

وزارة التعليم و البحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية للتعليم والبحث
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT HYDRAULIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Transformation de l'énergie de la houle
en énergie potentielle accumulable
(pompe actionnée Par la houle)*

Proposé par :
Gesa LAPRAY

Etudié par :
MANKOURI M.
HADDOUCHE H.

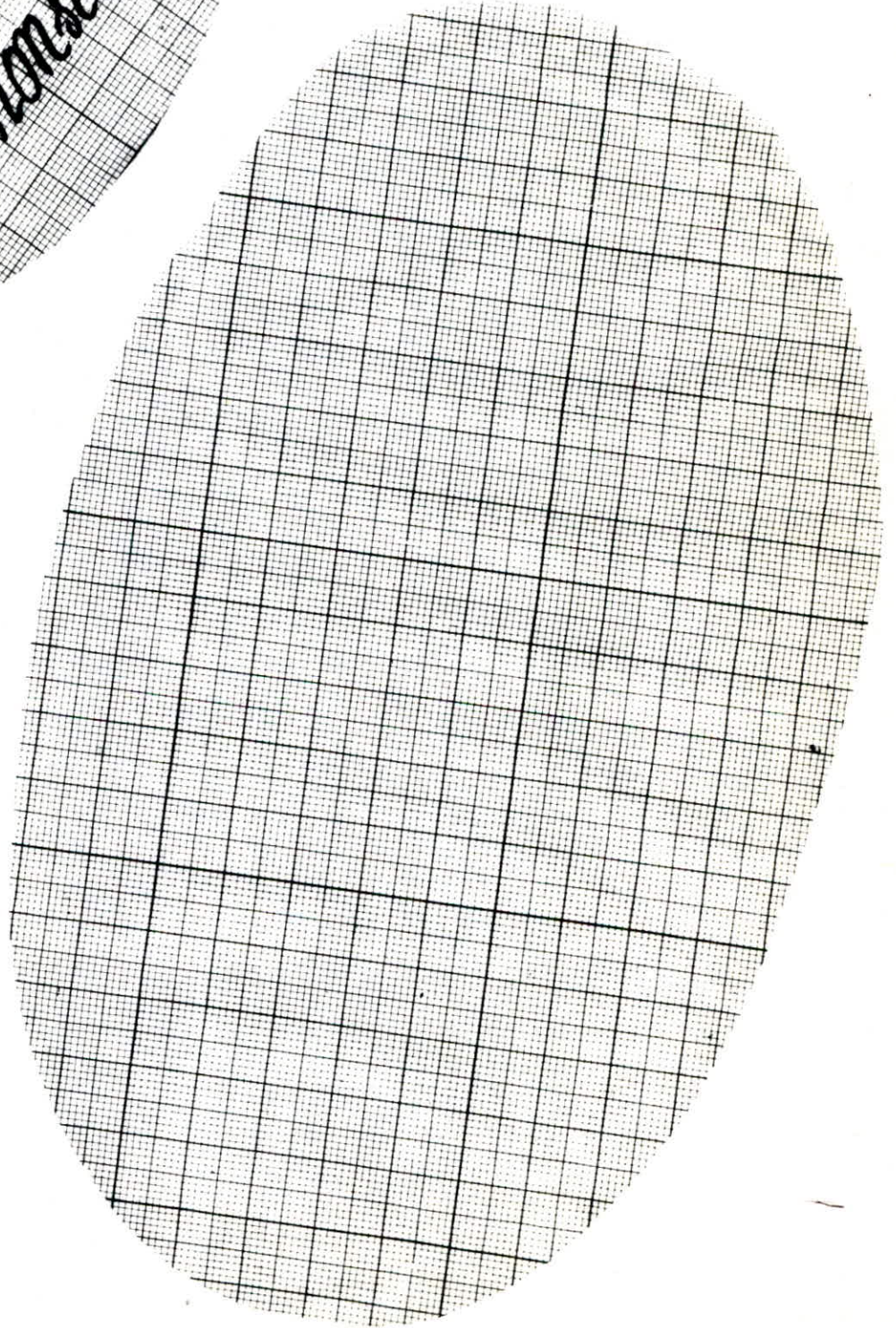
Dirigé par :
Gesa LAPRAY

PROMOTION Janvier 1985

املا

السيد

A monsieur



Dedicaces.

Je dedie ce modeste travail en
signe de respect et de reconnaissance

- A mon pere et ma mere pour leur sacrifice
a mon egard.
- A mes freres, soeurs et belles soeurs en leur
souhaitant le bonheur
- A toute ma famille.
- A tous mes Amis.

Naukuri Mohammed

Dedicaces.

Je dedie ce modeste travail en signe
de respect et de reconnaissance

- A mon pere et ma mere pour leur sacrifice
et mon egard
- A mes peres, soeurs et belles soeurs en leur
souhaitant le bonheur
- A celle qui m'a toujours apporte un solide
sentiment moral par sa tendresse, son amour
et sa comprehension (H.B)
- A toute ma famille.
- A tous mes amis

Haddouch Houine.

Remerciements

Le présent travail a été effectué au Département d'Hydraulique de l'École Nationale Polytechnique.

Mr. G. LAPRAY l'a dirigé avec une grande patience et un amour évident du travail minutieux. On lui exprime notre gratitude et notre profond respect.

Mrs. les assistants du Département d'Electrotechnique acceptent notre profonde considération. Qu'ils soient vivement remerciés.

Mr. DERRADJI, Professeur au Département d'Electrotechnique, pour nous avoir prodigués des conseils précieux et pour s'être intéressés à notre travail.

Nos remerciements vont également à notre ami MUSTAPHA pour avoir assuré la calligraphie de ce manuscrit.

Nos remerciements vont, évidemment, à nos amis pour leur soutien moral, leur aide technique et pour l'ambiance agréable qu'ils ont créé autour de nous. Les TAHAR AMAR, MEKID, MEFTAH et les autres.

Tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire soient vivement remerciés.

Plan

- I / Introduction.
- II / Théorie de la houle.
 - Analyse physique de la houle.
 - Caractéristiques de la houle.
 - Etude théorique de la houle.
 - Description générale de la houle de Gerstner.
 - Description générale de la houle de Stokes.
- III / Description du canal et fonctionnement du dispositif.
 - Canal à houle.
 - Description du canal à houle.
 - Fonctionnement du dispositif.
- IV / Principe de fonctionnement de la pompe.
 - Pompe à simple effet.
 - Pompe à double effet.
 - Capacité maximale d'élévation.
- V / Caractéristiques de la pompe
 - Vitesse moyenne d'écoulement du fluide au refoulement.

Pression maximale du fluide au refoulement.

Pression maximale à l'aspiration.

Rendement théorique de la pompe.

VI / Mesure du débit.

Installation de la pompe sur son support.

Réalisation du bassin.

Description du déversoir.

Mesure du débit.

VII / Calcul des pertes de charge.

VIII / Expérimentation.

IX / Conclusion

X / Références bibliographiques.



I / Introduction

Les vagues, Pétrole de l'an 2000 ?

On connaissait l'énergie des marées (Usine de la Rance) et l'énergie thermique des mers qui exploite la différence de température entre les surfaces chaudes de la mer et les grandes profondeurs plus froides ; mais l'énergie des vagues ?

À part quelques experts, peu savent bien que leur mouvement sans fin peut produire de l'électricité.

Sait-on par exemple que chaque vague transporte une énergie potentielle liée à la déformation de la surface de la mer et une énergie cinétique liée aux mouvements des particules d'eau. ?

Que l'énergie qui se dégage de la vague est proportionnelle au carré de cette dernière et à la période de celle-ci ? Autrement dit, l'énergie de la houle représente en théorie une puissance immense de plusieurs milliers de mégawatts par km^2 .

Récupérer l'énergie des vagues : La récupération de l'énergie libérée par les vagues n'est pas une idée nouvelle. Depuis un certain temps déjà, ce sujet fait l'objet de discussion dans les conférences internationales et passionne les inventeurs. Ainsi plusieurs centaines de brevets ont été déjà déposés concernant les dispositifs de récupération de ce type d'énergie. Certains peu nombreux en regard à tous ceux qui ont été déjà déposés ont donné lieu à des applications pratiques.

Nous citerons deux projets de Stephen Salter de l'université d'Edimbourg et de Sir Christopher Cockerell qui ont pratiquement échoué car leur principe consistait à transformer l'énergie de la houle directement en force motrice, ce qui n'a pas été réalisable au point de vue d'utilisation pratique en raison de la discontinuité de l'intensité de l'énergie apportée par la houle due à l'alternance des trains de vagues avec les périodes de calme.

Ce fut M LAPRAY le premier qui, en 1968 a réalisé au laboratoire d'Hydraulique de l'E.N.P.A un appareil transformant l'énergie de la houle en énergie accumulable réutilisable d'une manière continue réglable à volonté suivant les besoins de la consommation.

Ce fut ce système qui a été adopté cinq années plus tard par les japonais.

Des calculs récents ont permis d'arriver à la conclusion suivante : l'énergie des vagues qui se brisent sur les côtes japonaises avoisinerait les 400 millions de kilowatts soit trois fois la capacité actuellement utilisée.

Donc, on pourrait se baser sur les calculs et dire que les avantages que procurent la récupération de l'énergie des vagues sont loin d'être négligeables. Elle est renouvelable perpétuellement sans danger pour l'homme, elle est propre et sa pointe de production quand les vagues sont hautes concorde bien avec la consommation d'électricité en hiver.

Donc, il est raisonnable de penser qu'elle va occuper une place croissante dans les années à venir dans les plans énergétiques des différents pays et que nonobstant quelques défauts, elle mérite bien qu'on s'intéresse d'un peu plus près à elle.

II) Théorie de la houle

II₁) Analyse physique de la houle

L'agitation à la surface de la mer a pour cause essentielle le vent, quand celui-ci souffle avec une faible intensité; il se produit des ondulations très faibles assimilables à des rides. Avec l'augmentation de l'intensité des vents, l'agitation à la surface de la mer augmente et les ondulations deviennent très nettes (agitation à 3 dimensions). Quand le vent souffle continuellement, les ondulations à la surface de la mer progressent dans la direction d'action du vent; l'agitation devient alors un phénomène à deux dimensions: c'est ce qu'on appelle une houle cylindrique. Il est cependant clair que la houle cylindrique se propage suivant des profondeurs qui sont variables; par conséquent sa longueur d'onde, son amplitude et sa direction sont susceptibles à des modifications tout en gardant sa période constante. Nous sommes donc en présence d'un phénomène de réfraction. La diminution de la longueur d'onde de la houle a été observée dans le cas où la propagation s'effectue vers une côte dont les lignes de niveaux sont assimilables à des droites parallèles aux crêtes de la houle. Par contre la propagation de celle-ci dans une baie provoque un épanouissement des crêtes; dans ce cas l'amplitude diminue. Le phénomène qu'on appelle clapotis s'observe au moment où la propagation de la houle est arrêtée par une paroi verticale, la houle se réfléchit, l'amplitude augmente comme le double de la houle incidente, tandis que la période et la longueur

d'onde restent constantes et égales à celle de la houle incidente. Le mouvement de la houle est orbital. Les molécules liquides décrivent des trajectoires fermées; au profondeur, il s'effectue un transport de masse dans le sens inverse que celui de la propagation de la houle en surface.

Dans le cas où la houle se propagerait en profondeur finie, les orbites sont des ellipses dont le grand axe diminue suivant une loi exponentielle en fonction de la distance à la surface libre; sur le fond les orbites sont réduites à des segments de droite.

On constate aisément la brutale libération d'énergie de la houle pendant le déferlement des lames le long des côtes.

II₂) Caractéristiques de la houle

La houle est un phénomène de propagation. Les caractéristiques sont l'amplitude, la longueur d'onde, la période, la célérité et la cambrure.

- L'amplitude ou hauteur du creux: définie comme étant la hauteur entre le sommet des crêtes et le fond du creux. Elle est désignée par "h".
- La longueur d'onde: qui est la distance entre deux crêtes ou deux creux consécutifs "L".
- La période: c'est l'intervalle de temps qui s'écoule entre le passage de deux crêtes ou deux creux consécutifs en un même point. Elle est notée par "T".

La célérité : c'est la vitesse moyenne de propagation des crêtes. On la note "C"

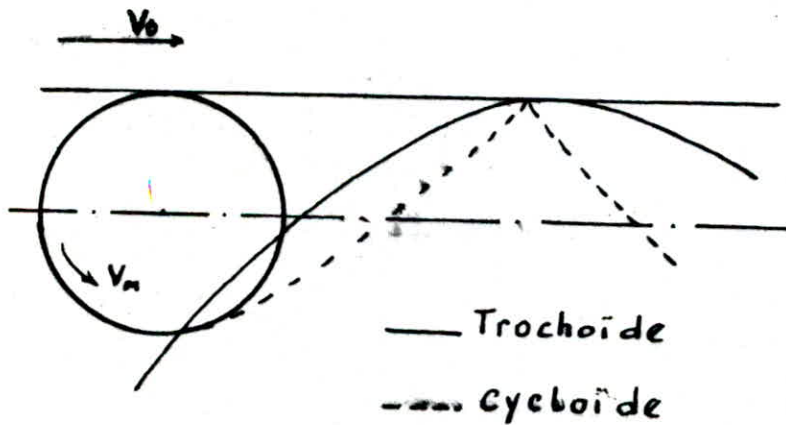
La cambrure : c'est le rapport entre l'amplitude et la longueur d'onde.

II₃ / ETUDE THEORIQUE DE LA HOULE

II₃₀ / Description générale de la houle de GERSTNER

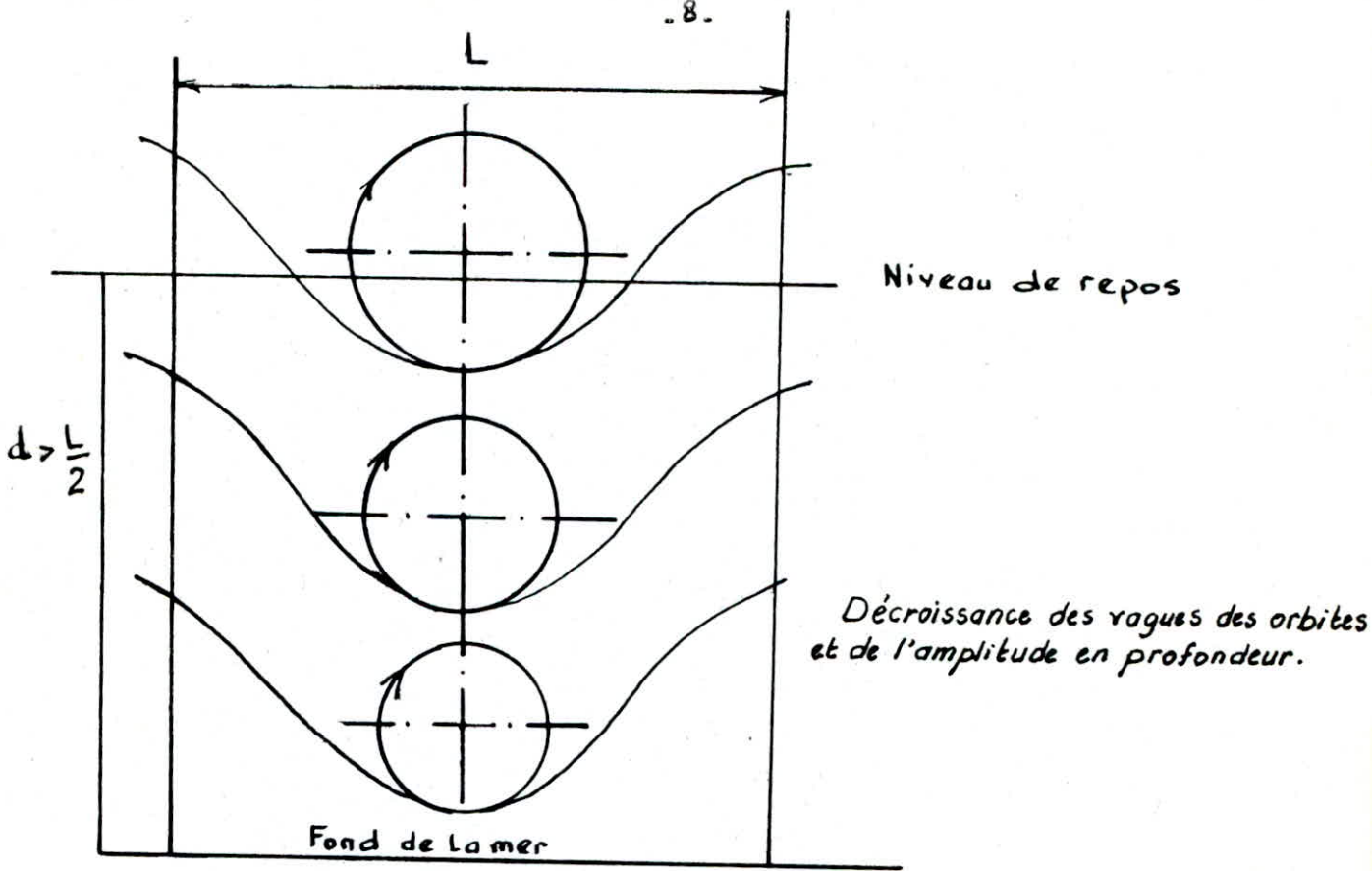
Il ne s'agit pas d'un mouvement de translation des masses d'eau. En réalité si l'on coupe la mer par un plan vertical perpendiculaire aux lignes d'ondulation, chaque particule décrit un cercle fermé revenant ainsi au bout d'un certain temps à son point de départ.

Ce mouvement orbitaire a été étudié en 1802 par Gerstner dans le cas d'une profondeur théorique infinie. La courbe de niveau est engendrée par un point M mobile se déplaçant à vitesse constante V_m sur une circonférence elle-même animée d'un mouvement de translation à vitesse constante V_0 . C'est par définition une trochoïde ^{ou} cycloïde raccourcie.



Si $V_m = V_0$, la courbe engendrée est cycloïde avec un point de rebroussement à chaque période.

Le rayon des orbites circulaires décroît en progression géométrique quand la profondeur croît en progression arithmétique.



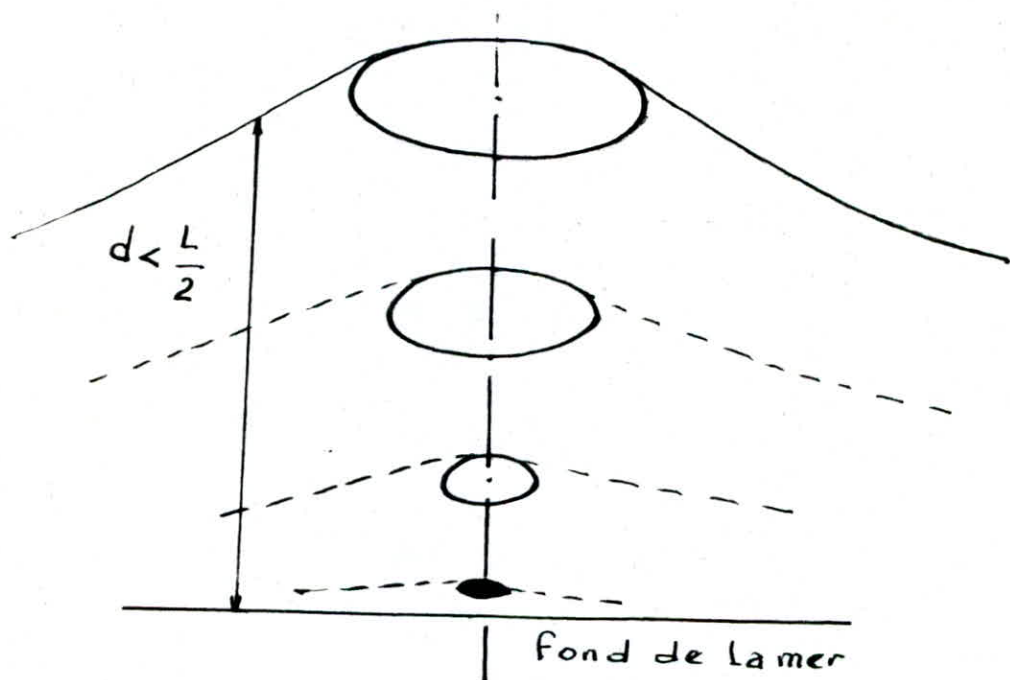
- la longueur L est proportionnelle au carré de la période T .

$$v = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} = \frac{T \cdot g}{2\pi} ; L = \frac{2\pi v^2}{g} = \frac{gT^2}{2\pi} ; T = \sqrt{\frac{2\pi L}{g}} = \frac{2\pi v}{g}$$

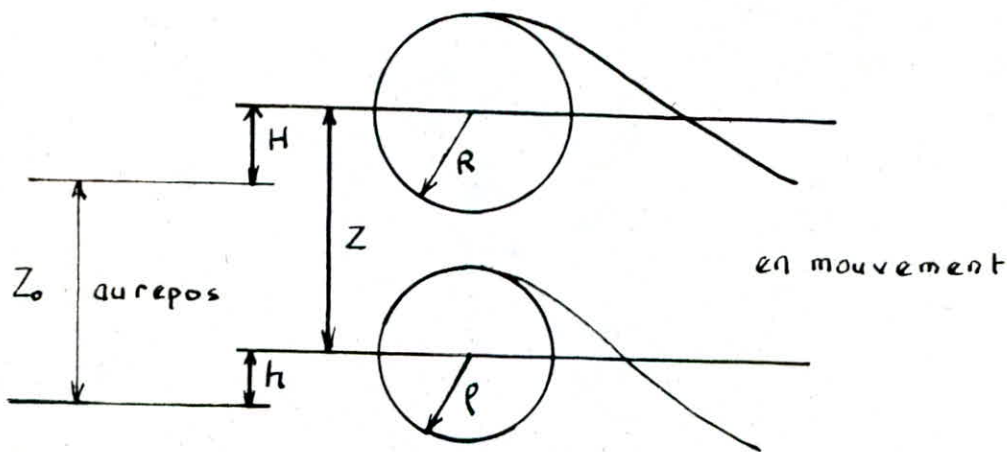
Gerstner avait admis que la profondeur de la mer d était suffisamment grande pour ne pas avoir d'influence sur la forme des vagues (on admet que cette condition est réalisée lorsque $d > \frac{L}{2}$).

Si $d < \frac{L}{2}$ la profondeur a une incidence sur le mouvement orbitaire, les particules ne se déplacent plus sur des cercles mais sur des ellipses qui s'applatissent au fur et à mesure que décroît la profondeur. C'est ce qu'a montré RANKINE en 1865.

Houle trochoïdale, déformation des orbites circulaires en eau peu profonde.



Houle en profondeur les rayons des cercles décrits par les particules sont d'autant plus petit que la profondeur à laquelle elles se trouvent est plus grande. Des raisonnements assez élémentaires permettent de déduire le centre du cercle et son rayon de la position initiale de la particule. Ils se basent sur la condition de continuité (invariance du volume d'une portion déterminée de liquide puisque celui-ci est supposé incompressible).



Le centre du cercle est sur la verticale de la position au repos élevé d'une grandeur : $h = \frac{\pi r^2}{L}$

Pour les particules initialement sur la surface libre, on a en particulier : $H = \frac{\pi R^2}{L}$

Z_0 : étant la distance initiale de la particule à la surface libre.

Z : la distance du centre du cercle trajectoire. On a donc :

$$Z = Z_0 + H - h = Z_0 + \frac{\pi(R^2 - r^2)}{L} \quad 1$$

D'autre part, la loi de décroissance du rayon en fonction de la profondeur est donnée par :

$$r = R e^{-\frac{2\pi Z}{L}} \quad 2$$

On en tire :

$$Z = Z_0 + \frac{\pi}{L} \cdot R^2 \left(1 - e^{-\frac{4\pi Z}{L}} \right) \quad 3$$

Equation du mouvement :

Elles résument toute cette étude et on peut en déduire aisément toutes les particularités précédentes.

Prenons un axe des abscisses parallèle à la direction de propagation et passant par le centre des trajectoires des particules constituant initialement la surface libre, un axe des ordonnées horizontal perpendiculaire, un axe des Z vertical dirigé vers le bas. Les équations définissant le phénomène sont alors :

$$\begin{cases} X = x + R e^{-2\pi z/L} \sin 2\pi (t/T - x/L) & \text{avec } T = \sqrt{\frac{2\pi L}{g}} \\ Y = y \\ Z = z - R e^{-2\pi z/L} \cos 2\pi (t/T - \frac{x}{L}). \end{cases}$$

X, Y, Z désignant les coordonnées d'une particule à l'instant t et x, y, z les coordonnées du centre de sa trajectoire.

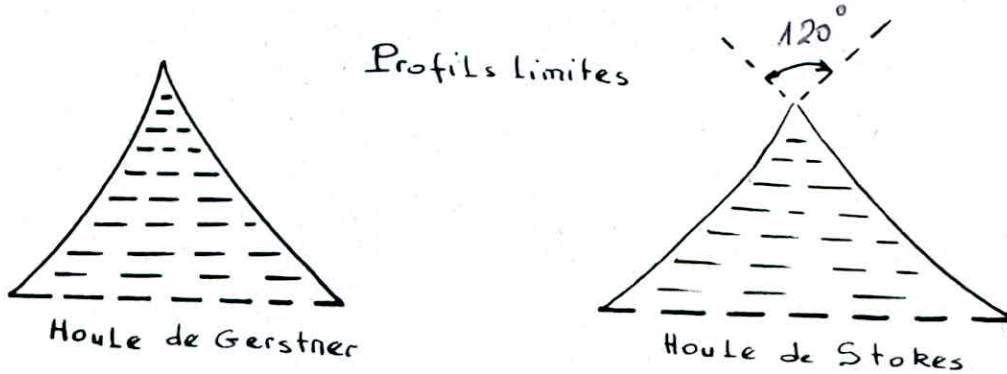
II₃₆] Houles de STOKES

Lorsque les déplacements et les vitesses des particules ne peuvent plus être considérés comme faibles, la face de la célérité et de la longueur d'onde c'est-à-dire lorsque le rapport :

$$\frac{v}{c} = \frac{2\pi R}{L}$$

a une valeur non négligeable, le phénomène précédemment décrit reste un mouvement possible mais rotationnel. On peut alors étudier un mouve-

- ment différent en conservant l'hypothèse d'un potentiel sinusoïdal et en ne gardant que les approximations légitimes. De nombreux mathématiciens ont étudié le problème et l'une des solutions les plus simples a été donnée par Stokes.



La nouvelle houle ainsi définie diffère surtout de la houle de Gerstner par le fait que les trajectoires des particules ne sont plus des courbes fermées. La particule est animée en plus de son mouvement oscillatoire, d'un déplacement horizontal dans le sens de la propagation de l'onde. La houle produit ainsi un courant au sens novel du terme; et il est évident qu'un contre courant doit se produire à une certaine profondeur. Enfin les deux houles diffèrent par leur forme limite. La houle de Gerstner admettant comme profil limite une cycloïde avec un point de rebroussement et la houle de Stokes admettant comme profil limite une courbe présentant un point anguleux avec angle des tangentes de 120° .

III / Description du canal et fonctionnement du dispositif.

III₁ Canal à houle.

Le canal a été effectué en plexiglas car il remplissait plusieurs conditions dont en premier lieu la grande ouvrabilité permettant le façonnage avec le moins de difficultés ; cette ouvrabilité est complétée par une résistance assez importante. La caractéristique primordiale était la transparence de ce matériau et cela afin de pouvoir observer l'évolution des divers phénomènes pendant les expérimentations au laboratoire. Ajoutant que ce matériau possède en plus des caractéristiques citées précédemment, toutes les qualités nécessaires pour l'expérimentation de toute nature et l'étude des phénomènes dans un laboratoire d'Hydraulique.

1 / Description du canal à houle.

C'est un canal divisé en deux grandes parties : les deux plages de forme triangulaire et le canal proprement dit de forme rectangulaire de 6 m de long, 0,49 m de large et 0,40 m de profondeur auquel viennent s'ajouter aux deux extrémités les plages qui sont la moitié d'un rectangle dont la longueur est 2 m et dont l'inclinaison a été calculée de façon à diminuer le phénomène de réflexion de la houle et en suite d'éliminer le clapotis.

Le canal rectangulaire est constitué de trois plaques de plexiglas formant le fond du canal ; à ces trois plaques sont vissées et collées six autres plaques qui forment les jous du canal. La hauteur de celui-ci est donc égale à la longueur de la plaque qui est de 0 cm. L'épaisseur de chaque plaque est de 1 cm.

Les plages s'appuient sur chaque extrémité du canal rectangulaire et sont reliées à celui-ci grâce à un procédé de collage très efficace.

Pour les besoins de l'expérimentation, il a été prévu au fond du canal un moyen de vidange, un volet batteur d'amplitude variable entraîné par un système bielle manivelle pivoté autour de la charnière fixée au fond du canal engendre les vagues (mouvement oscillatoire amorti) provoquant ainsi la houle.

III₃ / FONCTIONNEMENT DU DISPOSITIF

Un moto-réducteur constitué par une vis sans fin transmettant le mouvement à une roue laquelle fait tourner une poulie solidaire du moto-réducteur. Cette poulie est reliée par l'intermédiaire d'une courroie à une poulie itagée. Cette poulie est munie à l'une de ses extrémités d'une manivelle.

Un système bielle-manivelle transforme le mouvement circulaire de la poulie en un mouvement oscillatoire du volet batteur d'amplitude variable. Le volet engendre des vagues (mouvement oscillatoire amorti).

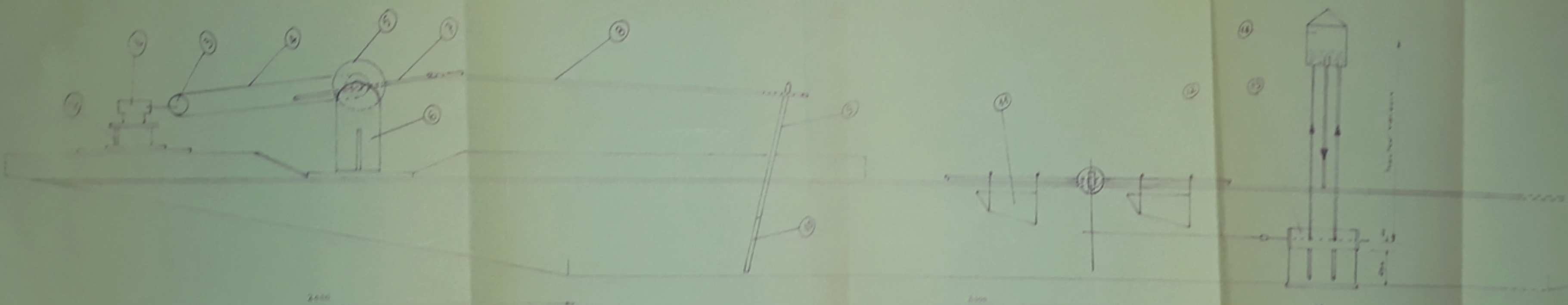
Un arbre fixé sur la largeur du canal muni à ses extrémités le volant d'inertie supporte les flotteurs destinés à recueillir l'énergie véhiculée par les vagues.

Une tige solidaire au volant d'inertie de longueur variable muni d'une bielle qui fait actionner une pompe à double effet sous l'action de la houle.

Le but de notre étude était d'actionner cette pompe à l'aide de la houle.

PH 029/85
avant p. 16

CANAL AVEC GENERATEUR ET RECEPTEUR DE HOULE



1	Moteur	8	Bielle
2	Support	9	Bras de volet
3	Poulie - moteur	10	Volet
4	Courroie	11	Flotteurs
5	Poulies	12	bielle
6	Support - poulies	13	Pompe
7	Manivelle	14	Reservoir

IV / PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA POMPE

IV₁ / Pompe à simple effet.

Dans son principe général, une pompe alternative se compose d'une capacité hermétiquement close à l'intérieur de laquelle se meut un élément mobile rigoureusement ajusté dont le déplacement rectiligne alternatif engendre soit le vide requis à l'aspiration, soit l'impulsion nécessaire au refoulement.

Des soupapes sont placées respectivement aux extrémités des conduites d'aspiration et refoulement. Suivant la pression relative créée par le piston dans les deux parties du cylindre, le liquide est aspiré ou refoulé. La hauteur théorique d'aspiration de l'eau dans les conditions normales d'utilisation dépasse légèrement 10 m. Elle diminue lorsque l'altitude croît et aussi quand la température du liquide aspiré augmente.

La hauteur pratique ne dépasse pas dans les mêmes conditions 7 à 8 m en raison des pertes de charge dans le tuyau d'aspiration et l'espace nuisible qui existe entre la base du corps de la pompe et le piston à fond de course.

La hauteur de refoulement dépend de la puissance motrice disponible (dans le cas de nos expériences, elle est faible), de la résistance des organes et de l'étanchéité des joints.

On peut amorcer ces pertes avant la mise en marche en

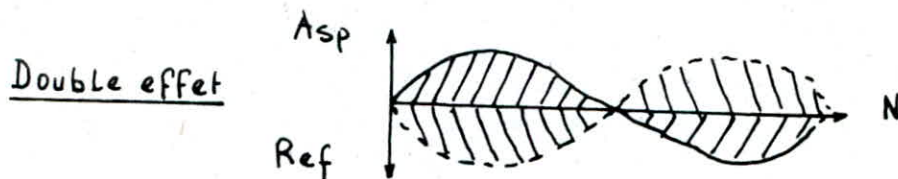
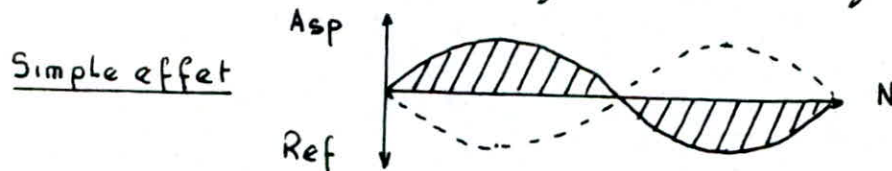
remplissant d'eau le corps de la pompe et la conduite d'aspiration où en plaçant un clapet de pied à la base du tuyau d'aspiration qui l'empêche de se vider.

L'amorçage se conserve si les soupapes sont étanches. Le bon fonctionnement de la pompe exige que la vitesse du piston ne soit pas élevée de façon qu'il ne se produise pas de choc. La vitesse de l'eau dans les conduites est inférieure à 1 m/s.

IV₂ / Pompe à double effet.

La pompe comporte un piston qui travaille alternativement à l'aspiration et au refoulement sur chacune de ses faces grâce à des soupapes disposées en conséquence. La pompe à double effet a un débit moyen double que la précédente. Elle est destinée pour des faible pression.

En général, le fonctionnement des pompes alternatives comporte toujours un temps mort si réduit soit-il d'où l'allure discontinue de son débit en fonction de la fréquence $N = \frac{1}{T}$



Par ailleurs, il est noté que le débit est fonction du volume engendré par le déplacement du piston de la pompe mais aussi de la fréquence des oscillations dans le cas de notre appareillage. En ce qui concerne notre cas, on pourrait faire varier la course du piston et l'effort exercé sur ce dernier si le besoin se fait sentir.

IV₃ / Capacité maximale d'élevation totale

C'est pour une vitesse de fonctionnement déterminée, la hauteur pratique d'élevation totale qui ne peut être dépassée du fait que les fuites internes correspondantes sont égales au volume engendré ou qui ne doit pas être dépassée sans mettre en péril la résistance mécanique de la pompe.

Chaque pompe est dotée d'une capacité pratique d'élevation totale. Tant qu'elle n'est pas dépassée, le débit varie peu; ainsi les fuites internes ne représentent qu'une faible partie du volume engendré. Les fuites sont appréciables si la viscosité du fluide et sa température sont grandes.

V] CARACTERISTIQUES DE LA POMPE

Elles ont été calculées avec un dispositif avec deux flotteurs car η_g était appréciable devant le dispositif à un seul flotteur.

- suspendre les masses manquées à une ficelle reliée à la poulie de rayon r
- mesurer le temps de parcours de la masse sur une distance de 0,81 m. Calculer la vitesse.
- mesurer les caractéristiques de la houle à l'amont et à l'aval des flotteurs.

$$\eta_g = \frac{P_u}{P_v} = f(m)$$

P_v : Puissance véhiculée par la houle

P_u : Puissance recueillie sur l'arbre tournant

$$P_u = m \cdot g \cdot v$$

$$P_v = \frac{\rho \cdot g \cdot b \cdot h^2 \cdot L}{16T} \left(1 + \frac{\frac{4 \cdot \pi \cdot H}{L}}{\operatorname{Sh} \frac{4 \cdot \pi \cdot H}{L}} \right)$$

Pour η_g optimal correspond m optimal

$$W_{opt} \times r = F \times m_1$$

$$F \times m_2 = F_{opt} \times L = F_{piston} \times L$$

$$F = \frac{W_{opt} \times r}{m_1} = \frac{F_{opt} \times L}{m_2} = \frac{F_{piston} \times L}{m_2}$$

$$F_{\text{piston}} = \frac{W_{\text{opt}} \times r \cdot m_2}{m_1 \cdot L}$$

$$\frac{r \cdot m_2}{m_1 \cdot L} = \eta \quad \text{rapport de transmission}$$

L : distance du centre de gravité d'un des flotteurs à son point d'articulation

$$r = 2 \text{ cm}$$

$$m_1 = 11 \text{ cm (manivelle de la roue libre).}$$

$$m_2 = 52 \text{ cm (manivelle du flotteur).}$$

$$M_{\text{opt}} = 5,6 \text{ kg} \rightarrow W_{\text{opt}} = mg = 5,6 \cdot 9,8 = 54,88 \text{ N}$$

$$F_{\text{piston}} = \frac{5,6 \times 9,8 \times 0,02 \times 0,52}{0,11 \times 0,25}$$

$$F_{\text{piston}} = 20,76 \text{ N}$$

l : longueur du bras de la tige

La course C du piston correspondant à cette masse optimale est de 3,275 cm

F_{piston} = force exercée par le piston

$$F_{\text{piston}} = \bar{\omega} \cdot H \cdot S \rightarrow S = \frac{F_{\text{piston}}}{\bar{\omega} \cdot H}$$

$$H = 5 \text{ m}$$

$$\bar{\omega} = \rho \cdot g$$

$$S = \frac{20,76}{10^3 \times 9,81 \times 5} = 4,23 \text{ cm}^2$$

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \Rightarrow D = \left(\frac{4S}{\pi} \right)^{1/2} = \left(\frac{4 \times 4,23}{3,14} \right)^{1/2}$$

$$S = 2,32 \text{ cm}$$

L'un des flotteurs effectue une course en une demi-période puisqu'ils sont disposés à la manière suivante: un sur la crête et l'autre sur le creux.

La distance séparant les flotteurs est égale à la demi longueur d'onde.

Volume pompé pendant une demi-Période

$$V = 3,275 \times 4,23 = C.S = 13,87 \text{ cm}^3$$

$$\text{On a } T = 1 \text{ s}$$

$$Q = \frac{V}{T/2} = \frac{2V}{T} = 2V = 27,74 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$Q = \frac{27,74 \times 60}{1000} \Rightarrow Q = 1,66 \text{ l/mn}$$

On envisagera un diamètre des conduites d'aspiration et de

refoulement arbitrairement de l'ordre de 14 mm.

V₁ / Vitesse moyenne d'écoulement du fluide au refoulement.

$$Q = V.S \Rightarrow S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14 \times (1,4)^2}{4} = 1,538 \text{ cm}^2$$

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{27,74}{1,538} = 18,036 \text{ cm/s}$$

V₂ / Pression maximale du fluide au refoulement

$$P_{\text{absolue}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{relative}}$$

$$P_{\text{abs}} = 1,013 \cdot 10^5 + \bar{\omega} H$$

$$P_{\text{abs}} = 1,013 \cdot 10^5 + 10^3 \times 5 \times 9,81$$

$$P_{\text{abs}} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Pascal} = 1,5 \text{ bar}$$

V₃ / Pression maximale à l'aspiration

$$P_a = P_{\text{at}} + \rho g h \quad \text{avec } h = 27 \text{ cm}$$

$$P_a = 1,013 \cdot 10^5 + 0,27 \times 10^3 \times 9,81$$

$$P_a = 1,04 \text{ bar}$$

V₄ / Rendement théorique de la pompe

$$P_{th} = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q$$

$$P_{th} = 10^3 \times 9,81 \times 5 \times 27,74 \cdot 10^{-6}$$

$$P_{th} = 1,36 \text{ Watt}$$

$P_{\text{absorbée par les flotteurs}} \quad P_{abs} = 4,178 \text{ watts}$

$$\eta_{th} = \frac{P_{th}}{P_{abs}} = \frac{1,36}{4,178} = 32,55 \%$$

Rendement théorique global de la pompe

$$\eta_{gth} = \frac{P_{th}}{P_v} = \frac{1,36}{6,469} = 21,1 \%$$

VI] MESURE DU DEBIT

VI₁] Installation de la pompe sur son support

Le support est réalisé en plexiglas de forme prismatique sur lequel repose notre pompe.

La tige reliant les flotteurs est munie d'un bras fixe en son milieu et perpendiculaire à la tige. Celle-ci est assujettie à osciller sous l'effet du mouvement oscillatoire des vagues dans un plan vertical.

L'effort exercé par la houle sur les flotteurs est recueillie sur le bras de la tige. Plus le bras sera long, plus l'effort sera moindre et plus la course du piston est importante. La pompe que nous adopterons sera disposée horizontalement à l'air libre.

La pompe repose sur le support de telle sorte que l'axe du piston soit aligné avec l'axe de la bielle.

Les orifices d'aspiration sont dirigés vers le bras ; ceux de refoulement vers le haut.

VI₂] Réalisation du bassin

Il est réalisé en plexiglas de forme cylindrique auquel, on juxtapose un cylindre collé à la base. On a pratiqué respectivement sur le fond, trois orifices. Deux, sont destinés à recevoir les conduites

de refoulement et l'autre à la conduite retour. Le bassin est relié à une poulie exécutée en plexiglas permettant de faire varier la charge.

VII₃ Description du déversoir

Réalisé lui aussi en plexiglas de forme cubique sur lequel on a pratiqué sur une des parois latérales une échancrure de forme triangulaire. Ce réservoir repose fixé sur une plaque de plexiglas l'ensemble déversoir - plaque repose sur les bordures du canal.

Ainsi l'eau pompée dans le canal retourne intégralement dans le canal par la conduite de retour et le déversoir.

En conséquence, le niveau d'eau dans le canal est maintenu constant car, il ne faut pas oublier que la puissance véhiculée par la houle est proportionnelle au carré de l'amplitude des vagues, donc au niveau d'eau dans le canal.

Veiller à ce que le niveau d'eau dans le canal soit maintenu constant à $H = 27 \text{ cm}$

VII₄ Mesure du débit

Pour la détermination du débit pratique, on s'est servi de notre déversoir.

Le débit passant par le déversoir triangulaire est d'après la formule empirique de GOURLEY valable pour $\alpha < 0,75$

$$Q = 1,32 \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \times h^{2,47}$$

α : coefficient égal au rapport $\frac{l}{L}$

l : largeur de l'échancrure

L : longueur du côté du déversoir

$$l = 2,4 \text{ cm}$$

$$L = 15 \text{ cm} \quad \Rightarrow \quad \alpha = \frac{2,4}{15} = 0,16$$

θ : angle au sommet de l'échancrure.

h : niveau d'eau dans le déversoir enregistré une fois l'écoulement est devenu stable.

Longueur de l'arête de l'échancrure = 8 cm.

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{1,2}{8} = 0,15 \quad \Rightarrow \quad \frac{\theta}{2} = \operatorname{Arcsin} 0,15 = 8,627^\circ$$

$$\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \operatorname{tg} 8,627 = 0,1517$$

$$Q = 1,32 \times 0,1517 \times h^{2,47}$$

$$Q = 0,2 \cdot h^{2,47} \text{ m}^3/\text{s}$$

VII / CALCUL DES PERTES DE CHARGE

Nature de l'écoulement du fluide

$$R = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

V : vitesse de l'écoulement $V = 18,036 \text{ cm/s}$

D : diamètre de la conduite $D = 1,4 \text{ cm}$

ν : viscosité cinématique $\nu = 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ à 20°C

$$R = \frac{18,036 \times 1,4}{10^{-2}} = 2525$$

Donc notre régime est laminaire

Expression du gradient de perte de charge

$$J = \frac{128 \cdot Q \cdot \nu}{\pi \cdot D^4 \cdot g}$$

$$J = \frac{128 \times 27,74 \times 10^{-2}}{3,14 \times 1,4^4 \times 981} = 3 \cdot 10^{-3} = 3 \text{ mm/m}$$

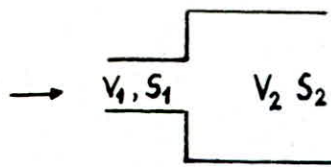
Pertes de charges singulières

Ces pertes de charges surviennent essentiellement dans les brusques changements de section occasionnés au niveau des clapets. Elles ont pour expression :

$$\Delta H_s = \sum Y \frac{V^2}{2g} = \frac{V^2}{2g} \sum Y$$

Calcul des Y

À l'aspiration nous avons un élargissement brusque.



$$\Delta H = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

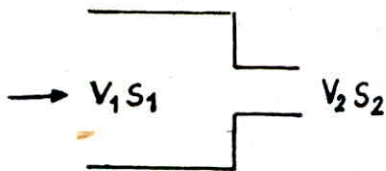
$$\Delta H = \frac{V_2^2}{2g} \left(\frac{V_1}{V_2} - 1 \right)^2$$

Donc

$$Y_1 = \left(\frac{V_1}{V_2} - 1 \right)^2 = \left(\frac{S_2}{S_1} - 1 \right)^2$$

$$Y_1 = \left(\frac{4,23}{1,538} - 1 \right)^2 = 3,06 \approx 3$$

Àu refoulement nous avons un rétrécissement brusque.



$$\Delta H = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

$$\Delta H = \frac{V_2^2}{2g} \left(-1 + \frac{V_1}{V_2} \right)^2$$

$$Y_2 = \left(-1 + \frac{V_1}{V_2} \right)^2 = \left(-1 + \frac{S_2}{S_1} \right)^2$$

$$Y_2 = \left(-1 + \frac{1,538}{4,23}\right)^2 = 0,406$$

On a une autre singularité au niveau du réservoir qui est sensiblement égale à 1.

$$Y_3 = 1$$

$$\sum Y = 3 + 0,406 + 1 = 4,406$$

$$\Delta H_s = \sum Y \cdot \frac{v^2}{2g} = 4,406 \times \frac{18,036^2}{2 \times 981} = 0,73 \text{ cm}$$

$$\Delta H_T = \Delta H_L + \Delta H_s$$

$$\Delta H_T = J \times L + \Delta H_s$$

$$\Delta H_T = 3,5 \times 3 \cdot 10^{-3} + 7,3 \cdot 10^{-3} = 17,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\Delta H_T = 1,78 \text{ cm}$$

VIII) EVALUATION DU DEBIT DU RENDEMENT PRATIQUE ET THEORIQUE DE LA POMPE EN FONCTION DE LA CHARGE

EXPERIMENTATION

Mode opératoire

- Les caractéristiques de la houle à l'amont des flotteurs sont constantes.
- Déterminer les caractéristiques de la houle à l'aval des flotteurs.
- Calculer la puissance absorbée par les flotteurs.
- Déterminer pour une longueur du bras de la tige solidaire de l'axe des flotteurs, la course du piston correspondante à la charge H .
- Plus la charge H croît, plus la course du piston diminue; plus la course du piston diminue, plus la pression relative à la sortie de la pompe augmente et enfin plus le débit diminue.
- Mesurer la période des oscillations T
- On part de l'hypothèse que la course aller du piston est égale à la course retour.
- Le volume engendré par le déplacement du piston pendant la course aller n'est pas le même que celui engendré pendant la course retour car l'axe du piston repose uniquement sur un palier (guidage du piston sur un palier et le cylindre).
- Pour la mesure pratique du débit, on s'est servi d'une éprouvette graduée et d'un chronomètre.

- Faire trois mesures du débit pour chaque charge donnée :
 $H (m) = 0, 0,5, 1, 2, 2,5, 3, 3,5$. et une longueur du bras de la tige L .
- Prendre la valeur moyenne du débit .
- Noter la dénivellation h dans le déversoir une fois l'écoulement est devenu stable .
- Calculer le débit à l'aide de la formule empirique de GOURLEY
- Comparer les deux résultats

DONNEES

Diamètre du piston $\phi_p = 25 \text{ mm}$

Diamètre de la tige $\phi_t = 8 \text{ mm}$

Surface S_1 balayée par le piston à la course retour

$$S_1 = \frac{3,14}{4} (\phi_p^2 - \phi_t^2) = \frac{3,14}{4} (25^2 - 8^2) \Rightarrow S_1 = 4,406 \text{ cm}^2$$

Surface S_2 balayée par le piston à la course aller :

$$S_2 = \frac{3,14}{4} \phi_p^2 = \frac{3,14}{4} \cdot 25^2 \Rightarrow S_2 = 4,908 \text{ cm}^2$$

Volume V_1 engendré : $V_1 = S_1 \cdot C$

Volume V_2 engendré : $V_2 = S_2 \cdot C$

C : Course du piston .

Caractéristiques de la houle à l'aval des flotteurs.

$$H = 27 \text{ cm (Niveau d'eau dans le canal) .}$$

$$b = 0,49 \text{ m (Largeur du canal) .}$$

$$T' = 1,0 \text{ s (Période des oscillations) .}$$

$$h' = 9 \text{ cm (Amplitude) .}$$

$$C' = 1,43 \text{ m/s (Célérité , vitesse de propagation des vagues) .}$$

$$L' = C' \times T' = 1,43 \text{ m . (Longueur d'onde) .}$$

Caractéristiques de la houle à l'amont des flotteurs

$$H = 27 \text{ cm}$$

$$b = 0,49 \text{ m}$$

$$T = 1,0 \text{ s}$$

$$h = 10,3 \text{ cm}$$

$$C = 1,43 \text{ m/s}$$

$$L = C \times T = 1,43 \text{ m .}$$

Puissance véhiculée par la houle .

$$P_v = \frac{\rho \cdot g \cdot b \cdot h^2 \cdot L}{16 T} \left[1 + \frac{\frac{4 \cdot \pi \cdot H}{L}}{\text{Sh} \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot H}{L}} \right]$$

$$P_v = 5,35 \text{ Watts}$$

Puissance restante

$$P_r = \frac{\rho \cdot g \cdot b \cdot h'^2 \cdot L'}{16 T'} \left[1 + \frac{\frac{4\pi H}{L}}{\text{Sh } \frac{4\pi H}{L}} \right]$$

$$P_r = 4,1 \text{ Watts}$$

Puissance absorbée par les flotteurs P_a

$$P_a = P_v - P_r = 5,35 - 4,1$$

$$P_a = 1,25 \text{ watts}$$

Calculs

$$Q_1 = \frac{V_1}{t_1}$$

$Q_{\text{moyen}} = Q_{\text{réel}}$ (débit moyen = débit réel mesuré).

$$Q_{\text{moyen}} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3}$$

Q_{th} = débit théorique (Volume engendré par le déplacement du piston).

$$Q_{\text{th}} = \frac{(S_1 + S_2) \cdot c}{T}$$

T = Période des oscillations

L'axe du piston accomplit un aller-retour en 1 période

P_r = Puissance réelle

$$P_r = \rho \cdot g \cdot Q_r \cdot H \quad (\text{Puissance réelle})$$

$$P_{th} = \rho \cdot g \cdot Q_{th} \cdot H \quad (\text{Puissance théorique}).$$

$$\eta_r = \frac{P_r}{P_a} \quad (\text{Rendement réel}).$$

$$\eta_{th} = \frac{P_{th}}{P_a} \quad (\text{Rendement théorique})$$

$$\eta_{gr} = \frac{P_r}{P_v} \quad (\text{Rendement global réel}).$$

$$\eta_{gth} = \frac{P_{th}}{P_v} \quad (\text{Rendement global théorique}).$$

Les pertes (fuites internes , frottements , pertes de charges)
sont égales à $P_{th} - P_r$.

H m	t_1 s	t_2 s	t_3 s	V_1 cm ³	V_2 cm ³	V_3 cm ³	Q_1 cm ³ /s	Q_2 cm ³ /s	Q_3 cm ³ /s	$Q_r = Q_m$ cm ³ /s	h cm	Q_{emp} cm ³ /s	C cm	Q_{th} cm ³ /s	P_r W	P_{th} W	η_r %	η_{th} %	η_{gr} %	η_{gth} %	Parte	
0,0	6,7	6,5	7,6	207	201	231	30,90	30,92	30,39	30,74	2,70	26,70	4,90	45,64	/	/	/	/	/	/	/	/
0,5	7,9	5,8	7,6	191	143	185	24,18	24,66	24,34	24,39	2,40	19,96	4,60	42,85	0,120	0,210	9,60	16,80	2,45	4,29	0,09	0,09
1,0	9,6	8,8	8,3	191	185	173	19,90	21,02	20,84	20,59	2,20	16,10	4,20	39,12	0,202	0,384	16,16	30,72	4,13	7,85	0,18	0,18
1,5	9,6	10,1	8,8	155	165	145	16,15	16,34	16,48	16,32	1,90	11,21	3,60	33,53	0,240	0,493	19,20	39,44	4,91	10,08	0,25	0,25
2,0	8,8	12,2	14,2	119	153	175	13,52	12,54	12,32	12,79	1,70	8,52	3,40	31,61	0,251	0,621	20,08	49,68	5,13	12,70	0,37	0,37
2,5	10,6	16,1	13,8	107	139	130	10,09	8,63	9,42	9,38	1,50	6,25	3,20	29,81	0,230	0,731	18,40	58,48	4,70	14,95	0,50	0,50
3,0	19,2	23,2	19,8	119	147	133	6,20	6,34	6,72	6,42	1,20	3,60	3,10	28,88	0,189	0,850	15,12	68,00	3,87	17,38	0,66	0,66
3,5	15,5	28,8	16,3	81	135	95	5,23	4,69	5,83	5,25	1,10	2,91	3,00	27,95	0,180	0,960	14,40	76,80	3,68	19,63	0,78	0,78

$$\underline{\underline{l = 25 \text{ cm}}}$$

H m	t_1 s	t_2 s	t_3 s	V_1 cm ³	V_2 cm ³	V_3 cm ³	Q_1 cm ³ /s	Q_2 cm ³ /s	Q_3 cm ³ /s	$Q_r=Q_m$ cm ³ /s	h cm	Q_{emp} cm ³ /s	L cm	Q_{th} cm ³ /s	P_r W	P_{th} W	η_r %	η_{th} %	η_{gr} %	η_{gth} %	Per W
0,0	8,3	6,8	7,1	280	243	250	33,73	35,74	35,21	34,89	2,90	31,85	5,00	46,58	/	/	/	/	/	/	/
0,5	6,4	6,3	5,2	189	187	156,5	29,53	29,68	30,1	29,77	2,65	25,49	4,60	42,85	0,146	0,210	11,68	16,80	2,99	4,29	0,06 0,064
1,0	10,5	9,5	8,5	237	217	205	22,57	22,84	24,12	23,18	2,40	19,96	4,20	39,12	0,227	0,384	18,16	30,72	4,64	7,85	0,15 0,157
1,5	8,2	7,9	4,1	181	179	101	22,07	22,66	24,63	23,12	2,30	17,97	3,90	36,33	0,340	0,535	27,20	42,80	6,95	10,94	0,19 0,195
2,0	9,2	10,7	10,9	199	225	229	21,63	21,03	21,01	21,22	2,20	16,10	3,60	33,53	0,416	0,658	33,28	52,64	8,51	13,46	0,24 0,242
2,5	9,6	13,7	11,6	169	239	200	17,60	17,45	17,24	17,43	2,00	12,72	3,40	31,67	0,427	0,777	34,16	62,16	8,73	15,89	0,35 0,350
3,0	11,3	14,8	15,9	163	211	213	14,42	14,26	13,40	14,03	1,80	9,81	3,20	29,81	0,413	0,877	33,04	70,16	8,43	17,93	0,46 0,464
3,5	18,6	16,2	18,7	161	141	169	8,66	8,70	9,04	8,80	1,40	5,27	3,00	27,95	0,302	0,960	24,76	76,80	6,18	19,63	0,65 0,658

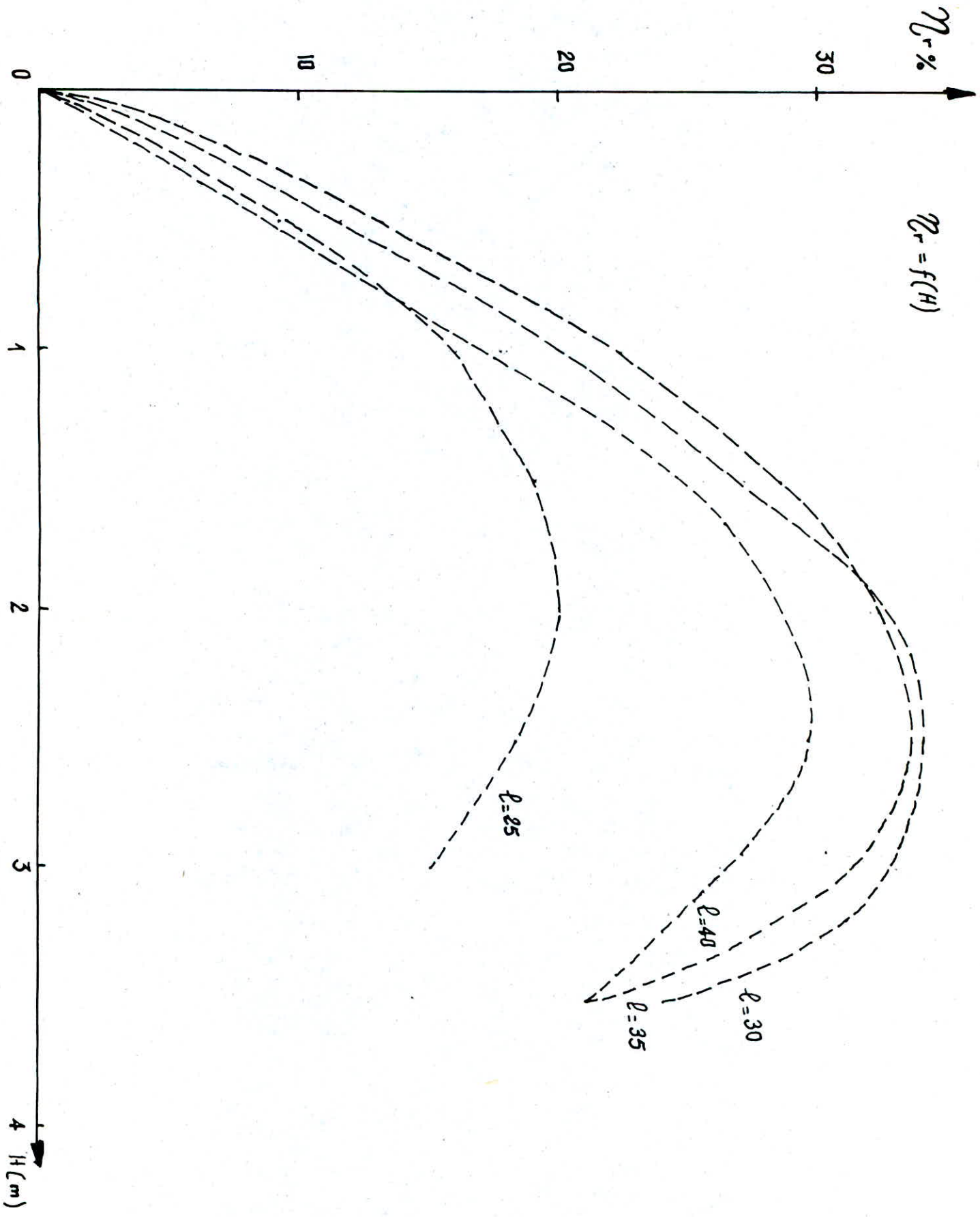
$l = 30$ cm

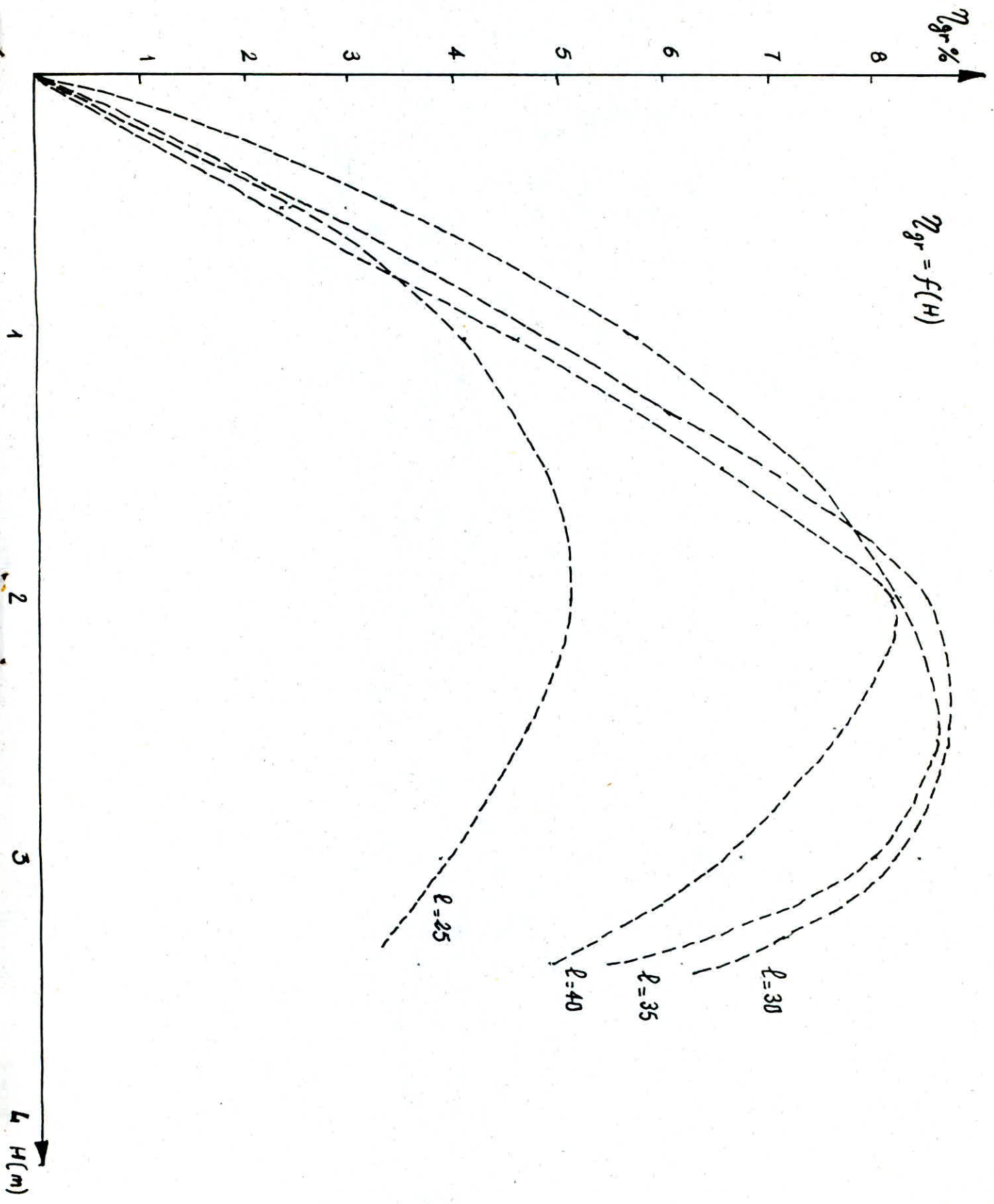
H m	t ₁ s	t ₂ s	t ₃ s	V ₁ cm ³	V ₂ cm ³	V ₃ cm ³	Q ₁ cm ³ /s	Q ₂ cm ³ /s	Q ₃ cm ³ /s	Q _{r=Q_{in}} cm ³ /s	h cm	Q _{emp} cm ³ /s	L cm	Q _{Th} cm ³ /s	P _r W	P _{Th} W	η _r %	η _{Th} %	η _{gr} %	η _{gth} %	P _{ext} W	
0,0	5,1	6,8	6,7	185	249	237	36,27	36,62	35,37	36,09	2,80	29,21	5,20	48,44	/	/	/	/	/	/	/	/
0,5	4,2	4,4	5,4	143	151	183	34,05	34,32	33,89	34,09	2,70	26,70	4,50	41,92	0,167	0,206	13,36	16,48	3,42	4,21	0,039 0,03	
1,0	4,0	4,2	6,1	118	121	171	29,50	28,81	28,03	28,79	2,60	24,32	4,20	39,12	0,282	0,384	22,56	30,72	5,77	7,85	0,102 0,102	
1,5	5,2	6,2	6,9	125	151	170	24,04	24,35	24,64	24,34	2,40	19,96	4,00	37,26	0,358	0,548	28,64	43,84	7,32	11,21	0,190 0,196	
2,0	5,9	6,6	7,6	123	135	157	20,85	20,45	20,66	20,65	2,10	14,35	3,50	32,60	0,405	0,640	32,40	51,20	8,28	13,09	0,235 0,235	
2,5	8,8	6,4	7,7	141	119	131	16,02	18,59	17,01	17,21	1,95	11,95	3,30	30,74	0,422	0,754	33,76	60,32	8,63	15,42	0,33	
3,0	9,5	10,7	5,6	133	133	75	14,00	12,43	13,39	13,27	1,70	8,52	3,20	29,81	0,391	0,877	31,28	70,16	8,00	17,93	0,486 0,48	
3,5	14,2	15,1	12,7	115	120	91	8,10	7,95	7,17	7,14	1,30	4,39	3,00	27,95	0,266	0,960	21,28	76,80	5,44	19,63	0,694 0,69	

l = 35 cm

H m	t ₁ s	t ₂ s	t ₃ s	V ₁ cm ³	V ₂ cm ³	V ₃ cm ³	Q ₁ cm ³ /s	Q ₂ cm ³ /s	Q ₃ cm ³ /s	Q _r = Q _m cm ³ /s	h cm	Q _{emp} cm ³ /s	L cm	Q _{th} cm ³ /s	P _r W	P _{th} W	η _r %	η _{th} %	η _{gr} %	η _{gth} %	Perte W	
0,0	4,1	6,1	5,4	165	247	215	40,24	40,49	39,81	40,18	3,00	34,64	5,50	51,23	—	—	—	—	—	—	—	—
0,5	5,9	5,6	5,7	139	133	135	23,56	23,75	23,68	22,66	2,40	19,96	5,00	46,58	0,116	0,228	9,28	18,24	2,37	4,66	0,112	
1,0	5,2	6,6	8,8	123	144	199	23,65	21,82	22,61	22,69	2,30	17,97	4,80	44,71	0,223	0,439	17,84	35,12	4,56	8,98	0,216	
1,5	6,3	7,1	6,1	137	157	133	21,75	22,11	21,80	21,89	2,20	16,10	4,50	41,92	0,322	0,617	25,76	49,36	6,58	12,62	0,295	
2,0	6,1	5,8	7,7	123	119	159	20,16	20,52	20,65	20,44	2,10	14,35	4,00	37,26	0,401	0,731	32,08	58,48	8,20	14,95	0,330	
2,5	8,3	9,7	9,2	125	147	141	15,06	15,15	15,33	15,18	1,90	11,21	4,00	37,26	0,372	0,914	29,76	73,12	7,61	18,69	0,542	
3,0	10,7	8,6	7,3	121	95	81	11,31	11,05	11,10	11,15	1,50	6,25	3,80	35,40	0,328	1,042	26,24	83,36	6,71	21,31	0,714	
3,5	10,9	12,8	12,5	81	87	84	7,43	6,80	6,72	6,98	1,30	4,39	3,50	32,60	0,240	1,119	19,20	89,56	4,91	22,88	0,879	

$$\underline{\underline{l = 40 \text{ cm}}}$$





Q_r (cm³/s)

$$Q_r = f(H)$$

40

30

20

10

$l = 35$

$l = 30$

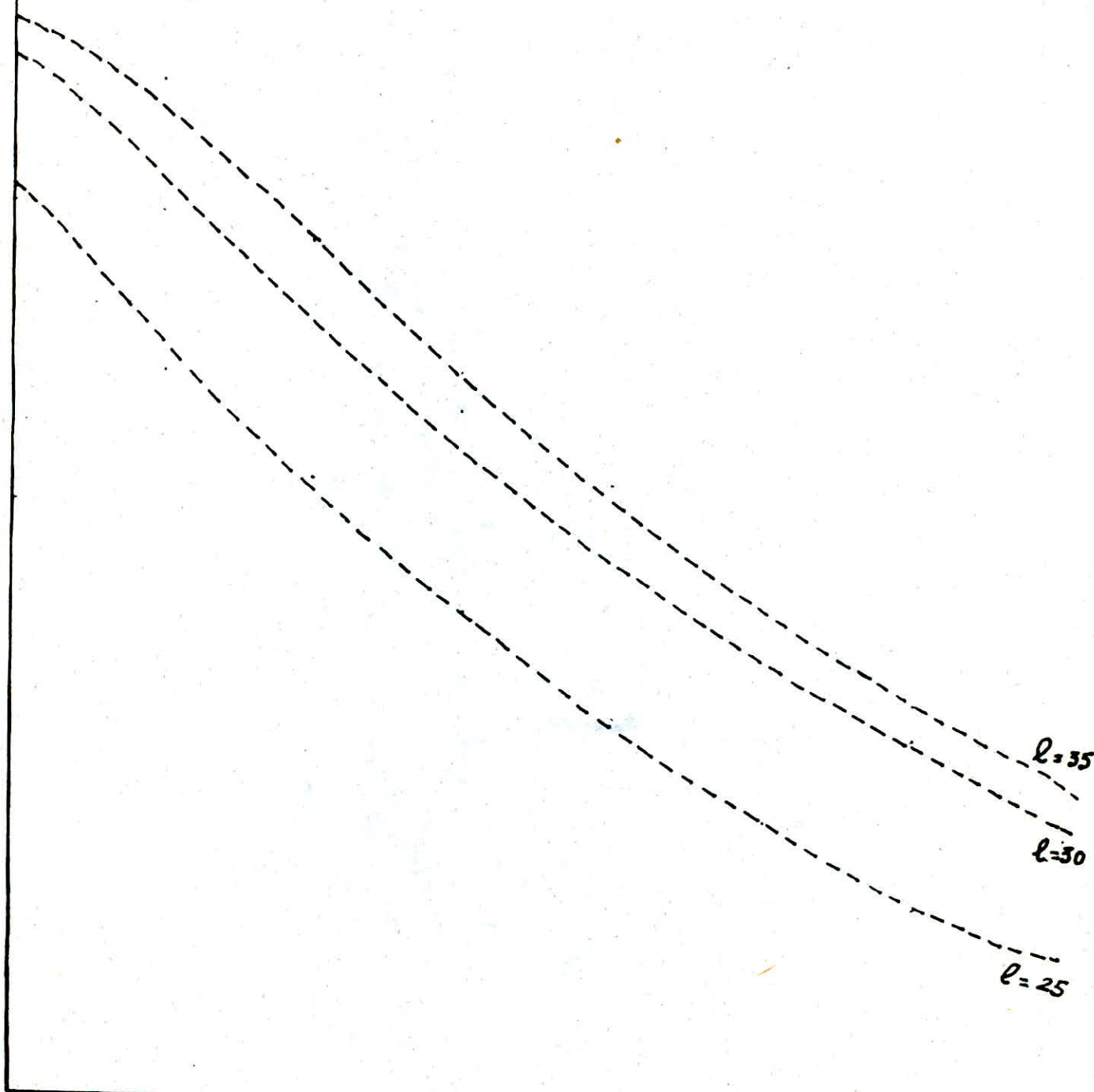
$l = 25$

1

2

3

H (m)



(cm/s)

Courbe d'étalonnage
du deversoir

$$Q_r = f(h)$$

25

20

15

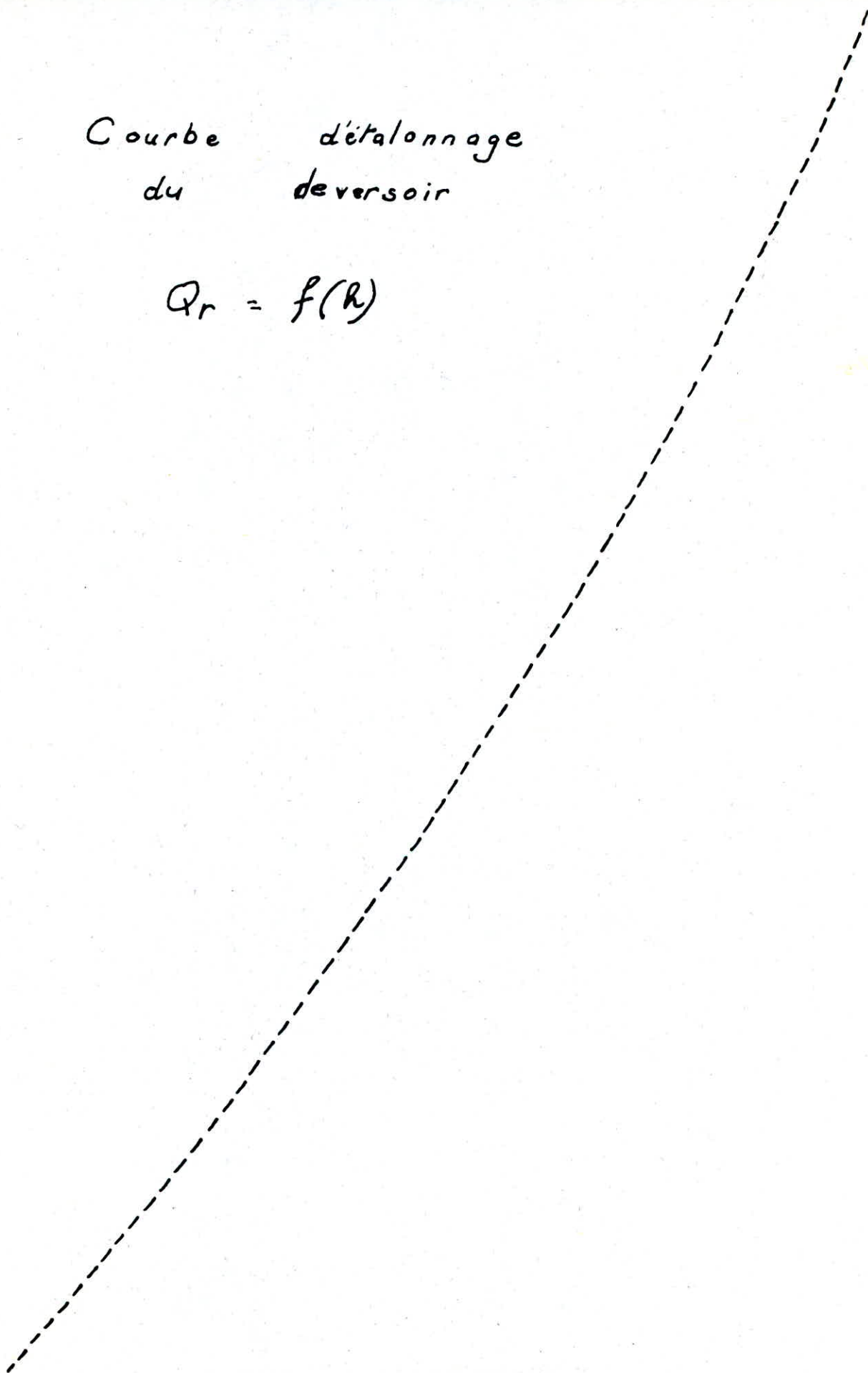
10

1.5

2

2.5

h



Interprétations

- Le rendement réel maximum de la pompe est atteint pour une charge $H = 2,5 \text{ m}$, un débit $Q_r = 17,43 \text{ cm}^3/\text{s}$ et une longueur du bras de la tige $l = 30 \text{ cm}$.

$$\eta_{r \max} = 34,16 \%$$

- Le rendement global réel maximum est atteint pour une charge $H = 2,5 \text{ m}$ avec $l = 30 \text{ cm}$

$$\eta_{gr \max} = 8,73 \%$$

- Le rendement maximum théorique est $\eta_{th \max} = 89,56 \%$

$$l = 40 \text{ cm}$$

$$H = 3,5 \text{ m}$$

$$Q_{th} = 32,60 \text{ cm}^3/\text{s}$$

- Le rendement global théorique max. $\eta_{gth} = 22,88 \%$

$$l = 40 \text{ cm}$$

$$H = 3,5 \text{ m}$$

$$Q_{th} = 32,60 \text{ cm}^3/\text{s}$$

IX Conclusion

Notre étude consistait à faire actionner une pompe à l'aide de l'énergie véhiculée par les vagues.

Cette pompe est destinée à refouler l'eau à une hauteur fixée arbitrairement à 5 mètres.

Les résultats que nous avons obtenu lors de l'expérimentation nous ont amené à dire que:

- l'énergie absorbée par les flotteurs n'est pas intégralement transmise au système bielle raccordée à l'axe de la pompe ; et cela est dû au système de transmission.
- Plus la charge augmentait, plus le débit diminuait. Donc pour une meilleure utilisation de la pompe, on adopte une longueur de la tige : $l = 30 \text{ cm}$ et une charge de $2,5 \text{ m}$.
- L'amplitude des vagues était de $10,3 \text{ cm}$.
- La hauteur d'élevation de l'eau était d'environ 4 m .

L'Algérie est particulièrement intéressée par la mise en application d'une centrale houlomotrice vu que notre pays est doté de 1400 km de côte avec une amplitude moyenne de $2,5 \text{ m}$, une longueur d'onde de 150 m et une vitesse de propagation de m/s .

IX Références bibliographiques

ANONYME : Travaux maritimes . Encyclopédie Pratique de la Construction et du Batiment . TOME III . CHAP. IX .

DUCROS . L. : Pompes Hydrauliques et Appareils Elevatoires .

HENRI . L. : Les Energies de la Mer .

Edition . Que sais-je . P.U.F 1979 .

JACQUES B. : Vagues , Marées , Courants Marins

Edition . Que sais-je . P.U.F 1979 .

QUERDANE S. : Thèse de Fin d'étude . Janvier 1978 .

SEMAOUI S. et al. : Générateur de Houle . Conception - Réalisation et Expérimentation . Projet de Fin d'étude . TOME I
E.N.P.A Juin 1977 .

SEMAOUI S. et al : Générateur de Houle . Conception - Réalisation et Expérimentation . Projet de Fin d'étude . TOME II
E.N.P.A. Juin 1977 .

SERRI M. : Energie de la Houle . Conception et Réalisation du canal . Etude Expérimentale . Thèse de Fin d'étude .
E.N.P.A. Janvier 1977 .

