Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 102 (1976)

Heft: 2

Artikel: Vagues de vent sur un plan d'eau confiné: considérations générales et application au Léman (Petit-Lac)

Autor: Bruschin, J. / Falvey, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-72904

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: 12.07.2025

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

Communication du Laboratoire d'hydraulique de l'EPFL

Vagues de vent sur un plan d'eau confiné

Considérations générales et application au Léman (Petit-Lac)

par J. BRUSCHIN et H. FALVEY (suite et fin) [1]

4. Utilisation des résultats obtenus

4.1 *Méthode de dimensionnement (marche à suivre)*

En l'absence d'observations directes et de longue durée des vagues — et dans la plupart des lacs il n'est même pas possible de faire des mesures directement utilisables dans la théorie générale — il faut employer les données météorologiques sur les vents pour calculer à l'aide de l'Eq 4 et dans les conditions définies par les Eq 5 et 11 la « vague significative » d'amplitude $\overline{H}_{1/3}$. Une question légitime qu'on peut se poser, étant donné qu'il y a une vague significative pour chaque vitesse U_{10} du vent, est de savoir laquelle choisir. Nous pensons que, s'agissant de phénomènes naturels — en l'occurrence de vents — les questions concernant les risques de dommages ou de destructions d'ouvrages, le degré de protection exigé, etc., doivent être traitées de manière analogue au cas des crues en rivière, objet d'une publication récente par Bruschin [10].[2]

Ayant admis un niveau de risque et déterminé la durée de retour correspondante, nous pouvons avec la $U_{10,\,T}$ ainsi choisie, procéder comme suit :

1) déterminer le fetch efficace maximal $F_{e,\,\max}$ au point qui nous intéresse, en fonction des directions possibles du vent, des formes du plan d'eau et des conditions topographiques locales ;
2) calculer l'amplitude $\overline{H}_{1/3,\,T}$ de la vague significative au large pour le $F_{e,\,\max}$ et $U_{10,\,T}$ choisie ;
3) transformer la vague significative en ondes sinusoïdales ;
4) apporter les corrections nécessaires, compte tenu de la réfraction, des réflexions et des courants éventuels ;
5) recalculer au moyen de la formule 13 l'amplitude de la « vague de dimensionnement » ou « de projet ».

4.2 *Exemples d'application*

A. *La région de Coppet*

Admettons qu'il s'agisse d'un ouvrage important à Coppet même, à exécuter au voisinage de la jetée d'un port existant, sur des fonds de 3 m. Un calcul économique ou des considérations subjectives sur la sécurité de l'ouvrage conduisent l'ingénieur à choisir pour le dimensionnement la tempête de bise ayant une période de retour de cent ans :

$$U_{10,\,T} = U_{10,\,100} = 23{,}2 \text{ m/s} \text{ — figure 2.5.}$$

1) pour ne pas allonger admettons que $F_{e,\,\max} = 7{,}1$ km, le F_e calculé à la figure 3.1 ;
2) $\overline{H}_{1/3,\,100} = 1{,}16$ m déjà calculé au chapitre 3.1. C'est l'amplitude de la vague significative en eau profonde ;
3) la transformation de la vague significative en ondes sinusoïdales se fait comme suit :

— l'énergie des vagues est déterminée au moyen de l'Eq 13

$$E = 0{,}125\,\overline{H}^2_{1/3} = 1682 \text{ cm}^2$$

— l'énergie maximale du spectre de Neumann

$$E_{\max} = 1{,}8 \cdot 10^5 \left(\frac{U_{10}}{2g}\right)^5 = 416\,119 \text{ cm}^2$$

avec U_{10} en m/s, g en m/s², E en cm²

— $E_\omega / E_{\max} = 4{,}04 \cdot 10^{-3}$ donne — figure A1/3

$$X = 1{,}62$$

— la fréquence la plus faible contenue dans les vagues (plus longue période) est

$$f_{\min} = \frac{gX}{\pi U_{10}} = 0{,}22 \text{ Hz soit } T_{\max} = 4{,}6 \text{ sec}$$

— la fréquence la plus élevée (plus courte période) est déterminée en utilisant la règle

$$f_{\max} \simeq 2 f_{\min}$$

soit $f_{\max} = 0{,}44$ Hz et $T_{\min} = 2{,}3$ sec, qui part de l'observation que l'énergie contenue dans les ondes de plus faibles fréquences est négligeable ;

— la décomposition en ondes sinusoïdales est faite au tableau n° 1 ;

4) les corrections de réfraction (angle d'approche des vagues $\alpha_0 \simeq 65°$) et de réflexion sur la jetée du port ($\rho = 0{,}4$ et m = 3/1), sont faites au tableau n° 2.
5) la vague significative au droit du futur ouvrage de l'Eq 13

$$\overline{H}_{1/3} = 1{,}12 \text{ cm}$$

qui est la « vague de dimensionnement » ou la « vague de projet » en cet emplacement particulier dans les conditions définies au départ et en cours de calcul.
Le fait que le résultat obtenu est peu différent de la vague significative théorique n'est qu'un hasard et ne signifie nullement que ce résultat ne peut pas être très différent dans d'autres conditions.

B. *La région de Corsier*

La présence d'un promontoire sous-lacustre orienté vers le NO à partir de Collonge complique la solution du problème à tel point que seuls un modèle mathématique complexe ou des essais sur modèle physique permettraient de trouver une réponse correcte. Nous pouvons toutefois, en raisonnant sur la base des calculs précédents, nous faire une idée de ce qui s'y passe — figure 4.1.

Lors des fortes bises les ondes les plus longues du spectre, c'est-à-dire celles qui contiennent la plupart de l'énergie, ont tendance à s'aligner à la topographie. Ceci se passant de part et d'autre de l'arête sous-lacustre, comme le montre la figure 4.1, il y aura une forte concentration d'énergie au point de rebroussement où la vague se replie sur elle-même, cet effet se combinant par ailleurs avec les réflexions

[1] Voir *Bulletin technique de la Suisse romande* n° 14 du 3 juillet 1975.

[2] Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

TABLEAU N° 1

Analyse spectrale/Energie par bande de fréquence						Caractéristiques des ondes sinusoïdales		
f [1] Hz	$\bar{f}$ Hz	X [2] —	$\Phi(X)$ [3] —	$\overline{\Phi}(X)$ —	A^2 [4] cm²	H [5] cm	T [6] s	L [7] m
0.22		1.620	0.0455					
	0.235			0.0338	834	57,8	4,3	28,3
0.25		1.843	0.0220					
	0.265			0.0167	412	40,6	3,8	22,2
0.28		2.066	0.0114					
	0.295			0.0089	220	29,7	3,4	17,9
0.31		2.289	0.0063					
	0.325			0.0050	123	22,2	3,1	14,8
0.34		2.512	0.0037					
	0.355			0.0030	74	17,2	2,8	12,4
0.37		2.735	0.0022					
	0.385			0.0017	42	13,0	2,6	10,5
0.40		2.958	0.0014					
	0.415			0.0012	30	11,0	2,4	9,1
0.43		3.181	0.0009					

[1] Largeur de bande choisie $\Delta f = 0.3$ Hz

[2] $\Delta X = \pi \Delta f U_{10}/g = 7{,}43\ \Delta f = 0.0223$

[3] $\Phi(X) = \dfrac{\exp(-1/2X^2)}{X^6}$

[4] $A^2 = \overline{\Phi}(X)\ \dfrac{C\pi}{2}\left(\dfrac{U_{10}}{2g}\right)^5 \Delta X$ où $C = 3{,}05 \cdot 10^4 \mathrm{cm^2 s^{-5}}$(cte)

$A^2 = 2{,}47 \cdot 10^4\ \overline{\Phi}(X)$

[5] $H = 2A$ où A = demi-amplitude de l'onde sinusoïdale.

[6] $T = 1/\bar{f}$

[7] $L = gT^2/2\pi = 1{,}56\ T^2$

TABLEAU N° 2

Correction pour réfraction				Correction pour réflexion				ΔE_ω [7] cm²
y/L [1]	K_R	K_D	H' [2] cm	H_I/L [3]	R [4]	H_R [5]	H'' [6]	
0.106	0.92	0.73	38,8	0,019	0,77	12	50,8	645
0.135	0.90	0.77	28,1	0,017	0,85	9,6	37,7	357
0.168	0.91	0.80	21,6	0,015	0,95	8,2	29,8	222
0.203	0.91	0.84	17,0	0,013	1	6,8	23,8	142
0.242	0.92	0.87	13,8	0,012	1	5,5	19,3	93
0.286	0.94	0.90	11,0	0,011	1	4,4	15,4	59
0.330	0.96	0.92	9,7	0,011	1	3,9	13,6	46

[1] La longueur d'onde du tableau n° 1 et $y = 3$ m.

[2] $H' = H \times K_R \times K_D$ où H du tableau n° 1, K_R et K_D de graphiques.

[3] $H_I = H'$ et $L' = L \tanh 2\ \pi y/L = L\ \sin\alpha/\sin\alpha_0$ où $\alpha_0 = 65°$ et α = angle après réfraction (même graphique).

α^0	41	44	48	53	56	58	60
L' m	20,7	17,0	14,7	13,0	11,3	9,8	8,7

[4] R tiré d'abaques.

[5] $H_R = \rho R H_I$

[6] $H'' = H_I + H_R = H' + H_R$

[7] $E_\omega = \Sigma \Delta E_\omega$

plus ou moins fortes selon la profondeur. Ceci a pour conséquence que les navigateurs passant au voisinage de l'arête, par forte bise, pour aller à Corsier-Port par exemple, traversent une zone très agitée où le creux des vagues observées dépasse sensiblement l'amplitude de la vague significative locale.

5. Conclusions

Les dépenses toujours grandissantes destinées aux ports de plaisance et autres ouvrages lacustres, la variété de types de structures et matériaux utilisés imposeront sans doute, si ce n'est déjà fait, des analyses plus attentives et plus poussées du dimensionnement de ces ouvrages. Nous pensons avoir réussi à expliquer dans ce qui précède, aussi clairement que cela peut être fait aujourd'hui, la nature des phénomènes de génération et de formation des vagues ainsi que proposer une philosophie et une méthode de calcul permettant d'obtenir une « vague de dimensionnement ». En ce qui concerne cette méthode, nous n'en avons pas caché certaines faiblesses dues pour l'essentiel à l'absence d'une information expérimentale adéquate. Il s'agit notam-

ment des corrélations entre vitesses des vents mesurées aux stations anémométriques terrestres et les vitesses U_{10} sur les plans d'eau. C'est à leur élaboration qu'il faut consacrer le principal effort, étant donné que dans le cas des lacs les stations terrestres sont à présent et resteront encore pour longtemps les seules sources d'information fiables.

Disons enfin que la mesure comme l'observation directe des vagues dans les lacs est, pour les raisons déjà amplement exposées, une affaire beaucoup plus délicate. Les résultats ainsi obtenus, même s'ils correspondent à une réalité physique, peuvent être dépourvus de tout sens pour les ingénieurs et ne doivent en tout cas pas être séparés de leur contexte géographique, topographique et météorologique.

BIBLIOGRAPHIE

[1] R. SILVESTER : *Coastal Engineering, I, Generation, Propagation and Influence of Waves*. Elsevier Scientific Publishing Co., London, 1974.

[2] B. KINSMAN : *Wind Waves*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J., 1965.

[3] H. T. FALVEY : *Prediction of Wind Wave Heights*. Journ. Harbors & Coast. Eng. Div. ASCE vol. 100, no WW1, February, 1974, p. 1-12.

[4] H. CHARNOCK : *Wind Stress on a Water Surface*. Quart. Journ. Meteor. Soc., vol. 81, 1955, p. 63-640.

[5] H. SCHLICHTING : *Boundary-Layer Theory*. McGraw-Hill, 6th ed., 1968.

[6] H. A. STURGES : *The Choice of a Class Interval*. Proc. Amer. Statistical Assoc., March 1926.

[7] E. J. GUMBEL : *Statistics of Extremes*. 4th Printing, Columbia University Press. New York, 1967.

[8] T. GINSBURG : *Extremwert-Statistik und kalkuliertes Risiko*. Annal. Meteorologie, Neue Folge, nº 5, 1971, p. 155-164.

[9] J. BRUSCHIN, R. ESTEVE : *Utilisation de l'analyse fréquentielle des crues pour la détermination de la crue de projet*. Schweiz. Bauz, nºs 32 et 33, 1974.

[10] J. BRUSCHIN, H. T. FALVEY : *Risques relatifs aux crues*. Bulletin Tech. nº 21, 1974.

[11] A. FOREL : *Le Léman*. Slatkine Reprints 1969, Genève, réimpression de l'édition de Lausanne 1892 (en 3 volumes).

[12] R. L. WIEGEL : *Oceanographical Engineering*. Prentice-Hall International Series in Theoretical and Applied Mechanics, 1964, p. 230.

[13] J. PLAUCHU : *Etude des courants du lac Léman du Rhône à la frontière Vaud-Genève 1969-1970*. Bureau d'Etudes et de Travaux hydrologiques et d'Océanologie Côtière, rue de l'Avenir 56, Genève, Suisse.

[14] M. S. LONGUET-HIGGINS : *On Wave Breaking and the Equilibrium Spectrum of Wind-Generated Waves*. Proc. Roy. Soc. A 310, p. 151-159, 1969.

Adresse des auteurs :
Prof. J. Bruschin
Laboratoire d'hydraulique
Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
Route de Genève 67
1004 *Lausanne*

Dr H. T. Falvey
Bureau of Reclamation
P.P. Box 25007 Denver
Federal Center
Denver, CO 80225, USA

Annexe

Vague significative et spectre de puissance

L'observation directe des vagues de vent ou l'examen d'un enregistrement typique — figure A 1/1 — font claire-

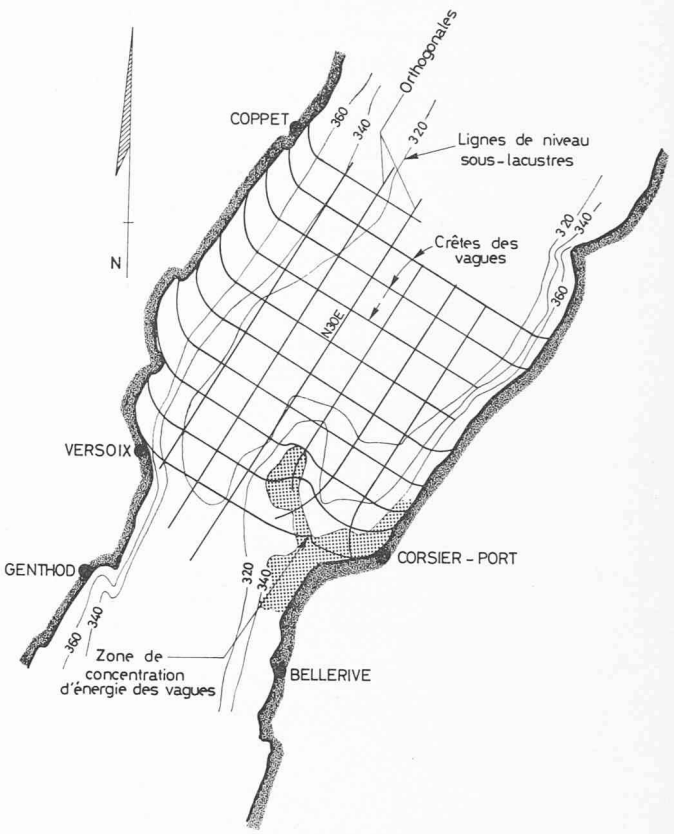


Fig. 4.1. — Vagues dans la région du port de Corsier.

ment apparaître le caractère aléatoire de leurs paramètres caractéristiques : amplitudes H, périodes T et longueurs d'ondes L. Longuet-Higgins [14], traitant le problème des amplitudes, a proposé une fonction de probabilité théorique bien vérifiée par les mesures — figure A 1/2. Nous pouvons à l'aide de cette fonction déterminer quelques valeurs intéressantes, soit :

— le mode, H_{mod} ou l'amplitude la plus fréquente dans un train de vagues,

— l'amplitude moyenne $\overline{H}$,

— l'amplitude moyenne du tiers supérieur des $H, \overline{H}_{1/3}$, que nous appelons l'amplitude de la « vague significative »,

— idem, mais pour le 1/10 supérieur $\overline{H}_{1/10}$.

Nous donnons au tableau A 1/1, à titre de comparaison, la liste des valeurs correspondantes théoriques et expérimentales (mesurées dans les océans) ; σ est ici la moyenne quadratique (RMS) des amplitudes.

TABLEAU A 1/1

Amplitude	Théorique	Expérimentale
H_{mod}	0,707 σ	—
$\overline{H}$	0,885 σ	0,9 σ
$\overline{H}_{1/3}$	1,416 σ	1,3 σ
$\overline{H}_{1/10}$	1,770 σ	1,5 σ

La valeur utilisée le plus couramment en océanographie est le $\overline{H}_{1/3}$ et ceci non seulement parce que, comme nous l'avons dit, elle correspond le mieux aux estimations des observateurs des océans, mais encore — et c'est par analyse spectrale que l'on peut le démontrer — les ondes sinusoïdales ayant cette amplitude particulière contiennent la part la plus forte de l'énergie totale d'un train de vagues.

Ce choix est donc intéressant à deux titres pour les ingénieurs :

— le danger de submersion des ouvrages par les vagues est limité de manière raisonnable, $\overline{H}_{1/3}$ étant une valeur élevée sans être une valeur extrême ;

— les ouvrages résistant à la « vague significative » résisteront aux autres composantes du spectre de puissance.

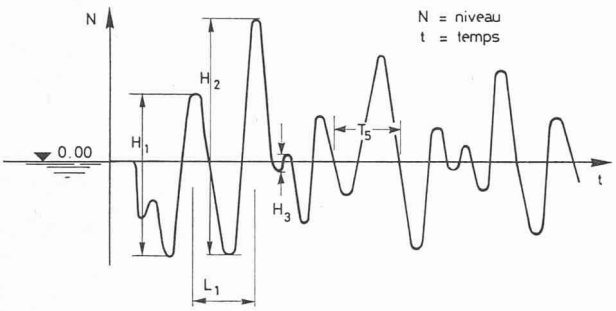
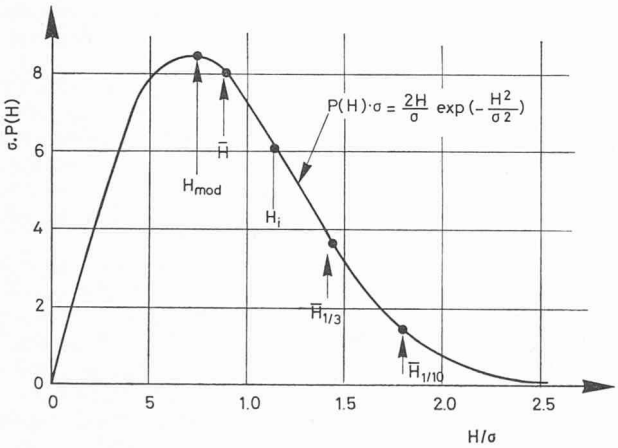


Fig. A1/1. — Enregistrement typique de vagues de vent.



$P(H)$ = probabilité que $H \leq H_i$
y = moyenne quadratique de H_i (RMS)
$\overline{H}$ = moyenne de H_i
H_{mod} = mode de H_i

Fig. A1/2. — Densité de probabilité des amplitudes des vagues de vent.

Cette dernière notion, comme la méthode de l'analyse spectrale d'ailleurs, ont leur origine dans la théorie générale de l'analyse du signal. On utilise ici non pas les amplitudes, mais les déplacements « A » du niveau d'eau par rapport à un niveau de référence (demi-amplitudes pour les ondes sinusoïdales) parce que leur moyenne quadratique — RMS — est directement proportionnelle à l'énergie des vagues.

L'analyse spectrale consiste à décomposer le train de vagues — enregistrement — en ondes sinusoïdales par analyse de Fourier rapide (FFA) par exemple et de construire la courbe A^2—f, où $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T}$ c'est-à-dire la fréquence, courbe connue sous le nom de « spectre d'énergie » ou « de puissance » des vagues. Neumann a proposé une forme théorique du spectre — figure A 1/3 — qu'il croyait être la limite supérieure absolue de l'énergie que le vent peut transmettre aux vagues pour un fetch infini. Lorsque le fetch est fini, les faibles fréquences sont supprimées, mais la partie correspondant aux fortes fréquences subsiste dans la même forme. L'énergie E_ω contenue dans le spectre à fetch limité peut être approximée par l'Eq 13 et la courbe E_ω/E_{max} permet de calculer la fréquence minimale du spectre lorsque nous ne disposons pas d'un enregistrement mais de la seule valeur $\overline{H}_{1/3}$.

Quoique le spectre de Neumann ne corresponde pas exactement aux spectres mesurés — et des améliorations ont été proposées depuis par Pierson-Moskowitz et autres [1] — le procédé peut être considéré comme une approximation acceptable de la réalité.

Un bénéfice marginal de l'analyse spectrale est la possibilité d'utiliser la théorie mathématique des vagues sinusoïdales pour les composantes des vagues aléatoires et introduire ainsi de manière simple les corrections de réfractions, réflexions, courants, etc. Les vérifications des différents éléments d'ouvrages ou même de ports entiers à la résonance devient aussi possible.

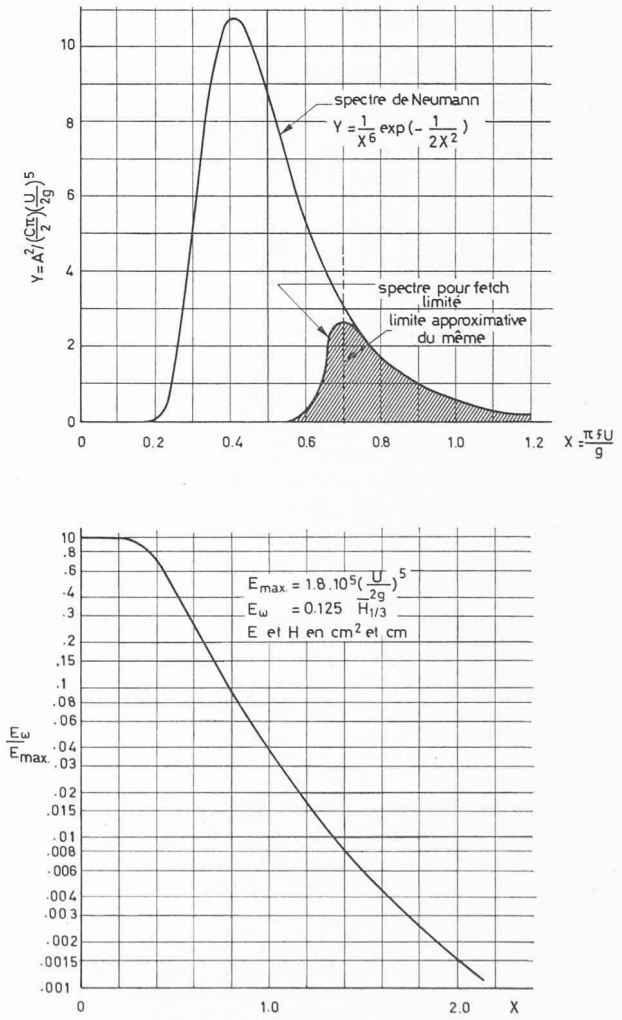


Fig. A1/3. — Spectres de Neumann et spectres pour fetchs limités d'après Kinsman (2).