

10/74

UNIVERSITE D'ALGER  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

26x

# THESE DE FIN D'ETUDES

Département - Hydraulique

## CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'EXPLOITATION DE L'ENERGIE DE LA HOULE



Proposée par:  
M. G. DE LAPRAY

Etudiée par:  
RAZKALLAH. H

PROMOTION 1974

UNIVERSITE - D'ALGER

ECOLE - NATIONALE - POLYTECHNIQUE

THESE - DE - FIN - D'ETUDES

CONTRIBUTION - A L'ETUDE - DE

L'EXPLOITATION - DE L'ENERGIE

DE LA HOULE.

Proposée par

M<sup>r</sup> GESA. DE. LA PRAY.

Etudiée par

M<sup>r</sup> RAZKALLAH. Hacène.



PROMOTION 1974

( I )

Que tous les professeurs ayant contribué à ma formation trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance .

je remercie les agents et les professeurs particulièrement Monsieur GEZA LAPRAY chef de département d'Hydraulique pour la formation et l'aide qu'ils m'ont données .

RAZKALLAH HACENE



--SUJET de la Thèse --

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية

الكتبة

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

BIBLIOTHÈQUE

- Etude de la houle
- Confection du bassin à houle
- Etude expérimentale de la transformation de l'énergie de la houle en énergie potentielle accummable
- Recherche de l'accomodation aux variations de la fréquence variation du rapport de transmission .

mesure de la longueur d'onde:  $L = 85 \text{ cm}$

-- INTRODUCTION --

La plupart des ressources naturelles d'énergie possédant une durée de vie, c'est le cas des gisements de pétrole, de houille et de l'uranium.

Pour cela on a eu l'idée d'essayer d'exploiter une énergie offerte par le mouvement oscillatoire de la mer : cette forme d'énergie dont la durée de vie n'a pas de limite est l'énergie de la houle. Nous remarquons qu'un tel mouvement constitué par la marée a déjà fait en France l'objet de réalisation dans l'estuaire de la France. Usine marémotrice.

Etant donnés les inconvénients qui se présentent lors de la réalisation d'une Usine marémotrice à savoir : marnage de 10 m, considérations géologiques de terrain estuaire à faible débit, ce projet a été abandonné ; ( sa réalisation revient plus chère que son exploitation ; rendement faible).

Par contre, l'exploitation de l'énergie apportée par les vagues nous donne des résultats satisfaisant surtout en Méditerranée où l'effet de la marée est négligeable .

Jusqu'à là les chercheurs voulaient transformer l'énergie de la houle directement en force motrice, ce qui présente des difficultés vu la discontinuité de la houle .

Tenant compte de toutes ces difficultés , Mr G.LAPRAY a proposé d'étudier la transformation de l'énergie de la houle en énergie potentielle accumulable; qui a donné un rendement appréciable .

Nous avons réussi avec une houle d'amplitude faible ( quelques centimètres ) à faire monter le liquide à une hauteur remarquable ( 5 m ).

Ceci est l'objet de la présente Etude.

PREMIERE - PARTIE;

ETUDE de L'ENERGIE de la HOULE;

- 1 . 1 Définition: mouvement quasi-périodique de la surface libre de la mer.
- 1 . 2 Aperçu historique.

En 1802 GERSTNER découvre la Houle trochoïdale.  
Poisson ( 1827 ), Kellaud ( 1840 ), Airy ( 1845 ) ont contribué à l'étude de la Houle.  
En 1846 Stokes découvrit la Houle irrotationnelle et 1849 il étudia son énergie.
- 1 . 3 Ondulation de la surface libre.

Une suite indéfinie de vagues ou de lames presque parallèles et presque identiques se propagent de façon semblable uniforme et sans déformation importante vers la côte. L'ensemble des vagues forme la Houle.
- 1 . 4 Classement.
  - a) Houle entretenue: Houle à amplitude constante.
  - b) Houle amortie: amplitude de plus en plus faible.
- 1 . 5 Forme de la Houle.
  - a) Houle cylindrique simple.
  - b) Houle elliptique.

1 . 5 Caractéristiques.

L: Longueur d'onde

h: Amplitude

$$\frac{h}{L} = \text{tg } \alpha : \text{ cambrure}$$

$$\frac{2h}{L} = 2 \text{tg } \alpha : \text{ pente du flan de la vague.}$$

T: période : durée en secondes du parcours L

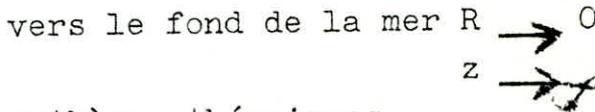
C: celerité de la vague.  $L = cT$

2 Houle cylindrique. ( Houle de GERSTNER ).

2 . 1 Appet physique ( cycloïde ).

Un point matériel liquide décrit un cercle ( R, c ) dans un plan vertical avec  $\omega = \frac{c}{R}$  en même temps que le centre c se déplace en ligne droite avec une celerité c. ( fig 2. 1. a et fig 2.I.b ).

On aura une condition de synchronisation des 2 mouvements qui sont superposés  $T = \frac{2\pi R}{\omega} = \frac{2\pi R}{\frac{c}{R}} = \frac{L}{c} \implies L = \frac{2\pi R c}{\omega}$



2.2. Hypothèses théoriques

- a) on considère que le mouvement est plan. Le mouvement se reproduit identiquement à lui même parallèlement à un plan vertical choisi comme de référence. La surface libre et les surfaces isobares sont cylindriques

( 6 )

b) Profondeur infinie : z infinie par rapport à h mais en réalité z est fini . exple : iles marianes : profondeur = 11km

$$\frac{h}{z} \approx 0 \quad \text{et} \quad \frac{z}{h} \rightarrow \infty$$

2-3 Equation de la cycloïde  
(fig 2;1,6)

$$\theta = \omega t$$

$$\varphi = (\theta)_{t=0} \quad \text{et} \quad \psi = \frac{\varphi}{\omega} \quad \text{déphasage}$$

le mouvement n'est pas sémioïdal

$x_c$  : abscise du centre du cercle c.

$z_c$  : ordonnée du centre du cercle c.

R : rayon du cercle .  $r_0$  rayon pour  $z = 0$

R suit une loi exponentielle :  $R = r_0 e^{-Bz_c}$  où  $B = \text{cte}$

$$x = x_c + r_0 \cos(\theta - \varphi) \quad x = x_{c0} + r_0 \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_0}{L} \right)$$

$$z = z_c + r_0 \sin(\theta - \varphi) \quad z = z_{c0} + r_0 \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_0}{L} \right)$$

#### 2.4 Trochoïde

(figure 2.4)  $r < r_0 \Rightarrow r = r_0 e^{-bz_c} \quad z_c > z_{c0}$

$$\Delta z = z_c - z_{c0} \Rightarrow \delta \rightarrow \delta \quad \text{et} \quad z_c \rightarrow \rho$$

Roulement sans glissement  $\Leftrightarrow$  condition de synchronisation

$$T = \frac{1}{c} = \frac{2 \pi}{\omega} \Rightarrow L = \frac{2 \pi c}{\omega}$$

$x = x_c + R_0 e^{-Bz_c} \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_c}{L} \right)$  équation de la trochoïde avec

$z = z_c + R_0 e^{-Bz_c} \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_c}{L} \right)$  synchronisation.

- 3.1. - CONDITION DE CONTINUITÉ -

$$dV = y dx dy \text{ où } y = 1 \quad ( \dots )$$

$$dV = y \cdot \Delta \cdot dx_c \cdot dz_c \text{ où } \Delta \dots$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial x_c} & \frac{\partial x}{\partial z_c} \\ \frac{\partial y}{\partial x_c} & \frac{\partial y}{\partial z_c} \end{vmatrix}$$

$$\Rightarrow dV = y \left( \frac{\partial x}{\partial x_c} \frac{\partial y}{\partial z_c} - \frac{\partial x}{\partial z_c} \frac{\partial y}{\partial x_c} \right) dx_c dz_c$$

$$\boxed{\frac{\partial \Delta}{\partial t} = 0}$$

$$R = R_0 e^{-B z_c} \quad \text{et} \quad \frac{\partial R}{\partial z_c} = -B R_0 e^{-B z_c}$$

$$\varphi = \frac{2\pi \tilde{x}_c}{L} \Rightarrow \frac{\partial \varphi}{\partial x_c} = \frac{2\pi}{L}$$

$$\frac{\partial x}{\partial x_c} = 1 - R \sin\left(\frac{2\pi \tilde{x}_c}{L} - \varphi\right) \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial x_c}\right) = 1 + \left[ R \sin\left(\frac{2\pi \tilde{x}_c}{L} - \varphi\right) \right] \left[ \frac{2\pi}{L} \right]$$

$$\frac{\partial y}{\partial z_c} = 1 + \frac{\partial R}{\partial z_c} \sin\left(\frac{2\pi \tilde{x}_c}{L} - \varphi\right) = 1 - B R \sin\left(\frac{2\pi \tilde{x}_c}{L} - \varphi\right)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_c} = R \cos\left(\frac{2\pi \tilde{x}_c}{L} - \varphi\right) \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial x_c}\right) = -\frac{2\pi R}{L} \cos\left(\frac{2\pi \tilde{x}_c}{L} - \varphi\right)$$

$$\frac{\partial x}{\partial z_c} = -B R \cos\left(\frac{2\pi \tilde{x}_c}{L} - \varphi\right)$$

$$\Delta = 1 - \frac{2\pi B R^2}{L} + \left(\frac{2\pi}{L} - B\right) R \sin\left(\frac{2\pi \tilde{x}_c}{L} - \varphi\right)$$

$$\frac{\partial \Delta}{\partial t} = 0 \Rightarrow \left(\frac{2\pi}{L} - B\right) = 0 \Rightarrow$$

$$\boxed{B = \frac{2\pi}{L}}$$

3.2. - CONDITION ISOBARE -

$$p = p_{at}$$

$$\text{ou } p = c^{te} \Rightarrow \boxed{\frac{\partial p}{\partial t} = 0}$$

$$\frac{dV_x}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = f_x = 0$$

$$\frac{dV_y}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = f_y = g$$

$$\frac{dV_x}{dt} = \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$$

$$\frac{dV_y}{dt} = \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$(1) \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = f_x = 0 \Rightarrow \rho \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (p_{gy} - p)$$

$$(2) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = g \Rightarrow \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g = \frac{\partial}{\partial y} (p_{gy} - p)$$

$$(3) \rho \left( \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \cdot \frac{\partial x}{\partial x_c} + \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \cdot \frac{\partial y}{\partial x_c} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (p_{gy} - p) \frac{\partial x}{\partial x_c} + \frac{\partial}{\partial y} (p_{gy} - p) \frac{\partial y}{\partial x_c} = \frac{\partial}{\partial x_c} (p_{gy} - p)$$

$$(4) \rho \left( \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \cdot \frac{\partial x}{\partial z_c} + \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \cdot \frac{\partial y}{\partial z_c} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (p_{gy} - p) \frac{\partial x}{\partial z_c} + \frac{\partial}{\partial y} (p_{gy} - p) \frac{\partial y}{\partial z_c} = \frac{\partial}{\partial z_c} (p_{gy} - p)$$

$$df = \frac{\partial f}{\partial x_c} dx_c + \frac{\partial f}{\partial z_c} dz_c = (3) dx_c + (4) dz_c = \frac{\partial}{\partial x_c} (p_{gy} - p) dx_c + \frac{\partial}{\partial z_c} (p_{gy} - p) dz_c$$

$$x = x_c + R \cos\left(\frac{2\pi t}{T} - \varphi\right) \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\partial x}{\partial t} = -R \frac{2\pi}{T} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \varphi\right)$$

$$y = y_c + R \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \varphi\right) \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -R \frac{4\pi^2}{T^2} \cos\left(\frac{2\pi t}{T} - \varphi\right)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -R \frac{4\pi^2}{T^2} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \varphi\right) \Leftrightarrow \frac{\partial y}{\partial t} = R \frac{2\pi}{T} \cos\left(\frac{2\pi t}{T} - \varphi\right)$$

Rappelons que  $R = R_0 e^{-Bz_c} = R_0 e^{-\frac{2\pi}{L} z_c}$

$$\frac{\partial x}{\partial x_c} = 1 + \frac{2\pi R}{L} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \varphi\right) ; \quad \frac{\partial x}{\partial z_c} = \frac{2\pi}{L} R^2 \cos\left(\frac{2\pi t}{T} - \varphi\right)$$

$$\frac{\partial z}{\partial x_c} = -R \frac{2\pi}{L} \cos\left(\frac{2\pi t}{T} - \varphi\right) ; \quad \frac{\partial z}{\partial z_c} = 1 - BR \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \varphi\right)$$

$$(3) = \rho \left[ -\frac{4R\pi^2}{T^2} \cos\left(\frac{2\pi t}{T} - \varphi\right) \left[ 1 + \frac{2\pi R}{L} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \varphi\right) + \frac{4R\pi^2}{T^2} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \varphi\right) \right] \right]$$

$$(3) = \frac{\partial}{\partial x_c} (\rho g z - p)$$

Par intégration au calcul

$$(\rho g z - p)$$

$$\rho g z - p = \int (3) dx_c \quad \text{après simplification}$$

$$\rho g z - p = \frac{2\pi^2 \rho R L}{T^2} \left[ \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_c}{L} \right) + \frac{\pi R L}{2} \left[ \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_c}{L} \right) \frac{L}{2\pi R} \right] - \frac{2\pi^2 R^2}{T^2} \right]$$

$$p = \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_c}{L} \right) \left[ \rho g R - \frac{2\pi^2 R}{T^2} \right] + \rho g z + \frac{2\pi^2 \rho R^2}{T^2}$$

Nous constatons que  $p$  ne dépend pas de  $t$

$$p = \rho g z_c + \frac{2\pi^2 \rho R^2}{T^2} = \rho \left[ g z_c + \frac{2\pi^2 R^2}{T^2} \right]$$

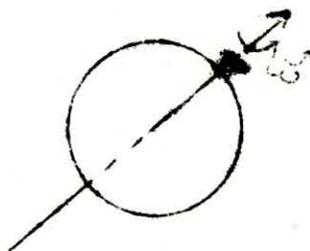
$$\text{d'où } \boxed{\frac{\partial p}{\partial t} = 0}$$

### 3.3. - VECTEUR TOURBILLON (Houe de G6STNER)

$$\vec{\omega}_T = \frac{1}{2} \text{rot } \vec{v} = \frac{1}{2} \nabla \wedge \vec{v}$$

$$\vec{\omega}_T = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ v_x & v_y & v_z \end{vmatrix}$$

mouvement plan  $\Rightarrow \frac{\partial}{\partial z} = 0$



$$\bar{\omega}_T = \begin{vmatrix} 1 & \bar{\gamma} & \bar{k} \\ \frac{\partial \psi}{\partial x} & 0 & \frac{\partial \psi}{\partial y} \\ \psi & 0 & \psi_y \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \bar{\gamma} \left( \frac{\partial \psi_x}{\partial y} - \frac{\partial \psi_y}{\partial x} \right) = \bar{\gamma} \omega_y$$

$$2 \omega_y = \left( \frac{\partial \psi_x}{\partial y} - \frac{\partial \psi_y}{\partial x} \right) \Rightarrow \begin{cases} \psi_x = \frac{\partial \psi}{\partial x} = -\frac{2\pi R}{T} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \varphi\right) \\ \psi_y = \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{2\pi R}{T} \cos\left(\frac{2\pi t}{T} - \varphi\right) \end{cases}$$

$$\frac{\partial \psi_x}{\partial y} = -\frac{2\pi^2}{T} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \varphi\right) \frac{\partial R}{\partial y} = \frac{\partial \psi_x}{\partial x_c} \cdot \frac{\partial x_c}{\partial y} + \frac{\partial \psi_x}{\partial z_c} + \frac{\partial \psi_x}{\partial y}$$

$$\frac{\partial \psi_x}{\partial x_c} = \frac{2\pi R}{T} \frac{2\pi}{L} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x_c}{L}\right)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial \psi_x}{\partial x_c} \cdot \frac{\partial x_c}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z_c} \cdot \frac{\partial z_c}{\partial x} ; \quad \frac{\partial \psi_x}{\partial x_c} = \frac{4\pi^2 R}{TL} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_c}{L}\right)$$

$$\frac{\partial \psi_x}{\partial z_c} = \frac{\partial \psi_x}{\partial x_c} \cdot \frac{\partial x_c}{\partial z} + \frac{\partial \psi_x}{\partial z_c} \cdot \frac{\partial z_c}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \psi_x}{\partial z_c} = \frac{2\pi^2 BR}{T} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_c}{L}\right) = \frac{4\pi^2 R}{TL} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_c}{L}\right)$$

$$\frac{\partial x_c}{\partial y} = \frac{L}{2\pi R \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_c}{L}\right)} \quad \text{et} \quad \frac{\partial z_c}{\partial y} = \frac{1}{1 - BR \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_c}{L}\right)}$$

$$\frac{\partial \psi_x}{\partial y} = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{[1 - BR \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_c}{L}\right) + BR \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_c}{L}\right)]}{1 - BR \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_c}{L}\right)}$$

$$\frac{\partial \psi_x}{\partial y} = \frac{2\pi}{T}$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{4\pi^2 R}{TL} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_c}{L}\right) \cdot \frac{1}{1 + \frac{2\pi R}{L} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_c}{L}\right)} + \frac{2\pi}{T}$$

$$\omega_y = -\frac{2\pi}{T} + \frac{2\pi^2 R}{TL} \left[ \frac{\cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_c}{L}\right)}{1 - \frac{2\pi R}{L} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_c}{L}\right)} - \frac{\sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_c}{L}\right)}{1 + \frac{2\pi R}{L} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_c}{L}\right)} \right]$$

$$\omega_y \neq 0$$

d'où le  $\omega \neq 0$  ceci définit la houle rotationnelle.

#### 4 - HOULE DE STOKES

L'énergie est transformé en travail de déformation des constructions portuaires.

##### 4-1 Les hypothèses de stokes

$$x = x_c + R_0 e^{-\frac{2\pi}{L}z} \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$
$$z = z_c + R_0 e^{-\frac{2\pi}{L}z} \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

Stokes propose une autre forme d'équation en changeant  $x_c$  en  $s_c$  et  $z_c$  en  $z$

$$x = x_c + R_0 e^{-\frac{2\pi}{L}z} \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$
$$z = z_c + R_0 e^{-\frac{2\pi}{L}z} \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

##### 4-2 Le potentiel de vitesse

$$\vec{v} = \text{grad } \phi = \vec{i} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \vec{k} \frac{\partial \phi}{\partial z} = \vec{i} v_x + \vec{k} v_z$$

$$v_x = \frac{\partial x}{\partial t} \quad \text{et} \quad v_z = \frac{\partial z}{\partial t} \quad ;$$

$$d\phi = v_x dx + v_z dz$$

$$\phi = \int v_x dx + \int v_z dz$$

$$\phi = -\frac{2\pi R}{T} \int \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) dx + \frac{2\pi R_0}{T} \int e^{-\frac{2\pi}{L}z} dz + c$$

$$\phi = -\frac{L}{T} R_0 e^{-\frac{2\pi}{L}z} \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) + c$$

4-3 Vecteur tourbillon

$$\text{rot } \vec{v} = 0 \text{ car } \vec{v} = \text{grad } \phi$$

$$\text{rot grad } \phi = 0 \quad (\text{Théorème de LAGRANGE})$$

d'où  $\vec{\omega}_t = \text{rot } \vec{v} = 0 \Rightarrow$  Mouvement irrotationnel

4-4 Condition de continuité

$$\text{div } \vec{v} = \nabla \cdot \vec{v} = \left( \bar{c} \frac{\partial}{\partial x} + \bar{k} \frac{\partial}{\partial z} \right) (i v_x + k v_z)$$

$$\text{div } \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial z} = \left( \frac{4 \pi^2 R}{L T} - \frac{4 \pi^2 R}{L T} \right) \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) = 0$$

$$\text{div } \vec{v} = 0 = \Delta \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

$$\boxed{\text{div } \vec{v} = 0}$$

4-5 Surface Isobare

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{dv_x}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho \\ \rho \frac{dv_z}{dt} &= -\rho - \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \right\} \vec{v}(x, t, z)$$

$$d\vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial t} dt + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx + \frac{\partial v_x}{\partial z} dz$$

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z}$$

$$\frac{dv_z}{dt} = \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v^2}{2} \right)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v_x^2 + v_z^2}{2} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v^2}{2} \right) = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} dx + \frac{\partial v_z}{\partial t} dz + d \left( \frac{v^2}{2} \right) = g dz - \frac{1}{\rho} dp \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) \quad \text{et} \quad \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} dx + \frac{\partial v_z}{\partial t} dz = d \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)$$

d'où (1) devient  $d \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) + d \left( \frac{v^2}{2} \right) = g dz - \frac{1}{\rho} dp$   
en intégrant

$$\boxed{\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{v^2}{2} = g z - \frac{p}{\rho} + f(t) \quad (2)}$$

#### 4-6. Calcul de la période

Derivant l'équation (2)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + 0 &= g \frac{\partial z}{\partial t} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{df}{dt} \\ \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - g \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} &= \frac{df}{dt} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} f'(t) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{v^2}{2} \right) &= 0 \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= 0 \end{aligned}$$

en tenant compte des conditions initiales

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - g \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \implies \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = g \frac{\partial z}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{2\pi L R}{T^2} \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{L}{T} R^2 \frac{4\pi^2}{T^2} \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{4 \tilde{\omega}^2 R L}{T^3} \cos 2\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) = g \frac{2\tilde{\omega}}{T} R \cos 2\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) \quad (I4)$$

d' où après simplification on aura.

$$\frac{2 \tilde{\omega} L}{T^2} g \implies T = \sqrt{\frac{2\tilde{\omega} L}{g}}$$

4. 7. Calcul de la célérité.

$$L = cT \implies c = \frac{L}{T} = \frac{L}{\sqrt{\frac{2\tilde{\omega} L}{g}}} = \sqrt{\frac{g \cdot L}{2\tilde{\omega}}} = c$$

Nous remarquons que la Houle de stocks est plus simple compte tenu des formules de sa période et de sa célérité.

4. 8. Comparaison de la Houle de stocks et celle de GESTNER

La seule différence qui existe est que stocks confond la position instantanée de  $P(x, z)$  avec la position instantanée du centre du cercle générateur  $C(x_c, z_c)$ .

cela revient à dire que la cambrure  $\tan \alpha = \frac{h}{L}$  est faible pour stocks.

5. Houle quelconque

5.1. Houle irrotationnelle ou Houle à profondeur finie.

$h$ : profondeur limitée ( construction portuaire ).

$$a) \phi = \frac{L}{T} R \cos 2\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) = \frac{-c}{2} \operatorname{ch} \frac{2\tilde{\omega}}{L} (z+n) \cos 2\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

au fond de la mer  $z=h$  et  $v_z = 0$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = v_z = \frac{-c}{2} \cos 2\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) \frac{d}{dz} \operatorname{ch} \frac{2\tilde{\omega}}{L} (z+h)$$

$$\text{ch} \frac{z\tilde{\omega}}{L} (z+H) = \frac{1}{2} \left( e^{\frac{z\tilde{\omega}}{L} (z+H)} + e^{-\frac{z\tilde{\omega}}{L} (z+H)} \right)$$

$$v_z = -\frac{c}{2} \frac{z\tilde{\omega}}{L} \text{sh} \frac{z\tilde{\omega}}{L} (z+H) \cos z\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

b) à la surface libre  $p = p_{at}$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} - g z = f(t) \implies \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} = g z$$

$$p = \rho g z - \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad ; \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{c}{2} \text{ch} \frac{z\tilde{\omega}}{L} (z+H) \frac{z\tilde{\omega}}{T} \sin z\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

$$p = \rho g z - \rho \frac{c\tilde{\omega}}{T} \text{ch} \frac{z\tilde{\omega}}{L} (z+H) \sin z\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

$$\rho g z_{pa} = p_{at} + \rho \frac{c\tilde{\omega}}{T} \text{ch} \frac{z\tilde{\omega}}{L} (z+H) \sin z\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

$$z_{pa} = \frac{p_{at}}{\rho g} + \frac{c\tilde{\omega}}{gT} \text{ch} \frac{z\tilde{\omega}}{L} H \sin z\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) = f(x, t)$$

$$z_{\text{max}} = \frac{p_{at}}{\rho g} + \frac{c\tilde{\omega}}{gT} \text{ch} \frac{z\tilde{\omega}}{L} H$$

$$z_{\text{min}} = \frac{p_{at}}{\rho g} - \frac{c\tilde{\omega}}{gT} \text{ch} \frac{z\tilde{\omega}}{L} H$$

$$h = \frac{z\tilde{\omega}c}{gT} \text{ch} \frac{z\tilde{\omega}}{L} H$$

Condition isobare

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{v^2}{2} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} - g \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{df}{dt}$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = g \frac{\partial z}{\partial t} = -g v_z = -g \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

$$\boxed{\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0}$$

5-2 Calcul de la période

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \text{ et } \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

$$c \tilde{\omega} \left[ \frac{2 \tilde{\omega}}{T^2} \operatorname{ch} \frac{2 \tilde{\omega}}{L} (z+H) \cos 2 \tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) - \frac{g}{L} \operatorname{sh} \frac{2 \tilde{\omega}}{L} (z+H) \cos \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) \right]$$

$$\operatorname{ch} \frac{2 \tilde{\omega}}{L} (z+H) = \frac{\operatorname{sh}(\quad)}{\operatorname{ch}(\quad)} = \frac{c \tilde{\omega} L}{g T^2}$$

$$\text{d'où } T^2 = \frac{2 \tilde{\omega} L}{g \operatorname{ch} \frac{2 \tilde{\omega}}{L} (z+H)}$$

$$T = \sqrt{\frac{2 \tilde{\omega} L}{g \operatorname{ch} \frac{2 \tilde{\omega}}{L} (z+H)}}$$

5-3 Calcul de la célérité

$$L = c T \Rightarrow c = \frac{L}{T} \Rightarrow$$

$$c = \sqrt{\frac{g L \operatorname{ch} \frac{2 \tilde{\omega}}{L} (z+H)}{2 \tilde{\omega}}}$$

$$\text{si } N \rightarrow \infty \Rightarrow \operatorname{ch} \frac{2 \tilde{\omega}}{L} (z+H) \rightarrow 1$$

$$\text{d'où } c = \sqrt{\frac{g \cdot L}{2 \tilde{\omega}}}$$

On revient à l'hypothèse de Stokes

5-4 Distribution de la pression

$$\nabla^2 \phi(x, z, t) \Rightarrow p = \rho g z - \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} = \rho g z + \frac{\rho c \tilde{\omega}}{T} \operatorname{ch} \frac{2\tilde{\omega}}{L}(z+H) \sin 2\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

$$z = -H$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\rho g H + \frac{\rho c \tilde{\omega}}{T} \sin 2\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) = \rho g H + \frac{\rho c \tilde{\omega}}{T}$$

$$p = \rho g H + \frac{\rho c \tilde{\omega}}{T} \quad \text{et} \quad p = \rho g H - \frac{\rho c \tilde{\omega}}{T}$$

5-5 Les trajectoires

$$v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \dot{x} = -\frac{c}{2} \operatorname{ch} \frac{2\tilde{\omega}}{L}(z+H) \cdot \frac{2\tilde{\omega}}{L} \sin 2\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

$$v_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \dot{z} = -\frac{c \tilde{\omega}}{L} \operatorname{sh} \frac{2\tilde{\omega}}{L}(z+H) \cdot \cos 2\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

$$\text{à } t=0 \Rightarrow \begin{cases} x = x_0 \\ z = z_0 \end{cases}$$

$$dx = v_x dt \Rightarrow x = \int v_x dt$$

$$x = \frac{c \tilde{\omega} T}{2\tilde{\omega} L} \operatorname{ch} \frac{2\tilde{\omega}}{L}(z+H) \cos 2\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) + C_1$$

$$z = -\frac{c \tilde{\omega} T}{2\tilde{\omega} L} \operatorname{sh} \frac{2\tilde{\omega}}{L}(z+H) \sin 2\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) + C_2$$

Elevons au carré x et z on remarque

$$\frac{x^2}{\left( \frac{cT}{2L} \right)^2 \left[ \operatorname{ch} \frac{2\tilde{\omega}}{L}(z+H) \right]^2} + \frac{z^2}{\left( \frac{cT}{2L} \right)^2 \left[ \operatorname{sh} \frac{2\tilde{\omega}}{L}(z+H) \right]^2} = 1$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$$

Equation de l'ellipse

avec  $a = \frac{cT}{2L} \operatorname{ch} \frac{2\pi}{L} (z+H)$

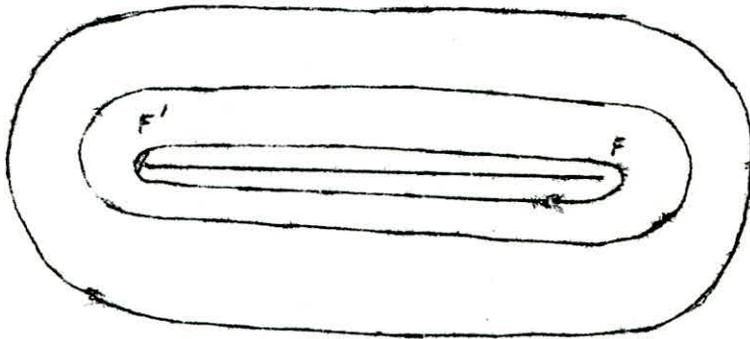
$$b = \frac{cT}{2L} \operatorname{sh} \frac{2\pi}{L} (z+H)$$

$$f^2 = a^2 - b^2 \Rightarrow \frac{cT}{2L} = f$$

Posons  $a_0 = \frac{cT}{2L} \operatorname{ch} \frac{2\pi H}{L}$

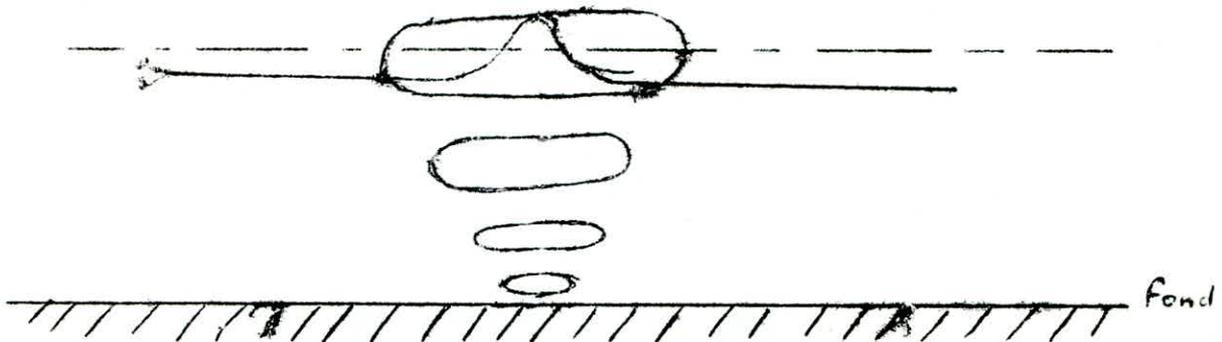
$$b_0 = \frac{cT}{2L} \operatorname{sh} \frac{2\pi H}{L}$$

On aura une famille d'ellipses homofocales



$$z=0 \begin{cases} a_0 \\ b_0 \end{cases}$$

$$z=-H \begin{cases} b_f = 0 \\ a_f = \frac{cT}{2L} \end{cases}$$



6 . E N E R G I E de la Houle6 . 1 Calcul de l'énergie de la Houle de stocks6 . 1 . 1 . calcul de l'énergie cinétiquesoit  $\phi$  potentiel de vitesse.

$$\vec{v} = g \bar{z} d\phi = \nabla \phi$$

$$E_c = \int_{(V)} \frac{\rho}{2} v^2 dV = \frac{\rho}{2} \int_{(V)} v^2 dV$$

$$\nabla(\phi \bar{v}) = \bar{v} \nabla \phi + \phi \nabla \bar{v} \quad \text{mais } \phi \nabla \bar{v} = 0 \quad (\text{condition continuité})$$

$$\nabla(\phi \bar{v}) = \bar{v} \nabla \phi = \bar{v}^2$$

$$E_c = \frac{\rho}{2} \int_{(V)} \nabla(\phi \bar{v}) dV = \frac{\rho}{2} \int_{(V)} dW(\phi \bar{v}) dV$$

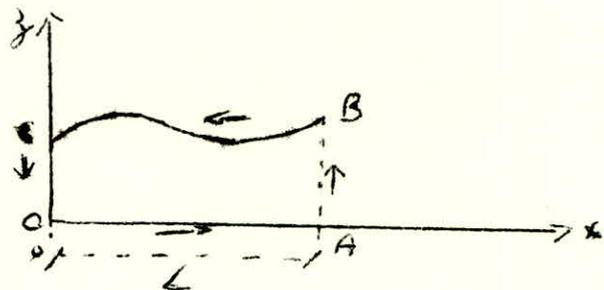
soit  $\Sigma$  la frontière de  $(V)$ 

$$E_c = \frac{\rho}{2} \oint_{(\Sigma)} \phi \bar{n} \bar{v} dA = \frac{\rho}{2} \oint_{(\Sigma)} \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} dA$$

$$\bar{n} \cdot \bar{v} = \left( \bar{i} \frac{dx}{dn} + \bar{k} \frac{dz}{dn} \right) \cdot \left( \bar{i} v_x + \bar{k} v_z \right) = \frac{\partial \phi}{\partial n}$$

$$E_c = \frac{\rho}{2} \oint_{(\Sigma)} \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} dA$$

$dA = y \, ds = y \sqrt{(dx)^2 + (dz)^2} = ds$  car  $dy = 1$  mouvement plan  
pour 1 m de largeur.



Pour 1m de largeur

$$E_c = \frac{\rho}{2} \int_{\Sigma(A)} \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} dA$$

$$\int_{A_2} = - \int_{A_1}$$

$$u_n = \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \text{ sur } \overline{OA} \text{ d'où } \int_{OABC} = \int_{BC} \Rightarrow E_c = \frac{\rho}{2} \int_{BC} \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} dA$$

$$dx = dx$$

$$dn = -dz$$

$$E_{c/m} = - \frac{\rho}{2} \int_0^L \phi \frac{\partial \phi}{\partial z} dx$$

$$\phi = - \frac{L}{T} R \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{L}{T} B R^2 \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) = \frac{2\pi}{T} R^2 \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

$$\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} = - \frac{2\pi L R^2}{T^2} \cos^2 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

en remplaçant  $\phi \frac{\partial \phi}{\partial z}$  par leur valeur dans l'intégrale ci-dessus on trouve

$$E_{c/m} = \frac{\pi \rho L R^2}{T^2} \int_0^L \cos^2 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) dx$$

$$E_{c/m} = \frac{\rho R^2 L^2 \pi}{T^2}$$

en remarquant  $T^2 = \frac{2\pi L}{\omega}$  et  $R = \frac{h}{2}$  ;  $\bar{\omega} = \rho g$

$$E_{c/m} = \frac{\bar{\omega} h^2 L}{16}$$

### 6-1-2 Energie Potentielle

$$dv = y z dx = z dx \text{ pour } y=1$$

$$dW = \bar{\omega} z dx \text{ et } dE_p = z \bar{\omega} dz = \frac{z}{2} \bar{\omega} dz dx = \frac{\bar{\omega}}{2} z^2 dx$$

$$E_p = \frac{\bar{\omega}}{2} \int_0^L z^2 dx = \frac{\bar{\omega}}{2} \int_0^L R^2 \sin^2 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) dx$$

en intégrant

$$E_p = \frac{\bar{\omega}}{4} L R^2 = \frac{\bar{\omega} h^2 L}{16}$$

$$E = E_p + E_c$$

$$E_{/m} = \frac{\bar{\omega} h^2 L}{8}$$

6-2 Energie d'une houle quelconque

$$E_{c/m} = -\frac{\rho}{2} \oint \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} ds = -\frac{\rho}{2} \int_0^L \phi \frac{\partial \phi}{\partial y} dx$$

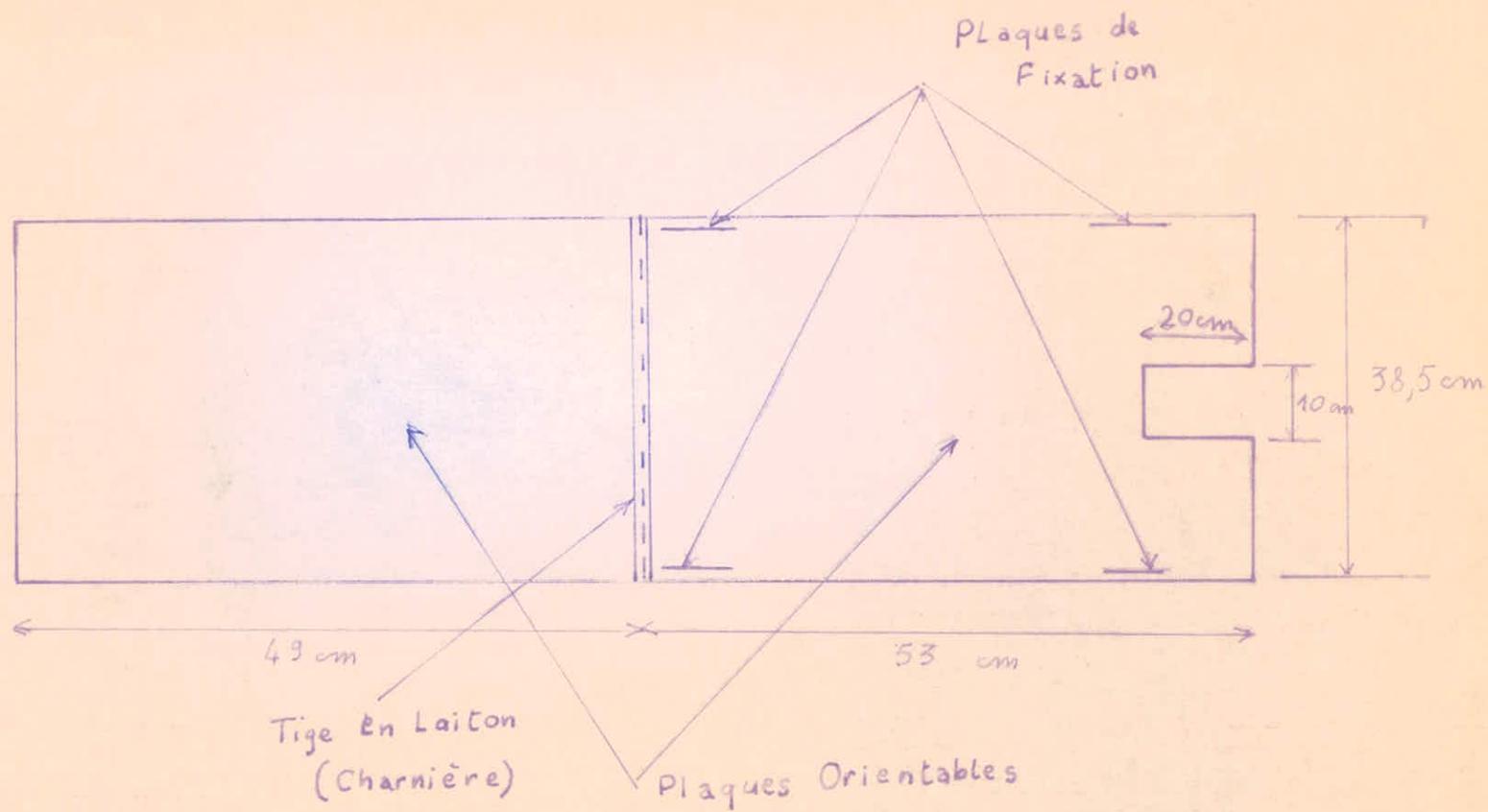
$$\phi = -\frac{c}{2} \operatorname{ch} \frac{2\tilde{\omega}}{L} (y+H) \cos 2\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

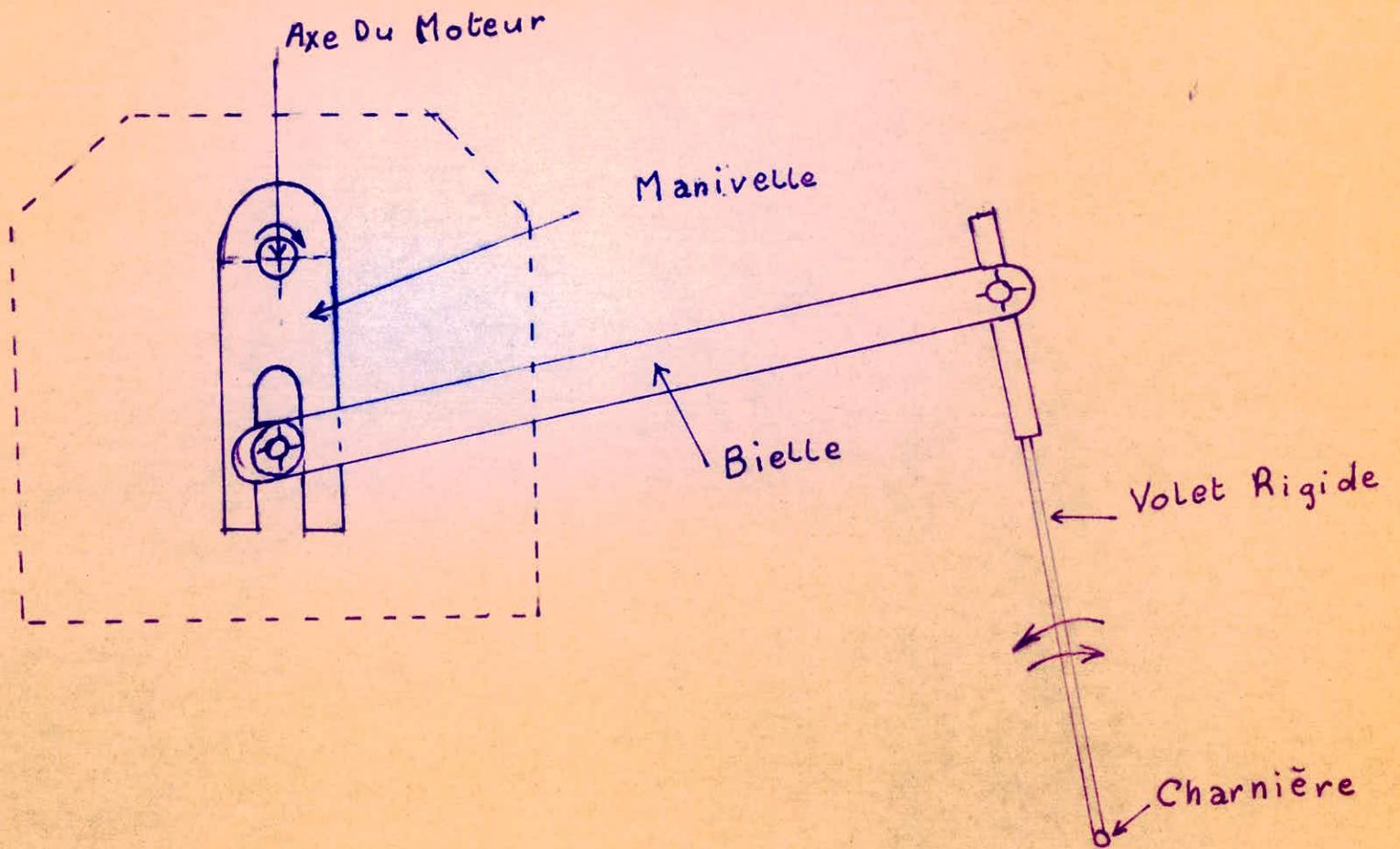
$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = -\frac{c}{2} \frac{2\tilde{\omega}}{L} \operatorname{sh} \frac{2\tilde{\omega}}{L} (y+H) \cos 2\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right)$$

en remplaçant  $\phi \frac{\partial \phi}{\partial y}$  par sa valeur et en intégrant

$$E_{c/m} = -\frac{\rho}{2} \left( \frac{c}{2} \right)^2 \frac{2\tilde{\omega}}{L} \operatorname{sh} \frac{2\tilde{\omega}}{L} (y+H) \operatorname{ch} \frac{2\tilde{\omega}}{L} (y+H) \int_0^L \cos^2 2\tilde{\omega} \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \right) dx$$

$$E_{c/m} = \frac{\rho c^2 \tilde{\omega}^2}{8L} \operatorname{sh} \frac{4\tilde{\omega}}{L} (y+H)$$





MECANISME DU MOTEUR

## DEUXIEME PARTIE BASSIN A HOULE

### 1 - Bassin à houle

On a utilisé le même bassin réalisé il y a 2 ans, plus la plage fixe de la longueur 2.Mètres.

Vu l'état dans lequel il était, nous étions obligé d'usiner vous, les axes en acier et de refaire toute l'étanchéité(fig I)

### 2 - Moteur

Ce moteur électrique dont la vitesse est réglable à l'aide d'un réostat branché en série et solidaire à un volet rigide à l'aide d'une bielle engendre la houle(Fig I et II)

### 3 - Plages orientables et fixe

Ces plaques ont pourbut d'éviter la réflexion des vagues-(Fig I) et (Fig III)

### 4 - Volet Rigide.

C'est une plaque en plexiglas disposée perpendiculairement au sens de propagation de la houle. Ce volet pivote autour d'une charnière au fond du bassin à houle.

### 5. Villebrequin (Fig 4)

5-1. Il est solidaire au volet à l'aide d'une bielle il pivote autour d'une axe. Il possède de part et d'autre des balenciers en laiton. Ces balenciers sont à leur tour reliés à un arbre ayant 2 roues libres et un volant d'inertie et à la pompe. (Fig I)

### 5-2 Réglage

Le réglage de l'amplitude du villebrequin se fait par l'intermediaire des plaques coulissantes les unes sur les autres munies d'une graduation permettant de lire facilement le réglage- (Fig 4)

### 5-3. Fonctionnement du villebrequin

Le mouvement altermatif du villebrequin est obtenu à partir de la houle engendre par le volet actionné par le moteur

### 6 - Pompe à essence

C'est une pompe à membrane fonctionnant avec le gaz-oil. Les caractenstiques de cette pompe exigent une certaine vescosité d'où l'emploi du gaz-oil de poids spécifique 0,87 Kg/le Litre.

Cette pompe aspire le liquide d'une esprovette, le refoule dans une retenire à une hauteur d'environ cinq metres. Le débit est mesuré à partir du retour dans une autre éprouvette graduée, la retenue étant pleine. (Fig V) voir installation de pompage.

Vilebrequin réglable avec balanciers

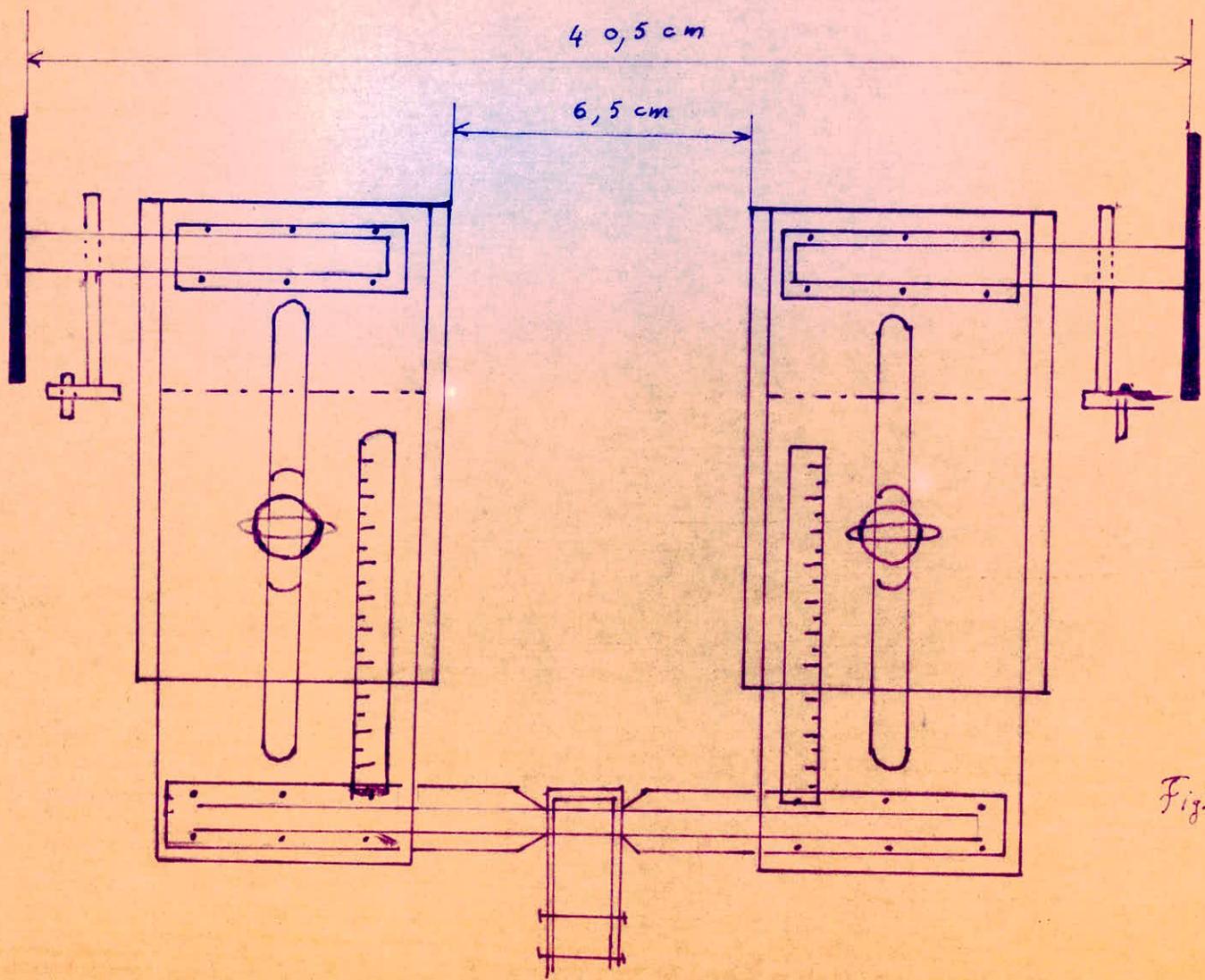
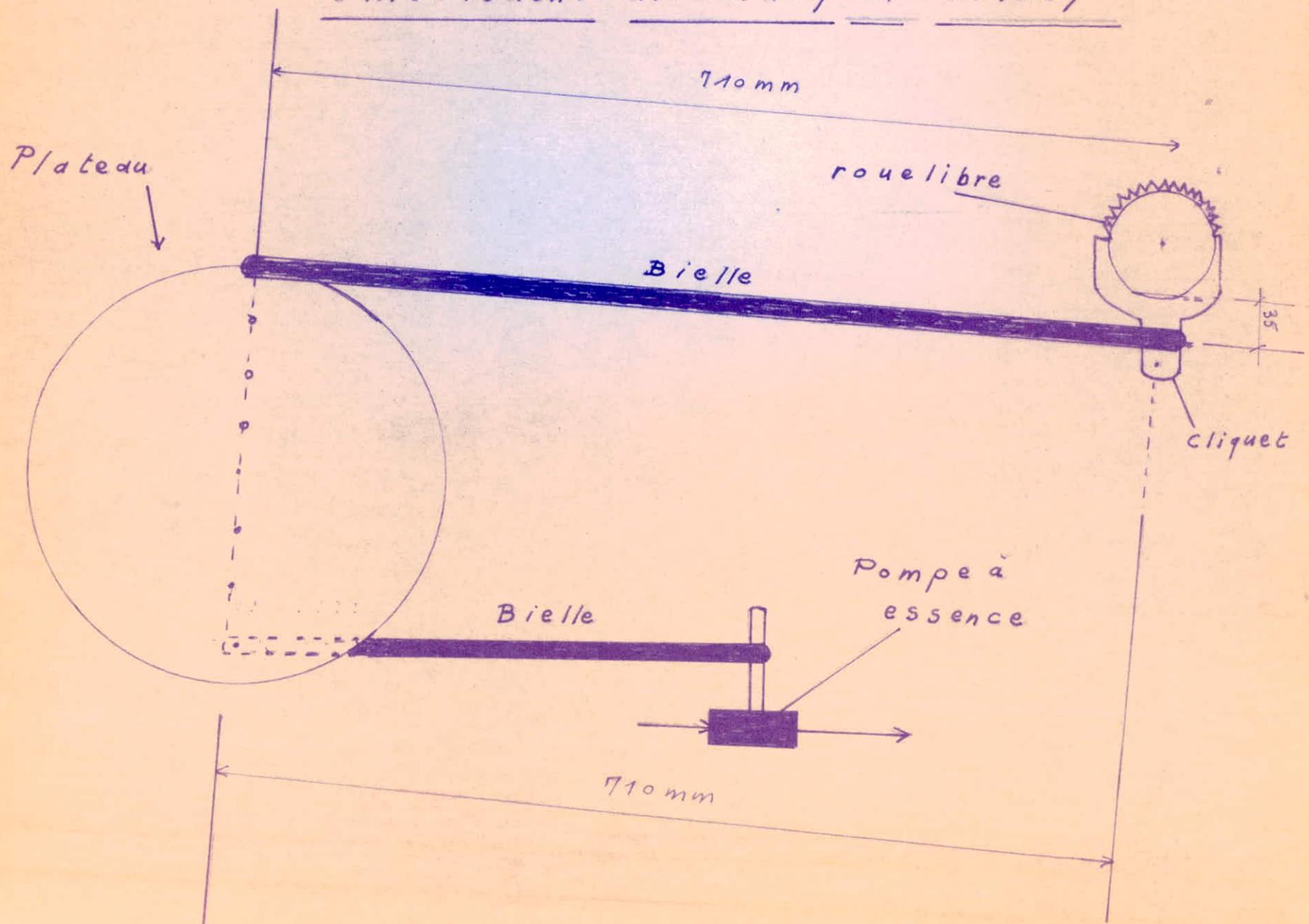
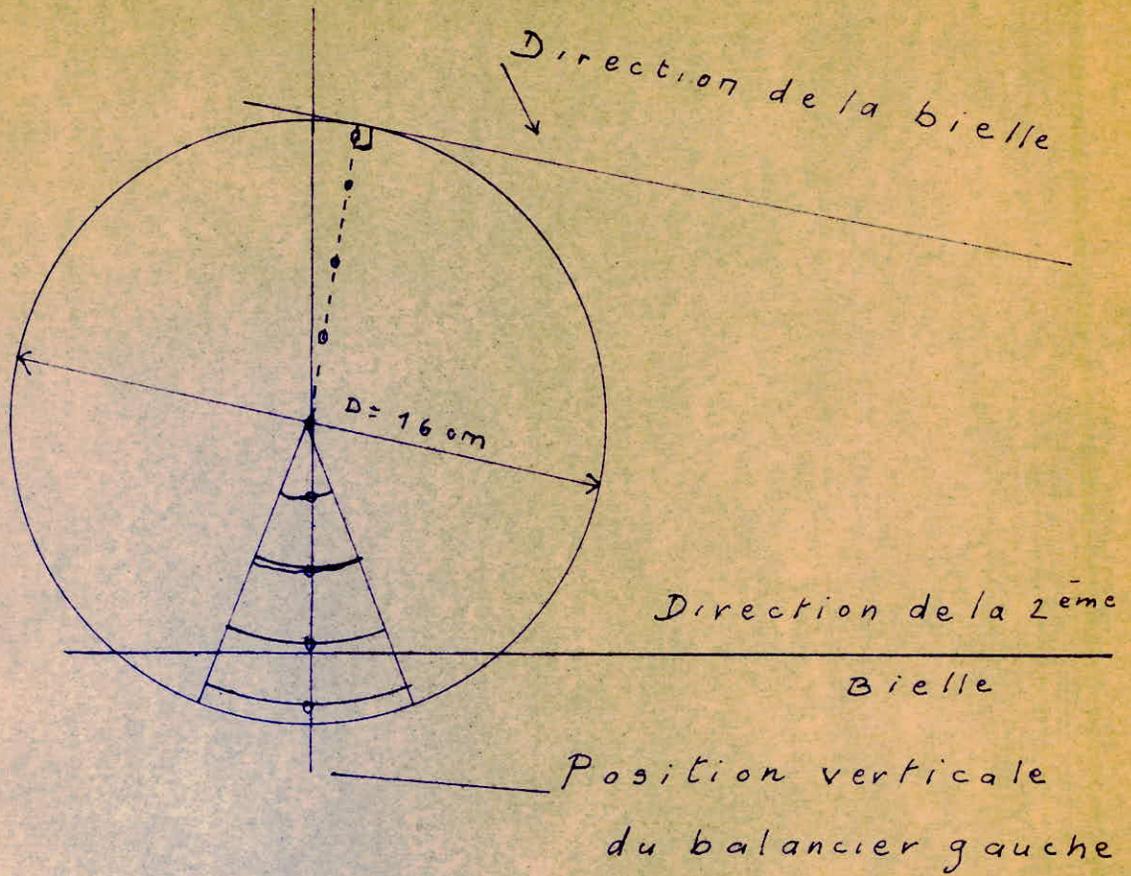


Fig. IV

Mecanisme transformant  
le mouvement alternatif en rotation



Balancier gauche



Balancier droit

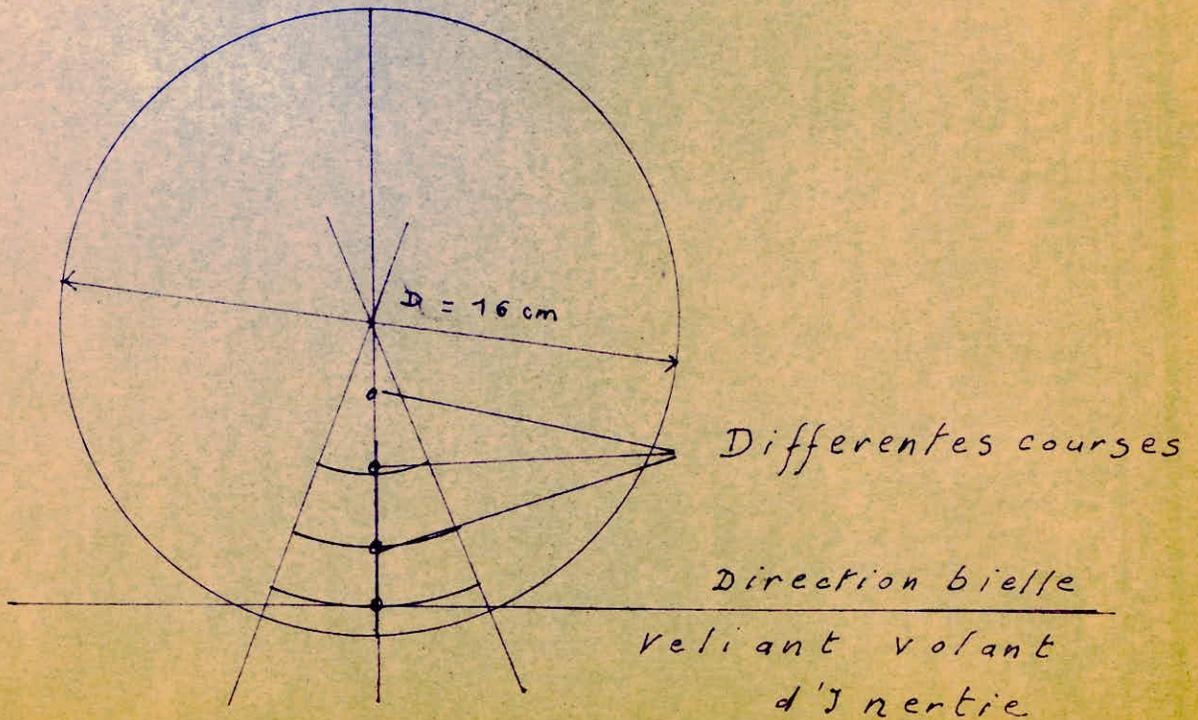
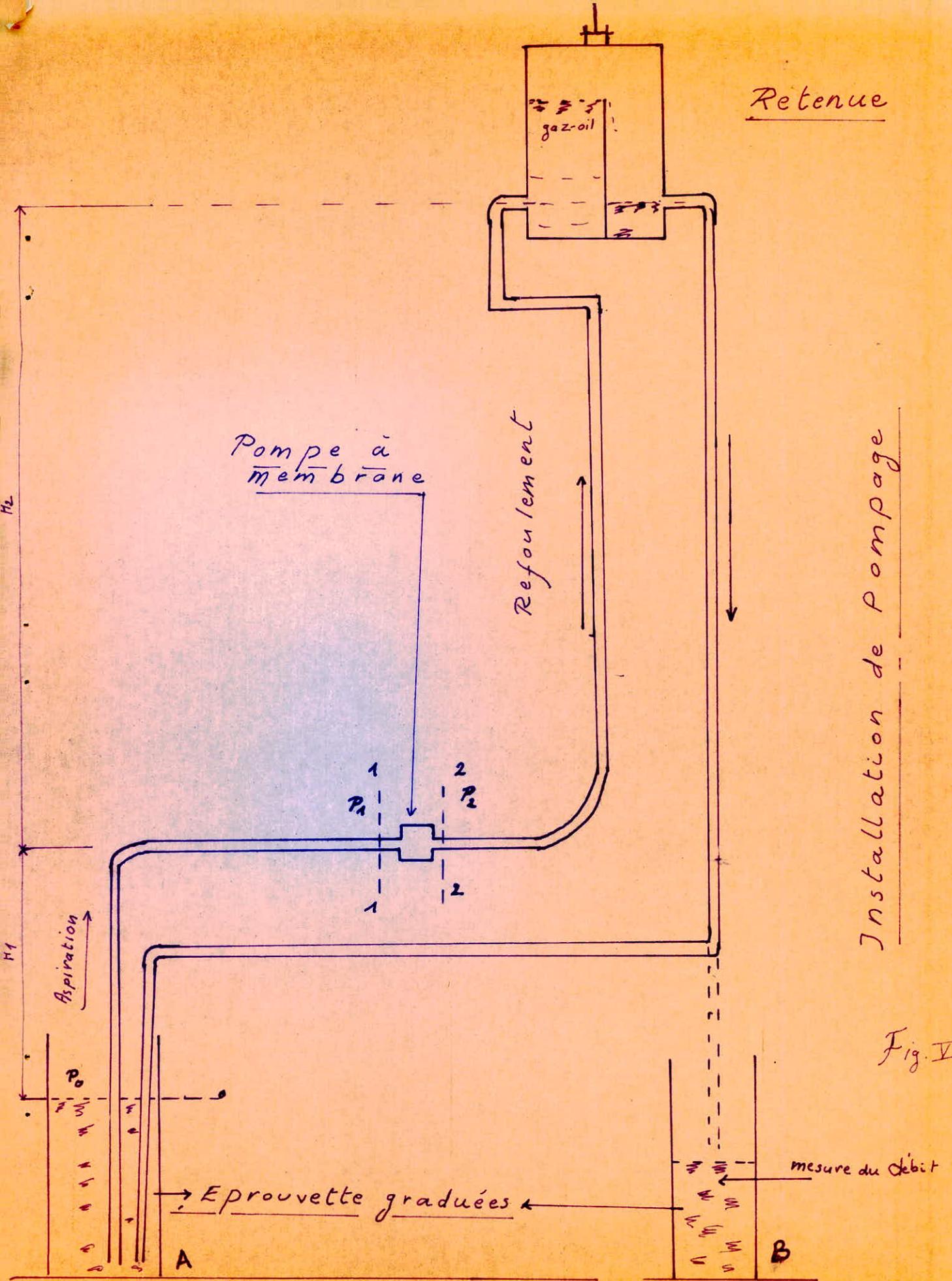


Fig.



Installation de Pompage

Fig. V

### 7. Bielles

Nous avons confectionné deux bielles de  $710 \frac{\text{m}}{\text{m}}$  pour actionner l'axe solidaire aux roues libres et au volant d'inertie et une bielle spéciale actionnant le pompe les roues libres sont disposées sur l'axe d'une façon que l'on exploite le mouvement de va et vient (alternatif) du vilebrequin-

Les bielles sont disposées perpendiculairement aux rayons des balanciers pour avoir le maximum de mouvement alternatif (Fig 6).

### 8. Règles et Mire (Fig I)

a - Règle n° 1 Pour la mesure de l'amplitude des vagues.

b - Règle n° 2 Pour la mesure de la longueur parcourue par le poids lors du calcul de la puissance sur l'arbre.

c - Mire Pour la mesure de la longueur d'onde.

### 9 Volant d'inertie

Pour augmenter la rotation de l'arbre on a installé un volant d'inertie solidaire à cet arbre . Cet arbre pivote dans des roulements à billes pour diminuer les frottements.

-- Etude Expérimentale --

Vue la faible profondeur du bassin à houle (30 cm) il n'y a pas de tourbillons, c'est une houle cirovotionelle. Nous considérons donc la houle de stockes.

On calculera le rendement, rapport de la puissance fournie sur l'arbre sur la puissance de la houle.

Le but du projet est d'améliorer ce rendement pour une éventuelle exploitation du projet.

Le deuxième rendement est le rapport entre la puissance de la pompe sur la puissance de la houle.

Ce rendement est intéressant dans la mesure où il nous donne une indication sur le pompage.

On choisira une pompe à grande charge et à faible débit.

1-1 Calcul de la celerité

$$L = c T \Rightarrow c = \frac{L}{T}$$

1-2 Calcul de la puissance de la houle

$$P_h = \frac{E}{T} = \frac{b \cdot \bar{\omega} \cdot h^2 \cdot L}{16 \cdot T}$$

b : largeur du bassin = 0,40 m  
h : amplitude de la houle  
L : Longueur d'onde  
T : Période

1-3 Puissance sur l'arbre .

$$P = F \cdot \frac{1}{2} = mg \cdot \frac{1}{t}$$

mg : poids marqués  
l : Longueur de parcours du poids = 0,75m  
t : Temps mis pour parcourir l.

1-4 Calcul de la puissance de la pompe :

$$P_p = \bar{\omega}_o \cdot Q \cdot H$$

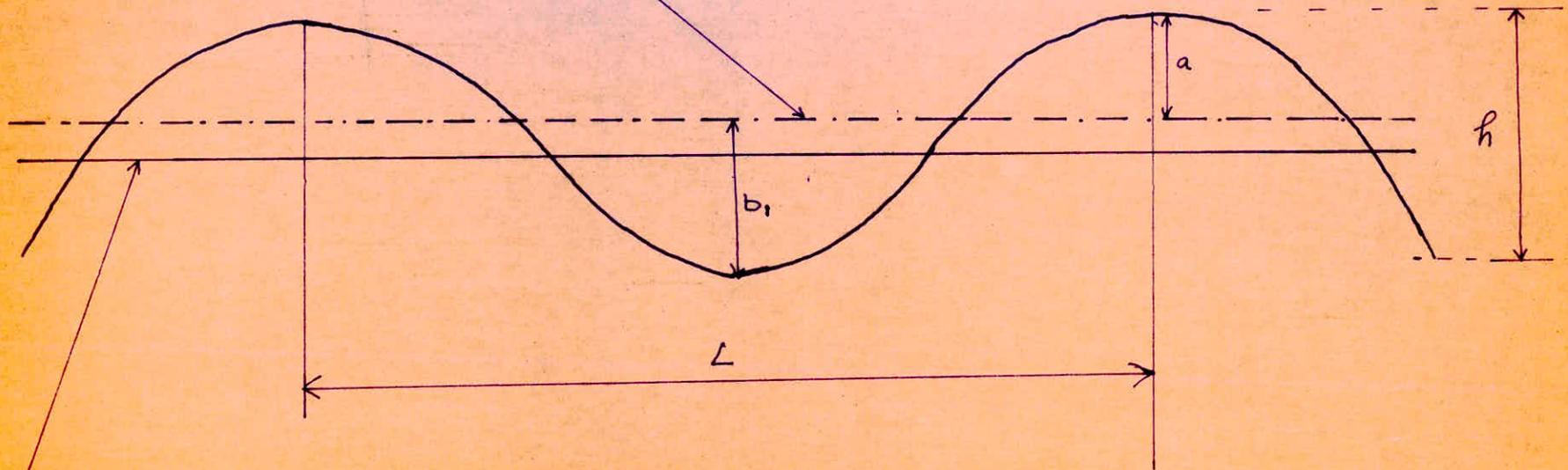
Q : Débit de la pompe =  $\frac{\text{Volume}}{t}$   
H : hauteur de refoulement = 4,90 m

1-6 Calcul du rendement :

$$\eta = \frac{P_a}{P_h}$$

# FORME LIMITE DE LA HOULE

Niveau moyen de la surelévation



Niveau de repos

## 2 -1 Courbes.

Les courbes ci-dessous nous indiquons que les puissances  $P_a$  et  $P_p$  dépendent du système mécanique de l'installation.

lorsque

$P_a$  augmente l'amplitude du vilbrequin diminue.

$P_p$  augmente lorsque l'amplitude du vilbrequin augmente.

Exemple : pour 1kg  $P_a = 2,08.10^{-2}$  kg m/s

mais lorsqu'on réduit le bras de la roue libre : pour 1kg  $P_a = 2,78$ kgm/s

donc quand les bras des 2 roues diminuent la puissance sur l'arbre augmente.

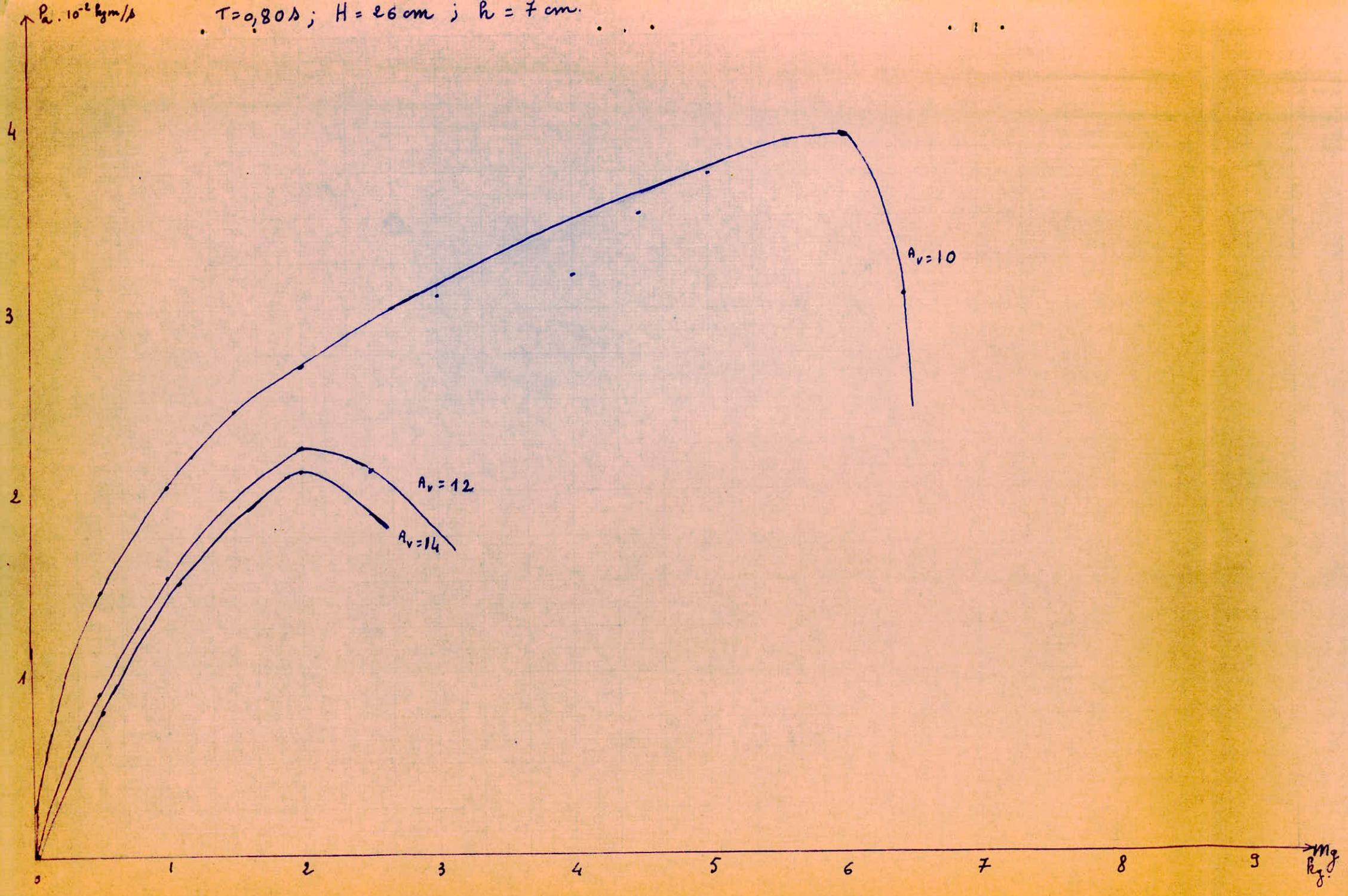
## 2-2 Remarque

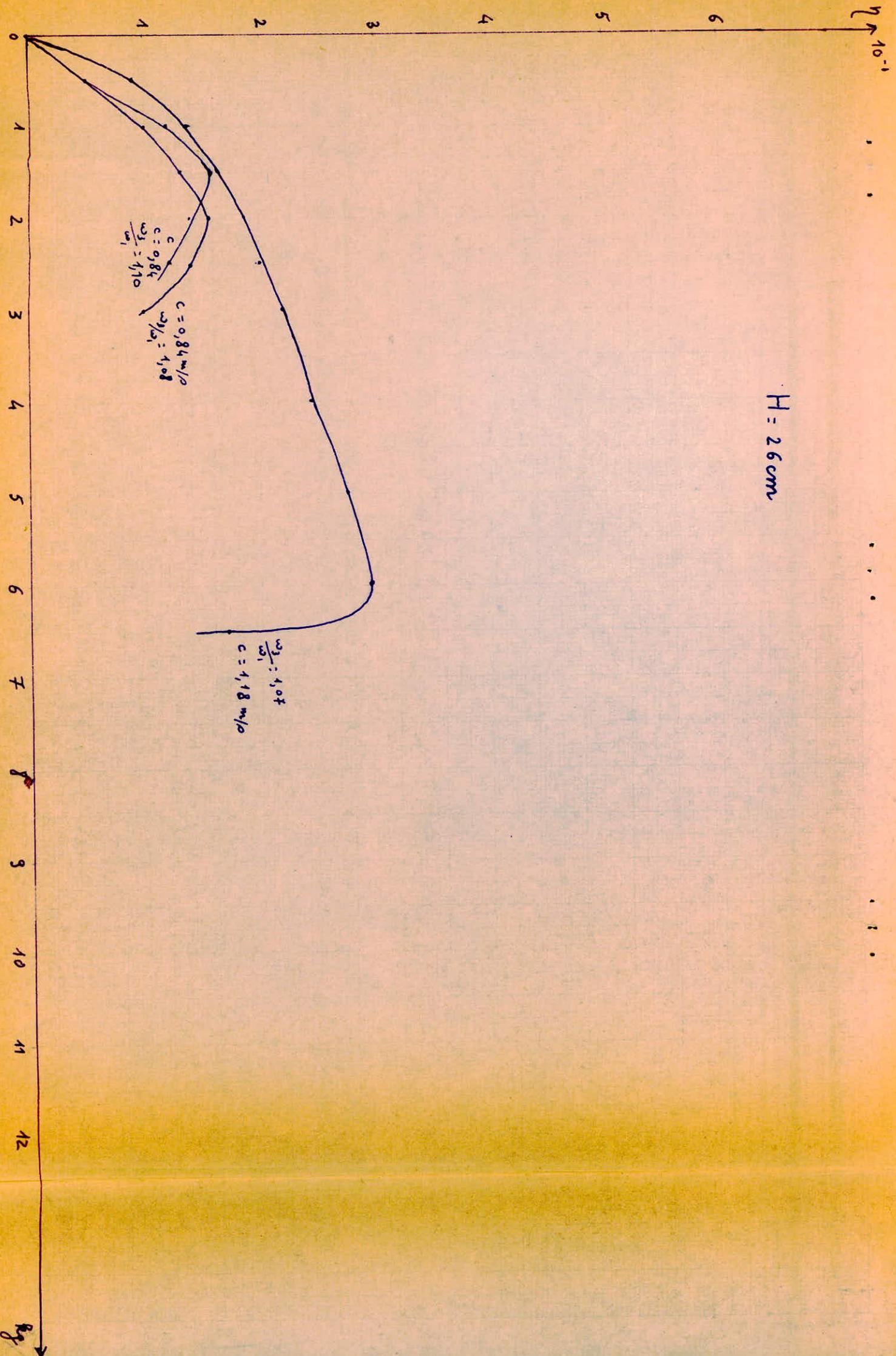
Le problème revient à obtenir un meilleur rendement en agissant sur les différentes parties du système mécanique de l'installation ceci devient au problème d'ingénieur mécanicien : concevoir une installation mécanique à frottement et à inertie minimum pour avoir une grande puissance sur l'arbre d'où l'amélioration du rendement. on remarque que le rendement dépend de la longueur d'onde ce qui est gênant.

l'idéal c'est de garder le meilleur rendement quelque soit la longueur d'onde, en agissant uniquement sur l'installation mécanique.



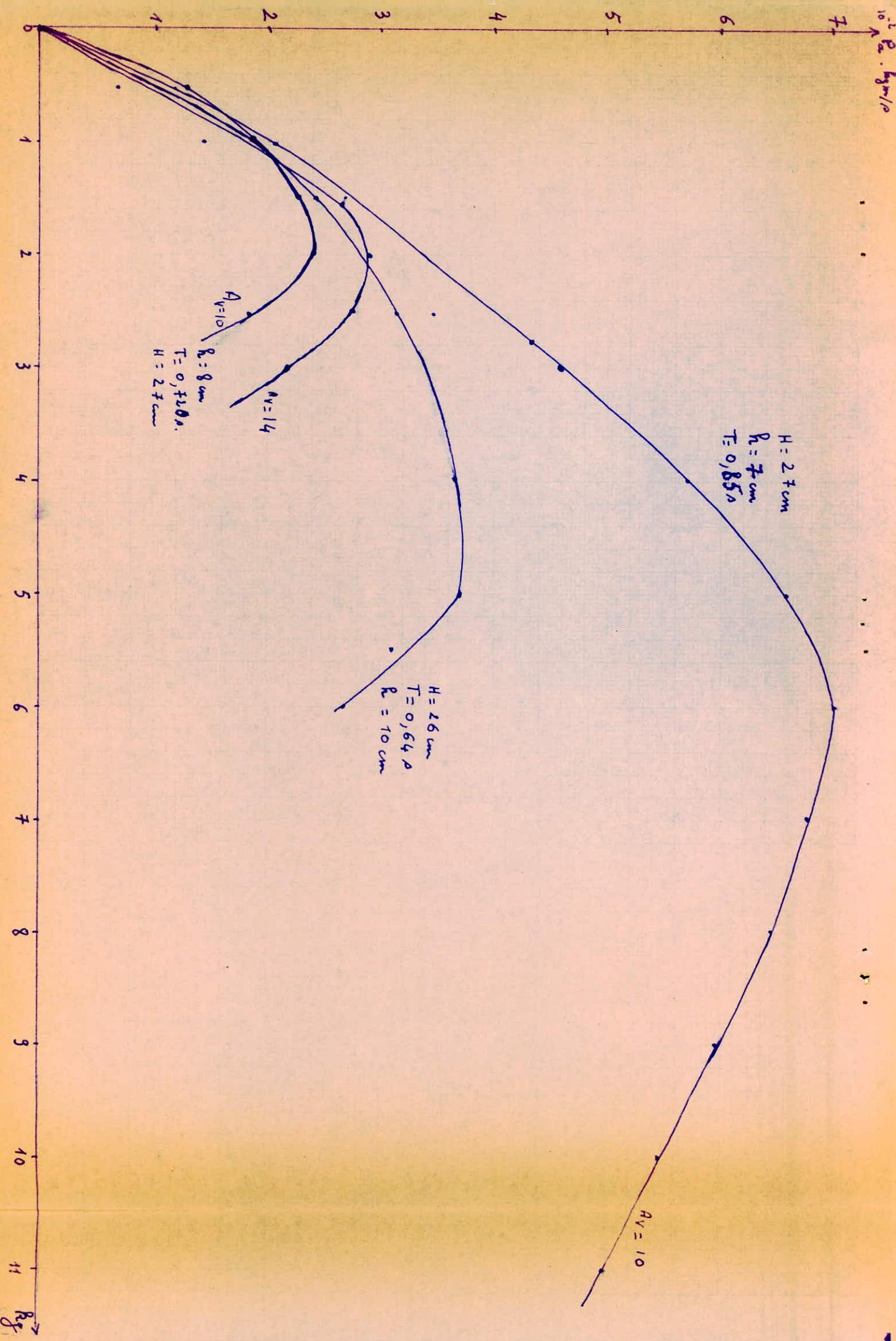
$T = 0,80 \text{ s}; H = 26 \text{ cm}; R = 7 \text{ cm}.$



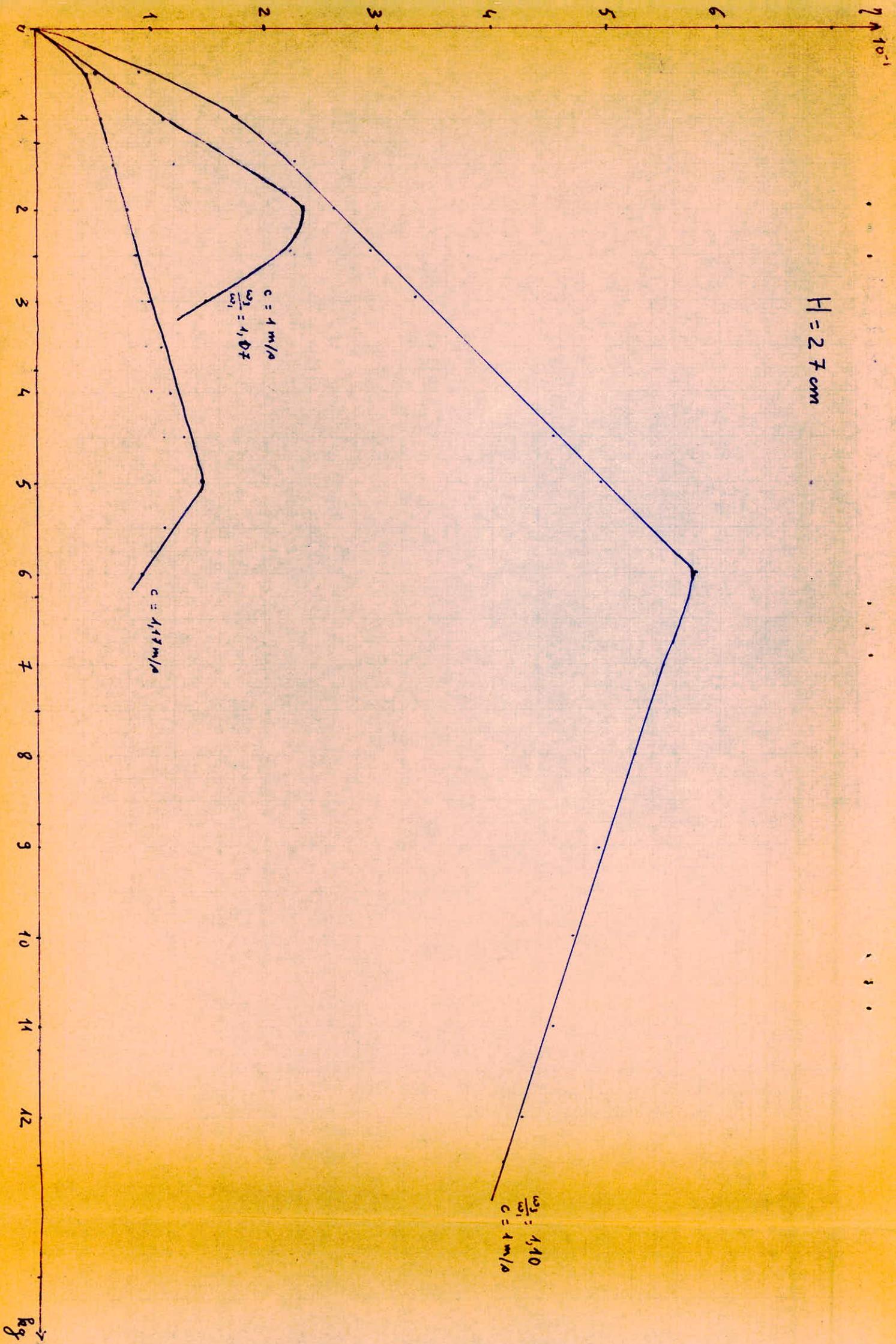


$H = 26 \text{ cm}$

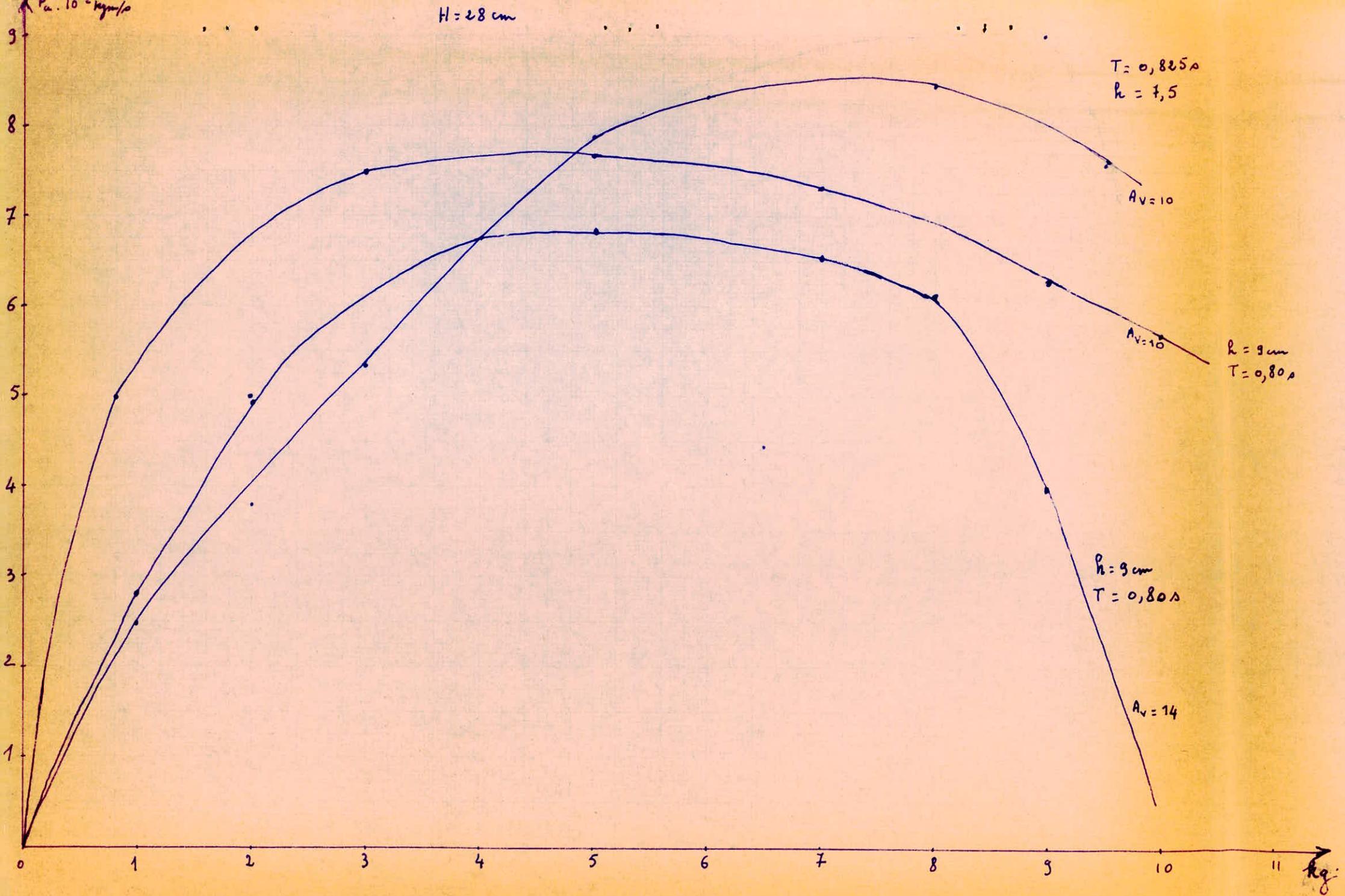


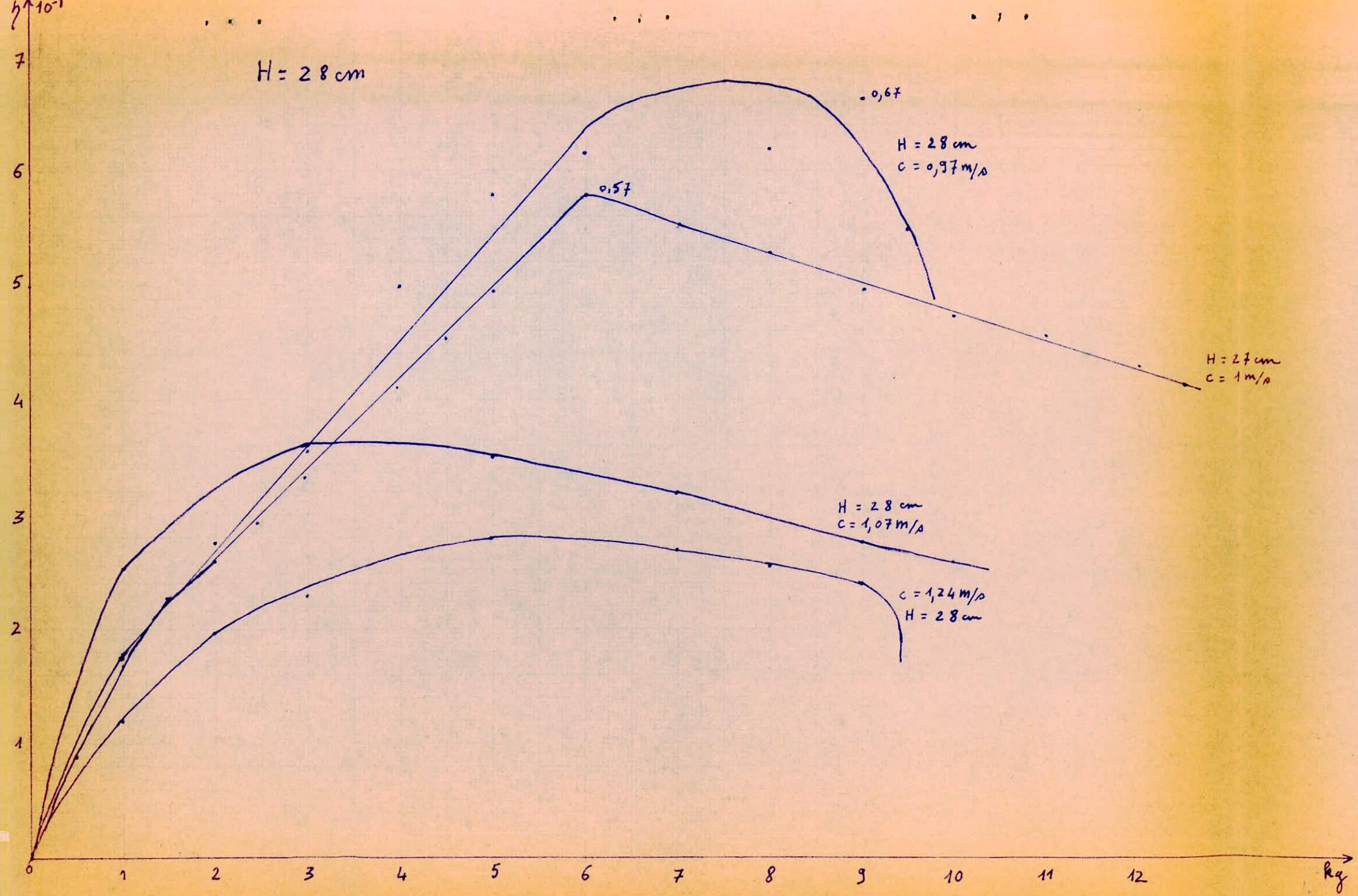


$H = 27 \text{ cm}$









Interpretation des Resultats

I - 1 Puissance-arbre en fonction du poids

On remarque que cette puissance augmente avec la profondeur de l'eau dans le canal à houle, elle dépend aussi de la période et du rapport de transmission définit ci-dessous.

$$P_a = mg \times \frac{0,75}{t} = mg \times \frac{1}{t}$$

$$P_a = 9 \times \frac{75}{74} \cdot 10^{-2} = 9,13 \cdot 10^{-2} \text{ kgm/s}$$

$$T = 0,825s$$

la plus grande puissance obtenue est pour  $H = 28 \text{ Cm}$

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = 0,612 \text{ correspondant } A_2 = 10$$

La puissance augmente lorsqu'on ajoute le poids puis à un certain poids elle commence à diminuer, d'une façon rapide parfois.

I-2 Rendement de l'appareil en fonction de la fréquence

Nous avons obtenu des courbes en cloche le rendement dépend de la fréquence et du rapport de transmission.

pour une très petite variation de fréquence le rendement descend brusquement

Exemple : pour  $N = 1,23s^{-1}$        $\eta = 0,57$  pour  $H = 27 \text{ cm}$

          pour  $N = 1,29s^{-1}$        $\eta = 0,42$  pour  $H = 27 \text{ cm}$

          pour  $N = 1,38s^{-1}$        $\eta = 0,13$  pour  $H = 27 \text{ cm}$

d'après les resultats ci-dessus nous remarquons que pour une variation de  $0,15s^{-1}$  le  $\eta$  descend très rapidement ou conclure que l'appareil est très sélectif.  
l'appareil du laboratoire est un récepteur d'ondes.

pour avoir un rendement maximum, après avoir pris une profondeur de l'eau MAX il faut régler l'appareil sous la fréquence donnant ce rendement MAX et prendre un rapport de transmission très grand et une longueur d'onde voulue le rapport de transmission rentable de l'appareil est

$$P_a = 9 \times \frac{75}{74} \cdot 10^{-2} = 9,13 \cdot 10^{-2} \text{ kgm/s} \quad \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{50,5}{15,5} \cdot \frac{4,5}{12,5} = 1,10$$

$$P_h = \frac{b \times h^2}{I \cdot 6 \cdot T} = \frac{4 \times 5,6 \times 8}{16 \times 8,25} \cdot 10^{-2} = \frac{179,2}{13,2} = 13,6 \cdot 10^{-2}$$

$$\eta = \frac{P_a}{P_h} = \frac{9,13 \cdot 10^{-2}}{13,6 \cdot 10^{-2}} = 0,67$$

H = 27 cm

H = 26 cm

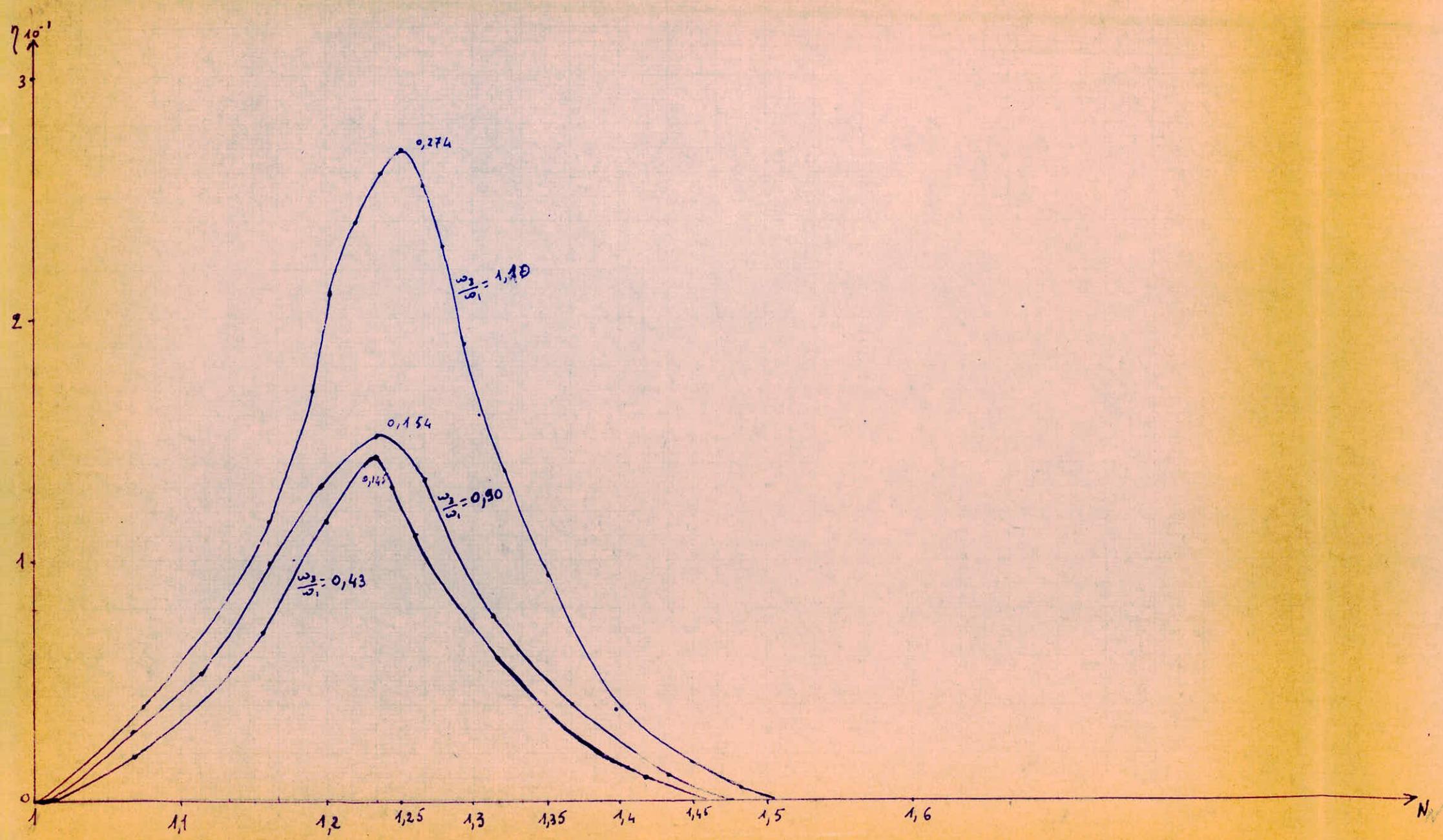
H = 27 cm

H = 27 cm			H = 26 cm			H = 27 cm		
N	$\eta$	$\omega_3/\omega_1$	N	$\eta$	$\omega_3/\omega_1$	N	$\eta$	$\omega_3/\omega_1$
1,030	0,04		1,070	0,04		1,065	0,02	
1,121	0,05		1,158	0,11		1,120	0,06	
1,214	0,14	0,34	1,170	0,17		1,153	0,15	
1,220	0,23		1,20	0,21		1,180	0,24	
1,250	0,32		1,207	0,24		1,210	0,33	
1,265	0,37		1,216	0,26		1,223	0,38	
1,270	0,36		1,250	0,27	1,10	1,225	0,43	1,10
1,280	0,34		1,27	0,25		1,245	0,48	
1,320	0,25		1,28	0,23		1,246	0,53	
1,330	0,13	0,34	1,23	0,13		1,250	0,57	
1,345	0,13		1,307	0,16		1,258	0,55	
1,420	0,07		1,31	0,13		1,270	0,49	
1,472	0,03		1,35	0,09		1,290	0,42	
			1,38	0,03		1,325	0,32	
			1,07	0,02		1,340	0,25	
			1,17	0,07		1,380	0,13	
			1,20	0,18	0,43	1,450	0,03	
			1,23	0,145		1,475	0,009	
			1,27	0,11		1,120	0,04	
			1,31	0,06		1,160	0,06	
			1,41	0,01		1,22	0,14	
			1,07	0,04		1,245	0,17	
			1,11	0,05	0,34	1,250	0,24	0,43
			1,16	0,10		1,267	0,27	
			1,19	0,13		1,280	0,25	
			1,23	0,15		1,300	0,22	
			1,27	0,13		1,317	0,18	
			1,32	0,07		1,355	0,13	
						1,380	0,08	
						1,470	0,02	
						1,500	0,006	

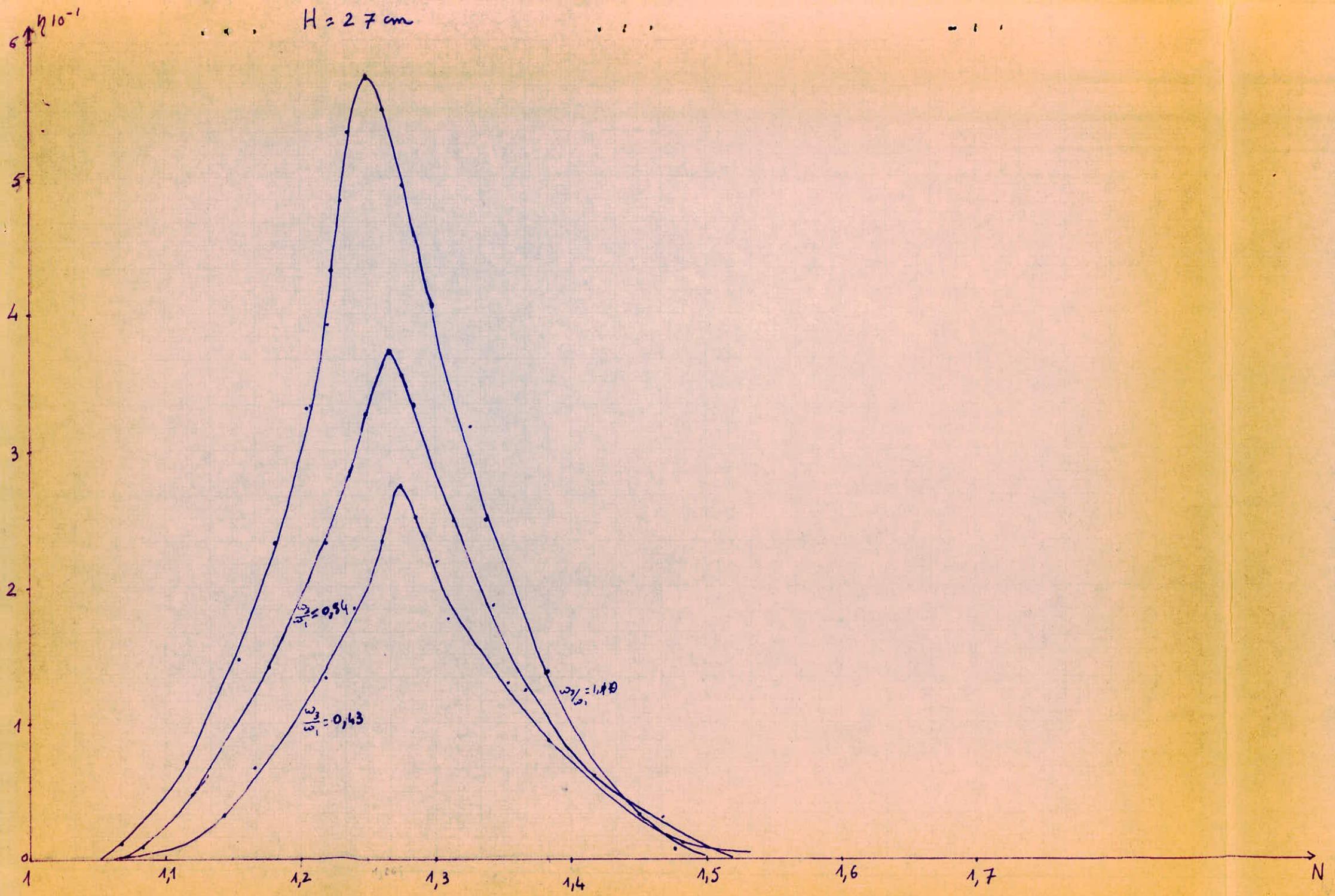
H = 2,6 μm.

• • •

- • •



$H = 27 \text{ cm}$



C'est le rendement MAX qu'on a pu obtenir de l'appareil en réglant  $N, L, \frac{\omega_3}{\omega_1}$   
on peut faire l'analogie avec récepteur d'ondes Hertzienne (Radio)  
pour avoir un son clair on joue sur la longueur, la fréquence et sur le potentiomètre.  
le récepteur d'onde de houle était très électif on peut dans l'avenir découvrir  
une fréquence telle que  $\eta = 0,75$  à  $0,80$ .

### I-3 Rapport de transmission de l'appareil

Soit  $\omega_1$  l'angle que fait le volet récepteur de vagues, et son excentricité

soit  $\omega_2$  l'angle qui fait le vilebrequin et  $R_2$  son amplitude

soit  $r_2$  le rayon du disque du vilebrequin

soit  $\omega_3$  l'angle que fait le bras de la roue libre et  $R_3$  la longueur de ce bras.

ce qui nous intéresse c'est le rapport qui existe entre , initial et , final.

$$\frac{\omega_3}{\omega_1} = \frac{\omega_3}{\omega_2} \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{r_2}{r_3} \cdot \frac{r_1}{r_2}$$

$r_1 = 50,5 \text{ cm}$   
 $r_2$  varie: réglable  
 $r_3$  varie: réglable

pour avoir une  $P_a$  maximum ( $n$  MAX) il faut choisir un  $\frac{\omega_3}{\omega_1}$  en "jouant" sur ces paramètres. Le rapport intéressant trouvé au cours des essais est  $\frac{\omega_3}{\omega_1} = 1,10$

### II- Avenir du projet

Le récepteur d'onde de houle était électif,  $n = (N, L, \frac{\omega_3}{\omega_1})$ , on peut dans l'avenir mettre ce modèle réduit à une grande échelle. (étude par similitude)

#### II - 1 Source d'énergie

D'après les éléments mis à notre disposition par le service de Météorologie de DRA EL BEIDA, la houle sur les 1400 km de côtes Algériennes possède les caractéristiques suivantes :

$$h = 2,5 \text{ m}$$

$$L = 150 \text{ m}$$

$$T = 9 \text{ s}$$

$$Ph = \frac{10^3 (2,5)^2 150 \cdot 1,40 \cdot 10^6}{16 \cdot 9} = 9,12 \cdot 10^9 \text{ kgm/s}$$

$$Ph = \frac{9,12 \cdot 10^9 \times 9,8}{10^3} = 89,4 \cdot 10^6 \text{ KW}$$

ceci correspond à une énergie annuelle

$$89,4 \cdot 10^6 \times 24 \times 365 = 7,83 \cdot 10^{11} \text{ kwh.}$$

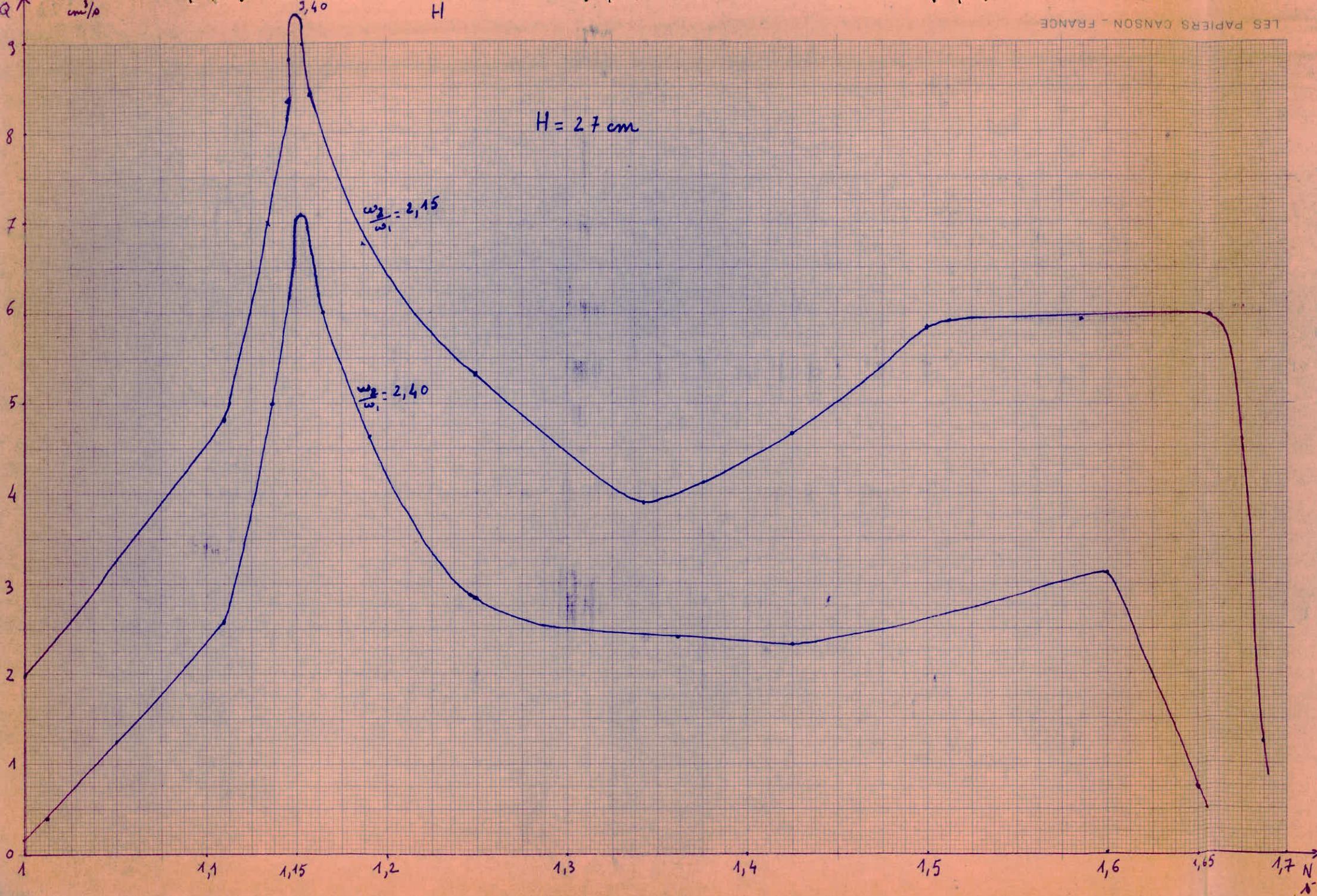
$$\frac{7,83 \cdot 10^{11}}{100} \times 67 = 5,246 \cdot 10^{11} \text{ kwh.}$$

d'autre part, d'après le rapport d'activité (1972) de S.O.N.E.L.G.A.Z.

la valeur de la production d'énergie hydraulique et thermique en Algérie est de  $17,724 \cdot 10^8 \text{ kwh}$

$$K = \frac{\text{énergie de la houle sur les côtes Algériennes}}{\text{énergie produite par S O N E L G A Z}} = \frac{5,246 \cdot 10^{11}}{17,724 \cdot 10^8}$$

$N_{0.1}$	$Q_{cm^3/s}$	$N_{0.1}$	$Q_{cm^3/s}$
1	2	0,94	1,41
1,11	4,8	1	4,9
1,15	8,7		
1,150	3,4	1,06	2,69
1,15	8,7		
1,46	8,4	1,11	6,40
1,17	6,75	1,13	7,93
1,25	5,30	1,14	9,20
1,34	3,86	1,19	8,25
1,41	4,60	1,33	4,63
1,50	5,80	1,36	4,92
1,58	5,94	1,42	6,20
1,66	6,09	1,53	5,00
1	0,20	1,66	5,51
1,11	2,50	1,03	2,40
1,15	7,05	1,05	2,62
1,16	6,02	1,11	3,40
1,18	4,6	1,12	3,85
1,25	2,82	1,14	6,93
1,36	2,45	1,17	7,33
1,41	2,32	1,18	6,92
1,60	3,12	1,26	3,36
1,65	0,75	1,38	4,06
		1,49	4,45
		1,66	2,15

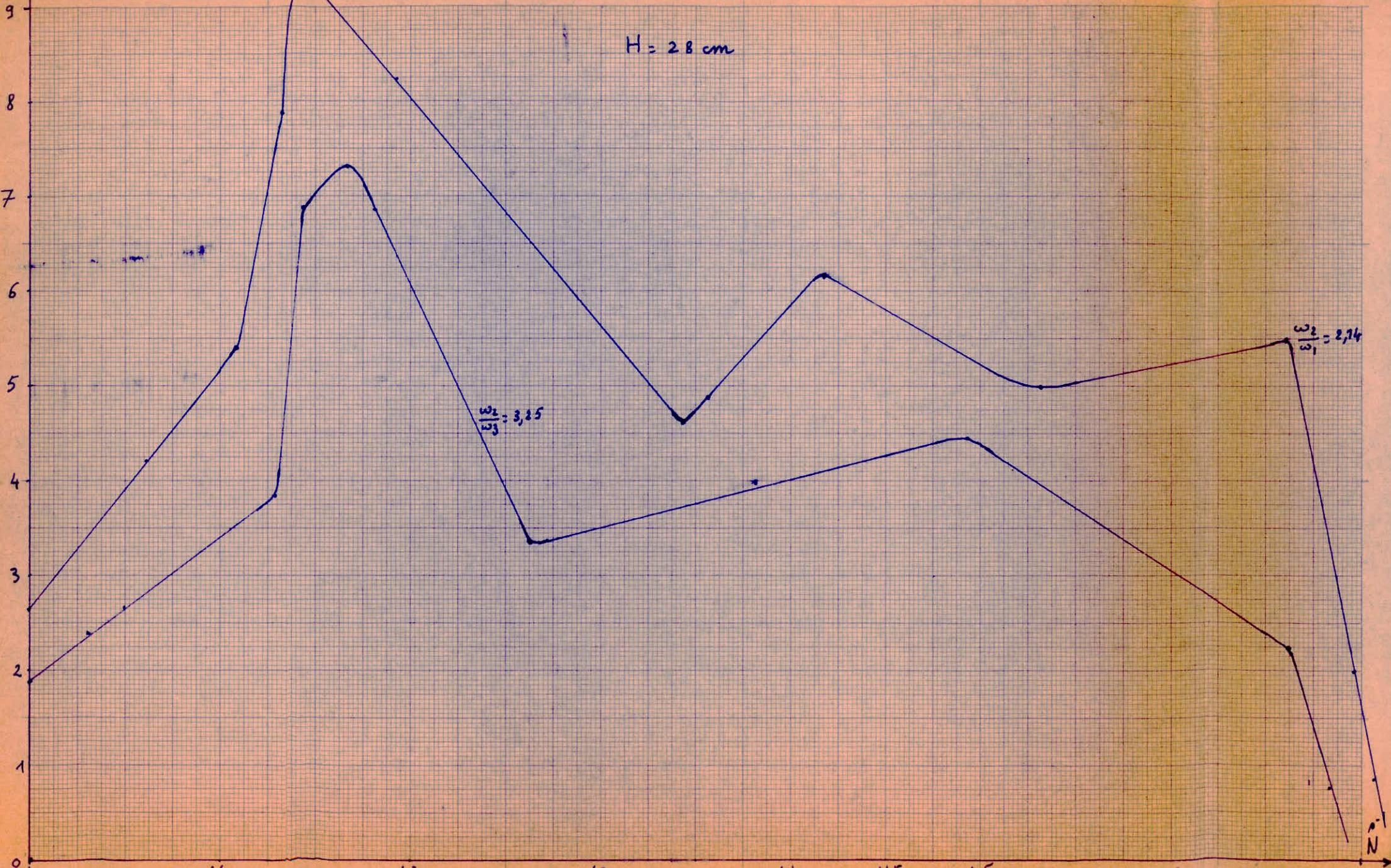


Q  $\frac{cm^3}{s}$

H = 28 cm

$\frac{w_2}{w_3} = 3,25$

$\frac{w_2}{w_1} = 2,74$



Le rapport K nous montre que l'énergie de la houle perdue sur les côtes Algériennes est d'une importance considérable; dans l'avenir ce projet peut être éventuellement exploité à condition que l'on se penche sérieusement sur le problème.

## II-2 Analogie

Il existe une parfaite analogie entre le récepteur d'ondes Hertzienne (Radio) et le récepteur d'onde de Houle. Tous les 2 ont les caractéristiques suivantes:

Récepteur (Radio)

- sélectif
- fréquence N
- longueur d'onde L
- potentiomètre
- gain:  $G = \frac{P \text{ de sortie}}{P \text{ d'entrée}}$

Récepteur d'ondes de Houle

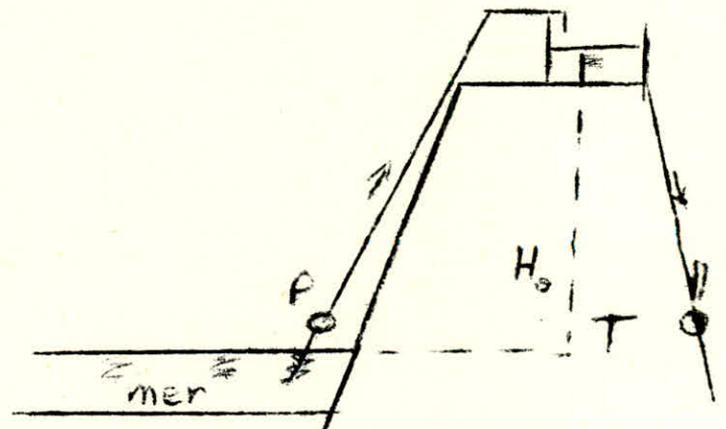
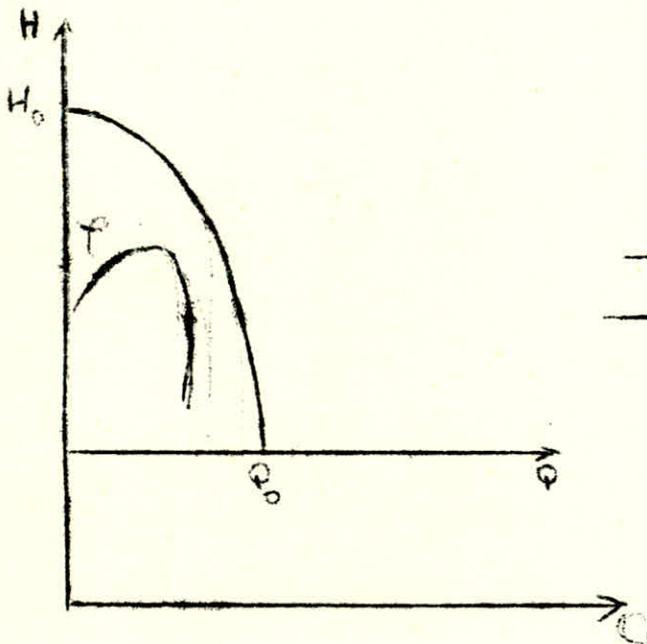
- sélectif
- fréquence N
- longueur d'onde L
- rapport de transmission
- rendement  $\eta = \frac{P_a}{P_h}$

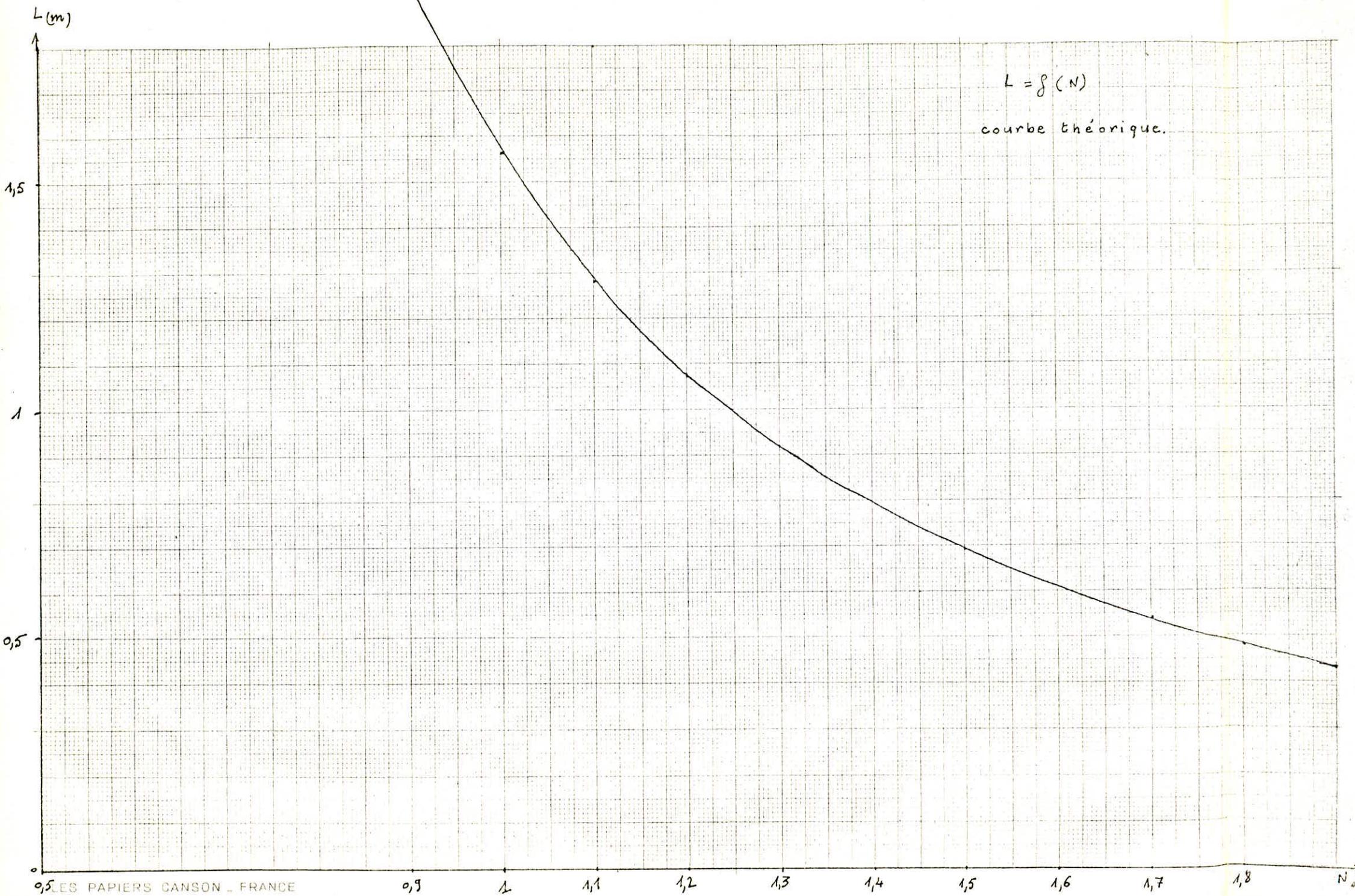
pour avoir un bon Gain dans la radio ou un bon rendement dans le récepteur d'ondes de Houle il faut éliminer les pertes de charges, les courants parasites dans le premier et éliminer les frottements, les inerties dans le 2<sup>o</sup>

## III Etude de débit pompé

### III-1 Le débit Q

Ce débit du niveau du bassin à houle de 4,90m n'est que la transformation de l'énergie de houle en une énergie potentielle (énergie de position) ce débit dépend de la fréquence et dépend aussi du rapport de transmission mais dans le prototype on choisira une pompe ayant un faible débit et une forte charge.





L (m)

$L = f(N)$   
courbe experimentale

1,5

1

0,5

0,5 ES PAPIERS CANSON FRANCE

0,7

1

1,1

1,2

1,3

1,4

1,5

1,6

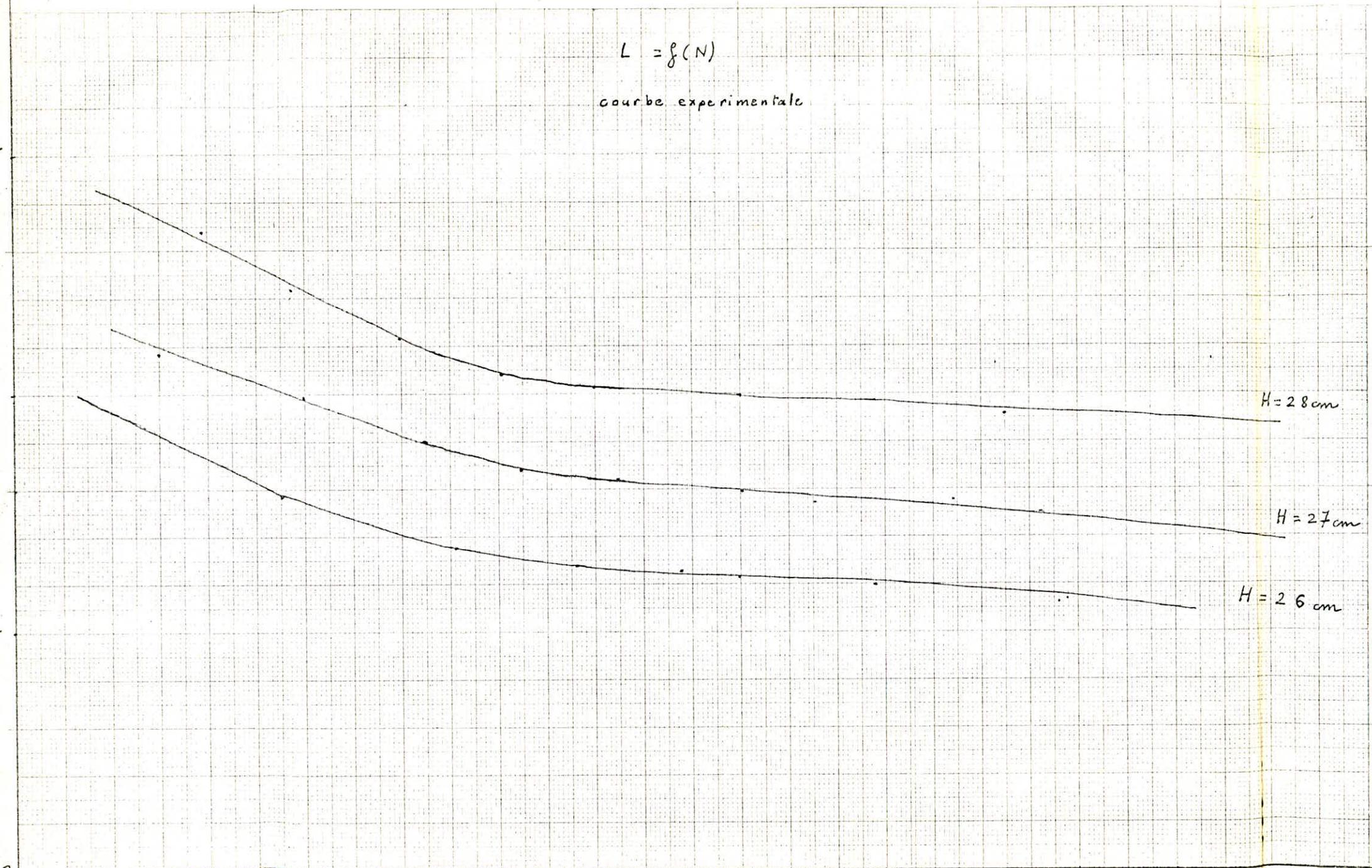
1,7

N (s)

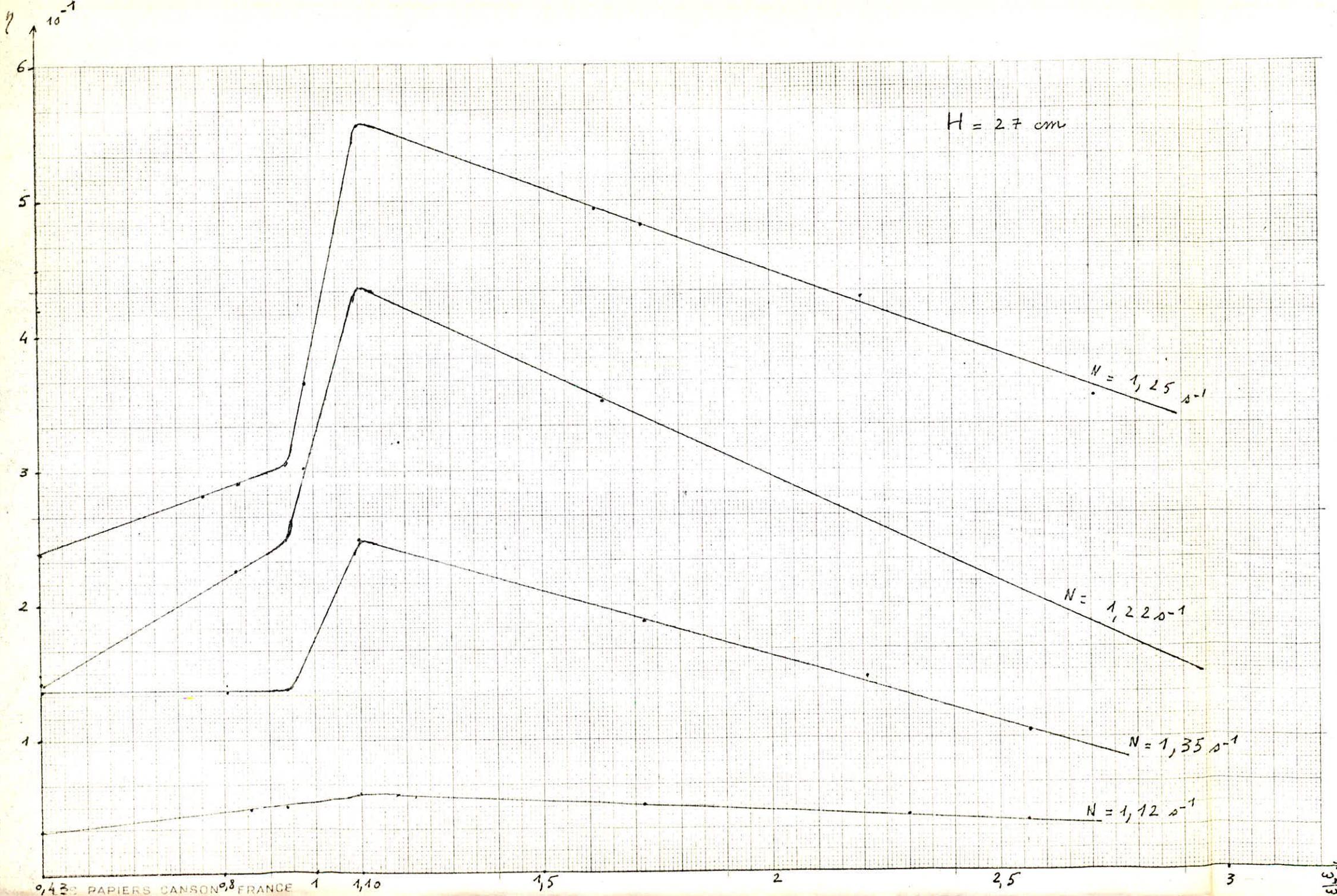
H = 28 cm

H = 27 cm

H = 26 cm



$r_2$ cm	$r_2'$ cm	$r_3$ cm	$\frac{\omega_3}{\omega_1}$	$P_{\alpha}$ $10^{-2}$ kgcm/s	$P_{\beta}$ $10^{-2}$ kgcm/s	$\eta$	
13	2	9	0,86	5,56	24,1	0,23	
15,5	7,5	14,5	1,63	8,08	24,1	0,35	H = 27 cm
16,5	2	14	0,43	2,31	17,8	0,13	N = 1,22 s <sup>-1</sup>
23,5	7	14	0,43	2,30	17,8	0,13	$r_1 = 50,5$ cm
16,5	3	10	0,33	3,02	12,5	0,24	
16,5	4,5	14	0,38	3,75	12,5	0,30	
16,5	4,5	12,5	1,10	5,38	12,5	0,43	
15,5	7,5	14,5	1,63	8,08	24,1	0,35	
15,5	7,5	11	2,22	3,20	12,3	0,26	
15,5	7,5	9	2,71	2,22	12,3	0,18	
16,5	2	14	0,43	0,49	12,3	0,04	
13	2	9	0,86	0,55	12,3	0,045	N = 1,12 s <sup>-1</sup>
16,5	3	10	0,33	0,62	12,3	0,05	H = 27 cm
16,5	4,5	12,5	1,10	0,86	12,25	0,07	$r_1 = 50,5$ cm
16,5	4,5	8	1,72	0,63	12,25	0,05	
15,5	8,0	11	2,30	0,58	12,25	0,047	
23,5	7	14	0,43	2,96	12,10	0,24	
18	3	10	0,84	3,40	12,10	0,28	N = 1,25 s <sup>-1</sup>
16,5	3	10	0,94	3,76	12,10	0,31	H = 27 cm
16,5	4,5	14	0,98	4,49	12,10	0,37	$r_1 = 50,5$ cm
16,5	4,5	12,5	1,10	7,02	12,25	0,57	
15,5	7,5	14,5	1,63	6,04	12,25	0,49	
16,5	4,5	8	1,72	5,89	12,25	0,48	
15,5	7,5	11	2,22	5,40	12,25	0,44	
15,5	7,5	9	2,71	4,31	12,25	0,35	



III-2- Calcul de Puissance de pompe :

Soit  $Q_0$  le plus grand débit obtenu au cours des essais :

$$Q_0 = 9,4 \text{ cm}^3/\text{s} = 9,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

Le liquide pompé au cours des essais est le Gaz-oil de poids spécifique  $0,87 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$

$$P_p = \rho \cdot Q \cdot H = 0,87 \cdot 10^3 \cdot 9,4 \cdot 10^{-6} \cdot 4,9 = 400,72 \cdot 10^{-4} \text{ Kgm/s}$$

$$P_p = 4,007 \cdot 10^{-2} \text{ Kgm/s}$$

$$\text{Le rendement } \eta = \frac{4,007 \cdot 10^{-2}}{13,6 \cdot 10^{-2}} = 0,30$$

-- Conclusion --

Notre appareil générateur de houle ne constitue qu'un premier pas dans la réalisation d'un appareillage qui pourra être mis sur pieds dans les années à venir. Mais déjà on connaît les facteurs très importants et leur rôle dans l'exploitation de cette énergie.

Nous espérons qu'un jour notre laboratoire d'hydraulique aura un bassin à houle à grande échelle et un matériel moderne pour répondre à d'autres essais dans ce domaine .

-----

## CONCLUSION GENERALE

Les vagues et la houle, leur connaissance, leur croissance sous l'effet du vent la constitution du mouvement complexe qu'il produit, la propagation de cette agitation hors des zones de vent sous forme d'ondulations de plus en plus régulières, la mesure du phénomène au large ou plus généralement au voisinage d'une côte souvent fort éloignée de l'aire de génération de l'agitation, la caractérisation du mouvement par un nombre minimum de paramètres, constituent des problèmes qui sont spécialement à l'ordre du jour de la recherche de l'exploitation de l'énergie de la houle.

Les deux facteurs caractérisant la houle sont la période et la longueur d'onde outre sa direction de propagation.

Nous avons remarqué au cours de nos essais un amortissement sélectif des diverses composantes, ce caractère sélectif est constaté sur les courbes de rendements en fonction de la fréquence.

L'étude de la houle constitue un nouveau pas qui se franchit actuellement, dans un effort portant sur une meilleure compréhension de la nature et du comportement d'un mouvement dont la complexité paraît défier toute analyse.

Mais nous avons étudié la transformation de l'énergie de la houle en énergie potentielle accumulable et non pas la houle elle-même; pour cela étant sur modèle réduit ou a pris en considération la houle de STOCKES.

Nous pensons, tenant compte de la discontinuité des vagues, que pour exploiter l'énergie de la houle, il faut la transformer en énergie potentielle accumulable. Nous avons réussi par une houle d'amplitude quelques centimètres à faire monter la liquide à une hauteur remarquable.

Les courbes tracées au cours de cette étude montrent le rôle des différents paramètres et l'importance de la sélectivité de l'appareil sur le rendement.

Ainsi chaque jour, les connaissances de l'homme évoluent et, dès qu'une branche seulement fait quelques progrès, tout est remettre sur l'effort et la volonté.

Nous espérons qu'un jour l'énergie de la houle, énergie gratuite, contribuera au développement du monde.

PH 0010/74

