

Chapter 28

COMPARAISON ENTRE DES TURBIDITES MESUREES DANS UN ESTUAIRE DE DES TURBIDITES CALCULEES A PARTIR D'ESSAIS EN LABORATOIRE

André WALLET

Ingénieur au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique

Introduction

La recherche de meilleures conditions de navigation dans l'estuaire de la SEINE a donné naissance à un vaste programme de travaux, dont l'étude sur modèle réduit a été confiée au Laboratoire NEYRPIC par la Direction du Port de ROUEN.

Ce modèle réduit a nécessité l'emploi, pour la représentation du fond affouillable, d'un matériau approprié. Le choix de celui-ci a posé des problèmes délicats : il fallait en effet trouver un matériau tel que le processus de transport de ce matériau sur le modèle fût sensiblement le même que celui du sable dans la nature, et qu'en particulier les débits solides de ces deux matériaux pour des vitesses d'écoulement en similitude fussent eux-aussi comparables, à l'échelle de réduction près.

Il fallait donc en premier lieu, déterminer le débit solide du sable dans la nature. Malheureusement les mesures de transport de matériaux sur le fond sont pratiquement impossibles à effectuer, surtout en ce qui concerne les matériaux fins, ce qui est le cas de l'estuaire de la SEINE. La difficulté provient de ce que, si l'on essaie de faire reposer sur le fond un appareil quelconque, celui-ci est très rapidement enfoui et la mesure perd toute signification. Pour les matériaux en suspension, les prélèvements ne peuvent descendre en-dessous de 0,20 à 0,30 m du fond. On peut se demander ce qui se passe au-dessous de ce niveau.

C'est le rôle du Laboratoire d'Hydraulique d'étudier, dans la mesure du possible, les phénomènes dans cette zone, et plus particulièrement les questions suivantes :

Quel est le débit solide passant dans cette couche près du fond ? Pour quelles conditions hydrauliques le transport de sable devient-il appréciable et mesurable ? Quelle est la loi qui fixe le débit solide à partir des conditions hydrauliques ?

Nous nous sommes efforcés de répondre à ces différentes questions, grâce à des essais effectués dans un canal expérimental sur lequel nous donnerons plus loin des indications très succinctes.

Nous ne ferons pas ici le rappel des notions théoriques, que nous supposons connues. Notons seulement que suivant la théorie de SCHMIDT et ROUSE, la concentration en tout point d'une verticale est connue si la concentration en un point est connue pour une traction sur le fond donnée : c'est la concentration en un point situé au voisinage du fond que nous avons déterminé à l'aide d'essais en Laboratoire. En intégrant ensuite sur toute la verticale, le produit de la concentration par la vitesse, nous avons pu calculer pour les conditions hydrauliques de la nature le débit solide total sur cette verticale. Pour juger de la valeur de cette extrapolation, nous avons comparé les concentrations calculées avec celles que l'on peut mesurer directement dans la nature.

Avant de passer aux essais effectués en Laboratoire, nous dirons quelques mots des caractéristiques physiques du matériau.

Caractéristiques physiques du matériau étudié

Nous nous bornerons ici, pour fixer les idées, à indiquer les pourcentages suivants :

10 %	des grains ont un diamètre inférieur à 0,08 mm
50 %	- d° - 0,16 mm
90 %	- d° - 0,20 mm

Il s'agit donc d'un sable fin, d'ailleurs vaseux. Sa répartition granulométrique est très resserrée, ce qui indique que ce sable a dû être l'objet d'un triage, probablement sous l'effet de l'action périodique de la marée.

Si l'on considère le "diamètre effectif" défini par VANONI, c'est-à-dire le diamètre moyen dans le graphique de probabilité, on trouve une valeur de 0,15 mm, à laquelle correspond une vitesse de chute moyenne de 16 mm/sec.

Dispositifs expérimentaux

Les caractéristiques hydrauliques du matériau ont été étudiées au Laboratoire NEYRPIC dans un canal d'essais de 1 m de largeur et de 15 m de longueur environ (fig. 1).

Nous ne ferons pas ici la description de ce canal d'essais ; nous nous bornerons à donner de brèves indications sur les méthodes de mesures (fig. 2).

COMPARAISON ENTRE DES TURBIDITES MESUREES DANS UN ESTUAIRE DE DES TURBIDITES CALCULEES A PARTIR D'ESSAIS EN LABORATOIRE 397



Fig. 1. Canal expérimental pour les essais du sable de l'Estuaire de la Seine.



Fig. 2. Appareillage pour les mesures de vitesses et les prélèvements de matières en suspension dans le canal expérimental.

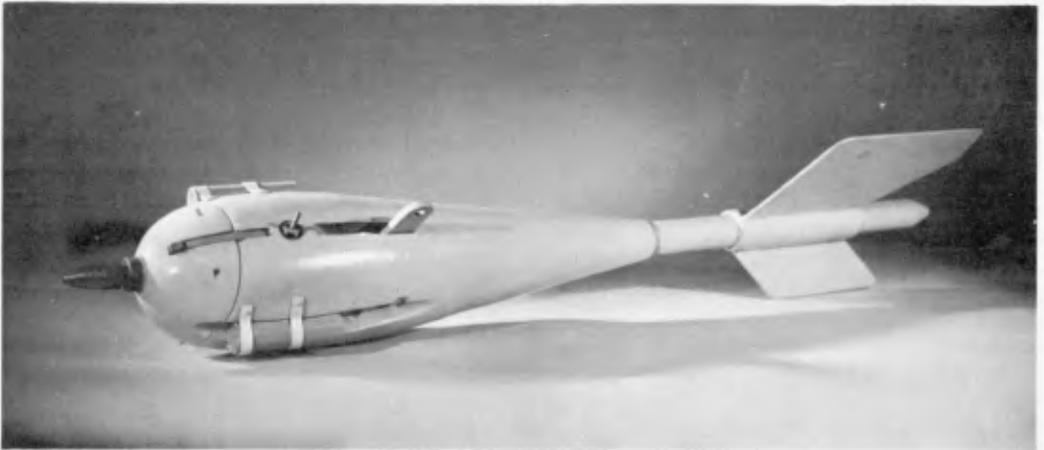


Fig. 3 - "Turbidisonde NEYRPIC" utilisée pour les prélèvements de matières en suspension dans l'estuaire de la SEINE

Les vitesses étaient mesurées grâce à trois moulinets DUMAS NEYRPIC disposés sur une même verticale, et à un tube de PITOT pour les vitesses au voisinage du fond.

Des prélèvements de matériaux étaient faits à l'aval du canal au moyen d'une sonde de fond de section rectangulaire, et de six sondes situées à différentes hauteurs pour les prélèvements en suspension. Le débit d'aspiration de chacune des sondes était réglé de manière que la vitesse d'aspiration fût égale à la vitesse de l'eau au niveau correspondant. Les matières prélevées en suspension étaient récupérées par filtrage, séchées et pesées. Quant au prélèvement de fond, il avait lieu de façon continue au cours de chaque essai, de façon à obtenir un débit solide moyen et à éliminer l'influence des fluctuations provoquées par le passage des dunes. Le volume total aspiré ainsi étant considérable, il convenait de séparer le sable de l'eau, et pour cela un décanteur à plaques (système breveté NEYRPIC) a été utilisé.

Résultats expérimentaux des essais de sable en canal

Pour déterminer la concentration C_0 près du fond, nous avons mesuré le débit solide p près du fond, que nous avons exprimé en fonction de la traction sur le fond. Cependant, pour tenir compte de la présence de rides, nous avons été amenés à remplacer, comme l'ont proposé plusieurs auteurs (MEYER-PETER, KALINSKE), la traction réelle par une traction réduite. La pente I est alors remplacée par une pente réduite I_r :

$$I_r = I \left(\frac{n_0}{n} \right)^m$$

n_0 étant le coefficient de rugosité du fond sans ride, n le coefficient de rugosité réel du fond. Pour déterminer l'exposant m , nous avons cherché la corrélation entre le débit solide p et la traction réduite $\gamma H I_r$, en donnant successivement à m diverses valeurs. On obtient le meilleur groupement des points pour la valeur $m = 2$, qui a en conséquence été adoptée. Dans ces conditions la force de traction réduite devient :

$$\gamma H I_r = \gamma \frac{U^2}{H^{1/3}} n_0^2$$

Le coefficient n_0 étant une constante, le transport doit être lié à $\frac{U^2}{H^{1/3}}$, ou à $\frac{U}{H^{1/6}}$. Il en est de même de la concentration C_0 , pour

laquelle nous avons obtenu l'expression :

$$C_0 = 0,0134 \frac{U^2}{H^{1/3}} \left(\frac{U}{H^{1/6}} - 0,40 \right)$$

C_0 = concentration volumétrique, U = vitesse en m/s, H = profondeur d'eau en m.

COMPARAISON ENTRE DES TURBIDITES MESUREES DANS UN ESTUAIRE DE DES TURBIDITES CALCULEES A PARTIR D'ESSAIS EN LABORATOIRE 399

voyons maintenant dans quelles conditions ces résultats trouvés en Laboratoire peuvent être utilisés dans la nature.

Transposition pour les conditions naturelles des résultats trouvés en laboratoire

Les résultats expérimentaux obtenus en Laboratoire dans le cas d'un écoulement pratiquement uniforme doivent être transposés avec de grandes précautions aux conditions naturelles, où les phénomènes sont complexes. Parmi les facteurs qui peuvent exercer une influence sur le transport, signalons :

- *la marée*, exprimée quantitativement par son coefficient. C'est nettement le facteur prédominant dans l'estuaire de la SEINE ;
- *la houle*, qui intervient à la fois par sa direction de propagation, sa période et son amplitude ;
- *le débit propre de la SEINE*, dont l'influence est limitée à la partie amont de l'estuaire ;
- *la salinité*, qui provoque une variation du poids spécifique de l'eau sur une verticale, donc une déformation de la répartition des vitesses suivant cette verticale ;
- *la présence de courants secondaires*, induits par le modelé du fond ou par les ouvrages (digues ou épis) ;
- *la nature du fond* au point considéré : le fond peut être plus ou moins chargé de vase, plus ou moins cohérent ;
- *la présence presque constante d'un régime transitoire* caractérisé par l'allure plus ou moins sinusoïdale de la courbe du courant en un point en fonction du temps, d'où peuvent résulter un certain retard à la mise en suspension ou à la décantation ; citons également la turbulence accrue au moment d'une inversion rapide des vitesses.

Il est évidemment difficile de trouver une loi générale reliant la turbidité à tous ces facteurs. Une certaine schématisation s'impose si l'on veut pouvoir exprimer dans la nature de façon quantitative les résultats expérimentaux indiqués plus haut. Le calcul que nous avons fait nous donne la concentration à un niveau déterminé en fonction de la vitesse du courant de marée, considérée provisoirement comme seul paramètre. La comparaison avec les données naturelles nous permettra d'apprécier dans quelle mesure cette approximation est justifiée, et nous permettra de mettre en évidence l'effet d'autres paramètres, tels que la présence d'un régime transitoire.

Avant de passer à la comparaison entre les turbidités calculées et les turbidités naturelles, nous examinerons succinctement la manière dont celles-ci ont été mesurées.

Mesures de turbidités dans la nature

Les mesures de turbidités dans l'estuaire de la SEINE sont effectuées par le Service de Recherches Hydrographiques de la Direction du Port de ROUEN. On trouvera des renseignements sur les activités de ce Service dans un article de M. BANAT, Ingénieur des Ponts et Chaussées, publié dans la revue "Travaux" (Avril 1954, p. 278).

Les appareils utilisés pour la plupart de ces mesures de turbidités sont de deux types :

- la turbidisonde NEYRPIG (fig. 3), appareil où l'on assure dans le tube de prise une vitesse d'écoulement égale à la vitesse du courant autour de l'appareil ;

- le BINKLEY silt-sampler, appareil formé d'un tuyau de 10 cm de diamètre ouvert aux deux extrémités et suspendu dans l'axe du courant ; à un moment donné, on obture brusquement les deux extrémités de ce tube par torsion de parties en caoutchouc.

Nous passerons maintenant à la comparaison entre valeurs calculées et mesurées.

Comparaison entre les concentrations calculées et celles mesurées dans la nature

Nous avons fait cette comparaison grâce à une méthode approchée permettant de placer tous les résultats de mesures faites dans la nature sur un même diagramme, ce qui est beaucoup plus intéressant pour l'interprétation des résultats qu'une simple comparaison, dans chaque cas particulier, des valeurs mesurées et calculées.

Les mesures de concentrations dans la nature correspondent à des profondeurs d'eau différentes et à des niveaux de prélèvement différents. Nous avons comparé toutes ces mesures à une courbe calculée unique, exprimant, pour une profondeur d'eau donnée et un niveau de prélèvement constant, la concentration en fonction de la vitesse moyenne du courant.

Nous avons d'abord remplacé la concentration mesurée par une valeur réduite :

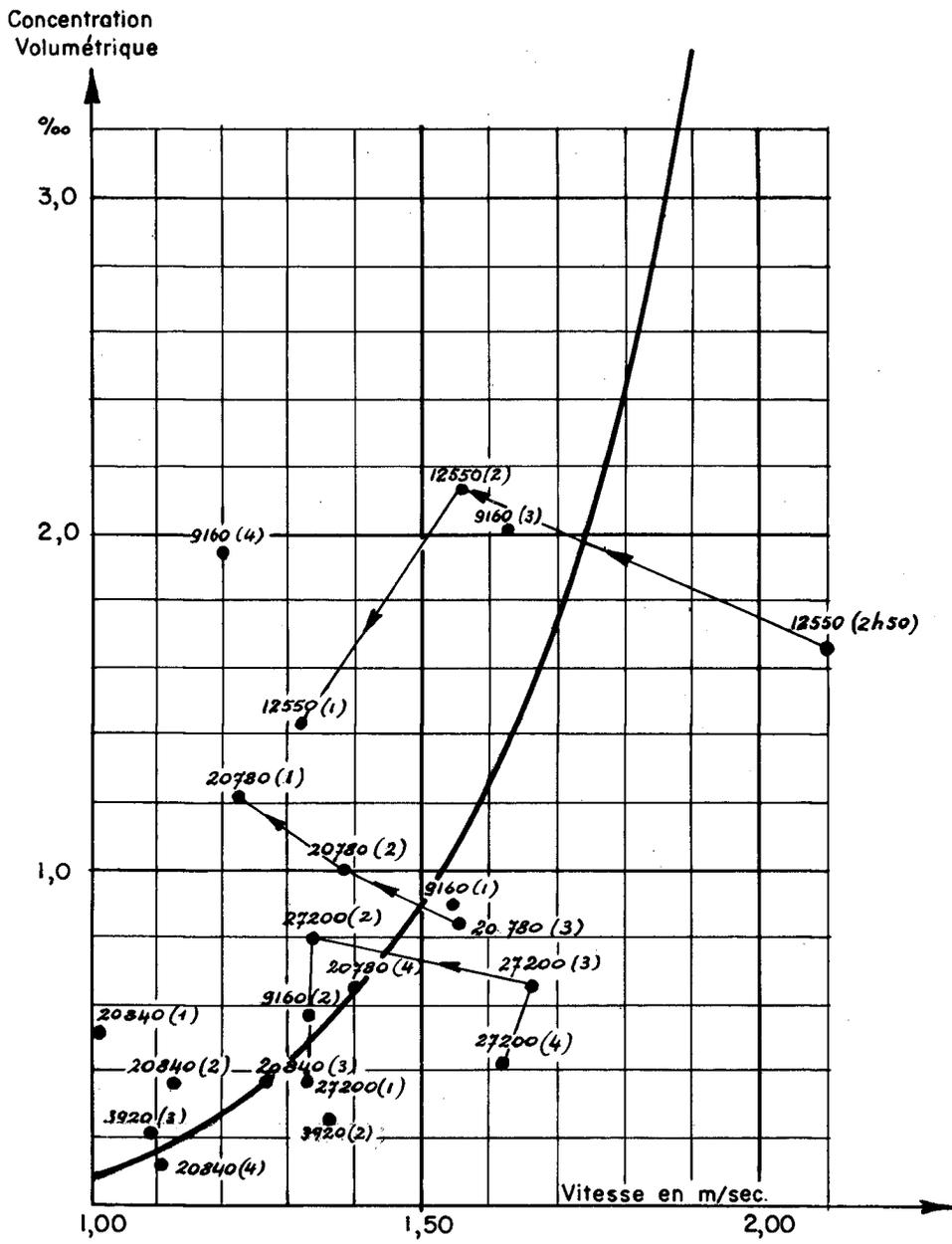
$$C_r = \frac{C_m}{\alpha}$$

$$\text{avec } \alpha = \frac{C_y}{C_{y_0}}$$

C_m = valeur mesurée

C_y = valeur calculée du niveau de mesure y

COMPARAISON ENTRE DES TURBIDITES MESUREES DANS UN ESTUAIRE DE DES TURBIDITES CALCULEES A PARTIR D'ESSAIS EN LABORATOIRE 401



12550(2) signifie : prélèvement au point d'abscisse 12550 à 2 H avant la Basse Mer.

Fig. 4 - Comparaison entre la concentration théorique calculée et celle mesurée dans la nature

C_{y_0} = valeur calculée au niveau fixe y_0 , pour lequel la courbe est tracée

Pour tenir compte maintenant de ce que la profondeur H lors de la mesure n'était pas celle H_0 pour laquelle la courbe a été calculée, nous avons remplacé la valeur C_r par une autre valeur réduite :

$$C'_r = \frac{C_r}{\beta}$$

avec

$$\beta = \left(\frac{H_0}{H}\right)^m$$

ceci supposant que la concentration peut être mise sous forme monôme avec l'exposant m .

Au total, une valeur mesurée étant C_m , la valeur réduite $C'_r = \frac{C_m}{\alpha\beta}$ peut être comparée au point correspondant de la courbe calculée. Cette réduction permet de mettre tous les résultats de mesures sur un même graphique (fig. 4).

On remarque d'abord une grande dispersion des points résultant des mesures par rapport à la courbe calculée : ceci était à prévoir d'après ce que nous avons indiqué plus haut sur le nombre de facteurs en jeu. Cependant, il convient de remarquer que la courbe calculée passe très sensiblement au milieu du nuage de points de mesures.

Par ailleurs, les points comme par exemple 9160 (4^H) montrent nettement la présence de la vase, qui apparaît par ailleurs d'après les analyses granulométriques qui ont été faites pour ce point.

Le cas du régime transitoire (la courbe calculée étant valable seulement pour un régime uniforme) est caractérisé par une sorte d'inertie, qui paraît être assez générale : pour que le matériau en suspension soit en équilibre avec le fond dans des conditions hydrauliques données, il lui faut un certain temps. Par exemple au point 12550 (2^H 50), pour une vitesse de 2,10 m/sec., on est nettement au-dessous de la courbe. A 2^H AV, la vitesse ayant diminué, on se trouve au-dessus de la courbe, les matériaux n'ayant pas eu le temps de décanter. On peut dire en quelque sorte que le domaine situé à droite de la courbe correspond à un écoulement "sous saturé" et que celui situé à gauche de la courbe correspond à un écoulement "sursaturé". Des analyses granulométriques ont été faites sur les matériaux prélevés dans ces deux cas particuliers ; elles ont montré une proportion de sable de l'ordre de 70 à 75 %, alors qu'elle est de 90 % pour le lit sauf en des points très particuliers (lentilles vaseuses). Entre ces deux points de mesures (en deça et au-delà de l'équilibre) se trouve le point de la courbe calculée, malgré cette présence plus grande de vase : il conviendrait donc, pour obtenir une courbe plus vraisemblable relative au sable seul (ou du moins à un matériau, analogue à celui du fond, contenant 90% de sable) d'opérer une correction à la courbe de la figure 4. La nécessité de cette correction paraît assez explicable. En effet, la présence de la vase empêche la réversibilité du phénomène : lorsque la vitesse aug-

COMPARAISON ENTRE DES TURBIDITES MESUREES DANS UN ESTUAIRE DE DES TURBIDITES CALCULEES A PARTIR D'ESSAIS EN LABORATOIRE 403

ment, la vase gêne la mise en suspension ; lorsque la vitesse diminue, le phénomène de décantation est moins gêné par la présence de la vase. C'est pourquoi l'on peut dire que, en moyenne, le débit solide du sable, qui constitue en majeure partie le lit, est moindre que celui donné par le calcul. Rappelons d'ailleurs que c'est seulement le débit solide du sable qui nous intéresse, la vase n'entrant que pour une faible part dans les mouvements de fonds qui déterminent les variations du chenal de navigation.

RESUME

COMPARISON BETWEEN TURBIDITY MEASURED IN AN ESTUARY
AND TURBIDITY CALCULATED FROM LABORATORY TESTS

A. Wallet

The study of navigation conditions in the Seine estuary has led to scale model tests which are now being carried out by the NEYRPIC Laboratory, Grenoble; for the Port of Rouen Authority.

In order to calibrate the model correctly, that is to say to ensure that the natural conditions would be reproduced on the model, it was necessary to carry out laboratory studies on the sand from the estuary bed to determine the solid discharge of this material for definite hydraulic conditions.

This was necessary because, while at some distance above the bed direct measurements of the solid transport are relatively easy to make in nature by means of samples, they are practically impossible in the immediate neighbourhood of the bottom when the sand is fine, as is the case in the Seine estuary.

On the other hand, by taking certain precautions it is possible to measure the solid discharge in the immediate neighbourhood of the bottom when the transport of sand is studied in the laboratory. The two methods, direct measurements of the suspended load in nature and measurements of solid discharge near the bottom in the laboratory therefore complement one another.

However, it seemed interesting to justify this method by comparing the results where nature and the laboratory coincide, i.e. for material in suspension.

This paper gives details on the procedure followed for these laboratory tests on an experimental canal. The main results of these tests will be reviewed by examining the relationship between the concentration in the neighbourhood of the bottom and the solid discharge on the one hand, and the bottom shear stress on the other.

In order to be able to make the above mentioned comparison, it was deemed interesting not to compare for each particular case the turbidity measured in nature with that calculated from the canal tests, but to make an overall comparison by plotting all the results from nature on a single graph. This can be done by a method which will be described. The comparison of these results with the curve obtained from the canal tests is then possible and it shows that this calculated curve passes between the points measured in nature, and therefore that the two series of results are completely compatible. In addition, the comparison allows some light to be shown on certain aspects of entrainment of material in the transitory regime, by demonstrating the delay with which both entrainment and deposition of the load occur. Finally, an interpretation of the results obtained will be given, taking into account the presence of mud in the material comprising the estuary bed.