $Q = 12,6$ l/h, soit 94 % du débit solide réel.

b) Les seuls profils de fond disponibles pour les essais antérieurs 400 et 422 avec traceurs luminescents ne permettaient pas un tel dépouillement statistique des calages des creux de dunes par rapport au fond moyen. Prenant alors pour niveau limite de charriage le niveau moyen des creux de macrodunes on obtient les résultats mentionnés au tableau III.

T A B L E A U III

Essai	e (avec creux moyen macrodunes) (cm)	$\frac{Q \text{ calculé}}{Q \text{ mesuré}} \times 100$ (%)
400-1	6,3	130
-2		85
422	3,2	38

Les causes d'erreur indiquées au paragraphe précédent restent valables et ne permettent pas de conclure en faveur d'une méthode particulière.

6 - 4 Par carottages (cf parag. 5-4)

Des carottages n'ont été effectués que pour les essais avec traceurs luminescents. Pour la série d'essais 319-321 avec traceurs radioactifs il était pratiquement impossible de prélever des échantillons de fond satisfaisants dans le matériau grossier utilisé sans, de plus, perturber l'écoulement en cours d'essai.

Ce processus de détection lent présente un certain intérêt pour des études systématiques en canal de laboratoire puisqu'il permet de suivre l'évolution du brassage du traceur dans la couche de charriage, en aval du profil d'injection, et de déterminer la longueur de bon mélange.

T A B L E A U IV

Essai	e (par carottages) (cm)	$\frac{Q}{Q} \frac{\text{calculé}}{\text{mesuré}} \times 100$ (%)
400 1	5,0	105
2	5,3	70
422	9,3	110
430	3,3	38

Cette autre méthode donne pour les essais 400 (Tableau IV) une épaisseur de charriage moindre que précédemment, mais sans doute plus exacte, si l'on admet comme plus vraisemblable la vitesse (28 cm/h) du lot de traceurs utilisé sur le tronçon aval du canal où il n'a pas été observé d'exhaussement des fonds.

L'épaisseur de charriage obtenue pour l'essai 422 est par contre plus importante que par les autres procédés et donne un débit solide juste.

La précision est médiocre pour le dernier essai n° 430 avec fond de rides.

VII - CONCLUSION -

Nombreuses sont les difficultés d'emploi de la méthode du centre de gravité pour calculer le débit solide d'un écoulement, en particulier pour déterminer l'épaisseur moyenne de la couche de sédiments charriés.

Carottages et relevés de fond sont possibles. Le premier procédé, peu commode, est pratiquement exclu sur les cours d'eau naturels. Le second n'apporte pas de solution immédiate au problème puisqu'il faut encore déterminer le niveau limite de charriage.

Si l'on retient seulement les derniers essais avec traceurs radioactifs, correspondant à un régime d'écoulement uniforme et permanent satisfaisant, l'épaisseur moyenne de transport calculée en prenant pour niveau de charriage le creux d'ondulation le plus profond rencontré donne un débit solide trop important; la précision est cependant acceptable eu égard aux autres méthodes de mesure du transport solide.

Pour fixer le choix du niveau de charriage à adopter il serait nécessaire d'effectuer des essais complémentaires de laboratoire en régime d'écoulement parfaitement uniforme et permanent.

Le régime de cours d'eau naturels n'est en général ni uniforme, ni permanent ; c'est à dire que par suite de changements locaux de la pente du lit ou des caractéristiques des ondulations une certaine quantité de traceurs peut se trouver définitivement enfouie. Il serait donc utile d'étudier également ces problèmes en canal de laboratoire.

NOTATIONS

C	Concentration en traceur dans la couche de charriage
e	épaisseur moyenne de la couche de charriage
h	hauteur d'ondulation
L	largeur de l'écoulement
M	masse de traceur injecté
Q	débit solide volumique
Q_s	débit solide massique
S	section de transport solide
t	variable temps
v	vitesse de déplacement d'une ondulation
V	vitesse du centre de gravité des traceurs
x	abscisse du centre de gravité des traceurs
() _m	valeur moyenne

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 M. CRICKMORE - G. LEAN. The measurement of sand transport by means of radioactive tracers. Proceedings of the Royal Society, March 1962.
- 2 M. CRICKMORE - G. LEAN. The measurement of sand transport by the time integration method with radioactive tracers. Proceedings of the Royal Society, October 1962.
- 3 G. LEAN - M. CRICKMORE. Methods for measuring sand transport using radioactive tracers. Symposium "Radioisotopes in Hydrology". International Atomic Energy Agency. 1963.
- 4 G. COURTOIS - J. DANION. Quelques récents aspects de l'emploi de traceurs radioactifs pour l'étude de la dynamique des sédiments en rivière et sur les côtes. Nouveautés Techniques Maritimes 1965. Journal de la Marine Marchande.
- 5 J. DANION. Etude du débit solide d'un écoulement par traceurs radioactifs. Note n° 3 (Charriage avec dunes, sans saltation)
- 6 D. HUBBELL - W. SAYRE. Sand transport studies with radioactive tracers. Proceedings of the Am. Soc. of Civ. Eng. HY 3 May 1964.
- 7 D. SIMONS - E. RICHARDSON. Forms of bed roughness in alluvial channels. Proceedings of the Am. Soc. of Civ. Eng. HY 3 May 1961.
- 8 J.L. CHAUVIN - J. DANION. Mesure du débit solide des cours d'eau par charriage au moyen de traceurs.
Rapport Euratom 1837 f. 1963