

وزارة التعليم و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT :

GENIE HYDRAULIQUE

المكتبة - المكتبة
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat

SUJET

ETUDE DU TRAVAIL DE
L'AIR-LIFT COURT

2 PLANCHES

Proposé Par :

M^r METRIVELLI V.

Etudié par :

M^r BOUCHALA A.

Dirigé par :

M^r METRIVELLI V.

M^r MESAHLI A.

PROMOTION : Juin 1988



REMERCIEMENTS

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Je tiens à remercier Monsieur METREVELI et Monsieur MESSAHLI, pour tous conseils et l'assistance qu'ils m'ont apporté pendant toute l'élaboration de cette étude

Ma reconnaissance et mon respect à tous les professeurs et assistants qui ont contribué à ma formation.

Je tiens à remercier les membres de jury qui ont bien voulu m'honorer par leur présence .

A. BOUCHALA.

SOMMAIRE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Chapitre 1 : INTRODUCTION , HISTORIQUE et BUT	p 1
Chapitre 2 : BASES THEORIQUES DE L'AIR LIFT	p 5
Chapitre 3 : EQUATIONS GENERALES THEORIQUES DE L'AIR LIFT	p 25
Chapitre 4 : PRESENTATION DE L'EXPERIENCE	p 30
Chapitre 5 : ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAL _TAUX	. p 53
Chapitre 6 : INTERPRETATION HYDRAULIQUE DES RES- ULTATS	p 72
Chapitre 7 : CONCLUSION	p 83

NOMENCLATURE

- P_m : Pression au niveau du mélangeur (Pa)
- h Immersion géométrique (m) - absolue -
- ρ Masse volumique du liquide (kg/m^3).
- Δh_e Hauteur d'élévation (m).
- a_c Résistance de la conduite de refoulement (s^2/m^5).
- Q_p Débit moyen du liquide qui sort de la conduite d'air (m^3/mn).
- d_a Diamètre de la conduite d'air (mm).
- D Diamètre de la conduite de refoulement (mm).
- P_c Pression donnée par la compression (kgf/m^2).
- P_{mmm} Pression de mise en marche au niveau du mélangeur (Pa).
- ΔP_c Perte de pression dans la conduite d'air pendant la mise en marche (Pa).
- $P_{\text{moy.m.b}}$ Pression moyenne du mélange correspondant au barbotage (Pa).
- $\rho_{\text{m.b}}$ Masse volumique du mélange gaz-liquide correspondant (kg/m^3).
- H Hauteur d'élévation (m).
- α Immersion relative de l'air-lift.
- ρ_m Masse volumique du mélange.

ρ_a Masse volumique de l'air comprimé (kg/m^3).

Q_a Débit du compresseur suivant l'unité de volume de l'air à l'état libre (Pa).

$Q_{a \text{ moy}}$ Débit moyen d'air (m^3/mn).

Q_m Débit du mélange (air comprimé, liquide)

q_{moy} Débit spécifique moyen.

q Débit spécifique d'air (m^3/m^3).

η Rendement de l'air lift.

P_a Puissance absorbée par l'air lift (watt).

P_f Puissance fournie par le compresseur (watt).

V_s Vitesse de sortie du jet au niveau du séparateur (m/s).

h_a Hauteur de la colonne du mélange correspondant à la pression atmosphérique (m)

λ Coefficient de perte de charge.

ψ Coefficient de résistance hydraulique.

K_Q Coefficient du débit liquide pour des air-lift semblables

q_c Débit spécifique d'air lift court.

$P_{\text{air comp}}$ Puissance fournie par le compresseur (watt).

ρ_l Masse volumique du liquide (kg/m^3).

H_c Hauteur du coude (m).

l_c Longueur du coude (m).

- a_c Résistance de la conduite d'air lift (s^2/m^4).
- $P_{entrée}$ Puissance hydraulique du liquide à l'entrée du mélangeur de la conduite d'alimentation (watt).
- P_{sortie} Puissance hydraulique du liquide à la sortie du mélangeur
- ρ_{mm} Masse volumique moyenne le long de la conduite d'air lift (kg/m^3).
- a_a Résistance spécifique d'air lift.
- v_m Vitesse moyenne du mélange (air comprimée, liquide)
- w Section de la conduite d'air lift.
- \bar{w}_l Fraction volumétrique du liquide
- \bar{w}_g Fraction volumétrique du gaz.
- K_m Coefficient de glissement.
- v_{ml} Vitesse moyenne du liquide (m/s).
- v_{mg} Vitesse moyenne du gaz. (m/s).
- v_l Vitesse du liquide.
- v_g Vitesse du gaz.
- q_z Débit spécifique d'air à une hauteur z de la section considérée
- P_z Pression dans la section considérée de la conduite de refoulement (Pa).
- P_1 Pression dans le mélangeur (Pa).

ETUDE DU TRAVAIL DE L'AIR LIFT COURT

- p_0 Pression dans le séparateur. (Pa).
- L Longueur de la conduite de refoulement. (m)
- Z Hauteur de la section considérée. (m).
- Re_m Nombre de Reynolds du mélange (air comprimé, liquide).
- ν_m Coefficient de viscosité cinématique du mélange.
- ν_l Coefficient de viscosité cinématique du liquide.
- q_0 Débit spécifique au niveau du séparateur.
- Fr_m Nombre de Froude du mélange.
- α Coefficient qui tient compte de l'irrégularité de la répartition des vitesses.
- E Taux d'énergie d'entrée nécessaire au refoulement.
- E_γ Taux d'énergie spécifique.

Une nouvelle méthode de calcul basée en partie sur des valeurs empiriques et en partie sur la théorie, rends possible le calcul du transport hydraulique vertical des solides dans les pipes selon le principe d'AIR LIFT et le schéma des systèmes appropriés de transport.

La procédure est basé sur la superposition d'un débit air-eau sur un débit air-eau-solides.

Les informations obtenues à partir de cette nouvelle méthode correspondent à des résultats expérimentaux contenus dans une gamme très large (Pour les diamètres 20-300 mm, longueurs 0-500 m).

Afin de déterminer de l'application possible de cette méthode sur des profondeurs opérationnelles très grandes, des expériences avec des quantités d'air plus grandes sont faites actuellement. le résultat déterminera si cette méthode est adapté pour le secteur des mines en mer profondes.

Cette méthode de calcul est intéressante non seulement pour transporter des solides, mais également pour le Génie Chimique et les secteurs connexes, en général pour le calcul des gisements fluidifiés tri-phasés.

INTRODUCTION, HISTORIQUE et BUT

La méthode de l'air lift a été connue depuis la fin du 18^{ème} siècle. Elle a été utilisée depuis, pour l'élévation de l'eau, l'eau-usée et les fluides agressifs, de plus en plus pour le transport des solides et plus récemment également pour les fluides radio-actifs dans les centrales de recyclage du carburant nucléaire.

Comparée aux autres méthodes hydrauliques, le système de pompage à air lift est un système simple et robuste avec de rares pannes et une maintenance simple.

En raison de tels avantages technologiques, cette méthode semble bien adaptée à l'exploitation des mines en mer profonde, à conditions que l'influence de l'expansion extrême de l'air sur le degré d'efficacité et sur la puissance d'élévation du mélange air-eau n'est pas trop défavorable. D'autres expériences auront à clarifier les effets de telles limitations.

Les principaux champs d'application ont été jusqu'à là :

- l'arbre et les puits de forage, les forages étant élevés ensemble avec l'eau souterraine ;
- l'ingénierie hydraulique, forage de tunnel, et immersion

INTRODUCTION HISTORIQUE et BUT

- de piles de pont dans la rivière ou fonds marins ;
- élévation des fluides contenant des solides, eaux-usées et suspensions épaisses (lait de ciment) ;
- combattre l'envasement des ports, les rivières et les réservoirs ;
- l'élévation verticale du charbon dans les puits .

La méthode Air lift a gagné l'importance également en Union Soviétique où une telle usine opère dans l'exploitation minière de la houille. Dans une autre mine de 718 m de profondeur, l'air lifting est testé en cinq étages.

Depuis que l'exploitation minière des nodules de manganèse en mer profonde a pris de la considération, l'air lifting a gagné en actualité. À titre d'essai, des nodules de manganèse de première grandeur ont été air liftés à partir d'une profondeur de 1000 m.

À cause de sa maintenance aisée, le système de pompage à air lift est également utilisé parfois pour élever de l'eau, bien qu'il soit moins efficace que les pompes d'eau normales. Ceci est fait, lorsque l'eau est occasionnellement nécessaire ou dans des cas d'urgence.

De nombreuses publications offrent de différents

INTRODUCTION HISTORIQUE et IBUT

méthodes de calcul, qui ne sont, cependant pas satisfaites quant à la précision et la validité générale.

Le transport des solides par air lift est plus difficile à calculer par ce qu'il implique un débit triphasé.

Le but de notre travail dans cette présente thèse est d'étudier l'air lift court, en établissant toutes les formules de son calcul et de son dimensionnement valable dans tous les domaines de son application et, enfin après une interprétation hydraulique des résultats de calcul et expérimentaux, on établit les règles générales de conception et d'optimisation de l'air-lift court travaillant sous des rendements acceptables.

- Principe de fonctionnement et les dépendances générales :

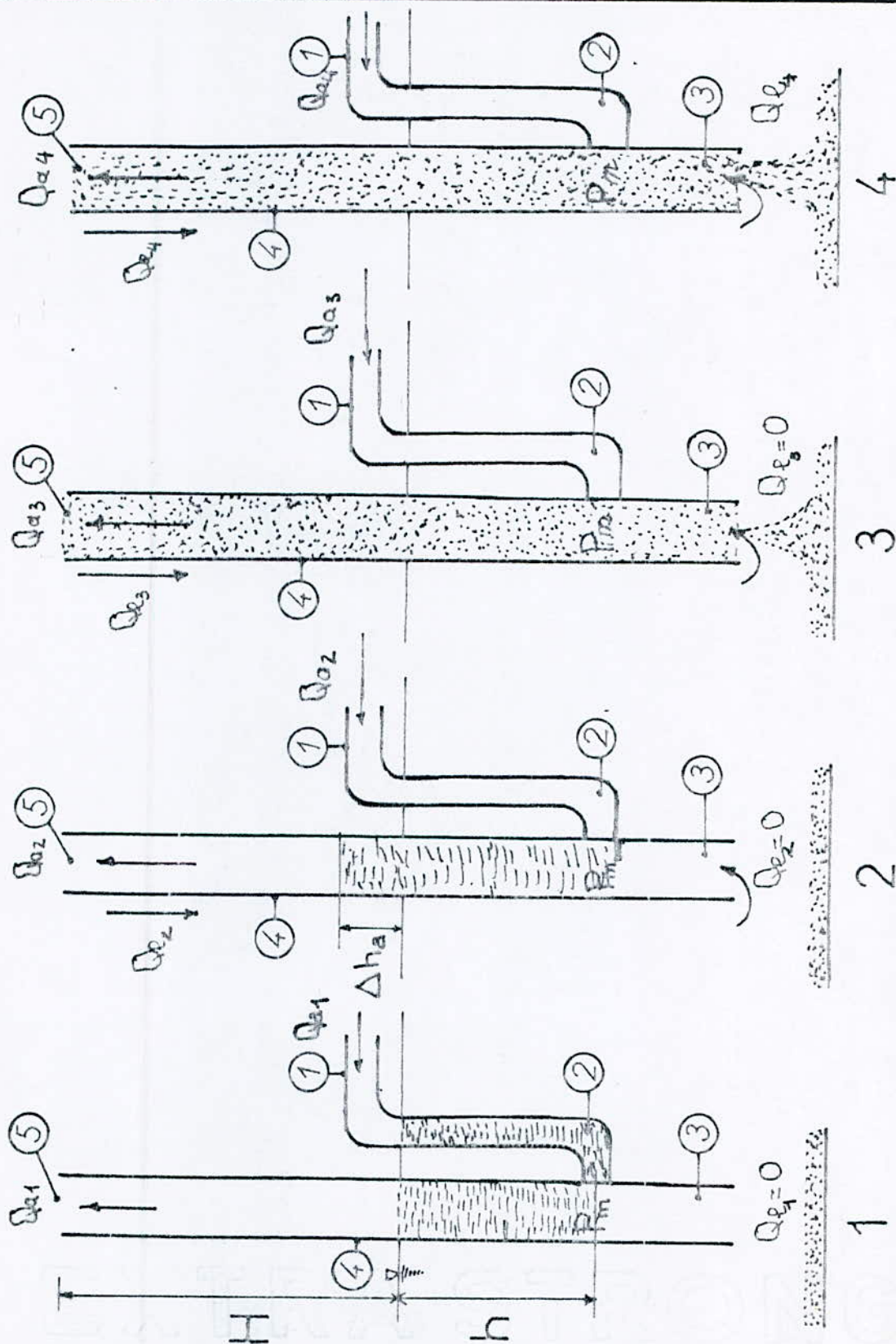
Le principe de fonctionnement du système de pompage par Air-lift est celui d'une machine hydraulique utilisant une énergie extérieure fournie par un compresseur (puissance que possède l'air comprimé) permettant par frottement de mélanger et de déplacer le mélange (air comprimé, liquide et solide).

À partir d'une conduite d'air comprimé ①, on injecte du gaz à la base du mélangeur ②, si la pression produite dans celui-ci est inférieure à la pression extérieure, l'eau se trouvant dans la conduite d'aspiration ③ entre dans le mélangeur où s'effectue le mélange et sous l'action du flux d'air comprimé puis de sa détente, l'écoulement se produit alors dans la conduite de refoulement ④ et au niveau du séparateur ⑤ s'effectue la séparation des deux fluides.

Sur la figure ① sont montrées les schémas des différentes étapes de fonctionnement de l'air-lift. Pour chaque cas de figure, on donne les équations générales de mise en marche de l'air-lift :

- schéma ① :

fig.a. Principe de la méthode de l'AIR_LIFT



BASES THEORIQUES DE L'AIR LIFT

Au départ, le mélangeur se trouve plongé à l'intérieur du liquide sous la profondeur d'immersion géométrique h (compresseur arrêté). La pression en niveau du mélangeur P_m est déterminée par la formule suivante :

$$P_m = \rho \cdot g \cdot h \dots \dots \dots 1$$

— schéma (2) :

Lorsque l'air est injecté dans la conduite de refoulement en dessous du niveau d'eau, un mélange eau-air de densité moindre à celle de l'eau est produit au dessus du point d'injection, il se produit une pression suffisante permettant de dégager le mélange eau-air où une partie de celui-ci s'élève dans la conduite de refoulement d'une hauteur Δh_a et l'autre partie gagne le réservoir. La pression de mise en marche au niveau du mélange deviendra :

$$P_m = \rho g (h + \Delta h_a) \dots \dots \dots 2$$

$$\text{avec : } \Delta h_a = \alpha_c \cdot Q_p^2$$

L'élévation Δh_a dans ce cas est déterminée d'après le volume du liquide qui se trouve dans la conduite d'air :

$$\Delta h_a = h \cdot \frac{d_a^2}{D^2} \dots \dots \dots 3$$

Par conséquent, la pression nécessaire permettant

BASES THEORIQUES DE L'AIR LIFT

l'entrée d'air dans le mélangeur doit être au maximum égale à la pression de mise en marche et la pression que doit fournir le compresseur doit être égale à :

$$P_c = P_{imm} + \Delta P_c \dots \dots \dots 4$$

Pour le démarrage du système, un seuil minimal d'air comprimé est requis qu'on appelle pression de mise en marche, cette pression peut être déterminée à partir de l'expression littérale obtenue par combinaisons des formules précédentes assurant la sûreté du fonctionnement du système :

$$P_c = \rho \cdot g \cdot h \cdot \left(1 + \frac{d_a^2}{D^2}\right) \dots \dots \dots 5$$

celle-ci ne dépend que des paramètres géométriques (h, D, d_a) mise à part le poids volumique (ρg) qui diffère d'un liquide à un autre.

Remarques :

- Pour un diamètre de la conduite d'air d_a égale au diamètre de la conduite de refoulement D (cas exceptionnel) cette pression P_c est deux fois la pression en niveau du mélangeur.
- Dans les autres cas, celle-ci est comprise entre $\rho g h$ et $2 \rho g h$. Pour une conduite d'air, une conduite de

BASES THEORIQUES DE L'AIR LIFT

refoulement et une hauteur d'immersion données, cette pression P_c est constante en niveau du mélangeur.

— Pour une installation donnée, le rapport $\frac{d_c}{D}$ est constant, par conséquent P_c ne dépendra que la hauteur d'immersion h .

— les valeurs des pressions données de la formule ne peuvent donner qu'un ordre de grandeurs indicatifs. En effet, pour une installation fixée, les pertes de pression dues au mouvement du mélange sont de deux sortes :

— pertes en niveau de la conduite d'air comprimé.

— une partie qui peut être considéré comme une pertes qui sert à mélanger le liquide.

De ce fait, elles sont négligeables car leur effet est insignifiant sur le fonctionnement du système d'où on peut écrire que :

$$P_c = P_{mm} = \rho \cdot g \cdot (h + \Delta h_a) \dots \dots 6$$

Phénomène de barbotage : Injection de l'air (ascension) sans qu'il y est un débit liquide.

Pour obtenir la pression moyenne du mélange correspondant au barbotage, il faut que la pression d'air comprimé soit égale au minimum à la pression de mise en marche, l'air entrant

BASES THEORIQUES DE L'AIR LIFT

dans le mélangeur de masse volumique mille fois inférieure à celle du l'eau, et sous l'action des forces, il monte à travers le liquide dans la conduite de refoulement, formant ainsi un mélange gaz-liquide de masse volumique moyenne inférieure à celle du liquide.

la pression moyenne du mélange correspondant au barbotage est exprimée par la relation suivante :

$$P_{\text{moy. m. b}} = \rho_{\text{m. b}} \cdot g \cdot (H+h) \dots \dots \dots 7$$

$$\text{avec : } \rho_{\text{m. b}} = \rho \cdot \frac{h}{H+h}$$

Remarque: le rapport d'immersion absolue h sur la hauteur $(H+h)$ est le paramètre caractéristique sans dimensions appelé immersion relative de l'air-lift noté α

$$\alpha = \frac{h}{H+h} \dots \dots \dots 8$$

On remarque bien que la masse volumique du mélange gaz-liquide correspondant au barbotage est inférieure à la masse volumique de l'eau.

— schéma ③ :

Le liquide monte jusqu'à la partie supérieure de la conduite sans se déverser ($Q_g \approx 0$).

L'augmentation du débit d'air entraîne la diminution de la masse volumique du mélange, donc la pression

BASES THEORIQUES DE L'AIR LIFT

au mélangeur diminue devenant inférieure que la pression statique (en 1).

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 fonction de la pression du mélange comme suit :

$$Q_e = \sqrt{\frac{h - P_m / \rho \cdot g}{a_c}} \dots \dots \dots 9$$

$$\text{avec : } P_m = \rho_m \cdot g \cdot (H + h)$$

En développant :

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

finalement :

$$Q_e = \frac{h}{a_c} \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho \cdot \alpha} \right) \dots \dots \dots 10$$

De cette dernière expression, on remarque qu'avec la diminution de la masse volumique du mélange correspondant 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.

En n'importe quelle section, la masse volumique du

BASES THEORIQUES DE L'AIR LIFT

mélange est donné par :

$$P_{\text{mél}} = \frac{P \cdot Q_p + P_a \cdot Q_a}{Q_p + Q_{\text{moy}}} \dots\dots\dots 11$$

où :

$$Q_a = Q_{\text{moy}} \cdot \frac{P_{\text{moy}} + P_{\text{atm}}}{P_{\text{atm}}} \dots\dots\dots 12$$

De l'expression (12), on tire le débit moyen d'air Q_{moy} :

$$Q_{\text{moy}} = Q_a \cdot \frac{P_{\text{atm}}}{P_{\text{atm}} + P_m/2} \dots\dots\dots 13$$

la substitution de l'équation (13) dans l'équation (11) donne une expression qu'on divise par Q_p pour avoir l'expression suivante :

$$P_{\text{mél}} = \frac{P \left(1 + \frac{P_a}{P} \cdot \frac{Q_a}{Q_p} \right)}{1 + \frac{Q_a}{Q_p} \cdot \frac{P_{\text{atm}}}{P_{\text{atm}} + P_m/2}} \dots\dots\dots 14$$

Dans cette dernière expression, on remarque qu'il existe un terme commun pour le numérateur et le dénominateur qu'on appelle : débit spécifique d'air qui est le second paramètre sans dimensions très important de l'air-lift noté q :

$$q = \frac{Q_a}{Q_p} \dots\dots\dots 15$$

BASES THEORIQUES DE L'AIR LIFT.

En substituant l'équation (15) dans l'équation (14) donne :

$$S_{\text{mél}} = \frac{\rho \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho} \cdot q\right)}{1 + q \cdot \frac{P_{\text{atm}}}{P_{\text{atm}} + P_m/2}} \dots\dots\dots 16$$

En analysant la formule 16, on voit que :

— le terme $\left(\frac{\rho_a}{\rho} \cdot q\right)$ peut être négligé car : $\rho = 1000 \cdot \rho_a$

et $q < 100$.

— On détermine le débit spécifique moyen q_{moy} suivant les pressions manométriques moyennes le long de la conduite de refoulement de l'air-lift par :

$$q_{\text{moy}} = q \cdot \frac{P_{\text{atm}}}{P_{\text{atm}} + P_m/2} \dots\dots\dots 17$$

finalement la masse volumique du mélange sera déterminée par :

$$\rho_m = \frac{\rho}{1 + q_{\text{moy}}} \dots\dots\dots 18$$

— Caractéristiques énergétiques de l'air-lift :

Par hypothèse, on a supposé que, dans la conduite de refoulement, l'écoulement est comme stationnaire ; on peut donc écrire :

$$\rho \cdot h = \rho_m \cdot (H + h) + z_c \cdot \rho_m \cdot Q_m^2 \dots\dots\dots 19$$

BASES THEORIQUES DE L'AIR LIFT

d'où :

$$Q_m = Q_p \cdot \left(1 + q \cdot \frac{P_{atm}}{P_{atm} + P_m/2} \right) \dots \dots \dots 20$$

De ces deux formules, on tire le débit de l'air-lift :

$$Q_p = \frac{1}{1 + q \cdot \frac{P_{atm}}{P_{atm} + P_m/2}} \cdot \sqrt{\frac{h}{\alpha c} \left(1 + q \cdot \frac{P_{atm}}{P_{atm} + P_m/2} \right) \dots \dots \dots 21$$

Soit à déterminer le débit spécifique d'air donnant le débit liquide maximal :

$$\frac{dQ_p}{dq} = 0, \text{ on obtient :}$$

$$q_m = \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \cdot \frac{P_{atm} + P_m/2}{P_{atm}}$$

où bien :

$$q_m = \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \left(1 + \frac{\rho g h}{2 P_{atm}} \right) \dots \dots \dots 22$$

L'analyse de ces deux expressions nous donne :

— Pour un immersion relative α constante, le débit d'air-lift dépend en grande partie de la quantité d'air comprimé et si cette dernière est égale à la valeur de débit d'air correspondant au barbotage, le débit d'air-lift est nul.

— L'augmentation du débit d'air comprimé implique l'augmentation

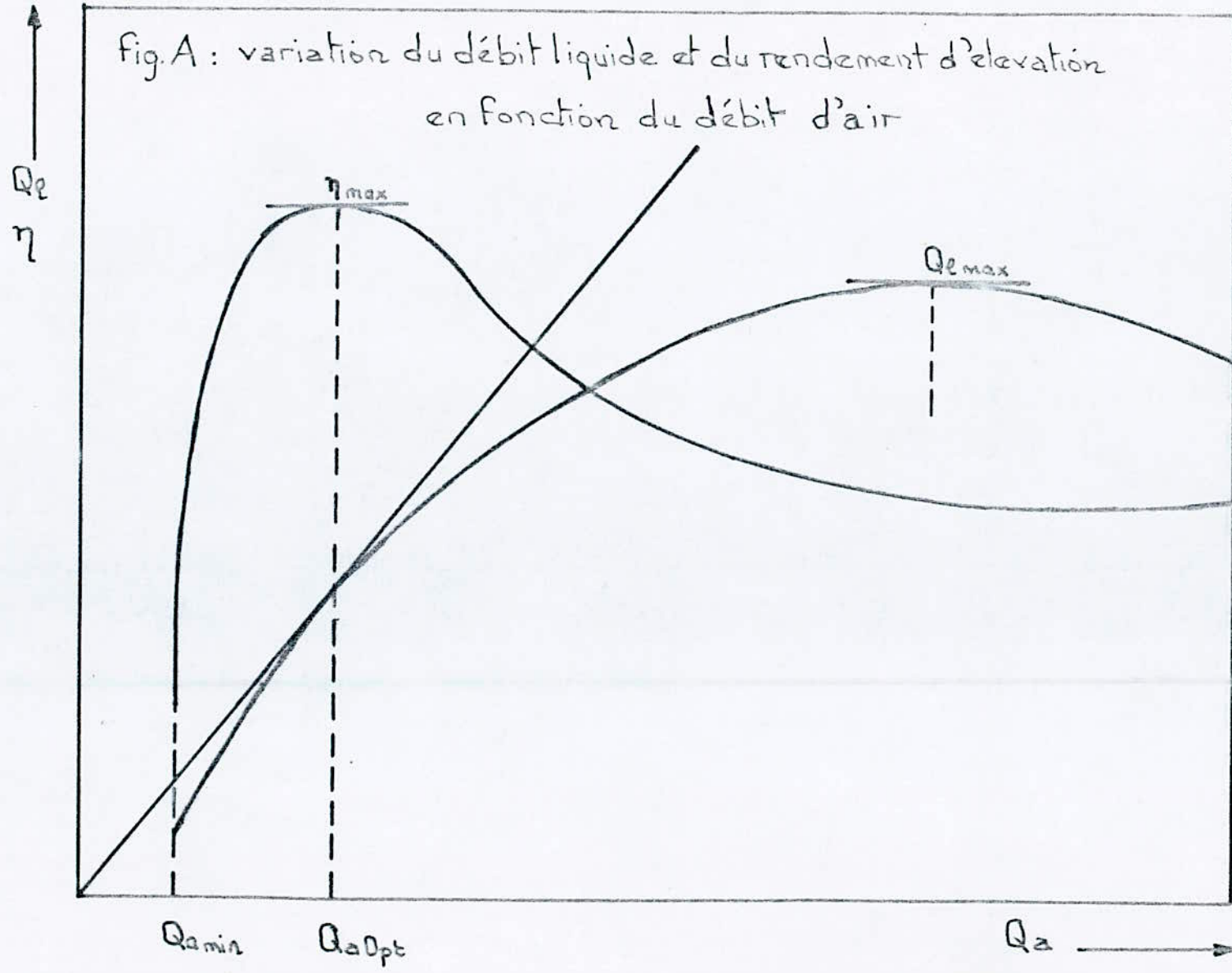
BASES THEORIQUES DE L'AIR LIFT

du débit liquide refoulé, atteint une valeur maximale puis diminue.

— L'expression (21) nous permet de tracer les caractéristiques de l'air-lift (figure A) graphiquement pour une immersion absolue h et relative α données.

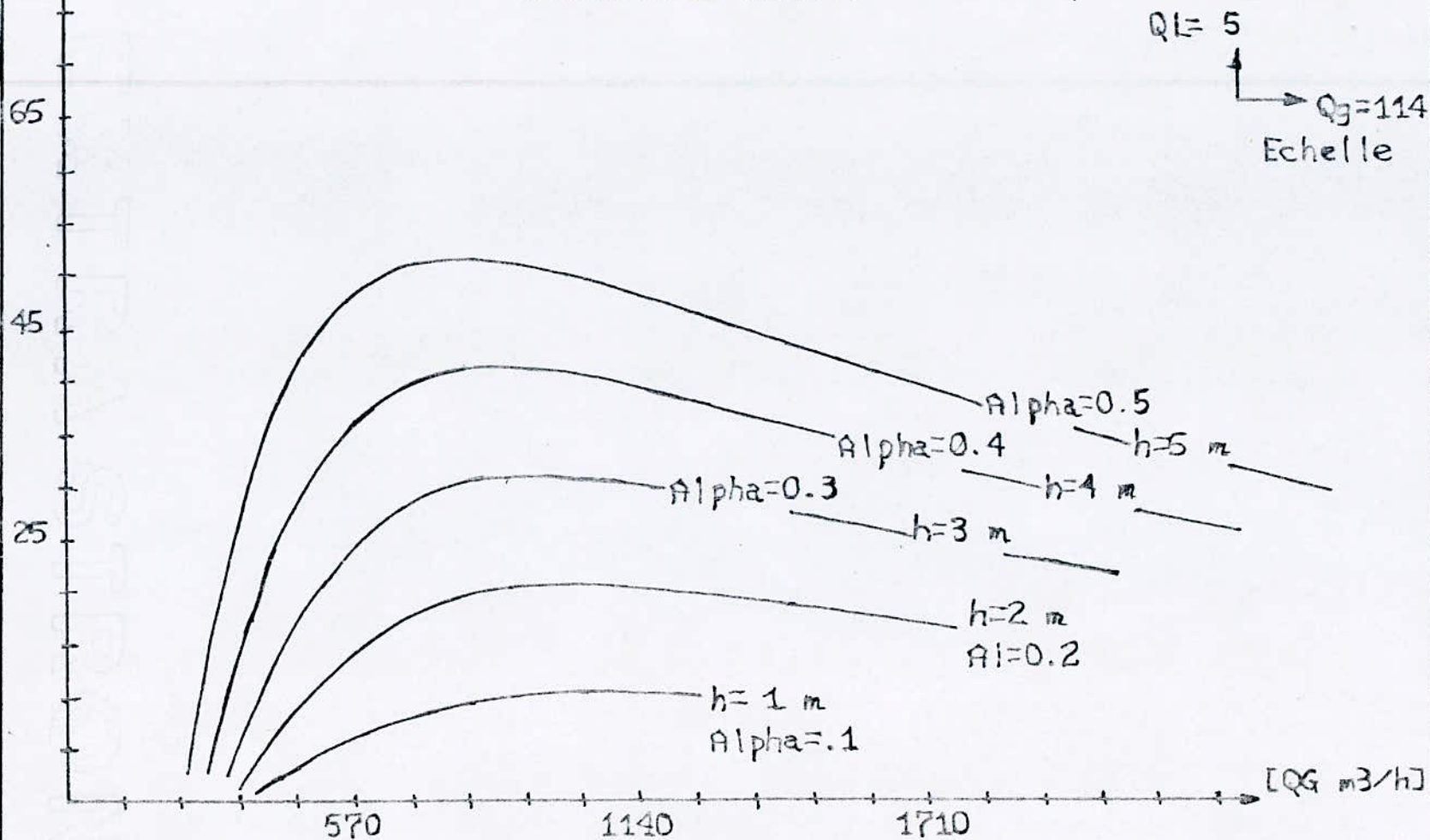
— À partir du point maximum de la courbe $Q_p = f(Q_g)$, le débit de l'air-lift diminue avec l'augmentation du débit d'air comprimé et ceci est dû à l'augmentation du débit spécifique q à partir de $Q_{g\max}$ qui correspond à une augmentation de la pression dans le mélangeur d'où formation d'une résistance supplémentaire dans la conduite de refoulement et avec l'expression (21) on explique la diminution du débit de l'air-lift.

— La variation de la hauteur d'immersion absolue h (donc α aussi) pour un même débit d'air entraîne la variation de débit liquide refoulé pour $(H+h)$ constant. Par conséquent, pour un même air-lift avec changement du niveau d'eau (changement de l'immersion du mélangeur), les caractéristiques énergétiques de l'air-lift sont différentes (figure B) qui sont déterminées par leurs rendements (rapport de la puissance théorique nécessaire pour élever le débit d'eau d'une hauteur située en dessus du niveau libre sur la puissance à l'accouplement du compresseur)



[Q_L L/s]

Fig. B: variation du débit liquide en fonction du débit de gaz pour un Système: D'AIR-LIFT COURT
diamètre de 0.08 m



BASES THEORIQUES DE L'AIR LIFT

Le rendement η du dispositif se définit par le rapport :

$$\eta \triangleq \frac{\text{puissance théorique nécessaire pour élever le débit d'eau}}{\text{puissance à l'accouplement du compresseur}}$$

$$\eta \triangleq \frac{P_a}{P_f} \dots\dots\dots 23 \text{ a}$$

avec : $P_a = \rho_m \cdot g \cdot Q_e \left(H + \frac{V_s^2}{2g} \right) \text{ (b)}$

$$P_f = P_a \cdot q \cdot Q_e \cdot \ln \frac{P_m + P_a}{P_a} \text{ (c)}$$

En substituant les équations (b) et (c) par l'équation (a) nous obtenons après une simplification le rendement η du dispositif :

$$\eta \triangleq \frac{H + V_s^2 / 2g}{q \cdot h_a \cdot \ln \left(1 + \frac{\rho_m h}{P_a} \right)} \dots\dots\dots 24$$

où : $h_a = P_a / \rho_m \cdot g$

Sur la figure (A) qui représente la caractéristique de l'air-lift, pour obtenir la zone optimale de fonctionnement de l'air-lift qui correspond à l'écoulement bouchon où les pertes par frottements et par glissements sont faibles, on trace une droite passant par l'origine et tangente à la courbe $Q_e = f(Q_g)$, on détermine le débit liquide optimal qui correspond à un rendement :

$$\eta \triangleq 0.85 \cdot \eta_{\max}$$

BASES THEORIQUES DE L'AIR LIFT

À partir du débit d'air correspondant au barbotage on augmente la puissance d'injection d'air pour avoir un débit liquide d'où la caractéristique de rendement est en premier lieu en élévation raide et devient par la suite plus plate, parce que l'air escalade plus rapidement à des vitesses supérieures.

Conclusions: — À certain débit d'air, le débit liquide maximum est atteint. À partir de ce moment et par la suite, une augmentation dans l'alimentation d'air résulte en une production décroissante. Le rendement maximum est achevé quand la caractéristique de rendement $\eta = f(Q_g)$ a sa ligne de tangente (O) zéro.

— La figure (B) indique quelle est la valeur du débit d'air qui correspond au débit liquide maximum. Des débits d'air plus élevés ne conduisent qu'à une augmentation des pertes par frottements. En outre, on voit clairement qu'un débit d'air minimum est requis pour le fonctionnement de la pompe à air-lift. Les rendements ne dépassent toute fois que difficilement 50%.

— Les coefficients (typiques) sans dimensions de l'air-lift:

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

BASES THEORIQUES DE L'AIR LIFT

$$a_c = \frac{8 \cdot \lambda \cdot H + h}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} = \frac{8 \cdot \lambda}{\pi^2 \cdot g} \frac{h}{\alpha \cdot D^5} = \gamma \cdot \frac{h}{\alpha \cdot g \cdot D^5} \dots 25$$

la substitution de l'équation (25) dans l'équation (21) donne le débit liquide en fonction des coefficients sans dimensions de l'air-lift :

$$Q_l = \frac{1}{1+q} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\gamma} \cdot \left(1+q - \frac{1}{\alpha}\right) \cdot g \cdot D^5} \dots 26$$

— Le coefficient sans dimensions KQ du débit liquide pour des air-lift semblables :

$$KQ = \frac{1}{1+q} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\gamma} \cdot \left(1+q - \frac{1}{\alpha}\right)} \dots 27$$

D'après les expériences de HEIR, le coefficient de γ vaut pour un régime optimal de l'air-lift court :

$$\gamma = 0.078$$

et la valeur du débit spécifique q sera donnée par le graphe

$q_c = f(\alpha)$ où calculé d'après la formule suivante :

pour $h = 2 \dots \dots \dots 20 \text{ m}$

$$q_c = 0.767 \cdot \alpha^{-2.2} \dots \dots \dots 28$$

— Le coefficient spécifique de la conduite d'air-lift :

le coefficient de résistance spécifique de

la conduite d'air-lift a'_a est déterminé à partir du bilan de puissance pour une section quelconque de celle-ci :

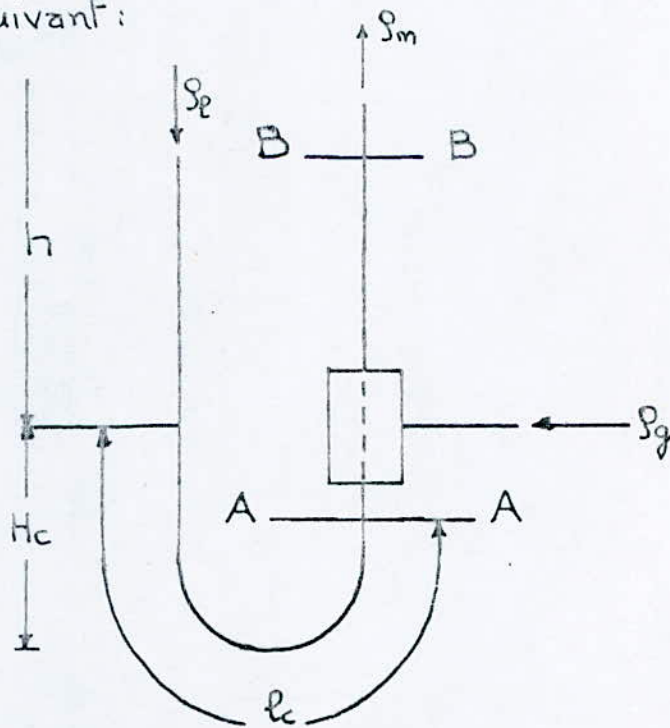
BASES THEORIQUES DE L'AIR LIFT

$$P_{air\ comp} = P_{sortie} - P_{entree} \dots\dots\dots 29$$

où, dans l'hypothèse d'une expansion isothermique de l'air, la puissance fournie par le compresseur nécessaire au refoulement est calculée comme suit :

$$P_{air\ comp.} = P_a \cdot q \cdot Q_e \cdot \ln \frac{P_{mélangeur}}{P_a} \dots\dots 30$$

— la détermination de la pression au mélangeur P_m se fait en écrivant l'équation de charge totale pour une même section à partir du schéma suivant :



L'équation de charge totale pour la section A-A est :

$$P_p g h + P_p g H_c + P_a = P_m + P_p g H_c + P_p g a_c^2 l_c Q_e^2 \dots\dots 31$$

d'où :

$$P_m = P_p g h - P_p g a_c^2 l_c Q_e^2 + P_a \dots\dots\dots 32$$

BASES THEORIQUES DE L'AIR LIFT

— la puissance hydraulique du liquide à l'entrée du mélangeur de la conduite d'alimentation est exprimée :

$$P_{\text{entrée}} = \rho_e \cdot g \cdot h \cdot Q_e - \rho_e g a'_c \cdot l_c \cdot Q_e^3 + P_a \cdot Q_e \dots\dots\dots 33$$

— la puissance hydraulique du liquide à la sortie du mélangeur est donnée par :

$$P_{\text{sortie}} = \rho_m \cdot g \cdot (H+h) \cdot Q_m + \rho_m \cdot g \cdot a'_a \cdot (H+h) \cdot Q_m^3 + P_a \cdot Q_m \dots\dots\dots 34$$

l'expression 30 devient :

$$P_a \cdot q \cdot Q_e \cdot \ln \frac{\rho_e \cdot g \cdot h - \rho_e \cdot g \cdot a'_c \cdot l_c \cdot Q_e^2 + P_a}{P_a} =$$

$$= \rho_m \cdot g \cdot (H+h) \cdot Q_m + \rho_m \cdot g \cdot a'_a \cdot (H+h) \cdot Q_m^3 + P_a \cdot Q_m - \rho_e g h \cdot Q_e$$

$$+ \rho_e \cdot g \cdot a'_c \cdot l_c \cdot Q_e^3 - P_a \cdot Q_e \quad \dots\dots\dots 35$$

En développant (35), on obtient :

— avec l'introduction du rendement η de la conduite d'alimentation d'air-lift, on détermine :

— l'équation du modèle mathématique d'air-lift :

$$h = \frac{P_a}{\rho g} \left[\exp\left(\frac{\rho \cdot g \cdot h}{P_a \cdot q \cdot \eta} + 1\right) - 1 \right] \dots\dots\dots 36$$

— l'expression de la résistance spécifique a'_a d'air-lift :

$$a'_a = \frac{P_a \cdot q + \rho_e g H - P_a \cdot q \cdot \ln \frac{\rho g h + P_a}{P_a}}{\rho_m g (H+h) (q+1)^2 \cdot Q_e^2} \dots\dots\dots 37$$

Connaissant la résistance de la conduite d'alimentation d'air-lift

BASES THEORIQUES DE L'AIR LIFT

on peut calculer les caractéristiques de celle-ci dont la plus importante est le diamètre D .

D'après les données bibliographiques, nous pouvons tracer les dépendances suivantes :

$$a'_a \cdot Q_p^2 = f(q) \cdot$$

$$a'_a \cdot Q_m^2 = f(q) \cdot$$

} Voir figure (C)

Fig. C: variation de la perte d'énergie en fonction du débit spécifique q .

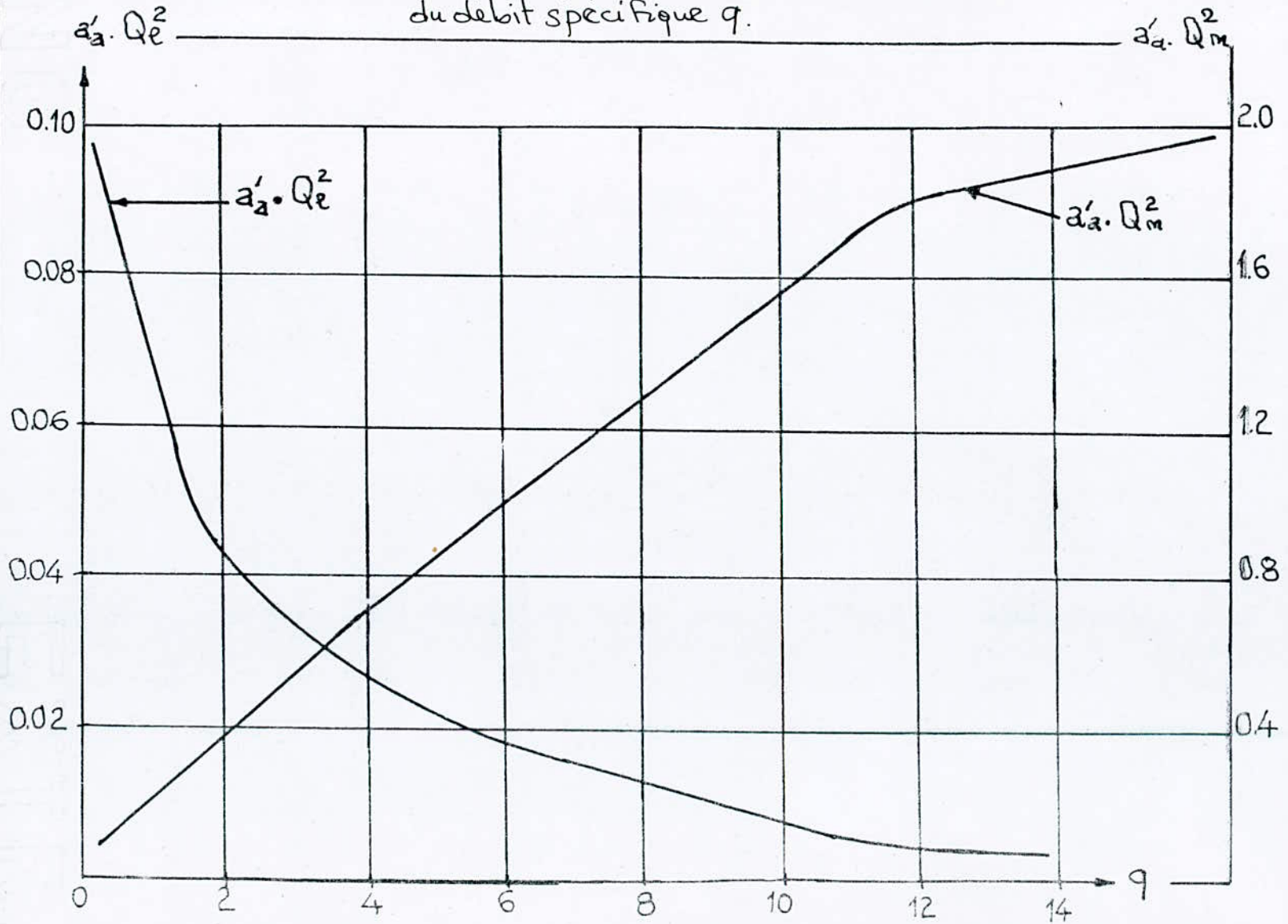
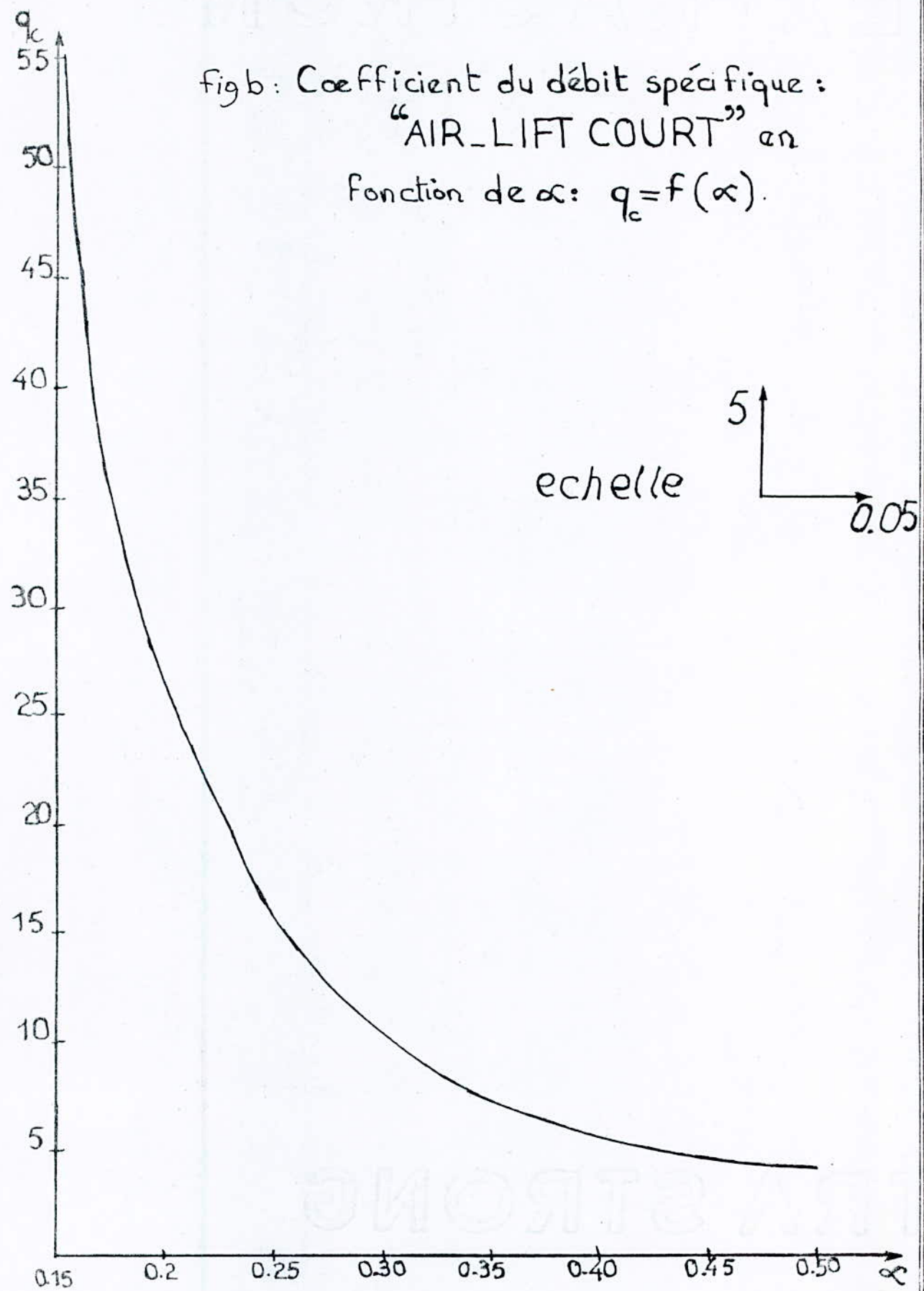


fig b : Coefficient du débit spécifique :
"AIR_LIFT COURT" en
fonction de α : $q_c = f(\alpha)$.



Chapitre 3 : EQUATIONS GENERALES DE L'AIR LIFT

Equation générale du mouvement des mélanges : gaz-liquide dans les conduites de l'air-lift :

La condition obligatoire du fonctionnement de l'air-lift est la disponibilité de l'immersion absolue du mélangeur h par rapport à la surface libre d'un liquide.

Les paramètres généraux de l'air-lift sont :

- la hauteur d'élevation : H (m)
- le diamètre de la conduite d'alimentation : d (mm)
- l'immersion relative du mélangeur : $\alpha = h/h + H$
- le débit de l'air-lift pour la phase fluide : Q_e (m³/min)
- le débit de l'air comprimé : Q_a (m³/min)
- le débit spécifique de l'air comprimé : $q = Q_a/Q_e$
- la pression au mélangeur : $P_m = \rho \cdot g \cdot h$
- la pression au séparateur de l'air : $P_0 = P_{at}$.

Composons l'équation différentielle du mouvement du mélange (air comprimé, liquide) en utilisant les équations d'énergie :

$$dz + \frac{dP_m}{\rho_m g} + \left(\alpha_{12} \frac{v_m^2}{2g} \right) + \lambda \cdot \frac{dz}{d} \cdot \frac{v_m^2}{2g} = 0 \dots\dots 38$$

Transformons l'équation (38) à la forme quasi-

homogène qui est commode à l'intégration. Représentons les membres de l'équation (38) à l'aide des paramètres de l'air-lift. Par exemple : la vitesse moyenne du mélange (air-comprimé, liquide) est égale à :

$$v_m = \frac{Q_e + Q_g}{\omega} = \frac{Q_e}{\omega} (1 + q_z) \dots\dots\dots 39$$

Il faut remarquer que le mouvement du mélange (air-comprimé, liquide) est accompagné du glissement relatif des phases composantes. On peut tenir compte de ce phénomène à l'aide du coefficient de glissement K_m qui est égale à :

$$K_m = \frac{v_{m,e}}{v_{m,g}} \dots\dots\dots 40$$

L'équation de continuité du mélange (air-comprimé, liquide) sous forme relative sera :

$$\bar{\omega}_e + \bar{\omega}_g = 1 \dots\dots\dots 41$$

où bien la fraction volumétrique du fluide plus la fraction volumétrique de l'air comprimé est égale à l'unité :

$$\begin{aligned} \frac{Q_e}{\omega \cdot v_e} + \frac{Q_g}{\omega \cdot v_g} &= \frac{Q_e}{\omega v_e} + \frac{Q_g \cdot K_m}{\omega \cdot v_e} = \\ &= \frac{Q_e}{\omega \cdot v_e} (1 + q_z \cdot K_m) \dots\dots\dots 42 \end{aligned}$$

la masse volumétrique du mélangeur (air-comprimé, liquide) respectivement sera :

$$P_m = \frac{Q_e}{Q_e + K_m \cdot Q_g} \cdot P_e = \frac{1}{1 + q_z \cdot K_m} \cdot P_e \dots\dots\dots 43$$

l'énergie cinétique de la phase fluide est de plusieurs fois supérieure à l'énergie cinétique de la phase de l'air-comprimé, qui nous donne la possibilité de représenter l'énergie cinétique du mélange

comme suit:
$$\frac{U_m^2}{2g} = \frac{U_e^2}{2 \cdot g} \dots\dots\dots 44$$

La variation de la pression le long de la hauteur d'élevation est une variation linéaire :

$$P_z = P_1 + \frac{z}{L} \cdot (P_1 - P_0) \dots\dots\dots 45$$

Les recherches de plusieurs savants (Armande, Teletove, Argounov, et autres) réalisées pour le barbotage du mélange de vapeur d'eau ont montré que, le long des parois solide (ou bien des parois de la conduite), la couche limite d'épaisseur plusieurs fois supérieure à celle de la couche de mouvement du liquide homogène c'est-à-dire, dans ce cas, on peut porter la conduite d'alimentation à la catégorie hydrauliquement lisse.

Donc, on a proposé la formule suivante pour déterminer le coefficient de frottement :

$$\lambda = 0.5 \cdot Re_m^{-1/4} \dots\dots\dots 46$$

et le nombre de Reynolds du mélange (air-comprimé, liquide)

est déterminé d'après la formule suivante :

$$Re_m = \frac{Q_e \cdot d}{\omega \cdot \nu_m} \dots\dots\dots 47$$

et le coefficient de viscosité cinématique sera déterminé à l'aide de la formule de Argounov :

$$\nu_m = \nu_p \cdot \frac{1 + 0.0136 \cdot q_z \cdot P_z}{1 + 0.00121 \cdot q_o \cdot P_o} \dots\dots\dots 48$$

Pour déterminer la grandeur du coefficient de glissement K_m , il faut examiner des structures du mouvement des mélanges (gaz-liquide) dans les conduites verticales de l'air-lift. la conduite d'alimentation de l'air-lift expérimentale a été fabriquée en verre de longueur 6.56 m et de diamètre $d = 0.08$ m. la méthode expérimentale doit être la suivante :

- on détermine les vitesses du courant des mélanges (gaz-liquide) dans la section fixée.
- on utilise un enregistrement photographique des structures du mouvement du mélange (gaz-liquide).

nous faisons l'évaluation des structures en fonction du nombre de Froude qui est le critère de similitude des processus quand les forces de pesanteur sont prédominantes. le nombre de Froude est égale à :

$$Fr_m = \frac{\nu_m^2}{g \cdot d} \dots\dots\dots 49$$

Dans les bibliographies, on a obtenu des résultats de la dépendance du coefficient de glissement K_m du nombre de Froude Fr_m . C'est pour cette cause qu'en faisant l'évaluation des conditions de la naissance, de la stabilité et de la disparition des structures, on peut déterminer, pour toute les structures, le coefficient de glissement K_m correspondant.

Nous savons que, pour les mouvements des mélanges (gaz-liquide), existent les types de structure du mouvement suivant:

- structures émulsions.
- structures par colonnes successives où structures bouchons.
- structures des axes.
- structures pulvérulentes où structures des poussières.

aussi bien que les structures intermédiaire entre les structures nommées. Donc, notre travail consiste à déterminer le nombre de Froude qui correspond à chaque structure nommée plus haut.

— Analyse dimensionnelle :

— Généralités :

Une loi physique concrétisée par une relation entre un certain nombre de grandeurs (longueurs, vitesses, ... 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 Vachy-Buckingham ou théorème des Π .

— Théorème des Π de Vachy-Buckingham :

L'analyse d'un phénomène physique comportant n variables dont les dimensions sont définies à partir de p grandeurs fondamentales permet de définir $(n-p)$ produits sans dimensions indépendants, cette généralisation constitue le théorème de Vachy-Buckingham.

Soit un phénomène de n variables :

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

les dimensions sont définies à partir de p grandeurs fondamentales alors selon le théorème de Vachy-Buckingham, on peut formuler

PRESENTATION

les produits de $(n-p)$ produits sans dimensions :

$$f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-p}) = 0$$

D'après ce théorème des Π , les produits sans dimensions peuvent être considérés comme de nouvelles variables en nombre réduit, on les appelle aussi grandeurs réduites.

Si $(n-p-1)$ variables sont identiques pour les deux écoulements qu'on compare, il est de même pour le dernier. Sur la représentation graphique de la loi $f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-p}) = 0$, les deux écoulements sont représentés par le même point, ils sont donc en similitude complète. L'égalité de $(n-p-1)$ produits sans dimensions constitue donc la condition de similitude complète des deux écoulements.

Après avoir effectué une analyse dimensionnelle on a énuméré tous les paramètres addimensionnels pouvant avoir une influence sur le phénomène et après une étude bien détaillée de chaque nombre, on a pris seulement en considération, vu leurs influences sur le phénomène étudié, deux (2) nombres addimensionnels qui caractérisent très bien le phénomène considéré qui sont :

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

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

— Nombre de Froude :
$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}$$

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

— Application du théorème des Π :

À fin de faire une vérification de l'existence des nombres addimensionnels cités précédemment dans le phénomène étudié, on applique le théorème de Vachy-Buckingham en utilisant les grandeurs physiques qui caractérisent l'écoulement dans une conduite.

1. Caractéristiques géométriques (Modèle) :

- longueur de la conduite : $L(m)$
- diamètre de la conduite : $D(m)$

2. Caractéristiques du mélange (Fluide) :

- masse volumique du mélange : $\rho_m (kg/m^3)$
- viscosité cinématique du mélange : $\nu_m (m^2/s)$
- Pression moyenne du mélange : $P_m (kg/m \cdot s^2)$
- vitesse moyenne du mélange : $V_m (m/s)$
- accélération de la pesanteur : $g (m/s^2)$
- débit liquide : $Q_e (m^3/s)$
- débit d'air-comprimé : $Q_a (m^3/s)$

le système ainsi défini contient neuf variables ($n=9$) caractérisant le phénomène étudié et trois grandeurs fondamentales ($p=3$), on trouve ($n-p=6$) produits sans dimensions indépendants formés avec les grandeurs considérées. On choisit des grandeurs primaires afin d'avoir les nombres addimensionnels cités précédemment; on prend P, l, Q_e comme grandeurs primaires et selon la méthode de Vachy-Buckingham, on formule les produits sans dimensions de la manière suivante:

• $\Pi_1 = \frac{D}{P^{\alpha_1} \cdot l^{\beta_1} \cdot Q_e^{\gamma_1}}$; on cherche α, β, γ pour que les Π_i soient addimensionnels c'est-à-dire:

$$L = (ML^{-1}T^{-2})^{\alpha_1} \cdot L^{\beta_1} \cdot (LT^{-1})^{\gamma_1}$$

• Pour L: $+1 = -\alpha_1 + \beta_1 + 3\gamma_1$

• " M: $0 = \alpha_1$

• " T: $0 = -2\alpha_1 - \gamma_1$

$$\left| \begin{array}{l} \alpha_1 = 0 \\ \beta_1 = 1 \\ \gamma_1 = 0 \end{array} \right.$$

donc: $\Pi_1 = \frac{D}{L}$

• $\Pi_2 = \frac{V}{P^{\alpha_2} \cdot l^{\beta_2} \cdot Q_e^{\gamma_2}}$

$$LT^{-1} = (ML^{-1}T^{-2})^{\alpha_2} \cdot L^{\beta_2} \cdot (LT^{-1})^{\gamma_2}$$

• Pour L: $1 = -\alpha_2 + \beta_2 + 3\gamma_2$

$$\left| \begin{array}{l} \alpha_2 = 0 \end{array} \right.$$

• Pour M: $0 = \alpha_2$

• Pour T: $-1 = -2\alpha_2 - \gamma_2$

$$\left| \begin{array}{l} \beta_2 = -2 \\ \gamma_2 = 1 \end{array} \right.$$

donc: $\Pi_2 = \frac{V \cdot L^2}{Q_e}$

• $\Pi_3 = \frac{g}{\rho^{\alpha_3} \cdot l^{\beta_3} \cdot Q_e^{\gamma_3}}$

$$LT^{-2} = (ML^{-1}T^{-2})^{\alpha_3} \cdot L^{\beta_3} \cdot (LT^{-1})^{\gamma_3}$$

• Pour L: $1 = -\alpha_3 + \beta_3 + 3\gamma_3$

• Pour M: $0 = \alpha_3$

• Pour T: $-2 = -2\alpha_3 - \gamma_3$

$$\left| \begin{array}{l} \alpha_3 = 0 \\ \beta_3 = -5 \\ \gamma_3 = +2 \end{array} \right.$$

donc: $\Pi_3 = \frac{g \cdot l^5}{Q^2}$

$$\Pi_3 = \frac{1}{Fr^2}$$

• $\Pi_4 = \frac{Q_a}{\rho^{\alpha_4} \cdot l^{\beta_4} \cdot Q_e^{\gamma_4}}$

$$L^3 T^{-1} = (ML^{-1}T^{-2})^{\alpha_4} \cdot L^{\beta_4} \cdot (LT^{-1})^{\gamma_4}$$

• Pour L: $3 = -\alpha_4 + \beta_4 + 3\gamma_4$

• Pour M: $0 = \alpha_4$

• Pour T: $-1 = -2\alpha_4 - \gamma_4$

$$\left| \begin{array}{l} \alpha_4 = 0 \\ \beta_4 = 0 \\ \gamma_4 = +1 \end{array} \right.$$

donc: $\Pi_4 = \frac{Q_a}{Q_e}$

$$\Pi_4 = q$$

• $\Pi_5 = \frac{P}{\rho^{\alpha_5} \cdot l^{\beta_5} \cdot Q_e^{\gamma_5}}$

$$ML^{-3} = (ML^{-1}T^{-2})^{\alpha_5} \cdot L^{\beta_5} \cdot (L^3T^{-1})^{\gamma_5}$$

• Pour L: $-3 = -\alpha_5 + \beta_5 + 3\gamma_5$	$\alpha_5 = 1$
• Pour M: $1 = \alpha_5$	$\beta_5 = 4$
• Pour T: $0 = -2\alpha_5 - \gamma_5$	$\gamma_5 = -2$

donc: $\Pi_5 = \frac{\rho \cdot Q_e^2}{\rho \cdot L^4} \quad \Pi_5 = \frac{1}{Eu.}$

• $\Pi_6 = \frac{\nu}{\rho^{\alpha_6} \cdot L^{\beta_6} \cdot Q_e^{\gamma_6}}$

• $L^2T^{-1} = (ML^{-1}T^{-2})^{\alpha_6} \cdot L^{\beta_6} \cdot (L^3T^{-1})^{\gamma_6}$

• Pour L: $2 = -\alpha_6 + \beta_6 + 3\gamma_6$	$\alpha_6 = 0$
• Pour M: $0 = \alpha_6$	$\beta_6 = -1$
• Pour T: $-1 = -2\alpha_6 - \gamma_6$	$\gamma_6 = 1$

donc: $\Pi_6 = \frac{\nu \cdot L}{Q_e}$

En faisant une combinaison entre Π_1, Π_2 et Π_6

on obtient:

$$\frac{\Pi_2 \cdot \Pi_1}{\Pi_6} = \frac{\frac{\nu \cdot L^2}{Q_e} \cdot \frac{d}{L}}{\frac{\nu \cdot L}{Q_e}} = \frac{\nu \cdot L \cdot d}{Q_e} \cdot \frac{Q_e}{\nu \cdot L} = \frac{\nu \cdot d}{\nu} = Re$$

d'où:

$$\Pi^* = \frac{\Pi_2 \cdot \Pi_1}{\Pi_6} = Re \text{ (nombre de Reynolds)}$$

donc :

$$f(\mathbb{E}u, q, \mathbb{F}r, \mathbb{R}e) = 0$$

Comme le nombre de Reynolds ne caractérise pas le régime d'écoulement pour les configurations bouchons observées, on peut écrire que :

$$f(\mathbb{E}u, \mathbb{F}r, q) = 0$$

Afin d'avoir une meilleure représentation physique de $\mathbb{E}u$ et $\mathbb{F}r$, on utilisera la combinaison suivante :

$$\mathbb{E}u \times \mathbb{F}r = \frac{P}{\rho \cdot v^2} \cdot \frac{v^2}{g \cdot L} = \frac{P}{\rho \cdot g} \cdot \frac{1}{L} = \frac{h}{L}$$

$$\text{avec : } L = H + h$$

on aura donc :

$$\mathbb{E}u \times \mathbb{F}r = \frac{h}{h + H}$$

on pose :

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

Donc la fonction finale sera de la forme :

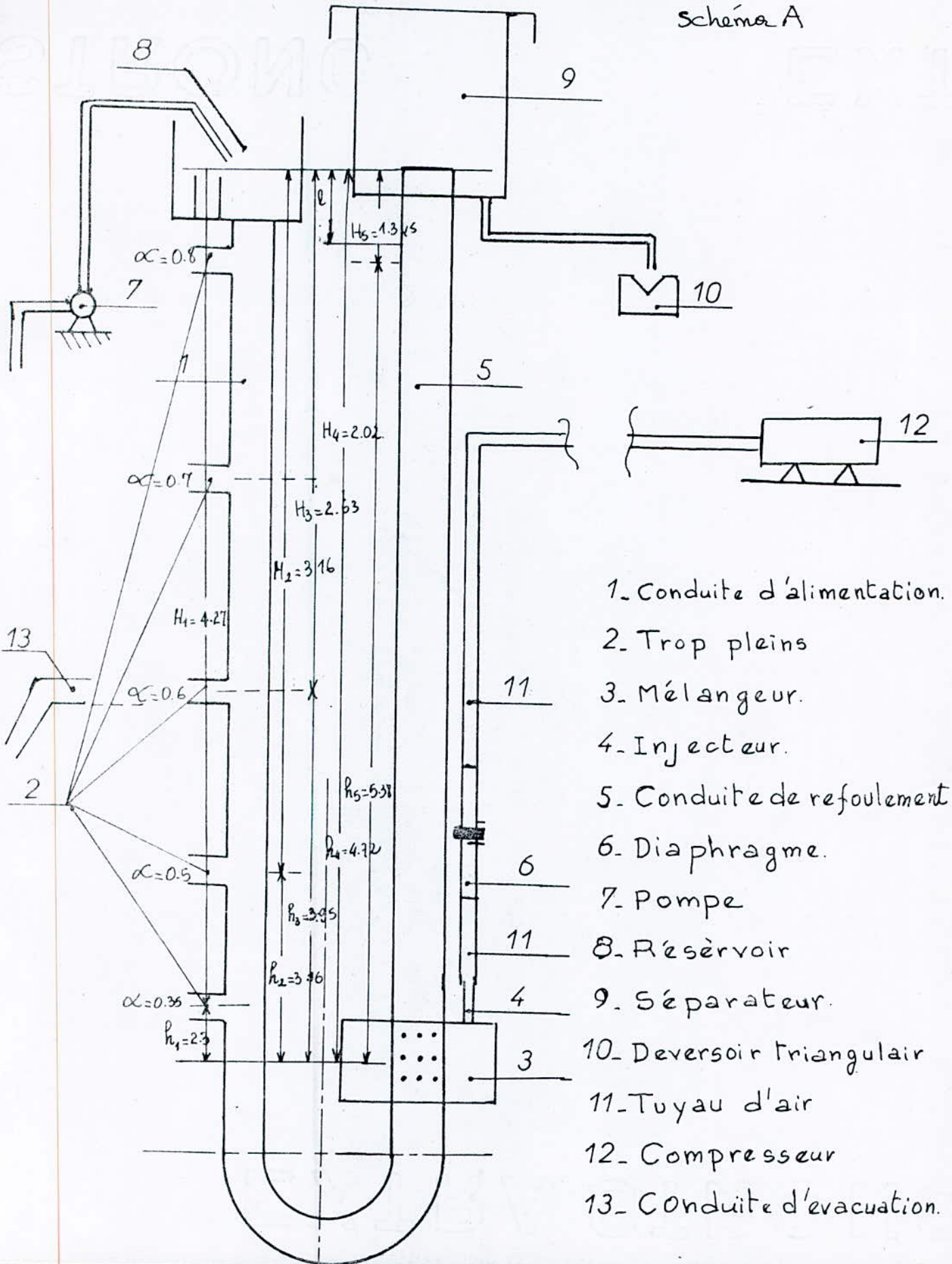
$$f(\alpha, q) = 0 \quad \text{où } q = f(\alpha)$$

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

Présentation de l'installation :

Pour notre expérience, on a utilisé une installation ayant la forme d'un tube en U (schéma A). La branche (A) permet de reproduire la pression statique est pourvue de plusieurs trops pleins (2) placés à différentes hauteurs (x) d'immersion afin de stimuler la variation de pression au niveau du mélangeur (3). Cinq trops pleins (2) sont fixés sur la conduite d'alimentation (1) de diamètre extérieur $\varnothing_1 = 0.063 \text{ m}$, liée à un réservoir cylindrique (8) de diamètre $\varnothing_8 = 0.7 \text{ m}$ et de hauteur $H_8 = 1.15 \text{ m}$ 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 $\varnothing_5 = 0.08 \text{ m}$ et de hauteur $H_5 = 7 \text{ m}$ 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

schéma A



1. Conduite d'alimentation.
2. Trop pleins
3. Mélangeur.
4. Injecteur.
5. Conduite de refoulement
6. Diaphragme.
7. Pompe
8. Réservoir
9. Séparateur.
10. Deversoir triangulaire
11. Tuyau d'air
12. Compresseur
13. Conduite d'évacuation.

aux débits liquides. les différentes dimensions du séparateur (9) longueur $L_g = 0.8\text{m}$, largeur $l_g = 0.8\text{m}$ et de hauteur $h_g = 1\text{m}$ ont été choisies de manière à réduire 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 perforée de trous de $\varnothing = 10\text{mm}$ 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 $\varnothing = 4.0\text{cm}$, solidaire du tuyau d'air-comprimé permet de relever les débits d'air-comprimé. Sur la conduite (6) est placé un thermomètre qui donne les variations de températures durant l'injection d'air-comprimé.

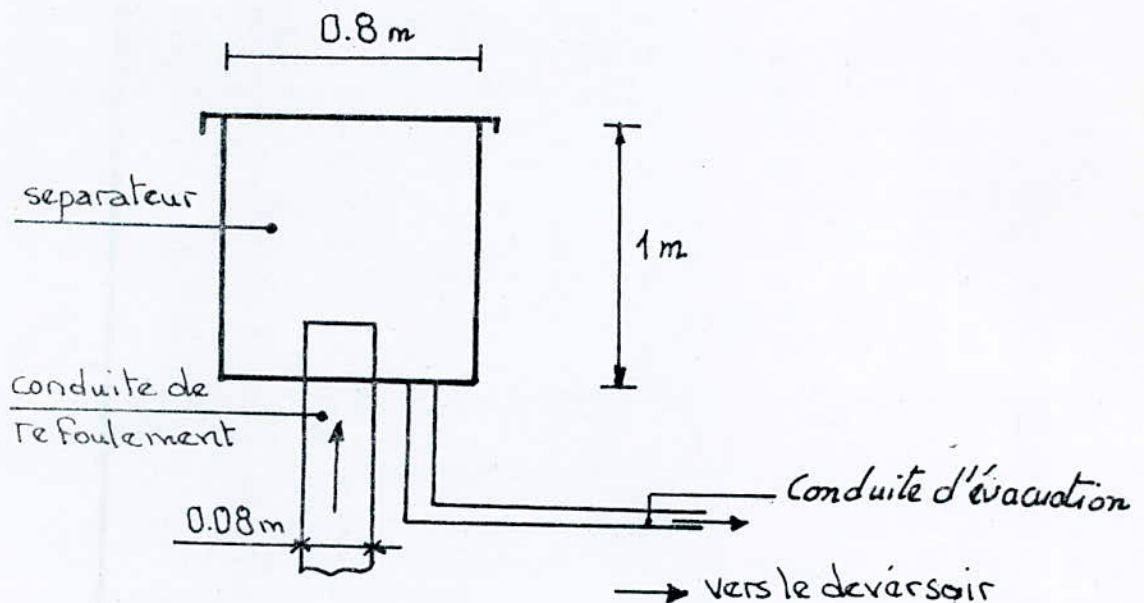
— Les principaux éléments constructifs de l'installation :

A — Le séparateur : Son rôle essentiel est de séparer le courant diphasique air-eau en deux parties :

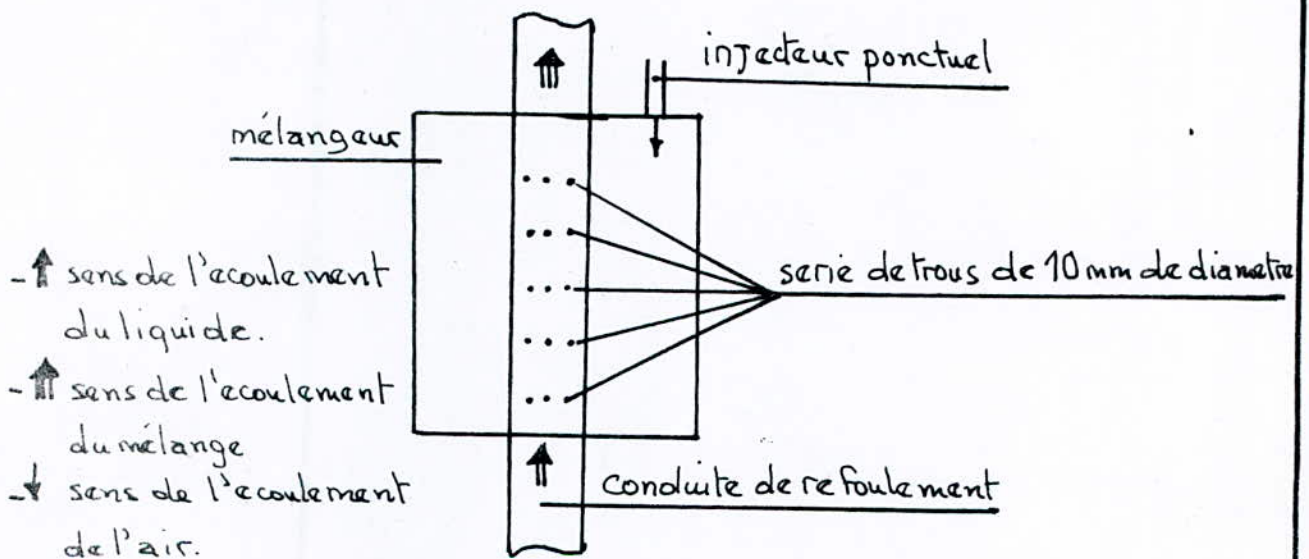
1. L'air sera évacué vers l'atmosphère .
2. L'eau sera orientée suivant la destination désirée .

Il doit satisfaire au 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



B — Le mélangeur : 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 et inversement de ne pas résister au passage de l'eau dans le mélangeur quand l'air comprimé n'est plus injecté.



— Conduite de l'expérience :

L'eau puisé du réservoir du laboratoire au moyen de la pompe centrifuge (7), se verse 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 α .

Un faible débit d'air comprimé est injecté à l'intérieur du mélangeur déjà rempli d'eau à la côte (a) voir le schéma B. 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 :

- une rapide ascension du mélange (air-eau) du fait que la masse volumique du mélange ρ_m est inférieure à celle de l'eau ρ_{eau} .
- une formation d'une multitude petites bulles de plus en plus grosses en remontant la conduite (5) et s'agglomèrent pour donner une grosse bulle de forme ovoïde.
- l'écoulement bouchon ou "configuration bouchon" se manifeste lorsque le mélange occupe toute la section de la conduite (5) et comme la masse volumique du mélange ρ_m est inférieure à celle de l'eau ρ_{eau} le bouchon s'élève en entraînant le liquide environnant.
- l'augmentation du débit d'air n'influence pas le niveau d'eau qui reste constant dans le mélangeur côte (c)

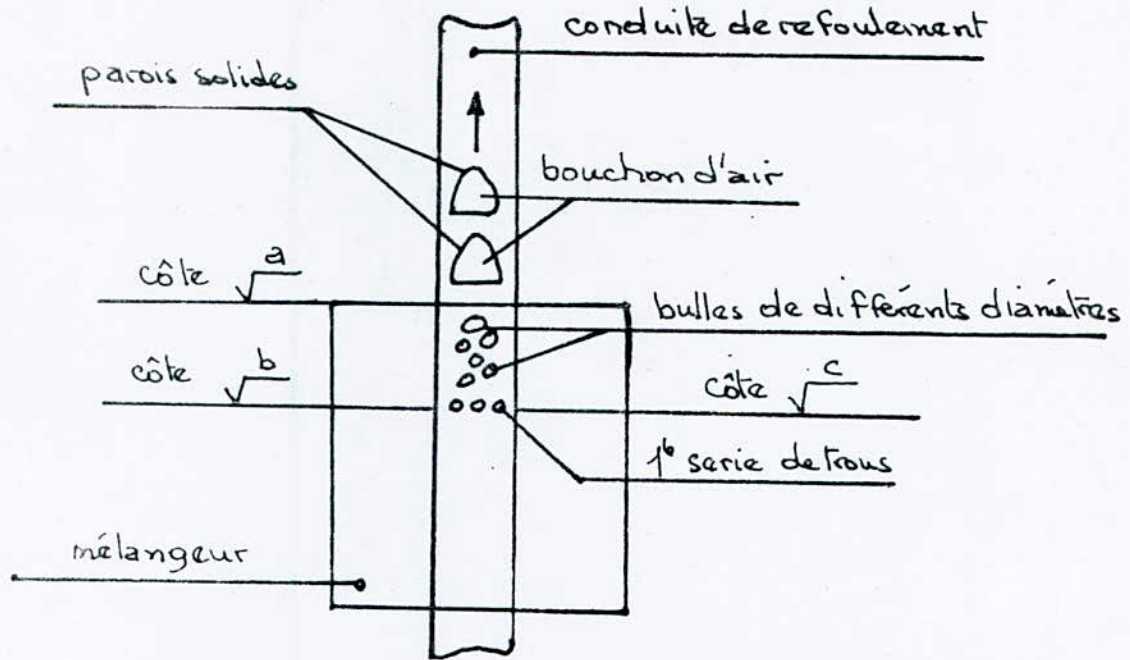


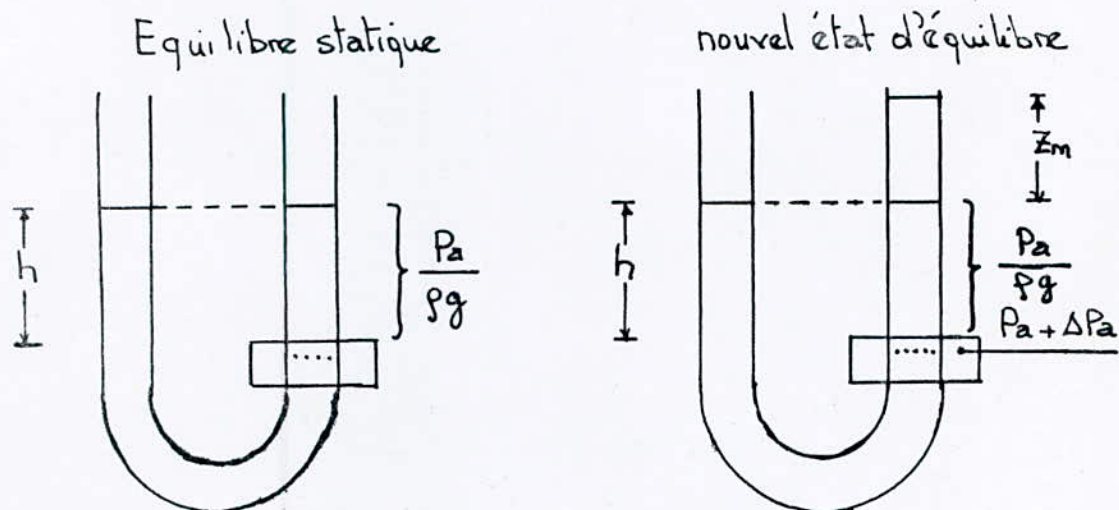
schéma B

Explication physique du phénomène:

Au début de l'expérience, le système est à l'état d'équilibre statique. Après l'injection d'un faible débit d'air, il se produit un déséquilibre du système, on se trouve alors en présence d'un phénomène oscillatoire. Le système commence à osciller autour d'une nouvelle position d'équilibre pour retrouver un nouvel état d'équilibre statique (augmentation de la hauteur d'eau Z_m).

La pression P_a élève le niveau d'eau dans les deux branches mais dès que l'air commence à s'échapper, la situation

est en équilibre. (ascension de l'air conduit à une diminution de la masse volumique dans la conduite de refoulement), tandis que la pression ΔP_a est constante. Une faible quantité de bulles d'air se défile à des vitesses différentes et qui diminue suivant la hauteur, ce phénomène provoque l'élévation du niveau d'eau jusqu'à une hauteur donnée où l'eau gagne l'espace et s'écoule à travers les trous du mélangeur. L'augmentation de la pression conduit à une augmentation du débit d'air et des grosses bulles et des bouchons apparaissent au niveau de l'injecteur.



— Instruments de mesure:

a). diaphragme (appareil déprimogène): mesure de la quantité d'air fourni par le compresseur (débit dans la conduite) à partir de la dépression provoquée par un rétrécissement.

le débit d'un dispositif d'étranglement est proportionnel à la racine carrée de la perte de charge Δh dans le dispositif d'étranglement :

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

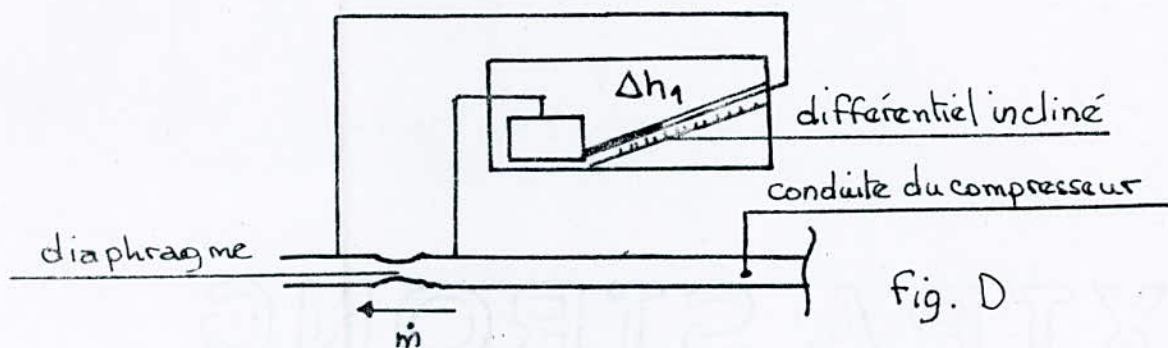
$$Q_a = a \cdot \Delta h^{1/2}$$

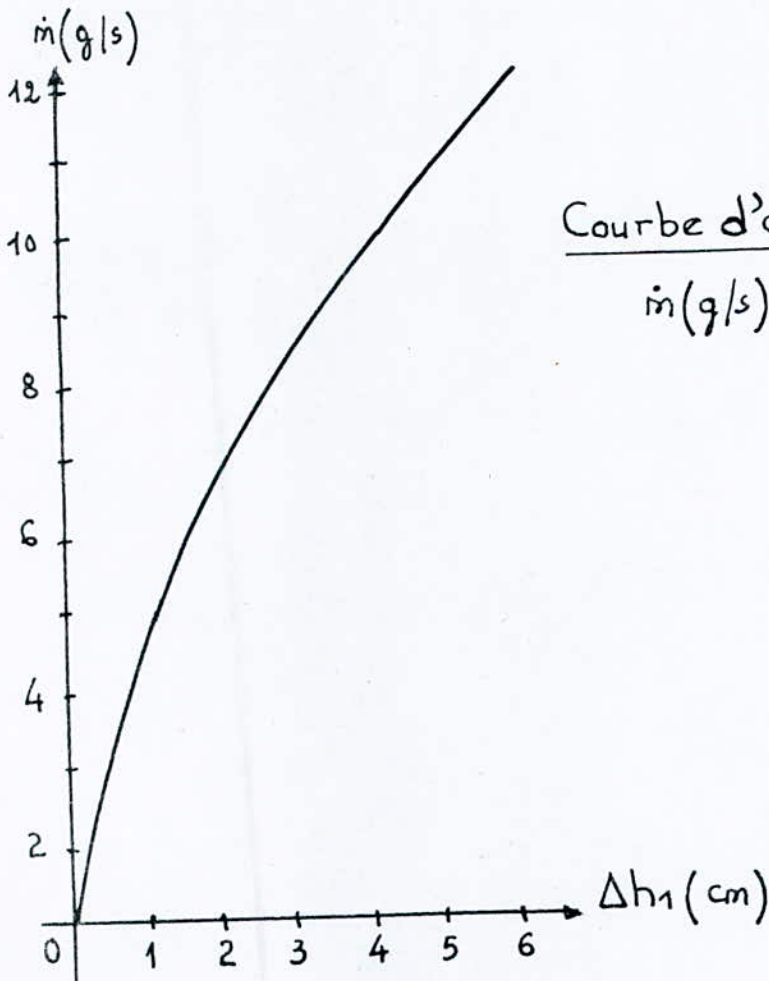
b). Deversoir triangulaire : mesure des débits provenant du séparateur. le choix de ce deversoir triangulaire a été dicté par sa simplicité de sa réalisation et de sa haute précision dans les lectures des hauteurs d'eau.

— Etalonnage de chaque instrument de mesure :

a). Etalonnage du diaphragme : le compresseur du laboratoire comprend :

- un différentiel incliné qui constitue l'élément secondaire. (fig. D)
- une courbe d'étalonnage du diaphragme qui permet d'obtenir par interpolation le débit massique (\dot{m} (g/s)) en fonction de la dénivellée Δh_1 (cm). (fig. E)





Courbe d'étalonnage

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

fig. E

Pour étalonner notre diaphragme, nous avons procédé de la manière suivante :

le compresseur progressivement ouvert donne une dénivellée Δh_1 qui correspond à une hauteur Δh_2 du second diaphragme. A partir de Δh_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 : $\log Q_a = f(\log(\Delta h_2))$.

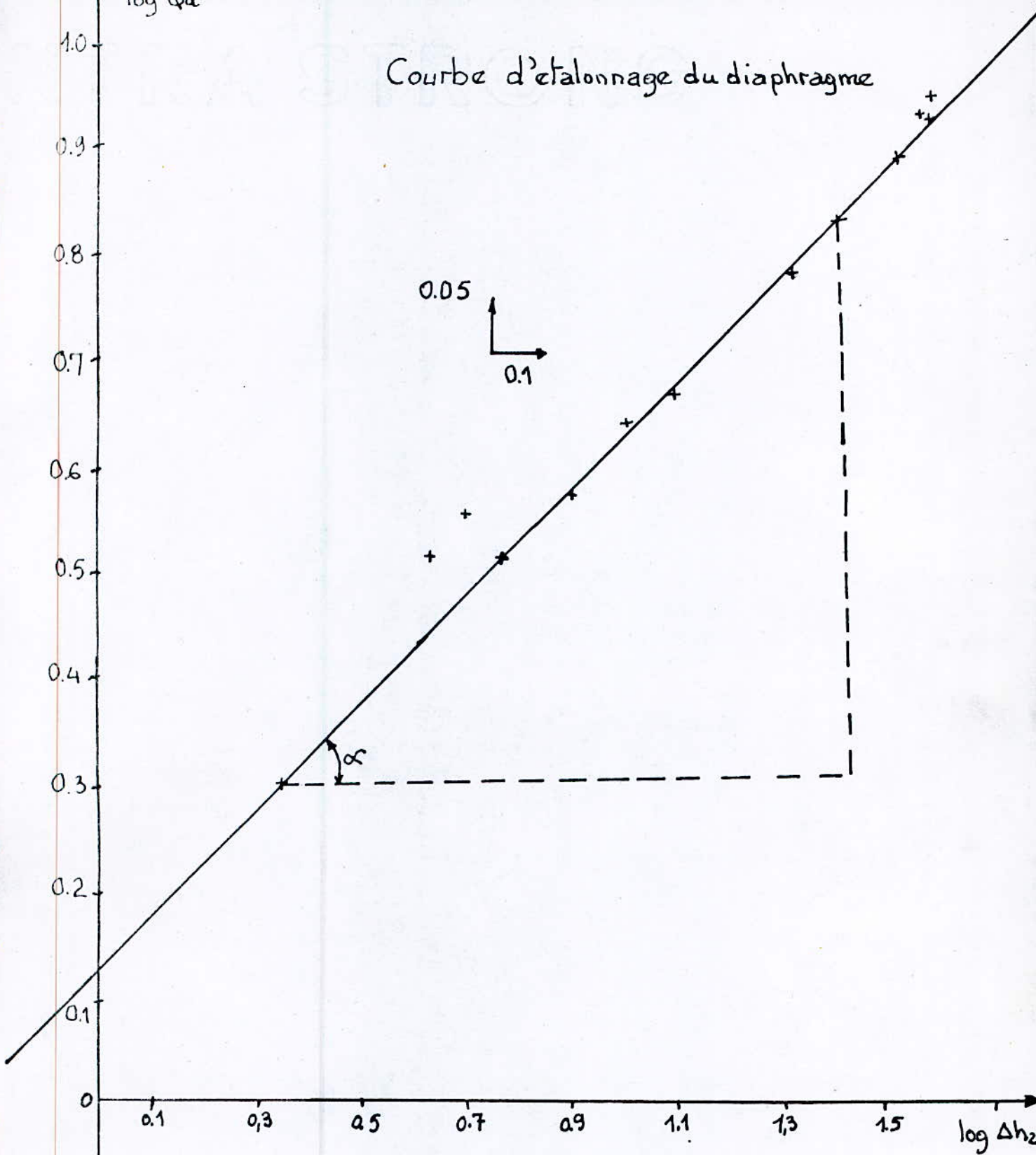
Détermination de la courbe d'étalonnage :

On dresse le tableau suivant pour le tracé de la courbe d'étalonnage :

Δh_1 (cm)	$\dot{m} = Q_a$ (g/s)	Δh_2 (cm)	$\log Q$	$\log \Delta h_2$
0.2	2	2,2	0,300	0.34
0.5	3.3	3,0	0.520	0.48
0.55	3.6	5,0	0,560	0.70
1	4.7	10.5	0.670	1.02
1.45	5,8	16.3	0.760	1.21
1.50	6,0	21,0	0.780	1.32
2,00	6.70	22,5	0.825	1.35
2.50	7.60	26.5	0,880	1.42
2,55	7.80	27,0	0,890	1.43
2.65	7.90	33,0	0.900	1.52
2,90	8,20	35,0	0.910	1.54
3,00	8,30	33,4	0.920	1.52
3.10	8,5	36,5	0.930	1.56
3,50	9,00	38,0	0,950	1.58
3.70	9,40	38,80	0.970	1.59

log ω_a

Courbe d'étalonnage du diaphragme



EXTRA STRONG

Détermination de l'équation de la courbe :

L'équation de la courbe est de la forme : $Q_a = a \cdot \Delta h_2^b$

— Calcul de a et b graphiquement :

$$\text{On a : } Q_a = a \cdot \Delta h_2^b$$

on peut écrire que : $\log Q_a = \log a + b \log \Delta h_2$

on pose : $\gamma = \log Q_a$; $x = \log \Delta h_2$; $A = \log a$; $B = b$.

donc : l'équation de la courbe est de la forme : $\gamma = Bx + A$

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

$$\text{tg } \alpha = \frac{0.9 - 0.3}{1.52 - 0.34} = 0.508 \quad \text{d'où } b = 0.508$$

détermination de a : $\log \Delta h_2 = 0 \Rightarrow \log Q_a = \log a$

$$\Rightarrow \log a = 0.125 \Rightarrow a = 10^{0.125} \quad \text{d'où } a = 1.33$$

finalement : l'équation de la courbe d'étalonnage du diaphragme est :

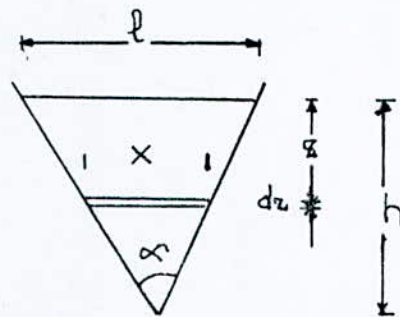
$$Q_a = 1.33 \cdot \Delta h_2^{0.508} \quad [Q_a(\text{g/s}), \Delta h_2(\text{cm})]$$

b). Étalonnage du déversoir :

le déversoir est rempli à un niveau quelconque au dessus de la crête puis on arrête l'alimentation. Quand l'écoulement casse dans le déversoir, on repère le zéro à l'arête 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.

Pour chaque hauteur relevée, on recueille un volume d'eau déversé dans un bac cylindrique gradué et à l'aide d'un chronomètre, on détermine la durée de remplissage du bac. Pour le tracé de la courbe d'étalonnage $Q_e = f(h)$, on relève le débit correspondant à la hauteur d'eau.

Pour la détermination du débit déversant à partir d'un déversoir triangulaire, on met 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 fig.).



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

le débit élémentaire de cette tranche est :

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

avec :

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

d'où :

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

Introduisons l'angle α de l'échancrure du fait que (l) est difficile à mesurer :

$$Q_e = \frac{8}{15} \cdot \mu_1 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sqrt{2g} \cdot h^{5/2}$$

$$Q_e = a' \cdot h^{5/2}$$

Détermination de la courbe d'étalonnage :

On dresse le tableau suivant :

h (cm)	5.52	6.48	7.82	8.55	10.80	11.67
Q _e (l/s)	0.299	0.493	0.741	0.936	1.659	2,05
log h = X	0.742	0,811	0,893	0.932	1,033	1,067
log h = Y	-0.524	-0.307	-0.130	-0.029	0.219	0.312.

Détermination de l'équation de la courbe :

L'équation de la courbe est de la forme : $Q_e = a' \cdot h^{b'}$

Calcul de a' et b' par la méthode des moindres carrés :

$$\text{On a : } Q_e = a' \cdot h^{b'}$$

On compose le logarithme de deux expressions, on obtient :

$$\log Q_e = b' \log h + \log a'$$

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

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 que : $\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$; $\bar{Y} = \frac{\sum Y}{n}$.

On dresse le tableau suivant :

$h(\text{cm})$	$Q(\text{l/s})$	$\log h = x$	$\log Q = y$	$(x - \bar{x})$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$
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
	$\frac{\sum x \cdot y}{n}$	0.913	-0.076	\sum	0.0787		0.4967	0.1972

donc: $A = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum (x - \bar{x})^2} = \frac{0.1972}{0.0787} = 2.505 \quad A \approx 2.5$

$$B = \bar{y} - A\bar{x} = -0.076 - 2.5(0.913) = -2.36$$

d'où: $\log Q_e = b' \log h + \log a' = 2.5 \log h - 2.36$

finalement: l'équation de la courbe d'étalonnage du déversoir s'écrit:

$$Q_e = 4.365 \cdot 10^{-3} h^{2.5} \quad [Q_e (\text{l/s}), h (\text{cm})]$$

le coefficient de corrélation r est donné par:

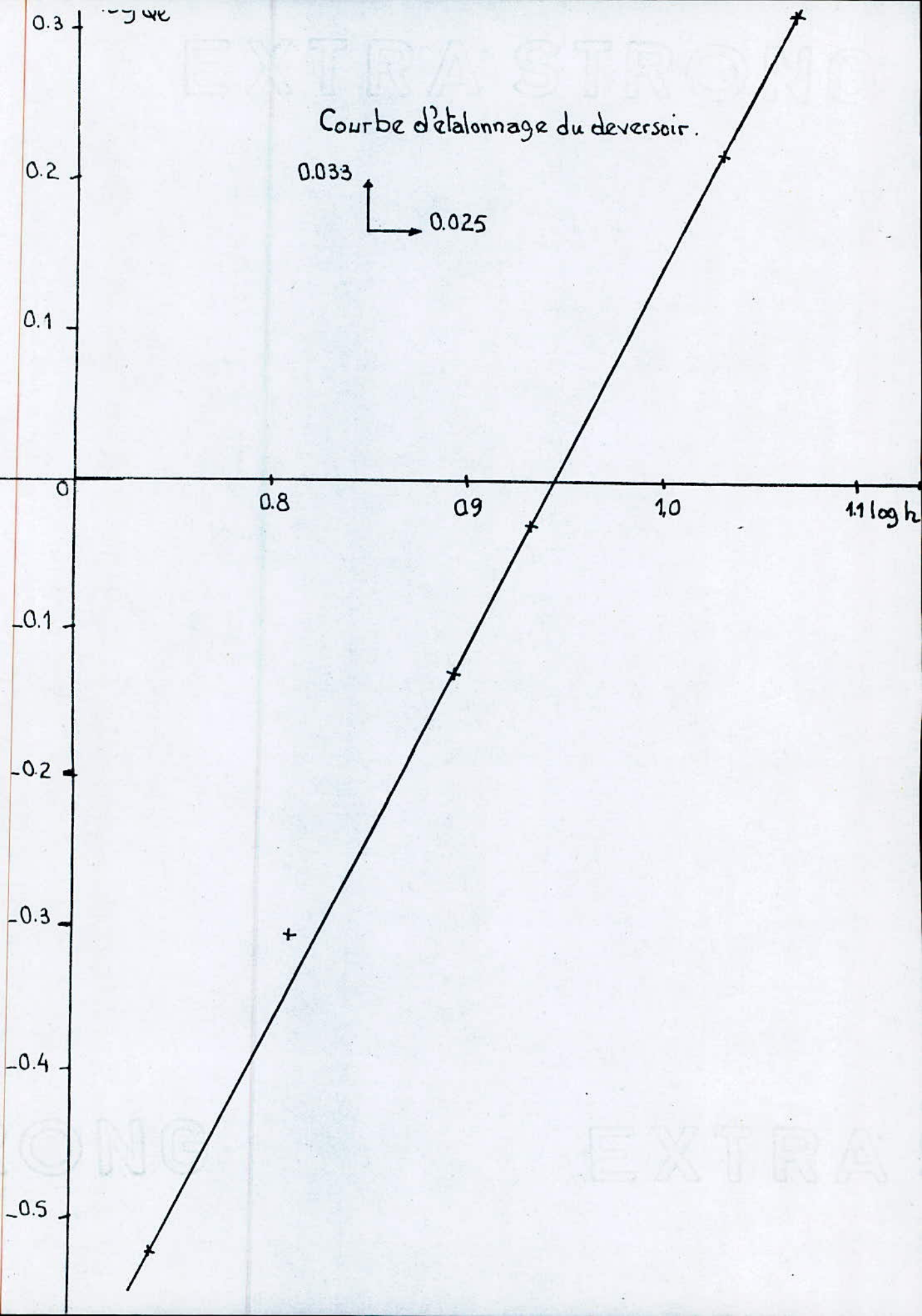
$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \cdot \sum (y - \bar{y})^2}} = \frac{0.1972}{\sqrt{0.0787 \cdot 0.4967}} \quad r = 0.99$$

0.34

EXTRA STROIC

Courbe d'étalonnage du deversoir.

0.033
0.025



- Calcul d'erreur

- Calcul d'erreur sur le diaphragme:

Pour le diaphragme, la dénivellée Δh_2 sur le manomètre différentiel lui correspond un débit massique \dot{m} (g/s). L'équation de la courbe d'étalonnage du diaphragme s'écrit :

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

c.à.d. $Q_a = f(\Delta h_2)$, l'erreur quadratique sur le débit est donnée par la formule :

$$\sigma_Q^2 = \left(\frac{\partial Q}{\partial \Delta h_2} \right)^2 \sigma_{\Delta h_2}^2$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \Delta h_2} = 0,508 \cdot 1,33 \cdot \Delta h_2^{-0,508}$$

$$\sigma_Q^2 = \left(\frac{0,508 \cdot 1,33 \cdot \Delta h_2^{-0,508}}{1,33} \right)^2 \sigma_{\Delta h_2}^2$$

et l'erreur relative sur le débit est donnée par :

$$\left(\frac{\sigma_Q}{Q} \right)^2 = \left(\frac{0,508 \cdot \Delta h_2}{1,33} \right)^2 \cdot \frac{\sigma_{\Delta h_2}^2}{\Delta h_2^2}$$

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

On dresse le tableau suivant :

Δh_2 cm	2.2	3	5	10.5	16.3	21	22.5	26.5	27	33	35	33.4	36.5	38.8
$\frac{\sigma_Q}{Q}$ %	8,55	5,36	2,50	0,81	0,417	0,285	0,257	0,200	0,195	0,144	0,132	0,141	0,124	0,11

— Calcul d'erreur sur le déversoir :

Pour cet essai, on a utilisé des moyens modestes et simples. le débit Q_e recueilli est mesuré par la formule : $Q_e = \frac{V}{t}$
on estime l'erreur sur le temps et le volume comme suit :

$$\sigma_V = 0.03 \text{ l} \quad \text{erreur de lecture sur le bac}$$

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

L'erreur quadratique sur le débit est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_{Q_e}^2 = \left(\frac{\partial Q_e}{\partial V} \right)_{V, E}^2 \cdot \sigma_V^2 + \left(\frac{\partial Q_e}{\partial t} \right)_{V, E}^2 \cdot \sigma_t^2$$

sachant que : $\frac{\partial Q_e}{\partial V} = \frac{1}{t} \Rightarrow \left(\frac{\partial Q_e}{\partial V} \right)_{V, E}^2 = \left(\frac{1}{t} \right)^2$

$$\frac{\partial Q_e}{\partial t} = -\frac{V}{t^2} \Rightarrow \left(\frac{\partial Q_e}{\partial t} \right)_{V, E}^2 = \left(\frac{V}{t^2} \right)^2$$

d'où : $\sigma_{Q_e}^2 = \left(\frac{1}{t} \right)^2 \cdot \sigma_V^2 + \left(\frac{V}{t^2} \right)^2 \cdot \sigma_t^2$

donc : $\left(\frac{\sigma_{Q_e}}{Q_e} \right)^2 = \left(\frac{1/t}{V/t} \right)^2 \cdot \sigma_V^2 + \frac{(V/t^2)^2 \cdot \sigma_t^2}{(V/t)^2}$

$$\Rightarrow \left(\frac{\sigma_{Q_e}}{Q_e} \right)^2 = \left(\frac{\sigma_V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{t} \right)^2$$

On dresse le tableau suivant :

t(s)	97	59.36	40	30.6	17.86	41.9
V(l)	0.3	0.4929	0.7411	0.9366	1.6587	2.050
$\left(\frac{\sigma_t}{t} \right) \%$	1.03	1.60	2.50	3.30	5.50	2.30
$\left(\frac{\sigma_V}{V} \right) \%$	10	6,086	4,05	3,20	1.81	1.46
$\left(\frac{\sigma_{Q_e}}{Q_e} \right) \%$	11.03	7.686	6,55	6,50	7,31	3.76

Chapitre 5: Analyse des résultats expérimentaux

Résultats et Graphes:

Les valeurs du débit d'air injecté et du débit liquide sont déterminés par les instruments de mesure utilisés pour chaque profondeur d'immersion du mélangeur. La variation de la pression au niveau du mélangeur nous permet d'avoir l'augmentation de la hauteur d'immersion absolue h . Le tableau des résultats (voir page 54) nous permet le tracé du graphe $Q_e = f(Q_a)$ et dans lequel :

Δh : variation de la hauteur au niveau du manomètre différentiel à mercure, elle nous permet de calculer la pression juste à l'entrée du mélangeur : $P = \rho_{\text{mer}} \cdot g \cdot \Delta h$

ρ_a : masse volumique de l'air comprimé juste avant son injection dans le mélangeur : $\rho_a = P/RT$

Q_e : débit liquide (l/s)

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

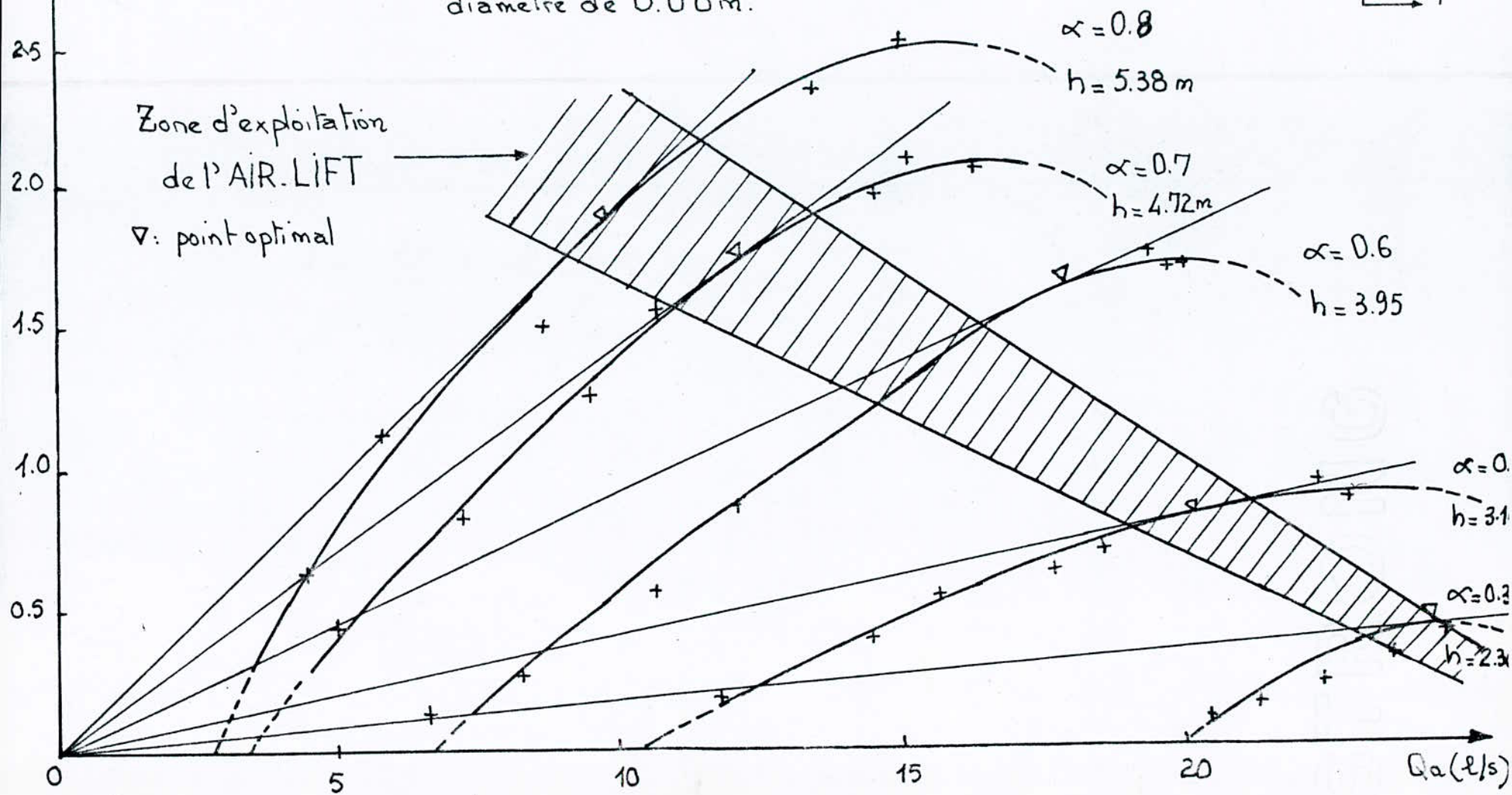
Q_a : débit d'air (l/s) tel que : $Q_a = Q'_a / \rho_{\text{air}}$

$\alpha_5 = 0.80$	$\Delta h(\text{cm})$	27.5	30	26.85	27.85	30.5	31.5	31
	$P_a(\text{kg/m}^2)$	0.454	0.495	0.443	0.460	0.503	0.520	0.512
	$Q_a(\text{g/s})$	1.99	2.81	3.82	6.14	7.40	7.67	7.76
	$Q_a(\text{l/s})$	4.38	5.67	8.63	13.35	14.71	14.75	15.16
	$Q_e(\text{l/s})$	0.61	1.12	1.50	2.37	2.44	2.42	2.40
$\alpha_3 = 0.70$	$\Delta h(\text{cm})$	25.2	24.6	25.4	26.6	27.2	28.6	30.6
	$P_a(\text{kg/m}^2)$	0.416	0.406	0.345	0.439	0.449	0.472	0.505
	$Q_a(\text{g/s})$	2.02	2.92	3.67	5.58	6.38	7.01	7.68
	$Q_a(\text{l/s})$	4.86	7.20	10.62	12.71	14.22	14.85	15.20
	$Q_e(\text{l/s})$	0.40	0.81	1.56	1.87	1.98	2.12	2.10
$\alpha_3 = 0.60$	$\Delta h(\text{cm})$	23.4	21.80	19.40	19.25	22.60	23.90	24.10
	$P_a(\text{kg/m}^2)$	0.386	0.360	0.320	0.318	0.373	0.394	0.398
	$Q_a(\text{g/s})$	2.46	2.96	3.35	3.83	6.92	7.67	7.76
	$Q_a(\text{l/s})$	6.38	8.23	10.48	12.04	12.55	19.43	19.46
	$Q_e(\text{l/s})$	0.11	0.27	0.54	0.85	1.69	1.75	1.72
$\alpha_2 = 0.50$	$\Delta h(\text{cm})$	18.08	18.20	18.45	19.00	19.85	20.75	20.85
	$P_a(\text{kg/m}^2)$	0.298	0.300	0.304	0.313	0.327	0.342	0.344
	$Q_a(\text{g/s})$	3.48	4.31	4.73	5.49	5.99	7.65	7.79
	$Q_a(\text{l/s})$	11.68	14.36	15.53	17.52	18.27	22.32	22.65
	$Q_e(\text{l/s})$	0.18	0.36	0.50	0.62	0.68	0.88	0.82
$\alpha_1 = 0.35$	t	15	15.4	16.4	17.6	19.6	19.8	20
	$P_a(\text{kg/m}^2)$	0.247	0.254	0.270	0.291	0.323	0.327	0.330
	$Q_a(\text{g/s})$	5.02	5.37	6.04	6.85	7.94	8.04	8.13
	$Q_a(\text{l/s})$	20.28	21.12	22.36	23.56	24.53	24.59	24.62
	$Q_e(\text{l/s})$	0.023	0.12	0.21	0.31	0.37	0.36	0.35

Q_e (l/s)

variation du débit liquide en fonction du débit d'air
pour un système: D'AIR-LIFT COURT
diamètre de 0.08 m.

0.2
1



Variation du coefficient du débit spécifique q en fonction de l'immersion relative α :

les débits optimaux sont déterminés graphiquement en traçant la tangente à la courbe $Q_p = f(Q_a)$ pour un fonctionnement optimal de l'air lift court et le coefficient du débit spécifique q est donné par le rapport du débit d'air optimal sur le débit liquide optimal. On dresse le tableau suivant donnant la variation du débit spécifique q en fonction de l'immersion relative α :

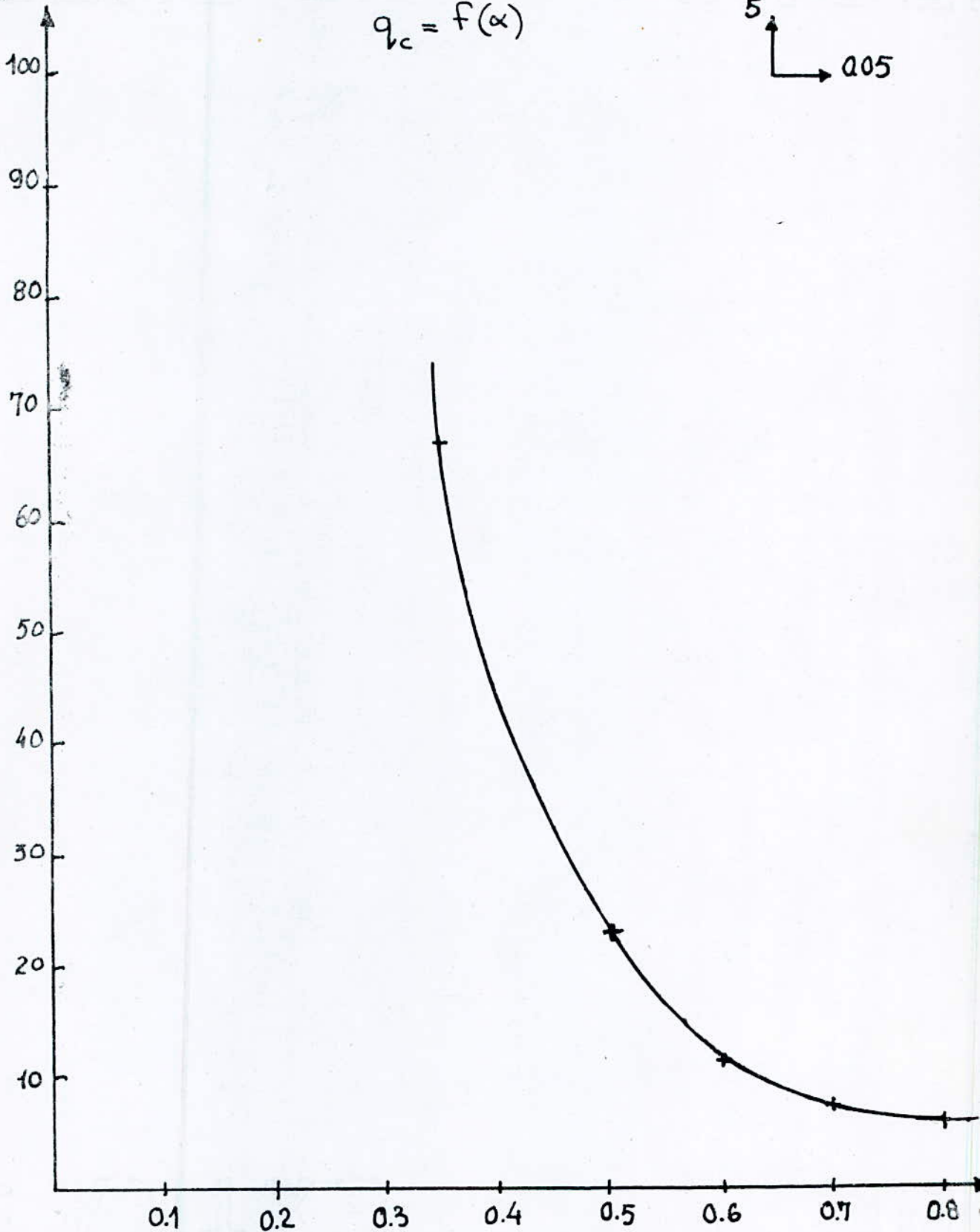
α	0.35	0.50	0.60	0.70	0.80
$Q_a^{opt} (l/s)$	24	20	17.7	12	9.8
$Q_e^{opt} (l/s)$	0.36	0.87	1.60	1.72	1.80
$q (m^3/m^3)$	66.66	22.98	11.06	6.97	5.45

fig.d: variation du coefficient du débit spécifique
en fonction de l'immersion relative

$$q_c = f(\alpha)$$

5
0.05

$q_c \left(\frac{m^3}{m^2} \right)$



Variation de la perte d'énergie (charge) en fonction du débit spécifique q :

l'expression du coefficient de résistance spécifique de l'air lift est donnée comme suit :

$$a'_a = \frac{P_a \cdot q + \rho_e g H - P_a \cdot q \cdot \ln(1 + \rho_e g h / P_a)}{8m g (H+h) (q+1)^2 \cdot Q_e^2}$$

En multipliant par :

1. le carré du débit de mélange, on obtient :

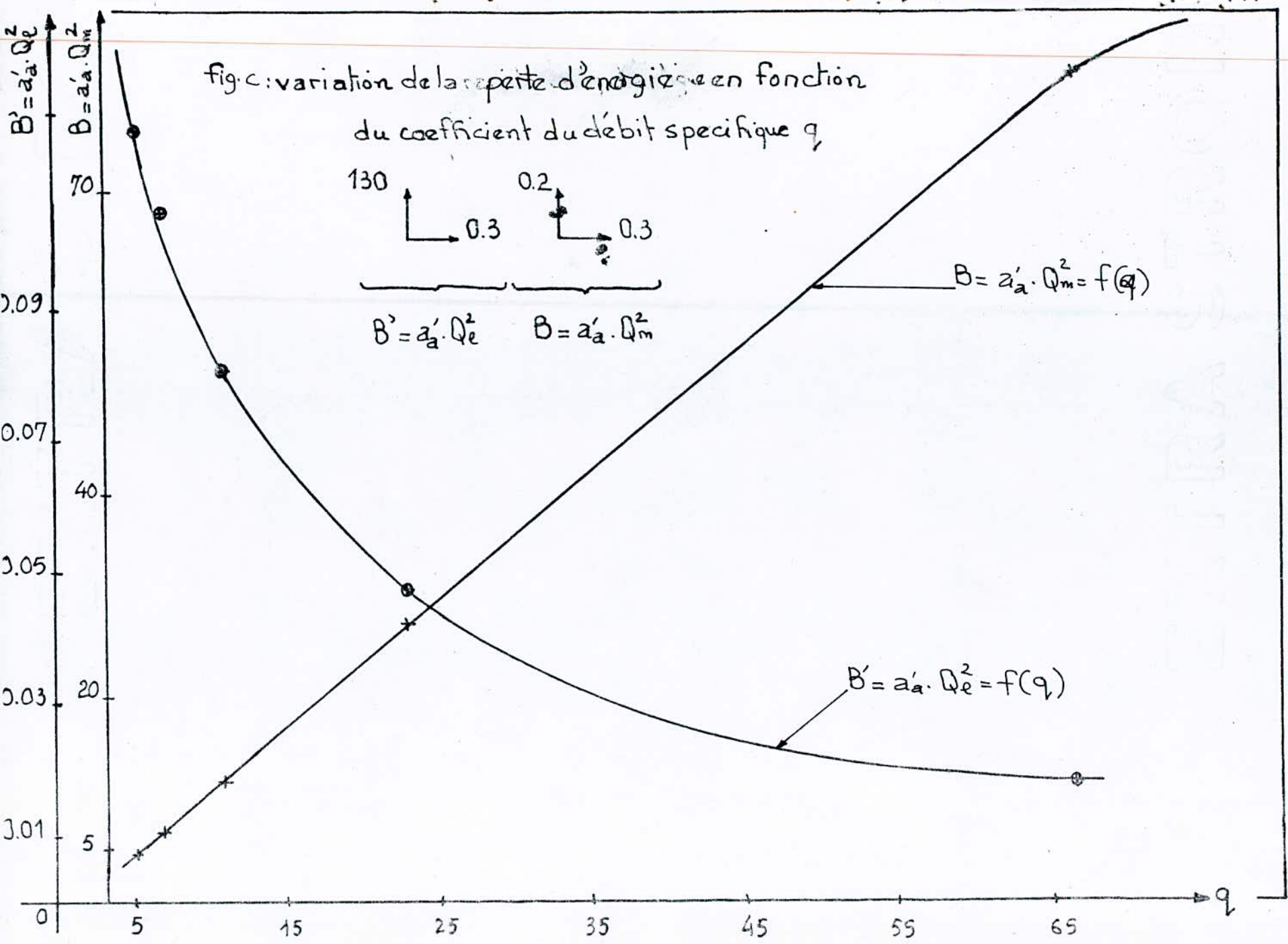
$$B = a'_a \cdot Q_m^2 = \frac{P_a q + \rho_e g H - P_a \cdot q \cdot \ln(1 + \rho_e g h / P_a)}{8m g (H+h)}$$

2. le carré du débit liquide Q_e , on obtient :

$$B' = a'_a \cdot Q_e^2 = \frac{P_a q + \rho_e g H - P_a \cdot q \cdot \ln(1 + \rho_e g h / P_a)}{8m g (H+h) (q+1)^2}$$

α	0.35	0.50	0.60	0.70	0.80
h (m)	2.30	3.16	3.95	4.72	5.38
H (m)	4.27	3.16	2.63	2.02	1.345
q (m ³ /m ²)	66.67	22.98	11.06	6.98	5.45
$10^{-3} \times Q_e$ (m ³ /s)	0.36	0.87	1.60	1.72	1.88
a'_a (s ² /m ⁵)	136666	61720	31180	35301.5	32800
Q_m (m ³ /s)	0.0244	0.0209	0.0193	0.0137	0.0121
$B = a'_a \cdot Q_m^2$	81.365	26.96	11.614	6.626	4.802
$B' = a'_a \cdot Q_e^2$	0.018	0.0467	0.08	0.104	0.116

fig. c: variation de la perte d'énergie en fonction du coefficient du débit spécifique q



— Caractères des structures du mouvement des mélanges gaz-liquide :

Comme nous avons précisé dans le chapitre précédent, pour déterminer la grandeur du coefficient de glissement K_m , nous avons examiné les structures du mouvement du mélange gaz-liquide dans les conduites verticales de l'air lift. la conduite de refoulement de l'air lift au niveau de laboratoire est en verre de longueur $L = 6.56 \text{ m}$ et de diamètre $d = 0.08 \text{ m}$. la méthode expérimentale est la suivante : On détermine les vitesses du courant de mélange gaz-liquide dans les sections fixées à l'aide de la formule suivante :

$$v_m = \frac{Q_a \cdot P_a}{P_2 \cdot S_c} + \frac{Q_e}{S_c} \dots\dots\dots$$

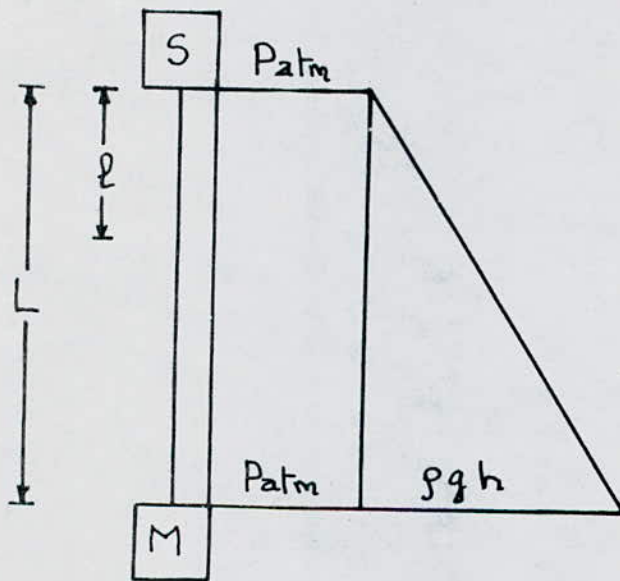
- où :
- v_m : vitesse du courant de mélange gaz-liquide (m/s).
 - Q_a : débit de l'air comprimé qui nous prenons des caractéristiques expérimentales $Q_e = f(Q_a)$ pour chaque point étudié (m^3/s). (fig. F).
 - Q_e : débit de l'air lift de la phase liquide qui nous relevons des caractéristiques expérimentales de l'air lift (m^3/s).
 - S_c : section de la conduite de l'air lift expérimentale de diamètre $d = 0.08 \text{ m}$.

P_a : pression dans le séparateur de l'air lift qu'on prend comme la pression atmosphérique ($P_a \cong 10^5 \text{ N/m}^2$).

P_z : pression dans la section fixée de la conduite de refoulement.

la loi de variation de la pression le long de la conduite de mélangeur au séparateur est considérée comme linéaire :

$$P_z = P_a + \frac{\ell}{L} (P_1 - P_0) \dots \dots$$



ℓ : distance entre le séparateur et la section fixée.

On prend deux sections fixées: l'une inférieure "i" qui se trouve à la distance ℓ_i de séparateur et l'autre supérieure "s" qui se trouve à la distance ℓ_s de séparateur.

Dans notre cas:

α	0.35	0.50	0.60	0.70	0.80
$P_1 \cdot 10^4 (N/m^2)$	12.3	13.16	13.95	14.72	15.38
$P_2 \cdot 10^5 (N/m^2)$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$(P_1 - P_2) \cdot 10^4 (N/m^2)$	2,30	3.16	3.95	4.72	5.38
$L (m)$	6.56	6.56	6.56	6.56	6.56
$l_i (m)$	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
$l_s (m)$	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
$P_{zi} \cdot 10^4 (N/m^2)$	12.10	12.84	13.55	14.25	14.80
$P_{zs} \cdot 10^4 (N/m^2)$	10.19	10.26	10.34	10.40	10.46

On prend sur les caractéristiques expérimentales de l'air-lift $Q_e = f(Q_a)$ trois points correspondant aux trois (03) régimes de travail :

1. le régime de travail minimal.
2. le régime de travail optimal.
3. le régime de travail maximal.

Pour ces régimes de travail, on détermine six (06) vitesses du mouvement du mélange gaz-liquide :

- vitesse minimale inférieure : $v_{m \text{ inf}}(L)$.
- vitesse optimale inférieure : $v_{m \text{ inf}}^{\text{opt}}$
- vitesse maximale inférieure : $v_{m \text{ inf}}^{\text{max}}$.

— vitesse minimale supérieure : $v_{m \text{ sup}}^{\text{sup}}$.

— vitesse optimale supérieure : $v_{m \text{ sup}}^{\text{opt}}$.

— vitesse maximale supérieure : $v_{m \text{ sup}}^{\text{max}}$.

Exemple de calcul: de la courbe $Q_e = f(Q_a)$, on relève Q_e et Q_a correspondant à $\alpha = 0.8$, on a :

$$1. v_{m-l}^{\text{min}} = \frac{Q_{a \text{ min}} \cdot P_a}{P_a(i) \cdot S} + \frac{Q_{e \text{ min}}}{S} = \frac{(4 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^5}{14,8 \cdot 10^4 \cdot 0,005} + \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{0,005}$$

$$v_{m-l}^{\text{min}} = 0,64 \text{ m/s.}$$

$$2. v_{m-l}^{\text{min}} = \frac{Q_{a \text{ min}} \cdot P_a}{P_a(s) \cdot S} + \frac{Q_{e \text{ min}}}{S} = \frac{(4 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^5}{10,46 \cdot 10^4 \cdot 0,005} + \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{0,005}$$

$$v_{m-l}^{\text{min}} = 0,86 \text{ m/s.}$$

$$3. v_{m(i)}^{\text{opt}} = \frac{Q_a^{\text{opt}} \cdot P_a}{P_a(i) \cdot S} + \frac{Q_e^{\text{opt}}}{S} = \frac{(9,8 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^5}{14,8 \cdot 10^4 \cdot 0,005} + \frac{1,8 \cdot 10^{-3}}{0,005}$$

$$v_{m(i)}^{\text{opt}} = 1,68 \text{ m/s.}$$

$$4. v_{m(s)}^{\text{opt}} = \frac{Q_a^{\text{opt}} \cdot P_a}{P_a(s) \cdot S} + \frac{Q_e^{\text{opt}}}{S} = \frac{(9,8 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^5}{10,46 \cdot 10^4 \cdot 0,005} + \frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{0,005}$$

$$v_{m(s)}^{\text{opt}} = 2,23 \text{ m/s.}$$

$$5. v_{m(i)}^{\text{max}} = \frac{Q_a^{\text{max}} \cdot P_a}{P_a(i) \cdot S} + \frac{Q_a^{\text{max}}}{S} = \frac{(15 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^5}{14,8 \cdot 10^4 \cdot 0,005} + \frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{0,005}$$

$$v_{m(i)}^{\text{max}} = 2,52 \text{ m/s.}$$

$$6. v_{m(s)}^{\text{max}} = \frac{Q_a^{\text{max}} \cdot P_a}{P_a(s) \cdot S} + \frac{Q_e^{\text{max}}}{S} = \frac{(15 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^5}{10,46 \cdot 10^4 \cdot 0,005} + \frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{0,005}$$

$$v_{m(s)}^{\text{max}} = 3,36 \text{ m/s.}$$

Donc, en faisant le même calcul pour d'autres valeurs de α , nous obtenons le tableau de vitesses suivant :

α	0.35	0.50	0.60	0.70	0.80
$v_{m(i)}^{\min}$ (m/s)	2.85	1.63	0.92	0.73	0.64
$v_{m(s)}^{\min}$ (m/s)	4.02	2.29	1.23	1.01	0.86
$v_{m(i)}^{\text{opt}}$ (m/s)	3.25	2.87	2.71	1.96	1.68
$v_{m(s)}^{\text{opt}}$ (m/s)	4.57	3.99	3.70	2.63	2.23
$v_{m(i)}^{\max}$ (m/s)	3.40	3.20	3.05	2.62	2.52
$v_{m(s)}^{\max}$ (m/s)	4.77	4.45	4.17	3.52	3.36

Ensuite nous faisons l'évaluation des structures en fonction du nombre de Froude, qui est le critère de similitude des processus quand les forces de pesanteur sont prédominantes. le nombre de Froude est donné par :

$$Fr = \frac{v_m^2}{g \cdot d}$$

Pour les six (06) valeurs des vitesses du mouvement du mélange gaz-liquide et pour différents α , nous avons :

α	0.35	0.50	0.60	0.70	0.80
$Fr_{\min}(i)$	10.41	3.4	1.08	0.68	0.50
$Fr_{\min}(s)$	20.7	7.32	1.93	1.3	0.94
$Fr_{\text{opt}}(i)$	13.50	10.50	9.40	4.90	3.60
$Fr_{\text{opt}}(s)$	26.70	20.40	17.55	8.87	6.37
$Fr_{\max}(i)$	14.80	13.10	11.90	8.80	8.14
$Fr_{\max}(s)$	29.17	25.38	22.29	15.90	14.50

Rappelons qu'il existe quatre (04) types de structures du mouvement de mélange gaz-liquide qui sont :

1. La structure d'émulsion.
2. La structure par colonnes successives où "bouchon".
3. La structure axiale.
4. La structure pulvérulente.

Sur la bases des recherches de plusieurs auteurs, on caractérisé les structures du mouvement de mélange gaz-liquide par le critère de similitude de Froude :

- $Fr < 80$: structures par colonnes successives où "bouchon".
- $90 < Fr < 120$: structures transitoires entre "bouchon" et "axiales".
- $120 < Fr < 200$: structures "axiales".
- $Fr > 200$: structures pulvérulentes.

Pour faire une comparaison avec les données de notre expériences, on se base sur les données de l'expérience faite par METREVELI pour l'air lift avec le diamètre de la conduite $d = 0.08 \text{ m}$ et de longueur $l > 16 \text{ m}$. Nous avons choisi les mêmes intervalles de α et de h d'où on dresse le tableau suivant:

α	0.35	0.50	0.60	0.70	0.80
$U_{m(i)}^{\min} \text{ (m/s)}$	4.42	2.54	1.42	1.11	0.9
$U_{m(s)}^{\min} \text{ (m/s)}$	14.20	6.34	2.93	1.96	1.5
$U_{m(i)}^{\text{opt}} \text{ (m/s)}$	5.08	4.40	4.07	2.86	2.42
$U_{m(s)}^{\text{opt}} \text{ (m/s)}$	15.88	14.8	8.25	5.00	3.81
$U_{m(i)}^{\max} \text{ (m/s)}$	5.33	4.94	4.58	3.83	3.60
$U_{m(s)}^{\max} \text{ (m/s)}$	16.59	12.00	9.21	6.72	6.00
$F_r(i)^{\min}$	25.04	8.27	2.59	1.60	1.04
$F_r(s)^{\min}$	257	51.00	11.00	4.90	2.80
$F_r(i)^{\text{opt}}$	33.08	24.80	21.20	10.50	7.50
$F_r(s)^{\text{opt}}$	323	148	87.25	32.05	18.60
$F_r(i)^{\max}$	36.40	31.20	26.90	18.80	16.60
$F_r(s)^{\max}$	352	184	108	57.8	46.15

les structures correspondantes à ces paramètres sont représentées par les schémas (Fig. G, H, I).

Comme nous voyons sur les figures (G, H, I) que la tendance générale pour tous les cas : c'est l'augmentation de la vitesse du mouvement le long de la conduite verticale pour tous les régimes minimaux de travail. Pour les régimes minimaux de travail et pour toute les valeurs de α , la structure de bouchon reste la même pour les deux positions de la conduite (inférieure et supérieure) (sauf pour $\alpha = 0.35$). Pour les régimes optimum de travail, la structure transversale est apparue pour la position supérieure de $\alpha = 0.6$, la structure axiale correspondante à $\alpha = 0.5$ pour la position supérieure de la conduite et la structure pulvérulente correspond à $\alpha = 0.35$ pour la position supérieure. Il faut remarquer que pour les régimes optimaux pour tous les α , sur les positions inférieures on observe la structure de "bouchon". Donc pour conserver cette structure, il faut augmenter la section de la conduite à la partie supérieure.

Pour les régimes maximum de travail, la structure du mouvement est presque semblable avec les régimes optimum avec quelques augmentation de la vitesse v_m et de f_{fr} .

faisons une même analyse d'après notre expérience :

1. L'immersion relative $\alpha = 0.35$ ($h = 2.3 \text{ m}$, $H = 4.26 \text{ m}$).

Sur la fig. (F) on représente la caractéristique du travail pour $\alpha = 0.35$ avec trois (03) points caractéristiques (I, II, III) du travail

minimale I, optimale II et maximale III du débit et avec différents débits spécifiques q (m^3/m^3). Sur les fig. (J, K, L) on représente les structures du mouvement observées pour deux positions : inférieure et supérieure correspondant aux mêmes régimes de travail (mini, opt. ou maxi) nous voyons que pour la position inférieure "i", la vitesse du mouvement du mélange $v_m = 2.85 \text{ m/s}$, le nombre de Froude $Fr = 10.4$ et le débit spécifique $q = 61 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ce qui nous donne la structure du mouvement par colonnes successives. En observant les structures pour le même régime de travail mais pour la position supérieure "s", on a :

$$v_m^{\text{min}} = 4.02 \text{ m/s} ; Fr_{\text{min}} = 20.7 ; q_s = 7.6 \text{ m}^3/\text{m}^3.$$

on constate que ces paramètres augmentent mais la structure du mouvement reste constante.

En augmentant le débit de l'air comprimé de $Q_a \approx 18 \text{ l/s}$ à $Q_a^{\text{opt}} \approx 22 \text{ l/s}$, le régime du travail change de point et devient un régime optimal (point II) avec les paramètres suivants :

— Pour la position "i" : $v_m^{\text{opt}} = 3.25 \text{ m/s} ; Fr^{\text{opt}} = 13.5 ; q_i^{\text{opt}} = 33 \text{ m}^3/\text{m}^3.$

— Pour la position "s" : $v_m^{\text{opt}} = 4.57 \text{ m/s} ; Fr^{\text{opt}} = 26.7 ; q_s^{\text{opt}} = 33 \text{ m}^3/\text{m}^3.$

Nous voyons sur la fig. (K) que la structure du mouvement reste constante par colonnes successives pour tous les deux positions.

En augmentant le débit de l'air comprimé de $Q_a^{\text{opt}} \approx 22 \text{ l/s}$

$Q_a^{\text{max}} \approx 24 \text{ l/s}$, nous obtenons le régime maximum du travail (point III)

avec les paramètres suivants (fig. L) :

— Position "i" : $v_m^{\max} = 3.4 \text{ m/s}$; $Fr^{\max} = 14.8$; $q_i^{\max} = 34 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

— Position "s" : $v_m^{\max} = 4.77 \text{ m/s}$; $Fr^{\max} = 29.17$; $q_s^{\max} = 34 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

on observe pour ce régime du travail, la structure du mouvement ne change pas et reste constante sur toute la caractéristique de travail (la structure observée est une structure par colonne successives ou "bouchons").

2. L'immersion relative $\alpha = 0.5$ ($h = 3.16 \text{ m}$, $H = 3.16 \text{ m}$) :

Sur la fig. (F) est représentée la caractéristique du travail pour $\alpha = 0.5$ avec trois (03) points caractéristiques (I, II, III) du travail avec différents débits spécifiques q (m^3/m^3). Sur les fig. (J, K, L) sont représentées les structures du mouvement observées pour les deux positions considérées ("i" et "s"), on observe pour :

— la position "i" : $v_m^{\min} = 1.63 \text{ m/s}$; $Fr^{\min} = 3.4$; $q_i^{\min} = 20 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

— la position "s" : $v_m^{\min} = 2.29 \text{ m/s}$; $Fr^{\min} = 7.32$; $q_s^{\min} = 20 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Pour les deux positions, la structure du mouvement observée est une structure par colonnes successives ou bien "bouchon" et qui reste constante le long de la conduite malgré l'augmentation de ces paramètres.

En augmentant le débit d'air comprimé de $Q_a \approx 11 \text{ l/s}$ à $Q_a^{\text{opt}} \approx 18 \text{ l/s}$, le régime du travail change de point et devient un régime optimal (II) avec les paramètres suivants :

— Position "i" : $v_m^{\text{opt}} = 2.87 \text{ m/s}$; $Fr^{\text{opt}} = 10.5$; $q_i^{\text{opt}} = 16 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

— Position "s" : $v_m^{\text{opt}} = 3.99 \text{ m/s}$; $Fr = 20.4$; $q_s^{\text{opt}} = 16 \text{ m}^3/\text{m}^3$

On constate que la structure du mouvement reste constante par colonnes successives "bouchon" pour les deux positions.

En augmentant le débit de l'air comprimé de $Q_a^{\text{opt}} = 18 \text{ l/s}$ au $Q_a^{\text{max}} = 22 \text{ l/s}$, nous arrivons au régime maximum du travail (point III) avec les paramètres suivants (fig. L) pour les positions :

— "i" : $v_m^{\text{max}} = 3.2 \text{ m/s}$; $Fr = 13.1$; $q_i^{\text{max}} = 16.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

— "s" : $v_m^{\text{max}} = 4.45 \text{ m/s}$; $Fr = 25.4$; $q_s^{\text{max}} = 16.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

On remarque que pour cet α , la structure du mouvement ne change pas et sur toute la caractéristique du travail reste constante (structure bouchon) pour tous les régimes de travail.

3. L'immersion relative $\alpha = 0.6$ ($h = 3.95 \text{ m}$, $H = 2.63 \text{ m}$).

Sur la fig. (F) est représentée la caractéristique du travail correspondant à l'immersion relative $\alpha = 0.6$ avec les trois (03) caractéristiques (I, II, III) du travail. Sur les fig. (J, K, L) on représente les structures du mouvement observées pour les deux positions inférieure et supérieure

Pour la position "i", on relève :

— $v_m^{\text{min}} = 0.92 \text{ m/s}$; $Fr^{\text{min}} = 1.08$; $q_i^{\text{min}} = 16.25 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

et de même pour la position "s" :

— $v_m^{\min} = 1.23 \text{ m/s}$; $Fr^{\min} = 1.93$; $q_s^{\min} = 16.25 \text{ m}^3/\text{m}^3$

Pour les deux positions, on observe toujours la structure du mouvement "bouchon".

En augmentant le débit de l'air comprimé de $Q_a^{\min} = 6 \text{ l/s}$ à $Q_a^{\text{opt}} = 15 \text{ l/s}$ c.à.d passage de régime du travail minimum au régime de travail optimum (point II) avec les paramètres suivants :

— Position "i" : $v_m^{\text{opt}} = 2.71 \text{ m/s}$; $Fr^{\text{opt}} = 9.4$; $q_i^{\text{opt}} = 5.6 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

— Position "s" : $v_m^{\text{opt}} = 3.7 \text{ m/s}$; $Fr^{\text{opt}} = 17.55$; $q_s^{\text{opt}} = 5.6 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

la structure reste constante c.à.d structure par colonne successive "bouchon" malgré l'augmentation de ces paramètres à la partie supérieure de la conduite.

En augmentant le débit de l'air comprimé de $Q_a^{\text{opt}} = 15 \text{ l/s}$ à $Q_a^{\max} = 19 \text{ l/s}$ c.à.d passage de régime optimal de travail au régime maximal de travail (point III) avec les paramètres suivants :

— Position "i" : $v_m^{\max} = 2.62 \text{ m/s}$; $Fr^{\max} = 8.8$; $q_i^{\max} = 9.85 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

— Position "s" : $v_m^{\max} = 3.52 \text{ m/s}$; $Fr^{\max} = 15.9$; $q_s^{\max} = 9.85 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

On observe une autre fois que la structure du mouvement ne change pas malgré le passage d'un régime à un autre, reste constante et on obtient toujours une structure par colonne successive "bouchon".

4. L'immersion relative $\alpha = 0.7$ ($h = 4.72 \text{ m}$; $H = 2.02 \text{ m}$) :

Sur la fig. (F) est reproduite la caractéristique du

travail correspondante à l'immersion relative $\alpha = 0.7$ avec les trois (03) points (I, II, III) caractéristiques du régime de travail (mini, opt, max) avec différents débits spécifiques q (m^3/m^3). Sur les fig. (J, K, L) sont reproduites les structures du mouvements observées pour les deux (02) positions. On observe que pour la :

- position "i" : $v_m^{\min} = 0.73 \text{ m/s}$; $Fr^{\min} = 0.68$; $q_i^{\min} = 10 \text{ m}^3/\text{m}^3$.
- position "s" : $v_m^{\min} = 1.01 \text{ m/s}$; $Fr^{\min} = 1.3$; $q_s^{\min} = 10 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

D'après le tableau de comparaison, la structure du mouvement est une structure "bouchon".

En augmentant le débit d'air comprimé de $Q_a^{\min} = 4 \text{ l/s}$ à $Q_a^{\text{opt}} = 10 \text{ l/s}$, on passe du régime de travail minimal au régime de travail optimal (point II) sur la fig. (F) avec les paramètres suivants :

- Position "i" : $v_m^{\text{opt}} = 1.96 \text{ m/s}$; $Fr^{\text{opt}} = 4.9$; $q_i^{\text{opt}} = 5.7 \text{ m}^3/\text{m}^3$.
- Position "s" : $v_m^{\text{opt}} = 2.83 \text{ m/s}$; $Fr^{\text{opt}} = 8.87$; $q_s^{\text{opt}} = 5.7 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

la structure reste toujours "bouchon".

En augmentant le débit de l'air comprimé de $Q_a^{\text{opt}} = 10 \text{ l/s}$ à $Q_a^{\max} = 15 \text{ l/s}$, on passe du régime optimum au régime maximum (point III) avec les paramètres suivants :

- Position "i" : $v_m^{\max} = 2.62 \text{ m/s}$; $Fr^{\max} = 8.8$; $q_i^{\max} = 6.7 \text{ m}^3/\text{m}^3$.
- Position "s" : $v_m^{\max} = 3.52 \text{ m/s}$; $Fr^{\max} = 15.9$; $q_s^{\max} = 6.7 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Malgré le passage d'un régime à un autre, la structure du mouvement

reste toujours constante c.à.d structure du mouvement "bouchon".

5. L'immersion relative $\alpha = 0.8$ ($h = 5.38$ m, $H = 1.345$ m):

Sur la fig. (F) on reproduit la caractéristique correspondante à l'immersion relative $\alpha = 0.8$ avec trois (03) points (I, II, III) caractéristiques du régime de travail (mini., opt., maxi.) du débit et avec différents débits spécifiques q (m^3/m^3). Sur les fig. (J, K, L) on représente les structures du mouvements observées pour les deux positions "i" et "s" qui correspondent aux mêmes régimes du travail (mini., opt., maxi.). On voit que pour la:

— position "i": $v_m^{min} = 0.64$ m/s; $Fr^{min} = 0.5$; $q_i^{min} = 7.5$ m^3/m^3 .

— position "s": $v_m^{min} = 0.86$ m/s; $Fr^{min} = 0.94$; $q_s^{min} = 7.5$ m^3/m^3 .

Ces données satisfont la condition qui permet d'avoir une structure du mouvement "bouchon".

le passage de régime minimal du travail au régime optimum du travail en augmentant le débit de l'air comprimé de $Q_a^{min} = 3$ l/s à $Q_a^{opt} = 10$ l/s (point II) avec les paramètres suivants:

— position "i": $v_m^{opt} = 1.68$ m/s; $Fr^{opt} = 3.6$; $q_i^{opt} = 4.5$ m^3/m^3 .

— position "s": $v_m^{opt} = 2.23$ m/s; $Fr^{opt} = 6.37$; $q_s^{opt} = 4.5$ m^3/m^3 .

On obtient toujours une structure du mouvement "bouchon".

et le passage de régime optimum au régime maximum de travail en augmentant le débit d'air comprimé de $Q_a^{opt} = 10$ l/s à $Q_a^{max} = 16$ l/s

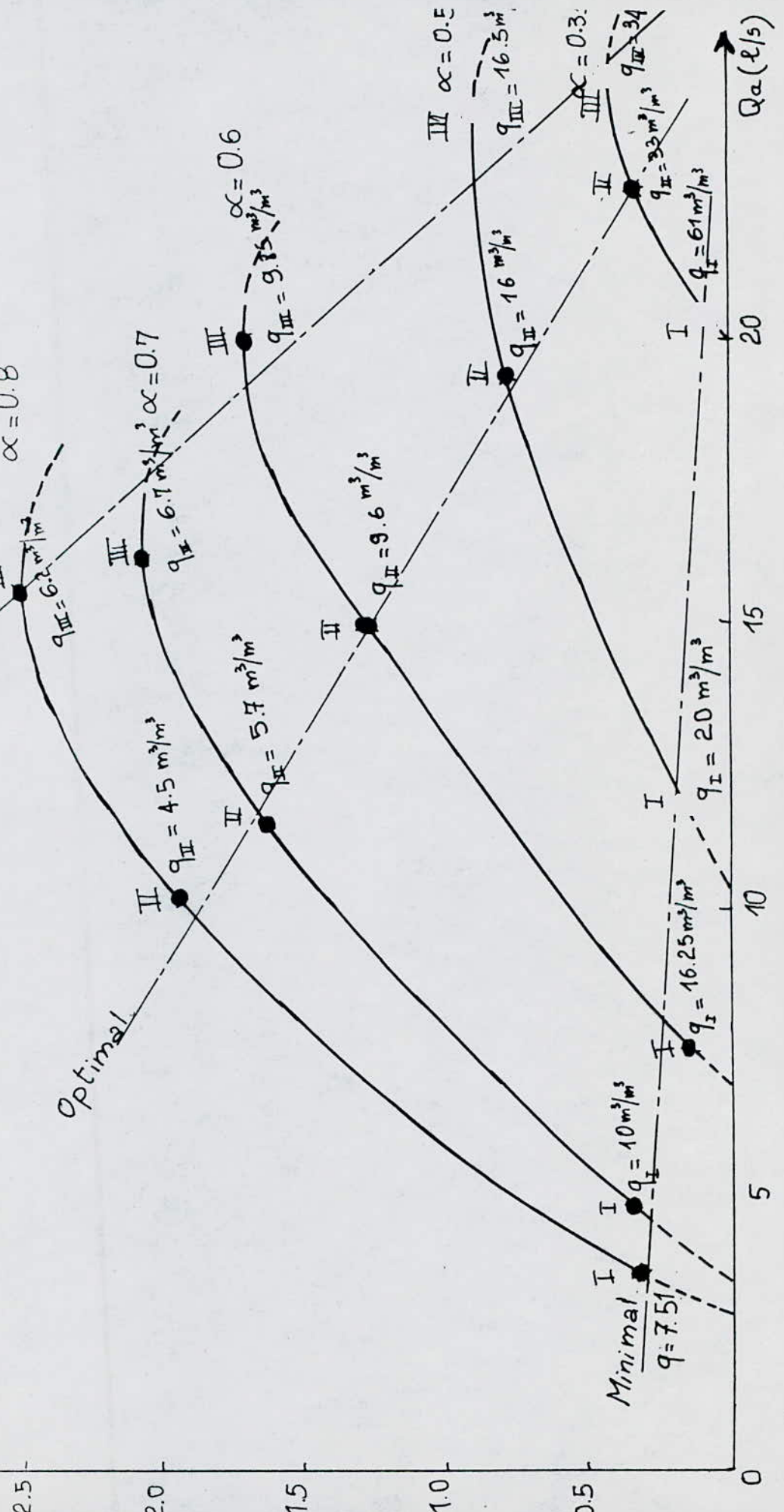
(point III) avec les paramètres suivants :

— position "i": $v_m^{\max} = 2.52 \text{ m/s}$; $Fr^{\max} = 8.14$; $q_i^{\max} = 6.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

— position "s": $v_m^{\max} = 3.36 \text{ m/s}$; $Fr^{\max} = 14.5$; $q_s^{\max} = 6.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Pour ce dernier régime de travail, on obtient toujours une structure du mouvement "bouchon" pour les deux positions "i" et "s".

Fig. F: Variation du débit liquide en fonction du débit d'air pour un système: D'AIR-LIFT COURT
diamètre de: 0.08 m.



— Dépendance universelle de q et Q_e dans les régimes optimaux de travail :

Ces dépendances sont obtenues pour l'air-lift qui satisfont les relations suivantes :

$$\frac{L}{d} \geq 40 \dots\dots\dots 50$$

Considérons les données expérimentales (Tableau 1) des air-lift courts et cherchons les dépendances suivantes :

$$q = f(h, \alpha, d) \dots\dots\dots 51$$

$$Q_e = f(h, \alpha, d) \dots\dots\dots 52$$

Le débit spécifique q est un paramètre très important technico-économique du travail d'air-lift car il détermine des quantités énergétiques sur le mouvement du liquide. Dans chaque air-lift, ce paramètre est variable en fonction du régime de fonctionnement. On prend le débit spécifique pour le régime optimal de l'air-comprimé aux conditions normales ($t_0 = 20^\circ\text{C}$, $P_0 = 10^5 \text{ Pa}$).

Pour déterminer la dépendance (51) du paramètre caractéristique, nous prendrons une quantité d'énergie l'unité de mètre cube de liquide sur un déplacement de 1 m de longueur.

Par hypothèse, le processus de dilatation de l'air

Comparaison des résultats expérimentaux et théoriques (Tableau 1)

d(m)	h(m)	α	q_r	q_c	Er.q	Q_{Lr}	Q_{Lc}	Er.Q
0.100	7.670	0.415	5.88	7.31	0.20	23.04	24.71	0.07
0.100	6.670	0.360	9.00	9.64	0.07	20.16	20.75	0.03
0.150	6,500	0.570	2,32	3.48	0,33	65.16	100,59	0,35
0,150	5,000	0.400	6.24	7.17	0.13	39.96	66,65	0,40
0.150	3.700	0,330	10.70	10.39	0.03	30.25	52.73	0.43
0,150	3,850	0,400	7,20	6,85	0,05	40,32	67,39	0,40
0,150	7,000	0,350	8,10	10,38	0,22	42,72	54,88	0,22
0,150	4,590	0,235	19,00	22,73	0,16	26,69	32,60	0,18
0,150	6,770	0,330	8,00	11,71	0,32	39,96	50,84	0,21
0,150	6,580	0,337	8,10	11,10	0,27	42,72	52,42	0,19
0,150	5,700	0,292	11,80	14,72	0,20	31,68	43,58	0,27
0,150	7,750	0,397	6,06	8,08	0,25	57,24	64,27	0,11
0,150	8,000	0,400	4,70	8,02	0,41	46,08	64,74	0,29
0,150	6,000	0,492	4,05	4,73	0,14	42,48	85,13	0,50
0,150	4,600	0,230	19,00	23,84	0,20	26,69	31,60	0,16
0,250	4,320	0,188	47,50	72,53	0,35	58,32	53,33	0,09
0,250	6,200	0,300	12,10	14,14	0,14	90,00	161,19	0,44
0,250	6,200	0,376	7,25	8,60	0,16	140,40	218,17	0,36
0,250	6,200	0,600	2,25	3,08	0,27	122,40	382,97	0,68
0,250	8,000	0,500	3,44	4,91	0,30	150,72	306,81	0,51

est une expansion isothermique, on peut dire que la quantité d'énergie dépend de h , d et α . Pour simplifier les calculs, on suppose que la quantité d'énergie reste constante sur toute la longueur de la conduite du mélangeur au séparateur :

$$E_s = \frac{E}{L} = \alpha \cdot \frac{E}{h} \dots\dots\dots 53$$

Dans l'hypothèse d'une expansion isothermique de l'air, le taux d'énergie d'entrée nécessaire au refoulement est calculée comme suit :

$$E = q \cdot P_a \cdot \ln\left(\frac{P_a + \rho g h}{P_a}\right) \dots\dots\dots 54$$

D'après les données (Tableau 1), on construit un champ de corrélation dont les coordonnées sont :

$$\ln\left[E_r \cdot \frac{(\ln h)^{0.4}}{d^{0.2}}\right] = f(\alpha)$$

représenté par le graphe (D'). D'après l'allure de la courbe, on fait une approche de la forme de la courbe par deux fonctions : l'une linéaire et l'autre quadratique dont les équations sont de la forme :

— Dépendance linéaire :

$$\ln\left[E_r \cdot d^{-0.2} \cdot (\ln h)^{0.4}\right] = 11,916 - 3,6\alpha \dots\dots 55$$

— Dépendance quadratique :

$$\ln\left[E_r \cdot d^{-0.2} \cdot (\ln h)^{0.4}\right] = 12,1 - 4,6\alpha + 1,3\alpha^2 \dots\dots\dots 56$$

En substituant les équations (55) et (56) par l'expression suivante: $(\gamma \cdot E\gamma)$, nous obtenons les dépendances pour le débit spécifique q :

$$q = h \cdot d^{0.2} \cdot (\ln h)^{-0.4} \cdot \left[P_a \cdot \alpha \cdot \ln \left(1 + \frac{\rho \cdot q \cdot h}{P_a} \right) \right]^{-1} = \dots\dots\dots 57$$

$$q = h \cdot d^{0.2} \cdot (\ln h)^{-0.4} \cdot \left[P_a \cdot \alpha \cdot \ln \left(1 + \frac{\rho \cdot q \cdot h}{P_a} \right) \right]^{-1} = \dots\dots\dots 58$$

$$= \exp(121 - 4.6\alpha + 1.3\alpha^2) \dots\dots\dots 58$$

En comparant (57) et (58) avec les données réels, on peut conclure que l'expression (58) est plus juste vu que l'erreur maximum est acceptable de l'ordre de 20%, on recommande comme formule de base, l'expression 58

La détermination du débit liquide Q_e est le problème principal de calcul. D'après les données expérimentales (Tableau 1) on peut avoir la dépendance (52) avec une relation donnant le rapport entre la masse volumique du liquide ρ et celle du mélange (air-comprimé, liquide). La masse volumique du mélange (air-comprimé, liquide) est déterminée, d'après des données bibliographiques (11), comme suit:

$$\rho_m = \rho \cdot \left[1 + \alpha \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot \rho \cdot q \cdot h}{P_a} \right) \right]^{-1} \dots\dots\dots 59$$

D'après les données expérimentales (Tableau 1), on construit un champ de corrélation dont les points se disposent plus proche dans

l'équation (63) nous ^{donne} une possibilité de déterminer le débit spécifique optimal q_{opt} et le diamètre de la conduite de l'air-lift d .

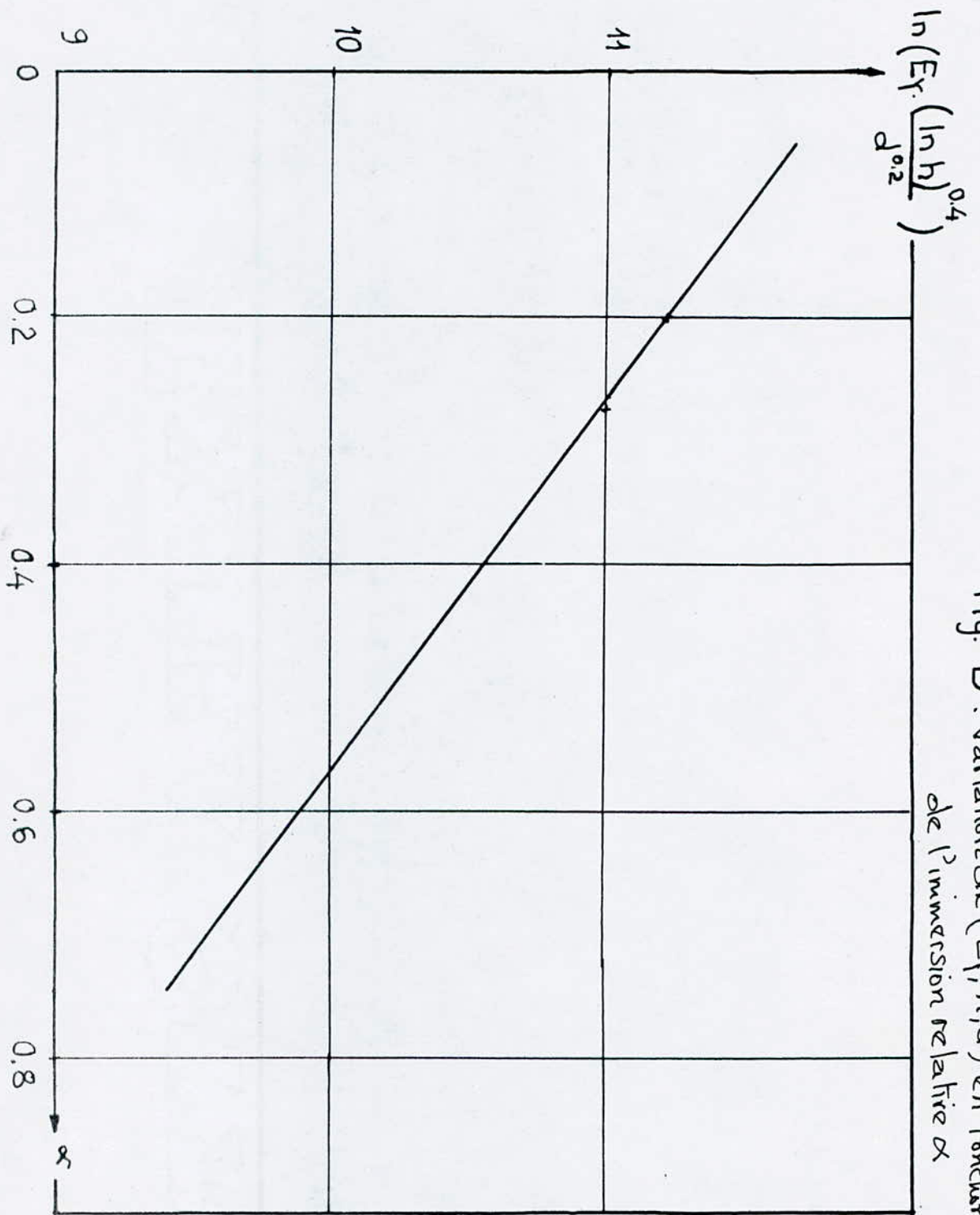


Fig. D : variation de (Er, h, d) en fonction de l'immersion relative α

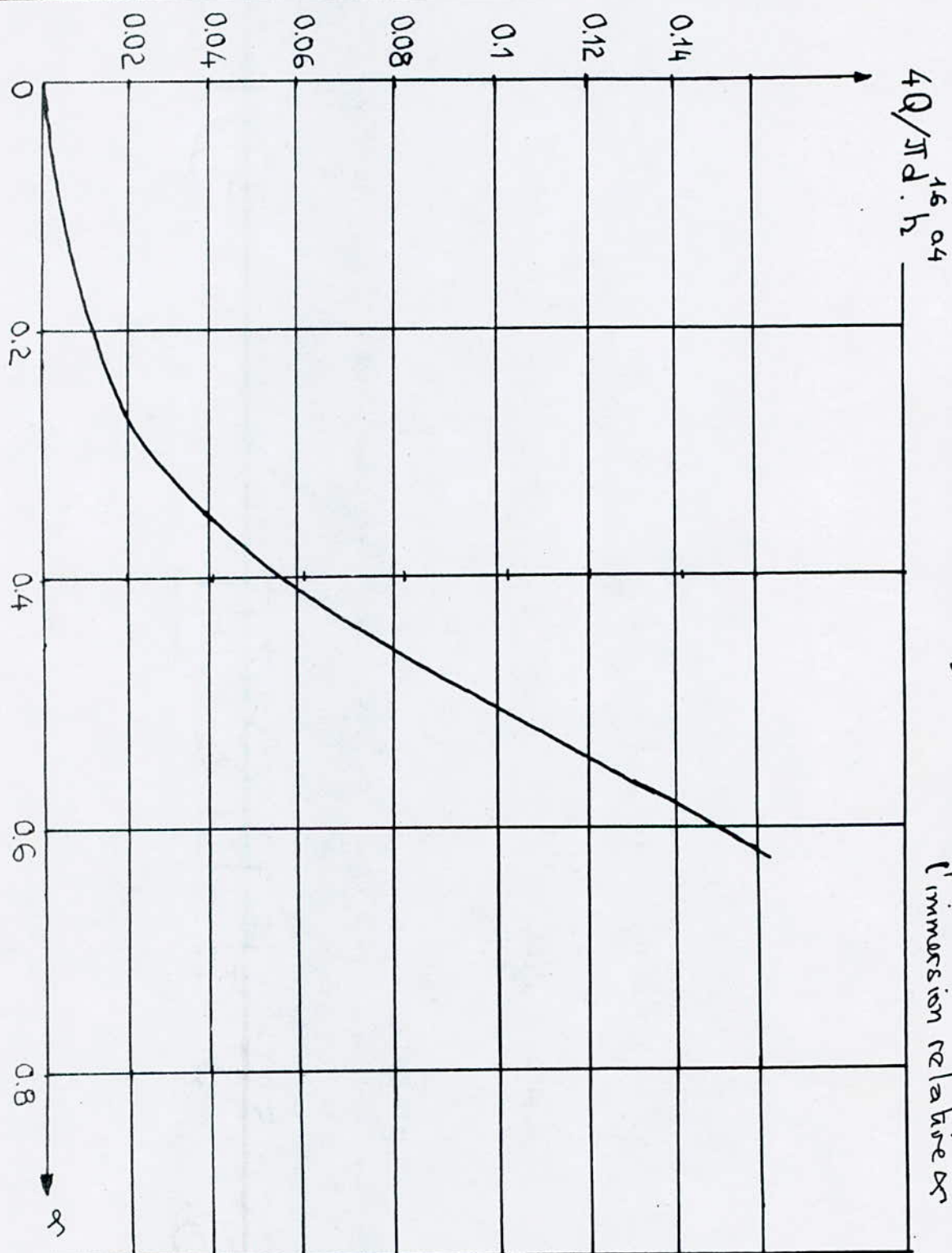


Fig. E : variation (Q, d, h) en fonction de l'immersion relative x

— Variation de la fonction $\ln \left[E_{\gamma} \cdot \frac{(\ln h)^{0.4}}{d^{0.2}} \right]$ en fonction de l'immersion relative α :

D'après les données de comparaison des résultats expérimentaux et théoriques (Tableau 1), on a tracé la dépendance

$$\ln \left[E_{\gamma} \cdot \frac{(\ln h)^{0.4}}{d^{0.2}} \right] = f(\alpha) \quad (\text{Fig. D}')$$

pour des débits spécifiques réels et théoriques. D'après les données obtenues par notre expérience, on trace la même dépendance pour avoir un aperçu sur son allure en dressant le tableau des valeurs suivant pour les débits optimaux de l'air lift: (Voir Fig. D'').

α	0,35	0.50	0.60	0.70	0.80
$h(m)$	2,30	3.16	3.95	4.72	5.38
$d(m)$	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
$10^3 \cdot Q_e (m^3/s)$	0.36	0.87	1.60	1.72	1.88
E_{γ}	474680.85	306822.37	217328.98	185651.31	176645.24
q	66,66	22.98	11.06	6.97	5.21
$\ln \left[E_{\gamma} \cdot \frac{(\ln h)^{0.4}}{d^{0.2}} \right]$	13,5	13.20	12.92	12.81	12.79

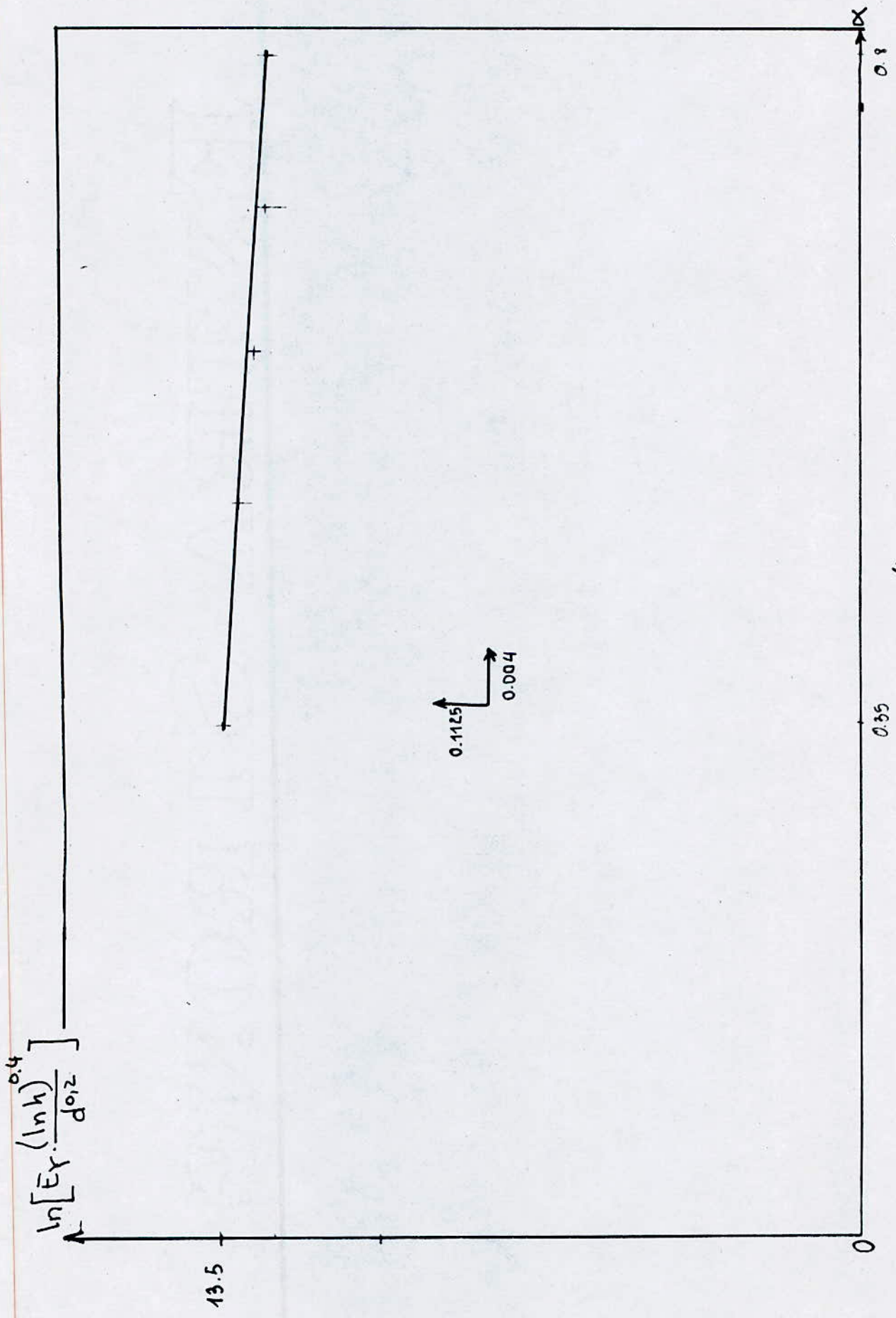


fig. D'' : variation de (E_r, h, d) en fonction de l'impression relative α .

— Variation de la fonction $\frac{4 \cdot Q}{\pi d^{1.6} h^{0.4}}$ en fonction de l'immersion

relative α :

D'après les données de comparaison des résultats expérimentaux et théoriques (Tableau 1), on a tracé la dépendance :

$$\frac{4 \cdot Q}{\pi d^{1.6} h^{0.4}} = f(\alpha) \quad (\text{fig. E}).$$

pour les débits spécifiques réels et théoriques. D'après les données obtenues par notre expérience, on trace la même dépendance pour avoir un aperçu sur son allure en dressant le tableau des valeurs suivant pour les débits optimaux de l'air lift (Voir fig. E').

α	0,35	0,50	0,60	0,70	0,80
$h(m)$	2,30	3,16	3,95	4,72	5,38
$d(m)$	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
$Q_e \times 10^3 (m^3/s)$	0,36	0,87	1,60	1,72	1,88
E_T	47468085	30688257	21732896	18565131	17664584
$q (m^3/s)$	66,66	22,78	11,06	6,97	5,21
$\frac{4Q}{\pi d^{1.6} h^{0.4}}$	0,019	0,040	0,0670	0,067	0,069

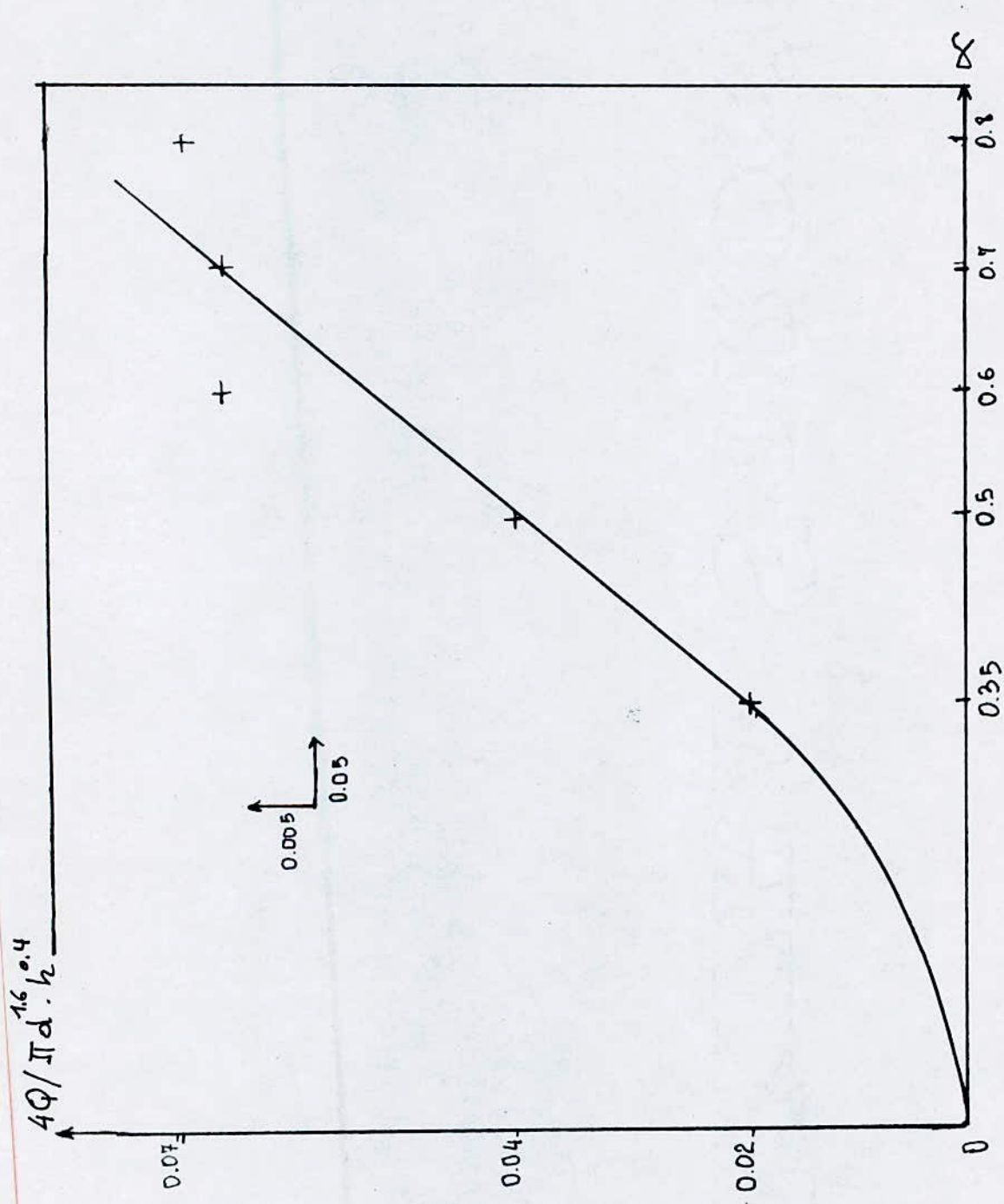


fig. E': variation de (Q, d, h) en fonction de l'immersion relative α .

En analysant les résultats d'expérience obtenus pour le système de pompage par air lift court pour les différentes immersions relatives α , nous pouvons conclure que :

1. la structure du mouvement de mélange gaz-liquide reste constante sur toutes les caractéristiques $Q_e = f(Q_a)$ des régimes de travail (mini., opti., maxi.) et sur toute la longueur de la conduite verticale pour les deux positions (inférieure et supérieure). On observe toujours, malgré quelques modifications de vitesse de mélange et de nombre de similitude de Froude, la structure du mouvement par colonnes successives ou bien "bouchon".

2. L'évaluation des structures observées en fonction du nombre de Froude qui est le critère de similitude des processus quand les forces de pesanteur sont prédominantes montre que le nombre de Froude ne dépasse pas 30 c.à.d beaucoup plus inférieur à la limite 80 qui correspond au passage de la structure "bouchon" à la structure "axiale".

3. Donc, on peut prendre la valeur du coefficient d'agissement k_m pour tous les régimes d'exploitation des air-lift courts comme :

$$k_m \approx 1 \text{ (donné par TELETOVE).}$$

qui nous facilite de bien intégrer l'équation différentielle du mouvement du mélange gaz-liquide

4. L'exactitude des données expérimentales et les résultats des autres Auteurs est similaire. Donc la recherche élaborée est correcte appuyée par une recherche expérimentale bien connue.

5. les difficultés d'obtenir des structures pour l'immersion relative $\alpha \approx 0.35$ avec les données bibliographiques données par METREVELI affirment que la longueur d'air-lift joue un rôle prépondérant dans le système considéré.

6. Variation : $Q_e = f(Q_a)$.

Pour une immersion absolue h et relative α données on constate que le débit liquide Q_e commence à monter lorsque le débit d'air Q_a atteint une certaine valeur supérieure à celle correspondante au barbotage. En augmentant le débit d'air, le débit liquide augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale puis diminue. Ceci s'explique par le fait que des grands débits d'air bouchent le passage de l'eau et rendant son déplacement plus difficile et aussi à l'apparition des pertes de charge par frottement et par glissement.

D'après la caractéristiques énergétique de l'air lift on remarque que le rendement maximal du système ne correspond pas au débit liquide maximum mais il correspond au débit liquide optimal qui est obtenu par le tracé d'une tangente à la courbe $Q_e = f(Q_a)$.

7. Variation : $q = f(\alpha)$.

8. Variation de :

1. la perte d'énergie due au mélange gaz-liquide :

$$B = a'a \cdot Q_m^2 = f(q).$$

le coefficient de résistance $a'a$ est un coefficient qui englobe toutes les pertes de charges qui peuvent être occasionnées tout le long de la conduite de refoulement.

D'après la courbe $B = a'a \cdot Q_m^2 = f(q)$, on peut remarquer que pour des immersions relatives (α) importantes la hauteur de refoulement est très faible et la perte d'énergie due au mélange gaz-liquide est faible pour des valeurs faibles de débit spécifique q et pour des grandes valeurs de débits spécifiques correspond des grandes de perte d'énergie due au mélange gaz-liquide. En effet lorsque la quantité d'air injectée dans le mélangeur est faible, les pertes d'énergie due au mélange gaz-liquide le long de la conduite de refoulement sont faibles par contre lorsque la quantité d'air est importante, donc le débit spécifique q augmente, la configuration bouchon se perturbe et on aura l'apparition de la configuration annulaire où les pertes d'énergie par frottements et par glissements sont très importantes.

2. la perte d'énergie du liquide seul :

$$B' = a'a \cdot Q_l^2 = f(q).$$

D'après la courbe $B' = a \cdot Q_e^2 = f(q)$, on peut remarquer que la perte d'énergie du liquide seul augmente avec la diminution du débit spécifique q et que les valeurs obtenues à partir de l'expérience sont acceptables vu que la perte d'énergie est très petite. La courbe $B' = a \cdot Q_e^2$ est de la forme hyperbolique qui confirme celle obtenue par les résultats expérimentaux et théoriques (Tableau 1). (Voir fig. C, Page 23).

9. Variation de :

1. la dépendance : $\ln \left[E_r \cdot \frac{(\ln h)^{0.4}}{d^{0.2}} \right] = f(\alpha)$. (fig. D) et (fig. D')

D'après les résultats expérimentaux et théoriques (Tableau 1), on a tracé cette dépendance pour des débits spécifiques réels et théoriques et d'après les résultats obtenus par notre expérience on trace la même dépendance pour des débits optimaux, on remarque qu'elle a la même allure que celle obtenue par les résultats théoriques et confirme ainsi la théorie.

2. la dépendance : $\frac{4 \cdot Q}{\pi d^{1.6} h^{0.4}} = f(\alpha)$ (fig. E) et (fig. E')

On remarque qu'elle a la même allure que celle obtenue par d'autres expériences et ceci confirme la théorie. On remarque que cette dépendance a l'unité de vitesse (on peut dire que cette dépendance est une fonction de vitesse en dépendance de l'immersion relative α).

D'après les courbes tracées à partir des résultats expérimentaux on remarque que : en se référant aux courbes théoriques tracées au paravent (fig. D') et (fig. E'), on peut dire que les résultats expérimentaux (obtenus par notre expérience) sont assez proches de celles obtenues par les calculs théoriques, ce qui explique le fait que notre expérience est plus proche de la pratique autrement dit la courbe (fig. E'') est en général plus con fondue à celle tracée théoriquement (fig. E') et de la même pour les deux autres courbes (D' et D'').

Dans la présente étude, on vient de faire connaître une nouvelle technologie : Pompage par air-lift.

Ce système permet de résoudre plusieurs problèmes posés dans la pratique, tant dans les domaines hydrauliques que dans les domaines industriels, ce système sera sans doute le plus choisi parmi tant d'autres vu sa facilité de construction, son revenu économique en puissance fournie et durabilité. C'est un système simple et robuste avec de rares pannes et une maintenance simple.

Les richesses minières s'infiltrent et s'écoulent dans les couches terrestres souterraines, pour s'échapper et se déposer au fond des océans, dans un avenir proche aucune richesse naturelle ne sera prise des mines ni en surface (actuellement les pays occidentaux s'approchent de cette vérité) il ne reste qu'à pomper ces précieux solides et cet or noir des océans, la est le problème puisque aucune pompe ni aucun système connus ne pourrait faciliter cette tâche, sauf l'AIR-LIFT puisque on a réussi à faire fonctionner ce système en vrai grandeur (air lift étagé) dans l'océan pacifique à 4500 m de profondeur, c'était un pompage triphasique avec une section variable (Houille Blanche 6/7.1979).

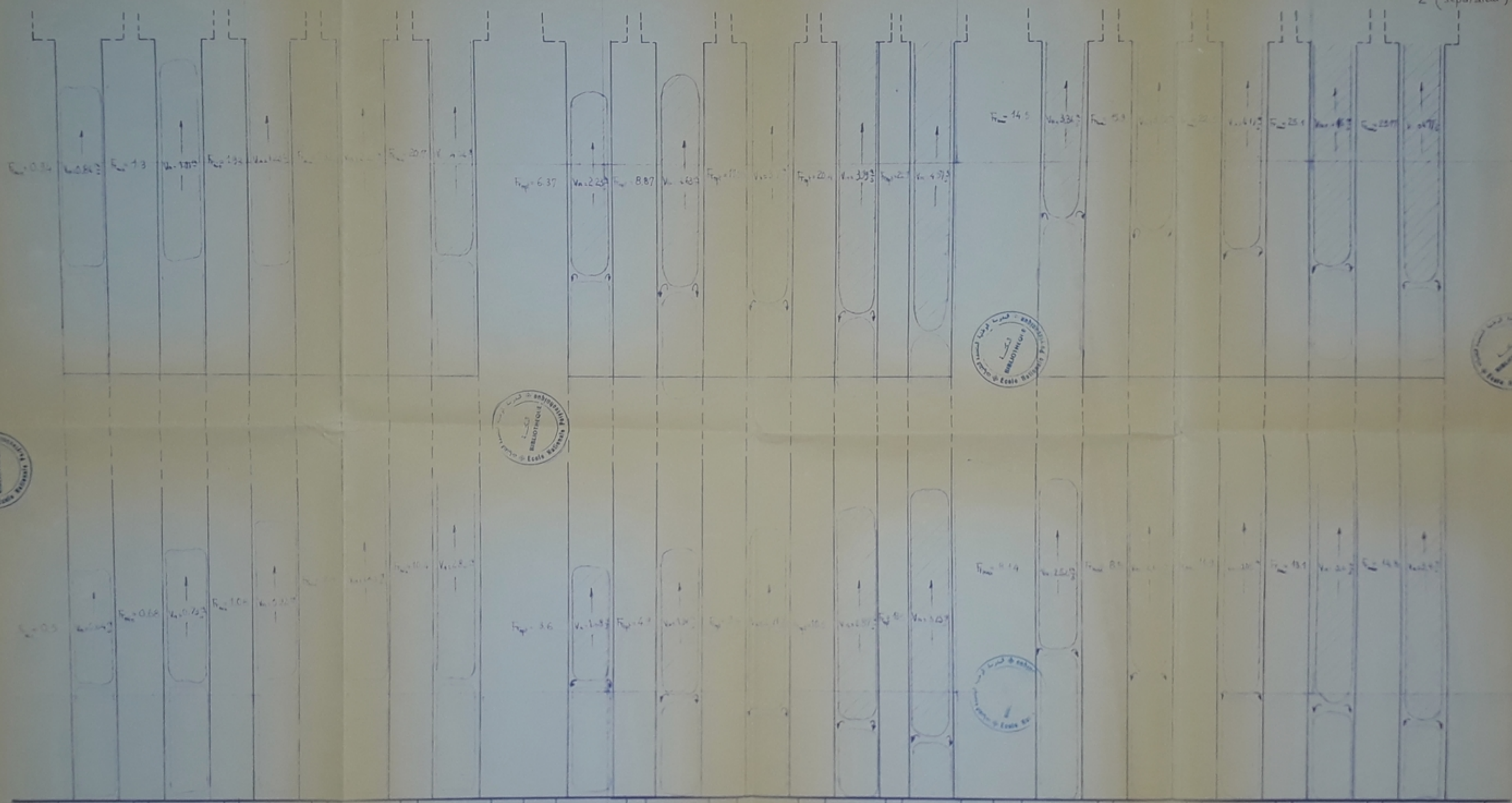
À la lumière des résultats obtenus, nous émettons le vœu d'approfondir les recherches dans cette direction.

BIBLIOGRAPHIE

- 1_ P.P. ARGOUNOV, Recherches du travail d'air lift et son calcul - Moscou 1953 -
- 2_ A.A. ARMAND, Recherche du mouvement de mécanisme du mouvement du mélange dans la conduite verticale - Moscou 1950 -
- 3_ V.G. HAÏER, La théorie des hydrau compresseurs - Donesk 1953 -
- 4_ V.S. COSTANDA, Calcul de conduite d'air lift - Donesk 1965 -
- 5_ V.S. COSTANDA, Les structures cinématiques du mélange dans air lift - Donesk 1961 -
- 6_ COSTERIN, Recherche des résistances hydrauliques de mouvement gaz - liquide - Moscou 1949 -
- 7_ A. CRILOV, Exploitation des gisements pétroliers - Moscou 1949 -
- 8_ V. METREVELI, Recherche du travail de modèle d'air lift - Tbilissi 1967 -
- 9_ V. METREVELI, Caractère du mouvement du mélange à l'air lift - Tbilissi 1967 -

Position Supérieure

Position Inférieure



Régime Minimal

Fig. J

Régime Optimal

Fig. K

Régime Maximal

Fig. L

1 (mélangeur)

STRUCTURE DU MOUVEMENT DANS LES CONDUITES EXPERIMENTALES DE L'AIR LIFT COURT POUR DIFFERENTS REGIMES DE TRAVAIL (regime mini, opt, max) POUR DIFFERENTS α ET DIFFERENTES POSITIONS

(Conduite en verre de diamètre $D=0.08m$ et de longueur $L=16.56m$)

Position Supérieure S.

Position Inférieure I.

