Étude comparative du taux d'envasement dans différentes zones de l'estuaire de la Loire

par Cl. Migniot

Ingénieur en Chef du Département de Sédimentologie
du Laboratoire Central d'Hydraulique
de France

Le taux d'envasement d'une darse, d'une souille ou d'un poste à flot est extrêmement variable d'un point à un autre du globe et l'on peut constater, pour des turbidités des eaux assez voisines, des valeurs de la sédimentation très différentes suivant l'implantation des ouvrages et les profondeurs du plan d'eau portuaire.

Ces différences peuvent s'expliquer dans la plupart des cas par le processus même de l'envasement, les sédiments très fins pouvant être apportés, soit en suspension sous le jeu de la marée ou des courants de remplissage, soit par les courants de turbidité qui se propagent sur les fonds, ou par l'écoulement de la « crème de vase » que l'on peut observer dans certains points des estuaires, soit, plus simplement, par glissement des vases le long des talus qui bordent un point bas et accumulation des matériaux dans les zones plus profondes.

Atteignant 0,30 m par an environ à l'intérieur du port de La Rochelle, le taux d'envasement dépasse 2,50 m par an dans la darse bananière de Conakry par suite d'un mouvement tourbillonnaire à son entrée qui augmente les volumes d'eau qui pénètrent dans la darse. Dans la baie de Bombetoka, à Madagascar, l'envasement dépasse 40 millions de m³ par an, la fosse centrale s'exhaussant de près de 1 m par an tandis que la fosse de mouillage, située devant le port Schneider, conserve et conservera encore pendant plusieurs années une profondeur d'une dizaine de mètres ; dans la même période, les dépôts à l'intérieur du port variaient entre 0,50 m et 0,25 m/an, le taux de sédimentation diminuant en fonction de l'exhaussement des fonds.

A l'embouchure de l'Orne, les dépôts de vase dans le chenal d'accès sont assez limités mais dépassent par contre 100 000 m³ par an pour une surface de 70 000 m² dans l'avant-port (1,4 m/an). Dans la darse de Larache, au Maroc, les apports sont du même ordre de grandeur (100 à 150 000 m³ par an) mais se localisant en grande partie dans la souille draguée devant les quais nécessitant des dragages

quasi-permanents. A Dieppe, le taux de sédimentation peut atteindre 0,20 m par mois, les apports annuels variant entre 250 000 et 350 000 m³ ; dans le bassin de l'Adon, au port de Saint-Gilles-Croix-de-Vie par contre, le taux d'envasement ne dépasse pas 0,30 m par an. Dans l'estuaire de la Loire, le taux mensuel des dépôts peut varier entre 1,50 m par mois à moins de 0,10 m...

Ces valeurs extrêmes de la sédimentation nous ont conduits à effectuer une étude en nature des risques d'envasement d'un secteur particulier, en l'occurrence l'estuaire de la Loire, en examinant, au cours d'une même période, l'évolution des fonds dans des zones très voisines, séparées de quelques kilomètres seulement, mais soumises à des actions hydrodynamiques très différentes. Les résultats obtenus permettront de fixer les ordres de grandeur des phénomènes et d'utiliser les enseignements du passé pour prévoir les risques d'envasement d'un site portuaire établi à l'intérieur de l'estuaire.

Sept zones situées dans des secteurs voisins où peuvent se déposer les sédiments fins ont été choisies (fig. 1) :

1. Entre l'entrée sud du port de Saint-Nazaire et l'anse du Brivet, il s'agit d'une zone balayée par les courants mais avec diminution des actions hydrodynamiques depuis les rectifications de la rive droite.
2. Devant la forme Joubert et l'entrée est de Saint-Nazaire, où les fonds sont dragués à — 7 ou — 8 m dans une zone où les profondeurs initiales étaient à — 3 m et s'ouvraient sur des fonds à — 10 m.
3. A l'intérieur de la forme Joubert, au cours d'une réparation, la porte aval de la forme n'étant pas fermée ; les profondeurs initiales étaient plus importantes à l'intérieur de la forme qu'à l'extérieur.
4. Dans la souille du *France*, draguée immédiatement en aval de la cale n° 1 dans l'anse de Penhoet, il s'agit d'un véritable trou dans des fonds de 0 à — 3 m.

1/ Zone des études.

5. Dans l'avant-port de Saint-Nazaire (entrée sud), qui s'ouvre sur les profondeurs plus grandes du chenal.
6. Devant la forme A, où l'on retrouve un chenal dragué dans une vasière.
7. Enfin, dans les souilles de Donges.

Précisons que, dans le chenal proprement dit, les dépôts de sédiments fins sont faibles, les courants étant assez violents pour remettre en suspension les apports d'éléments fins qui peuvent se produire à certaines périodes de l'année, et ceci bien que l'on ait approfondi le chenal d'une façon assez importante.

Après avoir rappelé quelques généralités sur l'estuaire de la Loire et donné un aperçu des propriétés physiques des sédiments fins que l'on peut y rencontrer, nous indiquerons des ordres de grandeurs de l'envasement observé dans ces différents sites en essayant de rattacher les envasements aux conditions hydrauliques locales.

Généralités sur l'estuaire de la Loire

Comme tous les estuaires, celui de la Loire est soumis à des mouvements sédimentaires importants dans lesquels le transports en suspension des particules fines n'est pas négligeable.

Les très nombreuses études faites par M. L. Berthois depuis une vingtaine d'années, auxquelles il faut associer celles des Ingénieurs des Ponts et Chaussées du port de Nantes/Saint-Nazaire et, plus récemment, les recherches du Laboratoire Central d'Hydraulique de France (L.C.H.F.), permettent d'évaluer les apports de matières solides transportées en suspension par la Loire à 1 750 000 tonnes au cours des années très pluvieuses et 500 000 tonnes environ les années sèches. Comparativement, les apports de sable par charriage sur les fonds, en amont de Nantes, sont beau-

coup plus faibles et ne représentent que 30 % des apports en suspension, les valeurs étant comprises entre 500 000 m³ et 120 000 m³ par an.

Ces apports sédimentaires fluviaux sont donc relativement faibles eu égard aux apports d'eau qui atteignent, rappelons-le, 17 à 40 millions de m³ par an, le débit maximum des eaux étant de 6 000 m³/s, avec, chaque année, des débits dépassant 3 à 4 000 m³/s. On peut estimer qu'en moyenne la turbidité des eaux, à la limite du bief maritime, varie entre 10 et 50 mg par litre suivant l'importance du débit fluvial (fig. 2 A et 2 B).

Les éléments transportés en suspension par la Loire sont constitués par un mélange d'éléments pélitiques (vases, inférieurs à 40 microns), de silts et de sable, le pourcentage de ces deux derniers éléments pouvant atteindre 20 à 30 % des éléments en suspension.

Dans l'estuaire proprement dit, la turbidité des eaux est beaucoup plus importante que dans la zone fluviale, les sédiments fins venant former une « masse sédimentaire » disponible qui s'accumule dans des zones privilégiées et se déplace alternativement à chaque marée, avec une résultante vers l'amont si le débit fluvial est faible et vers l'aval si le débit est important.

Cette masse sédimentaire disponible, ou « bouchon vaseux », a des concentrations qui peuvent atteindre plusieurs dixièmes de grammes par litre en surface et de 100 à 150 g/l sur les fonds, où elle se présente sous forme de « crème de vase » qui s'étend sur 10 km. Cette crème de vase peut être remise partiellement en suspension pour des conditions hydrauliques particulières et, notamment, sous l'action des marées de vives eaux.

Au cours de son déplacement, elle favorise les atterrissements dans les souilles ou les darses, entraînant une sédimentation d'autant plus grande que les zones sont plus calmes et plus profondes. On peut admettre, en première approximation, que le déplacement du bouchon vaseux, avec sa crème de vase, nécessite plusieurs semaines entre l'amont et l'aval de l'estuaire.

2 A/ Apports solides en suspension par la Loire
(d'après L. Berthois).

2 B/ Transport des vases et des sables en suspension
au cours de l'année 1967.

D'une façon générale, à la fin des crues cette masse sédimentaire disponible se situe entre Donges et Saint-Nazaire, et une partie seulement peut être évacuée en mer au cours de très grandes crues. Lorsque le débit du fleuve diminue, l'action dynamique de la marée refoule les sédiments dans l'estuaire et les localise en amont de Paimbœuf. En période d'étiage et de grande marée, des dépôts pourront apparaître dans la région de Nantes, et ceci d'autant plus que la température des eaux sera plus élevée.

A ce mouvement longitudinal, le long de l'estuaire, peut se superposer un mouvement transversal, les sédiments fraîchement déposés sur les slikkes étant repris au cours du jusant pour venir se déverser dans le chenal. Cet apport de matériaux est d'autant plus important qu'il peut être accentué par l'influence des clapots à la laisse des eaux. En flot, au contraire, une partie des eaux turbides peut être refoulée du chenal vers les rives, entraînant des envaselements appréciables des zones abritées ou draguées.

Pour donner l'ordre de grandeur de l'importance des déplacements des sédiments en suspension dans l'estuaire, différentes mesures ont été faites par le L.C.H.F. On a pu constater que, dans la région située immédiatement en amont de Saint-Nazaire, une seule marée de vive eau peut déplacer au cours du flot ou du jusant plus de 100 000 tonnes de sédiment alors qu'en morte eau, le tonnage déplacé ne dépasserait pas 15 000 tonnes. Précisons que la loi de variation du volume d'eau oscillant V dans l'estuaire de la Loire, à laquelle les mouvements sédimentaires restent plus ou moins rattachés, suivent une loi exponentielle comme dans l'estuaire de la Gironde (fig. 3).

Loire :

$$V_x = V_0 e^{-0,065 x}$$

$$\text{ou } \log V_x = \log V_0 - 0,028 x$$

Gironde :

$$V_x = V_0 e^{-0,031 x}$$

$$\text{ou } \log V_x = \log V_0 - 0,0135 x$$

3/ Variation du volume d'eau oscillant
dans l'estuaire de la Loire.

4/ Diamètres des particules élémentaires de la vase de la Loire.

6/ Vitesse critique de frottement nécessaire pour éroder une vase de concentration donnée.

5/ Rigidité initiale τ_y en fonction de la concentration T_s .

V_0 étant le volume d'eau oscillant en mètres cubes à l'embouchure et V_x le volume d'eau oscillant à une distance de x km de l'embouchure.

Propriétés physiques des sédiments de Loire transportés en suspension

Les vases rencontrées dans l'estuaire de la Loire ont des diamètres moyens compris entre 1,5 et 3,1 microns et des teneurs en calcaire de l'ordre de 20 % ; elles contiennent en moyenne 2 à 2,5 % de matières organiques (fig. 4). En surface, ces vases peuvent avoir des concentrations très variables, s'échelonnant entre 200 et 350 g/l si elles sont pures et atteignant 450 g/l si elles sont mélangées à des éléments silteux ou sableux.

A l'état de particules élémentaires, la vitesse moyenne de sédimentation des vases de Loire atteint 0,01 mm/s et 0,4 mm/s à l'état de flocons, dans une eau dépassant 3 à 4 ‰ de salinité.

Décantées sur les fonds, ces mêmes vases atteindraient, après 1 à 2 mois, une concentration moyenne de 300 g/l à 350 g/l, sur une épaisseur de 1 m, avec un gradient de concentration entre la surface (80 g/l) et le fond (400 g/l). La concentration moyenne variera en fonction du logarithme du temps et la concentration en fonction de la profondeur suivra une loi de la forme :

$$T_H = 180 + 100 \log(H + 1)$$

T_H étant la concentration en g/l à la profondeur H en cm sous le niveau de la vase si le dépôt s'est effectué en partant

7 A/ Pourcentage de vase contenue dans les sédiments.

7 B/ Répartition des diamètres moyens des sables.

d'une concentration initiale de 75 g/l et si la durée de tassement est de 3 mois.

Sur le plan rhéologique (fig. 5), la rigidité initiale ou la cohésion de la vase de Loire varient très rapidement en fonction de la concentration des dépôts suivant une expression de la forme :

$$\text{Rigidité initiale } \mathfrak{T}_y = 10^{-11} T_s^{4,7}$$

$\mathfrak{T}_y$ étant exprimé en N/m² et T_s en g/l.

En eau douce, la rigidité initiale de cette vase serait à concentration égale, quatre fois plus faible qu'en eau de mer. Ces vases déposées pourront tenir en équilibre pour des pentes du talus atteignant :

$$\begin{aligned} \text{tg } \alpha &= 0,02 \quad \mathfrak{T}_y \text{ (en N/m}^2\text{) pour des vases immergées ;} \\ \text{tg } \alpha &= 0,0075 \quad \mathfrak{T}_y \text{ (en N/m}^2\text{) pour des vases émergées.} \end{aligned}$$

Une vase de Loire déposée depuis quelques semaines seulement dans une souille et ayant une concentration de 300 g/l par exemple, ne pourra se maintenir qu'avec une pente de 7 % si elle est immergée et de 2 % hors d'eau ; à 250 g/l de concentration, cette même vase s'écoulera comme un fluide visqueux et tiendra avec des pentes de 20 % sous l'eau si elle a une concentration de 350 g/l.

Enfin, les études de la vitesse critique d'érosion, faites en canal, ont permis de montrer que la vase de Loire est érodée par un courant ayant une vitesse de frottement :

$$U_* \text{ (en m/s)} = 0,016 \mathfrak{T}_y^{1/2} \text{ (en N/m}^2\text{)}$$

A titre d'exemple, il faudra une vitesse moyenne de courant de 1,50 m/s pour provoquer un début d'érosion d'une vase de Loire ayant une concentration de 400 g/l; pour une

vase de 300 g/l, il ne faudrait qu'une vitesse moyenne de 0,5 m/s et 0,30 m/s pour une vase qui vient de se déposer (fig. 6).

Cette sensibilité de la vase de Loire à être érodée par les courants permet d'expliquer que, dans le chenal de navigation, soumis à des vitesses de 1 m/s, le pourcentage de vase est faible alors qu'il devient de plus en plus important au fur et à mesure que l'on se rapproche des zones tourbillonnaires ou de moindre courant.

C'est ainsi que, dans la région de Saint-Nazaire, on retrouve, dans le chenal proprement dit, des éléments ayant des diamètres de 0,30 à 1 mm avec un pourcentage de sédiments pélitiques inférieur à 5 % et que, plus on se rapproche de l'anse de Penhoet, on assiste à une augmentation progressive du pourcentage d'éléments fins tandis que la granulométrie des sables diminue (fig. 7 A-7 B). On peut dire que, pratiquement, les éléments pélitiques sont exclus dès que le diamètre des éléments sableux dépasse 0,30 mm et que le pourcentage d'éléments fins augmente proportionnellement au fur et à mesure que le diamètre des sables diminue.

Étude du taux d'envasement de différents sites de l'estuaire de la Loire

L'étude des phénomènes naturels et des propriétés physiques des vases, que nous venons de rappeler, a permis de préciser les causes susceptibles d'intervenir dans l'envasement des différents sites de l'estuaire de la Loire. L'examen détaillé des relevés mensuels ou annuels des profondeurs, réalisés par l'Administration, donnera l'ordre de grandeur et le rythme de cet envasement.

8/ Zone des études.

1. Zone située entre l'entrée sud du port de Saint-Nazaire et l'anse du Brivet

En 1925, on constatait dans ce secteur que les grandes profondeurs étaient situées au nord de la Basse-Nazaire et atteignaient 10 m au minimum avec, par endroits, des fonds de 25 m. Le taux de sédimentation était faible (fig. 8).

La réalisation d'ouvrages de guidage en amont, sur la rive droite, et des dragages, vont modifier considérablement la répartition des courants dans tout ce secteur entraînant un colmatage progressif des fonds situés au nord de la Basse-Nazaire, et un approfondissement au sud, dans le prolongement du chenal de concavité.

Entre 1957 et 1961, les fonds se sont sédimentés de 2 m en moyenne au nord de la Basse-Nazaire, et de 0,50 m dans l'anse de Penhoet. A cette époque, on peut estimer que, grâce aux courants qui passaient encore sur la rive droite, le taux annuel de sédimentation atteignait 0,50 m par des fonds de — 5 à — 10 m.

Ce rythme d'envasement va se maintenir entre 1957 et 1965 et s'accroîtra à partir de cette époque dans la partie aval du site où l'ancienne fosse de — 20 m va s'exhausser de 8 m entre 1961 et 1969, soit 1 m par an, et de 4 m entre janvier 1969 et octobre 1970, soit un taux annuel de sédimentation de 2 m, par suite vraisemblablement d'un glissement des vases du nord vers le sud, le long du talus qui raccorde le chenal aux hauts fonds de l'anse de Penhoet.

Cette sédimentation s'est produite bien que les vitesses de courant de flot atteignent, en vive eau, des valeurs de

/A

/B

9/ Variation des profondeurs minimales dans le chenal d'accès à la forme Joubert.

0,75 m/s. Elle ne se produisait pas lorsque le maximum de courant empruntait la fosse située au nord de Basse-Nazaire, avec des vitesses de 1 à 1,50 m/s.

2. Zone située devant la forme Joubert et l'entrée est de Saint-Nazaire

La forme Joubert et l'entrée est du port de Saint-Nazaire s'ouvrent sur une zone limitée de part et d'autre par des hauts-fonds à — 2 m ou — 3 m, descendant en pente douce vers le chenal navigable. L'accès à la forme Joubert est réalisé par un chenal artificiel dragué à — 7 m ou — 8 m, et s'ouvrant sur des fonds à — 10 m.

Dans cette zone, où les courants sont faibles : 0,25 m/s, et souvent tourbillonnaires, les fonds s'exhausseraient rapidement sous l'action, non seulement de la décantation des sédiments contenus dans les eaux, mais par les apports latéraux, les vases des talus venant glisser vers les plus grandes profondeurs (fig. 9).

Le taux annuel de sédimentation atteint 5 m par an. Le rythme des dépôts augmente avec la profondeur ; il est plus important immédiatement après dragage que lorsque les fonds se sont surélevés ; il semble également plus fort pendant les forts débits de la Loire qu'en été et en automne.

En suivant mois par mois la sédimentation dans cette zone, et en tenant compte des dragages intermédiaires, on constate que l'épaisseur mensuelle peut dépasser 1 m dans les mois les plus défavorables. D'une façon générale, la

sédimentation est rapide, au cours du premier mois qui suit les dragages, et atteint 1 à 1,20 m par mois, puis passe à 0,70 m, au cours du deuxième mois pour tomber à 0,40 m puis à 0,25 m par mois lorsque la cote du chenal tend vers des valeurs voisines de celles des berges. Pour maintenir des profondeurs moyennes à — 4,5 m ou — 5 m, il faut draguer en permanence 20 000 m³ de sédiment par mois sur une surface de 35 000 m².

Précisons que, devant l'entrée est de Saint-Nazaire, où l'on maintient des fonds à une cote légèrement plus faible que devant la forme Joubert, le taux de sédimentation est moins important et n'atteint que 0,30 m à 0,50 m par mois.

3. Intérieur de la forme Joubert

La forme Joubert se présente comme un bassin à la cote — 9,25 m, fermé sur ses côtés, et pouvant être mis en communication avec le chenal dragué à — 6 m par une porte écluse.

En temps ordinaire, cette forme est donc protégée contre les apports sédimentaires. La nécessité de réparer la porte écluse, entre mars et mai 1970, a transformé cette forme en une souille ouverte aux apports de la marée.

En 2,5 mois, les fonds se sont exhausés de 4,20 m, soit une sédimentation moyenne de 1,70 m par mois, constituée de vase molle ayant, en surface, une densité de 1,15 (concentration en matière sèche de 250 g/l) et atteignant, au fond, une densité de 1,20 à 1,25 (concentration 350 à 400 g/l).

Au total, en deux mois, 19 000 t de vase sèche se sont déposées dans cette forme. Une telle quantité de matériaux ne peut être expliquée par le seul jeu des sédiments transportés en suspension, et un calcul rapide montre que les apports, par ce processus, seraient environ dix fois plus faibles. Il faut donc admettre que la plus grosse partie des apports s'est effectuée au voisinage du fond, sous la forme de crème de vase ou de courant de turbidité.

4. Envasement de la souille du *France*

Afin de pouvoir faire sortir les navires construits par les Chantiers de l'Atlantique, de la cale n° 1, située au nord-est de la forme Joubert, une cuvette de lancement doit être draguée dans l'axe de la cale.

Dans cette zone, les courants de marée sont très faibles, les fonds avoisinants découvrant aux basses mers de grande marée, et les profondeurs supérieures à 7 m se situent à plus de 600 m au sud de la cale.

La souille du *France* a été draguée à — 10 m dans ces hauts fonds de l'anse de Penhoet, formant une cuvette propice à l'accumulation des vases par gravité, glissement et courant de turbidité. Les pentes de dragage étaient très fortes, atteignant 2 pour 1, entre les fonds de 0 m et 5 m, ce qui tend à prouver que les vases avaient une concentration de 500 g/l dans ce secteur et une rigidité appréciable. Le volume de cette souille atteignait 500 000 m³.

Draguée à — 10 m, en mai 1960, cette souille s'était pratiquement recomblée en mars 1961, l'épaisseur des dépôts atteignant 8 m en 10 mois. Les mesures faites *in situ* ont montré qu'il existait dans les dépôts un gradient de concentration, la densité des dépôts passant sur une épais-

seur de 2 m de 1,03 en surface à 1,15 ou 1,20 à 2,50 m de profondeur (concentration de 80 g/l à 300 g/l).

En prenant, comme limite du toit de vase, une concentration des dépôts superficiels de 250 g/l ($\rho_y = 1 \text{ N/m}^2$), on constate, qu'au cours des deux premiers mois d'été qui ont suivi le dragage, le taux de sédimentation atteint 1,30 m à 1,35 m par mois. Entre le deuxième et le cinquième mois, ce taux passe à 0,80 m et tombe à 0,45 m dans la phase finale du comblement (fig. 10).

DURÉE (en mois)	TAUX DE SÉDIMENTATION (en m/mois)
1 et 2	1,35
2 au 5	0,85
5 au 8	0,53
8 au 11	0,37

10/ Envasement de la souille du « France » (1960).

11/ Envasement de l'avant-port de Saint-Nazaire (répartition des dépôts dans l'axe).

Si l'on examine le volume d'eau oscillant qui est passé au-dessus de la souille, au cours de cette période, on remarque que près de 100 millions de m³ d'eau ont été renouvelés. Les dépôts (100 000 t) sont donc bien supérieurs à ceux qui peuvent provenir d'une simple décantation et, pour expliquer le taux d'envasement, il faut faire appel, soit à une remise en suspension des vases de Penhoet par les clapots, soit à des apports par coulées, glissements ou courants de turbidité.

5. Envasement de l'avant-port de Saint-Nazaire

L'entrée sud de l'avant-port de Saint-Nazaire est limitée par deux jetées convergentes qui protègent le plan d'eau contre l'agitation et les apports sédimentaires latéraux. Cette entrée, draguée à -6 m, s'ouvre directement sur le chenal à -10 m. Les dépôts, dans cette zone, sont dus, en majeure partie, à la décantation des particules en suspension dans les eaux qui pénètrent à chaque marée dans l'avant-port (fig. 11).

Au total, il s'est déposé 107 000 m³ de vase entre le 15 janvier et le 15 octobre 1965, c'est-à-dire pendant 9 mois, représentant un rythme moyen de la sédimentation annuelle de 3 m environ, soit 0,25 m par mois.

Ce rythme de sédimentation n'est d'ailleurs pas homogène ; il est supérieur, au cours des mois d'hiver, où il peut atteindre 0,50 à 0,75 m par mois, et tomber à 0,15 m par mois en été. On peut estimer que cette modification du

12/ Envasement des souilles de Donges.

COMPARAISON DES TAUX D'ENVASEMENT DANS DIFFERENTES SOUILLES		
CARACTERISTIQUES		TAUX D'ENVASEMENT
Pas de communication avec le large Apports latéraux Courants très faibles (Souille du FRANCE)	1,30 m par mois
Communication avec le large Apports latéraux Courants très faibles (Acces forme JOUBERT)	0,50 à 1 m par mois (influence des crues)
Pas d'apports latéraux Fonds plus profond que fonds avoisinants Courants très faibles (Interieur forme JOUBERT)	1,70 m par mois (vase molle à 250 g l)
Communication avec le large Pas d'apports latéraux Fonds plus hauts que fonds avoisinants Courants très faibles (Avant Port St Nazaire)	0,25 à 0,50 m par mois (influence des crues)
Faible différence de profondeurs Courants importants ($T_0 > 0,5 \text{ N/m}^2$) (Basse NAZAIRE - Aval fosses de DONGES)	0,05 à 0,25 m par mois

13/

taux d'envasement est liée à la présence du bouchon vaseux dans l'estuaire de la Loire.

6. Envasement devant la forme A

La forme A est située à l'est immédiatement de la forme Jean-Bart et s'ouvre directement à l'est sur l'anse du Brivet. L'équilibre des fonds se situe aux environs de la cote + 2 m, au-dessus du Zéro S.H., et il est nécessaire de draguer un chenal avant chaque sortie de bateau.

L'importance des dragages dans cette zone atteint 100 000 m³ et le chenal se recomble en trois mois. Le taux de sédimentation atteint 1 m par mois environ, les dépôts étant dus principalement aux apports latéraux provenant de l'anse du Brivet.

7. Envasement des souilles de Donges

Les souilles de Donges se répartissent dans des zones où les courants sont très variables, presque nuls à l'amont et très actifs à l'aval avec des vitesses supérieures à 1 m/s. Par ailleurs, les postes amont sont situés en bordure d'une vasière (fig. 12).

Dragués à — 10 m, ces souilles se maintiennent pratiquement sans dragage à leur partie aval, tandis que la partie amont est l'objet d'une sédimentation qui atteint ou même dépasse 1 à 1,50 m de vase molle par mois. Le taux d'envasement semble être en liaison avec la présence du bouchon vaseux et peut atteindre 3 m par mois en juin-juillet, à la saison des atterrissements maximaux.

Il apparaît que l'envasement dans les souilles amont est dû, en partie, à des reprises sur la vasière par les courants

de jusant qui viennent balayer celle-ci au perçant. Ces reprises sont augmentées en cas de clapot. Il n'en reste pas moins que les atterrissements les plus importants sont le fait de la stagnation du bouchon vaseux dans la zone Donges-Paimbœuf (juin à août); il se dépose alors 70 % du volume annuel.

Conclusions

Les écarts trouvés entre les différentes valeurs de l'envasement, dans des secteurs voisins de l'estuaire de la Loire montrent la sensibilité du phénomène et les précautions dont il faut s'entourer pour réduire au strict minimum les volumes des dragages d'entretien d'une souille (fig. 13).

Dans le cas le plus défavorable, correspondant à une souille profonde, réalisée dans une zone de hauts fonds, à proximité d'une vasière, et non drainée par les courants, le taux de sédimentation pourra dépasser 1,30 m par mois. Une telle souille sera comblée en moins d'un an, le rythme de sédimentation étant dégressif, au cours du temps, au fur et à mesure que la cote moyenne des fonds s'exhausse (cas de la souille du *France*).

Une souille draguée dans une zone de hauts fonds, non parcourue par des courants importants, mais s'ouvrant à l'une de ses extrémités sur un chenal profond, pourra être l'objet d'un envasement de 1 m par mois, au cours des périodes de crue de la Loire, et d'une sédimentation moyenne annuelle de 0,50 m par mois, les dépôts étant plus faibles en fin d'été et au début d'automne qu'en hiver et au printemps. De même, on constate que le rythme de sédimentation est d'autant plus rapide que la profondeur de la souille est plus grande par rapport à celle des fonds avoisinants (cas du chenal d'accès à la forme Joubert et à l'entrée est de Saint-Nazaire).

Si la souille est protégée latéralement et à l'une de ses extrémités par des parois étanches, mais si les profondeurs

initiales sont supérieures à celles des fonds avoisinants, on retrouve un taux de sédimentation très important pouvant atteindre 1,70 m par mois de vase molle (à 250 g de sédiments secs par litre), les apports s'effectuent principalement par coulées et courants de turbidité (cas de l'intérieur de la forme Joubert).

Par contre, si tout en assurant une protection latérale de la souille, elle s'ouvre sur une zone de plus grande profondeur, le rythme de la sédimentation moyenne annuelle tombe à 0,25 m par mois, avec un maximum en hiver et après dragage, où les dépôts peuvent atteindre un maximum de 0,50 m par mois (cas de l'avant-port sud de Saint-Nazaire).

Si la zone portuaire est parcourue par les courants, et ne présente pas de différence de cotes importante par rapport aux fonds des chenaux avoisinants, la sédimentation moyenne peut devenir faible et atteindre moins de 0,05 m par mois. Si la souille est, par contre, plus profonde que le chenal, le rythme de sédimentation dépassera 0,25 m par mois. Pour qu'un auto-dragage puisse être effectif, il faut que les forces tractrices sur les fonds dépassent $0,5 \text{ N/m}^2$ et les vitesses moyennes dans la couche profonde $0,55 \text{ m/s}$ (cas des fonds du chenal passant au nord de la Basse-Nazaire).

L'importance de l'action des courants sur l'autodragage des fonds, et de l'alimentation en sédiments par une vasière limitrophe de la souille, se retrouve tout le long de l'estuaire, où le rythme de la sédimentation mensuelle peut varier de 1 m à quelques centimètres, suivant les actions antagonistes rencontrées (cas des souilles de Donges).

Ces quelques valeurs du taux de sédimentation à l'intérieur d'un estuaire montrent toute l'importance du choix du site à retenir pour réaliser une souille ou une darse, et permettent de prévoir les dragages d'entretien qu'il sera nécessaire de réaliser, sans oublier pour autant la répercussion que peut avoir un tel aménagement sur le milieu environnant.

Discussion

Président : M. J. LARRAS

Il m'est très agréable de remercier M. MIGNIOT, dit M. le Président, car il nous a montré combien les taux d'envasement pouvaient varier d'un point à un autre et d'une période à l'autre. Il faut d'ailleurs observer que ce qu'on appelle le niveau supérieur de la vase est mal défini : l'est-il par le taux d'enfoncement d'un plateau, par la concentration en matières sèches par litre ?

Je voudrais souligner l'influence sur la vitesse d'érosion non seulement de la position du banc de vase considéré, mais aussi de son orientation par rapport à la direction du courant liquide. Considérons, par exemple, le cas d'un chenal dragué dans une baie entièrement vaseuse — cas extrêmement fréquent dans certains ports étrangers lointains —. Si le chenal est placé transversalement à des courants, mêmes faibles, il se remplira à une vitesse très grande ; s'il est placé longitudinalement, peut-être se remplira-t-il vite, mais le taux de remplissage sera très différent de celui réalisé dans le cas précédent.

Le grand intérêt de la communication de M. MIGNIOT est de nous avoir montré toutes ces différences et, par conséquent, de nous obliger à réfléchir à ce qui se passera quand il y aura envasement.

A l'heure actuelle, on n'a pas une connaissance assez profonde de ces phénomènes pour les reproduire sur modèle réduit, mais je crois que M. MIGNIOT serait le plus qualifié pour le faire, étant donné sa double compétence en matière de matériaux vaseux et de constructeur de modèles réduits.

Si certains d'entre vous, Messieurs, ont des questions à poser — et je l'espère — M. MIGNIOT y répondra directement.

M. BANAL apporte les observations ci-après :

J'ai le souvenir d'avoir fait, autrefois, des saignées dans l'estuaire de la Seine en dehors du courant ; un atterrissement s'y produisait à des vitesses tout à fait comparables à celles qu'indiquait M. MIGNIOT, c'est-à-dire plusieurs mètres par an, et, en tout cas, au début, de l'ordre du mètre par mois.

M. MIGNIOT enchaîne par la recommandation suivante :

Dans une zone de vase non soumise à des courants de balayage, il est vain de vouloir réaliser une darse, une souille, etc., dont la cote serait à une profondeur sensiblement plus grande que celle du chenal sur lequel elle débouche ; en effet, il suffira de quelques mois pour niveler les profondeurs et des dragages périodiques seront nécessaires.

Il a été question, dit M. LESPINE, de la vitesse de reprise des vases ; la détermination de cette vitesse suppose la connaissance de la cote du fond et de la répartition verticale des vitesses. En nature, il est très difficile de définir la cote du fond en période de dépôt de vase. Qu'admettez-vous pour cette cote de fond ?

En canal, au laboratoire, répond M. MIGNIOT, on mesure la vitesse de frottement à partir de la répartition des vitesses sur une verticale et on en déduit la valeur de U^* . En nature, il faudrait faire des mesures de vitesse sur des verticales assez près du fond. En admettant une répartition logarithmique des vitesses, on en déduira les U^* . Je sais bien que, dans un estuaire, il est très difficile de faire de telles mesures, sauf au fort du courant ; aux vitesses de reprises, la méthode est valable mais lorsqu'on se rapproche des étales, elle devient inapplicable.

M. MAQUET présente l'observation suivante à propos des souilles draguées en bordure d'un chenal, notamment lorsque le chenal dessert un port pétrolier à l'importation : Les navires montent avec l'onde marée et bénéficient donc de la hauteur de la pleine mer. Lorsqu'ils sont dans la souille, ils restent pendant au moins

une basse-mer par la force des choses, la cote de la souille doit être plus profonde que la cote du chenal et il y a donc un envasement préférentiel. Le seul moyen de l'atténuer est de faire des raccordements progressifs avec les fonds avoisinants.

On peut draguer ces souilles à une profondeur plus importante que celle du chenal, estime M. MIGNIOT, à condition de créer par les formes d'entrée de l'ouvrage — et dans chaque cas d'espèce — des courants balayant les vases en cours de sédimentation dans l'emprise de ce dernier.

La question soulevée va très loin, opine M. le Président, car ce que vous avez dit pour les vases est également vrai pour les sables ; les vitesses de remblaiement sont évidemment moindres, encore que, dans certaines régions, elles puissent atteindre 1 m le premier mois. Mais l'orientation des entrées par rapport aux courants est le problème essentiel pour les ports fluviaux : l'importance énorme de l'angle d'entrée, par rapport à l'axe du courant, fait de ce paramètre la donnée essentielle pour établir de tels ouvrages. Dans le delta du Mississippi, la première entrée réalisée, pour arriver au port de la Nouvelle-Orléans, n'a pu être maintenue jusqu'au jour où on l'a déviée d'une vingtaine de degrés. Un faible changement des formes suffit donc à modifier considérablement la quantité de matériaux qui se déposent.

C'est le point fondamental à retenir de l'exposé de M. MIGNIOT ; je le remercie encore en votre nom à tous et je donnerai la parole successivement à M. SALOMON et à M. MAUVAIS pour l'exposé de leur communication.