Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 100 (1974)
Heft: 2: SWISSBAU + HILSA, Zürich et Bâle, 29 janvier-3 février 1974

Artikel: Erosion des rives due aux oscillations du plan d'eau d'une retenue - Le Rhône à l'aval de Genève
Autor: Bruschin, Jacques / Dysli, Michel
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-72090

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Communication des Laboratoires d'hydraulique et de géotechnique de l'EPFL

Erosion des rives due aux oscillations du plan d'eau d'une retenue — Le Rhône à l'aval de Genève

par JACQUES BRUSCHIN et MICHEL DYSLI

1. Introduction

Le lit naturel d'un cours d'eau est le résultat d'un long processus géologique d'érosion et d'alluvionnement passant par des périodes de plus ou moins grande activité, ces dernières étant assimilables à un état d'équilibre naturel. Une perturbation des conditions « d'équilibre » déclenchera automatiquement une phase plus active.

Les constructeurs de canaux connaissent depuis tout temps ces phénomènes et s'en prémunissent par des renforcements des berges, des dragages réguliers et en limitant la vitesse de navigation des embarcations. En ce qui concerne les retenues artificielles, la prise de conscience de l'importance du phénomène de l'érosion des rives [1] par les ingénieurs est plus récente. Dans ces retenues, c'est le marnage, soit des oscillations lentes de grandes amplitudes dues à l'exploitation de la retenue qui est, dans la plupart des cas, préoccupant et il a malheureusement fallu des accidents coûteux pour que l'examen des conditions de stabilité des berges vis-à-vis du marnage soit systématiquement entrepris. Un des plus grands glissements de terrain connu, soit celui qui s'est produit en octobre 1963 sur la rive gauche de la retenue du Vaiont en Italie et qui déplaça quelques 300 millions de m^3 de roches et sols n'est-il pas dû à une certaine forme de marnage ?

D'autre part, à la surface d'un lac naturel ou d'une retenue, une modification du régime des vagues, notamment par un accroissement important de la navigation à moteur, peut aussi transformer une érosion des rives presque nulle en un régime transitoire beaucoup plus actif.

La première partie de cet article, soit les chapitres 2 et 3, est consacrée à l'analyse des oscillations du plan d'eau et la seconde, soit le chapitre 4, traite de l'action de ces oscillations sur les berges. Quoique cette étude soit confinée, surtout dans sa partie expérimentale, à la retenue de Verbois, les renseignements que l'on a pu en tirer vont bien au-delà de ce cas particulier et pourront être appliqués avec profit ailleurs.

2. Types et importance relative des oscillations

D'une manière générale, on peut distinguer deux types d'oscillations, différentes essentiellement par leur période :

— lentes, dont la période est de l'ordre de grandeur de l'heure ou plus grande, allant jusqu'à l'année, connues sous le nom de marnage ;

— rapides, ayant des périodes de l'ordre de la seconde allant jusqu'à la minute — les vagues et les ondes de translation.

Il est, toutefois, plus intéressant encore, tout au moins au point de vue de leur effet sur les rives, de classifier les oscillations selon leur origine. Ainsi :

— *le marnage* est une conséquence soit de l'exploitation normale de la retenue, soit de la pratique des chasses. Seules les oscillations ayant des amplitudes de l'ordre du mètre ou plus grandes et des périodes relativement courtes, d'une à plusieurs heures, viendront en considération pour la suite ;

— *les vagues de vent* dont les réflexions sur des rives parfois abruptes (clapotis) peuvent impressionner l'observateur ;

— *les vagues générées par la navigation* ou *le batillage*. Il s'agit du train de vagues accompagnant tout corps se déplaçant sur un plan d'eau et dont les caractéristiques dépendent essentiellement des formes et surtout de la vitesse de déplacement de celui-ci par rapport à l'eau. Ce type d'oscillation est le moins bien étudié et le plus difficile à saisir, même en ordre de grandeur, par le calcul. C'est la raison pour laquelle nous lui réservons une place importante dans ce qui suit ;

— *les ondes de translation* générées, sauf accident, par des manœuvres de vannes qui sont soumises à des consignes rigoureuses et, de ce fait, limitées en amplitude au point de les rendre le plus souvent négligeables.

L'importance relative de chaque type d'oscillation dépend, bien entendu, de circonstances particulières à chaque retenue dans la mesure où l'un ou l'autre, sinon tous les types, y sont présents. Si les amplitudes, les fréquences et les durées des phénomènes sont les paramètres généraux d'évaluation, une approche plus détaillée permet une estimation à la fois plus précise et plus directe, soit :

— *le marnage* n'a pas d'action mécanique directe significative sur les rives. C'est indirectement par la génération d'un gradient hydraulique qu'il agit. L'importance de ce dernier est déterminée par l'amplitude totale de l'oscillation et la vitesse verticale du plan d'eau.

A titre d'exemple, dans la retenue de Verbois, les amplitudes et les vitesses d'abaissement sont en chiffres ronds :

	H	V_{max}	$V_{max\ max}$
— en exploitation normale	150 cm	20 cm/h	25 cm/h
— en vidange (chasse)	3,5 à 20 m	50 cm/h	60 cm/h

[1] Le terme « érosion des rives » est pris, ci-après, dans son sens le plus large et comprend tous les phénomènes d'instabilité des sols et roches où sont impliquées des variations des niveaux d'eau.

C'est lors des chasses également que le courant regagne son pouvoir érosif et agit sur son lit comme une rivière en crue :

— *les vagues de vent* peuvent acquérir une certaine importance si l'emprise dans la direction des vents les plus forts est de l'ordre du km au moins et si les vitesses des vents soufflant pendant au moins une heure dépassent fréquemment 30 nœuds. Dans le cas contraire, les effets d'érosion sont le plus souvent négligeables à l'échelle de la vie humaine.

Pour mieux situer leur importance, nous utiliserons la formule proposée par H. T. Falvey pour calculer les amplitudes que l'on pourrait rencontrer

$$\overline{H}_{1/3} = 10^{-2} (0{,}4\ V_v^2 + 6{,}5\ V_v)\ L^{1/2} \qquad (2.1)$$

avec

$\overline{H}_{1/3}$ = moyenne des amplitudes du tiers supérieur de toutes les vagues observées classées selon leurs amplitudes, en cm

V_v = vitesse du vent mesurée à 10 m du plan d'eau en km/h

L = emprise du vent sur le plan d'eau (en anglais fetch) en km

Ainsi avec :

V_v = 50 km/h et L = 10 km

$\overline{H}_{1/3}$ = 40 cm après minimum 1 ½ h de tempête

et

V_v = 100 km/h et L = 10 km

$\overline{H}_{1/3}$ = 1,5 m après 1 h déjà

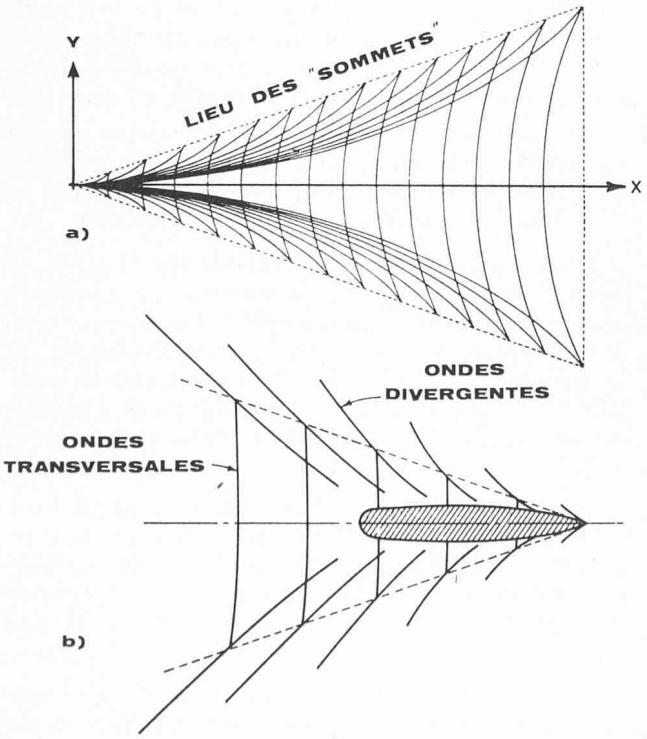

Fig. 1. — Ondes générées :
a) par une perturbation ponctuelle se déplaçant en eau profonde stagnante
b) idem, mais par un bateau

Les temps minima indiqués ci-dessus correspondent à un spectre des vagues complètement développé.

Dans le cas de Verbois, les couloirs orientés dans la direction du vent ne dépassent pas 1,5 km de longueur et les vagues observées restent inférieures à 30-40 cm.

— *le batillage*, comme les vagues de vent d'ailleurs, a une action mécanique plus directe sur les rives auxquelles il transmet une fraction importante et grandissante avec la vitesse des bateaux, de la puissance utilisée pour leur propulsion. Compte tenu de la dispersion de l'énergie dans le train de vagues, tout dépendra de la distance à la rive, de la fréquence des passages et de la vitesse des embarcations. La vague, quelle que soit son origine, agit sur la rive par une variation rapide des pressions hydrostatiques et, lorsqu'elle arrive obliquement à celle-ci, par l'induction d'un courant parallèle à la rive pouvant entraîner les grains dégagés par les chocs.

3. Le batillage dans la retenue de Verbois

Comme nous l'avons déjà dit, c'est l'étude de ce phénomène relativement complexe qui a exigé un effort particulier, en rapport d'ailleurs avec la place importante qu'il occupe ici parmi les sources d'érosion des rives. En effet, la navigation des convois barge-pousseur entre le quai de chargement des ordures à la Jonction et la station d'incinération des ordures des Cheneviers affecte la presque totalité des rives naturelles de la retenue.

3.1 *Analyse théorique*

Les développements et considérations théoriques de Froude, Rankine, Kelvin et Havelock ainsi que les essais, il est vrai encore peu nombreux, en laboratoire et « in situ » donnent des indications générales sur les caractéristiques du phénomène. Ainsi une perturbation se déplaçant sur un plan d'eau génère en eau profonde, un train de vagues — *fig. 1 et 2* — formant un groupe de triangles curvilignes dont le sommet commun est occupé par la perturbation et les deux autres, intersections d'ondes diver-

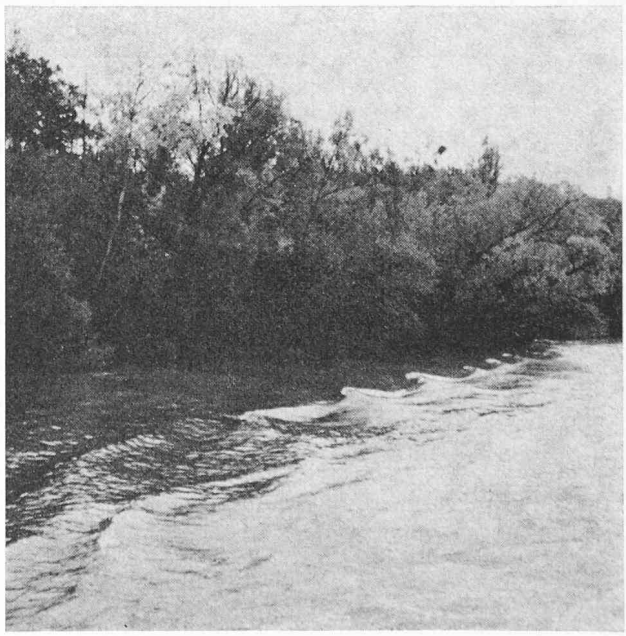

Fig. 2. — La ligne des « sommets » — points d'intersection des ondes divergentes et transversales.

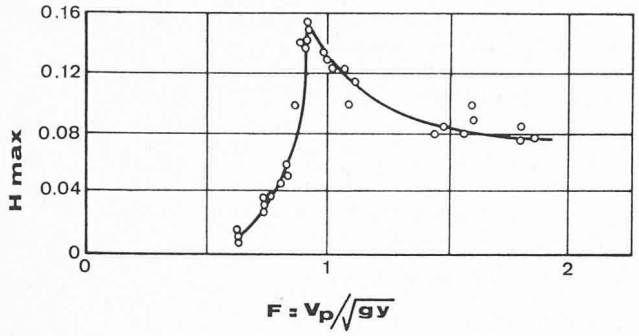

Fig. 3. — Amplitudes maxima en fonction du nombre de Froude : $H_{max} = f(F)$ — selon Johnson, 1968.

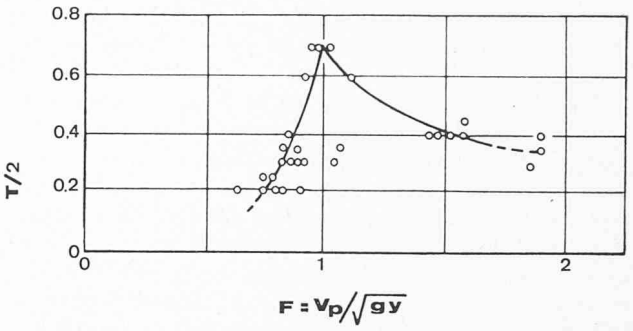

Fig. 4. — Demi-périodes en fonction du nombre de Froude: $T/2 = f(F)$ — selon Johnson, 1968.

gentes et transversales, alignés sur deux droites à environ 20° par rapport à l'axe de déplacement (en anglais « cusp locus lines ») sont les points d'amplitudes maxima. Le critère « d'eau profonde » est pour le problème plan :

$$F = \frac{c}{\sqrt{gy}} \quad < 0{,}57 \qquad (3.1)$$

F = nombre de Froude
c = célérité de propagation des ondes
y = profondeur de l'eau

En eau stagnante, la célérité des ondes transversales est égale, tout au moins dans l'axe de déplacement, à la vitesse « V_p » de la perturbation

$$c = V_p \qquad (3.2)$$

Lorsque $V_p > 0{,}57\sqrt{gy}$ les ondes « sentent le fond ». L'équation (3.2) n'est plus valable puisque « c » est limité par la présence des fonds — $c < \sqrt{gy}$ — alors que V_p peut croître indéfiniment. Le train d'ondes est alors modifié, l'angle de l'alignement des « sommets » croissant vers 90° lorsque $F \to 1$ (pour diminuer ensuite) ce qui a pour conséquence une « concentration » de l'énergie arrivant à la rive, effet qui s'ajoute à l'accroissement en valeur absolue de celle-ci dû à l'augmentation de la vitesse V_p. Parlant d'énergie, la théorie linéaire des houles en eau profonde conduit à la relation :

$$E_h = \frac{1}{8}\gamma H^2 L \sim c\, T H^2 \qquad (3.3)$$

par onde et m^1 de crête

avec γ = poids spécifique de l'eau
L = longueur d'onde
T = période des vagues

Par analogie, on pourra dire que l'énergie contenue dans chaque groupe de vagues généré par une perturbation est :

$$E_p \sim V_p\, T H^2 \qquad (3.4)$$

où T et H sont fonctions de V_p — *fig. 3 et 4* — H étant, par ailleurs, aussi fonction de la distance à la perturbation. L'intérêt de l'équation (3.4) est que V_p, T et H sont facilement mesurables.

Les indications ci-dessus, vérifiées d'ailleurs expérimentalement pour des formes de coques simples en eau stagnante, ne permettaient en aucun cas d'obtenir des renseignements même approximatifs sur l'importance du

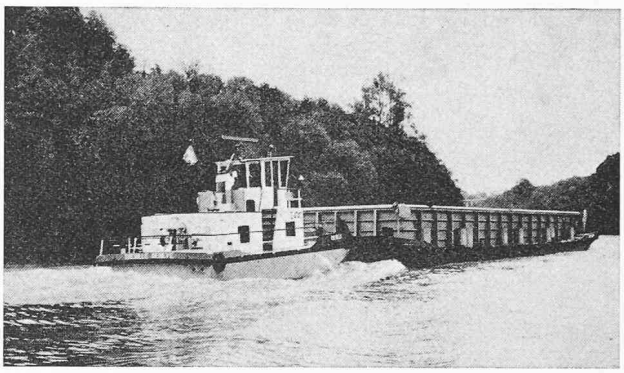

Fig. 5. — Vue du convoi barge-pousseur remontant le Rhône.

Fig. 6. — Vue d'un limnimètre à flotteur utilisé pour la mesure du batillage.

batillage dans la retenue de Verbois avec un convoi très particulier comme formes — *fig. 5* — et dans un courant. Le moyen le plus sûr pour résoudre le problème posé consistait à procéder à des mesures sur place.

3.2 *Etude expérimentale — essais et méthodes de mesure*

Comme nous l'avons déjà dit, il fallait mesurer V_p, T et H mais, pour pouvoir en tirer le meilleur parti, ces

mesures devaient être faites dans des conditions telles que la seule variable indépendante soit la vitesse des convois — V_p.

Après avoir choisi dans ce but un tronçon rectiligne de 1200 m, à profil en travers pratiquement invariable, situé immédiatement à l'aval du pont Butin nous avons fixé dans sa partie centrale, deux repères distants d'environ 500 m et implanté deux limnimètres à flotteur de construction spéciale — *fig. 6* — aux extrémités du tiers central de cet alignement. Ces limnimètres, testés préalablement en laboratoire, permettaient de suivre correctement l'évolution du niveau d'eau pour des oscillations supérieures à 5 cm et une période supérieure à environ une seconde. En filmant les flotteurs avec des caméras de précision nous pouvions obtenir simultanément les niveaux d'eau et une base de temps, soit H et T. Le convoi lancé à une vitesse déterminée effectuait chaque fois un aller-retour sur le tronçon de mesure en maintenant un régime des moteurs (nombre de tours) rigoureusement constant. Le temps de parcours entre les deux repères était chronométré depuis le pont ce qui permettait de déterminer la vitesse V_p du convoi par rapport à l'eau et par différence la vitesse d'écoulement du Rhône maintenue en l'occurence pratiquement constante par consigne spéciale.

Les caractéristiques du convoi sont les suivantes :

		Pousseur	Barge
Longueur hors tout	m	24,5	43,0
Largeur sur membreures	m	5,775	8,6
Hauteur latérale	m	1,925	1,2
Tirant d'eau	m	1,015	0,4 *
Déplacement	t	95,2	120 *
Puissance moteurs	CV	2×300	—

* barge vide — le double pour la barge à pleine charge.

Deux autres paramètres influençant les grandeurs mesurées et maintenus invariables ici sont :

— la distance relative perturbation-limnimètre

$$\frac{x}{L} = \frac{40{,}0}{67{,}5} = 0{,}6$$

avec x = distance normale limnimètre — ligne de navigation

L = longueur du convoi

— la profondeur relative

$$\frac{y}{TE} = 6{,}5 \text{ et } 16{,}5 \text{ (pousseur et barge)}$$

avec TE le tirant d'eau respectif et $y = 6{,}60$ m.

A titre d'exemple nous donnons à la *fig. 7* quelques enregistrements bruts tels que tirés des films.

3.3 *Etude expérimentale — analyse des résultats*

Les principaux résultats obtenus sont donnés à la *fig. 8* et au *tableau 1*. Nous avons retenu comme valeurs caractéristiques du train de vagues correspondant à chaque vitesse donnée du convoi l'amplitude H_{max} de la plus grande vague — valeur utilisée couramment dans la littérature — ainsi que la période moyenne du groupe de trois vagues successives comptées depuis la plus grande, ceci dans le but d'améliorer la précision des mesures portant sur des fractions de seconde.

Si ces résultats sont en parfait accord avec la théorie et les résultats expérimentaux déjà connus — H_{max} et T croissent avec V_p — il apparaît nettement que ces paramètres dépendent aussi de la vitesse absolue du convoi et non seulement de sa vitesse relative par rapport à l'eau.

TABLEAU 1

Essai N°	V_p km/h	$V_e = V_{Rhône}$ m/sec	$V_p \pm V_e$ km/h	Période T_{max} sec	Amplitude max H_{max} cm	ΔH ▼ — Δ cm	Nombre de Froude $F_r = \frac{V_p \pm V_e}{\sqrt{gy}}$
1	15,6	0,68	▼ 18,1	1,60	37	11	0,617
			Δ 13,2	1,25	26		< 0,57
2	14,7	0,69	▼ 16,8	0,90	27	3	0,585
			Δ 12,2	1,15	24		↑
3	13,5	0,66	▼ 15,9	0,85	25	4	
			Δ 11,1	1,05	21		
4	12,5	0,68	▼ 15,0	0,80	23	4	0,57
			Δ 10,0	0,95	19		V
5	11,3	0,68	▼ 13,7	0,75	11	1	
			Δ 8,8	0,90	10		
6	9,6	0,64	▼ 1,8	0,70	7	3	
			Δ 7,3	0,85	4		↓
7	15,8	0,68	▼ 18,2	1,25	42	20	0,62
			Δ 13,3	1,35	22		< 0,57

▼ Navigation dans le sens du courant

Δ sens contraire

On constate en effet que les amplitudes sont plus fortes et les périodes plus courtes lorsque le convoi descend le courant et que le contraire se produit lorsqu'il le remonte. L'explication de ce phénomène se trouve dans le fait que les deux trains d'ondes émis par toute perturbation en mouvement sur un plan d'eau ne se déplacent pas dans le même sens : les ondes latérales suivent la perturbation alors que les ondes transversales s'en éloignent. Cela fait qu'un courant aura pour effet de ralentir les unes tout en accélérant les autres et déplacera ainsi vers l'extérieur ou l'intérieur la ligne des sommets (H_{max}), ce qui, par ailleurs, modifie les longueurs d'ondes — voir fig. 1 a — et les périodes respectives mesurées à la rive.

En ce qui concerne les amplitudes, la théorie générale permet de prévoir qu'elles sont augmentées par un courant opposé à leur sens de propagation et vice-versa. Ce qui arrive dans le cas de deux trains de vagues se déplaçant chacun en sens opposé est cependant moins évident. Toutefois, si nous nous intéressons exclusivement aux « sommets » ceux-ci se déplacent contre le courant lorsque la perturbation se déplace dans le sens du courant et inversément dans le cas contraire, les angles de la ligne des sommets étant respectivement comme nous l'avons vu plus grand et plus petit que 19° 28′, angle théorique en eau stagnante lorsque $F < 0{,}57$. Pour évaluer en ordre de grandeur la différence d'amplitudes pouvant se produire entre les vagues correspondant aux deux sens de navigation du convoi nous partirons d'un modèle très simple : le courant opposé aux vagues agit par frottement visqueux comme un frein modifiant en conséquences les diagrammes instantanés des vitesses dans la vague tout comme la présence de fonds élevés — l'amplitude des vagues augmente ; le courant dans le sens des vagues accélère par contre les particules à la base de la vague et tend à l'étaler en diminuant son amplitude, le mécanisme du phénomène restant bien entendu le même que dans le premier cas. Le transfert d'énergie cinétique en énergie potentielle et vice-versa se produisant dans la vague ne peut pas dépasser la valeur $V_e^2/2$ g où V_e est la vitesse de l'écoulement. Avec la définition des angles donnée à la *fig. 9* le front des vagues fait l'angle $\gamma = 90° - (\beta - \alpha)$ avec le courant

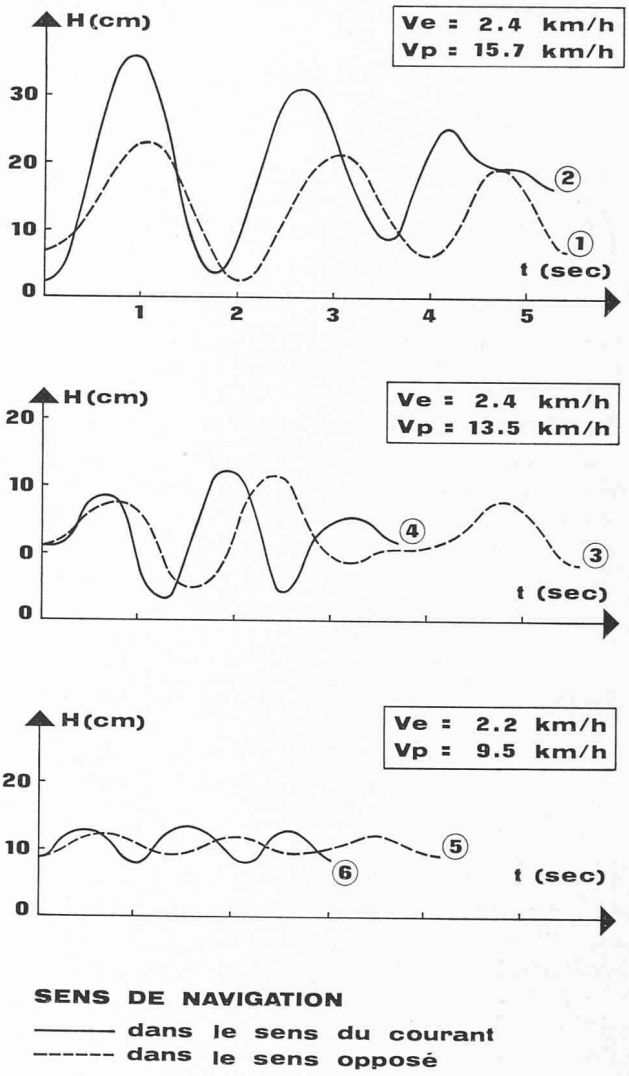

Fig. 7. — Oscillations enregistrées au voisinage de la rive lors des passages du convoi à différentes vitesses.

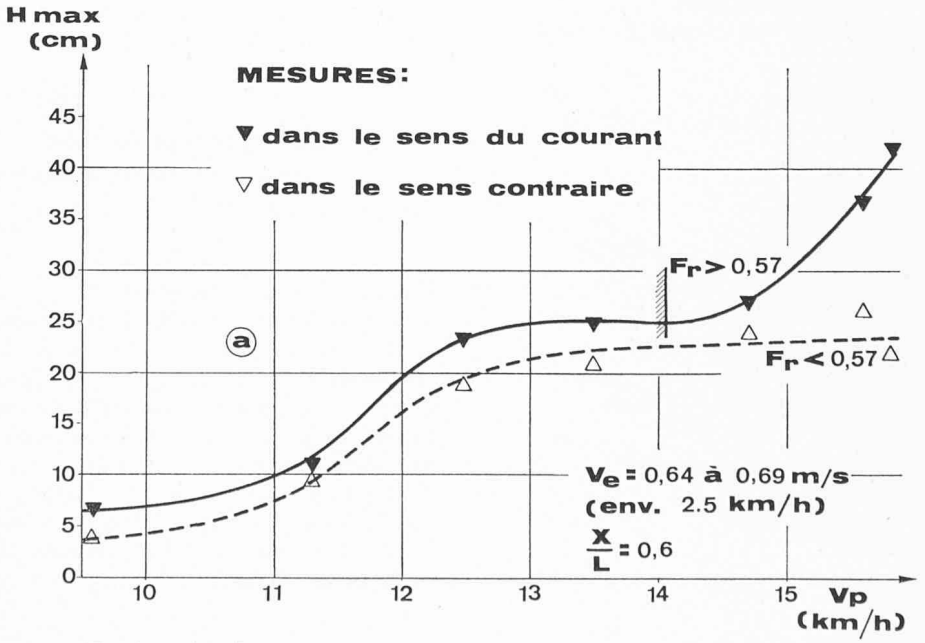

Fig. 8. — Amplitudes maxima en fonction de la vitesse de navigation du convoi barge-pousseur par rapport à l'eau : $H_{max} = f(V_p)$.

Si $\alpha \simeq 0$ alors $\gamma = (90° - \beta)$ et l'énergie cinétique transférée reste plus petite que

$$\frac{(V_e \sin \gamma)^2}{2\,g}$$

Cumulant pour les deux sens et avec $\beta \neq 19° 28'$ — augmenté et diminué respectivement de 5° et 10° — la différence ΔH d'amplitudes calculée est

$$3{,}9 < \Delta H < 4{,}1 \text{ cm}$$

alors que celle mesurée est comprise entre 1 et 4 cm — voir *tableau 1* — aussi longtemps que $F < 0{,}57$.

3.4 *Conclusions concernant le batillage*

En récapitulant ce qui précède nous pouvons dire que si l'énergie transmise aux vagues est déterminée par la vitesse du convoi par rapport à l'eau et le nombre de Froude correspondant

$$F_p = \frac{V_p}{\sqrt{gy}} \tag{3.5}$$

les conditions de son transfert à la rive sont régies par

$$F_r = \frac{V_p \pm V_e}{\sqrt{gy}} \tag{3.6}$$

comme le montrent les *figures 8* et *10*. Le courant produit à la rive une « concentration » ou une « dilution » de l'énergie contenue dans le train de vagues généré par le convoi ou toute autre embarcation, la concentration devenant très importante lorsque $0{,}57 < F_r < 1{,}0$.

Les vagues plus fortes et plus courtes sont sans doute plus dangereuses pour la rive. Ceci ne veut pas dire qu'il faut automatiquement réduire la vitesse de navigation dans le sens de courant lorsque la vitesse du courant croît : on peut au contraire l'augmenter jusqu'à obtenir $F_r \gg 1$. Si cela n'est pas possible il s'agit simplement d'être prudent à défaut de connaître les valeurs expérimentales des amplitudes et périodes en fonction de F_r que nous n'avons pu déterminer lors de cette série d'essais.

Les « règles » résultant de ce qui précède peuvent être formulées comme suit :

1) on peut naviguer plus vite par rapport à l'eau dans le sens contraire au courant que dans le sens du courant ;
2) on peut naviguer plus vite par rapport à l'eau en eau profonde ;
3) lorsque la vitesse du courant augmente toutes les autres conditions restant égales, il est plus prudent de réduire la vitesse de navigation dans le sens du courant, même si parfois il pourrait être plus avantageux de l'augmenter sensiblement. Il n'y a par contre aucune restriction pour le sens contraire.

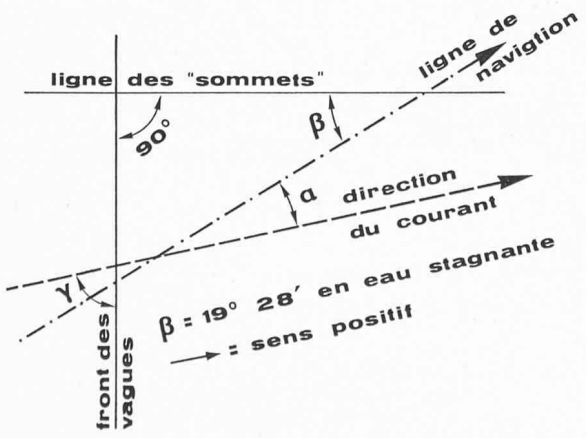

Fig. 9. — Définition des angles.

Ces règles pourraient bien entendu être raffinées par la continuation des études expérimentales jusqu'à l'établissement d'une consigne optimale. En attendant ce jour il est déjà possible d'en tirer le parti qui convient pour une meilleure exploitation du parc navigant et la protection des rives à Verbois comme ailleurs.

4. Effets des vagues et du marnage sur les berges

4.1 *Approche théorique*

Comment se comportera une berge soumise aux variations du niveau du plan d'eau d'une retenue, que sont les vagues et le marnage ? Autrement dit, comment l'énergie transportée par ces oscillations va être transformée au contact de la berge et quelles seront alors les conséquences de cette transformation ?

Rappelons tout d'abord que si l'épaisseur de la nappe varie peu, le mouvement de l'eau dans un sol est régi, en régime transitoire, par l'équation :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T_r}\frac{\partial h}{\partial t} \tag{4.1}$$

S = coefficient d'emmagasinement
T_r = transmisivité = $k \cdot e$ (cm²/s)
k = coefficient de perméabilité (cm/s)
e = épaisseur de la nappe (cm)
$h\,(x, y, t)$ = niveau dynamique de la nappe (dans ce cas par rapport au niveau moyen du plan d'eau de la retenue)

Le coefficient d'emmagasinement S est approximativement égal à la porosité efficace n_e dans un sol perméable — ceci en admettant que le sol et l'eau sont incompressibles — et dans un sol imperméable :

$$S = \gamma_w\,(m_v + n_e/E_w) \cdot e \tag{4.2}$$

γ_w = poids spécifique de l'eau
m_v = coefficient de compressibilité volumétrique du sol
E_w = module d'élasticité de l'eau.

Si n est la porosité totale $n_e = \alpha \cdot n$. Le facteur de réduction α est par exemple de 1,3 % pour un sol contenant 10 % d'argile (< 0,002 mm), 30 % de limon (0,002-0,06 mm) et 60 % de sable (0,06-2 mm) et de 82 % pour un sol contenant 15 % de sable, 75 % de gravier et 10 % de blocs (> 60 mm) [6]. La référence bibliographique [5] donne aussi quelques renseignements concernant les valeurs de α et n_e.

Dans le phénomène qui nous intéresse on peut admettre que le mouvement de l'eau est à 2 dimensions h et x, x étant l'abscisse horizontale mesurée depuis la berge en direction du terrain ; l'équation (4.1) devient alors :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{S}{T_r} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \tag{4.3}$$

Remarquons encore que dans le cas de terrains imperméables — sans eau gravifique — le terme S/T_r peut se devélopper ainsi en négligeant la compressibilité de l'eau

$$\frac{S}{T_r} = \gamma_w \cdot \frac{m_v}{k} \qquad (4.4)$$

et son inverse $k/\gamma_w \cdot m_v$ n'est autre que le coefficient de consolidation c_v, d'où

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{1}{c_v}\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (4.5)$$

qui est aussi l'équation de la consolidation.

Par simplification, nous utiliserons par la suite le terme c_v aussi bien pour un sol imperméable (nappe captive) que pour un sol perméable (nappe libre).

Dans le but d'une intégration pas trop laborieuse de l'équation 4.5, nous allons tout d'abord assimiler les variations du plan d'eau de la retenue à un mouvement sinusoïdal. Cette hypothèse est parfaitement valable pour les vagues, elle l'est beaucoup moins en ce qui concerne le marnage. Cependant, en général, la géométrie des terrains constituant une berge est complexe et leur transmissivité et leur coefficient d'emmagasinement sont mal connus ; c'est donc l'ordre de grandeur du phénomène qui nous intéresse et l'hypothèse de l'onde sinusoïdale est acceptable.

$$h = h_0 \sin \omega t \qquad (4.6)$$

ω = pulsation = $2\pi/T$

T = période (s)

En intégrant l'équation 4.5 avec cette condition aux limites, on détermine une relation permettant d'estimer la hauteur piézométrique h mesurée depuis le niveau moyen du plan d'eau, à une distance x de la berge ; côté terrain, on admet qu'il n'y a pas d'écoulement de la nappe vers ou de la retenue.

$$h = h_0 \cdot e^{-x\sqrt{\omega/(2 \cdot c_v)}} \cdot$$
$$\cdot \sin (\omega t - x \cdot \sqrt{\omega/(2 \cdot c_v)}) \qquad (4.7)$$

Le mouvement de l'eau dans le sol se propage donc horizontalement dans le terrain avec un amortissement (voir *fig. 11*) :

$$c = e^{-x\sqrt{\omega/(2 \cdot c_v)}} \qquad (4.8)$$

un déphasage

$$d = x \cdot \sqrt{1/(2\,\omega \cdot c_v)} \qquad (4.9)$$

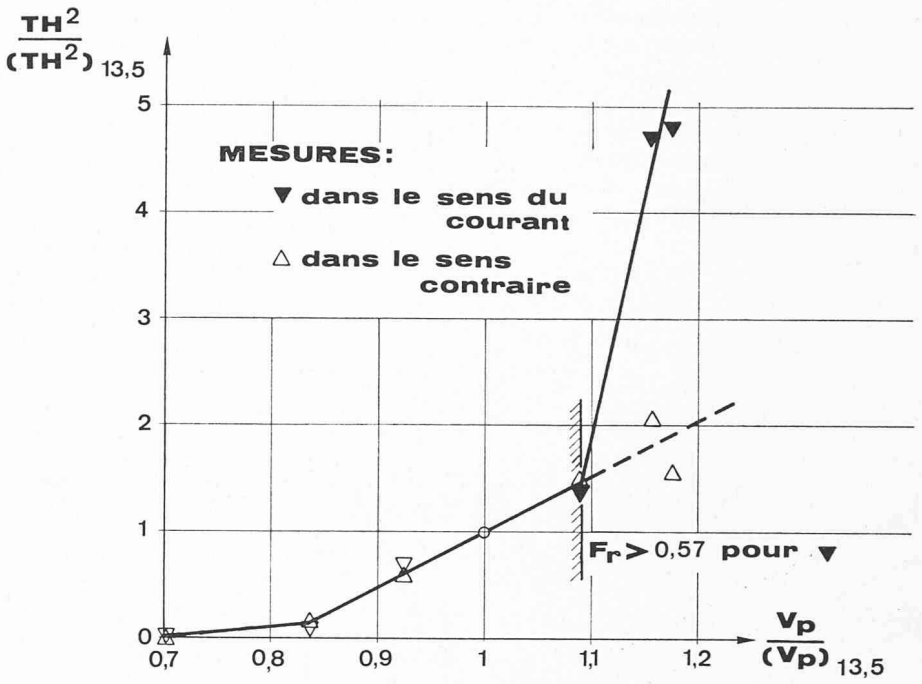

Fig. 10. — Variation de l'énergie transmise à la rive par unité de temps en fonction de la vitesse V_p du convoi par rapport à l'eau, en valeurs relatives.

et une vitesse

$$v = \sqrt{2 \cdot \omega \cdot c_v} \qquad (4.10)$$

On voit, qu'en mesurant in situ, le déphasage ou l'amortissement par comparaison entre les variations du plan d'eau de la retenue et celles du niveau piézométrique mesurées par une cellule de pression placée à une distance x de la berge, il est possible de calculer le terme $c_v = T_r/S$.

Nous avons représenté sur la figure 12 l'effet amortissant du terrain de la berge soumise à une oscillation sinusoïdale du plan d'eau, ceci pour différents coefficients c_v. En abscisse sont placées les distances mesurées depuis la berge

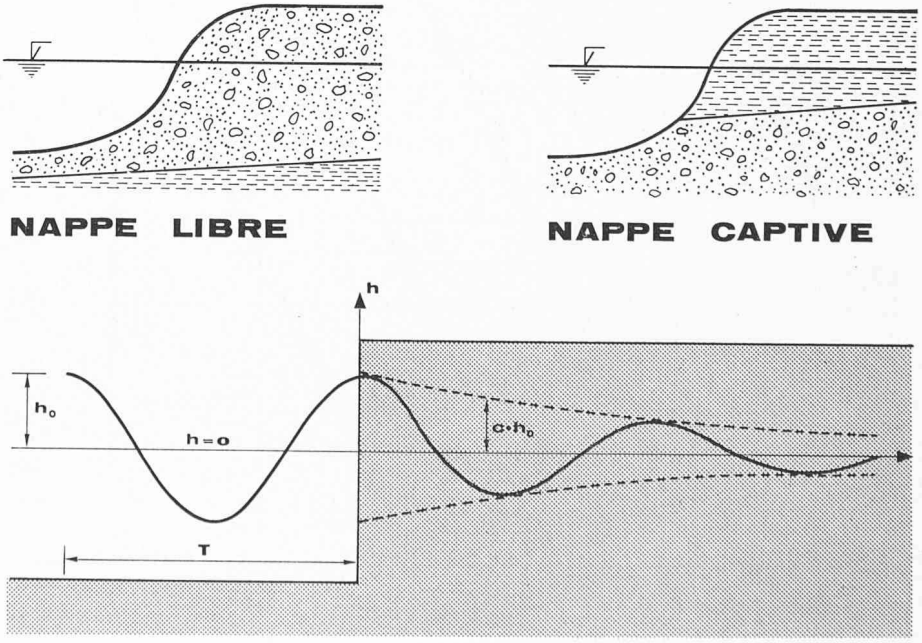

Fig. 11. — Définition des berges et des oscillations.

pour lesquelles l'amortissement est le dixième de la demi-amplitude h_0 (demi-creux) de la vague et en ordonnée figure la période T de l'oscillation.

Une autre condition aux limites est intéressante et permet l'intégration de l'équation 4.5, c'est la variation instantanée à l'instant t_0 du niveau h, de 0 à h_0 ; ceci toujours sans écoulement de la nappe vers ou de la retenue. Le niveau piézométrique à l'abscisse x et à l'instant t est alors donnée par la relation

$$h = h_0 \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_a^{\infty} e^{-c^2}\, dc \qquad (4.11)$$

avec

$$a = \frac{x}{2} \sqrt{1/(c_v \cdot t)}$$

L'intégrale de la formule se calcule sans difficulté au moyen d'une table ou d'un développement en série (fonction erreur de la statistique) et nous l'avons effectuée pour déterminer la distance de la berge où la hauteur piézométrique ne représente plus que le dixième de h_0, ceci en fonction du temps *(fig. 13)*.

Il est encore intéressant de remarquer que, si la nappe est captive à partir d'un certain niveau, la transmission

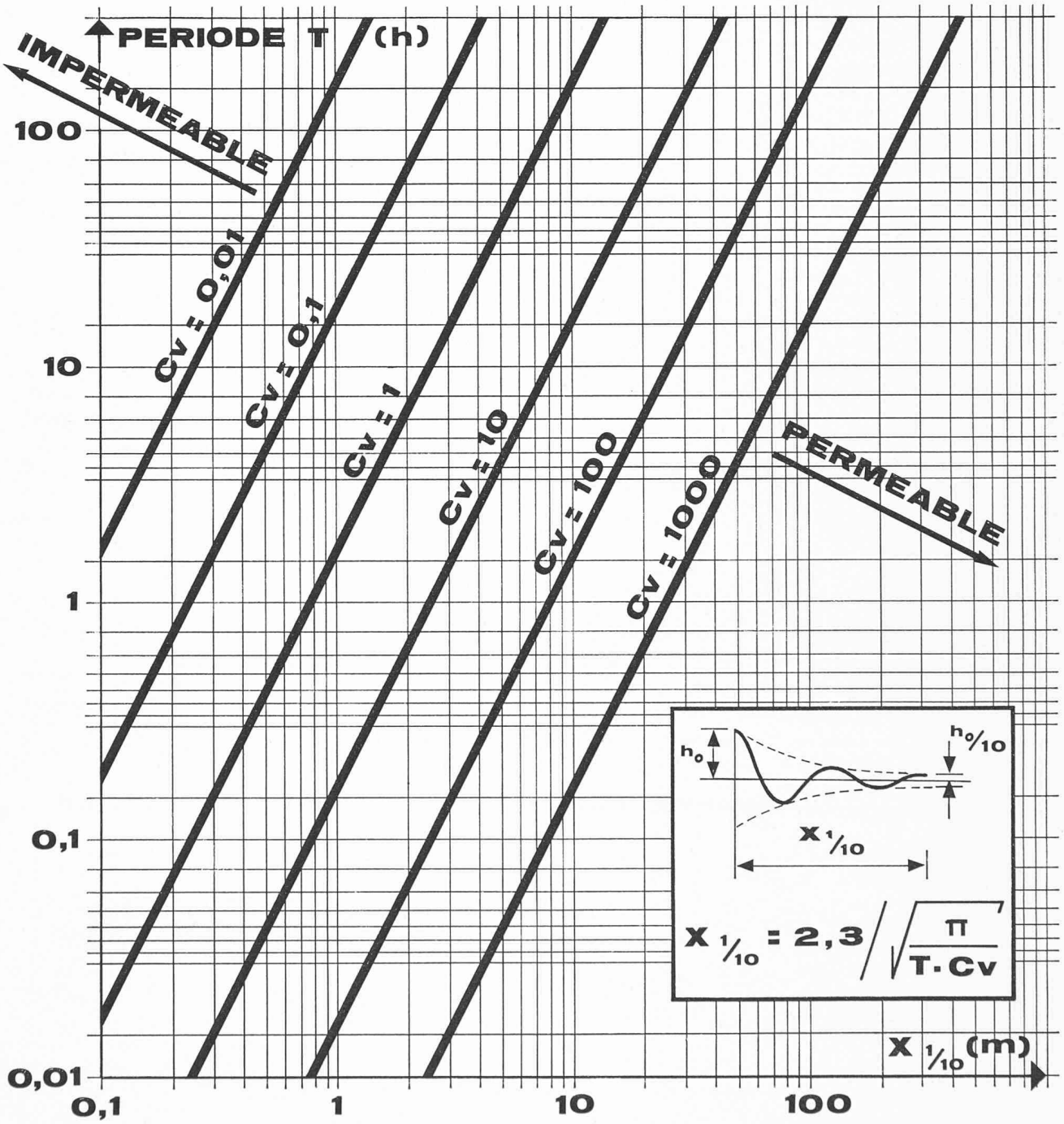

Fig. 12. — Oscillations sinusoïdales du plan d'eau — Distance mesurée depuis la berge $X_{1/10}$ où l'amortissement est égal au $^1/_{10}$ de l'amplitude h_0.

verticale des variations de pression interstitielle se fera avec un certain retard.

Nous nous sommes bornés à introduire ici ces diverses notions d'écoulement souterrain non permanent moins bien connues que les conditions d'équilibre d'un sol soumis à un gradient hydraulique qui ne sont pas traitées dans cette petite introduction théorique.

4.2 *Effets des vagues*

Nous entendons par vagues, comme dans les chapitres précédents, des oscillations du plan d'eau générées par le vent ou la navigation. Ces oscillations ont, dans le cas de la retenue de Verbois, des demi-amplitudes h_0 maximum d'environ 20 cm et une période variant de 0,5 à 1,6 sec. Les variations de pression à la rive sont transmises à l'eau interstitielle du terrain dans lequel elles se propagent et s'amortissent comme nous le verrons. Il y a, en outre, une transformation de l'énergie des vagues par modification de la direction des vecteurs vitesse au contact de la berge (effet de jet).

L'action de la vague est fonction de la topographie de la berge ; un même train de vagues aura une action beaucoup plus violente sur une falaise que sur une berge inclinée où une partie importante de l'énergie sera consommée en frottement. Cette action amortissante des berges en pentes douces (plage) sera discutée au paragraphe 4.4.

En prenant comme exemple la demi-amplitude maximum h_0 du batillage mesurée sur la retenue de Verbois (21 cm) et une période correspondante de 1,25 s, nous obtenons un amortissement d'un facteur 10 à la distance de la berge suivante :

$$X_{1/10} = -\frac{ln\,(1/10)}{\sqrt{\pi/(T \cdot c_v)}} = \frac{2{,}3}{\sqrt{\pi/(T \cdot c_v)}}$$

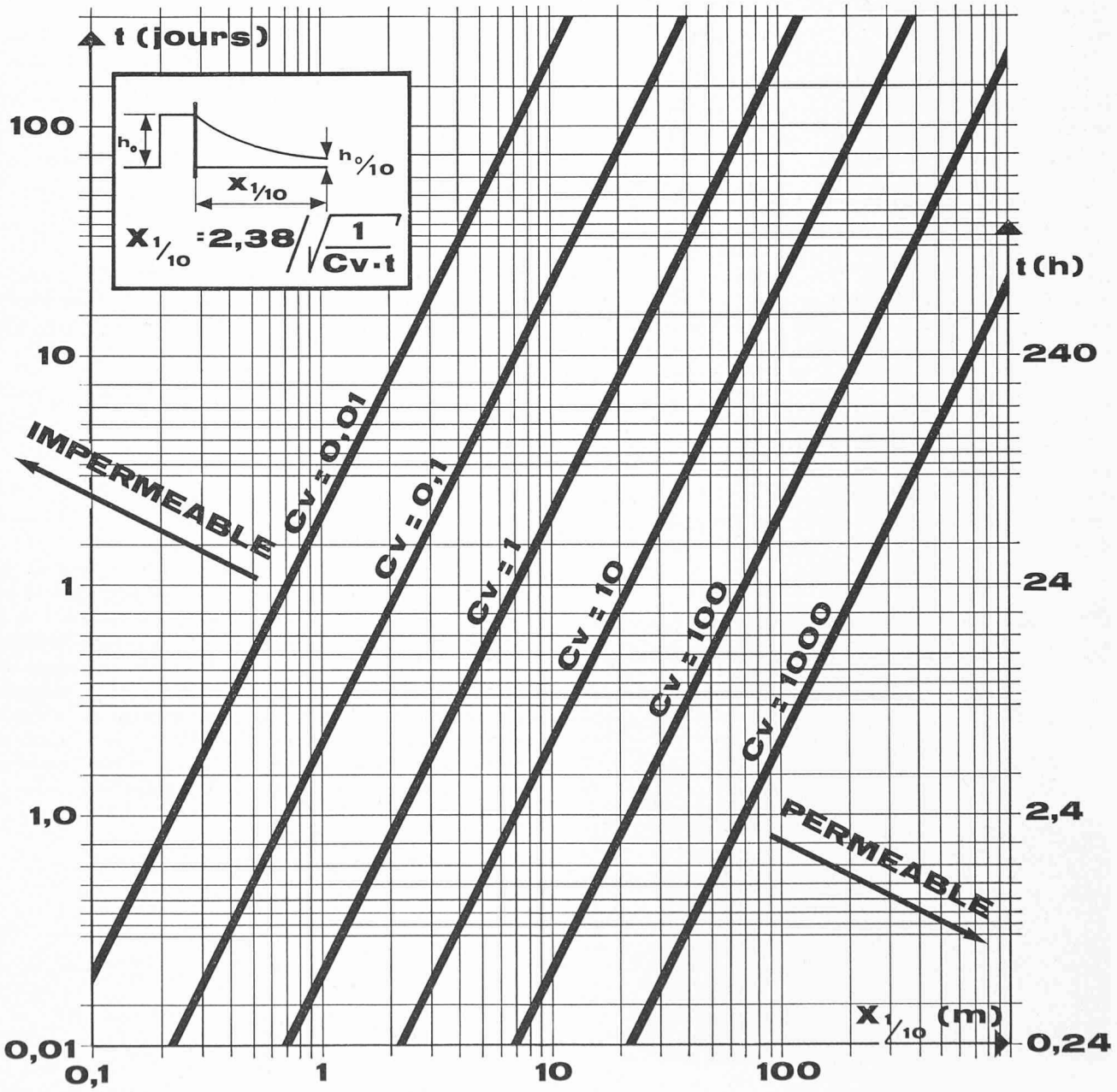

Fig. 13. — Variation brusque du plan d'eau. Distance mesurée depuis la berge où, à un temps donné t, le niveau piézométrique est égal $^1/_{10}$ de la variation h_0.

c_v {cm²/s}	0,01	0,1	1	10	100	1000
$X_{1/10}$ {cm}	0,15	0,46	1,45	4,59	14,5	45,85

Le tableau ci-dessus montre que l'amortissement de la variation de la pression interstitielle dans le terrain de la berge est *extrêmement* rapide pour des sols fins et *très* rapide pour des sols grossiers.

Le modèle mathématique représente bien le phénomène naturel ; dans les terrains à matrice fine (limon argileux, argile), l'action de la variation de pression se fait sentir sur une épaisseur représentant environ 10 fois le diamètre moyen des grains de la matrice et l'on observe, en effet, un délavage de surface très caractéristique. Cependant, de par la cohésion de ces terrains, le gradient hydraulique alternatif induit en surface peut amorcer des ruptures intéressant des volumes atteignant le m³ et nous avons pu observer que ces ruptures se manifestent avec un certain retard (quelques secondes) par rapport au passage du train d'ondes.

Dans les terrains à matrice plus grossière (sable et limon), l'action du gradient hydraulique alternatif se fera sentir un peu plus profondément dans le terrain et provoquera un délavage plus important que dans le cas des terrains à matrice fine et, par entraînement des graviers et blocs du squelette (s'il existe), des ruptures fragiles, quasi instantanées, intéressant des volumes de quelques dm³. Le long des berges de la retenue de Verbois, un terrain fréquemment rencontré illustre bien cette action sur des terrains à matrice pas trop fine, c'est la moraine würmienne caillouteuse profonde dénommée aussi alluvion ancienne, qui possède de nombreux niveaux indurés dont l'épaisseur varie de quelques centimètres à plusieurs mètres. Les petits éboulements décrits plus haut qui se produisent sur la hauteur de la vague créent petit à petit de véritables surplombs sous les niveaux indurés et lorsque l'équilibre de tels surplombs n'est plus assuré par la résistance au cisaillement du terrain, il se produit alors des ruptures fragiles intéressant des volumes de terrains pouvant dépasser 10 m³ (voir *fig. 14*).

Fig. 14. — Falaise en alluvion ancienne (GM, GP, GW induré par zones) érodée par le batillage de la retenue de Verbois. Photo prise pendant la vidange, la zone foncée est normalement sous l'eau.

4.3 *Effets de marnage*

Sur la retenue de Verbois, le marnage résulte de l'exploitation normale de la retenue et, tous les 3 ans, des vidanges de chasse. Nous rappelons qu'en exploitation normale, la variation entre le niveau minimum et le niveau maximum est de quelque 150 cm et qu'elle se déroule à une vitesse maximum de 25 cm/h. Quant à la vidange, elle abaisse le plan d'eau de 3 à 20 m à une vitesse maximum de 60 cm/h; sur la figure 15, on peut remarquer le limnigramme de la vidange de juin/juillet 1972 enregistré au Bois Carrien, soit à 9,5 km du barrage.

Pendant l'exploitation normale de la retenue, si l'on assimile l'abaissement de 1,5 m à la vitesse de 25 cm/h à une variation instantanée du plan d'eau, on peut déterminer au moyen du graphique de la figure 13, à quelle *distance x en m* de la berge la variation de la hauteur piézométrique ne sera plus que le dixième de la variation du plan d'eau (15 cm), et ceci pour différents c_v et durées pendant lesquels cet abaissement ou exhaussement persiste.

c_v {cm²s/} / Durée	0,01	0,1	1	10	100	1000
1 jour	0,7	2,2	7	22	70	220
1 mois	4	12	40	125	400	1250

Dans le cas de la vidange, si nous considérons un abaissement du plan d'eau de 7,5 m, une variation du niveau phréatique de 15 cm se fera encore sentir au bout de 3 jours à une distance, en mètres, de :

c_v {cm²/s} / Durée	0,01	0,1	1	10	100	1000
3 jours	1,5	4,5	14	45	144	450

Les mesures entreprises au Bois Carrien, lors de la vidange de 1972, ont montré, si l'on considère l'axe 19-17 (voir *fig. 15*) un abaissement maximum d'environ 1 m à 35 m de la berge qui s'est établi 3,5 jours après le début de la vidange et à 95 m un abaissement maximum de quelques 50 cm, 5 jours après le début de la vidange. Au piézomètre 18, placé à 30 ml de la berge, un abaissement maximum de 1,4 ml fut atteint 1,3 jours après le début de la vidange. On peut utiliser ces valeurs mesurées pour déterminer, au moyen de l'équation (4.11) les c_v du terrain à cet endroit :

	c_v {cm²/s}
berge - 17	50,2
berge - 18	61,7
berge - 19	18,5

Rappelons que $c_v = T_r/S = k \cdot e/S$ et pour un sol perméable $S \simeq n_e$ la porosité efficace. L'alluvion ancienne a une perméabilité k d'environ 10^{-1} cm/s et une porosité

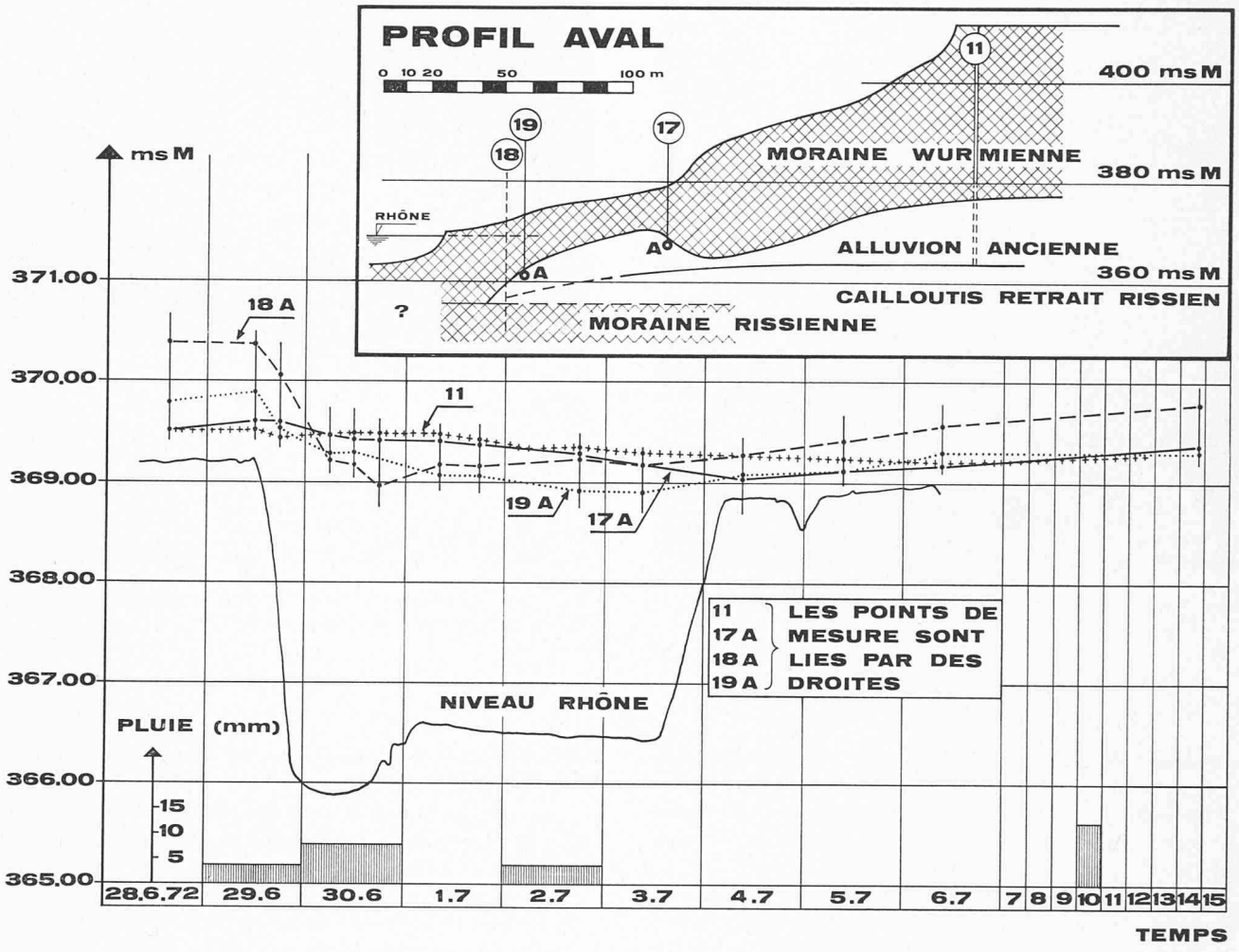

Fig. 15. — Vidange de Verbois 1972. Niveaux du Rhône et dans les cellules de pression au Bois Carrien.

efficace de quelques 10 %, en outre l'épaisseur de la nappe est, au Bois Carrien, d'environ 15 m. Calculée avec ces valeurs la transmisivité T_r est égale à 150 cm²/s ou 0,015 m²/s pour employer une unité plus parlante aux géologues et le coefficient c_v égal à 1500 cm²/s. La valeur de la transmisivité obtenue correspond assez bien à celle calculée par Amberger [7] lors d'un essai de pompage dans la région d'Aïre. Quant au coefficient c_v on voit qu'il est beaucoup plus élevé que celui calculé au Bois Carrien lors de la vidange de 1972. On peut en conclure que la lentille d'alluvion ancienne du profil aval (fig. 15) n'est, probablement, pas en contact direct avec la retenue ce que les sondages avaient laissé présumer.

Le piézomètre 11, constitué par un tube de 2″ perforé au contact de l'alluvion ancienne et foré à environ 220 m de la berge, a accusé une dénivellation de 26 cm avec un retard de 7 jours sur le début de la vidange. Calculé sur cette base le c_v est égal à 124 et si l'on admet que ce piézomètre de grande dimension présente une certaine inertie, cette valeur est encore plus élevée, ce qui dénote un meilleur « contact » avec le Rhône que pour les cellules de pression précédemment examinées.

Ces exemples montrent que l'action du marnage peut s'étendre très loin au-delà du rivage et avoir ainsi un effet déterminant sur la stabilité des berges par variation du poids apparent du sol et par accroissement de la pousée d'écoulement lors de l'augmentation du gradient hydraulique.

Dans les terrains relativement perméables, comme l'alluvion ancienne, des variations rapides du plan d'eau peuvent provoquer des ruptures fragiles (éboulements) intéressant des volumes de quelques mètres cubes. De telles ruptures ont été observées pendant les vidanges de la retenue de Verbois.

Dans les terrains moins perméables, soit dans le cas de la retenue de Verbois, des formations géologiques comme les colluvions, le retrait würmien et la moraine argileuse würmienne, des variations même lentes du plan d'eau peuvent amorcer ou réactiver des ruptures ductiles (glissement de terrain) pouvant intéresser des volumes de terrain de plusieurs milliers de mètres cubes, voire beaucoup plus dans des retenues où l'amplitude du marnage est plus importante que sur le lac de Verbois. Le long des berges de la retenue de Verbois, la plupart des glissements reconnus aujourd'hui, et ils sont nombreux, ont été amorcés ou réactivés par le marnage.

Lors des vidanges de la retenue de Verbois, ces manifestations d'instabilité sont fréquentes et rapides. La *figure 16* en montre un exemple.

Le déséquilibre des berges sous l'action du marnage n'a pas que des effets négatifs, en effet, il est un agent

Fig. 16. — Fissure le long d'un chemin de berge ouverte lors de la vidange de 1972.

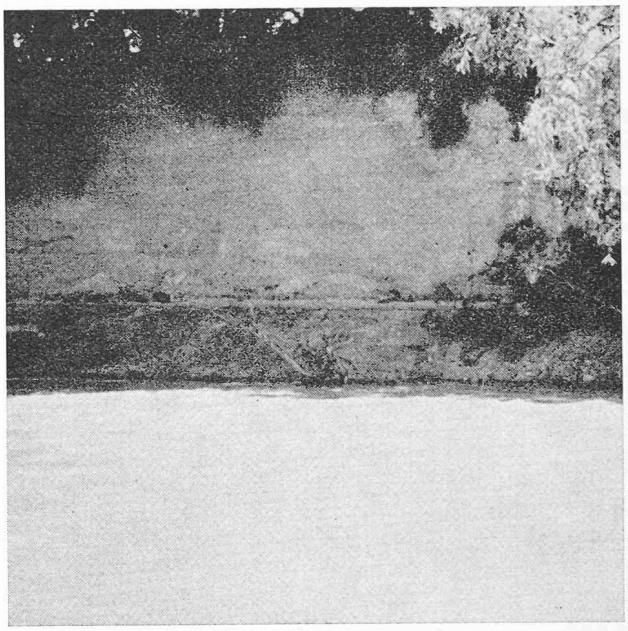

Fig. 18. — Formation d'une plage dans la retenue de Verbois. Photo prise pendant la vidange de 1972.

important de nettoyage de la retenue lors des vidanges, comme le montre la *figure 17*.

Enfin, pour conclure ce paragraphe, nous nous devons de signaler les essais en laboratoire exécutés par J. Zeller [6].

Les diagrammes obtenus par ce dernier donnent la forme de la nappe phréatique à l'intérieur de la berge, à différents instants en fonction du rapport $k/n_e \cdot v$, v étant la vitesse de variation du plan d'eau. Ces diagrammes confirment les résultats que nous avons obtenus par voie théorique ; ils sont d'une grande utilité lors du calcul de la stabilité d'une berge de retenue.

Fig. 17. — Déséquilibre des berges sous l'action du marnage lors de la vidange de 1972.

4.4 *Evolution de l'érosion dans une retenue sans marnage important : Verbois*

Nous allons admettre, pour simplifier, qu'après la création de la retenue la berge présente une pente prononcée au-dessus et au-dessous du plan d'eau. Les vagues et le marnage produiront une érosion plus ou moins rapide des terrains exondés. La fraction grossière des produits de cette érosion s'accumulera sous l'eau au pied du talus sous une pente d'équilibre naturel ; la fraction la plus fine restera en suspension dans l'eau et se déposera plus loin. C'est le début d'un régime actif, mais transitoire d'érosion.

Cette accumulation des produits grossiers de l'érosion atteindra bientôt la zone de variation du plan d'eau et, sous l'action des vagues, s'y étalera pour former des plages comme le montre la figure 18. Sur ces plages, les vagues s'amortiront en dissipant leur énergie par frottement et, ainsi, ce régime d'érosion transitoire tendra vers un nouveau régime d'équilibre où l'action érosive des intempéries et du gel prendra une part prépondérante. Nous avons esquissé ce processus sur la figure 19. La baine des lacs est le résultat final du processus. Dans les retenues où

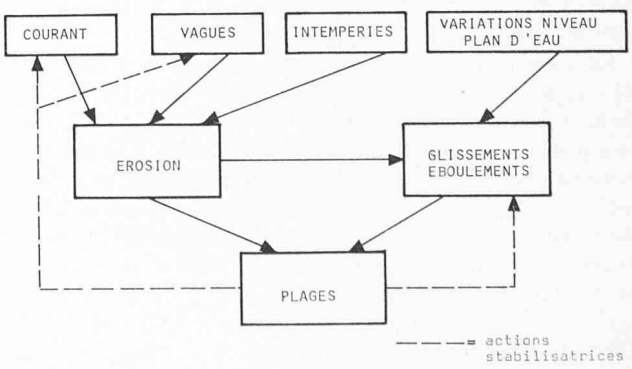

Fig. 19. — Cycle de l'érosion et des actions stabilisatrices.

l'amplitude du marnage est importante par rapport à la profondeur de l'eau, ce cycle de l'érosion et des actions stabilisatrices est souvent plus complexe. Il s'agit alors essentiellement d'un rééquilibrage des versants par glissements de terrain et éboulements qui tend à faire décroître le gradient de l'érosion.

Faut-il favoriser ces actions stabilisatrices naturelles ou créer des protections artificielles souvent coûteuses ? Ce problème est, à notre avis, à traiter de cas en cas selon la valeur des terrains et des ouvrages riverains. Il s'agit, toutefois, de le prévoir, sinon le résoudre dès la création de la retenue.

5. Conclusions

Les ingénieurs n'ont pas toujours soupesé suffisamment les conséquences lointaines d'interventions modifiant l'état naturel d'un cours d'eau comme la création de retenues, l'introduction de la navigation, etc. Il faut dire, à leur décharge, que certaines conséquences et pas des moindres, étaient difficilement prévisibles, d'autres complètement ignorées et que, par conséquent, la politique du « voir venir » a prévalu pendant longtemps. C'est bien pour cette raison qu'il nous a paru important de faire connaître les principaux résultats de notre étude qui portent sur :

— les paramètres déterminant les mouvements des rives (érosion, glissements) en fonction des oscillations du plan d'eau, soit l'amplitude et la période des oscillations ainsi que le coefficient de consolidation c_v du terrain les constituant ;

— les lois régissant le phénomène du batillage lorsque la navigation se fait dans un courant ;

— les moyens — formules et graphiques — permettant d'évaluer le comportement de divers terrains pour différents types d'oscillations.

Si les éléments réunis ici sont par la force des choses incomplets, ils nous paraissent cependant suffisants pour attaquer, sur une base rationnelle, des problèmes comme :

— l'élaboration d'un compromis acceptable entre les consignes d'exploitation ou de chasse d'un barrage et les ouvrages éventuels de consolidation des rives à prévoir ;

— l'évaluation des conséquences de la modification de la beine d'un lac, par exemple par l'exploitation des graviers dont elle est constituée ;

— l'élaboration de consignes de navigation en rivières, retenues ou lacs en fonction de la nature des rives ou consolidations prévues

problèmes résolus au jugé ou, tout simplement, ignorés par le passé.

6. Remerciements

Signalons enfin que cette publication est le fruit d'une expertise confiée aux Laboratoires de géotechnique et d'hydraulique de l'EPFL par le Département des travaux publics du canton de Genève et les Services industriels de la ville de Genève.

Les auteurs remercient très sincèrement ces derniers qui ont mis à leur disposition des moyens leur permettant d'aller plus loin que ne le demandait le cadre restreint de leur mandat et qui ont autorisé la publication des principaux résultats obtenus.

Bibliographie

[1] R. M. Sorensen : *Waves generated by model ship hull.* Journal of the Waterways and Harbors Division ASCE, Novembre 1969.

[2] D. Hay : *Ship waves in navigable water-ways.* XIth Conference on Coastal Engineering, London 1968.

[3] I. Jonsson : *Interaction between waves and currents.* Proceedings of the XIIth Coastal Engineering Conference, Septembre 1970, Washington, DC.

[4] H. Lundgren : *Turbulent currents in the presence of waves.* Proceeding of the XIIIth Coastal Engineering Conference, July 1972, Vancouver, Canada.

[5] G. Castany : *Traité pratique des eaux souterraines.* Dunod 1963.

[6] J. Zeller : *Sickerströmungen als Folge von Stauspiegelschwankungen.* Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau, N° 50.

[7] G. Amberger : *Etude comparative de diverses méthodes de détermination des caractéristiques hydrogéologiques appliquées à des aquifères quaternaires de la région de Genève.* Eclogae geologicae Helveticae, Vol. 69, N° 2, 1969.

Adresses des auteurs :

J. Bruschin
Laboratoire d'hydraulique de l'EPFL
Rue de Genève 65-67, 1004 Lausanne.

M. Dysli
Laboratoire de géotechnique de l'EPFL
Av. de Provence 22, 1007 Lausanne.

Bibliographie

Bibliographies de problèmes technologiques

Le nombre de publications techniques augmente, peut-on dire, de façon exponentielle, et tout effort tendant à nous renseigner sur des sujets précis est le bienvenu. Un tel effort est entrepris depuis 1969 par le Centre de documentation de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics, 9, rue La Pérouse, Paris 16^e, qui publie régulièrement des bibliographies sélectionnées. Ces listes comportent quatre parties :

a) les ouvrages de langue française ;
b) les articles de langue française ;
c) les ouvrages de langue étrangère ;
d) les articles de langue étrangère ;

et sont mises à jour régulièrement.

Les listes déjà publiées sont les suivantes :

1. Préfabrication.
2. Désordres dans le bâtiment.
3. Etanchéité des toitures-terrasses.
4. Coffrages.
5. Isolation acoustique.
6. Fondations de machines.
7. Accélération de la prise par la chaleur.
8. Recherche opérationnelle.
9. Effets des séismes.
10. Piscines en béton armé.
11. Béton sous l'effet des intempéries.
12. Contreventement des bâtiments.
13. Constructions mixtes « acier-béton ».
14. Réservoirs et châteaux d'eau.
15. Maisons individuelles.
16. Béton apparent.
17. Résistance au feu et protection.
18. Immeubles de grande hauteur.
19. Garages-parkings souterrains.
20. L'isolation thermique dans le bâtiment.
21. Charpentes lamellées collées.
22. Parois moulées dans le sol.
23. Bétons légers.