

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

**DEPARTEMENT HYDRAULIQUE**



**PROJET DE FIN D'ETUDES**

**SUJET**

**ETUDE EXPERIMENTALE  
DE  
L'AIR-LIFT**

**Proposé par :**

METREVELI.V

**Etudié par :**

A. BENTABBOUCHE  
S. ZEGHLACHE

**Dirigé par :**

Mrs METREVELI.V  
MESSAHLI.R

**PROMOTION JANVIER 88**

1

ADRIANO ALBERTI

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

DEPARTEMENT

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

**SUJET**

**ETUDE EXPERIMENTALE  
DE  
L'AIR-LIFT**

Proposé par :  
**METREVELI.V**

Etudié par :  
**A. BENTABBOUCHE  
S. ZEGLACHE**

Dirigé par :  
**Mrs METREVELI.V  
MESSARLI.R**

PROMOTION JANVIER 1988

## Dédicaces

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

À mon père et ma mère pour leurs sacrifices et

soutient moral à mon égard.

À mes frères et sœurs.

À mes amis.

À tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près pour  
l'élaboration de ce projet.

H. Bentabouche.

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

À mon père et ma mère pour leurs sacrifices et

soutient moral durant toutes mes études.

À mes frères et sœurs.

À mes amis.

J. Zeghlache.

## Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur M<sup>r</sup> Metreveli et notre co-promoteur M<sup>r</sup> Messahli pour les conseils fructueux et l'assistance qu'ils nous ont apportée pendant toute l'élaboration de cette étude.

Notre reconnaissance et notre respect à tous les professeurs et assistants ayant contribué à notre formation.

Monsieur	Bentabbouche Abderrahmane.
Monsieur	Zeghlache Talim - Abdelwahab.

# PLAN D'ÉTUDE

	Page
I. Généralités.....	1
II. Généralités sur les propriétés physiques des fluides.....	8
III. Étude de l'écoulement diphasique.....	17
IV. Étude expérimentale.....	38
V. Conclusions.....	85

## *Chapitre .I.*

# *Introduction*

# INTRODUCTION

## 1 - Généralités :-

Une pompe ordinaire ne peut pas répondre à certaines situations technologiques de pompage particulièrement pour les cas suivants :-

- Pour le pompage à une profondeur très importante - Ce qui laisse à penser à une immersion de la pompe à une profondeur donnée - on prévoit un schéma de pompes installées en série.  
Cette solution reste toujours contraignante surtout dans le cas d'une panne où l'on doit déconnecter la pompe du reste du conduit pour une réparation éventuelle.
- Pour le transport de produits multiphasiques ou corrosifs où les pompes ordinaires peuvent être endommagées après un temps de fonctionnement très limité.
- Dans le cas d'un puits pétrolier non exploité à cause de la pression insuffisante.

Pour cela un procédé approprié a été mis en œuvre. IL consiste à injecter de l'air comprimé pour effectuer le pompage :

Le système se compose simplement d'une conduite de longueur et diamètre donné ; d'une conduite d'air comprimé ; d'un générateur d'air comprimé (ex<sup>ple</sup> compresseur) ; d'un organe permettant de mélanger le milieu afin de lui donner une certaine fluidité qu'on appelle mélangeur ; d'un système, recevant le mélange et permettant la séparation des différents produits recueillis, appelé séparateur.

L'ensemble est appelé système à air-lift.

Dans notre expérience on utilisera un tube en U, où l'une des branches permet de reproduire la pression statique à différents niveaux pour stimuler la variation de pression au niveau du mélangeur.

Dans cette présente étude, on essayera de dégager les principaux paramètres géométriques et hydrauliques et à l'aide des résultats de notre expérience, on établit les règles générales de conception et d'optimisation du Système d'air-lift travaillent sous des rendements acceptables.

## 2 - Principe de fonctionnement de L'air-lift.

On sait que le poids volumique d'un gaz est faible par rapport à celui d'un liquide. Si l'on mélange un liquide avec un gaz, on obtient un poids volumique intermédiaire entre ceux du gaz et du liquide.

Le poids volumique du mélange sera d'autant plus faible que la proportion du gaz sera plus élevée.

L'expérience concrétisant le phénomène est présentée de la manière suivante :-

Une conduite en plexiglas permettant de visualiser le phénomène équipée à sa partie inférieure d'un mélangeur. Cette conduite est reliée à une autre Conduite Verticale à l'aide d'un coude en caoutchouc.

une conduite d'air reliée au mélangeur est équipée de deux robinets  $x_1$  et  $x_2$ .

À l'état statique le liquide est au même niveau dans les deux conduites E, la pression au niveau du mélangeur est  $P_i = P_0 + \rho g h$ .

Ouvrons complètement le robinet  $x_1$ .

Ouvrons le robinet  $x_2$  de façon à ne laisser subsister qu'un faible passage d'air comprimé.

L'air pénètre dans le mélangeur et le niveau du liquide monte jusqu'à une certaine hauteur  $H$  en  $E'$ .

En effet, le poids volumique du mélange air-eau étant inférieur à celui de l'eau provoque une pression au niveau du mélangeur inférieure à la pression statique. Cette différence de pression provoque l'ascension du liquide.

on aura donc :-

$$P \cdot h = P_m \cdot (h + H) .$$

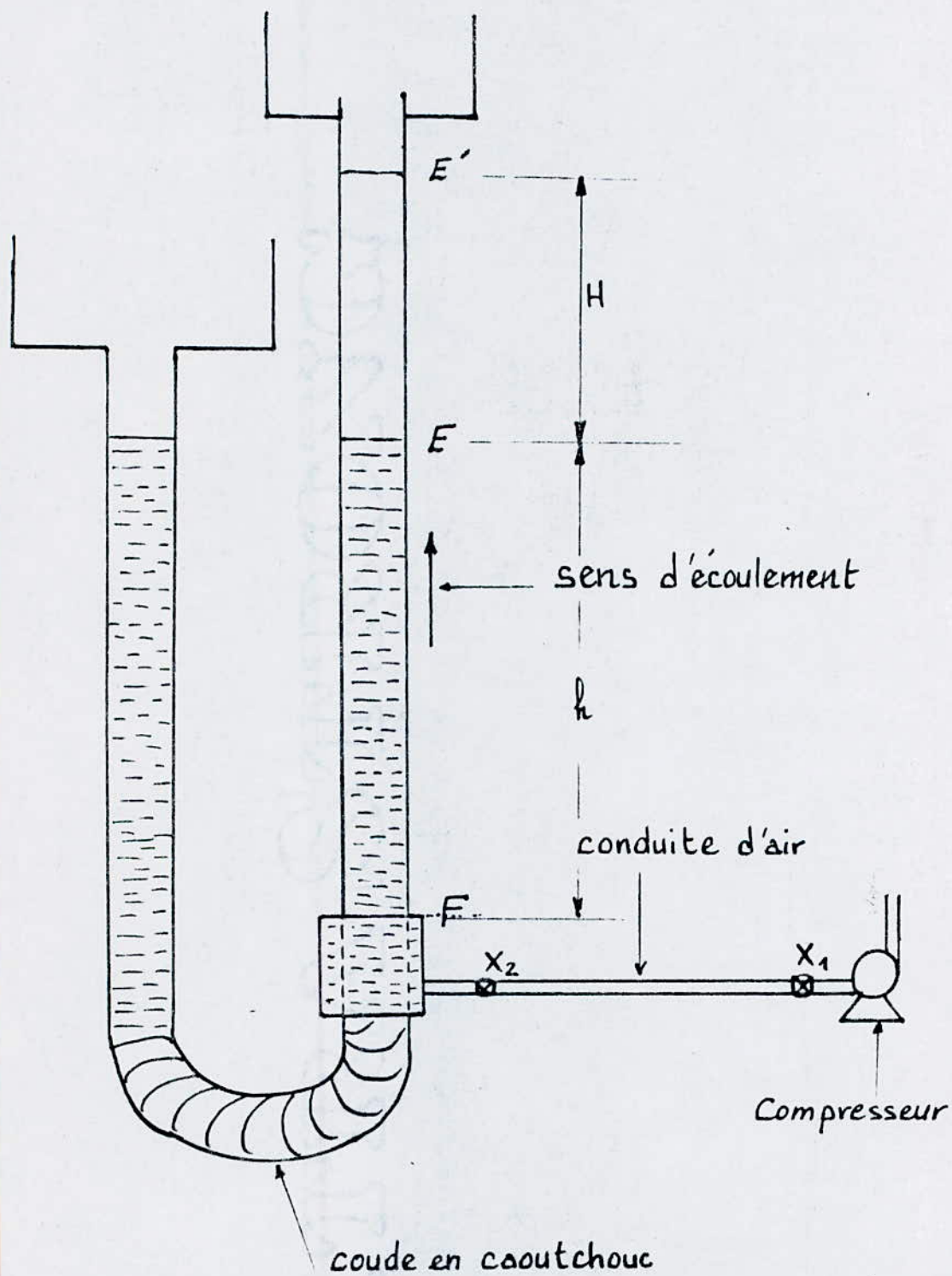
Fermons maintenant presque complètement le robinet  $x_2$  et attendons que le niveau d'eau reprenne sa position initiale. Ouvrons grand le robinet  $x_2$  un court instant puis refermons-le.

Une grosse bulle d'air est aduise dans le mélangeur et monte en se détendant et chasse une bonne partie de l'eau.

Dans ce cas au lieu d'alléger la colonne du liquide, comme dans le cas précédent, nous la chassons de la conduite.

On a ainsi rétabli la neutralité du système.

# EXPERIENCE CONCRETISANT LE PHENOMENE



### 3 - Domaine d'application de l'air-lift.

L'air-lift comme dispositif hydraulique se manifeste dans plusieurs domaines où l'application des procédés ordinaires et classiques deviennent très coûteuse et dans certains cas impossibles. Parmi ces domaines on citera :

L'industrie du pétrole où ce système a été examiné pour la première fois lors de l'exploitation des gisements pétroliers. Son application vient après la phase primaire d'exploitation au cours de laquelle la production est assurée par la dépletion naturelle du gisement jusqu'à épuisement ou décompression.

Elle consiste à injecter le gaz dans le gisement pour maintenir la pression en place et conserver le rythme de production.

En effet — la condition pour qu'un puits soit éruptif est que la pression statique de la couche productrice (ou pression de gisement :  $P_g$ ) soit supérieure à la contre pression exercée sur cette couche par la colonne de fluide présente dans le puits. il faut donc que :

$$P_g > 0,098 \cdot H \cdot d \quad \text{--- (1)} \quad ? \text{ unités}$$

avec :

$H$  : profondeur du puits.

$d$  : densité du fluide.

$P_g$  : pression de gisement.

Par contre le puits devient non éruptif lorsque :

$$P_g \leq 0,098 \cdot H \cdot d \quad \text{--- (2)}$$

Dans le cas où ce dernier est toujours exploitable, la relation (1) pourra être rétablie en réduisant suffisamment la valeur de la densité  $d$ .

Dans l'industrie chimique l'air-lift est utilisé pour le cas de refoulement des liquides agressifs. (acide ou base) et des liquides de forte viscosité.

Dans le domaine hydraulique on notera le phénomène d'envasement des barrages où le taux de vase atteint en général 40 à 80 % du volume initial diminuant ainsi la capacité de retenue de plus de 50% et réduisant par la suite la durée de vie des barrages.

Les procédés classiques d'évacuation des sédiments comme le dragage par exemple nécessitent des investissements très importants.

L'utilisation du système d'air-lift est le procédé idéal d'évacuation des vases par sa facilité de mise en œuvre.

## Chapitre . II.

Généralités sur les propriétés  
physiques des fluides et  
l'équation d'écoulement.

## 1. Module de compressibilité:

On appelle module de compressibilité le rapport de la diminution relative de volume rapporté à l'augmentation de pression.

$$\chi = - \frac{dV/V}{dP} = - \frac{1}{V} \frac{dV}{dP} = \frac{1}{K}$$

$K = dP/dV/V$ : est le coefficient de compressibilité volumique.

Le calcul du module de compressibilité des gaz est possible si la loi d'évolution est connue. Examinons les deux principaux cas.

1) Evolution isothermique: La loi d'évolution est donnée par "Mariotte"  
 $PV = \text{cte}$  ce qui entraîne.

$$\frac{dV}{dP} = - \frac{V}{P}$$

Le module de compressibilité isothermique sera donné par.

$$\chi = - \frac{1}{V} \frac{dV}{dP} = \frac{1}{P}$$

2) Evolution isentropique: la loi d'évolution (loi de Laplace) est donnée par  $PV^\gamma = \text{cte}$ , on a donc.

$$\frac{dV}{dP} = - \frac{V}{\gamma P}$$

$\gamma$ : étant le rapport des chaleurs massiques à  $P$  et  $V$  constant.

Le module de compressibilité isentropique sera donné par.

$$\chi = \frac{1}{\gamma P}$$

Dans le cas des liquides le module de compressibilité est toujours très faible.

Pour l'eau à la température ordinaire  $\chi$  est de l'ordre de  $\frac{1}{20.000} \text{ bar}^{-1}$ , ce qui signifie qu'une augmentation de pression de 1 bar entraîne une diminution de volume  $\frac{1}{20.000}$ .

## 2 - Vitesse de propagation du son:

On peut estimer la compressibilité d'un fluide en considérant le paramètre caractéristique qui est la vitesse de propagation du son ( $a$ ), à l'intérieur du fluide tel que.

$$a = \sqrt{\frac{\partial P}{\partial \rho}}$$

où

$\Delta P$  - l'accroissement de la pression

$\Delta \rho$  - l'accroissement de la masse volumique.

Plus la vitesse est grande et plus la compressibilité est petite et vice-versa. En faisant intervenir le module de compressibilité.

$$\chi = \frac{1}{\partial P} \frac{\partial \rho}{\rho}$$

La vitesse de propagation du son deviendra.

$$a = \sqrt{\frac{1}{\rho \chi}}$$

Pour le gaz, l'évolution étant très rapide, la compression  $\partial P$  se fait sans échange de chaleur.

Dans un milieu indéfini, les frottements sont négligeables et la compression est isentropique.

on a :

$$\chi = \frac{1}{\gamma P}$$

$$a = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$$

Pour l'air, dans les conditions normales:  $\gamma = 1,4$ ;  $\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$

$$P = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

la vitesse de propagation du son est de :  $a = \sqrt{1,4 \times \frac{1,013 \cdot 10^5}{1,293}} \approx 331 \text{ m/s}$

Dans un tuyau cylindrique, la compressibilité de la paroi est négligeable. Cependant à cause des frottements et des échanges de chaleur avec la paroi, la vitesse est plus faible, que la vitesse théorique.

La différence est d'autant plus grande que le diamètre du tuyau est petit. Elle peut atteindre 200 m/s pour un tuyau de diamètre 5 mm.

Pour estimer le mouvement du fluide on utilise le rapport de la vitesse du fluide considéré ( $C$ ) et la vitesse de propagation du son dans le fluide.

Ce rapport est désigné par  $M$  appelé nombre de Mach

$$M = \frac{C}{a}$$

Si  $C < a$      $M < 1$     L'écoulement est dit subsonique

Si  $C > a$      $M > 1$     L'écoulement est dit supersonique

Dans le cas où  $C < a$  l'écoulement est analogue à celui des fluides incompressibles, la section et la vitesse varient en sens inverse.

### 3- <sup>différentielle</sup> Equation de Bernoulli pour les fluides compressibles et visqueux (Air)

Lorsque la masse spécifique du fluide varie au cours de son déplacement ce qui est le cas pour le déplacement des gaz dans une conduite.

L'équation de Bernoulli est utilisée sous sa forme différentielle.

En appliquant le principe de la conservation de l'énergie, pour l'évolution d'un élément de masse  $m$  égale à l'unité au cours d'un déplacement élémentaire dans une veine fluide.

On peut écrire que la somme de l'énergie ( $dQ$ ) échangée sous forme de chaleur avec le milieu extérieur à la veine et de l'énergie dissipée par le travail des forces de frottements dues à la viscosité ( $dW$ ) est égale à la somme des variations :

- de l'énergie interne ( $dE$ ) de l'élément gazeux.
- de son énergie cinétique  $md(\frac{U^2}{2}) = mUdU = U dU$  pour  $m=1$
- du travail ( $dT_p$ ) exercé dans la veine par le gaz contre les forces de pressions extérieures de l'élément considéré.
- du travail exercé par le gaz contre les forces de gravité  $mgdz$

Soit l'équation :  $dE + U dU + dT_p + g dz = dQ + dW$  (1)

Sachant que tous les termes de cette équation s'expriment en unités d'énergie par unité de masse.

$$\begin{aligned} dT_p &= (P + dP)(V + dV) - PV \\ &= P dV + V dP = d(PV) = d\left(\frac{P}{\rho}\right) \end{aligned}$$

$$dE = dQ - dV = dQ - P d\left(\frac{1}{\rho}\right)$$

remplaçons  $dT_p$  et  $dE$  dans l'équation (1).

$$dP + \rho U dU + \rho g dz = \rho dW$$
 (2)

on obtient la formule de Bernoulli sous sa forme différentielle.

#### 4- Expression de la perte de charge.

Considérons l'écoulement permanent en charge d'un fluide dans une conduite circulaire longue, rectiligne et de section constante. Nous voulons connaître la perte de pression correspondant à l'écoulement pour une longueur  $L$  de la conduite.

Les grandeurs physiques qui interviennent dans le problème ainsi posé sont :

$\Delta p$  : la perte de pression.

$L$  : longueur du tronçon d'écoulement considéré.

$D$  : dimension caractérisant la section transversale de l'écoulement.

$K'$  : dimension des aspérités de la paroi solide

$V$  : vitesse moyenne du fluide.

$\rho$  : masse volumique du fluide.

$\nu$  : viscosité cinématique.

Les paramètres  $L$ ,  $D$  et  $K'$  caractérisent la conduite considérée  
Les paramètres  $V$ ,  $\rho$ ,  $\nu$  caractérisent le fluide considéré.

On peut écrire que  $\Delta p = f(L, D, K', V, \rho, \nu)$

La matrice dimensionnelle des 7 grandeurs physiques caractérisant le phénomène étudié est : ( $n=7$ )

	$\Delta P$	$L$	$D$	$K'$	$v$	$\rho$	$\nu$
$L$	-1	1	1	1	1	-3	2
$M$	1	0	0	0	0	1	0
$T$	-2	0	0	0	-1	0	-1

Le nombre maximum de variables pouvant jouer le rôle d'unités primaires sont les trois grandeurs fondamentales ( $M$ ,  $L$  et  $T$ ) ( $r=3$ ).

En application du théorème de "Vaschy-Buckingham", on peut dire qu'il existe une relation du type  $\Pi = f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3)$ .

La relation physique cherchée doit s'exprimer par une relation entre  $n-r=4$  produits sans dimensions, indépendants formés, avec les sept grandeurs considérées.

La série habituellement choisie, et qui convient de prendre ( $v, D, \rho$ ) comme grandeurs primaires est.

$$\frac{\Delta P}{\rho v^{4/2}}, \frac{L}{D}, \frac{vD}{\nu}, \frac{K'}{D}$$

on a alors

$$\frac{\Delta P}{\rho v^{4/2}} = f\left(\frac{L}{D}, \frac{vD}{\nu}, \frac{K'}{D}\right)$$

L'écoulement étant identique dans toute les sections, on peut considérer que ( $P$ ) est proportionnel à ( $L$ ). La relation s'écrit.

$$\Delta P / \rho \frac{v^2}{2} = \frac{L}{D} \varphi\left(\frac{vD}{\nu}, \frac{K'}{D}\right)$$

ou

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}$$

Si on exprime la perte de pression  $\Delta P$  en hauteur de fluide on aura.

$$\Delta H = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad \lambda = f\left(\frac{vD}{\nu}, \frac{k'}{D}\right)$$

$\Delta H$  = perte de charge

$\lambda$  = coefficient adimensionnel nommé coefficient de perte de charge exprimé en fonction  $\left(\frac{vD}{\nu}\right)$  représentant le nombre de Reynolds et  $\left(\frac{k'}{D}\right)$  appelé rugosité relative.

## Influence de la rugosité des parois (courbes de Nikuradse).

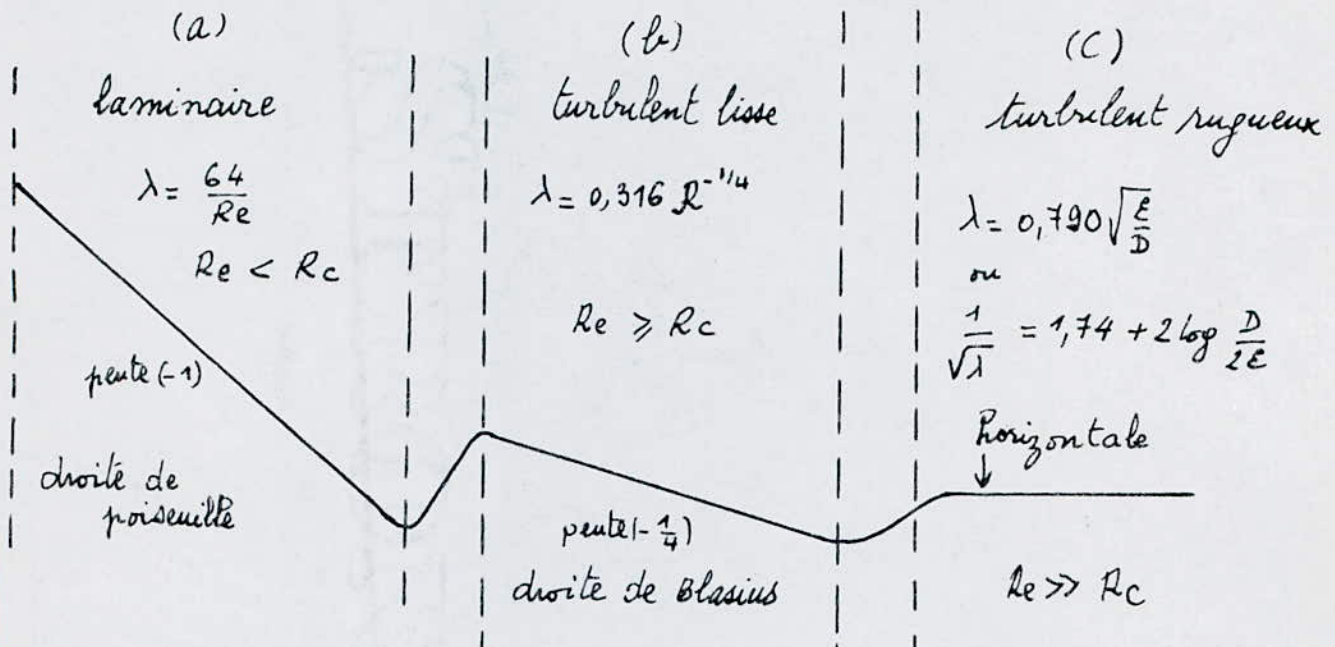


Schéma d'interprétation des régimes d'écoulement sur une courbe de Nikuradse pour une rugosité relative moyenne

L'examen de ce réseau de courbes montre que :

a) La rugosité n'a aucune influence pour le régime laminaire, étant donné que la valeur de  $R_c$  est pratiquement indépendante de la rugosité des parois.

b) La forme de la courbe pour  $Re > R_c$  et donc l'importance des pertes de charge dépend de beaucoup de la rugosité.

En particulier pour les tubes très rugueux ou le rapport  $(\frac{\epsilon}{D} \approx \frac{1}{30})$ , le régime turbulent lisse est généralement inexistant en pratique.

c) Pour un nombre de Reynolds grand devant le nombre de Reynolds critique ( $Re \gg R_c$ ), la valeur du coefficient de perte de charge ( $\lambda$ ) unitaire est indépendante du nombre de Reynolds, elle est uniquement fonction de la rugosité des parois  $\lambda = f(\frac{\epsilon}{D})$

## Chapitre .III.

### Etude de l'écoulement diphaseique

# 1 - ANALYSE DIMENSIONNELLE

## 1-1 Généralités:-

Une loi physique concrétisée par une relation entre un certain nombre de grandeurs (longueur, vitesse, ... etc) est indépendante des unités employées pour exprimer les valeurs numériques des diverses grandeurs qui interviennent dans la dite relation.

La théorie de l'analyse dimensionnelle permet précisément de déterminer la forme la plus simple que peut revêtir une loi reliant un certain nombre de grandeurs physiques. Le théorème fondamental de l'analyse dimensionnelle est le théorème de Vaschy-Buckingham ou théorème des  $\pi_i$ .

## 1-2 Théorème des $\pi_i$ de Vaschy-Buckingham:-

Si  $n$  est le nombre des grandeurs physiques caractérisant le phénomène étudié, et  $r$  le nombre de grandeurs fondamentales intervenant dans la définition de ces  $n$  grandeurs.

$(n-r)$  représente le nombre de produits indépendants et sans dimension.

Soient  $(G_1, G_2, \dots, G_n)$  les grandeurs intervenant dans le phénomène étudié, soit  $r$  le nombre des dimensions fondamentales qui sont au maximum de trois ( $M, L, T$ ) respectivement (masse, longueur, temps).

Donc, il doit exister entre les dits paramètres une relation fonctionnelle qui peut-être écrite sous la forme :

$$F(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-r}) = 0$$

Les paramètres  $\pi_i$  sont formés par des expressions de la forme suivante :

$$\begin{aligned}\pi_1 &= G_1^{x_1} \cdot G_2^{y_1} \cdot G_3^{z_1} \cdot G_n \\ \vdots \\ \pi_i &= G_1^{x_i} \cdot G_2^{y_i} \cdot G_3^{z_i} \cdot G_{i-r} \\ \vdots \\ \pi_{n-r} &= G_1^{x_{n-r}} \cdot G_2^{y_{n-r}} \cdot G_3^{z_{n-r}} \cdot G_n\end{aligned}$$

Les problèmes pouvant être résolus de façon analytique sont extrêmement rares. On peut également développer des solutions en utilisant des hypothèses de nature expérimentale.

Si l'on effectue une analyse dimensionnelle, on peut mettre en évidence certains nombres adimensionnels pouvant intervenir dans le phénomène, on pourra citer les nombres suivants :

- Nombre d'Euler : 
$$Eu = \frac{P}{\rho V^2}$$

Ce nombre mesure l'influence des forces de pression c'est le rapport des forces de pressions aux forces d'inertie.

- Nombre de Reynolds : 
$$Re = \frac{VD}{\gamma}$$

Ce nombre mesure l'influence de la vitesse du fluide il exprime le rapport de l'influence de l'inertie sur celle de la viscosité.

- Nombre de Weber : 
$$We = \rho V^2 (D/\sigma)$$
  $\sigma$  : tension superficielle

Ce nombre exprime l'influence de la tension superficielle, il représente le rapport des forces d'inertie aux forces de capillarité.

- Nombre de Froude : 
$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Ce nombre mesure l'influence de la pesanteur, il exprime le rapport des forces d'inertie aux forces de pesanteur.

- Nombre de Mach : 
$$M = \frac{V}{a}$$
  $a = \sqrt{\kappa/\rho}$

Ce nombre représente le rapport de la vitesse du fluide à la vitesse du son dans ce fluide.

Après avoir énuméré les principaux nombres adimensionnels pouvant intervenir dans le phénomène étudié, Considérons chacun d'eux à part et étudions son influence dans le phénomène.

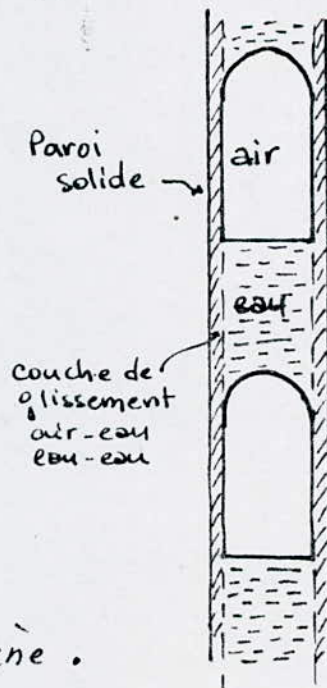
- Nombre d'Euler :-

L'élévation du liquide dans la conduite de refoulement est dû essentiellement à la variation de pression provoquée par la variation de la masse volumique du mélange, par conséquent ce nombre adimensionnelle qui caractérise les forces de pression sera très significatif.

- Nombre de Reynolds :-

L'écoulement étant turbulent et d'après la courbe de Nikuradze, la forme des pertes de charges qui caractérisent la viscosité dans cette région sont quadratiques par conséquent ces forces n'interviendront pas dans le phénomène. Et du fait que l'écoulement est à sa phase bouchon, une mince couche liquide reste toujours collée à la paroi et donc l'écoulement sera supposé turbulent lisse. Le liquide se déplace en bloc sans mouvement relatif à l'intérieur de celui-ci et sans déplacement relatif à l'interface. Ce qui nous permet de négliger les frottements à l'interface entre le bloc liquide et la couche mince collée à la paroi d'une part et entre l'air et la couche liquide d'autre part.

D'après ces considérations et du fait que les pertes par frottements sont négligeables par rapport aux pertes d'énergie, on peut dire que le nombre de Reynolds ne caractérise pas le phénomène.



- Nombre de Weber :-

Ce nombre n'intervient que si les phénomènes de capillarité sont importants, mais vu l'importance du diamètre de la conduite de refoulement ces phénomènes peuvent se manifester par conséquent ce nombre ne sera pas représentatif.

- Nombre de Froude :-

L'écoulement du mélange se produisant sur une conduite verticale, les forces de pesanteur et d'inertie seront prépondérantes dans le phénomène étudié, par conséquent ce nombre sera très significatif.

- Nombre de Mach :-

Lorsque la vitesse du fluide est inférieure à la vitesse du son, l'écoulement du fluide est considéré comme incompressible. De ce fait ce nombre ne pourra pas influencer l'écoulement étudié.

Donc les seuls nombres de significations physiques importants et qui caractérisent très bien le phénomène étudié sont les nombres suivants :-

Nombre de Froude

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Nombre de Euler

$$Eu = \frac{P}{\rho V^2}$$

### 1-3 Application du théorème des $\pi$ :-

Afin de vérifier l'existence des nombres adimensionnelles Euler et Froude dans le phénomène étudié, faisant l'application du théorème de Vaschy Buckingham en utilisant uniquement les grandeurs physiques qui caractérisent l'écoulement de l'air-lift.

Les caractéristiques du mélange sont obtenues par caractéristiques moyennes de chaque fluide.

#### caractéristiques géométriques:-

- Longueur de la conduite :  $l$
- diamètre de la conduite :  $d$

#### Caractéristiques du mélange (air-eau).

- masse volumique du mélange :  $\rho_m$
- Pression moyenne du mélange :  $P$
- Viscosité cinématique du mélange :  $\nu$
- Vitesse moyenne du mélange :  $V$
- accélération de la pesanteur :  $g$
- débit liquide :  $Q_l$
- débit d'air comprimé :  $Q_a$

Nous avons donc neuf grandeurs physiques caractérisant le phénomène étudié ( $n=9$ ) et trois grandeurs fondamentales ( $M, L, T$ ) ( $r=3$ ).

Donc la relation physique cherchée doit s'exprimer par une relation  $n-r = 6$  produits sans dimension indépendants formés avec les grandeurs considérées.

En considérant  $P, l, Q_e$  comme grandeurs primaires et  $\rho, Q_a, q, V, \gamma, d$  comme grandeurs secondaires, les produits sans dimension seront construits de la manière suivante :

$$\pi_1 = P^{x_1} l^{y_1} Q_e^{z_1} \rho = (ML^{-1}T^{-2})^{x_1} (L)^{y_1} (L^3T^{-1})^{z_1} (ML^{-3}) = M^0 L^0 T^0$$

$$\pi_2 = P^{x_2} l^{y_2} Q_e^{z_2} Q_a = (ML^{-1}T^{-2})^{x_2} (L)^{y_2} (L^3T^{-1})^{z_2} (L^3T^{-1}) = M^0 L^0 T^0$$

$$\pi_3 = P^{x_3} l^{y_3} Q_e^{z_3} q = (ML^{-1}T^{-2})^{x_3} (L)^{y_3} (L^3T^{-1})^{z_3} (LT^{-2}) = M^0 L^0 T^0$$

$$\pi_4 = P^{x_4} l^{y_4} Q_e^{z_4} V = (ML^{-1}T^{-2})^{x_4} (L)^{y_4} (L^3T^{-1})^{z_4} (LT^{-1}) = M^0 L^0 T^0$$

$$\pi_5 = P^{x_5} l^{y_5} Q_e^{z_5} \gamma = (ML^{-1}T^{-2})^{x_5} (L)^{y_5} (L^3T^{-1})^{z_5} (L^2T^{-1}) = M^0 L^0 T^0$$

$$\pi_6 = P^{x_6} l^{y_6} Q_e^{z_6} d = (ML^{-1}T^{-2})^{x_6} (L)^{y_6} (L^3T^{-1})^{z_6} (L) = M^0 L^0 T^0$$

$$\pi_1 \quad \begin{array}{l} M: \\ L: \\ T: \end{array} \left| \begin{array}{l} x_1 + 0 + 0 + 1 = 0 \\ -x_1 + y_1 + 3z_1 - 3 = 0 \\ -2x_1 + 0 - z_1 + 0 = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \begin{array}{l} x_1 = -1 \\ y_1 = -4 \\ z_1 = 2 \end{array}$$

$$\pi_2 \quad \begin{array}{l} M: \\ L: \\ T: \end{array} \left| \begin{array}{l} x_2 + 0 + 0 + 0 = 0 \\ -x_2 + y_2 + 3z_2 + 3 = 0 \\ -2x_2 + 0 - z_2 - 1 = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \begin{array}{l} x_2 = 0 \\ y_2 = 0 \\ z_2 = -1 \end{array}$$

$$\pi_3 \quad \begin{array}{l} M: \\ L: \\ T: \end{array} \left| \begin{array}{l} x_3 + 0 + 0 + 0 = 0 \\ -x_3 + y_3 + 3z_3 + 1 = 0 \\ -2x_3 + 0 - z_3 - 2 = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \begin{array}{l} x_3 = 0 \\ y_3 = 5 \\ z_3 = -2 \end{array}$$

$$\pi_4 \quad \begin{array}{l} M: \\ L: \\ T: \end{array} \left| \begin{array}{l} x_4 + 0 + 0 + 0 = 0 \\ -x_4 + y_4 + 3z_4 + 1 = 0 \\ -2x_4 + 0 - z_4 - 1 = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \begin{array}{l} x_4 = 0 \\ y_4 = 2 \\ z_4 = -1 \end{array}$$

$$\pi_5 \quad \begin{array}{l} M: \\ L: \\ T: \end{array} \left| \begin{array}{l} x_5 + 0 + 0 + 0 = 0 \\ -x_5 + y_5 + 3z_5 + 2 = 0 \\ -2x_5 + 0 - z_5 - 1 = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \begin{array}{l} x_5 = 0 \\ y_5 = 1 \\ z_5 = -1 \end{array}$$

$$\pi_6 \quad \begin{array}{l|l} M: & X_6 + 0 + 0 + 0 = 0 \\ L: & -X_6 + Y_6 + 3Z_6 + 1 = 0 \\ T: & -2X_6 + 0 - Z_6 + 0 = 0 \end{array} \Rightarrow \begin{array}{l} X_6 = 0 \\ Y_6 = -1 \\ Z_6 = 0 \end{array}$$

Les nombres adimensionnels : ainsi obtenus sont :

$$\pi_1 = \frac{\rho \omega^2}{\mu L^4} \Rightarrow \pi_1 = \frac{1}{Fr}$$

$$\pi_2 = \frac{Q_a}{Q_e} \Rightarrow \pi_2 = \frac{Q_a}{Q_e} = q$$

$$\pi_3 = \frac{g L^5}{\omega^2} \Rightarrow \pi_3 = \frac{1}{Fr^2}$$

$$\pi_4 = \frac{V L^2}{Q_e}$$

$$\pi_5 = \frac{\gamma L}{Q_e}$$

$$\pi_6 = \frac{d}{L}$$

En faisant une combinaison entre  $\pi_4$ ,  $\pi_5$  et  $\pi_6$  on obtient :-

$$\frac{\pi_4 \cdot \pi_6}{\pi_5} = \frac{\frac{V L^2}{Q_e} \cdot \frac{d}{L}}{\frac{\gamma L}{Q_e}} = \frac{V L \cdot d}{Q_e} \times \frac{Q_e}{\gamma L} = \frac{V d}{\gamma} = Re.$$

d'où :

$$\pi^* = \frac{\pi_4 \cdot \pi_6}{\pi_5} = Re. \quad (\text{nombre de Reynolds}).$$

d'où :

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi^*) = 0$$

$$\Rightarrow f(Fr, q, Fr^2, Re) = 0 \quad (*)$$

Le nombre de Reynolds ne caractérise pas le régime d'écoulement pour la configuration bouchon observée.  
néanmoins IL peut caractériser les écoulements secondaires autour du bouchon d'air, on pourra prendre à cet effet la perte de charge dans un écoulement turbulent lisse.  
ainsi l'équation (\*) devient

$$f(\overline{Eu}, \overline{Fr}, q) = 0$$

$q$  étant le débit spécifique

Afin d'avoir une meilleure représentation <sup>Physique</sup> de  $\overline{Eu}$  et  $\overline{Fr}$  on utilisera la combinaison suivante:

$$\overline{Eu} \times \overline{Fr} = \frac{P}{\rho V^2} \times \frac{V^2}{gL} = \frac{P}{\rho g} \cdot \frac{1}{L} = \frac{h}{L}$$

avec  $L = h + H$  : Longueur totale de l'air-lift.

On aura donc :

$$\overline{Eu} \times \overline{Fr} = \frac{h}{h+H}$$

on pose :

$$\alpha = \frac{h}{H+h}$$

où  $\alpha$  : est un paramètre caractéristique sans dimension appelé immersion relative.

il est défini comme étant le rapport de l'immersion absolue  $h$  sur la hauteur totale  $(H+h)$ .

Bonc la fonction finale sera de la forme :

$$f(\alpha, q) = 0 \quad \text{ou} \quad q = f(\alpha)$$

Ceci montre que l'écoulement de l'air-lift ne dépend que d'un seul paramètre caractéristique qui est le coefficient d'immersion :  $\alpha$ .

## 2 - BASES THEORIQUES DE L'AIR-LIFT.

### 2.1 Configurations d'écoulement vertical (air-eau) :-

On appelle " Configuration d'écoulement " l'ensemble des paramètres qui décrivent la forme (structure et dimensions) de chacune des phases dans l'écoulement diphasique.

une configuration représente un régime d'écoulement.

Écoulement monophasique :

- 1 - Régime laminaire.
- 2 - " transitoire
- 3 - " turbulent.

Écoulement diphasique :-

- 1 - Écoulement à bulles.
- 2 - " à bouchons.
- 3 - " semi-annulaire.
- 4 - " annulaire.

a) - l'écoulement à "bulles" est certainement le plus connu, bien qu'à grande vitesse son aspect laiteux le rende difficile à reconnaître. Le gaz est uniformément distribué dans la colonne liquide. On distingue deux régimes d'écoulement à bulles; dans le régime à bulles indépendantes les bulles sont très faibles, tandis que dans le régime à bulles agglomérées, les bulles forment un réseau très serré et leurs interactions sont fortes.

b) - l'écoulement à "bouchons" est constitué d'une succession de bouchons d'air dont l'avant est arrondi et l'arrière plat, le sillage de chaque bouchon contient souvent de nombreuses bulles et le film liquide entourant une poche d'air a un mouvement descendant par rapport à la paroi de la conduite. le film liquide plaqué à la paroi recouvre les aspérités et rend l'écoulement turbulent lisse.

l'écoulement bouchon possède une configuration non agitée, pour cela les pertes par frottements et par glissements sont faibles

c) - L'écoulement "semi-annulaire" se produit par disposition de plus en plus fréquente des bouchons de liquide lorsque la vitesse du gaz croît.

d) - L'écoulement "annulaire" dispersé est caractérisé par un noyau central de gaz chargé en gouttelettes et s'écoulant à une vitesse beaucoup plus élevée que le film liquide plaqué à la paroi; les gouttelettes sont arrachées de la crête des vagues qui se propagent à la surface du film liquide et peuvent se redéposer sur celui-ci.

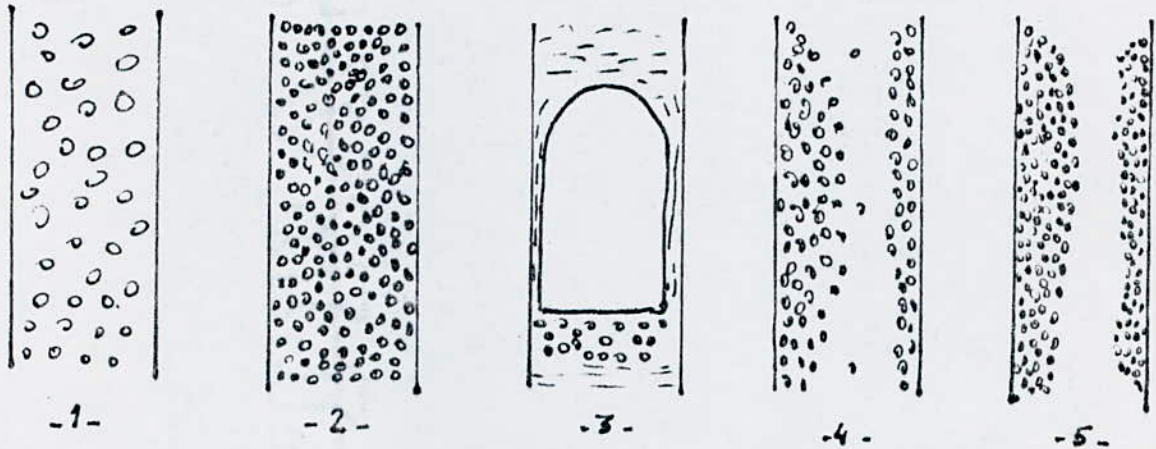


fig. (2.1) . Configuration des écoulements air-eau.

- 1- Bulles indépendantes.
- 2- Bulles agglomérées.
- 3- Bouchon.
- 4- Semi-annulaire.
- 5- Annulaire.

## 2-2 Étude de l'air-lift :

Le principe de fonctionnement de l'air-lift est celui de la pompe dynamique de frottements, Le déplacement du mélange (air comprimé, liquide) se produit à cause des différences de puissances que possède l'air comprimé en entrant dans l'air-lift au niveau du mélangeur et en sortant sous forme de mélange par le séparateur.

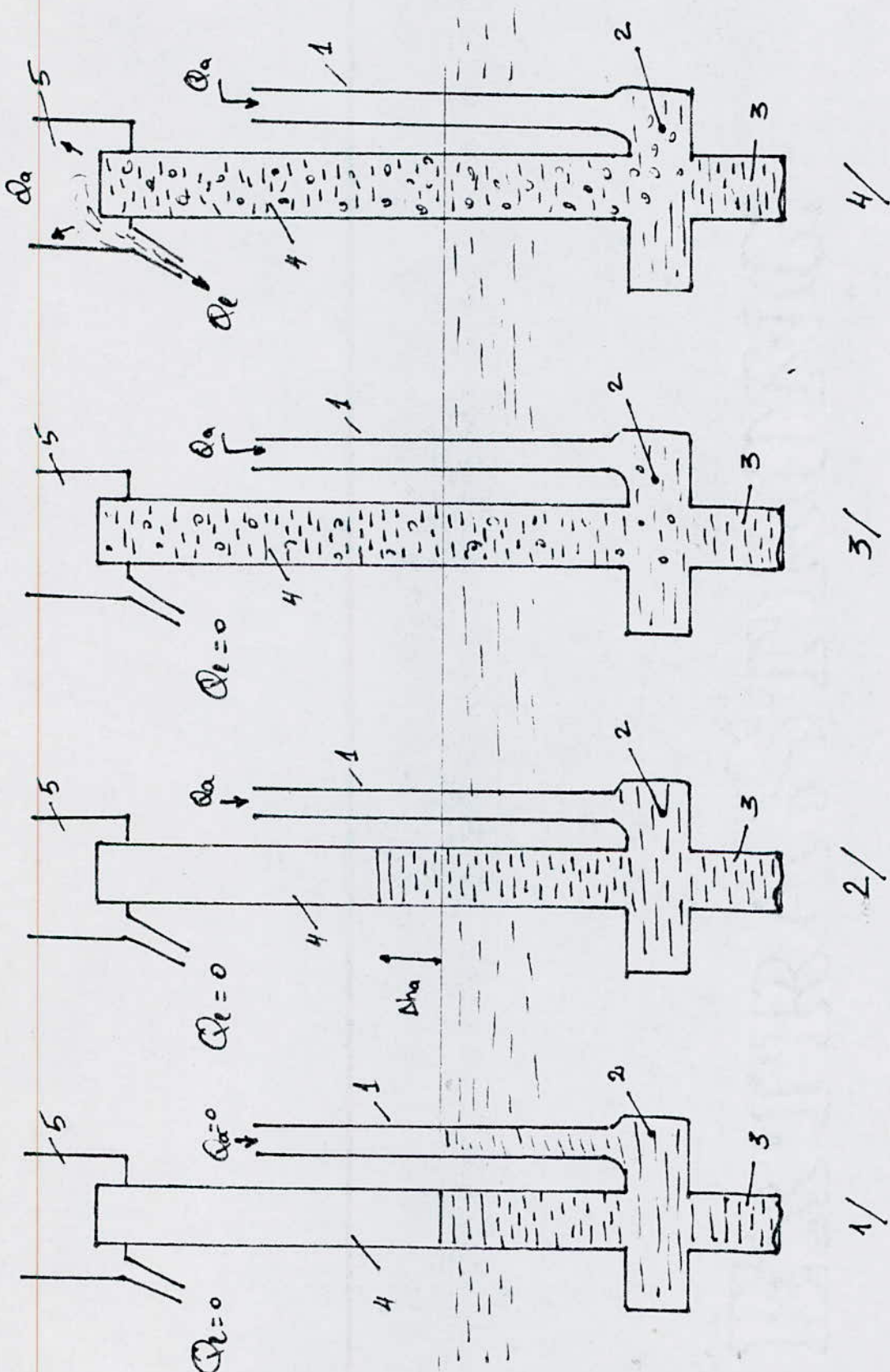
La puissance nécessaire au fonctionnement de l'air-lift est produite par un compresseur.

Sur la figure (2-2) sont montrés les schémas des différentes étapes de fonctionnement de l'air-lift.

L'air comprimé pénètre dans le mélangeur (2) par une conduite (1) placée verticalement, au niveau du mélangeur la pression produite est inférieure à la pression statique ; dans ce cas, l'eau de la conduite d'aspiration (3) entre dans le mélangeur et l'écoulement se produit alors dans la conduite de refoulement (4) Ceci sous l'action du flux d'air comprimé puis de sa détente tout le long de cette conduite.

Au niveau du séparateur<sup>(5)</sup> s'effectue la séparation des deux fluides.

En suivant chaque étape de fonctionnement donnant les équations de mise en marche de l'air-lift.



Shémas de fonctionnement de  
L'AIR-LIFT.

fig (2-2).

### 1<sup>er</sup> Etape :-

Avant la mise en marche du compresseur, le mélangeur se trouve plongé sous une profondeur d'immersion géométrique  $h$ . La pression hydrostatique à l'intérieur du mélangeur est déterminée par la relation suivante :-

$$P_m = \rho g h. \quad \text{---(2-1)}$$

$h$  : immersion géométrique.

$\rho$  : masse volumique du liquide.

### 2<sup>eme</sup> Etape :-

Suite à la mise en marche du compresseur l'eau qui se trouvait dans la conduite d'air pénètre dans le mélangeur provoquant une élévation dans la conduite de refoulement d'une hauteur  $Dha$ .

La pression à l'intérieur du mélangeur deviendra :-

$$P_{mm} = \rho g (h + Dha). \quad (2-2)$$

$P_{mm}$  : Pression de mise en marche au niveau du mélangeur.

$Dha$  : hauteur d'élévation.

Avec  $Dha = \alpha_c \cdot Q_c^2$

$\alpha_c$  : résistance de la conduite de refoulement.

$Q_c$  : débit moyen du liquide qui sort de la conduite d'air.

L'élévation  $Dha$  peut-être déterminée à l'aide de l'équation de Continuité en considérant le volume d'eau qui se trouve dans la conduite d'air et ce même volume déplacé dans la conduite de refoulement.

$$Dha = h \cdot \frac{d_a^2}{D^2}$$

La pression nécessaire pour que l'air pénètre dans le mélangeur, doit être au minimum égale à la pression de mise en marche

La pression que doit produire le compresseur doit être égale à :

$$P_c = P_{mm} + Dp_c$$

$P_c$  : pression donnée par le compresseur

$Dp_c$  : perte de pression dans la conduite d'air

En négligeant la perte de pression dans la conduite d'air il vient :

$$P_c = P_{mm} = \rho g (h + D h_a)$$

3<sup>ème</sup> Etape :-

En faisant varier la pression d'air comprimé celui-ci entre dans le mélangeur, la masse volumique de l'air étant mille fois inférieure à celle du liquide, l'air monte à travers le liquide sous l'action des forces d'Archimède

On observe ainsi la colonne du mélange gaz-liquide dont la masse volumique moyenne inférieure à celle du liquide.

La pression dans le mélangeur, dans ce cas, est une pression correspondante au barbotage : ascension de l'air sans qu'il y ait un débit liquide.

$$P_{\text{moy.m.b}} = P_{\text{m.b}} \cdot g (H + h) \quad (2-3)$$

$P_{\text{moy.m.b}}$  : pression moyenne du mélange de barbotage.

$P_{\text{m.b}}$  : masse volumique du mélange de barbotage.

$H + h$  : hauteur de la conduite de refoulement.

$$P_{\text{m.b}} = \rho \cdot \frac{h}{H + h} = \rho \alpha$$

4<sup>ème</sup> Etape :-

L'augmentation du débit d'air, entraîne la diminution de la masse volumique du mélange, donc la pression au mélangeur diminue devenant inférieure à la pression statique.

Sous l'action de la différence de pression produite, le liquide entre dans la conduite de refoulement, d'où l'apparition du débit de l'air-lift.

Ce débit peut être déterminé en dépendance de la pression du mélange comme suit :

$$Q_L = \sqrt{\frac{h - P_{mel}/\rho g}{a_c}} \quad (2-4)$$

En développant

$$Q_L = \sqrt{\frac{h - P_{mel} (H+h)/\rho}{a_c}} = \sqrt{\frac{h}{a_c} \left(1 - \frac{P_{mel}}{\rho} \cdot \frac{H+h}{h}\right)}$$

Finalement :

$$Q_L = \sqrt{\frac{h}{a_c} \left(1 - \frac{P_{mel}}{\rho \cdot \alpha}\right)} \quad (2-5)$$

De cette dernière expression, on remarque qu'avec la diminution de la masse volumique du mélange correspondante à l'augmentation du débit d'air, le débit de l'air-lift augmente.

Par contre lorsque la masse volumique du mélange devient égale à la masse volumique du mélange correspondante au barbotage, le débit de l'air-lift devient nul.

La masse volumique du mélange rapportée à la pression moyenne dépend de la quantité, en débit de gaz et liquide. Cette dernière pour n'importe quelle section est donnée par :

$$\rho_{mel} = \frac{\rho \cdot Q_L + \rho_a \cdot Q_a}{Q_L + Q_{amoy}} \quad (2-6)$$

Sachant que le débit du compresseur suit l'unité de volume de l'air à l'état libre est donné par :

$$Q_a = Q_{a.moy} \cdot \frac{P_{moy} + P_{atm}}{P_{atm}} \quad (2-7)$$

$Q_{a.moy}$  : débit moyen d'air

$P_{moy}$  : pression moyenne

d'où :

$$Q_{a.moy} = Q_a \cdot \frac{P_{atm}}{P_{atm} + \frac{P_m}{2}} \quad (2-8)$$

remplaçons cette dernière dans (2-6) on obtient :

$$P_{mel} = \frac{P \cdot Q_L + P_a Q_a}{Q_L + Q_a \frac{P_{atm}}{P_{atm} + \frac{P_m}{2}}} \quad (2-9)$$

en divisant celle-ci par  $Q_L$  il vient :

$$P_{mel} = \frac{P \left( 1 + \frac{P_a}{P} \cdot \frac{Q_a}{Q_L} \right)}{1 + \frac{Q_a}{Q_L} \cdot \frac{P_{atm}}{P_{atm} + \frac{P_m}{2}}} \quad (2-10)$$

Le rapport des débits d'air et liquide est appelé débit spécifique d'air - qui est le second paramètre (sans dimension) très important - on le note  $q$

$$q = \frac{Q_a}{Q_L} \quad (2-11)$$

mettons (2-11) en (2-10) :

$$P_{mel} = \frac{P \left( 1 + \frac{P_a}{P} \cdot q \right)}{1 + q \frac{P_{atm}}{P_{atm} + \frac{P_m}{2}}} \quad (2-12)$$

En analysant cette dernière expression, on remarque que le second paramètre du numérateur  $\left( \frac{P_a}{P} \cdot q \right)$  peut être négligé, puisque la masse volumique de l'eau est environ 1000 fois plus grande que celle de l'air.

On pourra ainsi écrire :

$$f_{mel} = \frac{P}{1 + q \cdot \frac{P_{atm}}{P_{atm} + \frac{P_m}{2}}} \quad (2-13)$$

Or le second parametre du denominateur represente le debit specifique moyen le long de la conduite de refoulement de l'air-lift.

$$q_{moy} = q \cdot \frac{P_{atm}}{P_{atm} + \frac{P_m}{2}} \quad (2-14)$$

remplaçons cette dernière dans (2-13)

$$f_{mel} = \frac{P}{1 + q_{moy}} \quad (2-15)$$

En considérant que dans la conduite de refoulement l'écoulement est comme stationnaire, on peut écrire :

$$\rho g h = f_m g (H+h) + f_m \cdot g D_{hm} \quad (2-16)$$

Sachant que  $D_{hm} = a_c \cdot Q_m^2$

$Q_m$  : débit du mélange.

donc 
$$P h = f_m (H+h) + f_m a_c Q_m^2 \quad (2-17)$$

d'où 
$$Q_m = \sqrt{\frac{h}{a_c} \cdot \frac{P - f_m/2}{f_m}} \quad (2-18)$$

d'autre part on a :

$$Q_m = Q_L + Q_{a.moy} \quad (2-19)$$

remplaçons (2-18) dans (2-19).

$$Q_m = Q_L + Q_a \cdot \frac{P_{atm}}{P_{atm} + P_{moy}} \quad (2-20)$$

finalement :

$$Q_m = Q_L \left( 1 + q \cdot \frac{P_{atm}}{P_{atm} + P_{moy}} \right) \quad (2-21)$$

Des formules (2-18) et (2-21) on tire le debit de l'air-lift.

$$Q_L = \frac{1}{1 + q \frac{P_{atm}}{P_{atm} + P_{moy}}} \cdot \sqrt{\frac{h}{\alpha_c} \left( \frac{\rho}{\rho_m} - \frac{1}{\alpha} \right)} \quad (2-22)$$

ou bien en utilisant (2-14) et (2-15)

$$Q_L = \frac{1}{1 + q \frac{P_{atm}}{P_{atm} + P_{moy}}} \cdot \sqrt{\frac{h}{\alpha_c} \left( 1 + q \cdot \frac{P_{atm}}{P_{atm} + P_{moy}} - \frac{1}{\alpha} \right)} \quad (2-23)$$

Sachant que les pertes dans l'air-lift en n'importe quel point de la conduite sont données par :

$$\alpha_c = \frac{8 \lambda (H+h)}{\pi^2 \rho D^5} = \frac{8 \lambda}{\pi^2} \cdot \frac{h}{\alpha_0 D^5} = \psi \frac{h}{\alpha_0 D^5} \quad (2-24)$$

$\psi$  : Coefficient de resistance hydraulique.

$D$  : diametre de la conduite de refoulement.

Mettons (2-24) dans (2-23), on obtient après transformation :-

$$Q_L = \frac{1}{1 + q} \sqrt{\frac{\alpha}{\psi} \left( 1 + q - \frac{1}{\alpha} \right) \cdot \alpha_0 D^5} \quad (2-25)$$

Pour des air-lift semblables, on donne le coefficient sans dimension  $K_Q$  du debit liquide.

$$K_Q = \frac{1}{1 + q} \sqrt{\frac{\alpha}{\psi} \left( 1 + q - \frac{1}{\alpha} \right)} \quad (2-26)$$

D'après les experiences de HEIR : pour un regime optimal de l'air-lift, le coefficient de resistance vaut :-

$$\psi = 0,078 \quad \text{pour l'air-lift court.}$$

Notion d'optimum :-

Pour une immersion relative ( $\alpha$ ) et une immersion absolue ( $h$ ) donnés on peut tracer la caractéristique  $Q_e = f(Q_g)$  en utilisant l'expression (2-25).

La caractéristique énergétique de l'air-lift est déterminée par son rendement qui est le rapport de la puissance absorbée par l'air-lift sur la puissance fournie par le compresseur.

$$\eta = \frac{N_a}{N_f} \quad (2-27)$$

$N_a$  : puissance absorbée par l'air-lift.

$$N_a = \rho_m g Q_e \left( H + \frac{V_s^2}{2g} \right) \quad (2-28)$$

$V_s$  : vitesse de sortie du jet au niveau du séparateur

$N_f$  : puissance fournie par le compresseur.

$$N_f = Q_a \cdot P_a \ln \frac{P_m + P_a}{P_a} \quad (2-29)$$

En remplaçant les expressions (2-28) et (2-29) dans (2-27) on obtient :

$$\eta = \frac{\rho_m g Q_e \left( H + \frac{V_s^2}{2g} \right)}{Q_a P_a \ln \frac{P_m + P_a}{P_a}} \quad (2-30)$$

Après transformation (2-30) devient

$$\eta = \frac{H + V_s^2/2g}{g h_a \ln \left( 1 + \frac{P_m}{P_a} \right)} \quad (2-31)$$

$h_a$  : hauteur de la colonne du mélange correspondant à la pression atmosphérique.

Sur la figure (2-3) est tracé la caractéristique de l'air-lift en montrant la zone de son fonctionnement optimal, en traçant la droite par l'origine et tangente à la courbe  $Q_e = f(Q_a)$ , on détermine le débit liquide optimal.

Au début d'injection d'air, le rendement est nul car le débit liquide est nul, le débit d'air ne donne pas une énergie nécessaire pour produire un débit liquide.

A partir de ce débit d'air correspondant au barbotage, on augmente la puissance d'injection, le débit liquide commence à se produire ; le rendement croît, il atteint brusquement son maximum.

Cette zone de travail optimal de l'air-lift correspond à l'écoulement bouchon où les pertes par frottements et glissements sont faibles.

# CARACTERISTIQUE ENERGETIQUE

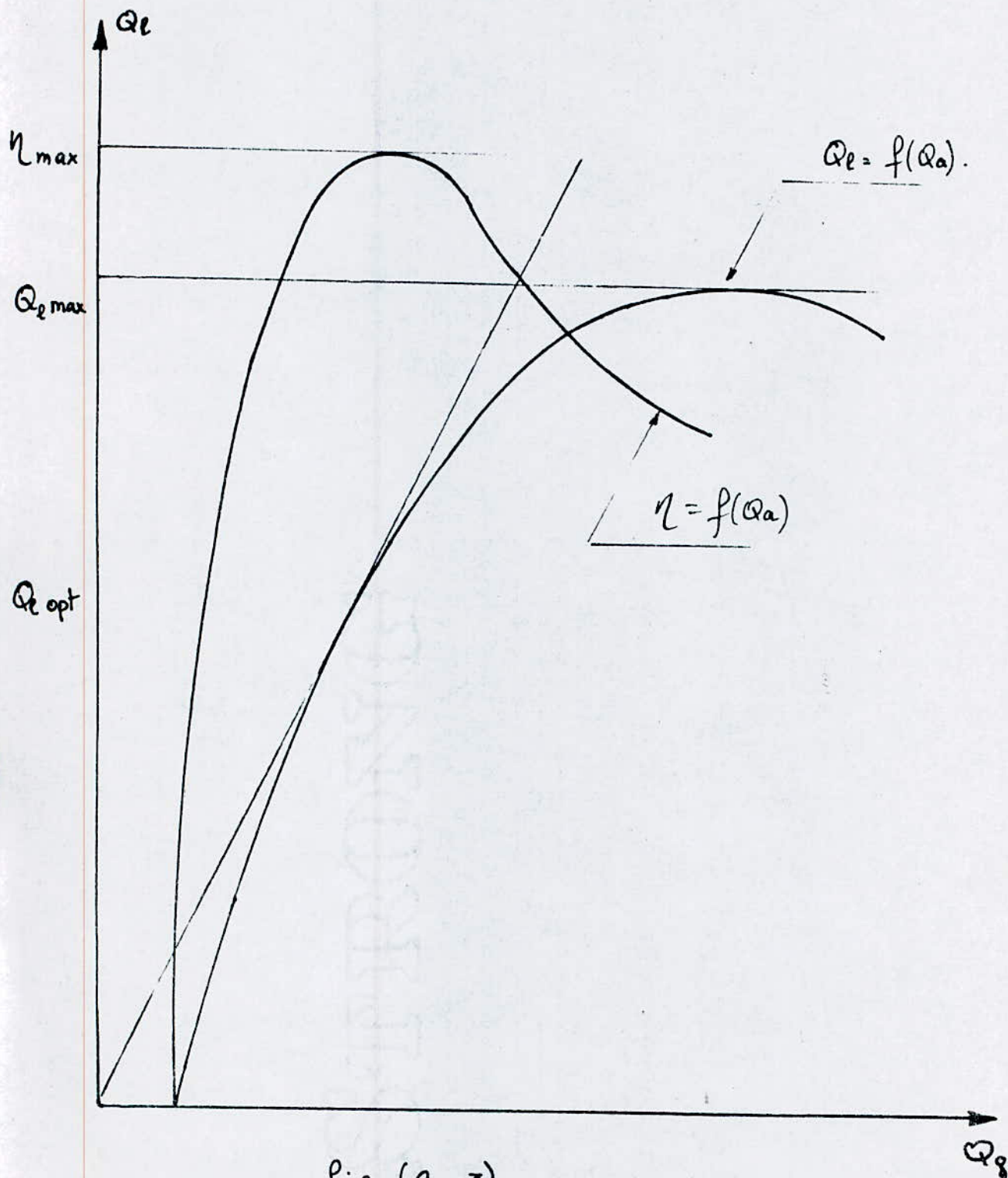


fig (2-3)

## Chapitre .IV.

### Etude experimenterale

## IV-1 : ASPECT EXPERIMENTAL

### 1- Présentation de l'installation

Nous avons utilisé dans notre expérience une installation ayant la forme d'un tube en U voir schéma (I)

La branche (A) permet de reproduire la pression statique et pourvue de plusieurs trop pleins (2) placés à différentes hauteurs (X) d'immersion, afin de stimuler la variation de pression au niveau du mélangeur (3). Cinq trop pleins (2) sont fixés sur cette conduite d'alimentation (1) de diamètre extérieur  $\phi_1 = 0,063m$ , liée à un réservoir cylindrique (8) de diamètre  $\phi_8 = 0,7m$  et de hauteur  $H_8 = 1,15m$  dont le rôle consiste à éviter les déversements lors de l'apport d'eau par la pompe (7).

Le déversoir muni d'un trop plein évacue l'excès d'eau.

La branche (A) est reliée à la branche (B) qui constitue la conduite de refoulement (5), par un flexible (C) qui facilite les petits mouvements du système durant l'injection d'air comprimé.

La conduite de refoulement (5) en plexiglas de diamètre  $\phi_5 = 0,08m$  et de hauteur  $H_5 = 7m$  permet d'observer tous les phénomènes physiques qui s'y produisent au cours de l'expérience.

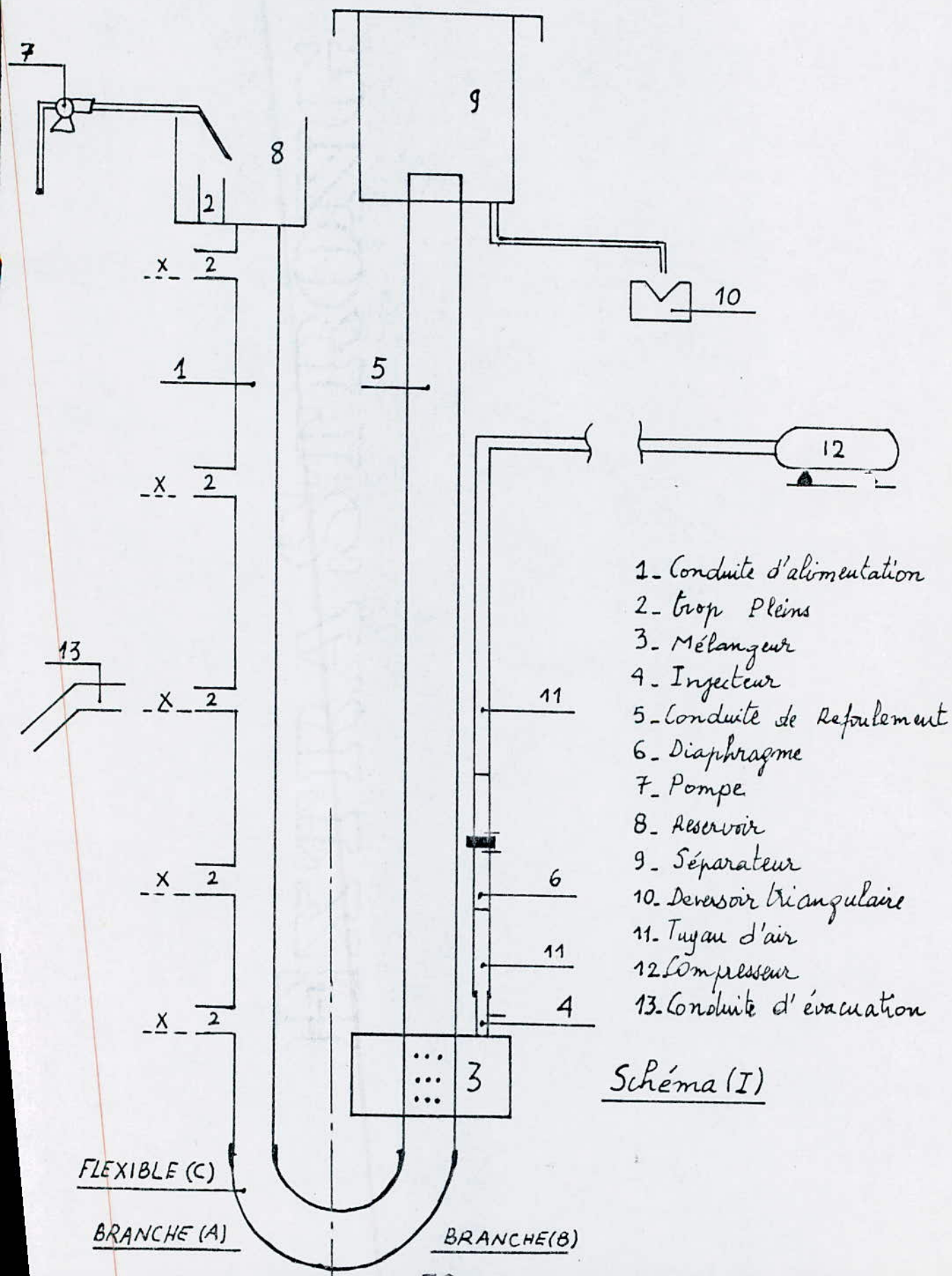
Cette conduite (5) débouche à sa partie supérieure dans un réservoir dit séparateur (9) pouvant recueillir les débits liquides refoulés puis dirigés vers le déversoir (10) triangulaire qui mesure les hauteurs d'eau correspondant aux débits liquides.

Les différentes dimensions du séparateur (9) (longueur  $L_9 = 0,8m$ , largeur  $E_9 = 0,8m$ , et de hauteur  $h_9 = 1m$ ) ont été choisies de manière à résister et à supporter la charge dynamique due aux vitesses élevées du mélange sortant de la conduite (5) sous forme de jets.

La partie inférieure comprend, un mélangeur (3) où est placé l'injecteur (4) qui permet l'entrée d'air dans la branche (B).

Une prise de pression est placée sur l'injecteur afin d'évaluer les variations de pression dans le mélangeur. La conduite (5) à l'intérieur du mélangeur est pourvue de trous de  $\phi = 10mm$  qui permettent au mélange air-eau de monter le long de la conduite (5).

Un tuyau (11) parallèle à la conduite de refoulement relie l'injecteur (4),



au compresseur (12), cette disposition évite l'ascension de l'eau dans la conduite d'air de manière à préserver le compresseur.

Un diaphragme logé dans une conduite de longueur  $L = 40\text{ cm}$ , de diamètre  $\Phi = 4,0\text{ cm}$ , solidaire du tuyau d'air comprimé permet de relever le débit d'air comprimé. Sur cette conduite (6) est placé un thermomètre qui donne les variations de températures durant l'injection d'air comprimé.

## 2 - Les principaux éléments constructifs de l'installation :

### A) Le séparateur voir schéma (II).

Son rôle essentiel est de séparer le courant diphasique (air-eau) en deux parties.

1) L'air sera évacué vers l'atmosphère.

2) L'eau sera orientée suivant la destination désirée

Il doit satisfaire en plus aux tâches suivantes.

1) Il divise quantitativement le mélange.

2) Il assure la stabilité du fonctionnement.

3) Il supporte la charge dynamique et doit avoir une résistance hydraulique minimale.

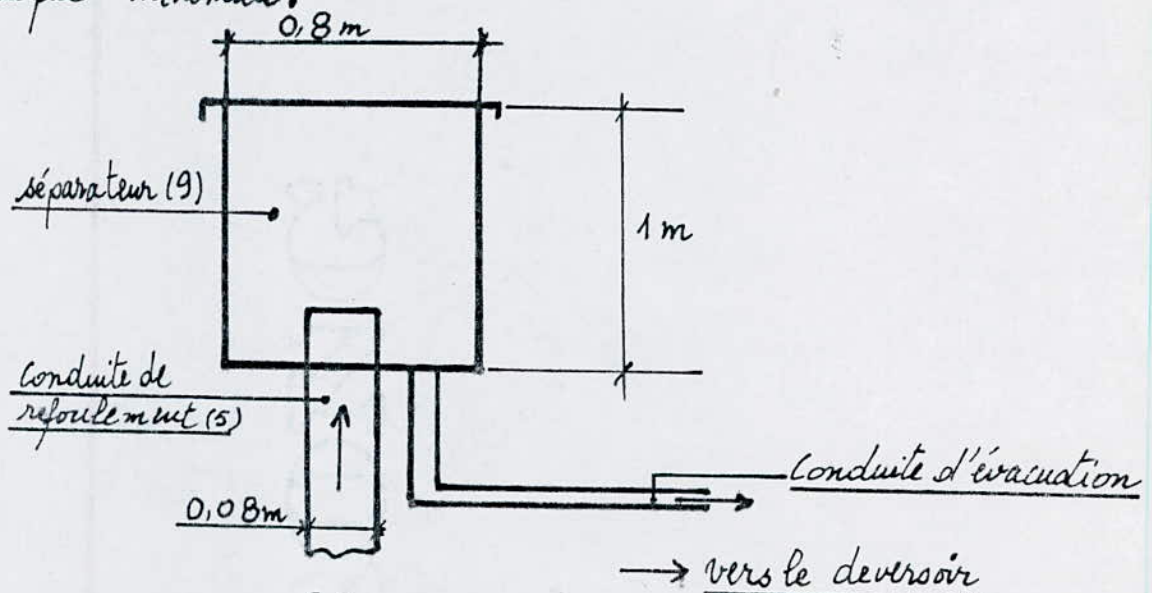
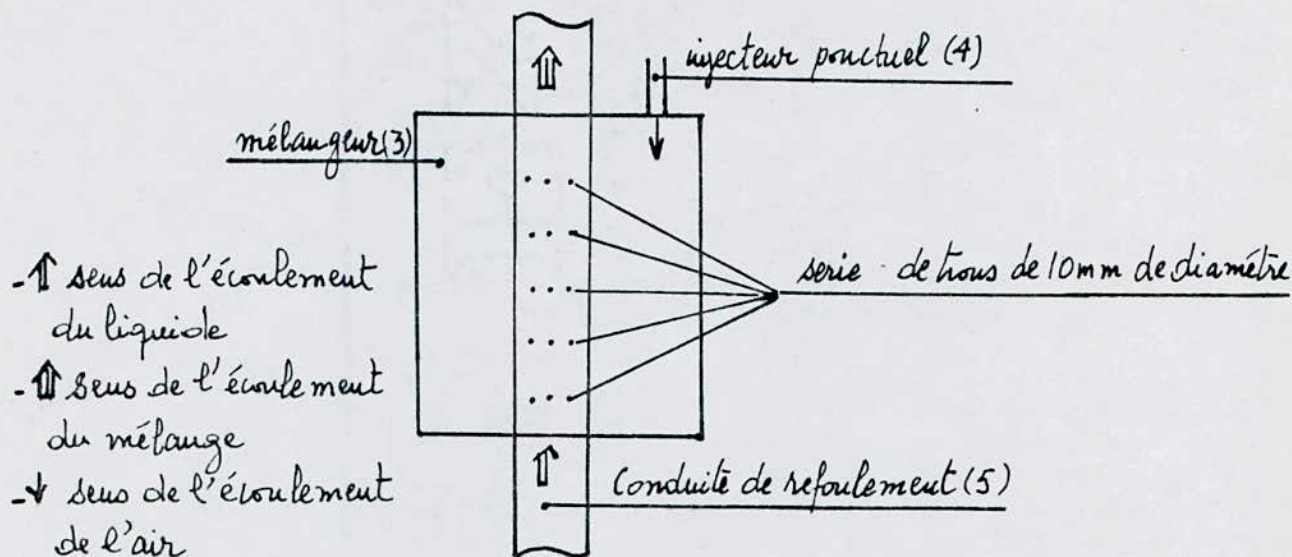


Schéma (II)

B) Le Mélangeur. voir schéma (III)

Son rôle essentiel est de réaliser le mélange liquide air-eau en transmettant au liquide l'énergie donnée par l'air d'une manière efficace.

Le mélangeur ne doit pas résister au passage de l'air dans la conduite de refoulement (5) et inversement; de ne pas résister au passage de l'eau dans le mélangeur quand l'air comprimé n'est plus injecté.



### Schémas (III)

c) L'injecteur : voir schéma (IV)

Dans le but de choisir judicieusement un injecteur d'air qui puisse permettre un fonctionnement pratiquement continu, du système et de faire apparaître l'évolution du mélange air-eau. Nous avons été amenés à choisir entre trois types d'injecteurs voir schéma II) qui diffèrent par leur position sur le mélangeur.

(-1) Injecteur frontal: (horizontal)

Sous l'effet de la pression d'air le dispositif expérimental est soumis le long

de la conduite (5) à des fortes turbulences ce qui ne permet guère d'apprécier les configurations et particulièrement les bouchons d'air. En outre dans le mélangeur le niveau d'eau est instable et de surcroît on observe un retour de l'eau dans la conduite d'air au moment de la décompression du compresseur (12).

### (2) Injecteurs répartis et injecteur ponctuel : (vertical)

Pour cette position on obtient <sup>même</sup> les phénomènes mais la turbulence diminue d'une façon notable laissant apparaître nettement les configurations. Le niveau d'eau dans le mélangeur reste constant pour des débits d'air élevés. Aucun retour d'eau dans la conduite d'air ne se produit.

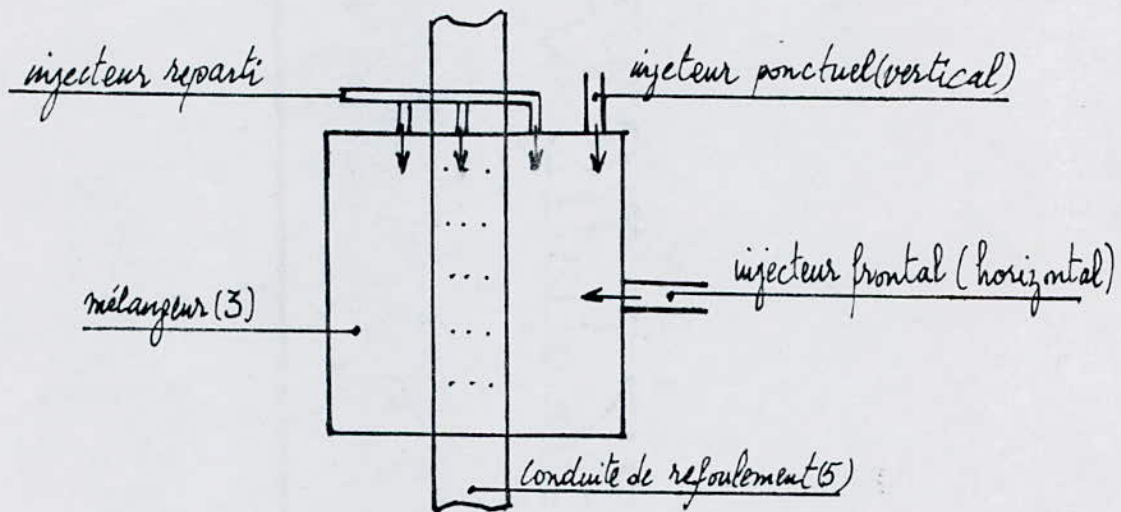


Schéma (IV)

De ce qui précède il convient d'adopter les injecteurs répartis ou ponctuel. Nous avons préféré l'injecteur ponctuel par sa commodité et sa simplicité.

### 3 - Conduite de l'expérience :

d'eau puisée du réservoir du laboratoire au moyen de la pompe centrifuge (7),

se déverse dans le réservoir (8), s'écoule dans la conduite (1) au niveau du trop plein choisi (X). L'excédent du liquide pompé est refoulé par la conduite (13) prévue à cet effet.

Initialement le niveau d'eau dans les deux branches est identique et correspond à la hauteur statique du trop plein (X) ou au coefficient d'immersion (d).

Un faible débit d'air comprimé est injecté à l'intérieur du mélangeur déjà rempli d'eau à la côte (a) voir le schéma (V). Sous l'action de la pression d'air le niveau du liquide dans le mélangeur diminue jusqu'à la côte (b) pour atteindre la première série de trous d'où l'air s'échappe et s'introduit dans la conduite (5) et le niveau d'eau augmente dans cette dernière.

On remarque alors que l'ascension du mélange (air-eau) est plus rapide, on observe alors la formation d'une multitude de petites bulles, devenant de plus en plus grosses en remontant la conduite (5) et s'agglomèrent pour donner naissance à une grosse bulle de forme ovoïde.

Le phénomène se déroule dans une discontinuité nette entre les deux phases air-eau, le mélange occupe alors la totalité de la section de la conduite (5). On reconnaît par là l'écoulement bouchon ou "configuration" bouchon qui s'accompagne d'un nuage de petites bulles qui à leur tour s'unissent pour former un autre bouchon.

Le mélange arrive à vive allure au niveau du séparateur par jets s'accrochant dus à l'irrégularité du volume du bouchon d'air.

Cette montée rapide s'explique du fait que la masse volumique ( $\rho_m$ ) du mélange est inférieure à celle de l'eau ( $\rho_{eau}$ ). La paroi d'un bouchon peut être considérée comme solide du fait que ce bouchon reste le même durant son ascension. Le bouchon entouré d'eau glisse dans la conduite (5) et le mouvement qu'il provoque est transitoire qu'on suppose turbulent lisse.

La masse volumique du bouchon d'air étant inférieure à la masse volumique de l'eau, le bouchon s'élève en entraînant le liquide environnant. A la fin de cette phase rapide dans le temps on observe au niveau

du mélangeur que l'eau remonte à la cote (a). Ce phénomène de va et vient se répète à une fréquence régulière et on peut en conclure que ce mouvement est oscillatoire. Cette oscillation s'explique par la compression et la décompression de l'air.

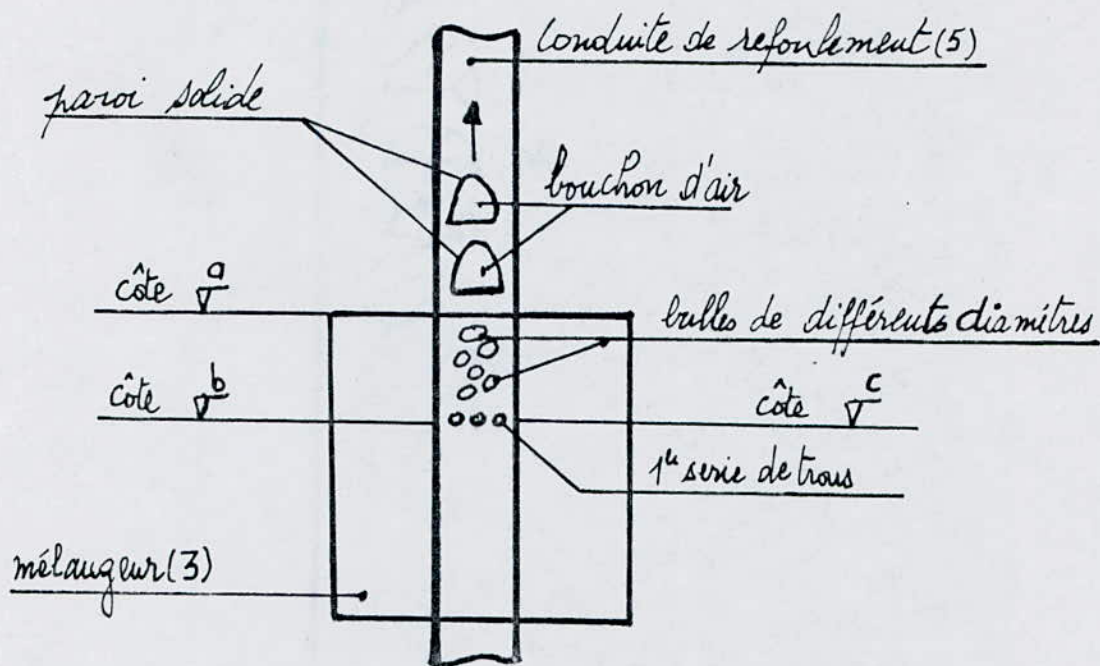


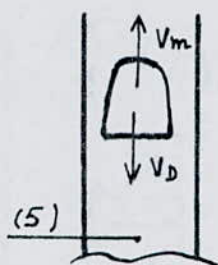
schéma (V)

En augmentant le débit d'air le niveau d'eau reste constant dans le mélangeur et correspond à la cote (c); mais les bulles d'air disparaissent pour laisser place à une forte turbulence donnant naissance à des jets de même intensité au niveau du séparateur (9). On remarque alors que la fréquence diminue sensiblement engendrant de faibles oscillations du système. Compte tenu de ces oscillations on est contraint de lire sur chaque appareil de mesure des valeurs moyennes.

#### 4- Explication physique du phénomène

Au début de l'expérience le système est à l'état d'équilibre statique. Il se produit après l'injection d'un faible débit d'air, un déséquilibre de ce système. Pour un nombre réduit de bulles d'air ce phénomène reste quasi statique. En revanche pour un nombre élevé de bulles une forte turbulence se manifeste. Le système oscille afin de retrouver un nouvel état d'équilibre statique et l'on se trouve en présence d'un phénomène oscillatoire (oscillation en masse).

Après l'ascension de bulles un phénomène retour se produit dès que les vitesses d'écoulement sont élevées. Ce dernier phénomène est dû à un changement de quantité de mouvement voir schéma(VI).



$$q \text{ de mouvement initial} = q \text{ de mouvement final}$$
$$V_m = V_D$$

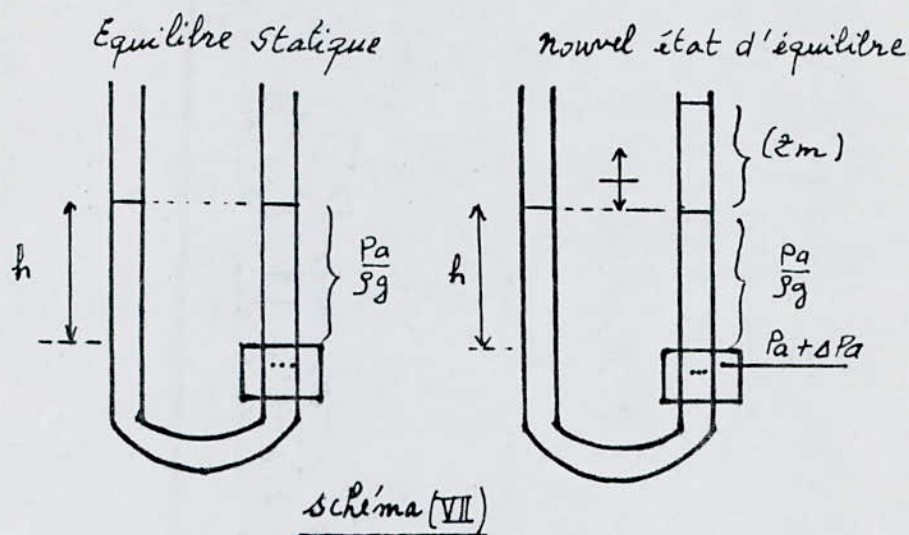
Au niveau du mélangeur la pression d'air parvient à vaincre la pression hydrostatique ( $h = \frac{P_a}{\rho g}$ ) l'air s'échappe.

On continue à perturber le système à ( $P_a + \Delta P_a$ ) voir schéma (VII) le système oscille cela revient à une augmentation de la hauteur d'eau (2m) dans l'une des deux branches.

Le système commence à osciller autour d'une nouvelle position d'équilibre. En réalité la pression ( $P_a$ ) élève le niveau d'eau dans les deux branches, mais dès que l'air s'échappe la situation est contrebalancée.

L'ascension de l'air conduit à une diminution de la masse volumique dans la conduite de refoulement.

La pression ( $\Delta P_a$ ) étant toujours constante, le défilement des bulles d'air est relativement faible à des vitesses différentes et diminue suivant la hauteur; ce-ci provoque l'élévation du niveau d'eau jusqu'à une hauteur donnée où la pression dans la branche d'alimentation devient suffisamment grande et l'eau gagne alors de l'espace et s'écoule à travers les trous du mélangeur.



En augmentant la pression, le débit d'air s'accroît, le phénomène disparaît de grosses bulles et de bouchons apparaissent au niveau de l'injecteur. L'oscillation diminue alors, grâce à l'excès de pression qui permet de vaincre ces perturbations secondaires.

Les valeurs de  $(\delta)$  se trouvent changées non seulement par l'oscillation du système mais aussi par l'alimentation dynamique où la vitesse et la pression, à la surface libre dans la branche d'alimentation, sont différentes de celles d'un état statique parfait.

## 5 - Instruments de mesure :

### a - diaphragme (appareil déprimogène) :

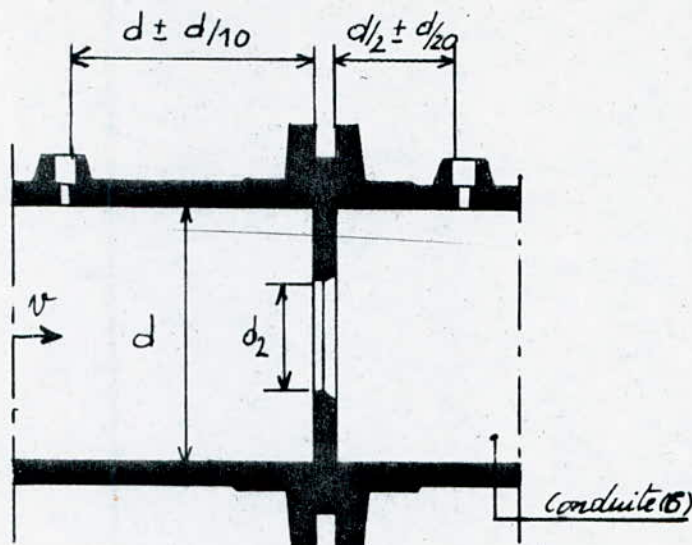
L'air comprimé est fourni par le compresseur à piston fonctionnant à deux temps (compression - détente).

Dans le but de mesurer la quantité d'air fourni par le compresseur, nous avons installé un diaphragme dans la conduite (6).

Le diaphragme permet de déterminer le débit dans la conduite par la mesure de la dépression provoquée par un rétrécissement.

Le dispositif interposé dans la conduite (6) est appelé élément primaire, la prise de pression et le tronçon de la conduite où l'appareil est installé étant compris dans ce terme.

Les instruments nécessaires pour mesurer la chute de pression sont les éléments secondaires voir (figure 1.).



diaphragme avec prise de pression.

(figure 1.)

$d$  = diamètre de la conduite. (40mm)

$d_2$  = diamètre minimum du dispositif d'étranglement. (24mm)

$S$  = section de la conduite

$S_2$  = section minimum du dispositif d'étranglement

$m$  = rapports des sections offertes.  $m = \frac{\text{section contractée}}{\text{section de la conduite}} = \frac{24}{40} = 0,6$

$\alpha$  = coefficient de contraction de la veine.

$v$  = vitesse moyenne d'écoulement dans la conduite

$\varphi$  = coefficient qui tient compte globalement des écarts causés par les changements des sections de prise de pression et par les résistances au mouvement.

Les prises de pression sont placées aux distances suivantes.

$$x_1 = d \pm \frac{d}{10} = 40 \pm 4 \text{ (mm)}$$

$$x_2 = \frac{d}{2} \pm \frac{d}{20} = 20 \pm 2 \text{ (mm)}$$

La vitesse moyenne d'écoulement dans la section contractée correspondant à la chute de pression mesurée  $\Delta p$  peut être donc exprimée par la formule.

$$v_c = \frac{\varphi}{\sqrt{1-\chi^2_{m^2}}} \cdot \sqrt{2g \frac{p_1 - p_2}{\gamma}} = \frac{\varphi}{\sqrt{1-\chi^2_{m^2}}} \cdot \sqrt{2g \Delta h}$$

$p_1$  et  $p_2$  sont respectivement les pressions mesurées à l'amont et l'aval du dispositif d'étranglement.

Le débit volumique est donné par:  $Q_a = S_c v_c = \frac{\chi \varphi}{\sqrt{1-\chi^2_{m^2}}} S_2 \sqrt{2g \Delta h}$

En posant  $\alpha = \frac{\chi \varphi}{\sqrt{1-\chi^2_{m^2}}}$  ou a  $Q_a = \alpha S_2 \sqrt{2g \Delta h}$

où  $\alpha$  représente le coefficient de débit du dispositif d'étranglement qui tient compte du coefficient de vitesse d'approche.

Pour des vitesses faibles la valeur du coefficient de débit ne subit pas de changements sensibles, le débit d'un dispositif d'étranglement est proportionnel à la racine carrée de la perte de charge  $\Delta h$  dans le dispositif d'étranglement.

$$Q_a \propto \sqrt{\Delta h}$$

$$Q_a = a \cdot \Delta h^{1/2}$$

## b - Déversoir triangulaire :

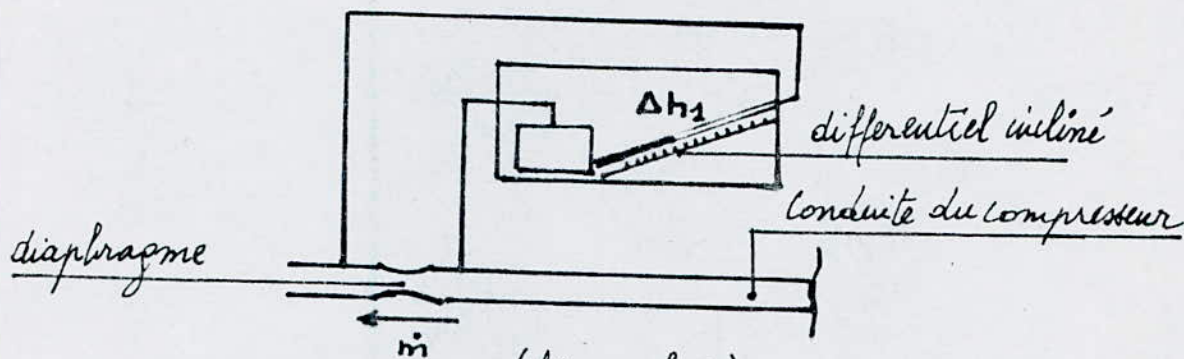
Pour nous permettre de recueillir les débits provenant du séparateur, nous avons choisi un déversoir triangulaire par sa réalisation simple et sa haute précision dans les lectures des hauteurs d'eau.

## 6 - Etalonnage de chaque instrument de mesure.

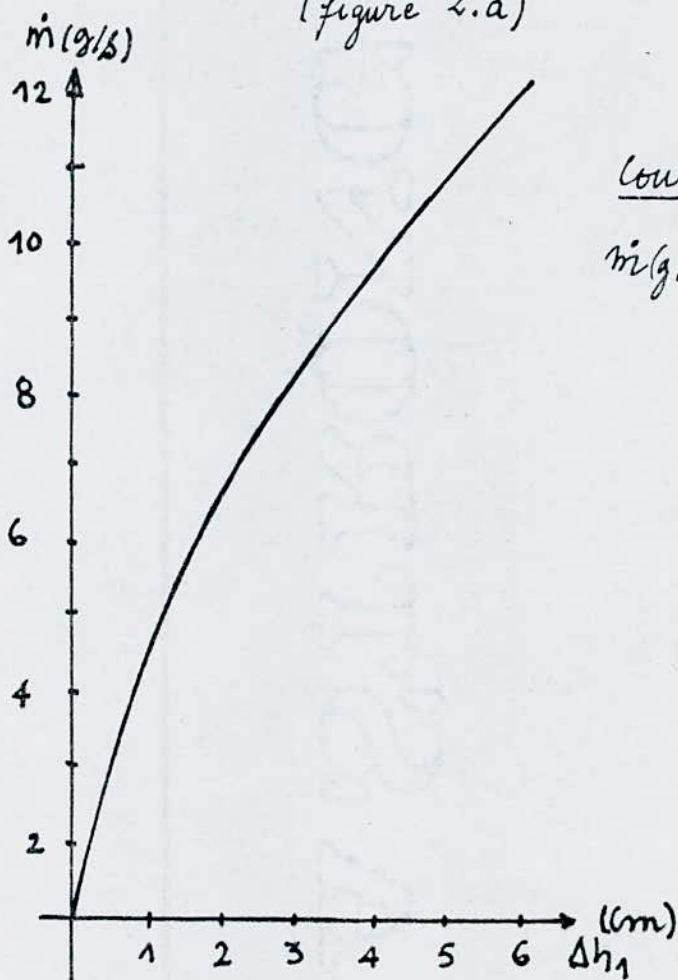
### a - Etalonnage du diaphragme :

Le compresseur du laboratoire est pourvu d'un diaphragme dont l'élément secondaire est un différentiel incliné.

Le compresseur est doté d'une courbe d'étalonnage du diaphragme voir (figure 2.a, b) qui permet d'obtenir par interpolation le débit massique ( $\dot{m}(\text{g/s})$ ) en fonction de la dénivelée  $\Delta h_1$  (cm).



(figure 2.a)



courbe d'étalonnage

$$\dot{m}(\text{g/s}) = f(\Delta h_1)$$

(figure 2.b)

Pour étalonner notre diaphragme nous avons procédé de la manière suivante.

Le compresseur progressivement ouvert donne une dénivellée  $\Delta h_1$  qui correspond à une hauteur  $sh_2$  du second diaphragme.

A partir de  $\Delta h_1$  une simple lecture de la courbe d'étalonnage nous permet d'obtenir le débit correspondant.

Grâce à ces valeurs on peut tracer la courbe d'étalonnage relative à notre diaphragme interposé dans la conduite (6).

L'équation de la nouvelle courbe est de la forme  $Q_a = a \cdot \Delta h_2^b$   
 Pour rendre linéaire l'équation précédente, traçons la droite  $\log Q_a = f(\log(\Delta h_2))$

#### \*) Détermination de la courbe d'étalonnage :

On dresse le tableau de mesure portant le débit  $Q_a$  (g/s), les hauteurs  $sh_1$  (cm),  $sh_2$  (cm) et leurs logarithmes décimaux correspondants.

$\Delta h_1$ (cm)	$Q_a = Q_a$ (g/s)	$\Delta h_2$ (cm)	$\log(Q)$	$\log(\Delta h_2)$
0,2	2	2,2	0,300	0,34
0,5	3,3	3	0,520	0,48
0,55	3,6	5	0,560	0,70
1	4,7	10,5	0,670	1,02
1,45	5,8	16,3	0,760	1,21
1,5	6	21	0,780	1,32
2	6,7	22,5	0,825	1,35
2,5	7,6	26,5	0,880	1,42
2,55	7,8	27	0,890	1,43
2,65	7,9	33	0,900	1,52
2,9	8,2	35	0,910	1,54
3,0	8,3	33,4	0,920	1,52
3,1	8,5	36,5	0,930	1,56
3,5	9,0	38	0,950	1,58
3,7	9,4	38,8	0,970	1,59

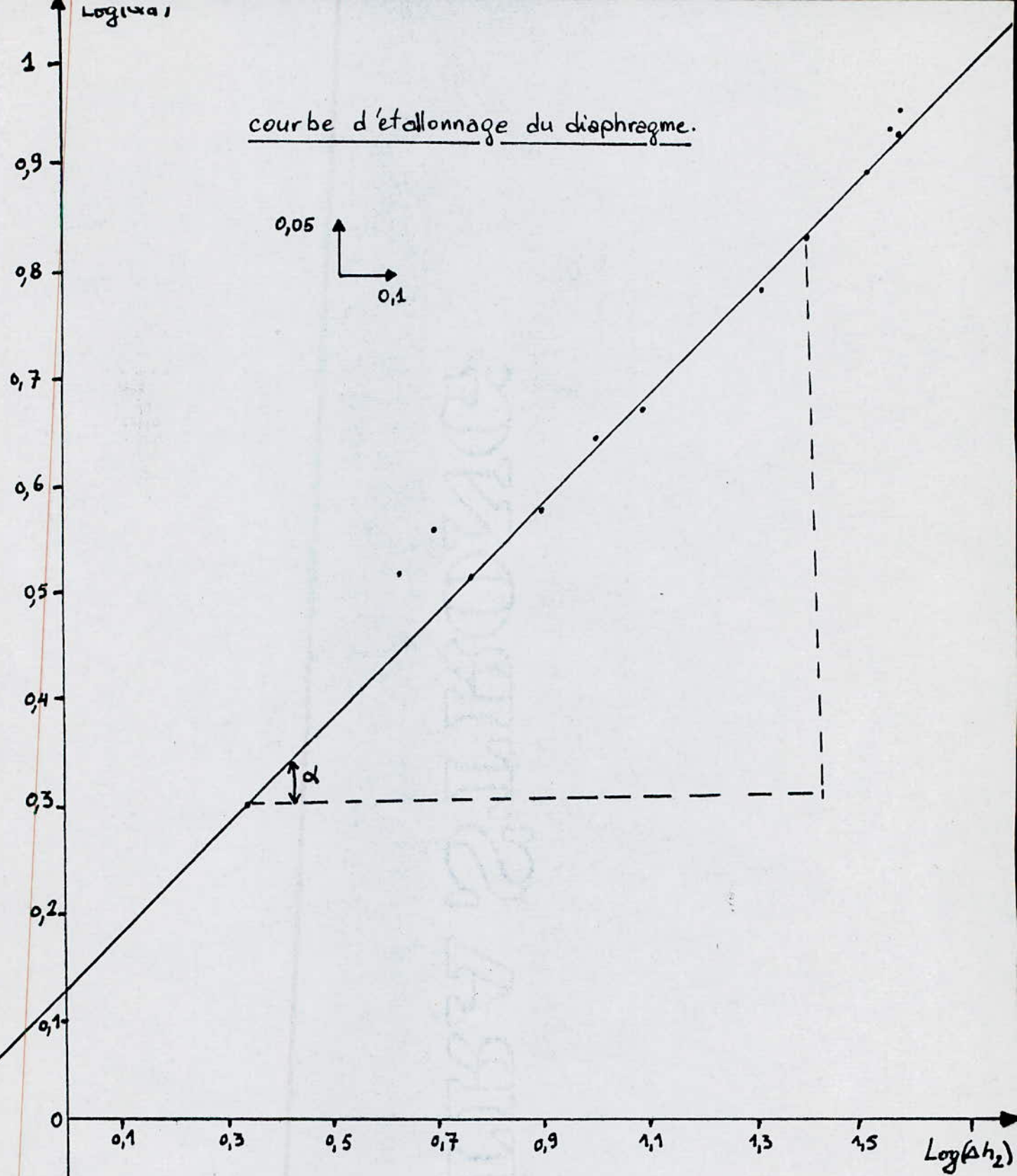


fig (3).

### Commentaire et équation de la courbe:

Le graphe  $\log(Q_a) = f(\log(\Delta h_2))$  voir fig(3) fait apparaître l'existence de deux points aberrants à négliger dûs probablement à des lectures impondérables.

Calcul de a et b graphiquement:

$$Q_{air} = a \Delta h_2^b$$

on écrit:  $\log Q_a = \log(a) + b \log(\Delta h_2)$  de la forme  $y = Ax + B$

on pose:  $y = \log Q_a$ ;  $x = \log(\Delta h_2)$ ;  $B = \log(a)$ ;  $A = b$

détermination de b:  $\text{tg } \alpha = \frac{\Delta(\log(Q_a))}{\Delta(\Delta h_2)}$

$$\text{tg } \alpha = \frac{0,9 - 0,3}{1,52 - 0,34} = 0,508 \quad \text{donc } b = 0,508$$

détermination de a:  $\text{qd } \log(\Delta h_2) = 0 \Rightarrow \log Q_a = \log a$

$$\text{on a donc } \log a = 0,125 \Rightarrow a = 10^{0,125} = 1,33$$

L'équation de la courbe d'étalonnage du diaphragme s'écrit.

$$\boxed{Q_a = 1,33 \Delta h_2^{0,508}} \quad [Q_a(\text{g/s}), \Delta h_2(\text{cm})]$$

### b - Etalonnage du déversoir:

Le déversoir est rempli à un niveau quelconque au dessus de la vête puis on arrête l'alimentation. Quand l'écoulement cesse dans le déversoir, on repère le zéro à l'arrêt d'un limnimètre.

Ensuite on remplit progressivement le déversoir ayant soin de relever chaque fois la hauteur de la lame d'eau une fois que le niveau s'est stabilisé.

$h$ (cm)	$Q$ (l/s)	$\log h = X$	$\log Q = Y$	$(X - \bar{X})$	$(X - \bar{X})^2$	$(Y - \bar{Y})$	$(Y - \bar{Y})^2$	$(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})$
5,52	0,299	0,742	-0,524	-0,171	0,0292	-0,448	0,2007	0,0766
6,48	0,493	0,811	-0,307	-0,102	0,0104	-0,231	0,0534	0,0235
7,82	0,741	0,893	-0,130	-0,020	0,0004	-0,054	0,0029	0,0011
8,55	0,936	0,932	-0,029	+0,019	0,0003	+0,047	0,0022	0,0009
10,8	1,659	1,033	0,219	+0,120	0,0144	+0,295	0,0870	0,0354
11,67	2,050	1,067	0,312	+0,154	0,0240	+0,388	0,1505	0,0597

la méthode des moindres carrés donne.

$$\bar{X} = 0,913 \quad ; \quad \bar{Y} = -0,076$$

$$\sum (X - \bar{X})^2 = 0,0787 \quad ; \quad \sum (Y - \bar{Y})^2 = 0,4967$$

$$\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y}) = 0,1972$$

$$A = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sum (X - \bar{X})^2} = \frac{0,1972}{0,0787} = 2,505 \approx 2,5$$

$$B = \bar{Y} - A\bar{X} = -0,076 - 2,5(0,913) \approx -2,36$$

$$\log Q_p = b' \log(h) + \log(a') \Rightarrow \log Q_p = 2,5 \log h - 2,36$$

$$Q_p = 10^{-2,36} h^{2,5} = 4,365 \cdot 10^{-3} h^{2,5}$$

L'équation de la courbe d'étalonnage du deviceur s'écrit:

$$\boxed{Q_p = 4,365 \cdot 10^{-3} h^{2,5}} \quad [Q_p \text{ (l/s)} ; h \text{ (cm)}]$$

Le coefficient de corrélation  $r$  est donné par:

$$r = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \cdot \sum (Y - \bar{Y})^2}} = \frac{0,1972}{\sqrt{0,0787 \times 0,4967}} = 0,99$$

Pour chaque hauteur relevée on recueille un volume d'eau d'éversé dans un bac cylindrique gradué. Par ailleurs à l'aide d'un chronomètre on détermine la durée de remplissage du bac. Connaissant le débit correspondant à la hauteur d'eau on trace la courbe d'étalonnage  $Q_e = f(h)$ .

\* La détermination du débit deversant à partir d'un deversoir triangulaire consiste à mettre en évidence la théorie approchée de la vitesse moyenne dans la tranche d'eau de largeur ( $x$ ) et de hauteur ( $dz$ ) située à une profondeur ( $z$ ) au dessous de la surface libre.

(voir figure)

$$v = \sqrt{2gz}$$

on désigne par  $\mu_1$  le coefficient du débit  $\mu_1 = cste$   
le débit élémentaire de cette tranche sera:

$$dQ = \mu_1 \cdot x \cdot dz \sqrt{2gz} = ds \cdot v \cdot \mu_1$$

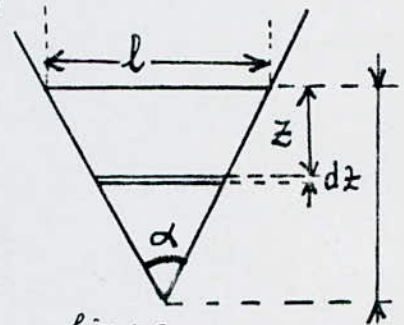
mettons  $x$  sous la forme de  $f(z)$  en faisant:

$$\frac{h}{l} = \frac{(h-z)}{x} \Rightarrow x = \frac{l}{h} (h-z)$$

$$dQ = \mu_1 \frac{l}{h} (h-z) \sqrt{2gz} dz$$

$$Q = \int_0^h \mu_1 \frac{l}{h} (h-z) \sqrt{2gz} dz$$

$$Q = \frac{4}{15} \cdot \mu_1 \cdot l \cdot h \sqrt{2gh}$$



On introduit l'angle ( $\alpha$ ) de l'échancrure du fait que ( $l$ ) est difficile à mesurer.

$$Q_e = \frac{8}{15} \mu_1 h^2 \tan \frac{\alpha}{2} \sqrt{2gh}$$

$$Q_e = \frac{8}{15} \mu_1 h^2 \tan \frac{\alpha}{2} \sqrt{2g} \cdot h^{1/2}$$

Si on pose  $a' = \frac{8}{15} \cdot \mu_1 \cdot \tan \left( \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \sqrt{2g}$  on obtient

$$Q_{\text{liquide}} = a' \cdot h^{5/2}$$

b\*) - Détermination de la courbe d'étalonnage.

Le tableau de mesure suivant donne les débits  $Q_e(l/s)$ , les hauteurs  $h(m)$  et leurs logarithmes décimaux correspondants.

$h(m)$	5,52	6,48	7,82	8,55	10,8	11,67
$Q_e(l/s)$	0,299	0,493	0,741	0,936	1,659	2,050
$\log h = X$	0,742	0,811	0,893	0,932	1,033	1,067
$\log Q_e = Y$	-0,524	-0,307	-0,130	-0,029	0,219	0,312

Avant de procéder au calcul, on trace la droite  $\log(Q_e = f(\log h))$   
voir

Notre travail consiste, à rendre linéaire la fonction puissance.

$$Q_e = a' h^{b'}$$

on écrit :  $\log Q_e = b' \log h + \log a'$

pour la détermination des coefficients  $a'$  et  $b'$  on utilisera la méthode des moindres carrés.

on pose :  $\log Q_e = Y$  ;  $\log h = X$   
 $\log a' = B$  ;  $b' = A$

d'où  $Y = AX + B$

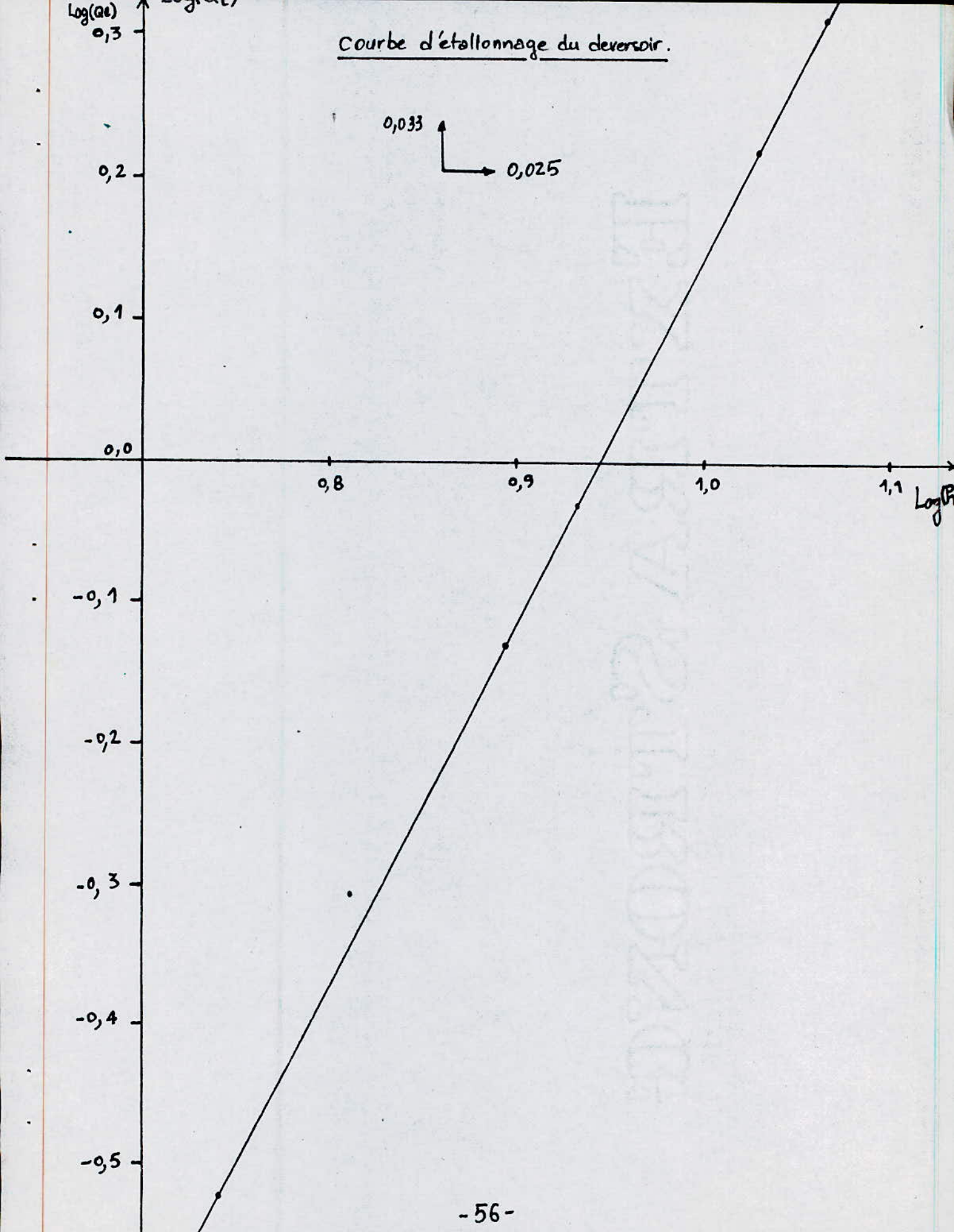
avec  $A = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sum (X - \bar{X})^2}$  et  $B = \bar{Y} - A\bar{X}$

Le coefficient de corrélation  $r$  est donné par :

$$r = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \cdot \sum (Y - \bar{Y})^2}}$$

Sachant  $\bar{X} = \frac{\sum X}{n}$  ;  $\bar{Y} = \frac{\sum Y}{n}$

Courbe d'étalonnage du deversoir.



# 7 - Détermination du coefficient du débit $\gamma$ à partir de l'expérience

on a  $Q_e = 4,36 \cdot 10^{-3} h^{2,5} \quad [Q_e (\text{l/s}); h (\text{cm})]$

$Q_e = 0,436 h^{2,5} \quad [Q_e (\text{m}^3/\text{s}); h (\text{m})]$

Sachant que  $Q_e = a' h^{2,5}$

avec  $a' = \gamma \cdot \frac{8}{15} \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \sqrt{2g}$

on obtient  $\gamma = \frac{a'}{\frac{8}{15} \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \sqrt{2g}} \quad \text{avec } \alpha = 34^\circ$

on dresse le tableau correspondant.

$h (\text{m})$ $\times 10^{-2}$	5,52	6,48	7,82	8,55	10,8	11,67
$Q_e (\text{m}^3/\text{s})$ $\times 10^{-3}$	0,299	0,493	0,741	0,936	1,659	2,050
$a'$	0,417	0,461	0,433	0,437	0,432	0,44
$\gamma_{exp}$	0,58	0,63	0,60	0,60	0,60	0,61

## 8 - Calcul d'erreur

### Calcul d'erreur sur le diaphragme.

Nous avons pour le diaphragme la dénivellée  $\Delta h_2$  sur le manomètre différentiel qui lui correspond un débit massique  $\dot{m}$  (g/s).

$$\text{donc} \quad \frac{\Delta Q_a}{Q_a} = \frac{\Delta(\Delta h_2)}{\Delta h_2} \quad \text{avec } Q_a \text{ (g/s)}.$$

$\Delta(\Delta h_2) \approx 2 \text{ mm}$  erreur de lecture sur le manomètre différentiel + erreur d'extrapolation sur la courbe d'étalonnage.

On dresse le tableau suivant:

$\Delta h_2 \text{ (cm)}$	2,2	3	5	10,5	16,3	21	22,5	26,5	27	33	35	33,4	36,5	38,8
$\frac{\Delta Q_a}{Q_a}$	9,09	6,6	4	1,9	1,2	0,9	0,8	0,76	0,74	0,6	0,57	0,59	0,55	0,51

### - calcul d'erreur sur le déversoir:

Le débit  $Q_d$  recueilli et mesuré par la formule  $Q_d = \frac{V}{t}$

V: volume du bac

t: le temps de remplissage du bac.  $Q_d \text{ (l/s)} = \frac{V}{t}$

$$\log(Q_d) = \log(V) - \log(t) \Rightarrow \frac{\Delta Q_d}{Q_d} = \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta t}{t}$$

$$\Delta V = 30 \text{ cm}^3 \rightarrow \Delta V = 0,03 \text{ l} \quad \text{erreur de lecture sur le bac}$$

$$\Delta t = 1 \text{ s} \rightarrow \Delta t = 1 \text{ s} \quad \text{erreur de lecture sur le chronomètre.}$$

L'erreur sur  $h$  de la lame d'eau déversante  $\Delta \log h = \frac{\Delta h}{h}$

$\Delta h$  = erreur du déversoir + erreur de lecture + erreur commise par l'influence de la tension superficielle.

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 = 2 \text{ mm.}$$

on dresse le tableau suivant:

$l(m)$	5,52	6,48	7,82	8,55	10,8	11,67
$t(s)$	97	59,36	40	30,6	17,86	41,9
$V(l)$	0,3	0,4929	0,7411	0,9366	1,6517	2,050
$\frac{\Delta T}{T} \%$	1,03	1,6	2,5	3,3	5,5	2,3
$\frac{\Delta V}{V} \%$	6,6	4,05	2,6	2,1	1,2	0,9
$\frac{\Delta Q}{Q} \%$	7,63	5,65	5,1	5,4	6,7	3,2
$\frac{\Delta h}{h} \%$	3,6	3,08	2,55	2,34	1,85	1,7

## IV-2 : RESULTATS ET GRAPHES

Pour chaque profondeur d'immersion du mélangeur, on détermine la valeur du débit d'air injecté et du débit liquide avec les instruments de mesures utilisés.

ensuite on fait varier la pression au niveau du mélangeur en augmentant la hauteur d'immersion absolue  $h$ .

Le tableau des résultats est dressé dans la page suivante dans lequel sont représentés les paramètres suivants :-

$\Delta h$  : variation de la hauteur au niveau du manomètre différentiel à mercure, elle nous permet de déterminer la pression juste à l'entrée du mélangeur.

$$P = \rho_{\text{mer}} g \Delta h$$

$$\rho_{\text{mer}} = 13,6 \cdot 10^3 \text{ Kg/m}^3$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\Delta h : [\text{m}]$$

$$P : [\text{bar}]$$

$\rho_a$  : Masse volumique de l'air comprimé juste avant son injection dans le mélangeur.

Pour un processus isothermique

$$\rho_a = \frac{P}{RT}$$

$$R = 0,00287 \left[ \frac{\text{bar m}^3}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \right]$$

$$T = 287^\circ \text{K}$$

$Q_l$  : débit liquide. ( $\ell/s$ )

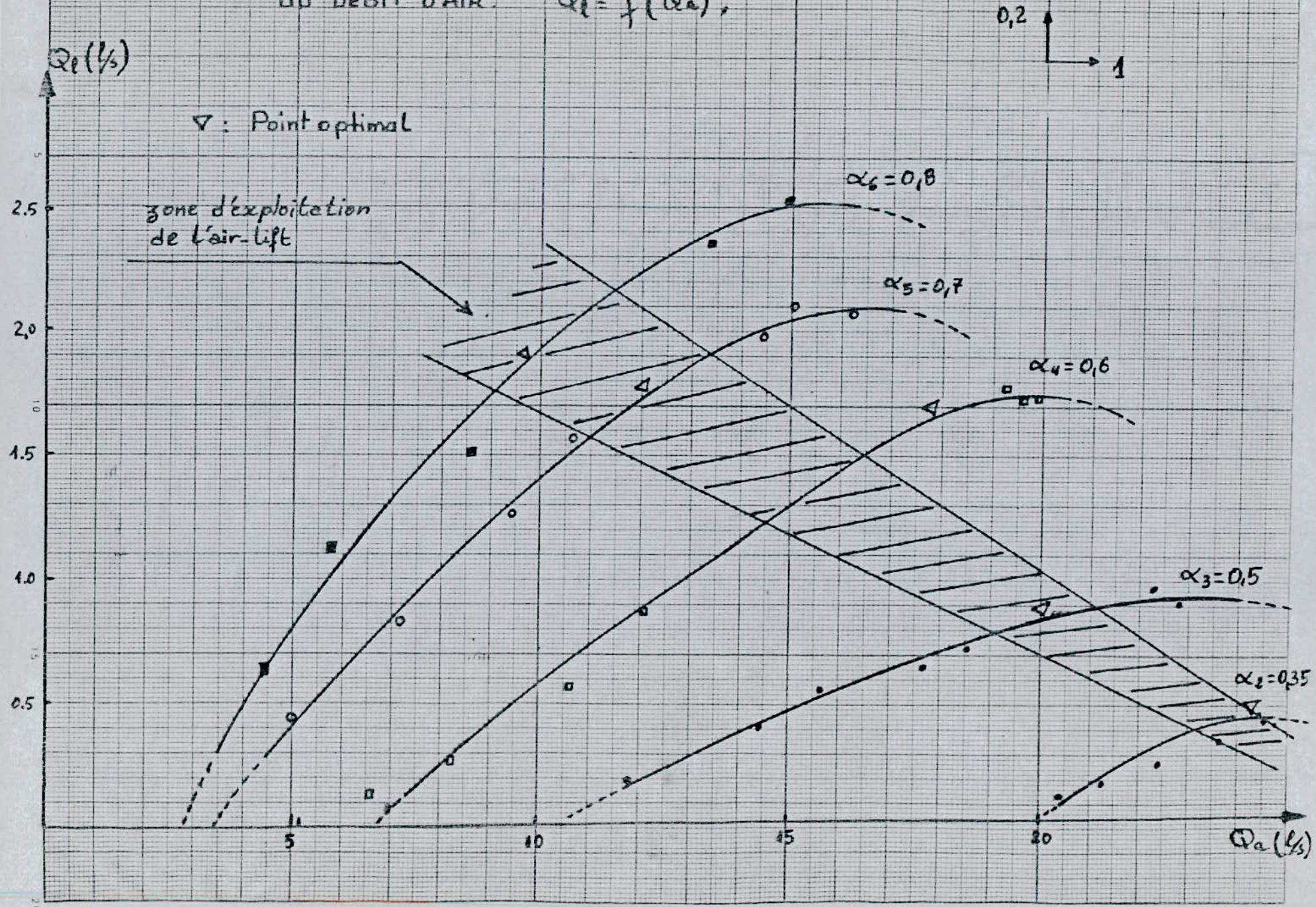
$Q'_a$  : débit d'air ( $\ell/s$ ) obtenu à l'aide du diaphragme

$Q_a$  : débit d'air ( $\ell/s$ ) tel que  $Q_a = \frac{Q'_a}{\rho_{\text{air}}}$ .

On notera que  $\alpha_1 = 0,2$  ne figure pas dans le tableau des résultats étant donné que le débit liquide est nul.

$\alpha_2 = 0,35$	$\Delta h$ (cm)	15	15,4	16,4	17,6	19,6	19,8	20
	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,247	0,254	0,270	0,291	0,323	0,327	0,330
	$Q_a$ (g/s)	5,02	5,37	6,04	6,85	7,94	8,04	8,13
	$Q_a$ (l/s)	20,28	21,12	22,36	23,56	24,53	24,59	24,62
	$Q_e$ (l/s)	0,023	0,12	0,21	0,31	0,37	0,36	0,35
$\alpha_3 = 0,50$	$\Delta h$ (cm)	18,08	18,20	18,45	19,00	19,85	20,75	20,85
	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,298	0,300	0,304	0,313	0,327	0,342	0,344
	$Q_a$ (g/s)	3,48	4,31	4,73	5,49	5,99	7,65	7,79
	$Q_a$ (l/s)	11,68	14,36	15,53	17,52	18,27	22,32	22,65
	$Q_e$ (l/s)	0,18	0,36	0,50	0,62	0,68	0,88	0,82
$\alpha_4 = 0,60$	$\Delta h$ (cm)	23,4	21,80	19,40	19,25	22,60	23,90	24,10
	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,386	0,360	0,320	0,318	0,373	0,394	0,398
	$Q_a$ (g/s)	2,46	2,96	3,35	3,83	6,92	7,67	7,76
	$Q_a$ (l/s)	6,38	8,23	10,48	12,04	18,55	19,43	19,46
	$Q_e$ (l/s)	0,11	0,27	0,54	0,85	1,69	1,75	1,72
$\alpha_5 = 0,70$	$\Delta h$ (cm)	25,2	24,6	25,4	26,6	27,2	28,6	30,6
	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,416	0,406	0,345	0,439	0,449	0,472	0,505
	$Q_a$ (g/s)	2,02	2,92	3,67	5,58	6,38	7,01	7,68
	$Q_a$ (l/s)	4,86	7,20	10,62	12,71	14,22	14,85	15,20
	$Q_e$ (l/s)	0,40	0,81	1,56	1,87	1,98	2,12	2,10
$\alpha_6 = 0,80$	$\Delta h$ (cm)	27,5	30	26,85	27,85	30,5	31,5	31
	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,454	0,495	0,443	0,460	0,503	0,520	0,512
	$Q_a$ (g/s)	1,99	2,81	3,82	6,14	7,40	7,67	7,76
	$Q_a$ (l/s)	4,38	5,67	8,63	13,35	14,71	14,75	15,16
	$Q_e$ (l/s)	0,61	1,12	1,50	2,37	2,44	2,42	2,40

# VARIATION DU DEBIT LIQUIDE EN FONCTION DU DEBIT D'AIR $Q_l = f(Q_a)$



# VARIATION DU DÉBIT SPECIFIQUE $q$ EN FONCTION DE L'IMMERSION RELATIVE $\alpha$ .

Pour un fonctionnement optimal de l'air-lift, le débit spécifique  $q$  est obtenu en faisant le rapport du débit d'air optimal sur le débit liquide optimal.

Ces deux derniers sont obtenus en traçant la tangente à la courbe  $Q_p = f(Q_a)$ .

Le tableau de variation du débit spécifique  $q$  en fonction de l'immersion relative  $\alpha$  est le suivant :-

$\alpha$	0,35	0,50	0,60	0,70	0,80
$Q_a^{opt} (l/s)$	24	20	17,7	12	9,8
$Q_e^{opt} (l/s)$	0,36	0,87	1,60	1,72	1,8
$q (m^3/m^3)$	66,66	22,73	11,06	6,97	5,21

Afin de Comparer nos résultats à ceux obtenus par d'autres expériences, dressons les tableaux suivants :

- Expérience de METREVELI :  $L = H + h = 17,5 m$ ,  $D = 80 mm$

$\alpha$	0,15	0,25	0,35	0,50	0,60
$q (m^3/m^3)$	100	45	19	6	4

- Expérience de HEIR :  $L = H + h = 50 \div 400 m$ ,  $D = 100 \div 700 mm$

$\alpha$	0,15	0,25	0,35	0,50	0,60
$q (m^3/m^3)$	75	30	16	8	6

VARIATION DU DEBIT SPECIFIQUE  
EN FONCTION DE L'IMMERSION RELATIVE

$$q = f(\alpha)$$

$q \left( \frac{m^3}{m^3} \right)$

5 A

0,05

- I - NOTRE EXPERIENCE
- II - EXP DE METREVELI
- III - EXP DE HEIR

100  
90  
80  
70  
60  
50  
40  
30  
20  
10

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

$\alpha$

Variation du coefficient de résistance  
spécifique en fonction du débit spécifique  $q$   
et en fonction de l'immersion  $\alpha$  :

Le coefficient de résistance spécifique de l'air-lift  
est déterminé à l'aide de l'équation des puissances

$$N_{\text{air}} = N_{\text{sortie}} - N_{\text{entrée}}.$$

Après développement et transformation de l'équation  
des puissances, on obtient le coefficient de résistance spécifique  
de l'air-lift :

$$\alpha'_{\text{a.l.}} = \frac{P_a \cdot q + \rho g H - P_a \ln \frac{P_a + \rho g h}{P_a}}{\rho_m \cdot g Q_e^2 (q+1)(H+h)}.$$

$$P_a = 10^5 \text{ pascal.}$$

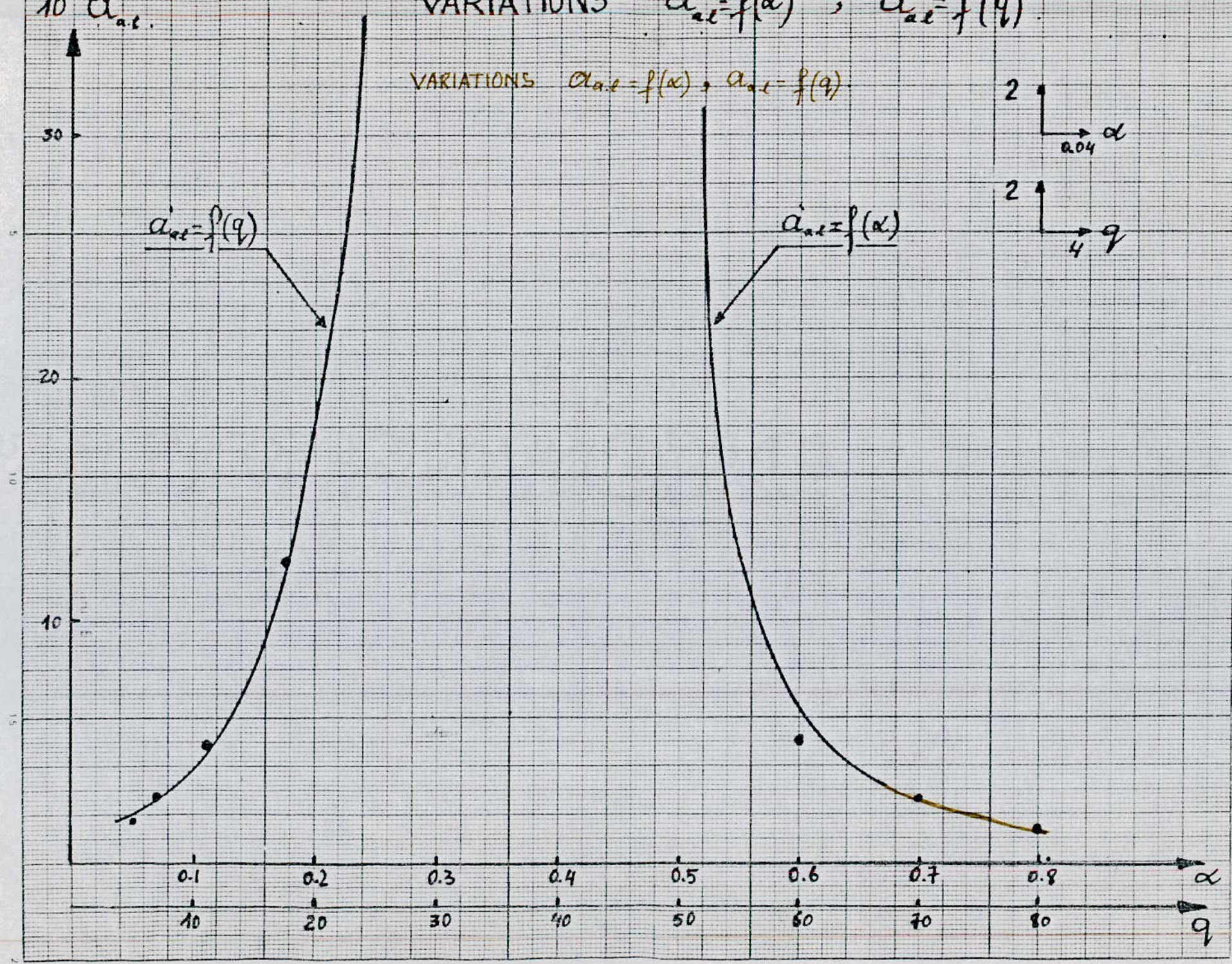
$$\rho = 10^3 \text{ Kg/m}^3$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\rho_m = \frac{\rho}{1+q} \cdot \text{Kg/m}^3$$

$\alpha$	0,35	0,50	0,60	0,70	0,80
$h$ (m)	2,30	3,16	3,95	4,72	5,38
$H$ (m)	4,26	3,40	2,61	1,84	1,18
$q$	66,66	22,73	11,06	6,97	5,21
$Q_e$ (m <sup>3</sup> /s) · 10 <sup>3</sup>	0,36	0,87	1,60	1,72	1,88
$\rho_m$ (Kg/m <sup>3</sup> )	14,78	42,14	82,92	125,50	161,03
$\alpha'_{\text{a.l.}} \cdot Q_e^2$	81,23	25,65	11,64	6,97	4,70
$\alpha'_{\text{a.l.}} \cdot 10^6$	626,75	33,88	4,55	2,30	1,33

VARIATIONS  $a_{rel} = f(x)$ ,  $a_{rel} = f(q)$



# VARIATION DU COEFFICIENT DU DEBIT $KQ$ EN FONCTION DE $\alpha, q$ .

Pour un fonctionnement optimal de l'air - lift, le coefficient du débit expérimental  $KQ$  est obtenu d'après la relation suivante.

$$Ql = KQ \sqrt{g D^5} \quad \text{d'où} \quad KQ_{exp} = \frac{Ql}{\sqrt{g D^5}}$$

(m<sup>3</sup>/s)

La valeur théorique de  $KQ$  peut être obtenue par la relation :

$$KQ_{théorique} = \frac{1}{1+q} \sqrt{\frac{\alpha}{\psi} (1+q - \frac{1}{\alpha})}$$

$\psi$ : coefficient de résistance hydraulique.

$\psi$ : 0,078 pour l'air lift court.

$\alpha$	0,35	0,50	0,60	0,70	0,80
$q$	66,66	22,73	11,06	6,97	5,21
$KQ_{th}$	0,252	0,497	0,741	0,961	1,148
$KQ_{exp_i}$	0,063	0,152	0,279	0,300	0,328
$KQ_{th}/KQ_{exp}$	4	3,2	2,6	3,2	3,5

$$\frac{\sum KQ_{th}}{KQ_{exp}} / n \approx 3,3$$

$$KQ_{th} \approx 3,3 KQ_{exp_i}$$

D'après l'expérience de  $\hat{\text{METREVELT}}^1$ , on dresse le tableau suivant

$\alpha$	0,15	0,25	0,35	0,50	0,60
$q$	100	45	19	6	4
$KQ_{th}$	0,135	0,252	0,438	0,808	1,013
$KQ_{exp_{II}}$	-	-	0,243	0,392	0,582
$KQ_{th}/KQ_{exp}$	-	-	1,8	2,061	1,740

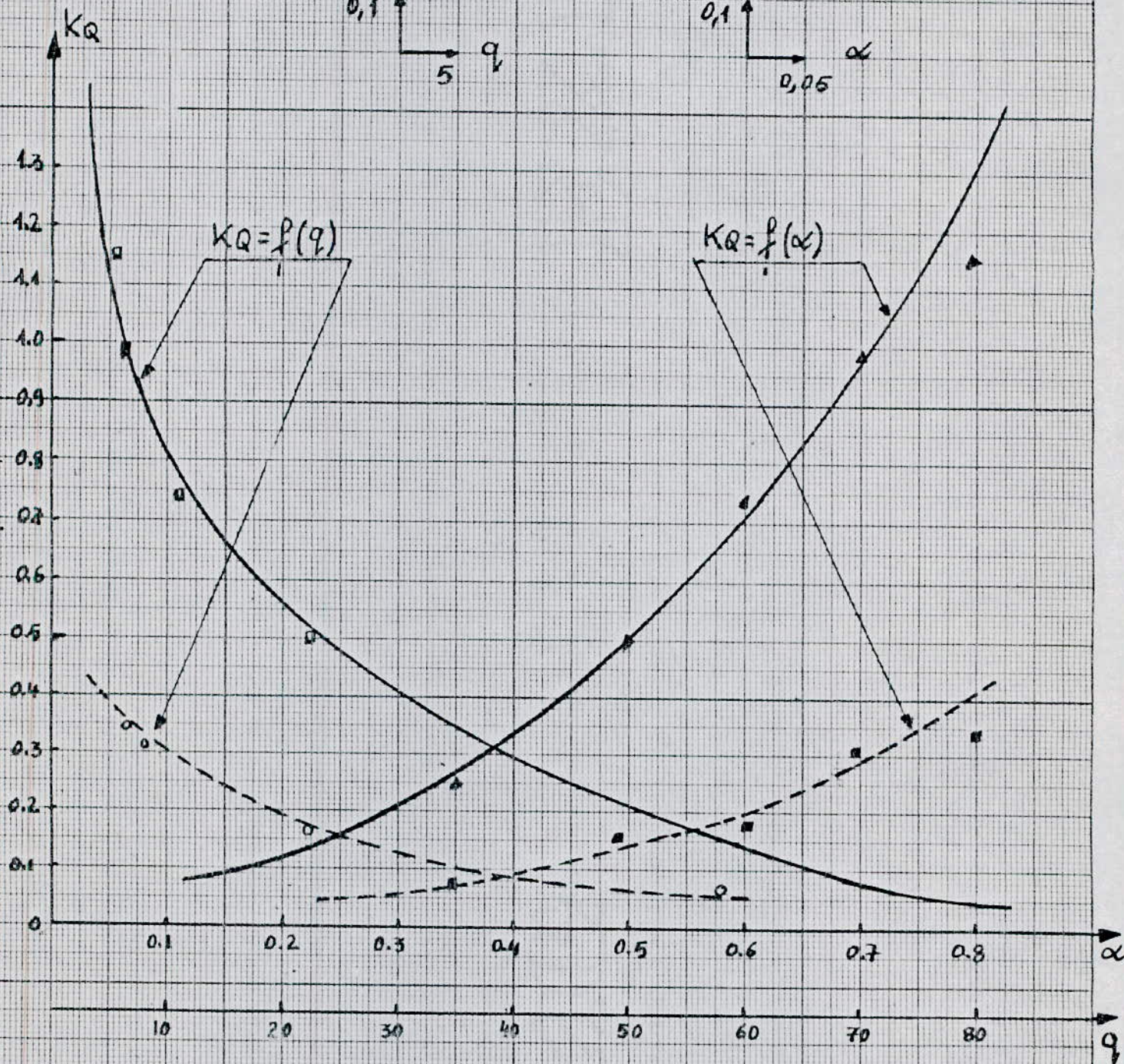
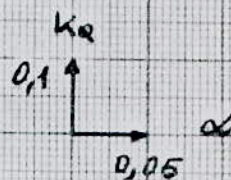
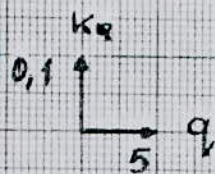
$$\leq \frac{KQ_{th}}{KQ_{exp}} / n \approx 1,9$$

$$KQ_{th} \approx 1,9 KQ_{exp_{II}}$$

On remarque que  $KQ_{exp_{II}}$  est plus proche de  $KQ_{th}$  par rapport à  $KQ_{exp_I}$ .

Ce qui donne un débit liquide plus important pour un coefficient d'immersion relative  $\alpha$  constant dans le cas de l'expérience (II).

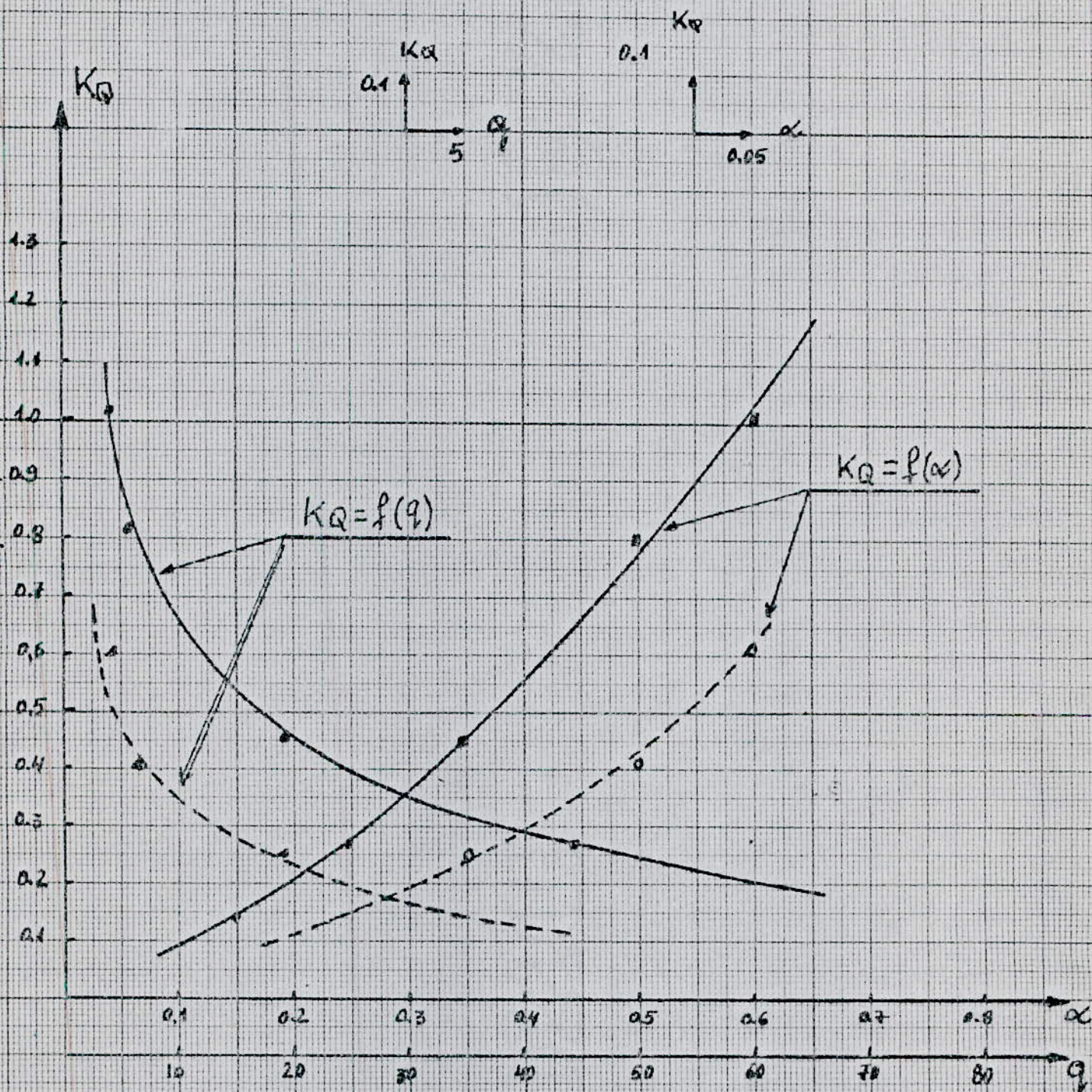
# VARIATION DE $K_Q$ EN FONCTION DE $\alpha$ et $q$



NOTRE  
EXPERIENCE

—  $K_Q$  THEORIQUE  
- - -  $K_Q$  EXPERIMENTAL

# VARIATION DE $K_Q$ EN FONCTION DE $\alpha$ et $q$

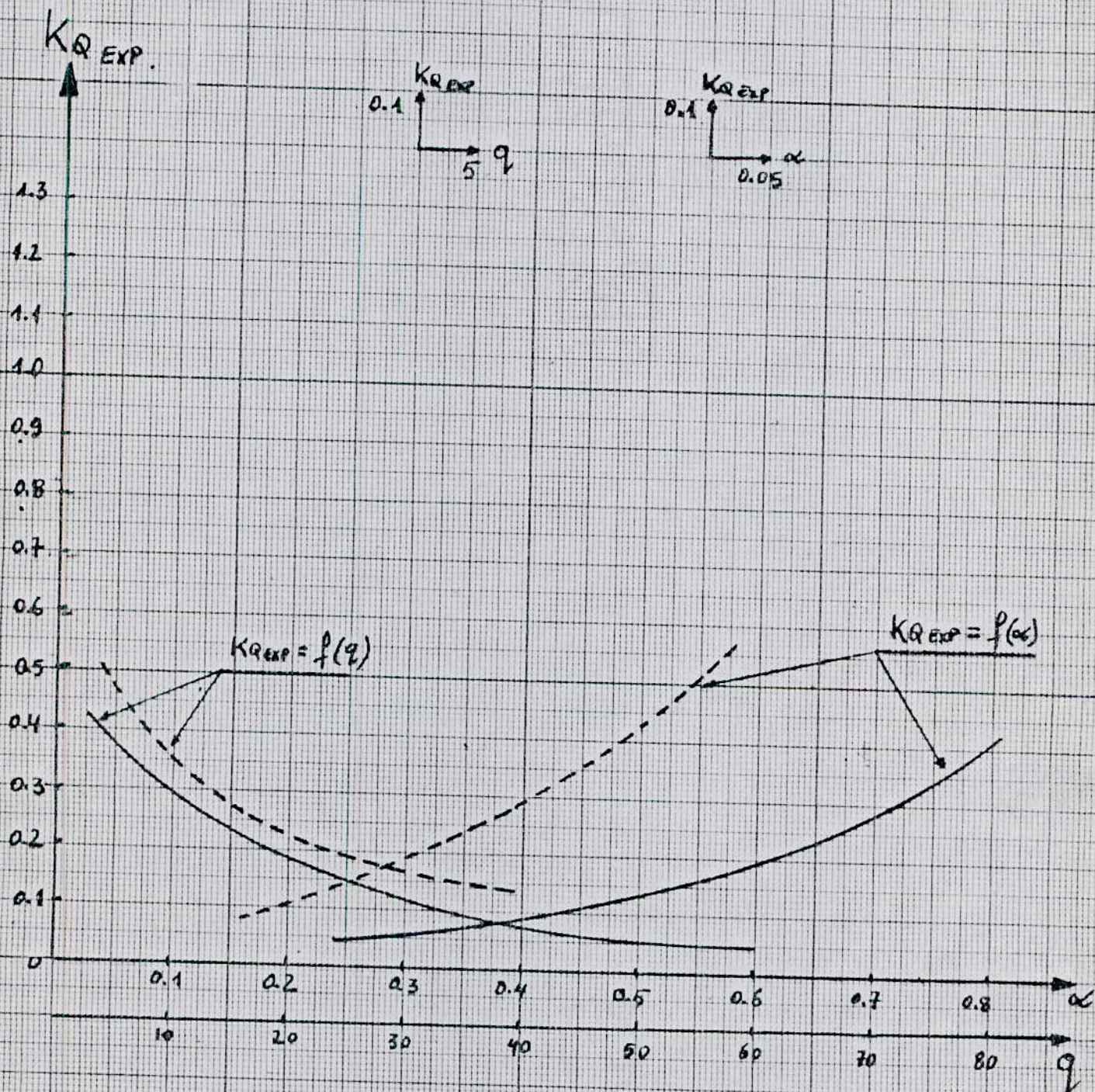


EXPERIENCE DE  
METREVELI

$K_Q$  THEORIQUE

$K_Q$  EXPERIMENTALI

# VARIATION DE $K_Q$ EXPERIMENTAL EN FONCTION DE $\alpha$ et $q$



NOTRE EXPERIENCE

EXPERIENCE DE METREVEIL

Variation de  $\bar{Q}$  en fonction de  $\bar{q}$ .

$\bar{Q}$  : débit liquide abstrait.

$\bar{q}$  : débit spécifique abstrait.

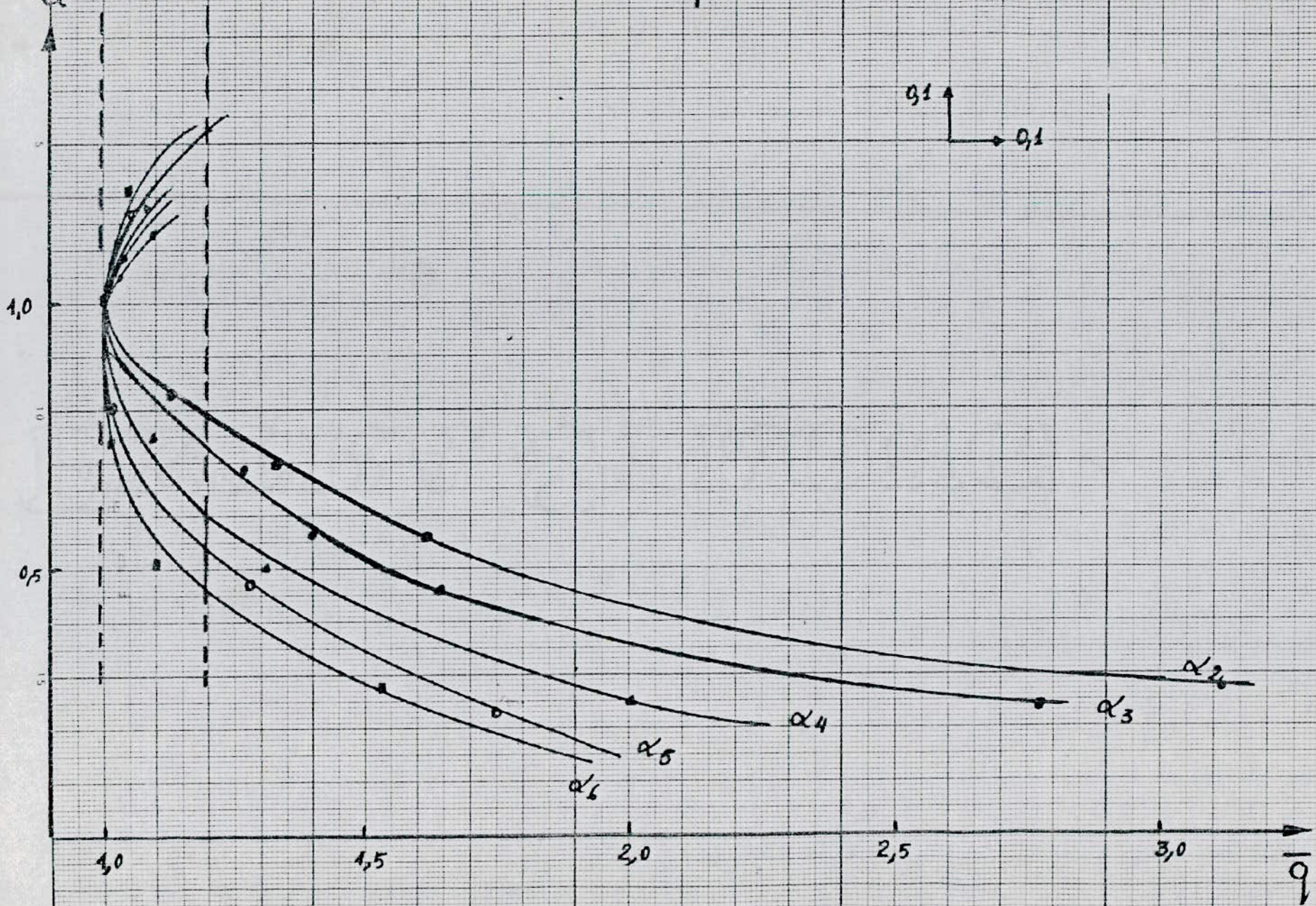
$$\bar{Q} = \frac{Q_e}{Q_e^{opt}} \quad ; \quad \bar{q} = \frac{q}{q^{opt}}$$

La variation de  $\bar{Q} = f(\bar{q})$  permet de trouver une valeur limite de  $\bar{q}$  pour laquelle tous les air-lift travaillent avec un rendement optimal.

$\alpha$	0,35	0,50	0,60	0,70	0,80
$Q_e^{opt} (\%)$	0,36	0,87	1,60	1,72	1,88
$q^{opt}$	66,66	23,73	11,06	6,97	5,21

$\alpha_2 = 0,35$	$Q_e(l/s)$	0,10	0,20	0,25	0,30	0,35	0,37	0,35
	$Q_g(l/s)$	20,70	21,50	22,10	22,70	23,60	24,53	24,62
	$q$	207	107,50	88,40	75,66	67,43	66,30	70,30
	$\bar{Q}$	0,277	0,555	0,694	0,833	0,972	1,030	0,972
	$\bar{q}$	3,10	1,61	1,33	1,13	1,01	0,99	1,05
$\alpha_3 = 0,50$	$Q_e(l/s)$	0,20	0,40	0,50	0,60	0,70	0,87	0,90
	$Q_g(l/s)$	12,5	14,8	15,8	17,2	18,5	20	22,3
	$q$	62,50	37,00	31,60	28,66	26,43	22,73	24,77
	$\bar{Q}$	0,23	0,46	0,57	0,69	0,80	1,00	1,034
	$\bar{q}$	2,75	1,63	1,39	1,26	1,16	1,00	1,10
$\alpha_4 = 0,60$	$Q_e(l/s)$	0,4	0,6	0,8	1,2	1,6	1,65	1,70
	$Q_g(l/s)$	8,8	11,0	11,5	14,4	17,7	18,2	18,8
	$q$	22,0	18,33	14,37	12,0	11,06	11,03	11,06
	$\bar{Q}$	0,25	0,37	0,50	0,75	1,0	1,03	1,06
	$\bar{q}$	1,99	1,65	1,30	1,085	1,0	0,997	1
$\alpha_5 = 0,70$	$Q_e(l/s)$	0,40	0,81	1,56	1,87	1,98	2,12	2,10
	$Q_g(l/s)$	4,86	7,20	10,62	12,71	14,22	14,85	15,20
	$q$	12,15	8,88	6,80	6,79	7,18	7,00	7,24
	$\bar{Q}$	0,23	0,47	0,907	1,087	1,15	1,23	1,22
	$\bar{q}$	1,74	1,27	0,97	0,97	1,03	1,005	1,04
$\alpha_6 = 0,80$	$Q_e(l/s)$	0,5	1,0	1,4	1,88	2,10	2,30	2,40
	$Q_g(l/s)$	4,0	5,8	7,4	9,8	11,0	12,5	13,7
	$q$	8,0	5,8	5,3	5,21	5,24	5,43	5,71
	$\bar{Q}$	0,266	0,532	0,744	1,0	1,120	1,220	1,270
	$\bar{q}$	1,534	1,112	1,016	1,0	1,005	1,040	1,095

VARIATION  $\bar{Q} = f(\bar{q})$



#### IV-3 :- INTERPRETATION DES RESULTATS

Afin de déterminer un domaine de fonctionnement optimal du système d'air-lift, faisons l'interprétation des différentes courbes tracées en fonction des caractéristiques principales  $q$ ,  $\alpha$ .

VARIATION  $Q_e = f(Q_a)$ .

Cette courbe nous permet de voir la variation du débit liquide en fonction du débit d'air pour des différentes profondeurs d'immersion du mélangeur.

Pour une immersion absolue ( $h$ ) et relative ( $\alpha$ ) donnée on remarque que le débit liquide ( $Q_e$ ) commence à se produire lorsque le débit d'air ( $Q_a$ ) atteint une certaine valeur supérieure à celle correspondante au barbotage.

En effet, l'augmentation du débit d'air entraîne une diminution de la masse volumique du mélange dans le mélangeur où la pression devient inférieure à la pression statique.

Sous l'action de cette différence de pression produite, le liquide entre dans la conduite de refoulement d'où l'apparition du débit liquide au niveau du séparateur.

En augmentant le débit d'air, le débit liquide augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale puis diminue. En effet pour des grands débits d'air, la conduite de refoulement se trouve pleine d'air, bouchant le passage de l'eau et rendant son déplacement plus difficile, on ne recueille qu'un faible débit liquide.

Pour des différentes immersions absolues ( $h$ ) et relatives ( $\alpha$ ) le débit liquide maximum est différent.

En faisant varier l'immersion relative  $\alpha$  de 0,35 à 0,80, on remarque que la valeur du débit maximale du liquide augmente contrairement au débit d'air qui diminue avec l'augmentation de  $\alpha$ . Ceci est illustré par le tableau suivant :-

$\alpha$	0,35	0,50	0,60	0,70	0,80
$Q_a$ (l/s)	24,53	22,32	19,43	14,85	14,71
$Q_e^{\max}$ (l/s)	0,37	0,88	1,75	2,12	2,44

La diminution du débit d'air s'explique par le fait que la hauteur de refoulement  $H$  diminue lorsque  $\alpha$  augmente.

D'après la caractéristique énergétique de l'air-lift donnée par la figure (2-3) (chapitre III) on remarque que le rendement max du système ne correspond pas au débit liquide max mais à un débit liquide inférieur.

Ce débit liquide est optimal et peut être obtenu en traçant la tangente à la courbe  $Q_e = f(Q_a)$ .

VARIATION :  $q = f(\alpha)$ .

D'après la Courbe I on remarque que le débit spécifique  $q$  diminue quand l'immersion relative  $\alpha$  augmente, et inversement, quand  $\alpha$  diminue, le débit spécifique  $q$  augmente.

En effet lorsque  $\alpha$  augmente, la hauteur de refoulement  $H$  devient petite et le débit d'air nécessaire pour élever le liquide à cette hauteur  $H$  devient faible ; et lorsque  $\alpha$  devient faible la hauteur de refoulement  $H$  tend à devenir très grande devant l'immersion absolue  $h$ , ce qui nécessite un important débit d'air et donc un important débit spécifique étant donné que  $q = \frac{Q_a}{Q_l}$ .

Pour les grandes valeurs de  $\alpha$  le débit spécifique  $q$  est faible, donc un débit d'air relativement faible devient le débit liquide, ce qui laisse penser à un fonctionnement économique du système, mais comme la hauteur de refoulement  $H$  dans ce cas est très petite devant l'immersion absolue  $h$ , le système devient non intéressant dans la pratique.

Par ailleurs pour des petites valeurs de  $\alpha$  le débit spécifique  $q$  est important donc des valeurs très importantes du débit d'air d'où une grande dépense d'énergie pour donner finalement un débit liquide insuffisant.

D'après ces deux considérations on est amené à trouver un domaine de fonctionnement optimal et économique du système.

Pour des débits spécifiques relativement faibles, on limite la valeur de l'immersion relative  $\alpha$  dans l'intervalle suivant

$$0,45 \leq \alpha \leq 0,65$$

$$9,5 \leq q \leq 33$$

En faisant une comparaison entre la courbe I et les courbes II et III, on constate qu'elles ont la même allure, mais qu'un décalage existe entre celles-ci.

Ce décalage résulte du fait que la longueur utilisée dans chaque expérience n'est pas la même.

En effet pour une grande longueur du système on donne une grande possibilité à une formation successive de bouchons d'air réduisant les pertes volumétrique au maximum.

L'importance de la longueur est confirmée par le décalage entre les courbes II et III.

On conclut ainsi que la longueur joue un rôle prépondérant dans le système d'air-lift.

Pour un même intervalle de l'immersion relative, la courbe II nous donne un autre intervalle du débit spécifique  $q$  tel que.

$$4 \leq q \leq 9$$

avec

$$0,45 \leq \alpha \leq 0,65.$$

VARIATIONS :  $\alpha_{ae} = f(\alpha)$  ;  $\alpha_{ae} = f(q)$ .

Le Coefficient de resistance  $\alpha_{ae}$  est un Coefficient qui englobe toutes les pertes de charge qui peuvent être occasionnées le long de la conduite de refoulement.

D'après la Courbe  $\alpha_a = f(\alpha)$  on peut remarquer que pour des immersions relatives ( $\alpha$ ) importantes la hauteur de refoulement  $H$  est très faible ce qui explique les faibles valeurs de la resistance.

Par Contre lorsque  $\alpha$  diminue la resistance augmente car la hauteur de refoulement devient importante.

En ce qui concerne la courbe  $\alpha_{ae} = f(q)$ . on remarque que pour des faibles valeurs du débit spécifique. correspond une faible resistance, et pour de grandes valeurs du débit spécifique correspondent de grandes valeurs de la resistance. En effet lorsque la quantité d'air injectée dans le mélangeur est faible, les pertes d'énergie le long de la conduite de refoulement sont faibles par contre lorsque la quantité d'air augmente et donc  $q$  augmente le bouchon se trouve perturbé et on aura l'opposition de la configuration ~~bouchon~~ annulaire où les pertes par frottements et par glissement sont très importantes.

## VARIATIONS DE $K_Q = f(\alpha)$ ; $K_Q = f(q)$ .

De la courbe  $K_Q = f(\alpha)$  on constate que pour un coefficient d'immersion relative ( $\alpha$ ) élevé le coefficient de débit  $K_Q$  l'est aussi.

Inversement pour des valeurs faibles de l'immersion relative ( $\alpha$ ) le coefficient de débit  $K_Q$  est petit.

Cela s'explique du fait que si ( $\alpha = \frac{h}{h+H}$ ) est grand la hauteur de refoulement ( $H$ ) diminue et la hauteur d'immersion ( $h$ ) augmente; donc dans ce cas il faut un faible débit d'air comprimé pour obtenir un débit liquide suffisamment grand. Etant proportionnel au débit liquide  $K_Q$  augmente  $Q_L = K_Q \sqrt{g \Delta h}$  avec  $\sqrt{g \Delta h} = \text{cte}$ .

La courbe  $K_Q = f(q)$  montre que pour un débit spécifique  $q$  faible le coefficient de débit  $K_Q$  est grand. Inversement pour des valeurs de  $q$  élevées  $K_Q$  diminue.

Si le débit spécifique  $q = \frac{Q_L}{Q_A}$  est petit le débit liquide ( $Q_L$ ) augmente plus rapidement que le débit d'air ( $Q_A$ ), on se trouve alors dans le cas d'un coefficient d'immersion relative ( $\alpha$ ) élevé voir la courbe ( $Q_L = f(Q_A)$ ) donc dans ce cas le débit d'air est faible, le coefficient de débit  $K_Q$  augmente avec l'augmentation du débit liquide ( $Q_L$ ).

Comparaison entre les courbes expérimentales (I) et (II) voir variation  $K_{Q \text{ exp}} = f(\alpha), f(q)$ . On constate qu'il y a un décalage qui apparaît nettement entre les 2 courbes.

Cela s'explique par l'utilisation d'une conduite de refoulement de 17,5 m dans le cas (II), et une conduite de refoulement de 7,5 m dans le cas (I).

Donc l'énergie cinétique est transformée en majeure partie dans la conduite de refoulement (II) et les pertes volumétriques sont complètement dissipées.

Dans ce dernier cas le mélange sort sans jet dans le séparateur et la quantité d'eau est supérieure au volume d'air. Avec cette augmentation de débit liquide ( $Q_L$ ) le coefficient de débit  $K_{Q \text{ exp}}(II)$  est plus grand que le coefficient de débit  $K_{Q \text{ exp}}(I)$ .

La longueur de la conduite joue donc un rôle prépondérant pour obtenir un débit liquide important. L'énergie fournie par le compresseur se dissipe entièrement dans la conduite de 17,5 m et on recueille le maximum de débit liquide.

Analyse des courbes  $KQ = f(\alpha)$  et  $KQ = f(q)$ .

Etant donné que l'écoulement est non permanent c'est-à-dire que le débit liquide  $Q_L$  est fonction du temps, d'où la nécessité de chercher un coefficient de vitesse propre à chaque configuration.

Le coefficient de débit  $KQ$  peut s'exprimer comme étant le produit de 2 coefficients  $C_v$  et  $C_s$ .

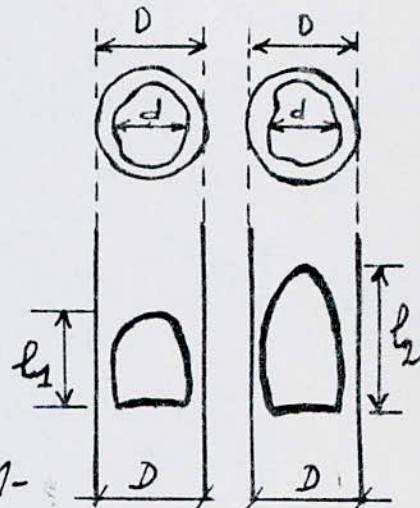
$$KQ = C_v \cdot C_s$$

$C_s$ : coefficient de section.

$C_v$ : coefficient de vitesse

Pour un écoulement bouchon la formule du coefficient de section s'écrit comme suit. voir schéma 1-

$$C_s = \frac{\text{surface contractée}}{\text{surface totale}} = \frac{d}{D}$$



Remarque le bouchon d'air garde la même section lorsqu'on augmente le débit d'air.

Avec un débit d'air croissant le bouchon d'air s'allonge

Schéma 1-

Le coefficient de section  $C_s$  peut s'exprimer comme étant le rapport du volume liquide à l'état statique sur le volume du mélange après l'injection d'air comprimé. voir schéma 2 -

$$C_s = \frac{w_L}{w_m} = \frac{S \cdot (h)}{S \cdot (h+H)} = \alpha$$

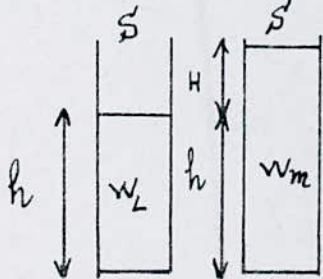


Schéma 2-

on peut écrire que  $KQ = C_v \cdot \alpha$ , pour chaque valeur du coefficient d'immersion relative on calcule le coefficient de vitesse correspondant.

on établit le tableau de valeurs suivant:  $Cv = \frac{kQ_{exp}}{\alpha} = \varphi$

$\alpha$	0,35	0,50	0,60	0,70	0,80
$kQ_{exp}$	0,063	0,125	0,279	0,300	0,328
$Cv = \varphi$	0,180	0,304	0,465	0,428	0,410

On constate que les valeurs du coefficient  $Cv = \varphi$  se stabilisent pour des valeurs de  $\alpha$  comprises entre  $0,6 < \alpha < 0,8$ , on peut donc évaluer un coefficient de vitesse moyen  $Cv_m$ .

$$Cv_m = \varphi_m = \frac{\sum Cv}{n} \approx 0,357$$

Cette valeur moyenne se rapproche du coefficient de vitesse expérimentale donné par "Dimétrescu" en 1943 qui a déterminé la vitesse d'un bouchon d'air par la formule suivante.

$$v_a = 0,35 \sqrt{g(D - \frac{D_0^2}{D})}$$

pour  $D_0 = 0,00535 \text{ m}$ ,  $D > 2 \text{ cm}$  avec  $\frac{D_0^2}{D} \approx 0$

$$v_a = 0,35 \sqrt{g \cdot D}$$

on peut donc comparer cette vitesse de l'air avec la nôtre.

$$Q_a = kQ \sqrt{g D^5}$$

$$Q_a = Cv \cdot \alpha \sqrt{g D^5}$$

$$Q_a = 0,357 \alpha \sqrt{g D^5}$$

En posant  $v_a = 0,357 \sqrt{g D}$  on a  $Q_a = v_a \cdot \alpha \cdot D^2$

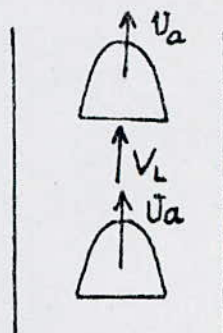
Le liquide est en réalité animé d'une vitesse liquide  $V_L$  qui est due à l'ascension de la succession de bouchons d'air. voir schéma 3. il suffit de connaître la vitesse du liquide  $V_L$  pour connaître celle de la vitesse de l'air limite  $V_a$ .

$$V_L = V_{ml} - 0,357\sqrt{gD}$$

$$V_{ml} = V_L + V_{\text{limite}}$$

$V_{ml}$  : vitesse du mélange limite.

schéma -3-



On remarque d'après le tableau de valeurs que la vitesse du liquide tend vers la même valeur que celle de l'air pour des  $0,5 < \alpha < 0,6$  et que le coefficient de vitesse  $\varphi$  reste toujours inférieur à une valeur limite expérimentale donnée par "Dimétrescu" qui est de  $\varphi = 0,496$ . Pour cela on limitera l'intervalle de  $\alpha$  entre  $0,45 \div 0,65$ , ce qui a été confirmé par les courbes expérimentales précédentes.

## VARIATION

$$\bar{Q} = f(\bar{q})$$

D'après les courbes de variation de  $\bar{Q} = f(\bar{q})$  on remarque que toutes les courbes se rapprochent les unes par rapport aux autres dans un domaine du débit abstrait  $\bar{q}$  tel que  $1 < \bar{q} < 1,2$ .

D'après la théorie en traçant une courbe moyenne dans le domaine  $1 < \bar{q} < 1,2$  et par ajustement de cette courbe, on peut avoir la dépendance entre  $\bar{Q}$  et  $\bar{q}$ .

toujours d'après la théorie cette dépendance est donnée par :

$$\bar{Q} = \left( \frac{\bar{q} - 1}{\bar{q}} \right)^{0,645} + 1 \quad (*)$$

Cette dépendance permet de tracer n'importe quelle caractéristique du système d'air-lift.

En effet pour un débit liquide optimal donné et pour une hauteur de refoulement  $H$  fixé, on détermine le débit spécifique optimal à l'aide de la courbe  $q = f(\alpha)$  pour une immersion donnée.

Pour des débits abstraits  $\bar{q}$  donnés tel que  $1 < \bar{q} < 1,2$  on détermine  $\bar{Q}$  d'après la dépendance (\*) et sachant que

$\bar{Q}_i = \frac{Q_{li}}{Q_{opt}}$  on détermine une frange de variations du débit liquide optimal. De même sachant que  $\bar{q}_i = \frac{q_i}{q_{opt}}$  on détermine les différentes valeurs de  $q_i$

or  $q_i = \frac{Q_{li}}{Q_{ai}}$  on détermine les débits d'air  $Q_{ai}$  d'après cette dépendance.

Connaissant  $Q_{li}$  et  $Q_{ai}$  on peut ainsi tracer la caractéristique  $Q_{li} = f(Q_{ai})$

## *Chapitre .V.*

### *Conclusions*

## Conclusion:

La représentation graphique des variations du débit liquide en fonction du débit d'air pour des valeurs différentes de l'immersion relative  $\alpha$  fait apparaître l'existence d'un point optimal correspondant à un rendement maximum du système de l'air-list.

De ce point de vue on a pu tirer un paramètre adimensionnel  $q$  appelé débit spécifique qui est le rapport du débit d'air et du débit liquide correspondant à la configuration bouchon pour laquelle le transfert d'énergie est quasiment total.

Les deux paramètres adimensionnels  $\alpha$  et  $q$  ont d'ailleurs été mis en évidence par l'analyse dimensionnelle.

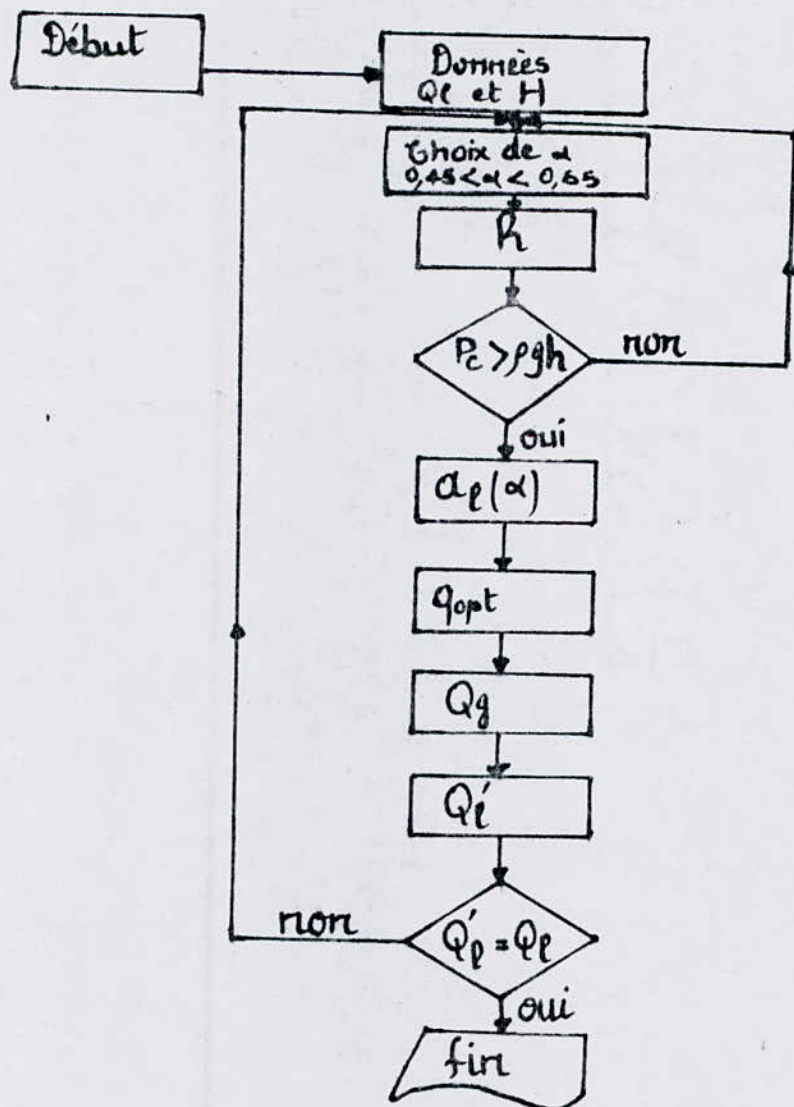
Les courbes expérimentales possèdent toutes la même allure que celles obtenues par d'autres expériences et confirment ainsi la théorie. Une comparaison qualitative de certains facteurs tels que le  $Kq(\alpha)$ ,  $q(\alpha)$ ,  $Kq(q)$ , avec les résultats des autres expériences (Heir, Metreveli) a fait ressortir l'influence non négligeable de certains paramètres géométriques tels que le diamètre et la longueur. L'écart entre ces caractéristiques est dû non seulement aux hypothèses émises principalement à la méthode qui consiste à admettre un écoulement permanent en moyenne malgré des fluctuations importantes sur les débits ce qui veut dire que les deux phases évoluent dans les mêmes manières mais aussi à une assimilation au quasi-isothermique du comportement de l'air à l'intérieur du conduit. L'examen du coefficient de vitesse  $\varphi$  montre que le liquide manifeste une mobilité d'autant plus accrue que  $\alpha$  est grand.

Moyennant certaines pertes d'énergies qui sont localisées

en majorité au niveau du mélangeur, le système est auto-réglable du fait qu'il travaille en régime turbulent lisse et par une simple manœuvre sur le débit de gaz.

Enfin la constitution d'autres paramètres adimensionnels  $\bar{Q} = \frac{Q_e}{Q_{opt}}$  et  $\bar{q} = \frac{q}{q_{opt}}$  nous a permis de tracer la caractéristique  $\bar{Q} = f(\bar{q})$  et de faire apparaître un intervalle commun pour  $1 < q < 1,2$  pour un fonctionnement optimal de n'importe quel système à air lift court.

Pour une exploitation pratique on peut suivre les étapes de calculs données par l'organigramme suivant :



# Bibliographie

1. Michel Hug: Mécanique des fluides appliquées  
Eyrolles. 1975.
2. Gaz-Lift : Technique de l'industrie du gaz.
3. Metreveli. V : Caractère du mouvement du mélange  
à l'air-lift.  
Tbilissi. 1967.
4. Oziaux : Mécanique des fluides appliquées.  
.1982.
5. Groskolariski : Appareil de mesure.  
.1962.
6. Thèse juin 87 : Etude technique de l'air-lift.
7. Thèse janvier 87 : Etude d'un écoulement diphasique  
(air-eau).

