

UNIVERSITE D'ALGER

2/70

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

Département : Génie Civil

**EXPLOITATION DE
L'ENERGIE DE LA HOULE**

PROMOTION 1970

Proposé par M. Gésa De LAPRAY

Etudié par M. **N**AHAS
ABIL

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GENIE CIVIL

-o-o-o-

1 ex

PROJET DE FIN D'ETUDES



EXPLOITATION DE L'ENERGIE

DE LA HOULE

Proposé par:

M^r G. LAPRAY

Etudié par:

M^r NAHAS Nabil

PROMOTION: 1970

=====

SUJET DE LA THESE

EXPLOITATION DE L'ENERGIE DE LA HOULE.

TRANSFORMATION DE L'ENERGIE DE LA HOULE EN ENERGIE MECANIQUE.



P L A N

I - Introduction

2 - Conception et réalisation des différents appareils

2.1. Généralités

- la houle
- les caractéristiques de la houle
- Méthodes artificielles de réalisation

2.2. Conféction des différents appareils

- Bassin à houle
- Amplificateur
- Aube fixe
- Roue comportant des aubes
- Arbre actionné par le jet d'eau comportant les différents accessoires.
- Aube à tangage.

3 - Etude de l'énergie apportée par le déferlement.

3.1. Objet de l'étude.

3.2. Etude théorique de la houle cylindrique en profondeur finie.

- Analyse mathématique du problème
- Conclusion.

4 - Essais et résultats

- Conclusion



I N T R O D U C T I O N

La plupart des ressources d'énergie est épuisable après un certain temps. Ainsi sera le cas des gisements pétroliers, de houille et de l'uranium. Pour cela on a eu l'idée de pouvoir exploiter une énergie qui nous est offerte par la nature et notamment par le mouvement oscillatoire de la mer. Un tel mouvement, constitué par la marée, a déjà fait objet de réalisations en France dans l'estuaire de la Rance. Cependant l'exploitation de la marée n'est possible que dans des conditions maréographiques et géologiques tout à fait particulières telles :

- qu'un marnage d'au moins 12 mètres
- qu'une baie pouvant être barrée par un barrage maritime.
- qu'un fond marin apte à supporter un tel barrage.

Il est excessivement rare de trouver un emplacement où toutes ces exigences sont satisfaites et c'est pour cette raison que mon promoteur s'est penché sur la problème de l'exploitation d'un autre mouvement oscillatoire de la mer qui est la houle. L'énergie en question est celle qui est apportée à la rive par le déferlement des lames.

L'objet de la présente étude consiste à la transformation de cette énergie en énergie potentielle accumulable pouvant être convertie en force motrice.

Cette étude sera présentée en quatre chapitres :

- le premier chapitre sera consacré à la conception et la réalisation des différents appareils en question.

- le deuxième chapitre portera sur l'étude théorique de la houle cylindrique en milieu de profondeur finie ainsi que le problème du déferlement.

- les divers modes d'essais concernant la houle et le déferlement ainsi que l'exploitation de leurs résultats correspondants feront l'objet du troisième chapitre.

- Au dernier chapitre on examinera les différentes conclusions qu'on a pu faire ressortir.

Je voudrais exprimer enfin toute ma gratitude envers les professeurs de l'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER qui ont contribué à ma formation et en particulier Monsieur Géza LAPRAY qui m'a permis de participer à ses travaux de recherche et m'a donné toute instruction nécessaire à la réalisation et à l'essai des appareils faisant objet de ma thèse.

- a -

Formules Appliquées.

$$c = \sqrt{\frac{g \times L}{2\pi} \operatorname{th} \frac{2\pi H}{L}} = 1,25 \sqrt{L \frac{\operatorname{th} 2\pi H}{L}} \quad (1)$$

$$L = c \times T \quad (2)$$

$$T = \sqrt{\frac{2\pi L}{g} \operatorname{coth} \frac{2\pi H}{L}} = 0,8 \sqrt{L \operatorname{coth} \frac{2\pi H}{L}} \quad (3)$$

$$2a = h \frac{\operatorname{ch} \frac{2\pi(H-y)}{L}}{\operatorname{sh} \frac{2\pi H}{L}} \quad (4)$$

$$2b = h \frac{\operatorname{sh} \frac{2\pi(H-y)}{L}}{\operatorname{sh} \frac{2\pi H}{L}} \quad (5)$$

$$E = \frac{\bar{\omega} \cdot h^2 \cdot L}{16} \quad (6)$$

$$P = \frac{E}{T} = \frac{\bar{\omega} \cdot h^2 \cdot L}{16 \cdot T} \quad (7)$$

- b -

$$2a_0 = h \cdot \coth \frac{2\pi H}{L} \quad (8)$$

$$2a_H = \frac{h}{\operatorname{sh} \frac{2\pi H}{L}} \quad (9)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi a_0}{T} \quad (10)$$

$$\omega_H = \frac{2\pi a_H}{T} \quad (11)$$

$$e = \frac{P_{roue}}{P_{roule}} \quad (12)$$

PREMIERE PARTIE

CONCEPTION ET REALISATION DES DIFFERENTS APPAREILS.

I - Généralités

* La Houle

- Caractéristiques
- Méthodes artificielles de réalisation.

II - Confection des différents appareils.

- Bassin à houle
- Amplificateur
- Aube fixe
- Roue comportant des aubes
- Arbre actionné par le jet d'eau comportant les différents accessoires.
- Aube à tangage

Généralités.

En ce qui concerne cette réalisation on devra en premier lieu avoir une idée de ce qu'est la houle ainsi que ses caractéristiques.

* La Houle :

On a bien observé des ondulations sur la surface de la mer. Ces dernières sont causées par le vent balayant cette surface. Ces ondulations sont appelées "vagues ou lames". Ce phénomène tend à se régulariser et donne naissance à un mouvement caractérisé par une série de lames équidistantes se propageant à la surface avec une célérité variable avec la profondeur et perpendiculaire aux crêtes.

* Caractéristiques de la houle : (voir fig. 2.I.).

Elle est caractérisée par :

- Son amplitude "h" ou hauteur du creux.
- Sa longueur d'onde "L" qui est la distance entre deux crêtes.
- Sa période "T" : intervalle de temps s'écoulant entre le passage de deux crêtes consécutives en un même point.
- Sa célérité "C" : vitesse moyenne de propagation.
- Sa cambrure $\frac{h}{L}$: rapport sans dimensions entre l'amplitude et la longueur d'onde.
- La direction des lames : est celle correspondant à la ligne normale aux crêtes dans le sens de la propagation.

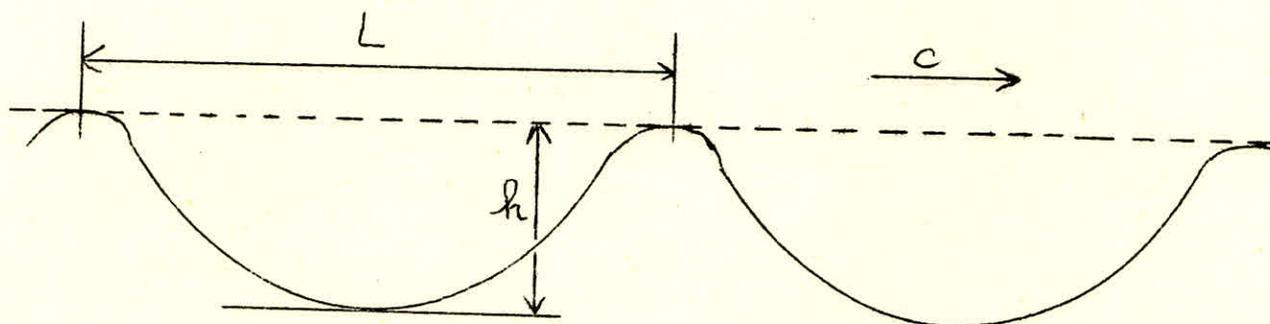


Fig. 2.I.

* Méthodes artificielles de réalisation.

L'appareil le plus couramment utilisé à engendrer la houle est le volet rigide. Ce dernier est animé d'un mouvement oscillatoire qui produit une houle cylindrique pure.

CONFECTION DES DIFFERENTS APPAREILS

A - Bassin à houle avec les différents accessoires:
(voir fig. A)

I - Le bloc moteur : (voir fig. A.I.)

Le générateur à houle est constitué par un moteur universel type "Robot Jeannette" avec démultiplicateur. Alimenté électriquement sur un circuit à 220 volts et dispose d'une puissance de 150 Watts. Sa vitesse varie entre 50 et 100 t/mn. , et est réglable à l'aide d'un rhéostat électrique branché en série. Le mouvement oscillatoire autour d'un axe horizontal du volet est créé par un système bielle-manivelle actionné par ce moteur.

VUE D'ENSEMBLE DU BASSIN A HOULE
AVEC LES DIFFERENTS ACCESSOIRES

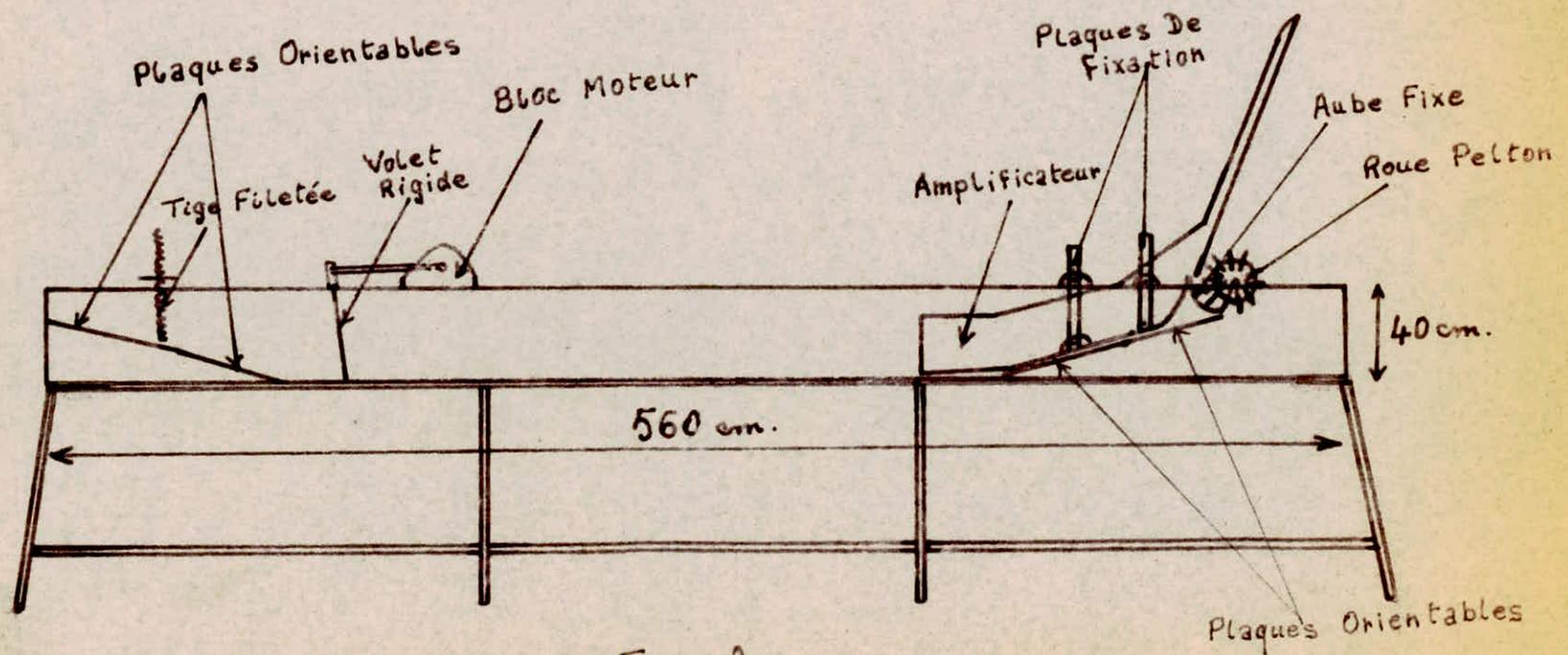


Fig.: A

2 - Le volet rigide : (voir fig. A.1.)

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

La dissymétrie de l'emplacement du volet par rapport au plan du bassin a été adoptée car nous sommes intéressés par une des deux extrémités du bassin.

3 - La plaque orientable : (voir fig. A.2.)

Pour empêcher la réflexion des lames on a prévu cette plaque, jouant le rôle de plage destinée à prendre toutes les positions possibles (dans le sens des vagues) de manière à reproduire le phénomène naturel.

Pour bien définir le rôle que joue cette plaque il est nécessaire de mentionner la question du déferlement.

Déferlement :

On appelle déferlement des lames leur dissociation. C'est l'apparition instantanée d'un bouillonnement sur leur face antérieure quand ces lames ne trouvent plus de profondeur suffisante au cours de leur progression vers la rive. On dit alors que la houle se déferle ou se brise (fig. I.2.)



Fig. I.2

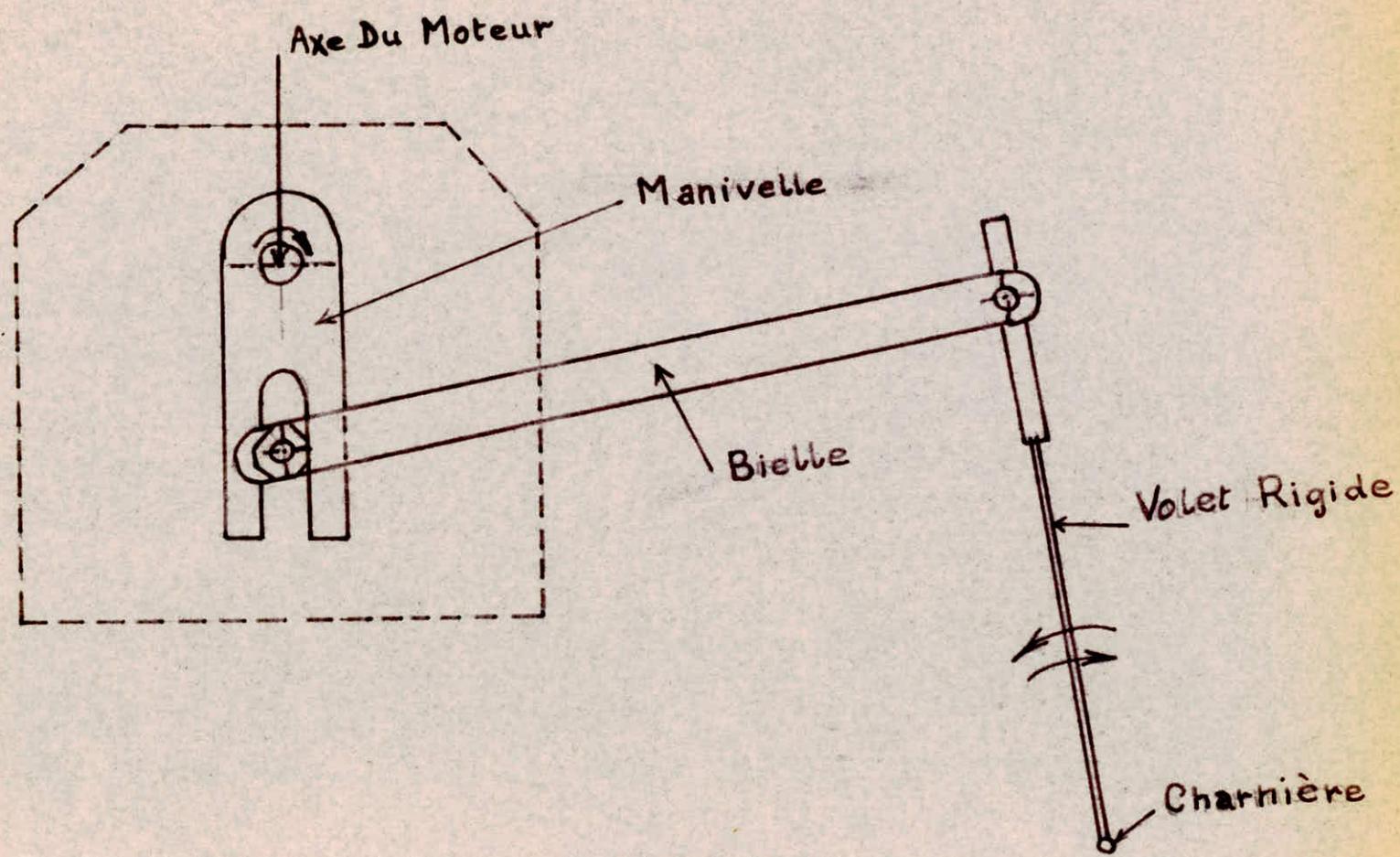


Fig: A-1

MECANISME DU MOTEUR

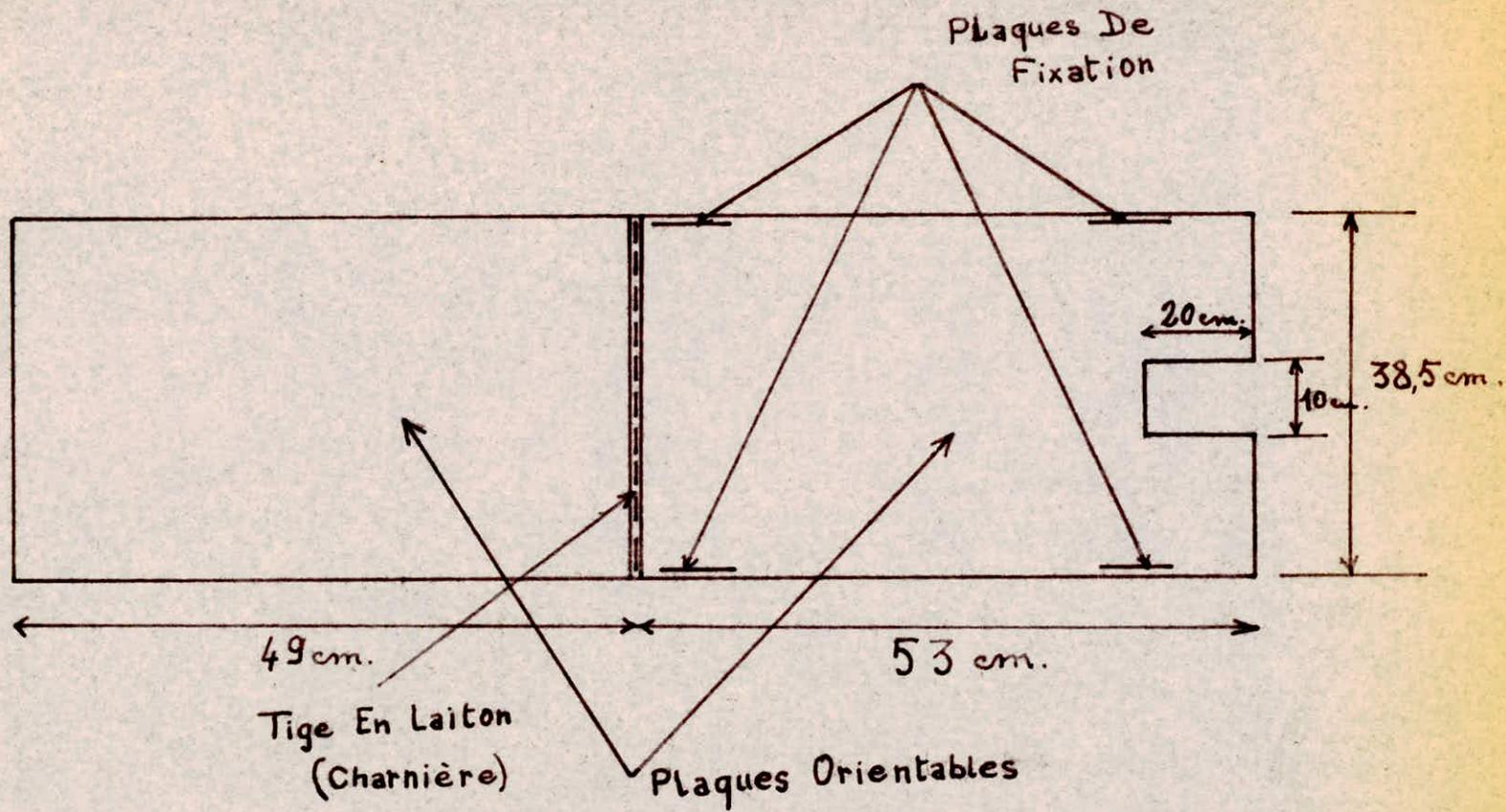
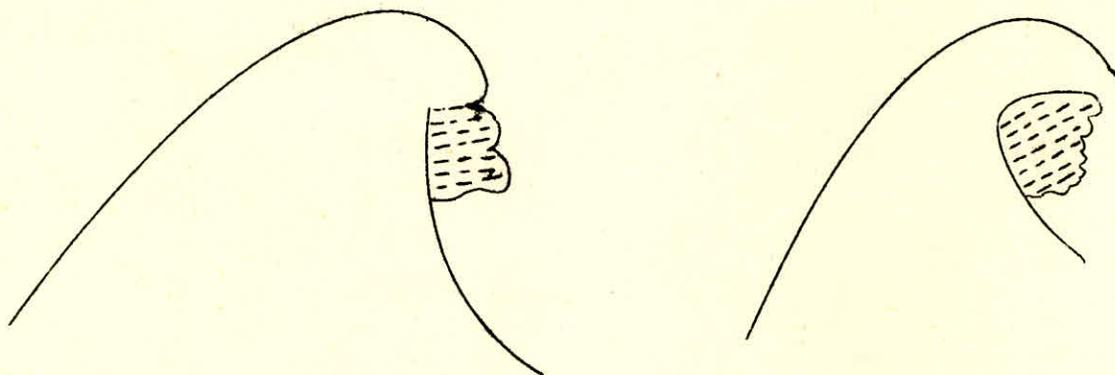


Fig: A-2

Ce déferlement varie suivant la pente. Sur les fonds à pente douce les lames déferlantes chassent longuement la masse bouillonnante devant elles ; le profil reste donc symétrique avec un angle de l'ordre de 120° en crête dont le point anguleux dépasse le niveau de repos d'a peu près des trois quarts du creux total des lames. (fig. I.3a).



a - Fond à pente douce

b - fond à pente plus raide

Fig. I.3

Sur les fonds plus raides, le bouillonnement devient brutal et plus bref. Le profil devient franchement dissymétrique et l'eau retombe violemment en nappe devant un front lisse abrupt sous une crête arrondie (déferlement basculant) (fig. I.3_b).

Notons qu'il existe toute une série d'intermédiaire entre les deux extrêmes précédents.

Les lames peuvent déferler plusieurs fois de suite surtout sur les plages de sable lisse à pente douce, ceci est appelé "lignes de rouleaux" qui sont des lignes grossièrement parallèles sur lesquelles les lames se brisent successivement. Quant à la ligne la plus large, c'est la première ligne de rouleaux. La profondeur y correspondante s'appelle "profondeur de déferlement".

Pour clore ce petit paragraphe, on doit noter que le déferlement des lames est accompagné d'importantes dissipations ou libérations d'énergie.

B - Amplificateur : (voir fig. B.I.)

Conformément aux directives de Mr. LAPRAY, on a procédé à la confection de cet appareil.

Le but de cet amplificateur est de faire monter l'eau à une certaine hauteur. Cette remontée de l'eau est due à la "gifle". Cette dernière est une pointe de pression extrêmement fugitive et brutale et qui aura lieu tout au début du déferlement.

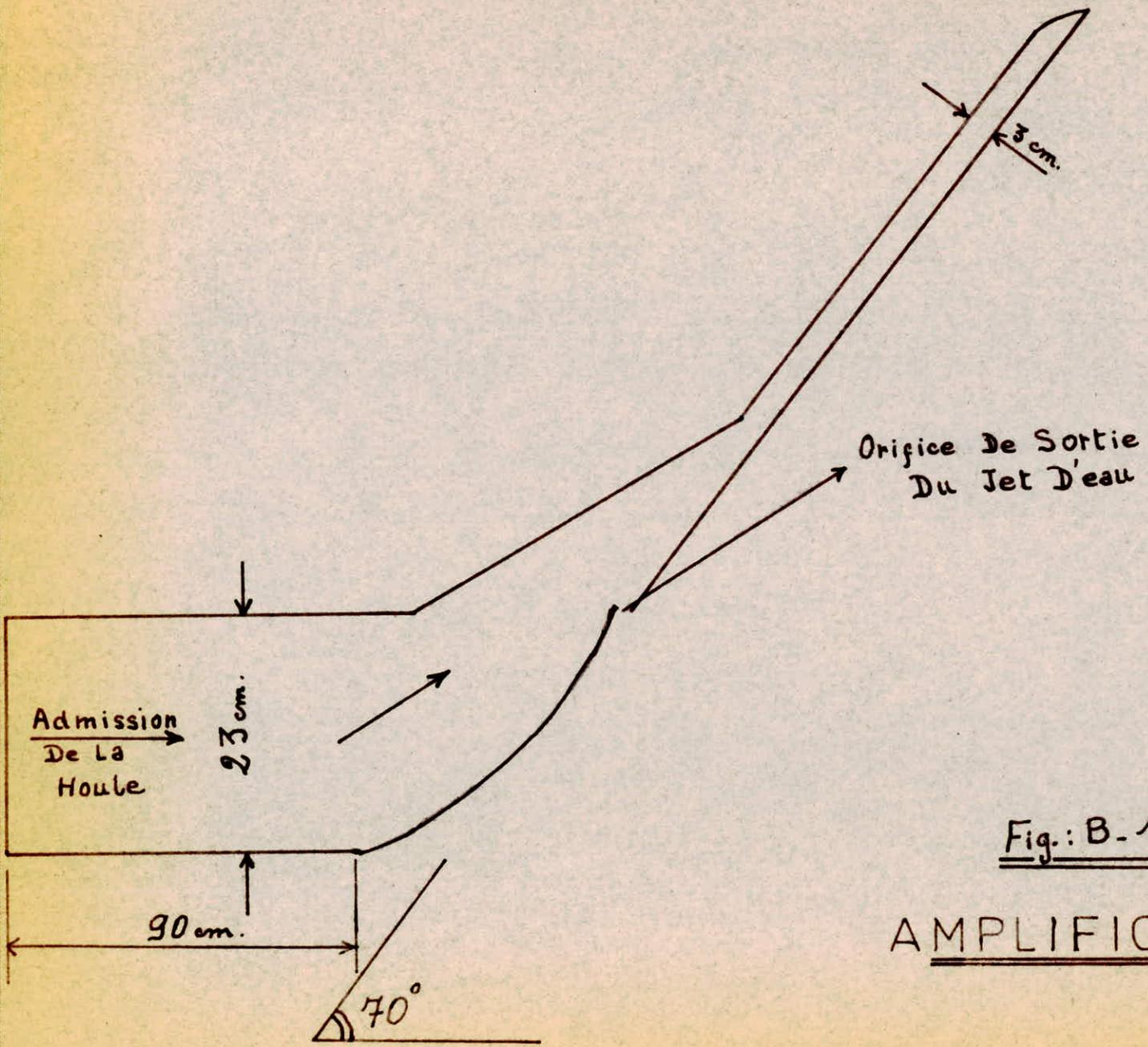
Cet amplificateur va en convergent puis remonte avec une conduite faisant un angle de 70° avec l'horizontale. L'eau retombe en passant par un orifice fait de façon à ce que la descente de l'eau n'empêche pas la partie qui monte sous l'effet de la "gifle".

Notons qu'en France ils ont pu arriver à confectionner un appareil dans lequel ils ont procédé à faire des sorties dans le convergent pour remplir des bassins à différents niveaux. Signalons que ce procédé a donné un rendement de 10 % environ ; ceci est dû à ce que le phénomène de montée et de descente dans le convergent se réalise.

Cet orifice qu'on a prévu nous a amené, en faisant différents essais, à doubler la hauteur où peut arriver l'eau dans le convergent.

Il est à signaler que l'appareil a été conçu et construit et par la suite on a pu adapter les caractéristiques de la houle à cet appareil en agissant sur le rhéostat qui fait varier la vitesse du moteur générateur de houle. Tandis que dans la nature l'appareil devra être construit en fonction des caractéristiques de la houle.

L'eau des lames déferlantes produites par notre appareil générateur de houle, peut s'élever dans le col à une altitude de 90 cm. au-dessus du niveau moyen de la surface d'eau ; ce qui correspond aux caractéristiques suivantes :



Orifice De Sortie
Du Jet D'eau

Fig.: B-1

AMPLIFICATEUR

Coefficient amplificateur : Nombre sans dimensions proposé par Mr. LAPRAY.

Il est défini par le rapport entre les distances verticales existant :

- entre le niveau de l'eau "H" atteint dans la conduite et le niveau de repos de la mer d'une part.

- et entre le niveau des crêtes et celui de la mer d'autre part.

Il s'exprime par la formule ci-dessous :

$$C_a = \frac{H}{h/2}$$

h étant l'amplitude

$$C_a = \frac{90}{7/2} = \frac{180}{7} = 25,71$$

Puissance mesurée sur la roue :

Poids = 300 g.

Longueur = 92 cm.

Temps = 13 sec.

$$P = 0,3 \times \frac{0,92}{13} = 2,12 \times 10^{-2} \text{ KG m/sec}$$

C - Aube fixe. (voir fig. C.I)

Pour changer la direction du jet d'eau sortant de l'orifice on a prévu une aube fixe. On admet que le jet atteint l'aube sans choc et que le frottement entre le jet et l'aube est insignifiant.

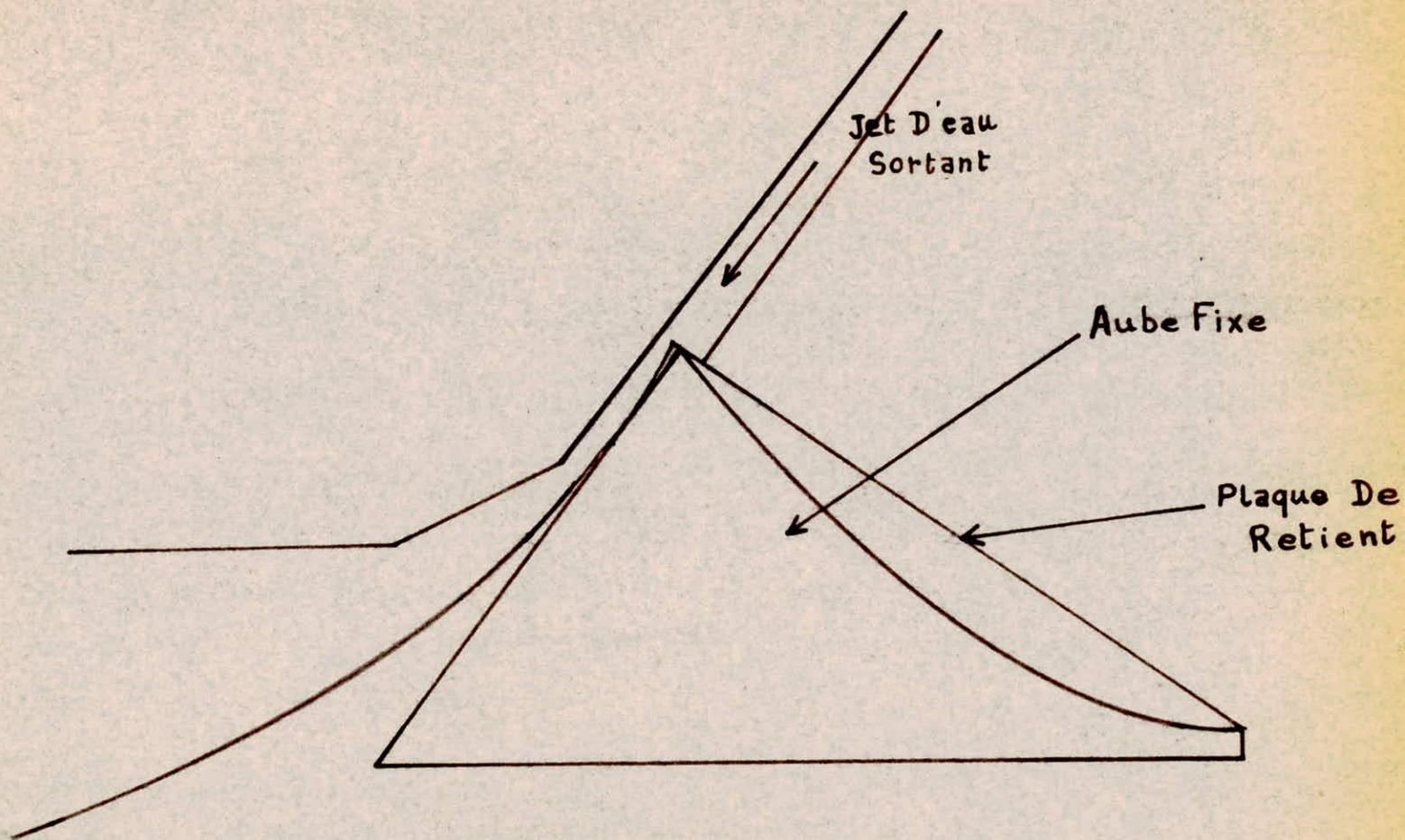


Fig: C-1

AUBE FIXE

Puisque le jet ne subit pas de changement de hauteur ni de pression lors de l'impact, la vitesse de sortie du jet doit être la même que la vitesse d'entrée.

D - Roue comportant des aubes. (voir fig. D.I.)

Cette roue est confectionnée en plexiglas : Elle comporte des aubes peu inclinées par rapport à la tangente à la roue ; c'est-à-dire faisant un angle supérieur à 90° avec la tangente. Elle sera actionnée par le jet d'eau sortant. L'exploitation rationnelle de l'énergie du jet par une seule aube n'est pas réalisable.

Dans la pratique on utilise généralement toute une série d'aubes montées sur la périphérie d'une roue et disposées de manière à ce que l'une après l'autre des aubes soit successivement soumise à l'effet du jet de façon à assurer un fonctionnement continu ininterrompu de l'ensemble. Cette roue qu'on a est une roue Pelton.

E - L'arbre et les différents accessoires. (voir fig. E.I.)

Deux roulements à billes étanches placés sur la partie supérieure du bassin à houle, assurent la rotation de l'arbre sous l'effet du jet d'eau ; Cet arbre comporte une roue en bois évidée, d'un moment d'inertie assez considérable ayant le rôle de maintenir constante la vitesse de rotation de cet arbre. A chaque extrémité de cet arbre se trouve un système de bielle-manivelle pouvant faire fonctionner une pompe à piston plongeur.

F - La pompe à piston plongeur : (voir fig. F.I.)

C'est une pompe à simple effet. Le cylindre a un diamètre supérieur au piston ; celui-ci ne frotte donc pas contre le cylindre et l'ensemble des frottements est ainsi diminué.

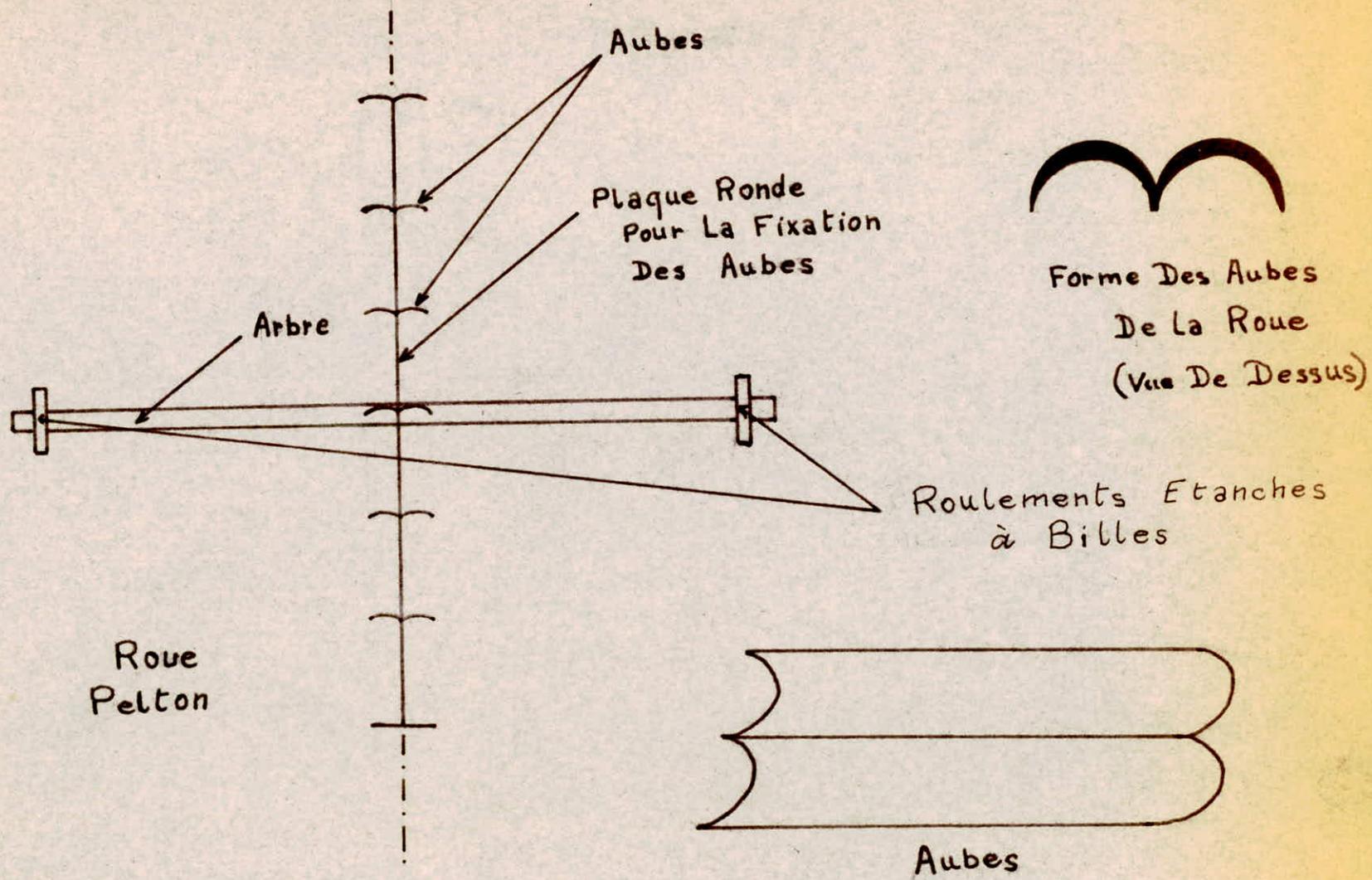


Fig.: D-1 et E-1.

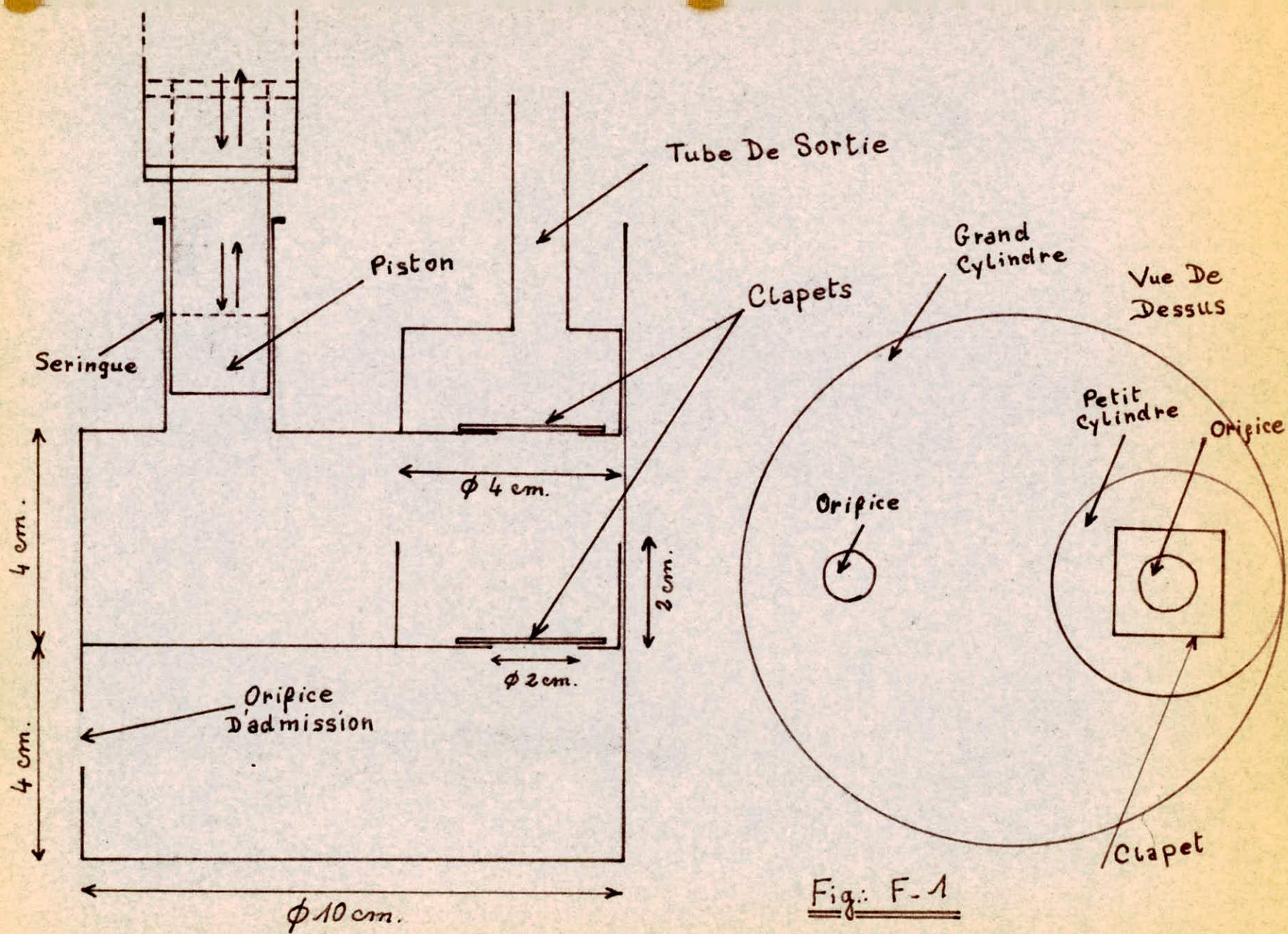


Fig. F-1

POMPE A PISTON PLONGEUR

Notre pompe à piston plongeur est en plexiglas. Le cylindre et le piston sont constitués par une seringue ordinaire. L'étanchéité est bien assurée.

Hauteur de refoulement :

Cette hauteur est théoriquement illimitée. En fait elle dépend, dans chaque type de pompe, de la résistance des organes et de l'étanchéité des joints.

La pompe à piston plongeur est actionnée par une aube mobile. Le système d'articulation est représenté sur la fig. F.2.

Pour avoir un rendement supérieur que dans le cas précédent on a pensé à faire actionner par ce même jet d'eau une pompe à essence qui débite mieux que la pompe qu'on a confectionnée. Notons que le fait d'obtenir un faible rendement est dû à ce que la seringue était exposée aux intempéries et aux poussières. Durant le fonctionnement le piston coinçait à chaque fois. Cette force de frottement entre piston et cylindre était suffisante à bloquer le système et à arrêter le pompage.

Ayant toujours l'idée d'exploiter ce jet d'eau sortant de l'orifice, on a pu arriver à réaliser un simple système pour faire actionner la pompe à essence. (voir fig. F.3.).

Ce système est composé d'une aube fixée sur un tube en aluminium cintré qui repose à l'autre extrémité sur un axe de rotation perpendiculaire au plan de ce tube. Un petit tube en aluminium est dans la continuation du premier et qui est relié à la manette de la pompe par un système de bielle-manivelle. Le mouvement de ce système, causé par le jet d'eau agissant sur l'aube, assure le fonctionnement de la pompe à essence.

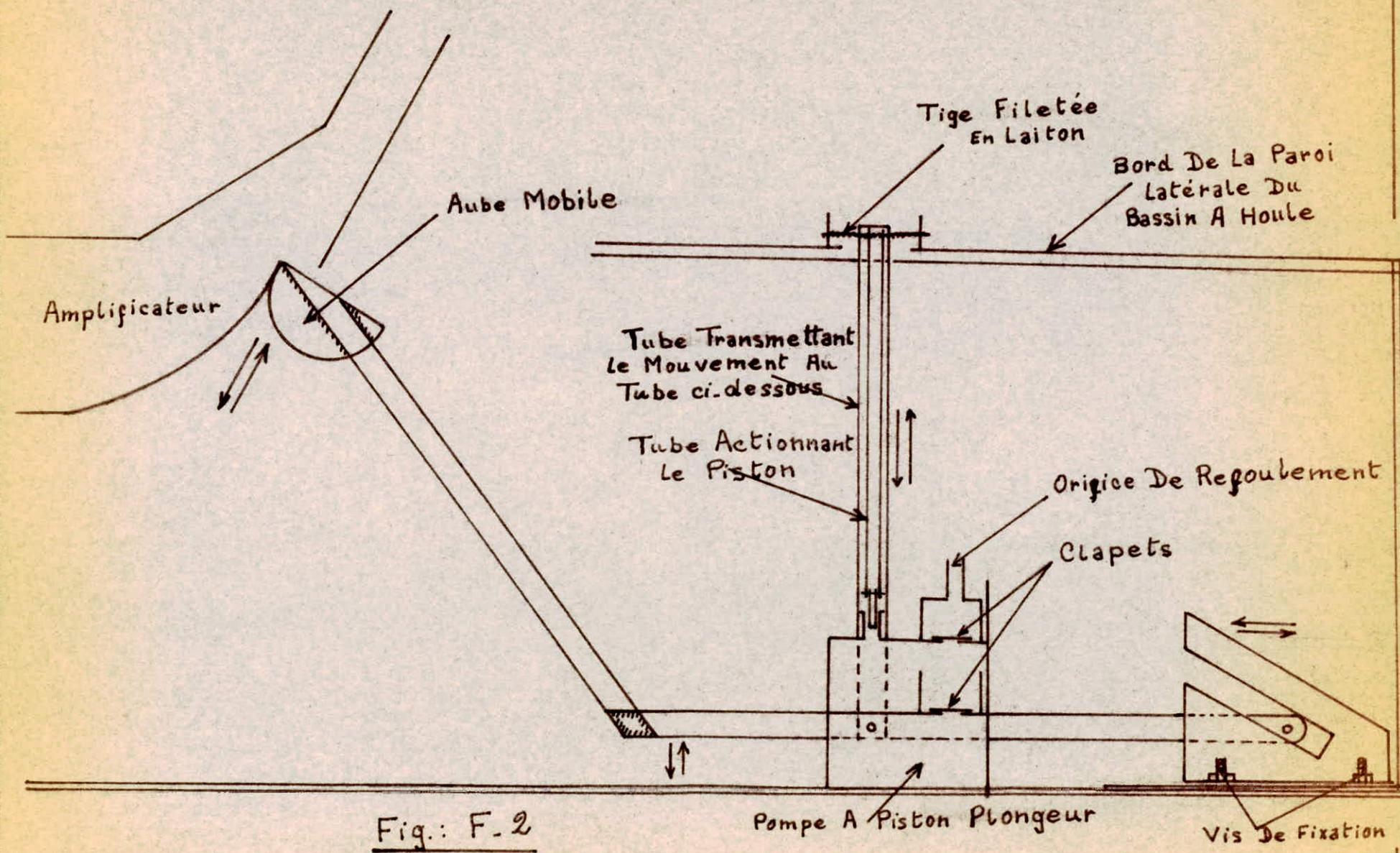


Fig.: F-2

Pompe A Piston Plongeur

Vis De Fixation

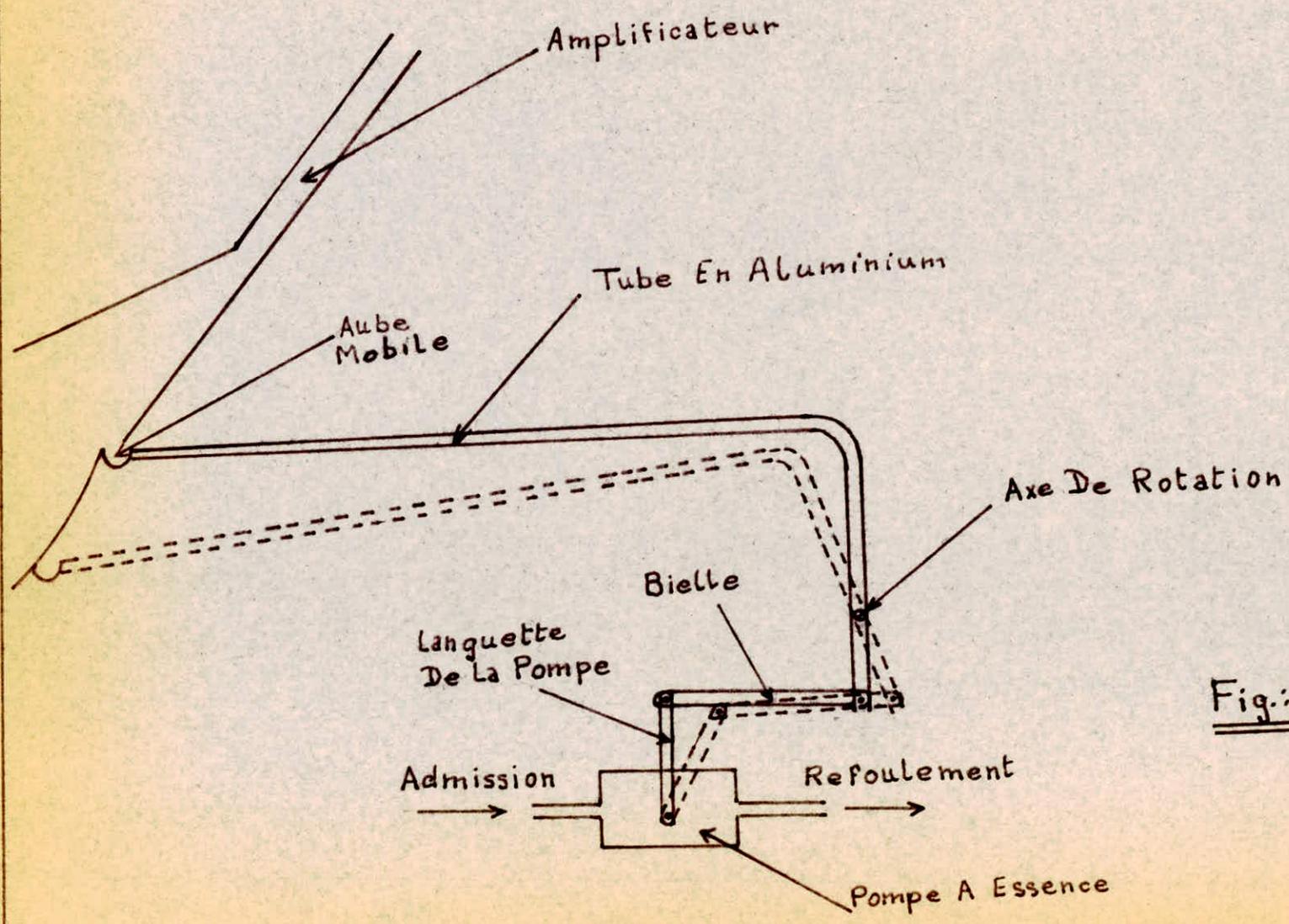


Fig.: F-3

Une installation de pompage était nécessaire. Celle-ci comprend une bouteille suspendue à 7 mètres au-dessus du niveau du gaz oil contenu dans deux vases communicants attachés à des supports reposant sur une table. Le premier vase est relié à l'extrémité admission de la pompe à essence au moyen d'un tube en nylon. Le refoulement de la pompe monte à la bouteille suspendue d'où sort un autre tube en nylon pour aller au second des vases communicants.

Ainsi on a un circuit fermé.

(voir fig. F.4.)

Nature de l'écoulement le long de cette installation.

Essayons de chercher la valeur du nombre de Reynolds pour pouvoir déduire la nature de l'écoulement :

$$R = \frac{V \times D}{\nu} = \frac{7.07 \cdot 10^{-2} \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{9 \cdot 10^{-6}} = 63$$

V étant la vitesse du jet sortant déterminée expérimentalement (voir essais)

D diamètre du tube en nylon.

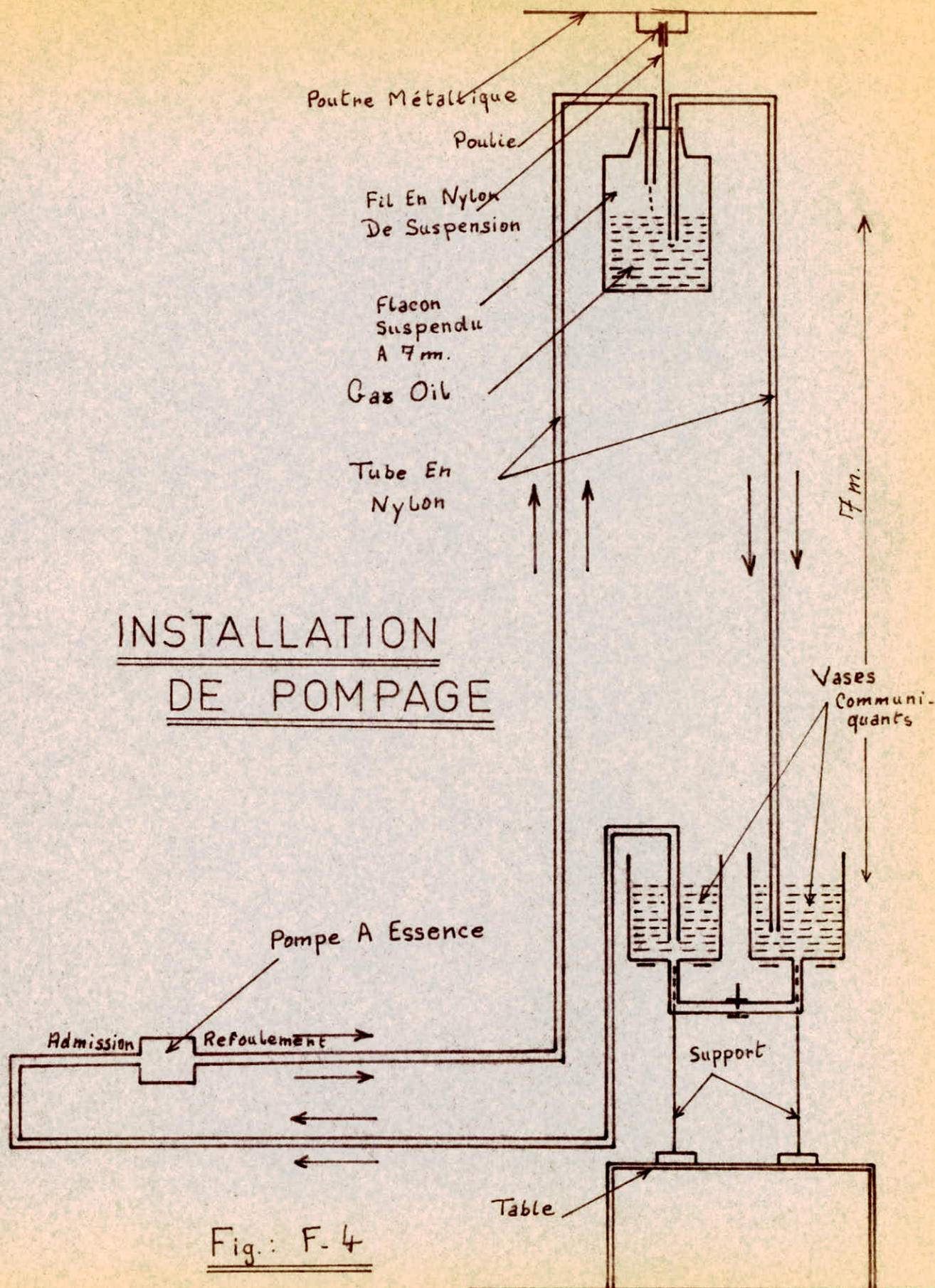
ν viscosité cinématique du gaz oil.

Donc l'écoulement est laminaire car $R < 2.000$.

En ce qui concerne les pertes de charge on en distingue deux :

- perte de charge linéaire tout le long des tuyaux en nylon.
- perte de charge due aux coudes des conduites en verre placées sur la bouteille suspendue.

Ces pertes de charge sont minimales.



DEUXIEME PARTIE

ETUDE DE L'ENERGIE APPOREE PAR LE DEFERLEMENT

- Objet de l'étude.
- Etude théorique de la houle cylindrique en profondeur finie.

3-1. Objet de l'étude

Le but de cette étude consiste à rechercher de démontrer si, à partir d'une houle cylindrique simple en profondeur finie, on pouvait obtenir une énergie convertible en force motrice.

3-2. Etude théorique de la houle cylindrique en profondeur finie.

a) L'amplitude et la longueur d'onde de la houle dépendent essentiellement du fetch (étendu de mer libre) désigné par "F" et exprimé en Km, de la vitesse du vent "W" en m/sec et la durée de son action ainsi que de la possibilité de l'épanouissement ou de l'amortissement du mouvement au cours de sa progression. Le phénomène le plus fréquent se produit pour les houles occasionnées par une tempête car en s'épanouissant, celles-ci perdent les 2/3 de leurs amplitudes et décroissent par la suite exponentiellement.

Les formules données à cet effet ne sont qu'empiriques ou approximatives dont la plus connue est la suivante.

$$h = \frac{1}{3} h_0 \times 0,8 \frac{L-1000}{1000} \quad (I)$$

"h₀" désigne l'amplitude de la houle à la limite de la zone de tempête.

"L" est la distance en Km. du lieu considéré, comptée à partir de la même limite.

Cette amplitude maximale peut être déterminée autrement en se basant sur des relevés quotidiens au même point selon une loi de probabilité convenable comme il a été fait dans diverses stations.

b) Analyse mathématique du problème.

Le problème mathématique correspondant au mouvement de la houle a donné naissance à diverses solutions proposées par des théoriciens différents comme : Poisson, Rankine et Boussinesq...

En effet, d'une façon générale la surface libre de la houle cylindrique simple ne diffère d'une trochoïde elliptique, en profondeur constante, que par des termes du second degré.

Dans ces conditions, les crêtes sont alors légèrement plus aiguës et les creux légèrement plus aplatis.

La vitesse de propagation ou célérité de la houle est donnée par la formule :

$$c = \sqrt{\frac{g \cdot L}{2 \cdot \pi} \operatorname{th} \frac{2 \cdot \pi \cdot H}{L}} = 1,25 \sqrt{L \operatorname{th} \frac{2 \cdot \pi \cdot H}{L}} \quad (2)$$

avec L = longueur d'onde de la houle.

H = profondeur constante.

et comme $L = C \cdot T$, la période de la houle sera donc d'après la formule (2) :

$$T = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot L}{g} \operatorname{coth} \frac{2 \cdot \pi \cdot H}{L}} = 0,8 \sqrt{L \operatorname{coth} \frac{2 \cdot \pi \cdot H}{L}} \quad (3)$$

Si la profondeur H est très faible par rapport à la longueur d'onde, la formule se réduit encore plus et devient

$$c = \sqrt{g \times H} \quad (4)$$

Les particules en se mouvant, décrivent des orbites circulaires de rayon "h" à la surface libre, ou plus généralement des orbites elliptiques aplatis qui ont pour grand axe : (voir fig. 3-I)

$$2 a = h \frac{\operatorname{ch} \frac{2 \cdot \pi \cdot (H - y)}{L}}{\operatorname{sh} \frac{2 \cdot \pi \cdot H}{L}} \quad (5)$$

et pour petit axe :

$$2 b = h \frac{\operatorname{sh} \frac{2 \cdot \pi (H - y)}{L}}{\operatorname{sh} \frac{2 \cdot \pi \cdot H}{L}} \quad (6)$$

au niveau déterminé par l'ordonnée "y" lorsque la houle se propage dans une masse de liquide ayant la profondeur $H = \text{constante}$.

On doit préciser par ailleurs que tout ceci n'est vrai qu'à des termes près de l'ordre tout au plus du carré de la cambrure et qu'il n'existe en réalité qu'une seule houle correspondant à un système de tourbillons particuliers pour laquelle les orbites sont toutes rigoureusement fermés.

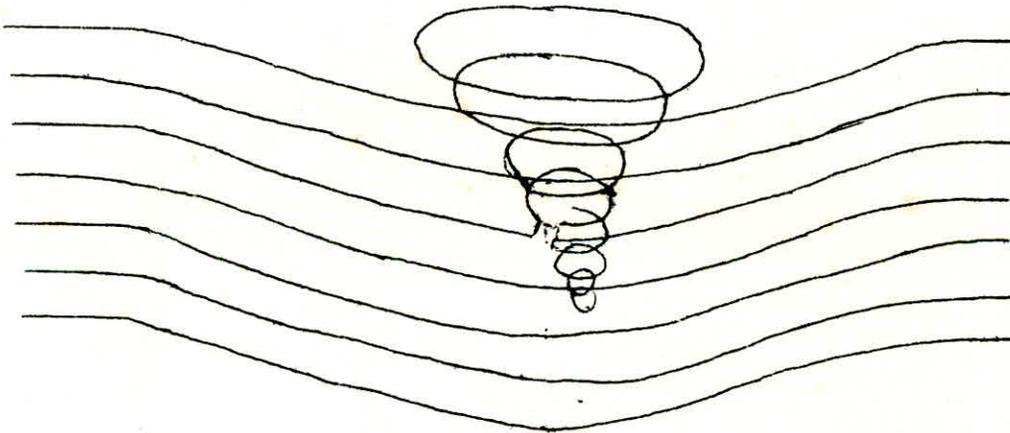


fig. 3-I

Quant à l'énergie cinétique de la masse d'eau moyennement fixe comprise entre deux plans fixes distants de la longueur d'onde "L", elle reste toujours rigoureusement égale à l'énergie potentielle, et leur somme est définie de la manière suivante :

$$E = \frac{\bar{\omega} \cdot h^2 \cdot L}{8} \quad (7)$$

par unité de longueur de crête, à des petits termes additifs près qui sont d'autant plus grands que la profondeur "H" est plus faible.

C) Conclusion :

Les hydrauliciens spécialistes divergent sur les deux points suivants :

* La position des crêtes et des creux par rapport au niveau de repos (problème de la surélévation du niveau moyen). (voir fig. 3-2).

Il s'agit là d'un simple problème géométrique de compensation de volume d'eau par rapport au niveau de repos.

* La forme limite de la houle (problème du déferlement). Il s'agit là aussi de faibles différences dans la distribution initiale des tourbillons.

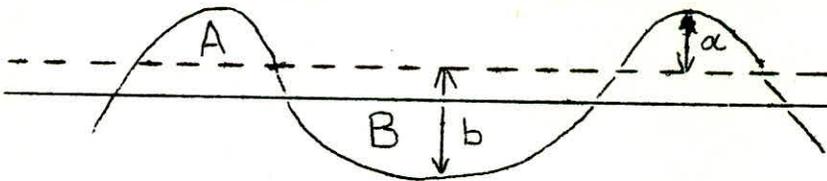


Fig. 3-2

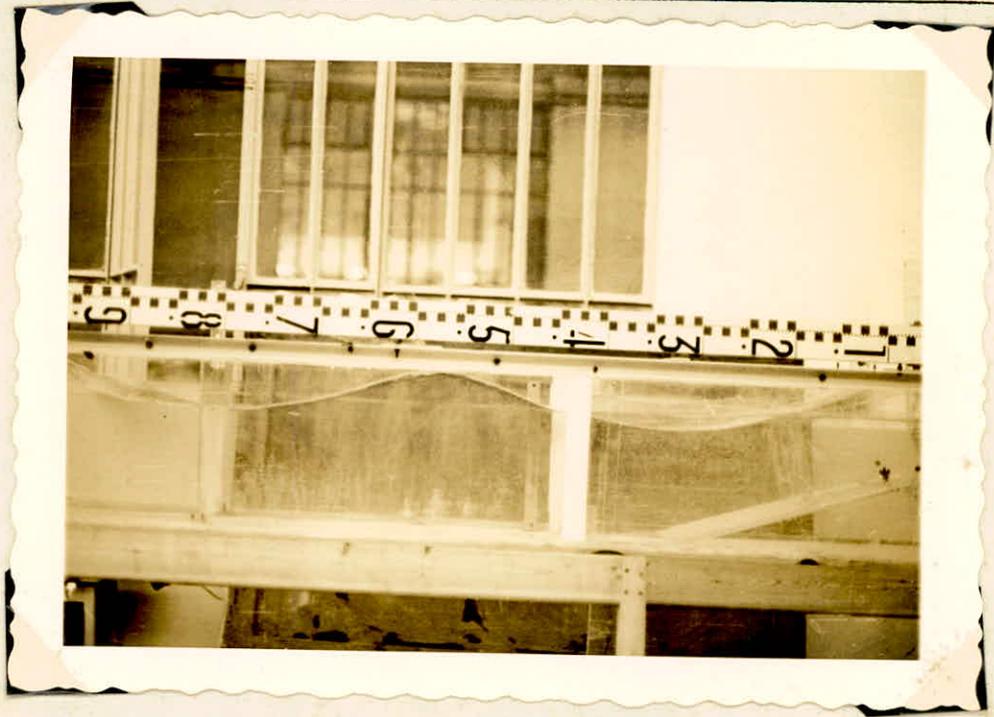
La fig. 3-2 montre la surélévation du niveau moyen (trait en pointillés) par rapport au niveau de repos (trait plein) ; on a par conséquent :

$$\text{aire } A = \text{aire } B \quad \text{soit } a = b$$

E S S A I S

E T

R E S U L T A T S



Détermination De La Longueur D'onde "L"

Après avoir déterminé les caractéristiques de la houle correspondant à une même position du curseur du rhéostat, on va essayer de trouver les valeurs des caractéristiques suivantes en appliquant les formules déjà mentionnées au début de ce rapport de thèse (formules appliquées).

Période.

Au cours du prélèvement des mesures on a trouvé pour cette période la valeur

$$T = 0,8 \text{ sec}$$

$$L_{\text{optimum}} = 0,50 \text{ m. (mesurée expérimentalement)}$$

Calcul de la célérité :

$$\begin{aligned} C_{\text{optimum}} &= \frac{L_{\text{optimum}}}{T_{\text{optimum}}} = \frac{0,50}{0,8} \\ &= 0,625 \text{ m/sec.} \end{aligned}$$

Calcul des caractéristiques de l'orbite elliptique.

- Grand axe :

$$\text{pour } (y = \frac{H}{2} = \frac{29}{2} = 14,5)$$

D'après la formule (4) on aura :

$$2a = h \frac{\operatorname{ch} \frac{2\pi(H-y)}{L}}{\operatorname{sh} \frac{2\pi H}{L}} = \frac{\operatorname{ch} \frac{2\pi(29-14,5)}{50}}{\operatorname{sh} \frac{2\pi \cdot 29}{50}}$$

$$\operatorname{ch} \frac{2\pi \cdot 14,5}{50} = \operatorname{ch} \frac{2\pi \cdot 14,5}{50} = \operatorname{ch} 1,82 = \frac{e^{1,82} + \frac{1}{e^{1,82}}}{2}$$

$$\operatorname{ch} 1,82 = \frac{6,15 + \frac{1}{6,15}}{2} = \frac{37,82+1}{2 \cdot 6,15} = \frac{38,82}{12,30} = 3,15$$

$$\operatorname{sh} \frac{2\pi \cdot 29}{50} = \operatorname{sh} 3,65 = \frac{e^x - e^{-x}}{2} = \frac{38,5 - \frac{1}{38,5}}{2}$$

$$\operatorname{sh} 3,65 = \frac{1482,25 - 1}{77,0} = \frac{1481,25}{77} = 1,94$$

$$2a = 7 \times \frac{3,15}{1,94} = 11,35 \text{ cm.}$$

- Petit axe : formule (5)

pour ($y = H/2 = 29/2 = 14,5$)

$$2b = h \frac{\operatorname{sh} \frac{2\pi(H-y)}{L}}{\operatorname{sh} \frac{2\pi H}{L}} = 7 \frac{\operatorname{sh} \frac{2\pi(29-14,5)}{50}}{\operatorname{sh} \frac{2\pi \cdot 29}{50}}$$

$$\operatorname{sh} \frac{2\pi \cdot 14,5}{50} = \operatorname{sh} 1,82 = \frac{e^{1,82} - \frac{1}{e^{1,82}}}{2} = \frac{6,15 - \frac{1}{6,16}}{2}$$

$$\operatorname{sh} 1,82 = \frac{37,82 - 1}{2 \cdot 6,15} = \frac{36,82}{12,3} = 2,99$$

$$\operatorname{sh} \frac{2\pi \cdot 29}{50} = 1,94$$

$$2b = 7 \times \frac{2,99}{1,94} = 10,6 \text{ cm.}$$

- Calcul des excursions périodiques totales

En surface : formule (8)

$$2a_0 = h \operatorname{coth} \frac{2\pi H}{L} = 7 \operatorname{coth} \frac{2\pi \cdot 29}{50}$$

$$\operatorname{coth} \frac{2\pi \cdot 29}{50} = \operatorname{coth} 3,65 = \frac{1}{\operatorname{th} 3,65} = \frac{1}{0,998} = 1,002$$

$$2a_0 = 7 \times 1,002 = 7,014 \text{ cm.}$$

Sur le fond : formule (9)

$$2a_H = \frac{h}{\text{sh} \frac{2 \cdot \pi \cdot H}{L}} = \frac{7}{\text{sh} \frac{2 \cdot \pi \cdot 29}{50}}$$

$$\text{sh} \frac{2 \cdot \pi \cdot 29}{50} = 1,94$$

$$2a_H = \frac{7}{1,94} = 3,61 \text{ cm.}$$

Calcul des vitesses maxima correspondantes :

$$u_o = \frac{2 \pi a_o}{T} = \frac{3,14 \cdot 7,014}{0,8} = 27,6 \text{ cm/sec.}$$

$$u_H = \frac{\pi \cdot 2a_H}{T} = \frac{3,14 \cdot 3,61}{0,8} = 14,2 \text{ cm/sec.}$$

Le calcul du rendement de l'appareil faisant objet de la présente étude nécessite la détermination du rapport entre l'énergie rendue par l'appareil et l'énergie apportée par la houle ayant pour expression

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

- b - désignant la largeur de la tranche parallépipédique considérée de liquide agité.
- L - la longueur de la tranche parallépipédique de liquide agité qui est égale à la longueur d'onde.
- h - l'amplitude de la houle.
- $\bar{\omega}$ - poids spécifique du liquide.

C'est la quantité de l'énergie qui est véhiculée par la houle dans la direction de la côte pendant la durée d'une période "T". Pour avoir la valeur de l'énergie par unité de temps ou autrement dit la puissance de la houle déferlant à la côte sur une largeur "b". On a

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

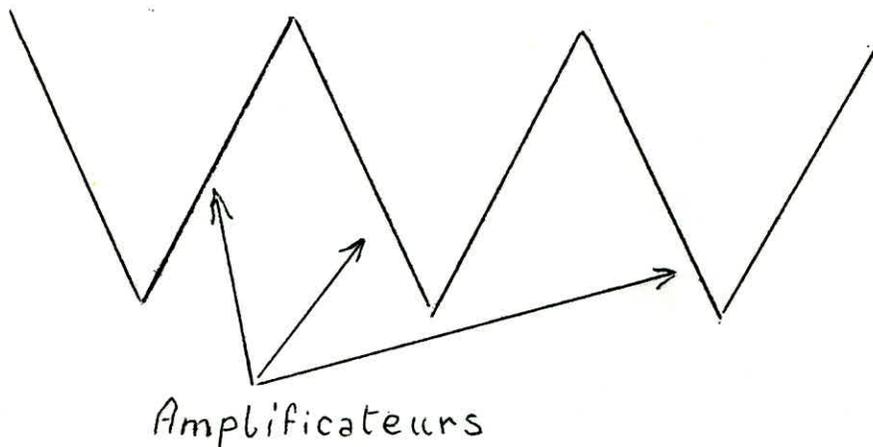
La largeur "b" intervenant à ce phénomène est celle qui correspond à l'écartement des parois convergentes à l'entrée de la houle.

Nous avons constaté expérimentalement que l'accroissement de cette largeur entraîne un accroît de l'énergie rendue par l'appareil tant que le rapport de $\frac{b}{L}$ reste inférieur à 0,3 c'est-à-dire pour une longueur d'onde $L = 0,50$ m. , "b" reste inférieure à 0,15 m. L'accrois de la largeur d'entrée au delà de cette valeur limite n'a aucune influence sur la valeur de la puissance rendue à

la sortie de l'orifice.

Pour cette raison dans les calculs des rendements nous avons considéré que $b = 0,15$ m. Toutefois on était obligé de dépasser en réalité cette largeur en continuant les parois convergentes vers l'arrière jusqu'à l'intersection de ces plans inclinés par les parois verticales du bassin à houle. Pour empêcher la pénétration de l'agitation dans l'espace constituant le lieu de l'emplacement des appareils récepteurs de l'énergie, comme la roue Pelton et comme l'aube à tangage entraînant la pompe, on aurait pu empêcher la pénétration de cette agitation par l'obturation du canal au niveau d'entrée de l'amplificateur, par une paroi verticale parallèle aux crêtes. Mais cette solution aurait provoqué, par réflexion de la houle, un phénomène de clapotis qui aurait complètement dégénéré les caractéristiques de la houle pénétrant dans le dièdre.

Dans le cas où l'appareil, objet de la présente étude, aura été réalisé dans la nature il ne s'agira plus de l'application d'un seul dièdre isolé, mais d'une batterie de dièdres disposés suivant le schéma représenté ci-dessous.



Dans ce cas l'espace constituant le lien de l'emplacement des appareils récepteurs sera automatiquement à l'abri de l'effet perturbateur des oscillations de niveau d'eau et l'élimination de cet effet perturbateur ne nécessitera pas des dispositifs spéciaux.

Le calcul effectué en application des considérations ci-dessous exposées donnent pour la plus favorable/houle expérimentalement déterminée une puissance

$$P = 0,15 \cdot \frac{10^3 \cdot 7^2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,50}{16 \cdot 0,8}$$

$$P = 2,87 \cdot 10^{-2} \text{ KG m/sec.}$$

La puissance rendue sur l'arbre de la roue étant:

$$P_{\text{roue}} = 2,12 \cdot 10^{-2} \text{ KG m/sec.}$$

D'où le rendement "c":

$$c = \frac{P_{\text{roue}}}{P_{\text{houle}}} = \frac{2,12 \cdot 10^{-2}}{2,87 \cdot 10^{-2}} = 73,8 \%$$

$$c = 73,8 \%$$

Nous estimons que ce rendement pourra être certainement atteint dans la nature. On pourra donc, en construisant des appareils adéquates, transformer l'énergie de la houle déferlant sur les côtes moyennant un rendement de 73,8 % environ.

Pour le cas de l'Algérie cette puissance représente, en application des éléments mis à notre disposition par le service de Météorologie de Dar-El-Beida pour une longueur de côte de 1400 Km.

pour une amplitude moyenne de $h = 2,5$ m. pour une longueur d'onde $L = 150$ m. et pour une période de $T = 9$ sec.

$$P = \frac{10^3 \cdot 2,5^2 \cdot 150}{16 \cdot 9} \times 1,4 \times 10^6$$

$$P = 9,12 \times 10^9 \text{ KG m/sec.}$$

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

$$P = 89,4 \times 10^6 \text{ KW}$$

correspondant à une énergie annuelle :

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

D'où la puissance rendue exploitable sera :

$$\frac{7,83 \times 10^{11} \times 73,8}{100} = 5,78 \times 10^{11} \text{ KW h.}$$

D'après le rapport d'activité (1969) de la société nationale de l'électricité et du gaz on a pu avoir les valeurs de la production d'énergie hydraulique et thermique en Algérie.

L'énergie hydraulique : $3,615 \times 10^8$ KW h.

L'énergie thermique : $11,155 \times 10^8$ KW h.

En considérant l'énergie totale on aura :

$$(3,615 + 11,155) \times 10^8 = 14,770 \times 10^8 \text{ KW h.}$$

On constate que le rapport entre l'énergie de la houle exploitable sur les côtes algériennes d'une part et l'énergie produite actuellement d'autre part est :

$$K = \frac{5,78 \times 10^{11}}{14,770 \times 10^8} = 392$$

En considérant une croissance annuelle de 5 % des besoins de l'énergie, la houle pourra suffire à ces besoins jusqu'à d'ici "n" années

$$1,05^n = 392$$

d'où $n = 122$ années

Dans les pays riverains des océans cette énergie serait encore beaucoup plus élevée car l'amplitude moyenne de la houle des océans correspond à 4 à 5 m., la longueur d'onde $L = 600$ m. et la période $T = 20$ sec.

Donc l'énergie de la houle déferlant par mètre linéaire sera "n" fois l'énergie calculée :

$$P = \frac{\bar{\omega} \cdot h^2 \cdot L}{16 \times T} = \frac{10^3 \times 4,5^2 \times 600}{16 \times 20} = 3,8 \times 10^4 \text{ KG m/sec.}$$

$$P = \frac{3,8 \times 10^4 \times 9,8}{10^3} = 372 \text{ KW}$$

L'énergie annuelle sera :

$$372 \times 24 \times 365 = 3,26 \times 10^6 \text{ KW h.}$$

d'où la puissance rendue exploitable :

$$\frac{3,26 \times 10^6 \times 73,8}{100} = 2,4 \times 10^6 \text{ KW h.}$$

L'énergie annuelle par mètre linéaire sur les côtes algériennes étant égale à :

$$\frac{5,78 \times 10^{11}}{1,4 \times 10^6} = 4,13 \times 10^5 \text{ KW h.}$$

le rapport sera :

$$m = \frac{2,4 \times 10^6}{4,13 \times 10^6} = 5,81$$

$m = 5,81$

Toutefois sur les océans ces installations ne pourraient pas être construites en un emplacement fixe sur la côte en raison de la marée. Mais il faut que ces installations soient montées sur des îles flottantes.

B I B L I O G R A P H I E

G. LAPRAY :

Cours d'hydraulique générale

L. ESCANDE :

Hydraulique générale (Tome III)

A. BOULANGER :

Hydraulique générale (Tome III)

G. LAPRAY :

Amplificateur de houle (1960)

