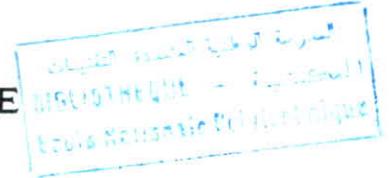


ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GENIE HYDRAULIQUE



PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION D'UN DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT

S U J E T

ETUDE TECHNIQUE
DE
L'AIR LIFT

Proposé par :

Mr. Metreveli

Etudié par :

Sehboub M.

Touahri B.

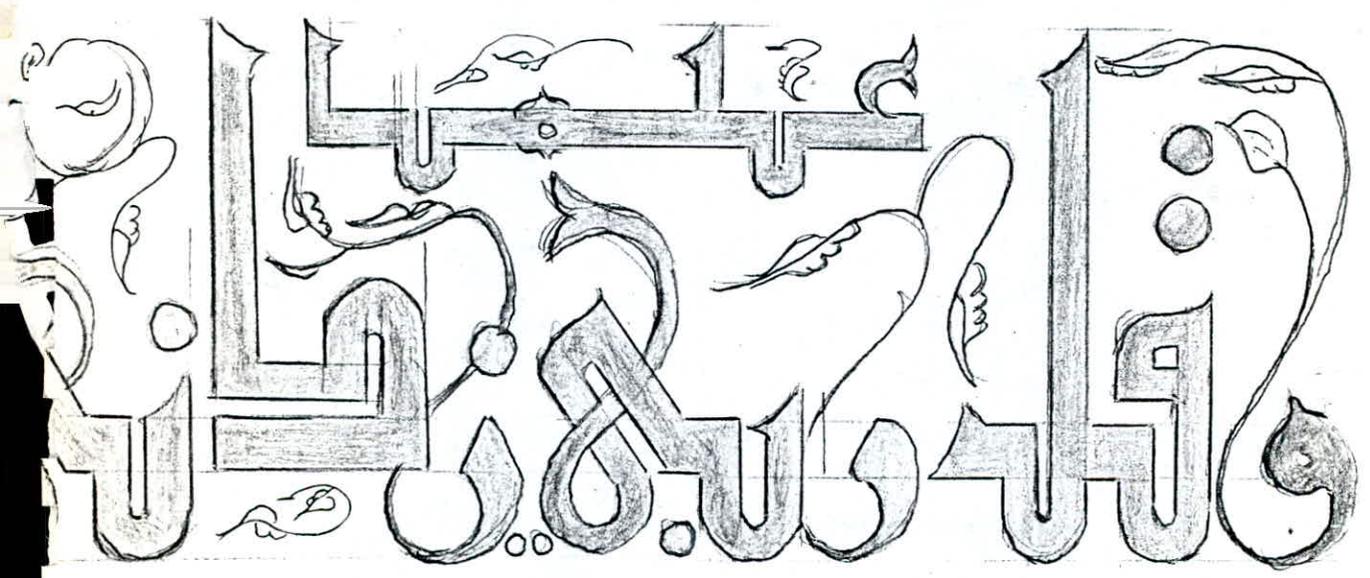
Dirigé par :

Mrs. Metreveli et Messahli

PROMOTION : JUIN 1987

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات -
المكتبة - BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ
الرَّحِيمِ



صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمُ

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

EGOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

EPARTEMENT : HYDRAULIQUE

PROMOTEURS : Mrs. METREVELI.V / MESSAHLI.R

ELEVES INGENIEURS : TOUAHRI Boudjemaa

SEHBOUB Mourad.

وزارة التعليم العالي
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

مصلحة : السري.

موجه : د/ مـتريفلي ، م/ مساحلي.

التلميذين المهندسين :

- طواهري بوجمعة

- سـحبـوب مـراد.

الموضوع : دراسة تقنية لجهاز ضخ بمدحاة .

الملخص : جريان السوائل في القنوات، والمحمل غالبا بالشوائب يطرح عدة مشاكل (انسداد المضخات والأنابيب) وتضطرب مجمل القنوانين المطبقة على السوائل أحادية الصنف ، المتجانسة .

وتجنبنا لهذا يستخدم جهاز يستعمل الهواء المضغوط كمصدر للطاقة ، لدفع الخليط (سائل ، غاز ، عناصر صلبة...) بواسطة مدحات للهواء .

واعتمادا على النتائج التجريبية والمعادلات النظرية تكون عملية اختيار وتصميم الجهاز بطريقة أفضل وأمثل ، هدفنا في هذه الأطروحة .

Sujet : Etude technique de l'air-lift.

Résumé : Le présent mémoire, propose une étude du système d'AIR-LIFT en écoulement diphasique (air-eau) et triphasique (air-eau-solides).

On trace les différentes caractéristiques énergétiques du système et par une interprétation physique des résultats graphiques (expérimentaux et théoriques), nous concevons un dimensionnement optimal de l'air-lift.

Subject : TECHNICS STUDIES OF AIR-LIFT.

Abstract : This present memorandum studies the AIR-LIFT system as two phases flow (air-liquid) and as tree phases flow (liquid-air-solids).

We draw a various energetics characteristics of the system and by an physical interpretation of graphics results (experimentals and theoriticals), we conceive the best and favorable dimension of air-lift.

DEDICACES

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

- à ma mère, à mon père et à ma grand-mère
- à mes frères et soeurs
- à tous mes amis
- à tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près
pour l'élaboration de ce projet.

Mourad SEHBOUB.

Je dédie ce travail

- à mes parents pour le sacrifice à mon égard
- à mes frères et soeurs
- à tous mes amis.

Boudjemâa TOUAHRI.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Monsieur METREVELI et Monsieur MESSAHLI, pour tous conseils et l'assistance qu'il nous ont apporté pendant toute l'élaboration de cette étude.

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

Nous tenons à remercier les membres de jury qui ont bien voulu nous honorer par leur présence.

Monsieur SEHBOUB Mourad

Monsieur TOUAHRI Boudjemâa.

- S O M M A I R E -

Chapitre 1 : INTRODUCTION, HISTORIQUE ET BUT.....	page 1
Chapitre 2 : NOTION D'ECOULEMENT DIPHASIQUE VERTICAL	page 5
Chapitre 3 : BASES THEORIQUES DE L'AIR-LIFT	page 15
Chapitre 4 : SCHEMAS HYDRAULIQUES DE L'AIR-LIFT	page 32
Chapitre 5 : CALCUL HYDRAULIQUE DE L'AIR-LIFT	page 36
Chapitre 6 : ELEMENTS CONSTRUCTIFS DE L'AIR-LIFT	page 51
Chapitre 7 : RESULTATS GRAPHES ET LEUR INTERPRETATION	page 56
Chapitre 8 : CONCLUSION	page 68
ANNEXE : PROGRAMMES INFORMATIQUES DE CALCUL DE L'AIR-LIFT.	

Une des directives des nouvelles technologies est le développement des transports par conduites (horizontales ou verticales), dans les dernières décennies, ce type de transport a connu une importance de plus en plus grande qui a correspondu à une augmentation croissante des quantités de produits mis en oeuvre et des consommations, faisant ressortir l'intérêt de ce développement.

Les transports hydrauliques dans ce cas est une des perspectives de ce développement, il s'agit du transport des corps solides par courant d'eau, transport de gaz ou du mélange eau-gaz ou encore eau-gaz-solide.

Les avantages de ce type de transport sont :

- continuité du processus
- simplicité de sa construction
- sûreté et stabilité du fonctionnement
- le travail demandé pour sa mise en marche et sa maintenance est minime
- assure un fonctionnement à long terme.

L'air-lift est représentant de cette nouvelle technologie, se compose d'un système de conduites, sans les éléments mobiles compliquant celui-ci, il utilise seulement l'énergie de l'air comprimé.

A l'échelle mondiale, spécialement dans les pays développés, beaucoup de travaux et expériences, pour étudier le système d'air-lift et d'étendre son domaine d'utilisation, sont en application.

Le système d'air-lift est examiné pour la première fois, lors de l'exploitation des gisements pétroliers :

- la phase primaire d'exploitation qui vient à la suite de la découverte, au cours de laquelle la production est assurée par la déplétion naturelle du gisement jusqu'à épuisement (on a compris alors que le pétrole contenu dans les roches réservoirs est refoulé par le biais d'un gaz comprimé, se trouvant dans le gisement, on dit que le gisement est à pression), ce gaz comprimé au fur et à mesure de sa dépression, véhicule le pétrole et le fait jaillir jusqu'à épuisement (ou décompression), la pression du gisement chute alors considérablement et la production aussi.

En comprenant ce processus de déplétion naturelle, les chercheurs pétroliers ont pu améliorer la production du brut, en utilisant le phénomène qui régit l'air-lift, (dans ce domaine, on l'appelle gaz-lift) c'est la deuxième phase d'exploitation

- la phase secondaire : où l'on met en oeuvre une injection de gaz dans le gisement pour maintenir la pression en place et conserver le rythme de production.

L'air-lift comme dispositif hydraulique, se manifeste dans plusieurs domaines, où l'application des procédés ordinaires et classiques deviennent impossibles, dans certains cas dangereux et dans des cas reviennent très coûteux.

Ces domaines sont tels que :

l'envasement des barrages où le taux de la vase atteint en général 43 à 80% du volume initial de la retenue, ainsi la durée de vie des barrages se trouve réduite, conduira à une exploitation imparfaite de celui-ci; les procédés classiques d'évacuation des sédiments, sont par exemple le dragage (utilisant soit une pelle mécanique, engin très lourd, reposant sur un bateau, soit des pompes de dragage où l'usure des parties de la pompe en contact avec le mélange (eau-solide) à refouler, étant considérable.

Un autre procédé, est de surelever la crête du barrage quand son volume se trouve très réduit, ceci coûterait plus cher que la construction d'un nouveau barrage, toutes ces opérations sont très coûteuses et entraînant des investissements très importants, l'air-lift est le procédé idéal d'évacuation des vases.

Dans l'industrie chimique, le refoulement des liquides agressifs (acides ou bases), et des liquides de forte viscosité (comme l'huile lourde, où les pertes d'énergie dues aux frottements sont considérables), nécessitent des pompes très spéciales et chères.

Donc l'air-lift, confirme son utilisation dans des domaines très variés et importants.

Pour bien entreprendre et comprendre les chapitres suivants, on a voulu dans ce chapitre introductif, présenter l'air-lift et son principe, d'une façon claire et simple, sous une expérience qui caractérisera le phénomène auquel il est assujéti.

Un tube de verre vertical est fermé à son extrémité inférieure et équipé à sa partie inférieure, des robinets A et B (fig. 1-1).

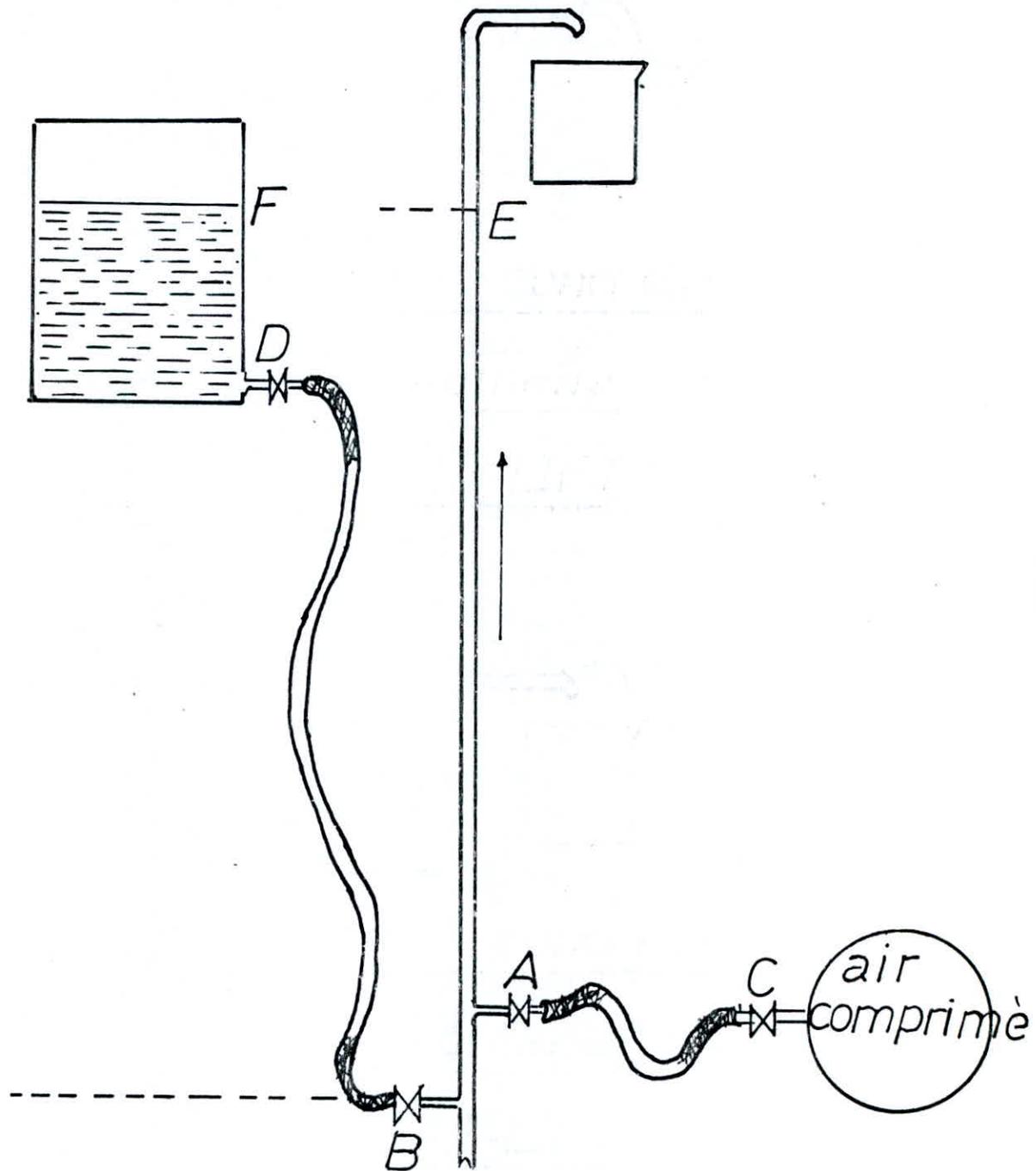
Le robinet A est relié d'un récipient contenant de l'air légèrement comprimé et équipé d'un robinet C.

Le robinet B est relié d'un récipient contenant de l'eau et équipé d'un robinet D.

Ce dernier récipient est placé de manière à ce que les robinets B et D étant ouverts, le niveau de l'eau dans le tube soit assez bas au dessous de l'extrémité supérieure de ce tube.

Ouvrons grand les robinets B et D.

fig.1.1 : Expérience concrétisant
le phénomène
d'AIR-LIFT



$$FB. \rho = BE'. \rho_m.$$

INTRODUCTION, HISTORIQUE ET BUT

Fermons le robinet A presque complètement de façon à ne laisser subsister qu'un faible passage.

Ouvrons le robinet C : l'air pénètre dans le tube et se mélange à l'eau en montant :

le niveau dans le tube monte, atteint l'extrémité supérieure de celui-ci, et le mélange air-eau se met à débiter.

En effet, le poids volumique du mélange air-eau étant inférieure à celui de l'eau, la colonne de fluide EB est devenue plus légère que la colonne FB; le niveau dans le tube est donc monté, et si le tube avait été assez long, se serait stabilisé en E' de telle façon que :

$$FB \cdot \rho = BE' \cdot \rho_m$$

Fermons maintenant presque complètement le robinet B de façon à ce que l'eau ne puisse passer que lentement dans le tube : le mélange air-eau devient très riche en air, et la quantité d'eau débitée au sommet du tube devient presque nulle; la consommation d'air nécessaire à la remontée de cette petite quantité d'eau devient très grande, et le rendement du système devient lamentable.

Il faut donc modifier le fonctionnement du système afin de le rendre efficace et rentable dans le cas d'une faible alimentation en eau.

Fermons le robinet C et attendons que le niveau de l'eau ait repris sa position en E dans le tube. Ouvrons grand le robinet A, ouvrons grand le robinet C un court instant puis refermons-le : une grosse bulle d'air est admise dans le tube, monte en se détendant et chasse à l'extrémité du tube une bonne partie de l'eau contenue dans celui-ci. Attendons que le niveau d'eau soit à nouveau remonté dans le tube et rééditons l'opération, nous avons rétabli la rentabilité du système : la consommation d'air nécessaire au débit de fluide cesse d'être excessive. Mais le fonctionnement du système n'est plus le même que dans le cas précédent; au lieu d'alléger la colonne du liquide, nous la chassons du tube de même que la balle est chassée du canon du fusil par les gaz dus à la combustion de la poudre, au moment du départ du coup. La balle est remplacée ici par la colonne de fluide et les gaz de la poudre par la bulle d'air.

Le but de notre travail dans cette présente thèse est d'étudier l'air-lift, 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 physique (plus exactement hydraulique), des résultats de calcul on établit les règles générales de conception et d'optimisation de l'air-lift travaillant sous des rendements acceptables.

2.1- Introduction :

L'étude de ces écoulements est subdivisible en un nombre de parties non négligeable, chacune de ces parties étant elles-mêmes suffisamment vaste. Aussi, il existe l'étude des écoulements gaz-liquide, liquide-solide, gaz-solide, liquide-liquide, solide-solide, mais, là encore il faut remarquer qu'une subdivision s'impose qui implique des différences fondamentales; ainsi, l'écoulement peut être à un seul composant (eau-vapeur par exemple), les conditions thermiques jouent un rôle important, ainsi les écoulements avec apport de chaleur ou retrait de chaleur ou adiabatique sont autant de cas différents. Il en est de même des écoulements verticaux ascendants ou descendants ou horizontaux.

Dans notre cas, l'étude de l'air-lift exige de se restreindre à l'écoulement diphasique air-eau dans une conduite verticale.

La connaissance du régime d'écoulement ou "configuration d'écoulement" sont aux écoulements diphasiques ce que l'écoulement laminaire et l'écoulement turbulent sont aux écoulements monophasiques. Donc il importe avant tout de définir ces configurations, du moins celles le plus souvent rencontrées.

2.2- Configurations d'écoulement (air-eau) vertical :

On appelle "configuration d'écoulement" l'ensemble des paramètres qui décrivent la forme (structure et dimensions) de chacune des phases dans l'écoulement. En général, cette description s'obtiendra directement par la vision si l'écoulement est lent, ou par photographie.

La figure (2.1) rassemble des photographies des principales configurations d'écoulements cocourants ascendants eau-air rencontrées en conduite verticale, en augmentant la vitesse du gaz on constate :

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

b)- L'écoulement à "bouchons" est constitué d'une succession de bouchons de gaz dont l'avant est arrondi et l'arrière plat, le sillage de chaque bouchon contient souvent de nombreuses bulles et le film liquide entourant une poche de gaz à un mouvement descendant par rapport à la paroi de la conduite. Lorsque le débit de gaz augmente, les poches de gaz s'allongent et se fractionnent de façon désordonnée. L'écoulement tend vers un écoulement annulaire sans l'atteindre complètement.

NOTION D'ÉCOULEMENTS DIPHASIQUES VERTICAUX

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

En général, une fraction du liquide est entraînée sous forme de gouttelettes, c'est un écoulement agité, de transition.

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

L'estimation de la configuration de l'écoulement de deux fluides qui parcourent une conduite verticale se fait à l'aide de diagrammes dont les coordonnées sont généralement des fonctions des débits de chacune des phases, du diamètre de la conduite et de certaines propriétés physiques des fluides.

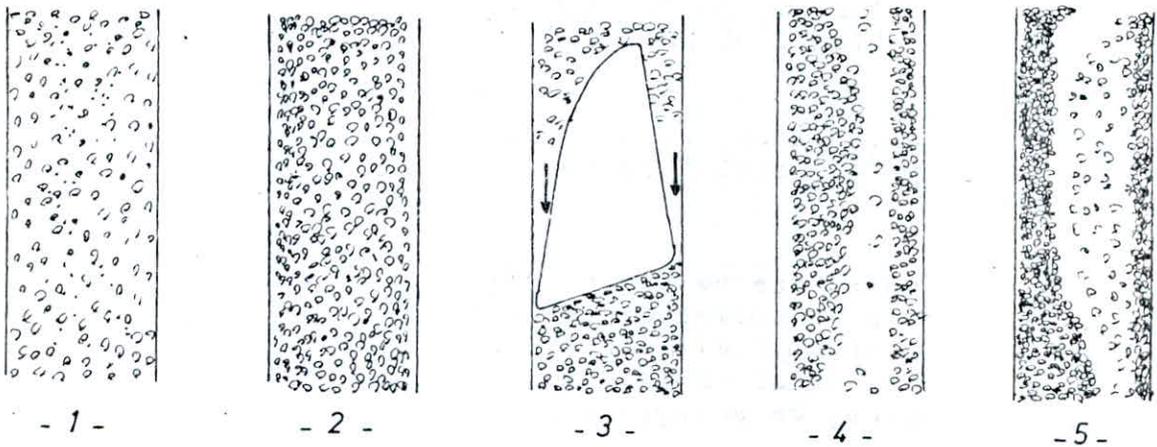


Fig. (2.1). Écoulement cocourant ascendant en conduite Verticale. Configuration des écoulements eau-air.

- (1) Bulles indépendantes.
- (2) Bulles agglomérées.
- (3) Bouchons .
- (4) Semi-annulaire.
- (5) Annulaire.

Diamètre de conduite : 32 mm; Pression atmosphérique.

NOTION D'ÉCOULEMENTS DIPHASIQUES VERTICAUX

On remarque des écoulements cités ci-dessus, que seul, l'écoulement bouchon possède une configuration non agitée, pour cela les pertes de vitesses entre phases sont faibles, et le film liquide descendant plaqué à la paroi de la conduite, recouvre les aspérités, rendant l'écoulement turbulent lisse.

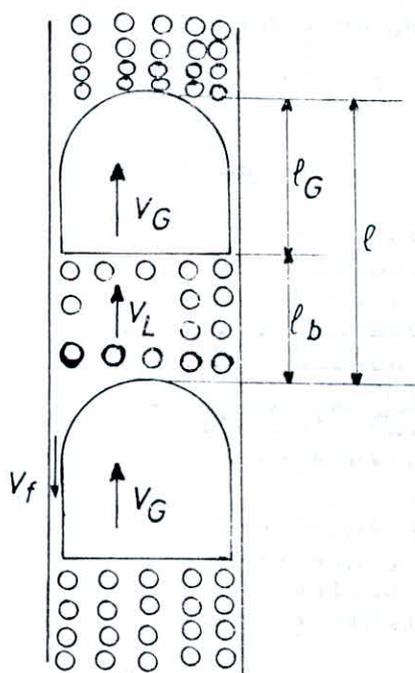
Donc, pour une bonne exploitation de l'air-lift, ce dernier, devra être assujéti de l'écoulement diphasique à bouchons où les pertes par frottements et par glissements sont faibles, ce qui laissera l'air-lift plus rentable; pour cela, on trouvera une étude détaillée de l'écoulement bouchon dans ce chapitre.

2.3- L'écoulement bouchon :

La figure (2.2), montre le détail d'un tel écoulement : on trouve un film liquide descendant le long des bouchons de gaz dont l'impact sur le bouchon de liquide entraîne du gaz au sein de celui-ci. Les bulles entraînées ont une vitesse ascendante inférieure à celle des bouchons.

La transition de l'écoulement à bulles vers bouchons a lieu lorsque la fraction de la section droite occupée en moyenne par la phase gazeuse, soit \bar{V}_G , vaut 25%, (AICHE Journal Vol. 26, n° 3, page 347); l'écoulement à bulles est par rapport à l'air-lift un écoulement de barbotage, où le débit liquide est nul, quand commence la transition bulles vers bouchons, le débit liquide augmente, pour atteindre son maximum lorsque l'écoulement bouchon devient stable.

Donc, il est bien utile de connaître ce domaine de stabilité pour l'exploiter dans l'air-lift.



- Fig - Géométrie de l'écoulement bouchon - fig. 22

NOTION D'ÉCOULEMENTS DIPHASIQUES VERTICAUX

Les pertes de vitesses par glissement sont dues à la présence des bulles entourant chaque bouchon liquide ou gaz et du volume liquide perdu, cette différence de vitesses correspondantes à chaque phase est donné par HARMATHY (1960);

$$V_0 = V_g - V_L \quad (2-1)$$

$$V_0 = 1,53 \cdot \left[\frac{g (\rho - \rho_G) \sigma}{\rho} \right]^{1/4} \quad (2-2)$$

V_G : vitesse de déplacement de la phase gazeuse

V_L : vitesse de déplacement de la phase liquide

ρ : masse volumique du liquide

ρ_G : masse volumique du gaz

σ : tension superficielle

Quand le liquide s'élève le long de la conduite verticale, proportionnellement les forces causant la turbulence, tendent à briser la stabilité de l'écoulement, en diphasique cette destabilisation s'explique par la division d'un bouchon de gaz en petites bulles qui ramène la configuration vers l'annulaire, ceci pour $V_G > 0,25$.

La théorie abordant l'instabilité de deux fluides non miscibles, causée par les forces de turbulences est donnée par HINZE (1955). Ce dernier, utilise la caractéristique dimensionnelle des bulles pour donner la condition de stabilité de l'écoulement en évaluant les résultats de dispersion d'une configuration au delà de l'équilibre entre les forces de tension superficielle et les forces de turbulences, HINZE donne le diamètre maximal des bulles correspondant à un écoulement diphasique stable.

$$d_{\max} = K \left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^{3/5} (\varepsilon)^{-2/5} \quad (2.3)$$

ε : énergie de dissipation par unité de masse

σ : tension superficielle.

K : coefficient qui dépend de la fréquence des bulles. pour les basses concentrations de gaz, qui est le cas de l'écoulement à bulles ou à bouchons $K = 0,725$, pour les écoulements à jet (cas de l'air-lift) $K = 1,14$, le taux de dissipation d'énergie (dûe au fluctuation) par unité de masse s'écrit :

NOTION D'ÉCOULEMENTS DIPHASIQUES VERTICAUX

$$\varepsilon = \left| \frac{dP}{dz} \right| \frac{V_M}{f_M}$$

$$\text{où } \frac{dP}{dz} = \frac{2 \lambda}{D} \cdot f_M V_M^2$$

f_M : masse volumique du mélange (gaz-liquide)

V_M : vitesse du mélange

λ : coefficient de frottement

Pour la détermination du coefficient de frottement, on utilise la formule de BLASIUS, ceci seulement pour le cas de l'écoulement bouchon

$$\lambda = C \cdot \left(\frac{V_M \cdot D}{\nu_L} \right)^{-n} \quad (2.4)$$

DUKLER (dans AICHE Journal Vol. 26 n° 3 page 345), donne les valeurs des coefficients C et n :

$$C = 0,046 \quad \text{et} \quad n = 0,2$$

V_M : vitesse du mélange m/s

ν_L : viscosité cinématique du liquide

$$V_M = \frac{Q}{S}$$

Q : débit total m³/s

S : section de la conduite de refoulement m²

V_M peut s'écrire aussi :

$$V_M = V_L (1 - \sqrt{V_G}) + V_G \cdot \sqrt{V_G} \quad (2.5)$$

Il reste à déterminer V_L et V_G , respectivement les vitesses liquide et gaz.

NOTION D'ÉCOULEMENTS DIPHASIQUES VERTICAUX

La vitesse de déplacement géométrique des bouchons de gaz est quasi-déterministe avec une loi du type :

$$V_G = A V_L + V_\infty \quad (2.6)$$

où V_∞ est la vitesse d'un bouchon de gaz dans une conduite où le liquide est au repos.

V_L : vitesse moyenne du liquide

NICKLIN (1962), dans la même bibliographie citée ci-dessus, donne l'expression de V_G :

$$V_G = 1,2 V_L + 0,35 \cdot \sqrt{g \cdot D} \quad (2.7)$$

$1,2 V_L$ est la vitesse du liquide au centre de la conduite.

Le débit volumique total s'écrit :

$$\begin{aligned} Q &= V_M \cdot S = V_L \cdot S \sqrt{V_L} + V_G \cdot S \sqrt{V_G} \\ Q &= V_L \cdot S (1 - \sqrt{V_G}) + V_G \cdot S \sqrt{V_G} \quad (2.8) \end{aligned}$$

puisque $\sqrt{V_L} + \sqrt{V_G} = 1$.

En utilisant (2.7) et (2.8) on tire V_G :

$$V_G = \frac{1,2 \cdot \frac{V_M}{1 - \sqrt{V_G}} + 0,35 \cdot \sqrt{g \cdot D}}{1 + 1,2 \frac{\sqrt{V_G}}{1 - \sqrt{V_G}}} \quad (2.9)$$

et

$$V_L = \frac{V_M - V_G \cdot \sqrt{V_G}}{1 - \sqrt{V_G}} \quad (2.10)$$

Dans un écoulement diphasique (gaz-liquide), le gaz se détend proportionnellement en s'élevant le long de la conduite de refoulement, donc, la pression du mélange varie avec la longueur de la conduite, pour cela, la vitesse moyenne du mélange doit être calculée en fonction de la pression du mélange dans une section considérée.

NOTION D'ÉCOULEMENTS DIPHASIQUES VERTICAUX

Jean-Marc DELHAYE, dans sa thèse de doctorat d'état "contribution de l'écoulement diphasique : eau-air, eau vapeur" (1972 centre d'études nucléaires de Grenoble), a établi suivant les résultats de son expérience (sur la mesure des pressions le long d'un écoulement diphasique eau-air) le diagramme donnant la variation de la pression avec la côte d'élévation (Z) du mélange (figure 2.3).

De ce diagramme, on voit que la pression varie linéairement le long de la conduite de refoulement, (le même résultat est trouvé par HEIR dans son livre "écoulement diphasique air-eau").

La loi de variation de la pression est donnée par ce dernier auteur :

$$P_Z = P_2 + \frac{l_Z}{L} (P_1 - P_2) \quad (2.11)$$

où P_Z : pression dans une section considérée

P_1, P_2 respectivement les pressions du mélange dans le mélangeur et dans le séparateur

$L = h + H$ longueur totale de l'air-lift

l_Z : distance entre le séparateur et la section considérée.

La vitesse moyenne du mélange dans une section est déterminée comme suit :

$$V_M = \frac{Q}{S}$$

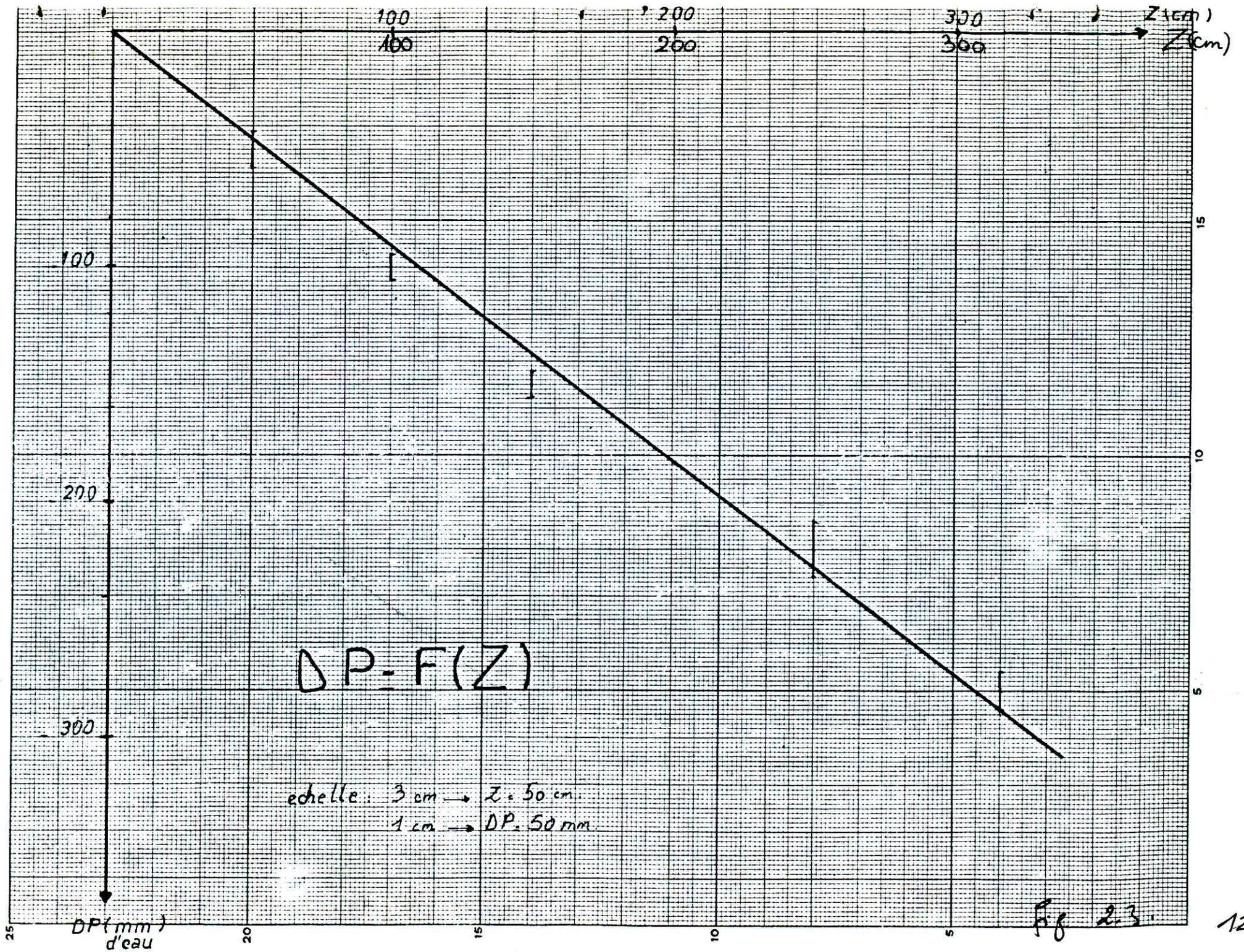
$$Q = Q_G + Q_L \quad (2.12)$$

Pour un écoulement bouchon KASTANDA a donné l'expression de cette vitesse moyenne du mélange :

$$V_M = \frac{Q_G \cdot P_{atm}}{P_Z \cdot S} + \frac{Q_L}{S} \quad (2.13)$$

P_{atm} et Q_G : correspondent à la pression atmosphérique et du débit de gaz dans les conditions normales de pression et de température.

-12-



NOTION D'ÉCOULEMENTS BIPHASIQUES VERTICAUX

Reprenons la formule de BLASINS donnant le coefficient de frottement λ , en utilisant les coefficients de DUKLER :

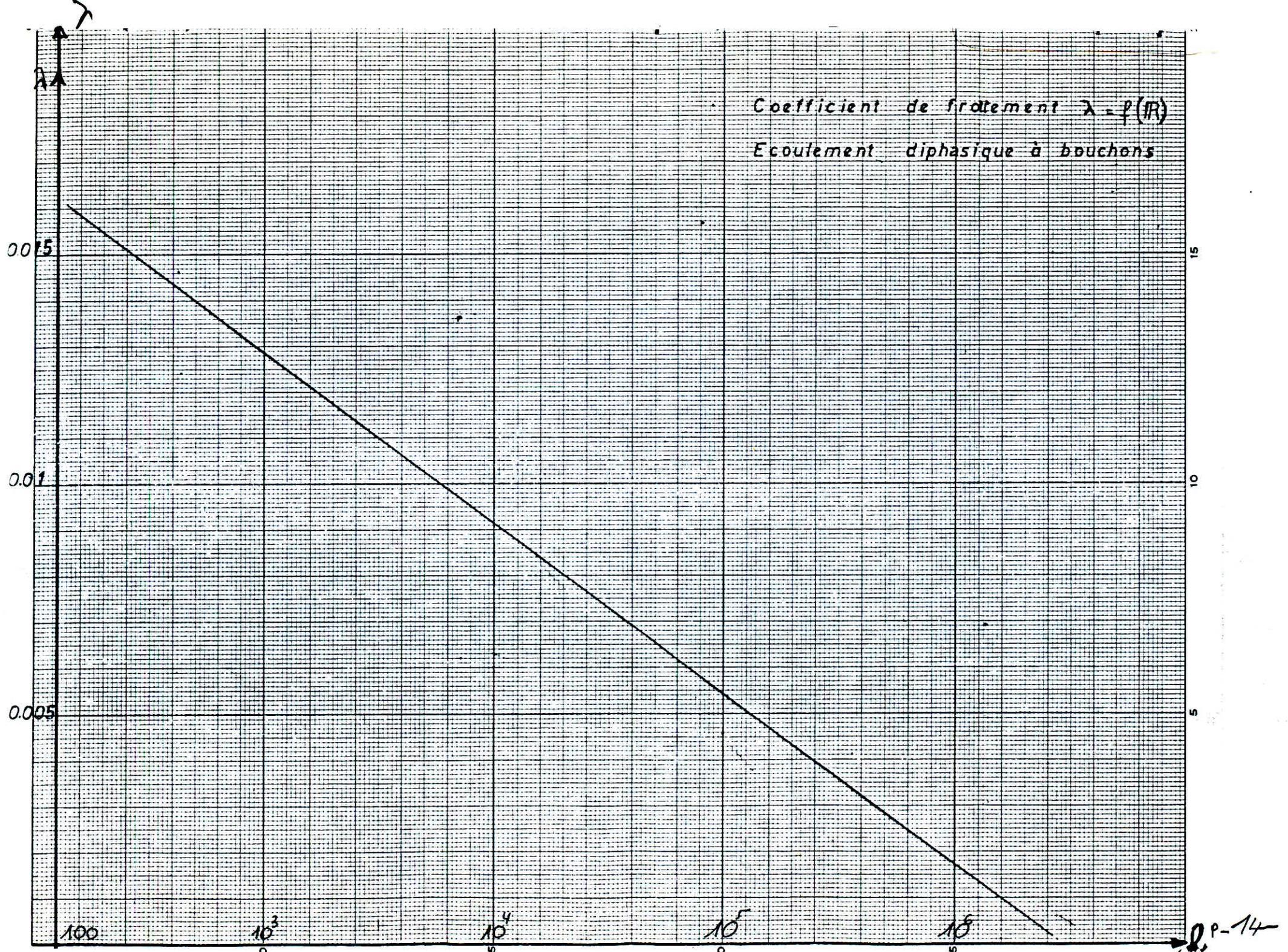
$$\lambda = 0,046 \left(\frac{v_M \cdot D}{\rho L} \right)^{-0,2} \quad (2.14)$$

L'écoulement bouchon pourrait avoir lieu que pour des débits spécifiques q ,

$$\left(q = \frac{Q_G}{Q_L} \right) \text{ faibles (ceci est confirmé dans les$$

tableaux de calcul de l'air-lift au chapitre 7), ce même écoulement où la condition d'avoir un glissement relatif entre phases faible (par conséquent les pertes par frottements sont faibles) est satisfaite si la vitesse du mélange est inférieure à 1 m/s, donc avec des nombres de REYNOLDS faibles.

-14-



P-14

3-1 Principe de fonctionnement et les dépendances générales.

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

Cette puissance nécessaire au fonctionnement de l'air est produite par un compresseur.

Sur la figure (3-1) (page 16), sont montrés les schémas des différentes étapes de fonctionnement de l'air-lift.

Par la conduite d'air comprimé (n° 1), le gaz entre dans le mélangeur (n° 2), à son niveau la pression produite est inférieure à la pression extérieure, dans ce cas, l'eau de la conduite d'aspiration (n° 3) entre dans le mélangeur où s'effectue le mélange, l'écoulement se produit alors dans la conduite de refoulement (n° 4), ceci sous l'action du flux de l'air comprimé, puis de sa détente tout le long de cette conduite.

Au niveau du séparateur (n° 5) s'effectue la séparation des deux fluides.

A présent, on donne les équations générales de mise en marche de l'air-lift, en suivant les différents schémas de fonctionnement :

- schéma "a".

Avant la mise en marche du compresseur, le mélangeur (2) se trouve plongé à l'intérieur du liquide sous la profondeur d'immersion géométrique h .

La pression statique P_m , dans le mélangeur est déterminée à l'aide de l'immersion absolue.

$$P_m = \rho \cdot h \cdot g \quad (3-1)$$

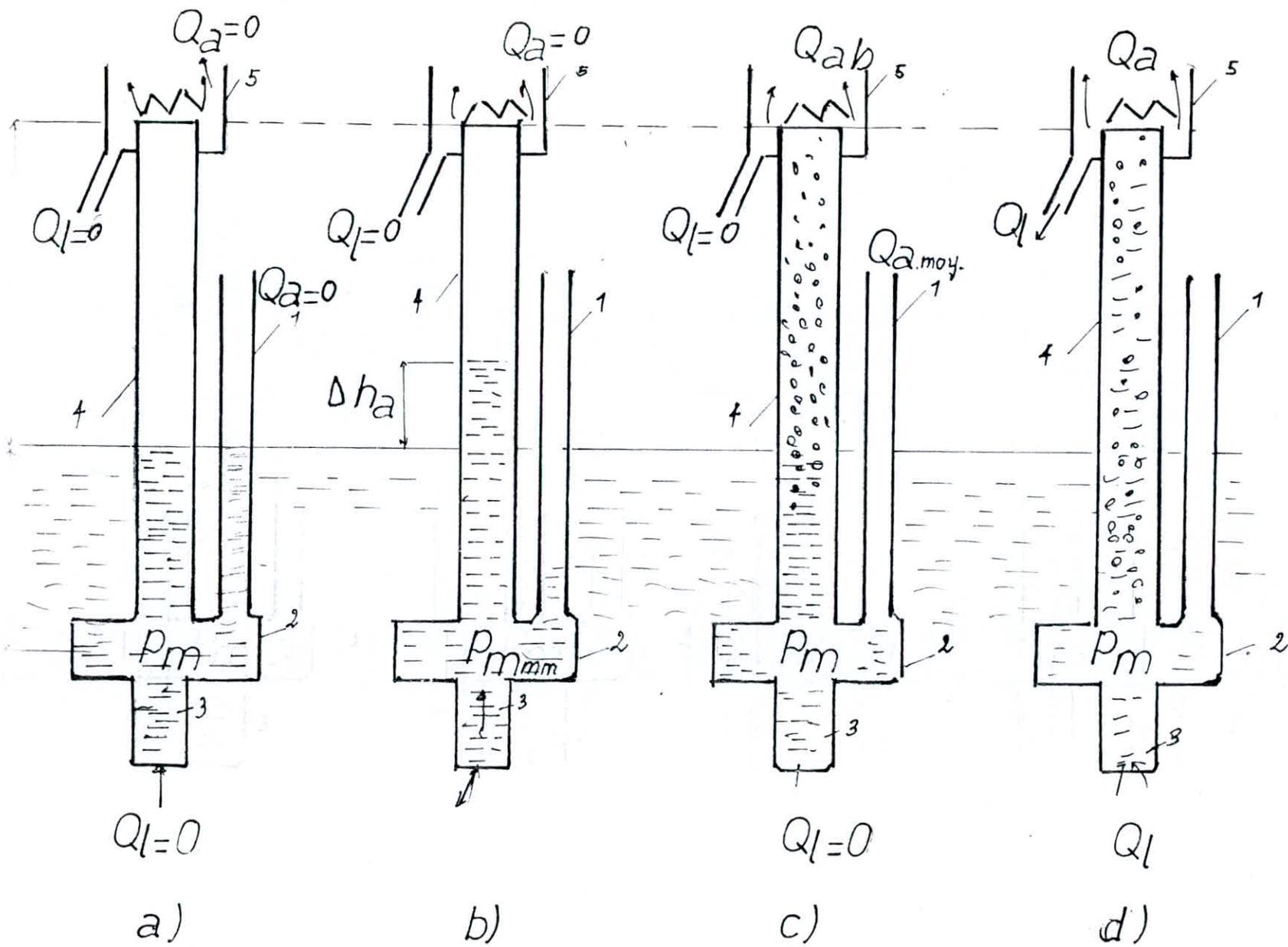
h : immersion géométrique

ρ : masse volumique du liquide (Kg/m^3)

- schéma "b".

A la mise en marche du compresseur, produisant une pression suffisante, faisant sortir du liquide du mélangeur, une partie du liquide s'élève dans la conduite de refoulement d'une hauteur D_{ha} , et, une partie gagne le réservoir.

La pression de mise en marche P_{mmm} , au niveau du mélangeur, serait donc :



g 3.1. Les schèmes de fonctionnement de L'AIR_LIFT.

BASES THEORIQUES DE L'AIR-LIFT

$$P_{mmm} = \rho \cdot g \cdot (h + D_{ha}) \quad (3-2)$$

le liquide qui se trouvait dans la conduite d'air, s'élève dans la conduite d'alimentation d'une quantité D_{ha} où

$$D_{ha} = a_c \cdot Q_l^2 \quad (3-3)$$

a_c : résistance de la conduite (3) (S^2/m^5)

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

Q_l est déterminé, d'après la dépendance :

$$Q_l = \frac{W_{la}}{t_{mm}} \quad (3-4)$$

t_{mm} : temps de mise en marche de l'air-lift

W_{la} : volume du liquide dans la conduite d'air

$$W_{la} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h \quad (3-5)$$

d : diamètre de la conduite d'air (m^3)

Mettons dans la formule (3-2), les expressions (3-3), (3-4) et (3-5), nous obtenons :

$$P_{mmm} = \rho \cdot g \cdot \left(h + \frac{\pi^2}{16} \cdot d^2 \cdot a_c \cdot \frac{h^2}{t_{mm}^2} \right) \quad (3-6)$$

le débit d'air comprimé, en période de mise en marche est

$$Q_{a.mm} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{h}{t_{mm}} \quad (3-7)$$

On remarque, des formules (3-6) et (3-7), que le débit d'air et la pression de mise en marche de l'air-lift, dépendent du temps de la mise en marche.

Quand la section de sortie de la conduite d'aspiration n'est pas libre, le débit du courant liquide à travers le réservoir est nul.

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

$$D_{ha} = h \cdot \frac{d^2}{D^2} \quad (3-8)$$

D : diamètre de la conduite de refoulement.

BASES THEORIQUES DE L'AIR-LIFT

Par conséquent, la pression nécessaire, pour que l'air entre dans le mélangeur, doit être au minimum égale à la pression de mise en marche et, la pression que doit produire le compresseur doit être égale à :

$$P_c = P_{mm} + DP_c \quad (3-9)$$

DP_c : perte de pression dans la conduite d'air, pendant la mise en marche; et P_c : pression donnée par le compresseur (Kgf/m^2).

En négligeant la perte de pression dans la conduite d'air, puisque le temps de mise en marche est très inférieure au temps normal de fonctionnement, alors, il vient :

$$P_c = \rho \cdot g \cdot h \cdot \left(1 + \frac{\pi^2}{16} \cdot a_c \cdot \frac{d^4 \cdot h}{t_{mm}^2} \right) \quad (3-10)$$

ou bien, d'après (3-8) :

$$P_c = \rho \cdot g \cdot h \left(1 + \frac{d^2}{D^2} \right) \quad (3-11)$$

Des expressions (3-10) et (3-11), on voit que la pression au temps de mise en marche de l'air-lift, doit être supérieure à la pression statique donnée par la formule (3-1), cela doit être tenu compte pour choisir le compresseur à utiliser.

Pour la sûreté du fonctionnement de l'air-lift, il faut déterminer la pression de mise en marche, d'après la formule (3-11).

Quand la pression d'air comprimé devient égale à la pression de mise en marche, l'air entre dans le mélangeur, la masse volumique d'air est presque mille fois inférieure que celle du liquide, donc, sous l'action des forces d'Archimède, l'air monte à travers le liquide dans la conduite de refoulement, on observe la colonne du mélange gaz-liquide, qui, a la masse volumique moyenne inférieure que celle du liquide.

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

$$P_{\text{moy.m.b}} = \rho_{\text{m.b}} (H + h) \quad (3-12)$$

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

$\rho_{\text{m.b}}$: masse volumique du mélange gaz-liquide correspondant au barbotage.

$$\rho_{\text{m.b}} = \rho \cdot \frac{h}{H+h} \quad (3-13)$$

BASES THEORIQUES DE L'AIR-LIFT

Le rapport d'immersion absolue h sur la hauteur totale ($H + h$), est le paramètre caractéristique sans dimension, appelé profondeur relative de l'air-lift.

$$\alpha = \frac{h}{H+h} \quad (3-14)$$

- schéma "c".

Le liquide monte jusqu'à la partie supérieure de la conduite sans se déverser (c'est-à-dire $\alpha_{l=0}$).

Cette condition aura lieu, si la vitesse relative du mélange de l'air-lift possède une valeur pour laquelle, la force hydrodynamique n'est pas encore suffisante pour donner au liquide un débit.

Sur la base des expériences 1 - HEIR 1980, page 14, cette vitesse relative est déterminée et à pour valeurs

$$2 - 3 \text{ m/s.}$$

La masse volumique du mélange dans la colonne de barbotage est donnée par :

$$\rho_{m.b} = \rho \cdot \alpha \quad (3-15)$$

En tenant compte de cette formule et suivant la formule bien connue : $Q = V.S$, pour une conduite en charge, on trouve le débit d'air rapporté à la pression moyenne, correspondant à la naissance de la colonne de barbotage où le débit liquide sortant est nul :

$$Q_{a.b} = V_b \cdot D^2 \cdot (1 - \alpha) \simeq (2 - 3) \cdot D^2 \cdot (1 - \alpha) \quad (3-16)$$

le chercheur HEIR, dans son livre, sur les écoulements diphasiques, en faisant ses expériences, sur une conduite verticale longue, s'écoulant l'air et l'eau, il obtient, que le changement de la pression suivant la hauteur du mélange se produit selon une loi linéaire, on détermine donc la pression moyenne par :

$$P_{\text{moy.}} = \frac{P_m}{2} = \frac{\rho \cdot g \cdot h}{2} \quad (3-17)$$

Ces mêmes expériences indiquent que la détente du gaz, se produit d'après un processus isothermique, donc le changement de la masse volumique en fonction de la pression est déterminé d'après la loi :

$$\frac{P_i + P_{atm}}{\rho_i} = \frac{P_{atm}}{\rho_{atm}} \quad (\text{loi isothermique}) \quad (3-18)$$

i : un point de mesure de l'écoulement diphasique dans la conduite verticale

BASES THEORIQUES DE L'AIR-LIFT

$P_i + P_{atm}$: pression absolue au point i

P_{atm} : pression atmosphérique

ρ_i : masse volumique de l'air au point i

ρ_{atm} : masse volumique de l'air libre.

Le débit du compresseur est calculé toujours suivant l'unité de volume de l'air à l'état libre.

$$Q_a = Q_{a.moy.} \frac{P_{moy.} + P_{atm}}{P_{atm}} \quad (3-19)$$

$Q_{a.moy.}$: débit moyen d'air, calculé d'après la pression moyenne (formule 3-17).

Finalement, des formules (3-16, 17 et 18), on détermine le débit volumique d'air libre, pour lequel, le débit de l'air-lift est nul :

$$Q_{a.b} = (2-3) D^2 (1 - \alpha) \left(1 + \frac{\rho_{gh}}{2 \cdot P_{atm}} \right) \quad (3-20)$$

L'augmentation du débit d'air (d'après 3-20), entraîne la diminution de la masse volumique du mélange, donc la pression au mélangeur diminue, devenant inférieure que la pression statique (en 3-1).

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 dépendance de la pression du mélange, comme suit :

$$Q_1 = \sqrt{\frac{h - P_{mel}/\rho \cdot g}{a_c}} \quad (3-21)$$

développant (3-21)

$$Q_1 = \sqrt{\frac{h - \rho_{mel} (H+h)/\rho}{a_c}} = \sqrt{\frac{h}{a_c} \left(1 - \frac{\rho_{mel}}{\rho} \frac{H+h}{h} \right)}$$

$$Q_1 = \sqrt{\frac{h}{a_c} \left(1 - \frac{\rho_{mel}}{\rho \cdot \alpha} \right)} \quad (3-22)$$

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.

BASES THEORIQUES DE L'AIR-LIFT

La masse volumique du mélange rapportée à la pression moyenne dépend de la quantité, en débit, de gaz et liquide, des précisions pratiques, on peut prendre le mouvement dans la conduite comme quasi-stationnaire, pour lequel le débit massique, le long de la conduite de refoulement, du mélange est constant, donc d'après la loi de conservation de la masse, ce débit massique est égal à la somme de la masse liquide et gaz par unité de temps.

La masse volumique du mélange en n'importe quelle section est donnée par :

$$\rho_{\text{mel}} = \frac{\rho \cdot Q_1 + \rho_a \cdot Q_a}{Q_1 + Q_a \cdot \text{moy.}} \quad (3-23)$$

En utilisant l'expression (3-19), donnant le débit d'air libre en fonction du débit d'air moyen ($Q_a \cdot \text{moy.}$), il vient

$$Q_a \cdot \text{moy.} = Q_a \cdot \frac{P_{\text{atm}}}{P_{\text{atm}} + \frac{P_m}{2}}$$

remplaçons cette dernière, dans (3-23) on obtient :

$$\rho_{\text{mel}} = \frac{\rho \cdot Q_1 + \rho_a \cdot Q_a}{Q_1 + Q_a \frac{P_{\text{atm}}}{P_{\text{atm}} + \frac{P_m}{2}}}$$

en divisant celle-ci par Q_1 , il vient :

$$\rho_{\text{mel}} = \frac{\rho \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho} \cdot \frac{Q_a}{Q_1} \right)}{1 + \frac{Q_a}{Q_1} \cdot \frac{P_{\text{atm}}}{P_{\text{atm}} + \frac{P_m}{2}}}$$

le rapport d'élévation du débit d'air est appelé ^{débit} spécifique d'air, qui est le second paramètre (sans dimension) très important, on le note q

$$q = \frac{Q_a}{Q_1} \quad (3-25)$$

mettons (3-25) en (3-24) :

$$\rho_{\text{mel}} = \frac{\rho \left(1 + \frac{\rho_a}{\rho} \cdot q \right)}{1 + q \frac{P_{\text{atm}}}{P_{\text{atm}} + \frac{P_m}{2}}} \quad (3-26)$$

BASES THEORIQUES DE L'AIR-LIFT

En analysant la formule (3-26), on voit que le deuxième paramètre de son numérateur ($\frac{\rho_a}{\rho} \cdot q$) peut être négligé, puisque la masse volumique de l'eau est 1000 fois plus que celle de l'air et que le débit spécifique ne dépasse pas 100 et suivant les pressions manométriques moyennes, le long de la conduite de refoulement de l'air-lift, on détermine le débit spécifique moyen (q_{moy}) par :

$$q_{moy} = q \cdot \frac{P_{atm}}{P_{atm} + P_m/2} \quad (3-27)$$

En tenant compte de (3-26) et (3-27), il vient :

$$f_{m.} = \frac{f}{1 + q_{moy}} \quad (3-28)$$

3.2 - Les caractéristiques énergétiques de l'air-lift.

En considérant que dans la conduite de refoulement, l'écoulement est comme stationnaire ["HEIR" Ecoulement diphasique dans une conduite verticale 1972], on peut écrire :

$$f \cdot h = f_{m.} \cdot (H+h) + a_c f_{m.}^2 Q_{m.}^2 \quad (3-29)$$

d'où :

$$Q_{m.} = Q_l \left(1 + q \frac{P_{atm}}{P_{atm} + P_m/2} \right) \quad (3-30)$$

Des formules (29) et (30), on tire le débit de l'air-lift :

$$Q_e = \frac{1}{1 + q \frac{P_{atm}}{P_{atm} + P_m/2}} \cdot \sqrt{\frac{h}{a_c} \left(1 + q \cdot \frac{P_{atm}}{P_{atm} + P_m/2} - \frac{1}{\alpha} \right)} \quad (3-31).$$

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

$$\begin{aligned} \frac{dQ_l}{dq} &= 0 \\ \text{on obtient } q_m &= \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \frac{P_{atm} + P_m/2}{P_{atm}} \\ \text{ou } q_m &= \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \left(1 + \frac{fgh}{2 P_{atm}} \right) \quad (3-32) \end{aligned}$$

BASES THEORIQUES DE L'AIR-LIFT

Des expressions (3-31) et (3-32), on peut conclure que le débit d'air-lift, pour une immersion relative (α) constante, dépend en grande partie de la quantité d'air comprimé, si cette dernière prend la valeur du débit d'air correspondant au barbotage, le débit de l'air-lift est nul.

Pour une augmentation du débit d'air comprimé, proportionnellement, le débit liquide refoulé augmente atteignant une valeur maximale.

A partir de la valeur du débit d'air donnant le débit liquide maximal, ce dernier va en diminuant.

Donc, l'expression (3-31), détermine les caractéristiques de l'air-lift, sur la figure (3.2), une caractéristique est donnée graphiquement pour une immersion absolue (h) et relative (α) données.

La diminution du débit d'air-lift avec l'augmentation du débit d'air comprimé, au delà du point maximum de la courbe $Q_1 = f(Q_a)$, est expliqué comme suit :

l'augmentation du débit spécifique q , à partir de $Q_1 \text{ max}$, correspond à une augmentation de la pression dans le mélangeur, pour cela une résistance supplémentaire se forme dans la conduite de refoulement et avec l'expression (3-31)

$$Q_1 = \sqrt{\frac{h - P_m}{\rho g a_c}}$$

on explique la diminution du débit de l'air-lift.

En variant la hauteur d'immersion absolue (h) (donc α aussi), et pour un même débit d'air, le débit liquide refoulé varie aussi.

Pour une augmentation de l'immersion absolue (h), (α croît aussi) et pour $(H+h)$ constant, le débit de l'air-lift augmente et au contraire pour une diminution de h et α , Q_1 diminue.

Par conséquent, pour le 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 3.3).

Donc, l'air-lift possède la propriété d'un régulateur automatique de débit, quand la hauteur d'immersion se trouve chargée.

Cette propriété est très importante pour un système à débits variables.

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

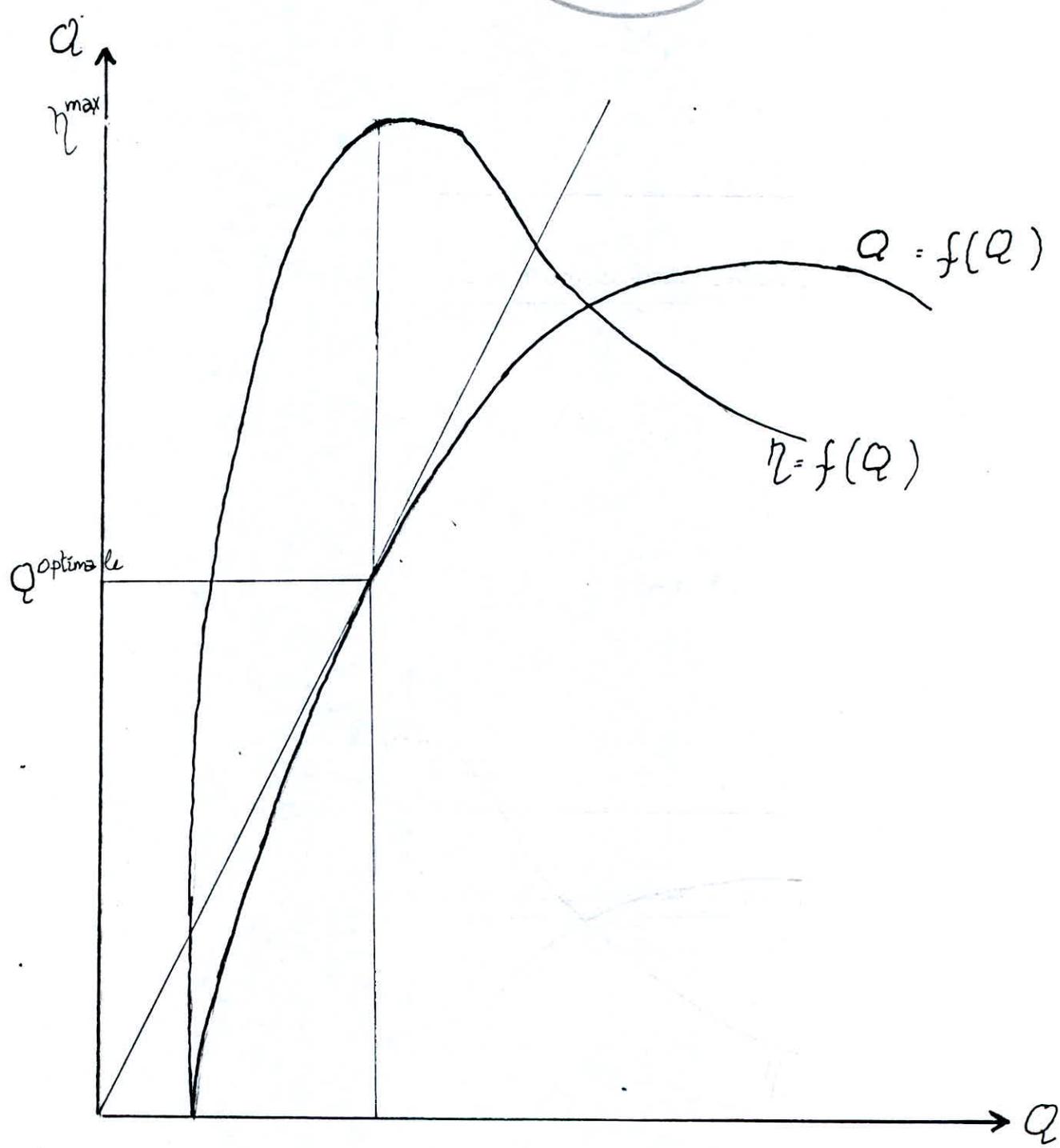


fig. 3.2 Caractéristique énergétique de l'air lift

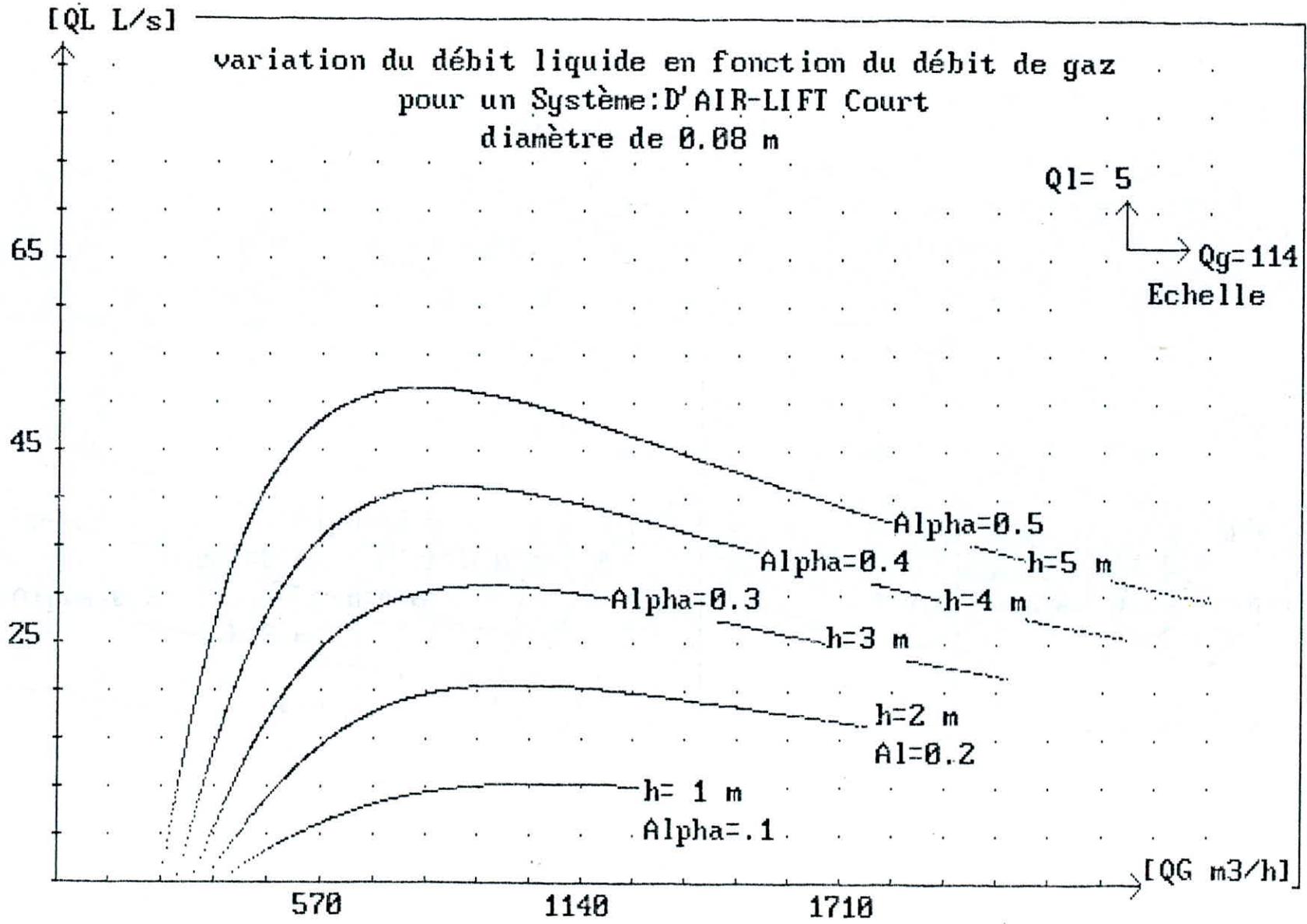


fig. 3.3.

BASES THEORIQUES DE L'AIR-LIFT

$$\eta = \frac{N_a}{N_f} \quad (3-32.a)$$

N_a : puissance absorbée par l'air-lift

$$N_a = \int m \cdot g \cdot Q_l \cdot \left(H + \frac{v_{\text{sortie}}^2}{2g} \right) \quad (3.32.b)$$

v_{sortie} : vitesse de sortie du jet au niveau du séparateur

N_f : puissance fournie par le compresseur

$$N_f = Q_a \cdot P_a \cdot \text{Ln} \frac{P_m + P_a}{P_a} \quad \begin{matrix} \text{(processus isothermique)} \\ (3.32.c) \end{matrix}$$

En remplaçant dans (3.32.a) :

$$\eta = \frac{\int m \cdot g \cdot Q_l \cdot \left(H + \frac{v_{\text{sortie}}^2}{2g} \right)}{Q_a \cdot P_a \cdot \text{Ln} \frac{P_m + P_a}{P_a}}$$

après transformation il vient :

$$\eta = \frac{H + \frac{v_{\text{sortie}}^2}{2g}}{q \cdot h_a \cdot \text{Ln} \left(1 + \frac{g \cdot h}{P_a} \right)} \quad (3-33)$$

$$\text{où } h_a = \frac{P_a}{\int m \cdot g}$$

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

Sur la figure (2-2, page) est représenté la caractéristique de l'air-lift en montrant la zone de son fonctionnement optimal en traçant la droite par l'origine et tangente à la courbe $Q_l = f(Q_g)$, on détermine le débit liquide maximal, celui ci correspond à un rendement $\eta = 0,85 \cdot \eta_{\text{max}}$

BASES THEORIQUES DE L'AIR-LIFT

3-3 Débit spécifique d'air comprimé

Suivant la pression dans le mélangeur, le débit d'air comprimé est déterminé, ce dernier nous renseigne sur le taux de puissance que doit fournir le compresseur à l'air-lift pour que le transport du mélange soit réalisé; cette analyse sera faite en utilisant le paramètre (sans dimension) q : débit spécifique, donné en (2-25), qui rentre aussi dans le calcul du rendement de l'air-lift (3-32a).

Commençons par étudier l'air-lift idéale, où les pertes de charge ne sont pas présentes, donc la puissance que doit fournir le compresseur soit égale à la puissance de refoulement du mélange sur une hauteur H , avec une vitesse du jet à sa sortie; les équations formulant ceci sont les suivantes:

$$\rho \cdot g \cdot Q_l \cdot \left(H + \frac{v_s^2}{2 \cdot g} \right) = Q_g \cdot P \cdot \ln \frac{P_m + P_a}{P_a}$$

en remplaçant Q_g/Q_l par q_{th} :

$$\rho \cdot g \left(H + \frac{v_s^2}{2 \cdot g} \right) = q_{th} \cdot P_a \cdot \ln \frac{P_a + P_m}{P_m}$$

d'où:

$$q_{th} = \frac{\left(H + \frac{v_s^2}{2 \cdot g} \right) \cdot \rho \cdot g}{P_a \cdot \ln \frac{P_a + P_m}{P_m}} \quad (3-34)$$

v_s : vitesse de sortie du jet.

P_m : Pression au niveau du mélangeur.

q_{th} : débit spécifique théorique d'air comprimé pour l'air-lift idéale.

(3-34) s'écrit aussi:

$$q_{th} = \frac{h}{h_a \cdot \ln \frac{P_a + P_m}{P_m}} \cdot \frac{1-a}{a} \quad (3-35)$$

puisque $v_s^2 / 2 \cdot g$ peut être négligée devant H .

BASES THEORIQUES DE L'AIR-LIFT

Donc le débit spécifique théorique d'air comprimé, pour une même immersion géométrique (h) et une même pression dans le mélangeur, dépend essentiellement de α ; sur la figure (2-4), on représente les courbes donnant les débits spécifiques théoriques d'air comprimé, en faisant varier l'immersion relative α de 0,15 jusqu'à 0,5, pour des immersion absolues $h = 30, 70$ et 120 m.

Ces courbes traduisent l'augmentation du q_{th} lorsque α diminue, ceci, car pour une même hauteur d'immersion absolue (h), et si α devient faible, la hauteur de refoulement H, tend à devenir très grande devant h, ce qui nécessite un important débit d'air comprimé donc fortiori il est de même pour le débit spécifique.

En présence des pertes de charge, pour les air-lift réels, les débits spécifiques réels sont supérieurs que ceux théoriques.

$$q = q_{th} + Dq \quad (3-36)$$

Dq : débit d'air (spécifique) supplémentaire à fournir à l'air-lift pour vaincre les pertes de charge.

De là on peut formuler d'une autre façon le rendement de l'air-lift, par:

$$\eta = \frac{q_{th}}{q} \quad (3-37)$$

Il reste à déterminer le débit spécifique q , ce dernier dépend de α .

KOZEREATZKI/ Détermination et calcul précis des paramètres de l'air-lift : THESE de DOCTORAT es.sciences, ECOLE POLYTECHNIQUE DONETSK 1976 page 20./ des résultats expérimentaux trouvés (ces résultats sont introduits au chapitre 7), par agustement de courbes, il obtient la fonction $q=f(\alpha)$, en divisant l'air-lift en deux catégories :

-AIR-LIFT LONG, $h = 20 \dots 120$ m

avec $0,15 < \alpha < 0,5$

$$q_1 = 60 \cdot \text{EXP}(-9,81 \cdot \alpha)$$

(3-38)

BASES THEORIQUES DE L'AIR-LIFT

-AIR-LIFT court, $h=4 \dots \dots \dots 20$ m
avec $0,15 < \alpha < 0,5$

$$q_c = 0,767 \cdot \alpha^{-2,2} \quad (3-39)$$

2-5 Les coefficients (typiques) sans dimension de l'air-lift.

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

$$a_c = \frac{8 \cdot \lambda \cdot (H+h)}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} = \frac{8 \lambda}{\pi^2} \frac{h}{\alpha g D^5} = \frac{\psi h}{\alpha g D^5} \quad (3-40)$$

ψ : coefficient de résistance hydraulique.
 D : diamètre de la conduite de refoulement.

Mettons (2-40) dans (2-31), on obtient:

$$Q_1 = \frac{1}{1+q} \sqrt{\frac{\alpha}{\psi} \left(1+q - \frac{1}{\alpha}\right) \cdot g \cdot D^5} \quad (3-41)$$

le débit spécifique q prend les formes de q_1 et q_c respectivement pour l'air-lift long et court.

Pour des air-lift semblables, on donne le coefficient sans dimension KQ du débit liquide.

$$KQ = \frac{1}{1+q} \sqrt{\frac{\alpha}{\psi} \left(1+q - \frac{1}{\alpha}\right)} \quad (3-42)$$

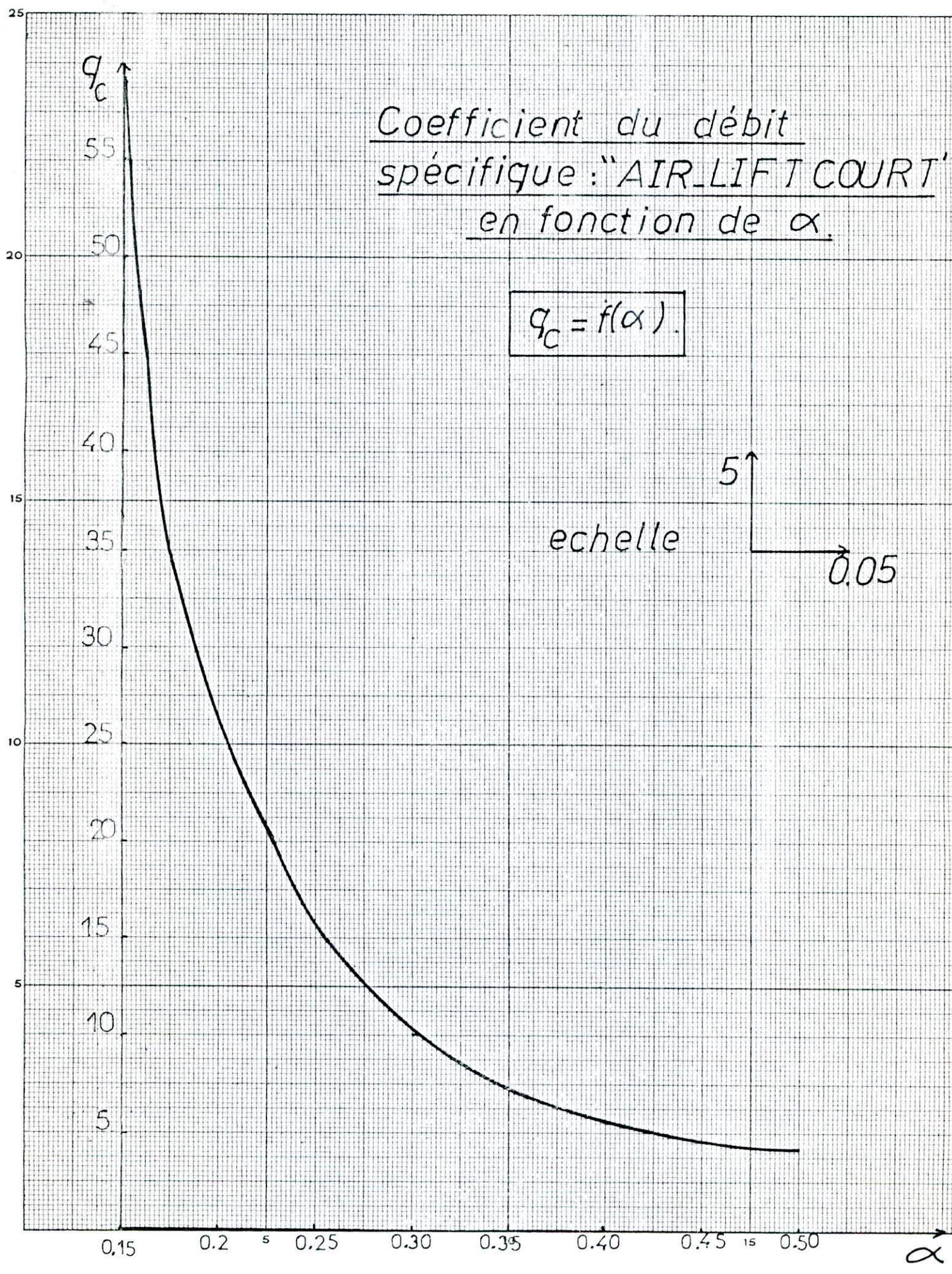
Sur la base des expériences HEIR : les bases théoriques de l'air-lift DONETSK 1980 page 14, le coefficient de résistance vaut pour un régime optimale de l'air-lift:

$\psi = 0,078$ pour l'air-lift court
 $\psi = 0,04$ pour l'air-lift long

Les valeurs de q sont prises des graphes page 30 et 31 ou calculées des formules (2-38) et (2-39).

Coefficient du débit
spécifique : "AIR-LIFT COURT"
en fonction de α .

$q_c = f(\alpha)$

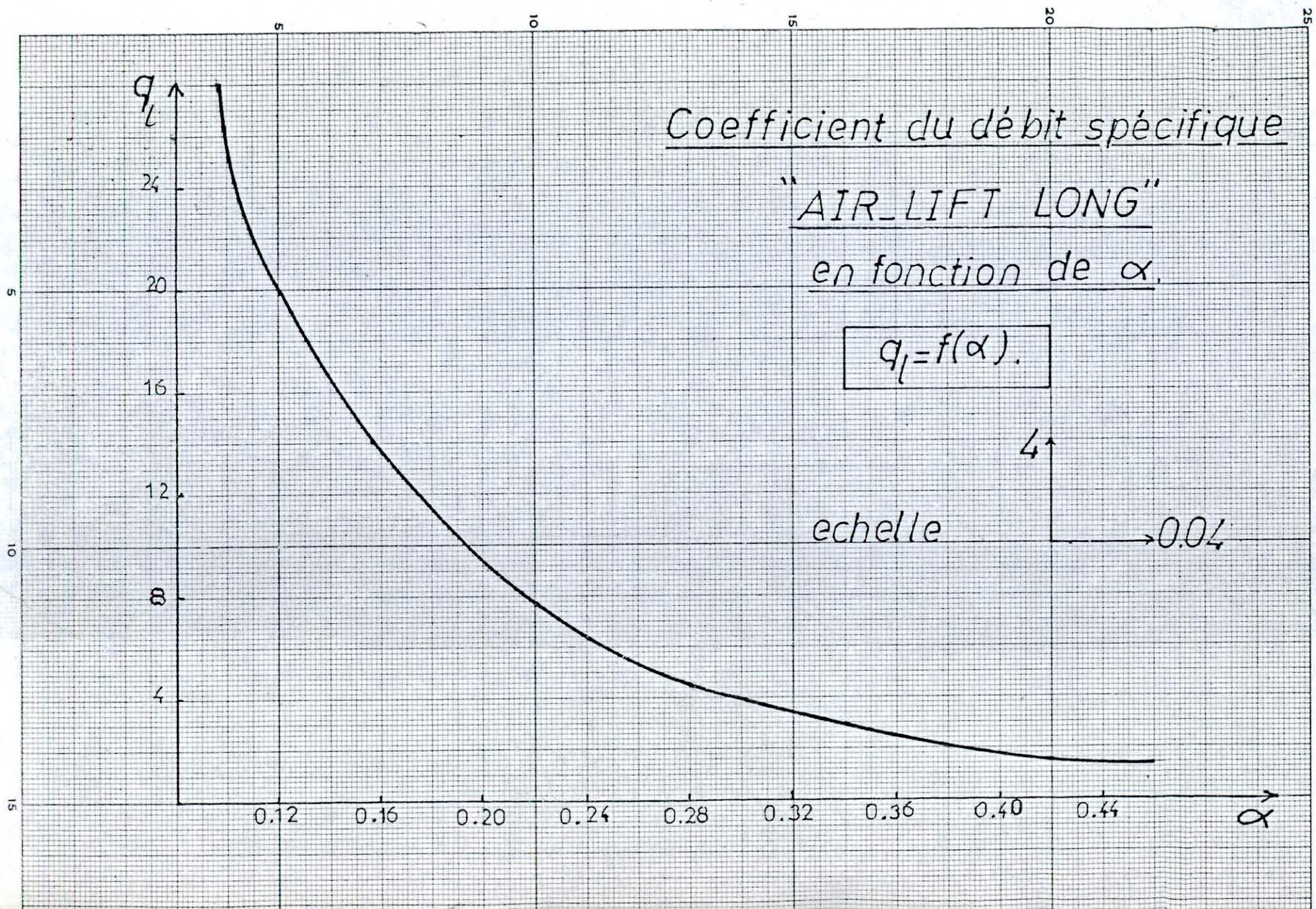


Coefficient du débit spécifique

"AIR_LIFT LONG"

en fonction de α .

$q_l = f(\alpha).$



échelle

4

→ 0.04

Sur la base de l'exploitation et de la projection de l'air-lift, dans différents domaines, celui-ci est représenté suivant plusieurs schémas :

- en une seule section avec le réservoir
- en une seule section avec la longue conduite d'aspiration
- en plusieurs sections avec les réservoirs intermédiaires
- air-lift groupés *fig. 4.2*
- air-lift jumelés dans un réservoir unique, (cas des barrages). *fig. 4.3*

Sur la figure 4.1 (page), on représente le schéma hydraulique de l'air-lift à une seule section, utilisé dans les mines; le réservoir secondaire (1) remplit le réservoir principal (2), pour pouvoir refouler la matière première sous un mélange triphasique.

Pour que l'immersion géométrique du mélangeur soit constante, le réservoir principal doit avoir une grande dimension par rapport à la conduite d'aspiration, diminuant ainsi le régime pulsatoire.

De l'expression (3.14), on tire H , la hauteur de refoulement :

$$H = h \cdot \frac{1 - \alpha}{\alpha} \quad (4.1)$$

Pour des immersions relatives , très faibles $0,01 < \alpha < 0,2$, dans (4.1), on voit que la hauteur de refoulement H , serait très grande par rapport à l'immersion absolue h , ce qui nécessiterait un grand débit d'air comprimé, obligerait l'utilisation de compresseur très puissant, alors que d'après les configurations d'un écoulement diphasique, un grand débit de gaz perturberait l'écoulement bouchant pour devenir semi-annulaire ou annulaire où les pertes par frottements et glissements sont importantes.

Aussi, pour $0,5$, d'après (4.1), les hauteurs de refoulement obtenues sont faibles et toujours inférieures à la hauteur d'immersion h , la pression au mélangeur étant alors grande, donc il faudrait une grande puissance d'air comprimé, pour transporter le mélange sur seulement une petite longueur de refoulement H ; dans ces deux cas, les rendements obtenus seront lamentables.

D'après ces explications, on a pu limiter les valeurs d'immersion relative , dans l'intervalle :

$$0,15 \leq \alpha \leq 0,5$$

pour obtenir un régime économique stable.

LES SCHEMAS HYDRAULIQUES DE L'AIR-LIFT

Les air-lift à une seule section peuvent être recommandés pour des hauteurs de refoulement allant jusqu'à 420m.

Sur la figure (3.1-c), est représenté l'air-lift à très longue conduite d'aspiration, utilisé à faire soulever la matière première du fond de l'océan.

Le mélangeur, dans ce cas, se trouve beaucoup immergé, la pression auquel il est soumis est grande, le compresseur utilisé doit au moins vaincre cette pression, donc la pression du compresseur est :

$$P_{comp} = \rho \cdot g \cdot h \quad \text{ou} \quad h = \frac{P_{comp}}{\rho \cdot g} ,$$

on a à voir à une puissance de mise en marche très importante, pour diminuer cette puissance, on utilise un air-lift à plusieurs mélangeurs, injecté chacun d'air comprimé, la hauteur d'immersion h, donc la pression en chaque mélangeur se trouve réduite.

La pression en chaque mélangeur, lors de la mise en marche, s'écrit comme suit :

$$\begin{aligned} P_w &= \rho \cdot g \cdot h - \rho' \cdot m \cdot g (H_m - h) - \rho \cdot g (H_m - h) - DP(\text{perte}) \\ \text{ou} \quad P_w &= \rho \cdot g \left[h - \left(\frac{\rho' \cdot m}{\rho} = 1 \right) (H_m - h) \right] - DP(\text{perte}) \quad (4.2) \end{aligned}$$

$\rho' \cdot m$ = masse volumique du mélange liquide-solide

DP(perte) = perte de pression due à la résistance par frottement du mouvement du mélange liquide-solide dans la conduite d'aspiration.

Dans le cas où la hauteur de refoulement est supérieure à 500m, on utilise un air-lift à plusieurs sections, chaque section possède une conduite d'aspiration, une conduite de refoulement, un mélangeur et un séparateur, le même principe d'air-lift se déroule pour chaque section, mais dans ce cas, le séparateur de la première section, libère le mélange vers le mélangeur de la deuxième section, ce mélange sera refoulé vers le séparateur de la même section et ainsi de suite jusqu'à arrivée au dernier Séparateur.

Les conduites d'air comprimé reliées aux mélangeurs sont réunies en un seul collecteur, où démarrera une conduite vers un seul compresseur unique.

fig.4.1 SChéma hydraulique d'une installation d'air_lift à un seul étage

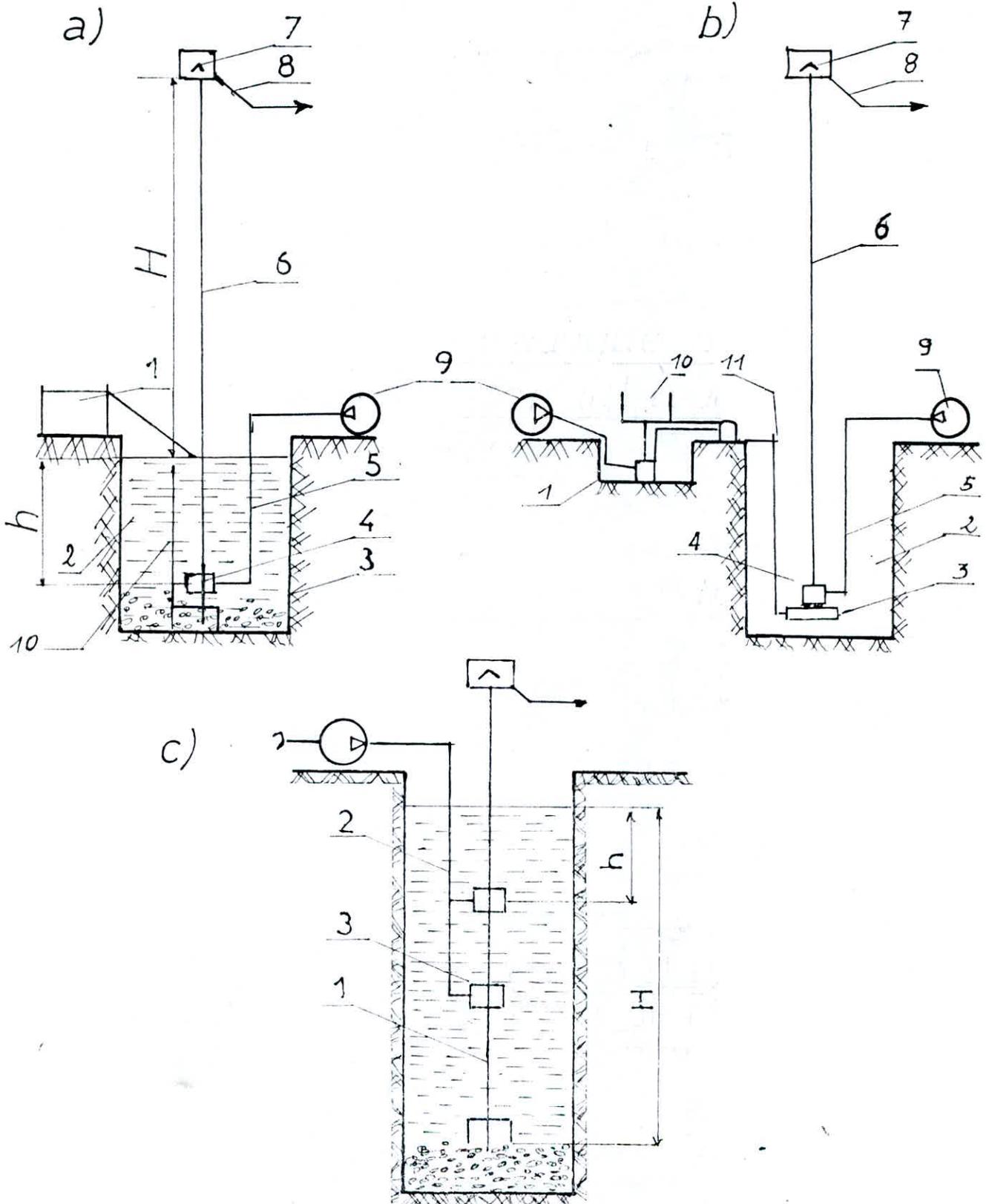


fig. 4.2 Installation d'air-lift groupés

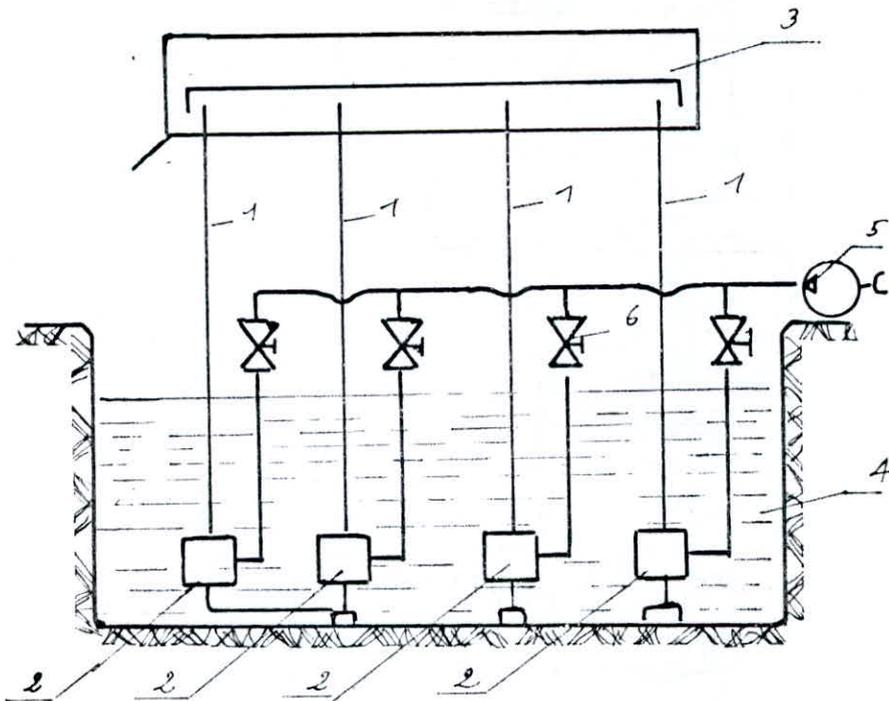
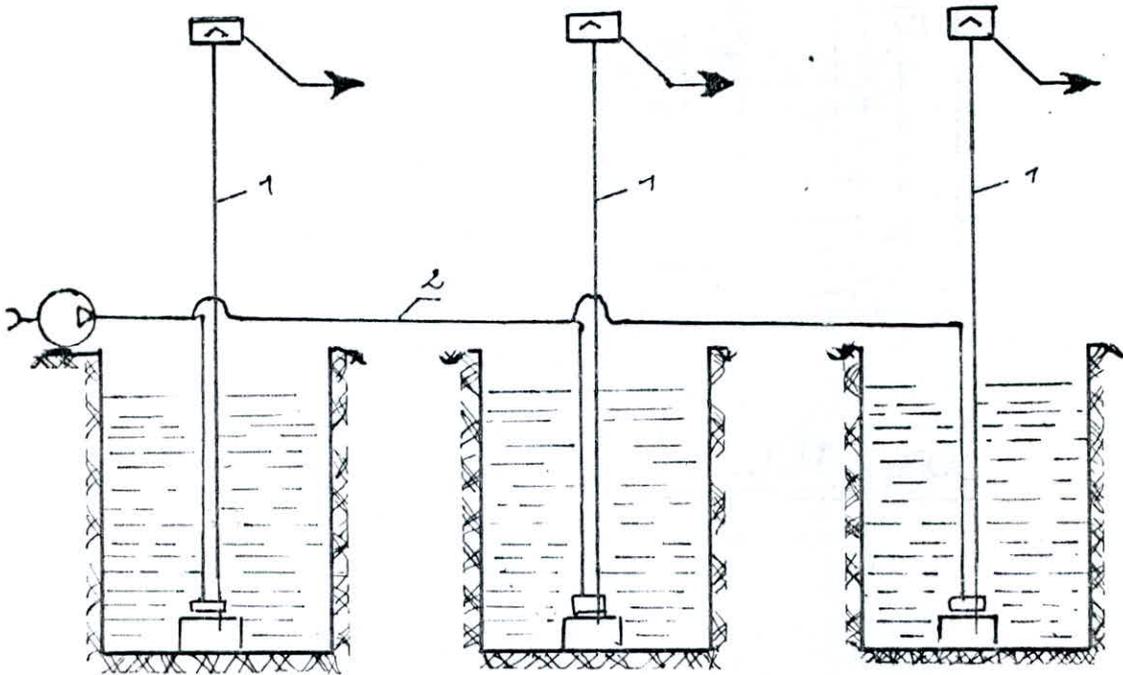


fig. 4.3 Installation d'air-lift jumelés

Les paramètres importants indispensables au calcul et au dimensionnement de l'air-lift sont :

- Ql - débit liquide refoulé
- H - hauteur de refoulement
- h - hauteur d'immersion.

Dans ce chapitre, on donne les expressions dimensionnant l'air-lift suivant un calcul hydraulique, utilisant les paramètres caractéristiques du système étudié, qui sont :

- 1- la profondeur d'immersion relatif de l'air-lift :
- 2- le débit spécifique d'air comprimé, q
- 3- le débit d'air comprimé, Qa,
- 4- le diamètre de la conduite d'air, d
- 5- le diamètre de la conduite d'aspiration, das
- 6- le diamètre de la conduite de refoulement, D, ou le diamètre équivalent, si cette conduite possède des diamètres différents (sous forme télescopique).

Considérons chaque étape de calcul :

5.1 - La profondeur d'immersion relative

Pour la détermination de la grandeur de ce paramètre, en premier lieu, il faudrait déterminer, la hauteur d'immersion absolue h, cette dernière, elle-même, dépend du domaine d'utilisation de l'air-lift, dépend aussi de la hauteur de refoulement voulue.

En tenant compte des données du 3ème chapitre et des indications de ce présent chapitre, on choisit le type et le schéma hydraulique de l'air-lift et la profondeur (h) de son mélangeur.

Pour un air-lift étagé, le nombre d'étages est pris de sorte que la hauteur de refoulement du mélange d'une section ne dépasse pas 420 m, et la limite inférieure de la profondeur absolue (h) du mélangeur est de 0,5 m d'après l'expression (4-1).

Dans certains cas, on peut choisir quelques hauteurs absolues d'immersion et par conséquent, quelques profondeurs relatives du mélangeur et en faisant une analyse technico-économique des variantes, on choisit l'optimale.

Donc, la profondeur relative du mélangeur est :

$$\alpha = \frac{h}{H+h} \quad (5.1)$$

CALCUL HYDRAULIQUE DE L'AIR-LIFT

alors que pour les air-lifts avec des conduites d'aspiration très longues, la perte de pression le long de celles-ci, ne peut être négligée, dans ce cas, la profondeur relative d'immersion dynamique est donnée par :

$$\alpha_d = \frac{P_w}{\rho \cdot g (h+H) + DP_a} \quad (5.2)$$

ici : P_w : pression de travail dans le mélangeur lors de la mise en marche, donnée par la formule (4.2)

DP_a : perte de pression dans la conduite d'aspiration, déterminée d'après la formule de DARCY-WEISBACH.

5.2 - Les débits d'air comprimé et diamètre de la conduite d'air.

5.2.1 - Equation de BERNOULLI pour les fluides compressibles et visqueux (air).

Lorsque la masse spécifique du fluide varie au cours de son déplacement dans une conduite, ce qui est le cas pour les gaz, l'équation de BERNOULLI est utilisée sous sa forme différentielle et généralisée, qu'on peut rétablir par le raisonnement ci-après.

Suivons l'évolution d'un élément de masse m égale à l'unité au cours d'un déplacement élémentaire dans une veine fluide (fig. 51) page 31

Appliquons le principe de la conservation de l'énergie.

On écrit que la somme de l'énergie (dQ) échangée sous forme de chaleur avec le milieu extérieur à la veine, et de l'énergie dissipée par le travail des forces de frottement (dw), est égale à la somme des variations :

- de l'énergie interne (dE) de l'élément gazeux,
 - de son énergie cinétique $md \left(\frac{U^2}{2} \right) = mUdU$ avec $m = 1$,
 - du travail (dT_p) exercé dans la veine par le gaz contre les forces de pression extérieures de l'élément considéré,
 - du travail exercé par le gaz contre les forces de gravité soit : $(mgdz)$, avec $m = 1$,
- soit au total :

$dE + U dU + dT_p + g dz = dQ + dw$,
étant entendu que tous les termes de cette équation s'expriment en unités d'énergie (ou de travail) par unité de masse.

CALCUL HYDRAULIQUE DE L'AIR-LIFT

Soit v le volume spécifique du gaz :

$$v = \frac{1}{\rho_a}$$

le travail (dT_p) effectué contre les forces de pression s'exerçant sur l'élément fluide pendant son passage de l'état (p) (v), à l'état ($p + dp$) ($v + dv$) au cours de son déplacement donné selon la démonstration suivante :

comme le régime est permanent l'état initial (1) et l'état final (2) sont les mêmes que si toute la masse de gaz comprise entre S_1 et S_2 (fig. 516) s'était déplacée pour venir entre S'_1 et S'_2 . A l'aval, le travail effectué contre les forces de pression (travail positif) est :

$$(p + dp) \times (\text{section } S_2) \times (\text{déplacement } S_2 S'_2).$$

Or le produit de la section S_2 par $S_2 S'_2$ est le volume de la masse de gaz égale à l'unité en position (2) : c'est ($v + dv$).

Le travail ci-dessus est donc :

$$(p + dp) (v + dv).$$

En amont, le travail effectué contre les forces de pression (négatif) est :

$$- p \times (\text{section } S_1) (S_1 S'_1) = - pv.$$

Le travail total :

$$\begin{aligned} dT_p &= (p + dp) (v + dv) - pv \\ &= pdv + vdp = d(pv) = d\left(\frac{p}{\rho_a}\right) \end{aligned}$$

en négligeant l'infiniment petit du deuxième ordre $dp \cdot dv$:

$$dT_p = d(pv) = d\left(\frac{p}{\rho_a}\right)$$

La thermodynamique nous apprend, d'autre part, que :

$$dE = dQ - pdv = dQ - pd\left(\frac{1}{\rho_a}\right).$$

Finalement l'équation (4) devient :

$$UdU + d\left(\frac{p}{\rho_a}\right) - pd\left(\frac{1}{\rho_a}\right) + gdz = dw$$

ou :

$$UdU + \frac{dp}{\rho_a} + gdz = dw$$

ou :

$$\boxed{dp + \rho_a U dU + \rho_a g dz = \rho_a dw.}$$

Telle est la formule de BERNOULLI sous sa forme différentielle.

CALCUL HYDRAULIQUE DE L'AIR-LIFT

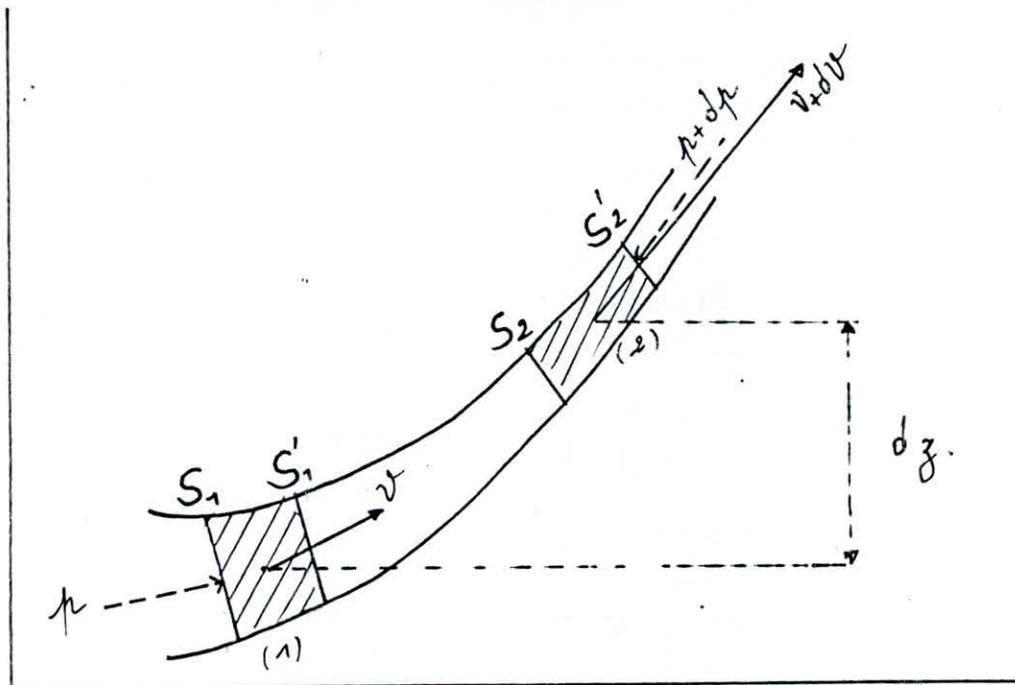


Fig. 5.1

5.2.2 - Expression de la perte de charge.

L'expérience montre que la perte de charge dans les tuyaux cylindriques est proportionnelle à la longueur de la conduite et que, de plus, elle est fonction de la vitesse moyenne U du fluide dans la conduite, de sa masse spécifique, de sa viscosité et du diamètre D de la conduite. Soit dL la longueur d'un élément de conduite.

La perte de charge correspondant à cet élément peut s'écrire : $dw = F(\rho, U, D, \mu) dL$ ou :

$$\frac{dw}{dL} = F(\rho, U, D, \mu)$$

ρ , U et μ représentant respectivement la masse spécifique, la vitesse et la viscosité absolue du gaz dans l'élément de conduite de longueur dL .

La fonction F développée en série peut s'écrire :

$$F = \sum A \rho^x \mu^y D^z U^t.$$

Ecrivons que le terme général a les dimensions d'une pression divisée par une longueur :

$$L^{-2} M T^{-2} = (M L^{-3})^x \times (L^{-1} M T^{-1})^y L^z (L T^{-1})^t$$

d'où : $x = 1 - y$ $z = -1 - y$ $t = 2 - y$.

CALCUL HYDRAULIQUE DE L'AIR-LIFT

Le terme général est donc de la forme :

$$A \times \frac{\rho_a \cdot U^2}{d} \left(\frac{H}{Ud \rho_a} \right)^y \quad \text{et puisque } \nu = \frac{\mu}{\rho_a} :$$

$$F = \frac{\rho_a \cdot U^2}{d} \sum A \left(\frac{H}{Ud \rho_a} \right) = \frac{\rho_a \cdot U^2}{2} \times \frac{1}{d} \times \lambda \left(\frac{Ud}{\nu} \right)$$

$\frac{Ud}{\nu}$ étant le nombre de Reynolds IR.

$\lambda(R)$ est une fonction, à déterminer, du nombre de Reynolds qui porte le nom de coefficient de perte de charge.

La perte de charge négative à l'image d'une hauteur de chute négative est, par convention, considérée comme une grandeur positive.

Par contre, la variation de pression par unité de longueur $\frac{dP}{dL}$ est bien une grandeur négative.

On écrit donc :

$$-\rho_a \frac{dw}{dL} = -\rho_a \frac{U^2}{2} \times \frac{1}{d} \times \lambda \left(R, \frac{e}{r} \right). \quad (5-3)$$

$\lambda \left(R, \frac{e}{r} \right)$, est une fonction, à déterminer, du nombre de Reynolds et de la rugosité des conduites dans les cas pratiques.

Remplaçons cette dernière expression, dans l'équation de BERNOULLI généralisée, il vient :

$$dp + \rho_a U \cdot dU + \rho_a g \cdot dz = - \frac{8 \cdot \rho_a}{\pi^2} \cdot \lambda \cdot \frac{\rho_a a^2}{d^5} \cdot dl. \quad (5-4)$$

Le terme $\rho_a U \cdot dU$ dû à la vitesse peut être négligé, devant les termes exprimant l'énergie potentielle;

il reste :
$$dp + \rho_a g \cdot dz = - \frac{8 \rho_a a}{\pi^2} \cdot \lambda \cdot \frac{\rho_a a^2}{d^5} \cdot dl \quad (5-4)'$$

Dans les conduites cylindriques horizontales, le terme dû à l'altitude disparaît, l'équation générale des pertes de charge prend la forme :

$$\frac{dP}{dl} = - \frac{8 \cdot \rho_a}{\pi^2} \cdot \lambda \cdot \frac{\rho_a a^2}{d^5} \quad (5-5)$$

CALCUL HYDRAULIQUE DE L'AIR-LIFT

Dans le cas de l'air-lift, une partie de la conduite d'air est immergée verticalement dans le réservoir d'aspiration, reprenons donc l'expression (5-4), soit H_a , la hauteur de cette partie verticale, et en tenant compte que les pertes dans cette conduite d'air comprimé, ne dépasse pas $0,1 \rho_a g h$, on obtient :

$$0,1 \rho_a g h + H_a \cdot \rho_a \cdot \text{moy. } g = - \frac{8 \rho_a \cdot \text{moy. } \lambda \cdot \frac{Q_a^2}{d^5}}{\pi^2} dl$$

$$\text{ou } d = \sqrt[5]{\frac{8 \cdot \lambda \cdot \rho_a \cdot \text{moy. } l \cdot Q_a^2}{\pi^2 g (0,1 \rho_a g h + \rho_a \cdot \text{moy. } H_a)}} \quad (5-6)$$

l : longueur de la conduite d'air

H_a : hauteur de la partie verticale de la conduite d'air

$\rho_a \cdot \text{moy.}$: masse volumique moyenne de l'air comprimé à température constante.

$$\rho_a \cdot \text{moy.} = \rho_a \cdot \frac{\rho_a g h}{P_a} \quad (5-7)$$

ici, ρ_a : masse volumique de l'air sous une pression de $101325 P_a$, $T = 353^\circ \text{ K}$ (80° C)

et de 50% comme taux d'humidité, $\rho_a \left[\text{Kg} / \text{m}^3 \right]$.

Le débit d'air comprimé nécessaire vaut:

$$Q_a = q_n \cdot \frac{P_a + \rho_a g h / 2}{P_a} \times Q_1$$

où q_n : coefficient du débit spécifique.

$$Q_a = q \cdot Q_1 \quad (5-8).$$

5.2.3 - Détermination du coefficient de perte de charge

a) Généralités sur le nombre de Reynolds.

λ est une fonction du nombre Reynolds, la forme de cette fonction dépend essentiellement de la façon dont se comporte le fluide pendant son écoulement. Or, les différents régimes d'écoulement dépendent eux-mêmes du nombre de Reynolds.

$$R = \frac{UD}{\nu} = \frac{4}{\pi \nu} \cdot \frac{Q_a}{d}$$

CALCUL HYDRAULIQUE DE L'AIR-LIFT

- U étant la vitesse du gaz (air)
 ν la viscosité cinématique
 d le diamètre de la conduite.

Si l'on exprime Q_a en m³/heure à 15°/1013 mbars, d en millimètres et ν en stokes (cm²/sec.) :

$$R = \frac{3537}{\nu} \frac{Q_a}{d} = \sqrt{\frac{Q_a}{d}}$$

selon la notation proposée par M. KOWARSKI,

$$\sqrt{} = 24300 \text{ pour l'air ; } \boxed{R = 24300 \frac{Q_a}{d}}$$

b) Ecoulement laminaire.

Utilisons la formule de Poiseuille, $Q = \pi \frac{r^4}{8 \mu DL} \frac{DP}{DL}$

Pour un élément de tuyau de longueur DL, on aura, en introduisant le diamètre d :

$$\boxed{\frac{DP}{DL} = \frac{128 \mu}{\pi} \frac{Q_a}{d^4}}$$

Il est intéressant de mettre la formule sous la forme générale donnée en (5-5) et d'en tirer la valeur de λ en régime laminaire.

$$\begin{aligned} \frac{DP}{DL} &= \frac{128 \mu}{\pi} \frac{Q_a}{d^4} = \frac{128 \nu}{\pi} f_a \frac{d}{Q_a} \frac{Q_a^2}{d^5} \\ &= \frac{8 f_a}{\pi^2} \cdot 64 \left(\frac{\pi \nu \cdot d}{4 Q_a} \right) \frac{Q_a^2}{d^5} \\ &= \frac{8 f_a}{\pi^2} \cdot 64 R^{-1} \frac{Q_a^2}{d^5}, \end{aligned}$$

d'où $\boxed{\lambda = 64 \cdot R^{-1}}$

CALCUL HYDRAULIQUE DE L'AIR-LIFT

c) Ecoulement turbulent dans les tuyaux lisses.

En se basant sur des considérations sur la répartition des vitesses, dans une section droite de tuyau, KARMAN a explicité la relation $\lambda = f(R)$.

Il a trouvé que :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log. \frac{2,51}{R \sqrt{\lambda}}$$

la formule la plus utilisée, est celle de BAZILUS, soit

$$\lambda = 0,3164 R^{-0,25} \quad \text{pour } R < 250\,000$$

convient à la plupart des cas de la distribution du gaz.

d) Ecoulement turbulent dans les tuyaux rugueux.

La fonction $\lambda = f\left(R, \frac{e}{R}\right)$, a été représenté sous la forme suivante :

$$\lambda = \psi\left(\frac{e}{R}\right) + a R^{-b},$$

est une fonction du facteur de rugosité, a et b des constantes.

Par exemple, la formule de VON MISES :

$$\lambda = 0,0096 + \sqrt{\frac{2e}{R}} + 1,77 R^{-0,50}$$

et NIKURADSE a donné ^D une formule exprimant la valeur limite de λ (pour R très grand)

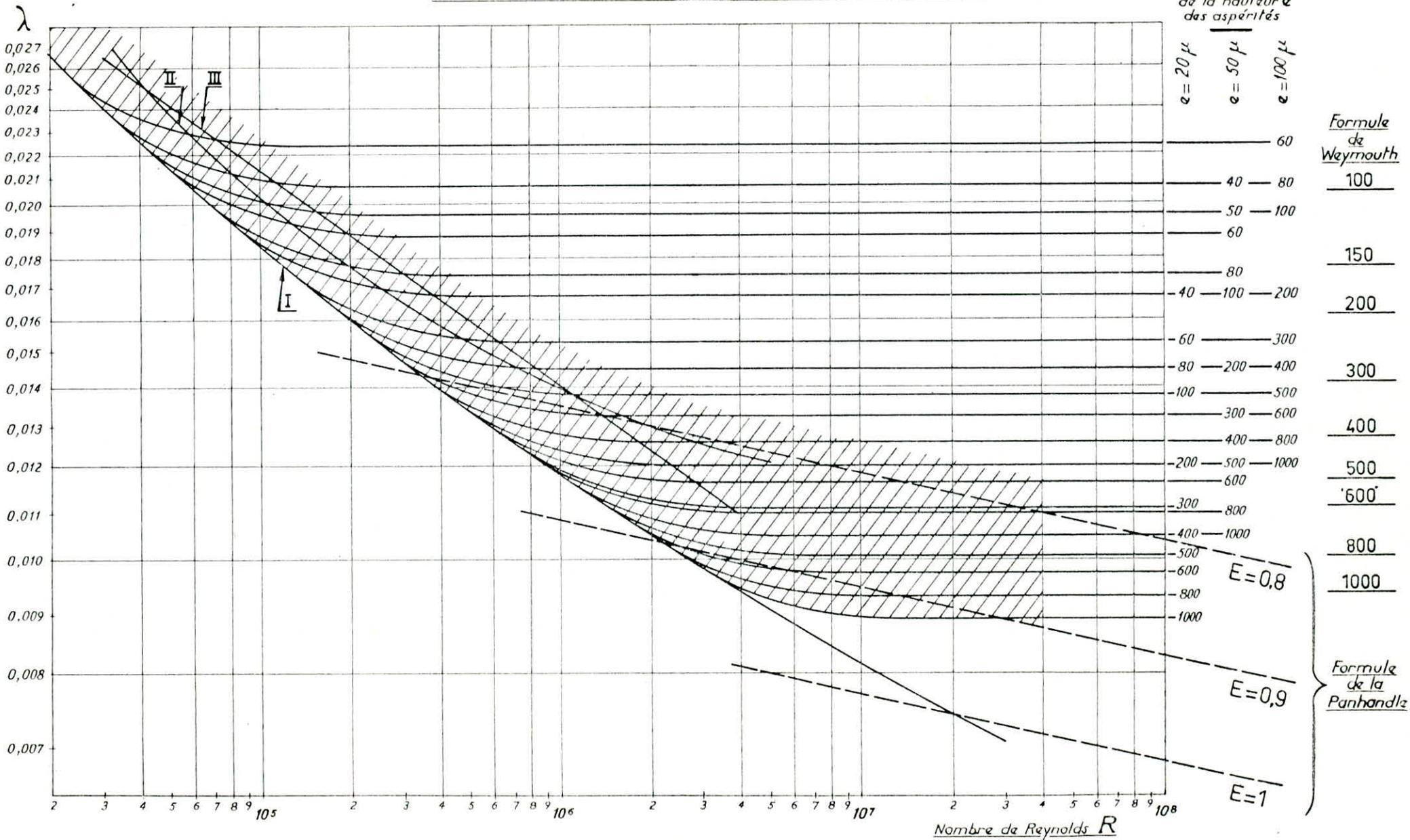
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda \text{ limite}}} = -2 \cdot \log \frac{e}{3,7 \cdot D}$$

e) Abaque générale indiquant le coefficient de perte de charge dans les conduites lisses et rugueuses.

L'abaque (page 44), établi par M. RENOARD donne une vue d'ensemble des renseignements concernant les pertes de charge.

- Courbe (I), donne les valeurs de λ pour les tubes lisses, d'où se détachent les branches relatives à différentes valeurs de la rugosité.

Coefficient de perte de charge λ , dans les conduites de gaz.



Page - 44 -

4A

CALCUL HYDRAULIQUE DE L'AIR-LIFT

- Courbe (II), utilise la formule binôme de M.RENOUARD

$$\lambda = 0,0103 + 1,59.R^{-0,44}$$

pour les écoulements turbulents lisses, tenant compte de l'influence de rugosité des tubes et des accidents de parcours, pour les valeurs élevées de R.

- Courbe (III); utilise la formule monôme de M.RENOUARD,

$$\lambda = 0,21 R^{-0,20}, R < 2 \cdot 10^4$$

$$\lambda = 0,172 R^{-0,18}, 2 \cdot 10^4 \leq R \leq 2 \cdot 10^6$$

- Formule de la PANHANDLE pour trois (03) valeurs du coefficient E, qui tient compte de la rugosité. $R > 2 \cdot 10^6$.

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{E^2}; \lambda_0 \text{ étant une expression théorique d'un coefficient de perte de charge attribué aux tubes lisses.}$$

$E = 1$ pour les tubes lisses

$0,8 < E < 0,95$, dans les cas pratiques.

- Niveaux de la formule de WEYMOUTH ($\lambda = 0,098.d^{-1/3}$, fonction de d et non de R).

Les branches de courbe donnant λ en fonction de la rugosité sont graduées par une triple échelle située à droite du graphique.

Par exemple, pour une conduite de 300 mm dont la hauteur des aspérités est de 20 μ (tube d'acier sans aucun dépôt), la branche à choisir correspond à 300 prise sur l'échelle 20 μ .

La zone hachurée correspond aux points $\lambda = f(R)$.

5.3 - Les paramètres nécessaires du compresseur.

Les compresseurs à pistons sont les plus utilisés dans l'industrie du gaz, on peut obtenir avec des pressions relativement élevées pouvant être comprise entre 1 bar et 400 bars effectives et les débits variant de 100 m³ à plusieurs milliers de mètres cubes/heure avec puissance maximale de l'ordre de 7500KW.

Les compresseurs à pistons réalisent la compression du gaz par la réduction de volume du gaz isolé dans le cylindre.

CALCUL HYDRAULIQUE DE L'AIR-LIFT

Le cycle théorique d'évolution du gaz dans un cylindre de compresseur est le suivant :

- compression et refoulement pendant la course aller,
- aspiration pendant la course de retour.

Dans un cycle idéal dans lequel l'espace mort au volume occupé par la gaz en fin de refoulement serait nul, le débit de gaz comprimé pour un tour d'arbre manivelle est égal au volume engendré pendant la course aspiration.

Le débit du compresseur (en tenant compte des pertes de débit); est donné par :

$$Q_c = (1,05 \dots 1,1) Q_a \cdot n \quad (5-9)$$

ici, n : nombre de sections pour les air-lift étagés.

La pression effective dans le collecteur de la centrale de refoulement est :

$$P_c = \rho \cdot g \cdot h + DP_f - \int_a, \text{ moy. } g \cdot H_a \quad (5-10)$$

où DP_f : perte de pression dans les conduites d'air

$$DP_f = \frac{16 \rho_a \cdot \text{moy. } l \cdot Q_c^2}{\pi^2 d_i^5} \quad (5-11)$$

d_i : diamètre intérieur de la conduite d'air.

5.4 - Diamètre équivalent du schéma hydraulique des conduites de refoulement.

D'après le chapitre 3, le diamètre équivalent est déterminé d'après la formule :

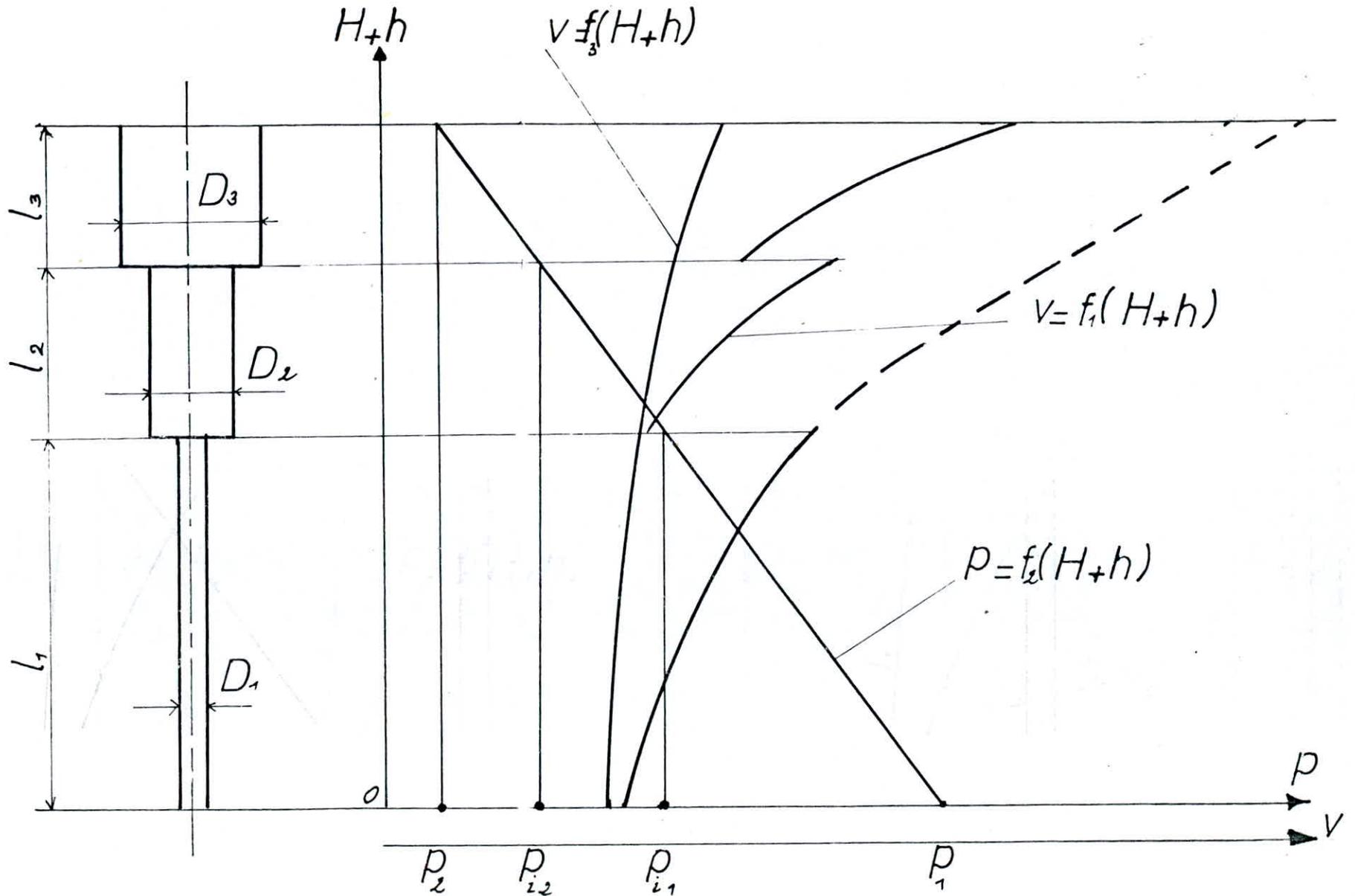
$$D_{eq} = \sqrt[5]{\frac{Q_1^2}{K \rho \cdot g}} \quad (5-12)$$

$K \cdot Q$ est le coefficient sans dimension, est déterminé sur l'abaque tracé en page .

La condition qui laisse prendre une section variable de la conduite de refoulement est tel que le changement de pression soit :

$$\frac{P_1}{P_2} > 2.$$

En s'élevant, le mélange perd de pression, alors que la vitesse dans la conduite étudiée, augmente, atteint des valeurs importantes qui influera négativement au travail de l'air-lift;



CALCUL HYDRAULIQUE DE L'AIR-LIFT

(usure rapide de conduites, augmentation des charges dynamiques et chocs importants du mélange sur le séparateur).

Sur le schéma (5-2), les lignes interrompues (...) montre la variation de la vitesse de l'écoulement du mélange dans une conduite de refoulement à section constante, alors qu'en traits forts, la variation de la vitesse dans une conduite à section variable.

En abordant ce type de conduite télescopique, il faudrait déterminer le nombre de sections à utiliser, en fonction des pressions d'entrée et de sortie du mélange, en sachant en premier lieu, l'égalité des travaux de détente de l'air suivant chaque section :

$$\frac{P_1}{P_{i1}} = \frac{P_{i1}}{P_{i2}} = \dots = \frac{P_i (Z-1)}{P_2} = \xi \quad (5-13)$$

P_2 : pression à la sortie de la conduite de refoulement

P_1 : pression dans le mélangeur : $P_1 = P_a + \rho \cdot g \cdot h$

P_i : pression à l'entrée à chaque nouvelle section.

ξ : taux de diminution de la pression

$$\xi = \sqrt[Z]{\frac{P_1}{P_2}} \quad (5-14)$$

Z : nombre de sections

$$Z = \text{Ln} \frac{P_1}{P_2}, \quad (5-15).$$

On prend la valeur entière de Z .

En utilisant la distribution triangulaire de la pression le long de la longueur de la conduite de refoulement suivant le graphique (fig. 5.2), on détermine le diamètre de chaque section.

$$D_i = \sqrt{\frac{4 Q_l (1 + q_{r,i})}{\pi \cdot v_{tr,i}}} \quad (5-16)$$

$q_{r,i}$: débit spécifique réduit correspond à la pression d'entrée en chaque section

i : numéro de chaque section

$$q_{r,i} = \frac{Q_a}{Q_l} \cdot \frac{P_a}{P_i}; \quad (5-17)$$

CALCUL HYDRAULIQUE DE L'AIR-LIFT

$v_{tr\ i}$: vitesse du mélange au début de chaque section.

HEIR, dans son livre recherche hydraulique sur les écoulements à grande vitesse dans la conduite d'alimentation de l'air-lift.

$$v_{tr\ i} = v_0 + K_s \left[1 - \left(\frac{d_s}{D_i} \right)^2 \right] \sqrt{\frac{2}{3} \cdot g \frac{d_s}{C} \left[1 - \left(\frac{d_s}{D_i} \right)^2 \right]^*}$$

$$\cdot \sqrt{\rho_s \frac{(q_{r,i} + 1)}{\rho} - 1} \quad (5-18)$$

$v_0 \approx 0,5$ m/s : vitesse initiale du mélange

d_s : diamètre des grains solides

$$d_s = \frac{D_i}{3}$$

Pour le cas de pompage par l'air-lift, $d_s \text{ max} = 0,05\text{m}$

$K_s = 1,2 \dots 1,4$: coefficient de sécurité

C : coefficient de résistance du mouvement des grains solides transportés; pour les solides de forme :

sphérique ; $C = 0,08 \dots 0,12$

carré ; $C = 0,12 \dots 0,15$

plat ; $C = 0,15 \dots 0,2$

ρ_s : masse volumique des grains solides Kg/m^3 .

La disposition en scène des différents diamètres de la conduite de refoulement permet d'écrire :

$$\frac{H + h}{D_{eq}^5} = \frac{l_1}{D_1^5} + \frac{l_2}{D_2^5} + \dots + \frac{l_z}{D_z^5} \quad (5-19)$$

Pour déterminer la variation $v = f(H+h)$, pour n'importe quelle section, on utilise

$$v_i = \frac{4 \cdot Q_1 (1 + q_{r,i})}{\pi \cdot D_i^2} \quad (5-20).$$

5.5 - Diamètre de la conduite d'aspiration.

La vitesse dans la conduite d'aspiration est déterminée selon la vitesse nécessaire au transport des grains solides.

CALCUL HYDRAULIQUE DE L'AIR-LIFT

ZARIA [les recherches sur le mouvement des grains solides dans les conduites verticales 1960], a déterminé l'expression de la vitesse du mélange à l'aspiration

$$v_{asp} = v_0 + K_s \sqrt{\frac{g \cdot d_s}{c} \frac{2}{3} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)} \quad (5-21)$$

ici, $c = 0,25$: coefficient de résistance du mouvement des grains solides dans le liquide.

Donc le diamètre de la conduite d'aspiration est déterminé par :

$$d_{asp} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_1}{\pi v_{asp}}} \quad (5-22)$$

on prend les diamètres normalisés, en vérifiant la condition :

$$d_{asp} = (2,5 \dots\dots\dots 3,0) d_s.$$

Les principaux éléments constructifs sont les suivants :

- 1- installation d'aspiration (pour les différentes sections, si l'air-lift est à étages)
- 2- mélangeur
- 3- séparateur

6.1 - Installation d'aspiration.

Celle-ci ayant pour but de régler la dose des grains solides dans la conduite d'aspiration.

L'installation d'aspiration est placée toujours dans la partie inférieure de l'air-lift, en sa section de sortie est reliée la conduite d'aspiration.

Cette installation comprend une cellule d'accumulation du liquide servant à protéger la section d'entrée et à régler en même temps la quantité de la matière solide entrante.

Sur la figure (6.1) p.54 (3) est la conduite de la cellule d'accumulation possédant à son extrémité haute des trous pour que l'injection du liquide se fasse d'une façon régulière.

L'installation d'aspiration repose sur un fond en fente, (4) où ses parois latérales sont inclinées de 30° - 45° , permettant l'infiltration des grains solides, (6) est une plaque métallique inclinée de 60° , facilitant le glissement des grains solides et la continuité du processus d'aspiration, (5) c'est les pieds de fixation de l'installation d'aspiration, pour la surelever d'une altitude D_h , nécessaire à une bonne pénétration du débit solide-liquide.

Si devant l'installation d'aspiration se trouve une grande quantité de corps solides, les résistances hydrauliques augmentent, cela conduira à une diminution de pression à l'intérieur de la cellule, d'où une naissance d'une différence de pression DP , égale à la perte de charge sur la couche d'infiltration.

Sur l'action de cette différence de pression, le liquide entre dans la conduite (3), chariera dans son parcours les grains solides, sous l'action de leur pesanteur, l'écoulement du mélange liquide-solide s'établira et le processus d'aspiration continue.

L'installation d'aspiration est le doseur automatique des débits de corps solides, le dimensionnement de l'installation d'aspiration (fig. 6.1, page 54) dépend dans beaucoup de cas de la conduite d'aspiration.

ELEMENTS CONSTRUCTIFS DE L'AIR-LIFT ET SON CALCUL

HEIR, dans son livre les conduites d'aspiration (1967) suivant les expériences qu'il a faites dans ce domaine, il a donné une formule donnant le diamètre d'action de la conduite d'aspiration

$$D_{act} = \frac{Q_1}{K_{act} \cdot D_h \cdot d_s \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho} - 1}} \quad (6-1)$$

ici : K_{act} : coefficient dépend des conditions d'aspiration.

$$\begin{aligned} K_{act} &= 4,5 && \text{pour } Q_1 > 300 \text{ m}^3/\text{h} \\ K_{act} &= 2,5 - 4,5 && \text{pour } Q_1 = 100 - 300 \text{ m}^3/\text{h} \\ K_{act} &= 1,4 - 2,8 && \text{pour } Q_1 < 100 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

la somme des sections de tous les orifices de la conduite (3) de l'installation d'aspiration doit être égale à 10 fois la section de cette conduite.

6.2 - Mélangeur.

Son rôle essentiel est de réaliser le mélange liquide-air comprimé, en faisant transmettre au liquide l'énergie donnée par l'air comprimé d'une manière efficace.

Ce mélangeur ne doit pas résister au passage des corps solides de la conduite d'aspiration vers la conduite de refoulement et inversement quand l'air comprimé n'est plus injecté.

Pour avoir un mélange uniforme et une injection d'air comprimé régulière, le schéma le plus efficace du mélangeur est tel que la conduite (3) (fig. 6.2) de la chambre du mélangeur soit perforée de trous de 3 - 6 mm, la quantité de ces trous est prise de la manière que leur somme soit égale à 1,5 - 2 la section de la conduite de refoulement (fig. 6.4) page 55.

La chambre (4) est destinée à diminuer la vitesse d'entrée de l'air comprimé vers les trous.

Une conduite (5), doit être aménagée à la partie inférieure de la chambre qui évacuera le liquide ainsi que les petites particules solides qui stagnent dans le mélangeur quand on cesse d'injecter de l'air.

6.3 - Le séparateur.

Il est destiné à séparer le courant triphasique (eau - air - solide) en deux parties :

- 1°) l'air sera évacué vers l'atmosphère
- 2°) l'eau + solide, orienté suivant la destination désirée.

Le séparateur à construire doit satisfaire les tâches suivantes :

- diviser quantitativement le mélange
- stabilité du fonctionnement
- supporter la charge dynamique et doit avoir une résistance hydraulique minimale.

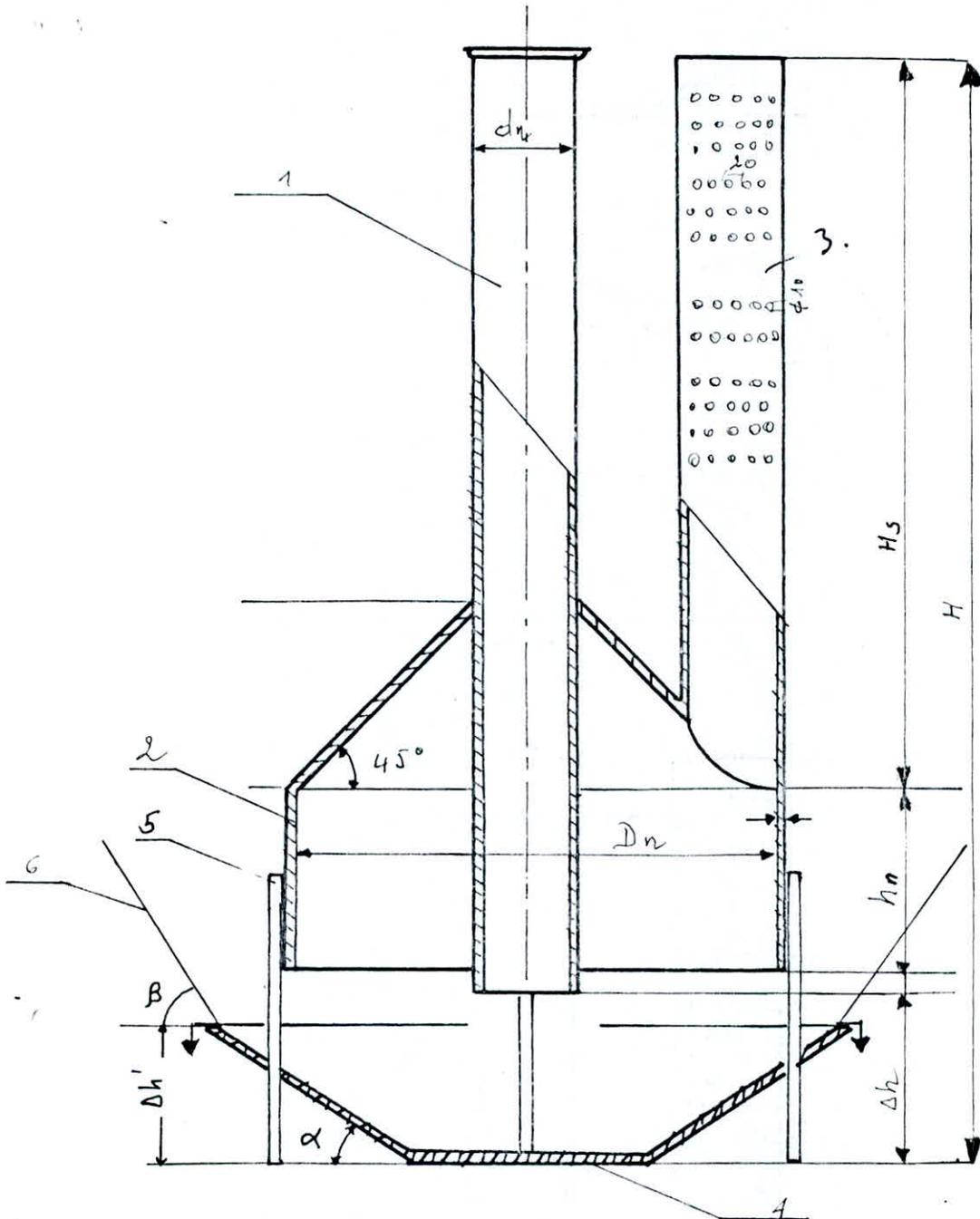
Les essais sur les différents séparateurs construits montrent que la variante la plus favorable est le séparateur possédant une sortie du mélange, suivant une surface latérale, celui-ci est schématisé sur la figure (6.3), page 55

Ce séparateur possède une conduite de refoulement fermé, mais sur sa surface latérale, elle possède deux groupes d'ouverture (2) et (3), la plus grande ouverture est destinée à la sortie du mélange (eau-solide) et la petite, pour la sortie de l'air, pour qu'il n'y est pas formation à nouveau d'un écoulement triphasique, les deux types d'ouverture doivent former un angle droit, évitant une intersection du mélange avec l'air.

Par la petite ouverture (4), le jet frappe la partie supérieure de la conduite, qui servira à amortir le jet et d'éviter les chocs; à la détente d'air, une poussée sur le mélange solide-liquide se forme, qui évacuera ce mélange vers l'ouverture (2) et le recueillira par la conduite (8), quittera enfin le séparateur.

L'air comprimé s'échappant de l'ouverture (4), gagne la partie supérieure du séparateur, où se trouvent des ouvertures (7), serviront à évacuer l'air comprimé vers l'atmosphère.

fig:6-1 INSTALLATION D'ASPIRATION



$$\Delta h = (0,8 - 1,0) dn$$

$$\Delta h' = (0,9 - 1,0) dn$$

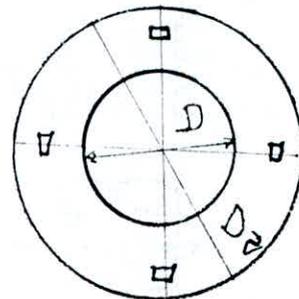
$$hn = (1,0 - 2,0) dn$$

$$dm = (0,7 - 1,0) dn$$

$$Dn = (3,0 - 5,0) dn$$

$$Da = (4,0 - 6,0) dn$$

$$f) = (1,5 - 2,0) dn$$



Schema du melangeur fig. 6.2

$$d_o = 3.6 \text{ mm}$$

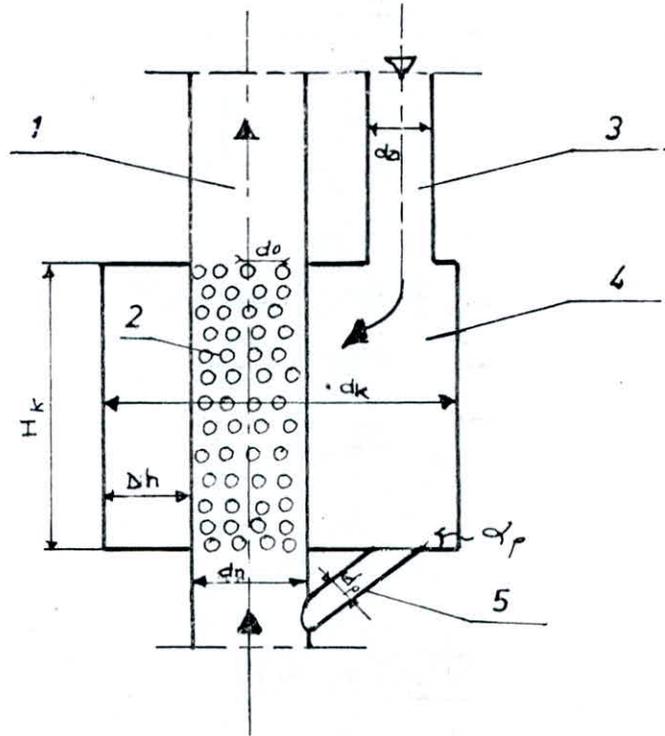
$$d_k = (2.5 \dots 3.0) d_n$$

$$H_k = (3.0 \dots 4.0) d_n$$

$$d_p = (0.5 \dots 6.0) d_n$$

$$\alpha_p = 45^\circ \dots 65^\circ$$

$$\Delta h = (0.3 \dots 0.5) d_n$$



Schema du separateur fig. 6.3.

$$D_o = 0.7.D$$

$$D'_k = 2.D$$

$$D_k = 3.5.D$$

$$D' = 1.7.D$$

$$H_N = (2 \dots 4).D$$

$$H_k = 6.D$$

$$H' = 0.2.D; H_a = 2.D$$

$$H_1 = 5.D; H_2 = 0.7.D$$

$$a = 0.7.D$$

$$b = 0.9.D$$

$$c = 0.3.D$$

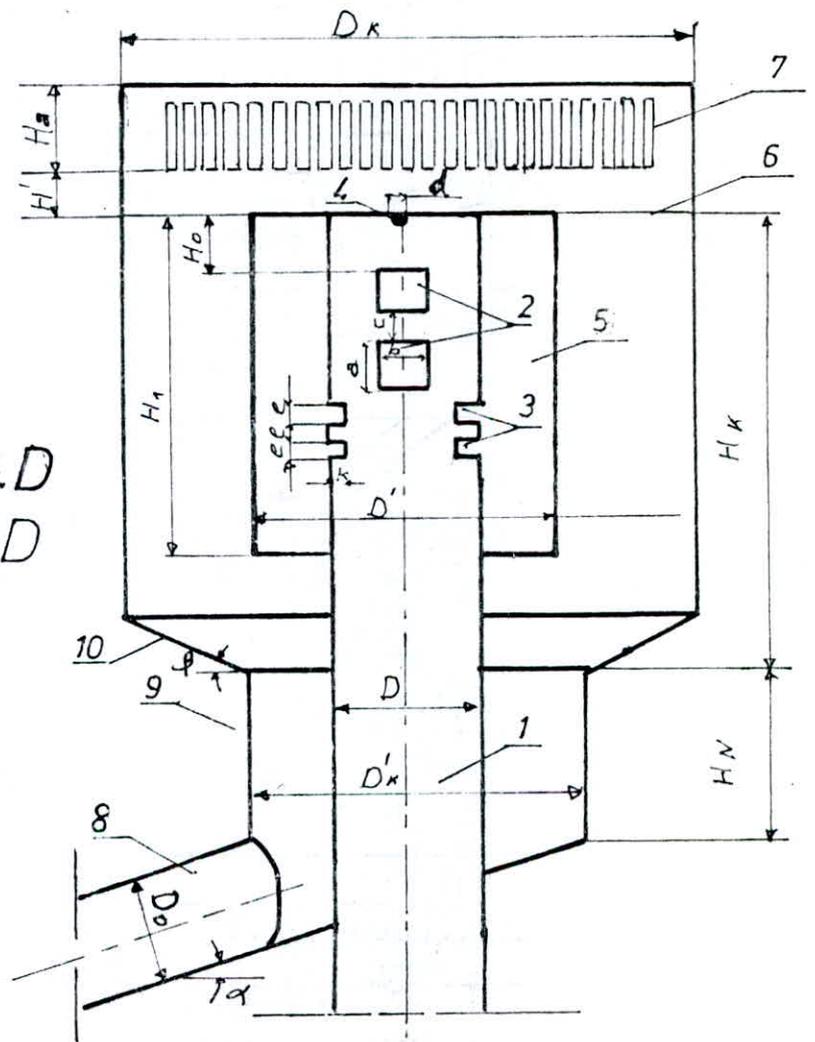
$$e = 0.16.D$$

$$d = 0.1.D$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$\beta = 45^\circ$$

$$K = 0.1.D$$



Les courbes de ce chapitre sont tracées en utilisant les formules données au chapitre 3 : bases théoriques de l'air-lift.

Ces formules sont les suivantes :

- Courbes A.7.1, 2 et 3.

$$Q_1 = \frac{5 \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \sqrt{q + 1 - \frac{1}{\alpha}}}{\sqrt{1 + q}} \cdot \sqrt{g D^5}$$

- Courbes B.7 .1 et 2.

$$KQ = \frac{5 \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \sqrt{q + 1 - \frac{1}{\alpha}}}{\sqrt{1 + q}}$$

- Courbes C.7.

$$q_{th} = \frac{h (1 - \alpha)}{\alpha \frac{P_a}{f \cdot g} \frac{P_m + P_{atm}}{P_{atm}}}$$

- Courbes D.7.1, 2, 3, 4,

$$\eta = \frac{h (1 - \alpha)}{\alpha \cdot H_a \cdot \ln \left(1 + \frac{f \cdot g \cdot h}{P_a} \right)} ; \quad Ha = \frac{P_a}{f \cdot g}$$

- Courbes F.7.

$$Q_1 = KQ \cdot \sqrt{g D^5}$$

$$KQ = \frac{1}{1 + q} \sqrt{\frac{\alpha}{\psi} \left(1 + q - \frac{1}{\alpha} \right)}$$

$$q = 60 \exp (-9,81 \cdot \alpha) \text{ air-lift long}$$

$$q = 0,767 \cdot \alpha^{-2,2} \text{ air-lift court.}$$

COMPARAISON DES RESULTATS EXPERIMENTAUX et THEORIQUES

..... D(m):diamètre de la conduite de refoulement

..... h(m):immersion absolue

..... a:alpha : immersion relative

..... qr:débit spécifique réel.....

..... qc:débit spécifique théorique

..... Er.q:erreur relative sur le débit spécifique.....

..... Qlr:débit liquide réel

..... Qlc:débit liquide théorique

..... Er.Q:erreur relative sur le débit liquide

```

#####
D(m) ! h(m) ! a ! qr ! qc ! Er.q ! QLr ! QLc ! 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 26.64 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 26.64 31.60 0.16 !
#####
0.150 61.000 0.318 16.30 10.58 0.54 55.08 69.48 0.21 !
#####
0.150 51.400 0.257 22.00 16.98 0.30 45.00 52.00 0.13 !
#####
0.150 43.800 0.206 35.50 25.04 0.42 40.32 39.42 0.02 !
#####
0.150 35.000 0.165 55.80 32.30 0.73 30.24 31.28 0.03 !
#####
0.153 42.900 0.174 50.00 33.79 0.48 31.68 33.36 0.05 !
#####
0.153 33.000 0.134 69.50 42.20 0.65 26.75 26.15 0.02 !
#####
0.250 4.320 0.138 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 0.27 122.40 382.47 0.68 !
#####
0.250 8.000 0.400 6.25 8.02 0.22 120.90 232.18 0.48 !
#####
0.250 8.000 0.500 3.44 4.91 0.30 150.72 306.81 0.51 !
#####

```



```

#####!
!   CALCUL DE LA MOYENNE DES ERREURES   !
#####!

#####!
!   moyenne des erreurs relatives      !
!   sur le debit specifique           !
!   Err.moy = somme Eqe/N              !
#####!

!#####!
!   Err.moy sur qe=0.28               !
!#####!

#####!
!   moyenne des erreurs relatives      !
!   sue le debit liquide               !
!   Err.moy = somme EQe/N              !
#####!

!#####!
!   Err.moy sur QLe =0.27            !
!#####!

#####!
!   CALCUL DU COEFFICIENT DE CORRELATION ENTRE LES !
!   DEBITS SPECIFIQUES ET DEBITS LIQUIDES REELS ET !
!   EXPERIMENTAUX                               !
#####!

#####!
!   LE COEFFICIENT DE CORRELATION est note ' r '   !
#####!

#####!
!   !r=(n.Sx.y-Sx.Sy)/sqr((n.Sx^2-(Sx)^2)(n.sy^2-(Sy)^2)) !
#####!

#####!
!   coefficient de correlation sur le debit specifique 'rq' !
#####!

!#####!
!   rq=0.85                                     !
!#####!

#####!
!   coefficient de correlation sur le debit liquide 'rQL' !
#####!

!#####!
!   rQL=0.94                                     !
!#####!

```

RESULTATS, GRAPHES ET LEUR INTERPRETATION

Sur la base des données théoriques, on trace graphiquement les dépendances des différentes variables caractérisant l'air-lift en fonction des paramètres généraux qui sont :

- le débit spécifique
- le débit d'air comprimé
- les immersions h et α .

Ceci pour les deux catégories de l'air-lift court et long et pour différents diamètres.

7.1- Variation $Q_1 = f(Q_a)$. fig.A(7.1, 2, 3) :

Les dépendances générales de travail de l'air-lift peuvent être représentées par $Q_1 = f(Q_a)$, de ces courbes, on remarque que pour une valeur du débit de gaz, (ce débit de gaz croît avec le diamètre) le débit liquide correspondant est nul, c'est la zone de barbotage où l'écoulement est à bulles.

On trouve les résultats suivants :

$$\alpha = 0,3; 20 \text{ m} < h < 120 \text{ m}$$

$$D = 0,25 \text{ m}; 1000 \text{ m}^3/\text{h} < Q_a < 5000 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{et } D = 0,60 \text{ m}; 4500 \text{ m}^3/\text{h} < Q_a < 19000 \text{ m}^3/\text{h}$$

Donc (enséidant aussi des tableaux de calcul de l'air-lift), pour un même diamètre et une même immersion, quelque soit

α ($\alpha = \frac{h}{H+h}$), le débit liquide augmente ainsi que le rende-

ment pour des débits spécifiques faibles, en augmentant le débit spécifique (revient à augmenter le débit d'air comprimé) le débit liquide ainsi que le rendement diminuent, l'explication de ceci, est que pour des grands débits d'air, la conduite de refoulement se trouve pleine d'air comprimé, bouchant le passage d'eau et rendant son déplacement plus difficile, donc pour une grande énergie fournie à l'air-lift, on ne recueille qu'un faible débit liquide, d'où le rendement du système se trouve réduit.

Des courbes indiquées et des tableaux de calcul, pour concevoir un air-lift donnant des rendements satisfaisants, nous limitons le débit spécifique comme suit :

$$3 < q < 15 \quad \text{pour l'air-lift long avec } D \geq 0,1 \text{ m.}$$

$$3,5 < q < 12 \quad \text{pour l'air-lift court avec } D < 0,2 \text{ m.}$$

RESULTATS, GRAPHS ET LEUR INTERPRETATION

7.2- Courbes $KQ = f(q)$ fig. B.7.1 et 2 :

Ce graphe est un genre d'abaque, que nous avons tracé pour faciliter le calcul de l'air-lift, il est indépendant du diamètre.

En ayant une immersion relative α , on calcule le débit spécifique q donné au chapitre 2, on trouve KQ , des graphes B 7.1 et 2 respectivement pour l'air-lift court et long, enfin le débit liquide est trouvé en multipliant le coefficient sans dimension KQ par le diamètre de la conduite de refoulement suivant la formule donnée au chapitre 2 :

$$Q_1 = KQ \cdot \sqrt{g \cdot D^5}$$

où

$$Q_1 = 3 \cdot KQ \cdot D^{2,5}$$

Les graphes $KQ = f(q)$, confirme la conclusion précédente (du paragraphe 7.1) que les bons rendements sont obtenus pour des débits spécifiques faibles, ceci nous amène à donner plus précisément les paramètres géométriques de l'air-lift pour une bonne exploitation de celui-ci.

En utilisant les courbes C.7 ($q_{th} = f(\alpha, h)$), on en déduit les valeurs de l'immersion relative α , suivant les limitations du débit spécifique, du paragraphe 7.1:

- air-lift court $4 \text{ m} < h < 20 \text{ m}$; $0,15 < \alpha < 0,35$
- air-lift long $20 \text{ m} < h < 120 \text{ m}$; $0,19 < \alpha < 0,5$

7.3- Courbes rendements $\eta = f(Q_a)$: courbes D.7.1,2,3,4.

Pour toutes ces courbes, nous avons choisi, une immersion relative α , unique ($\alpha = 0,3$), on change à chaque fois la pression dans le mélangeur (revient à varier h), ceci pour savoir les paramètres les plus indicatifs de l'air-lift.

Les courbes de rendements en fonction du débit de gaz, ont la même allure que celles donnant le débit liquide, le rendement croît avec le débit d'air, pour une valeur optimale de ce dernier, donnant un rendement maximal, en continuant d'augmenter le débit d'air, le rendement décroît brusquement par l'écoulement diphasique, on explique ce phénomène :

RESULTATS, GRAPHES ET LEUR INTERPRETATION

Au début d'injection d'air, le rendement est nul, car le débit liquide est nul, ce qui correspond à l'écoulement à bulles, ce débit d'air ne donne pas une énergie nécessaire pour produire un débit liquide, à partir de ce débit de barbotage, on augmente la puissance d'injection.

Le débit liquide commence à se produire, le rendement croît, il atteint brusquement son maximum, ce dernier est obtenu pour une petite zone de variation du débit de gaz, donc pour chaque paramètre géométrique de l'air-lift (diamètre, immersions h et α), on obtient des rendements maximums qui sont importants pour les grands diamètres, cette zone de travail optimal de l'air-lift, correspond à l'écoulement bouchon, les pertes par frottements et glissements sont faibles et pour une petite augmentation du débit d'air comprimé, la transition bouchon vers annulaire est atteinte, les bulles d'air se trouvent en excès, le rendement de l'air-lift décroît brusquement.

Cette explication est résumée par la courbe de la figure E.7.1

Pour une augmentation du débit d'air comprimé, la quantité d'énergie perdue par glissements entre les deux phases liquide et gaz (perte de vitesse) diminue, tandis que les pertes par frottements augmentent, donc pour certains débits d'air, la somme des pertes totales deviennent minimales, ce débit d'air optimale correspond à l'intersection des deux courbes h_f et h_g .

Cette région de débit d'air optimal augmente quand le diamètre est grand. (fig E.7.2.)

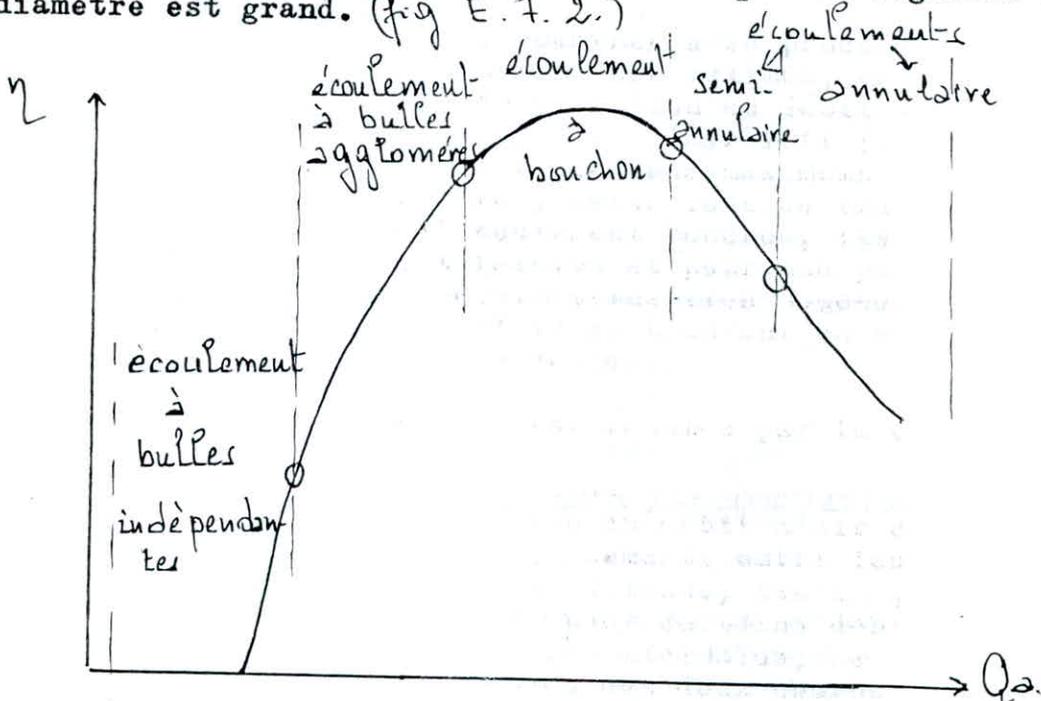


fig. E.7.1

RESULTATS, GRAPHES ET LEUR INTERPRETATION

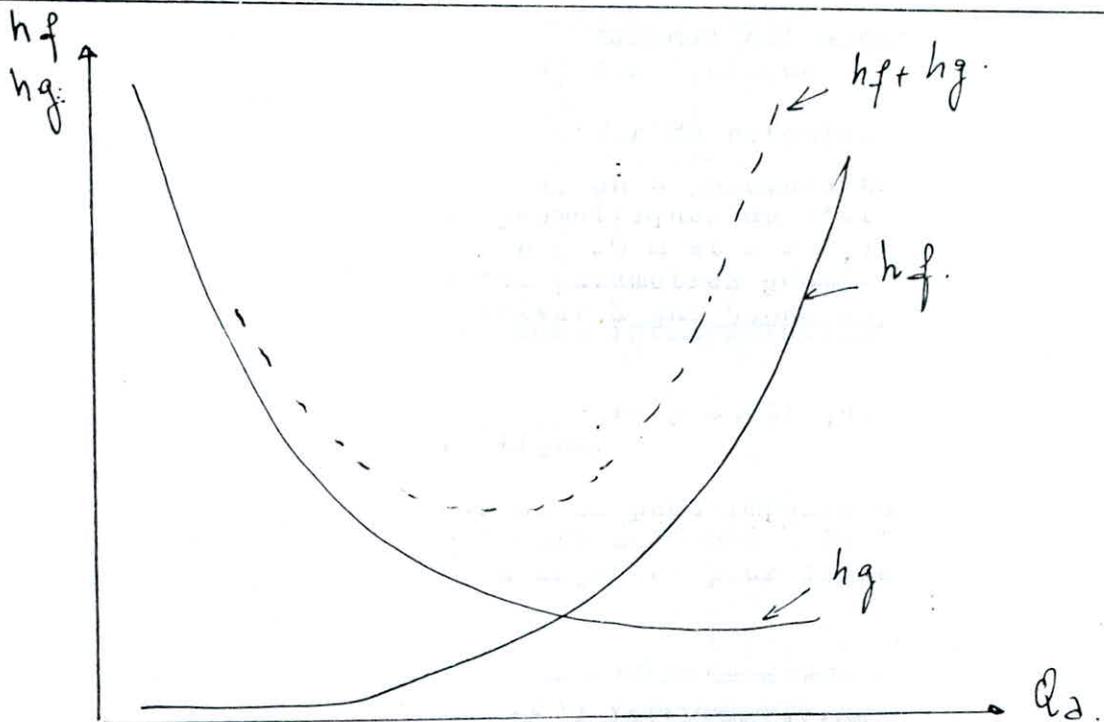


fig. E.7.2.

7.4- Courbes $Q_1 = f(\alpha)$ et $Q_a = f(\alpha)$ courbes F.7 :

Pour ce graphe, on a pris qu'un seul exemple :
 $h = 20$ m.

Le débit liquide maximal est donné pour une immersion relative unique $\alpha = 0,4$, donc puisque :

$H = h \frac{(1 - \alpha)}{\alpha}$, la hauteur de refoulement correspondante est $H = 30$ m, dans ce cas, on a pu connaître exactement quelles sont les paramètres géométriques de l'air-lift donnant le débit liquide maximal (si $h = 20$ m et $\alpha = 0,4$ alors $H = 30$ m) donc il a fallu imposer un des paramètres géométriques, connaissant les deux autres pour arriver à une bonne exploitation de l'air-lift.

Imposer un paramètre géométrique ce n'est pas toujours le cas, dans la pratique.

Dans les cas où on peut imposer un des paramètres indiqués (h ou H), le programme donné à la fin du polycopie nous donnera le débit d'air à injecter pour le bon fonctionnement de l'air-lift.

RESULTATS, GRAPHES ET LEUR INTERPRETATION

7.5- Conséquences générales :

- Choix du rapport d'immersion :

Quelque soit le diamètre de la conduite de refoulement, le rendement de l'air-lift croît si le rapport d'immersion relative α augmente, toutefois, la pression d'injection augmente elle aussi.

- Choix du diamètre du tube :

Pour limiter les pertes par frottements le diamètre du tube doit être choisi tel que la vitesse de l'eau ne dépasse pas 3 m/s à l'entrée du tube. Il peut être économique d'utiliser des tubes de diamètre croissant à l'approche de la sortie, de manière à y limiter la vitesse du mélange qui se détend.

- Choix du mélangeur :

Le dessin de l'injection doit favoriser la formation de petites bulles, afin d'augmenter dans la mesure du possible le taux de vide V_G , le mélangeur doit contenir des ouvertures pour obtenir un mélange uniforme à l'entrée de la conduite.

- Choix du débit d'air :

Le fonctionnement économique a lieu à faibles débits d'air, les rendements maximaux ne correspondent pas à des débits liquides optimaux.

Les rendements ne dépassent que difficilement 50% pour un fonctionnement optimal de l'air-lift.

- Choix du diamètre de la conduite lors du refoulement des grains solides :

Dans le cas du pompage de solides, il est clair que le choix des éléments de conduites pose des problèmes de résistance des matériaux, de résistance à l'avancement etc ... l'utilisation de tubes de diamètre croissant à mesure qu'on se rapproche de la surface est indispensable, sinon les grains solides sortent de la conduite comme des projectiles.

- Influence de la taille et de la concentration des éléments solides :

Le débit et le rendement augmente si le diamètre équivalent des éléments solides diminue. La concentration des éléments solides dans le tronçon diphasique influence fortement le rendement. Si l'on travaille avec une concentration élevée de grains solides, signifie un accroissement exagéré du poids du mélange et donc, une perte de rendement.

RESULTATS, GRAPHES ET LEUR INTERPRETATION

Les rendements maximaux de l'air-lift en triphasique sont inférieurs à ceux du diphasique, cela est dû à la différence de quantité d'air injecté.

- Dans le cas d'inclinaison de la conduite de refoulement, dans l'écoulement bouchon, qui est la seule configuration optimale correspondant à la bonne exploitation de l'air-lift, le liquide touche la paroi rugueuse, les pertes par frottements deviennent importantes, le débit liquide se trouve réduit.

7.6- Proposition de modèles d'air-lift :

Comme conséquence des interprétations et des résultats de calcul, nous concevons des modèles d'air-lift, en donnant leurs paramètres géométriques.

Les modèles que nous proposons sont des air-lift travaillant en régime optimal.

Air-lift court :

α	h (m)	H (m)	D(m)	Q_g (m ³ /s)	Q_l /l/s	η %
0,15	18	102	0,20	0,348	15,462	43,7
0,20	18	72	0,20	0,394	20,022	35,3
0,30	18	42	0,20	0,458	26,917	23,8
0,15	4	23	0,07	0,020	0,950	32,3

Air-lift long :

α	h (m)	H (m)	D (m)	Q_g (m ³ /s)	Q_l /l/s	η %
0,15	50	284	0,2	0,572	21	57,4
0,45	28	34	0,06	0,014	2	30,4
0,19	80	341	0,1	0,132	4	52,4
0,1	50	450	0,15	0,258	6	60,3

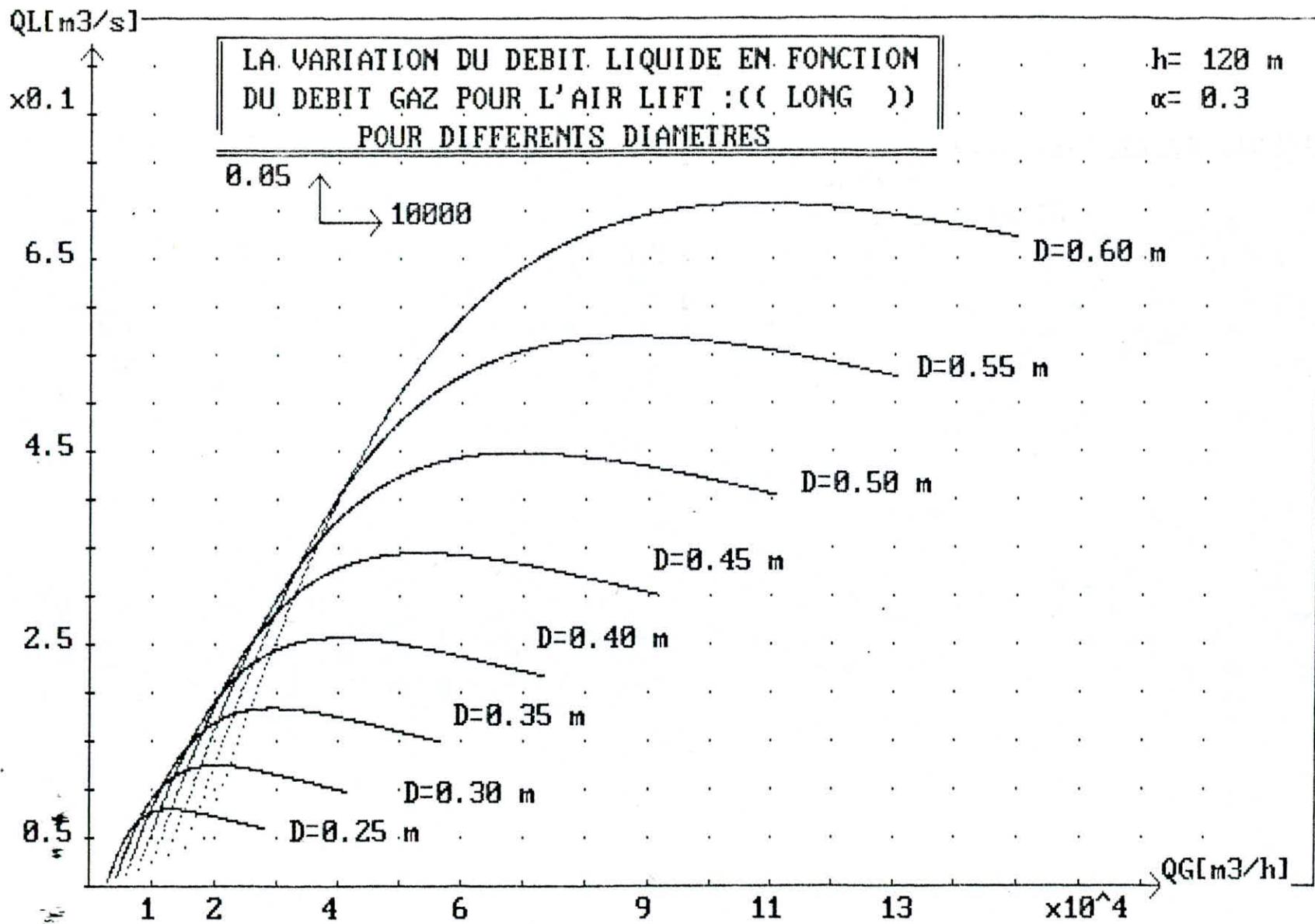
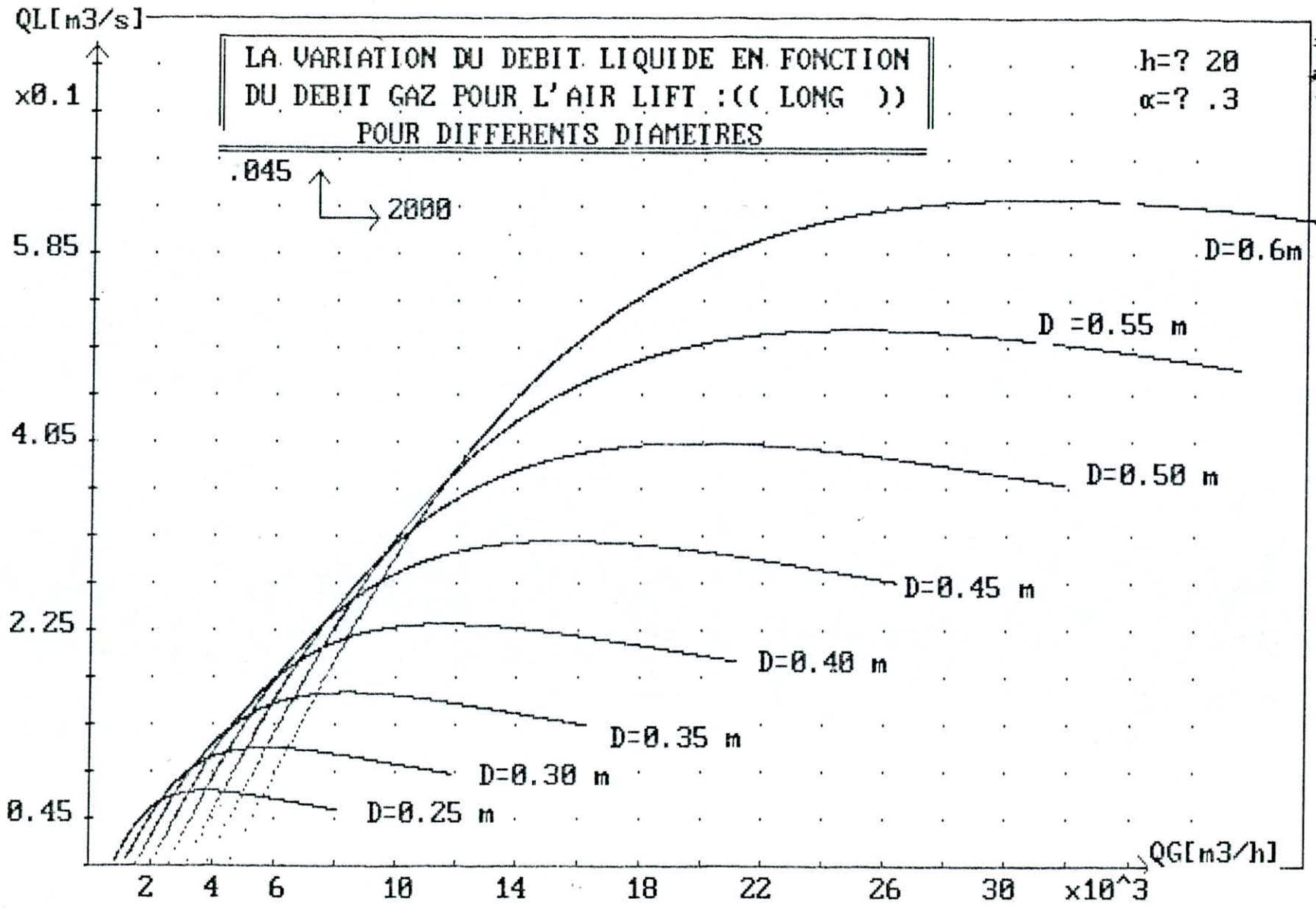


Fig A-7-1

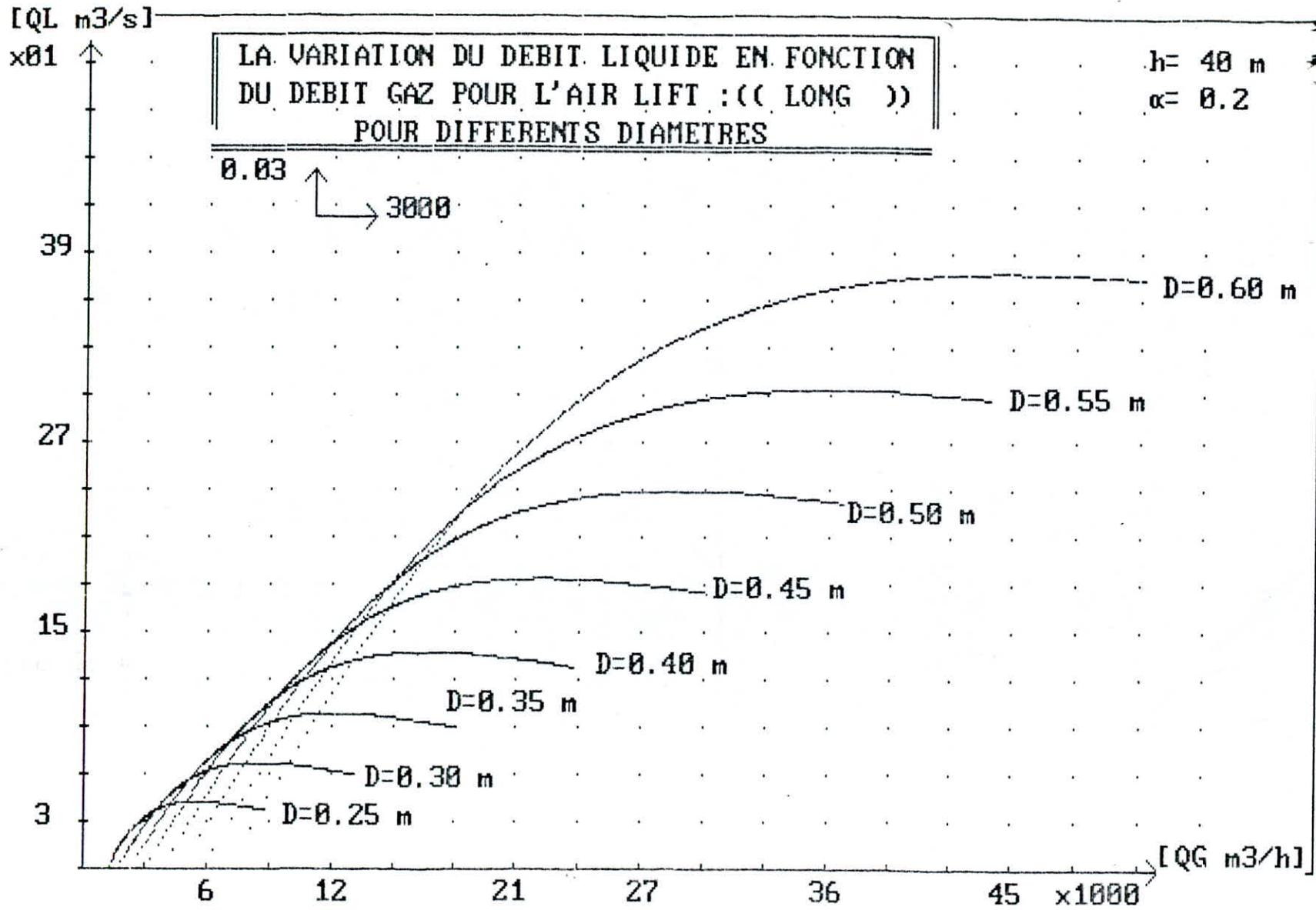
A-7-1

Fig A.7.2



A.7.2

Fig A-7.3



A-7.3.

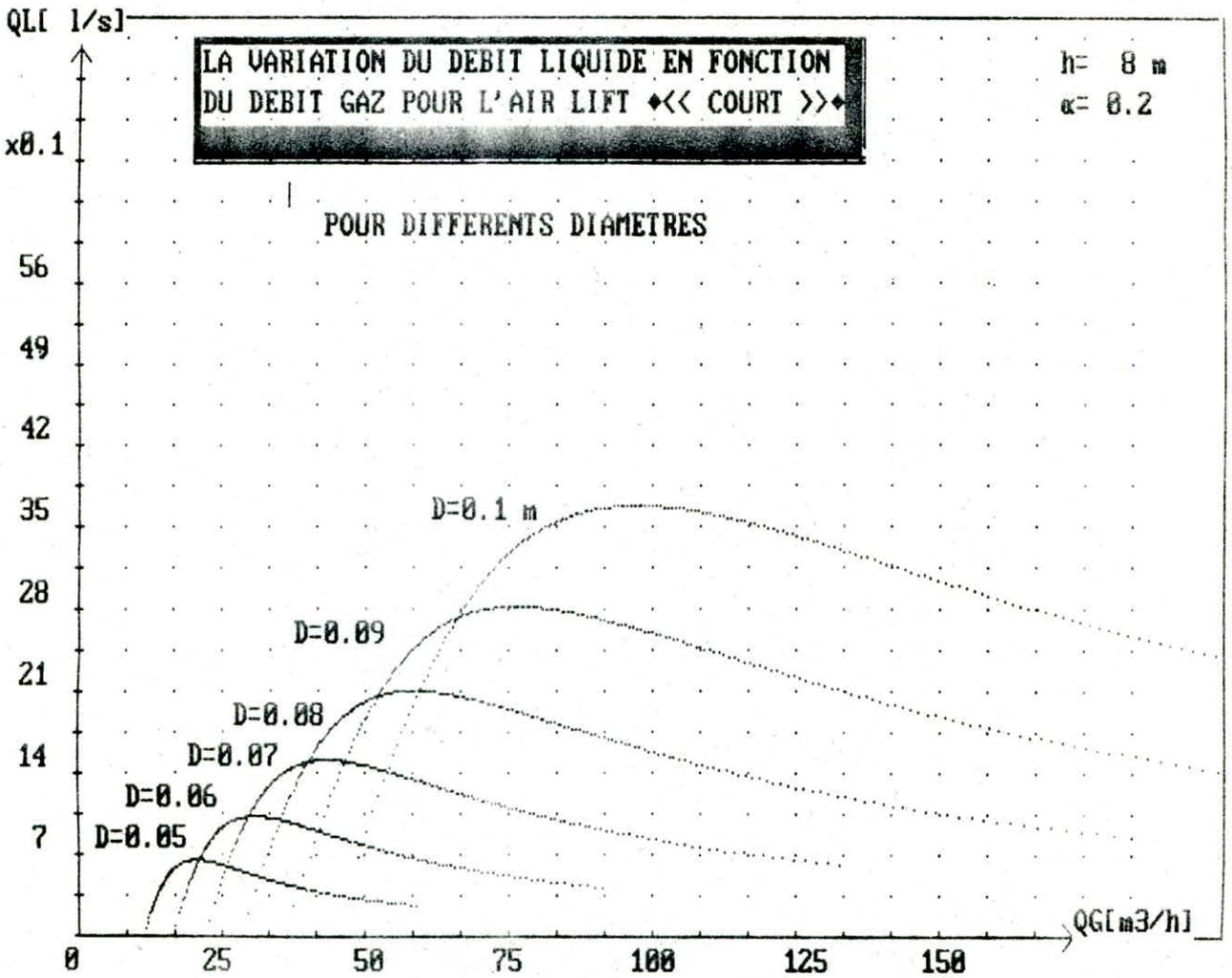
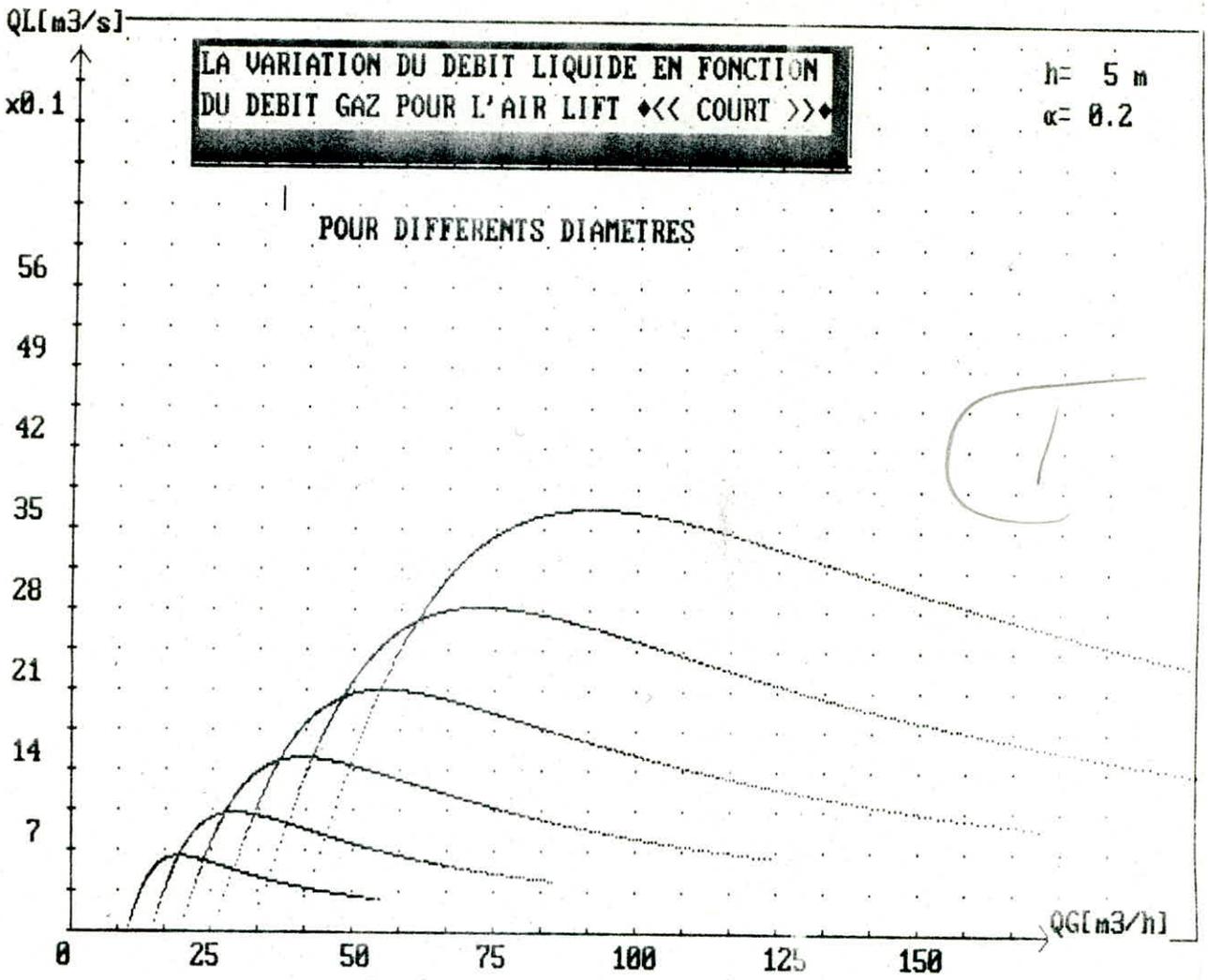


figure A: 7-4

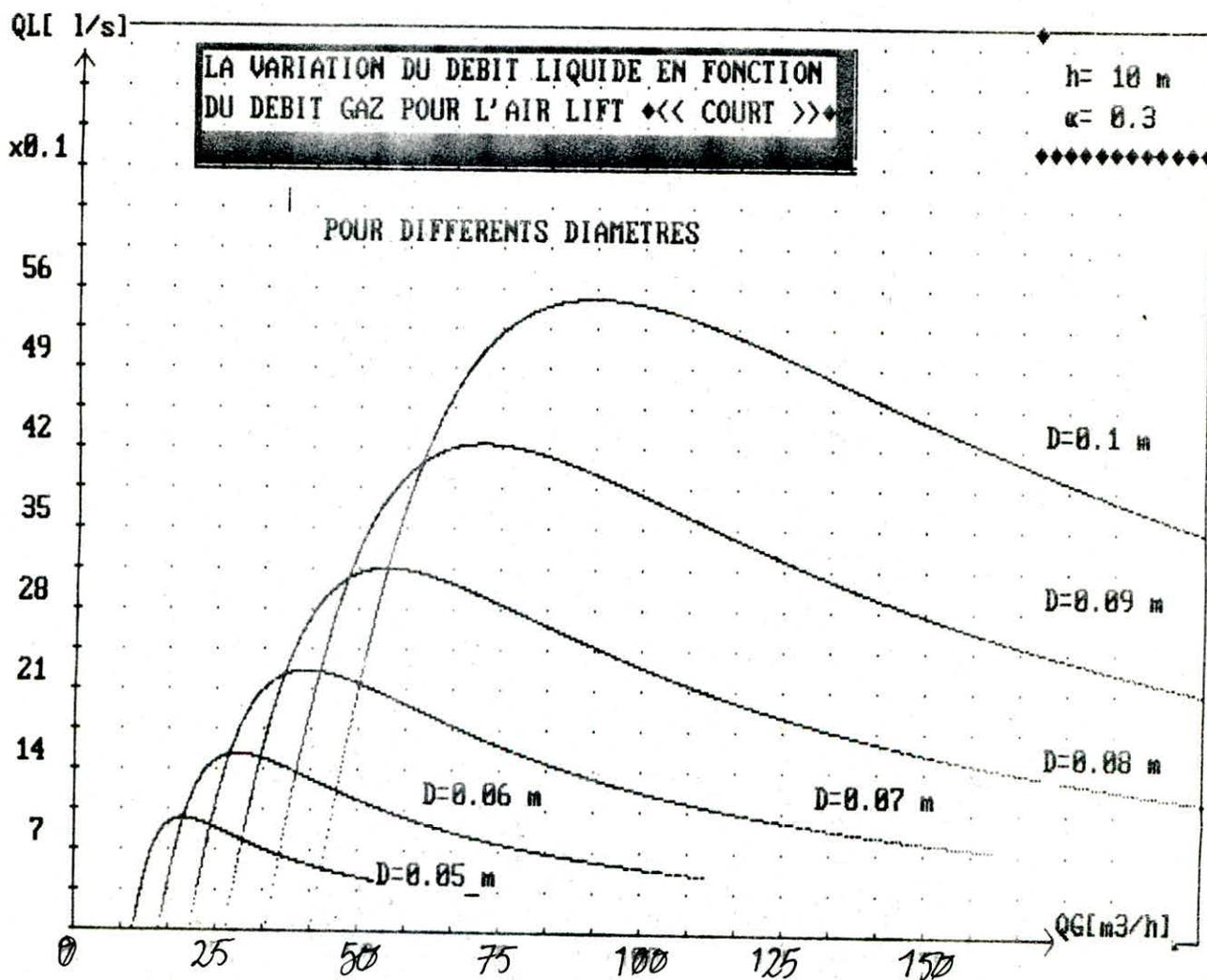
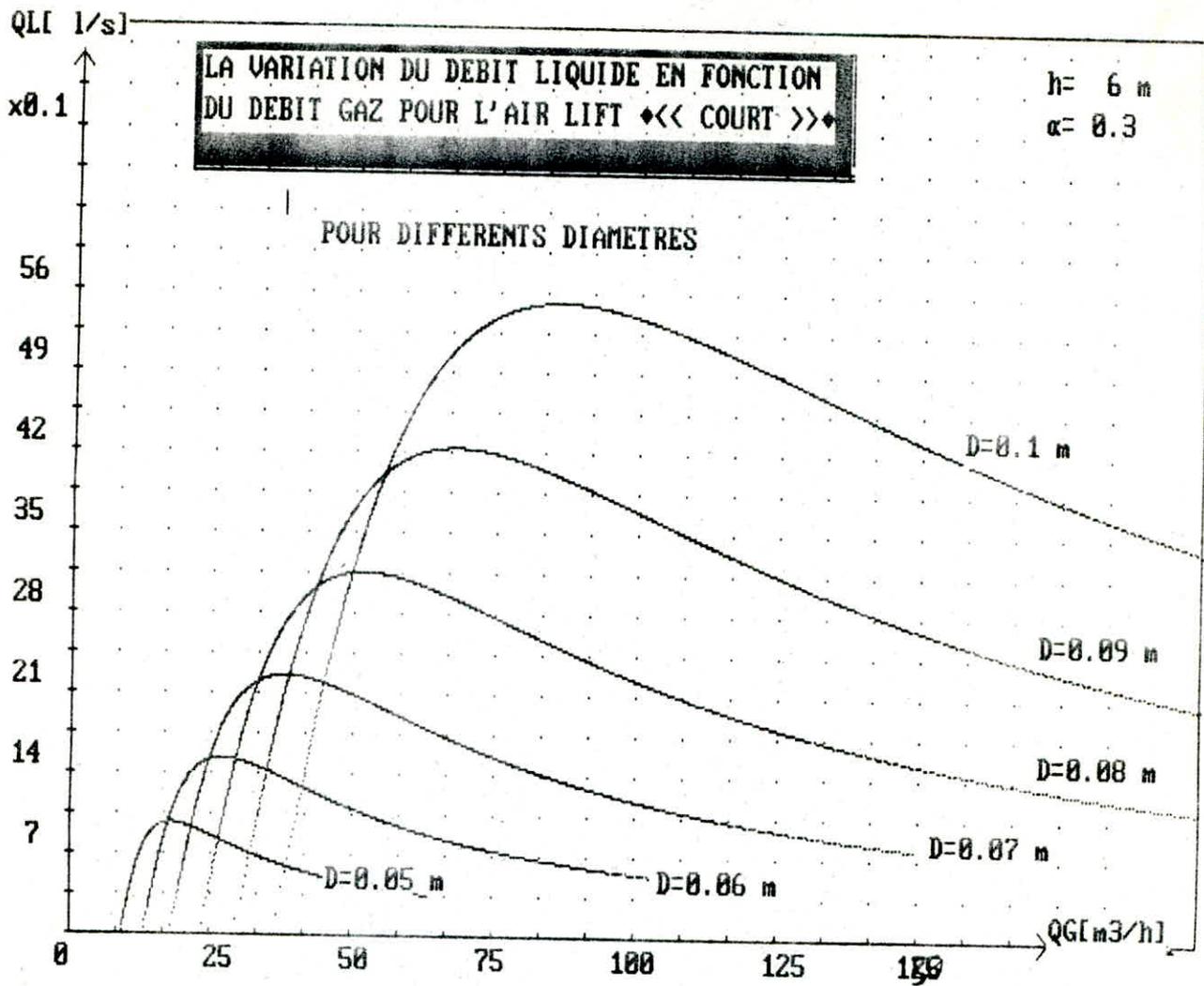
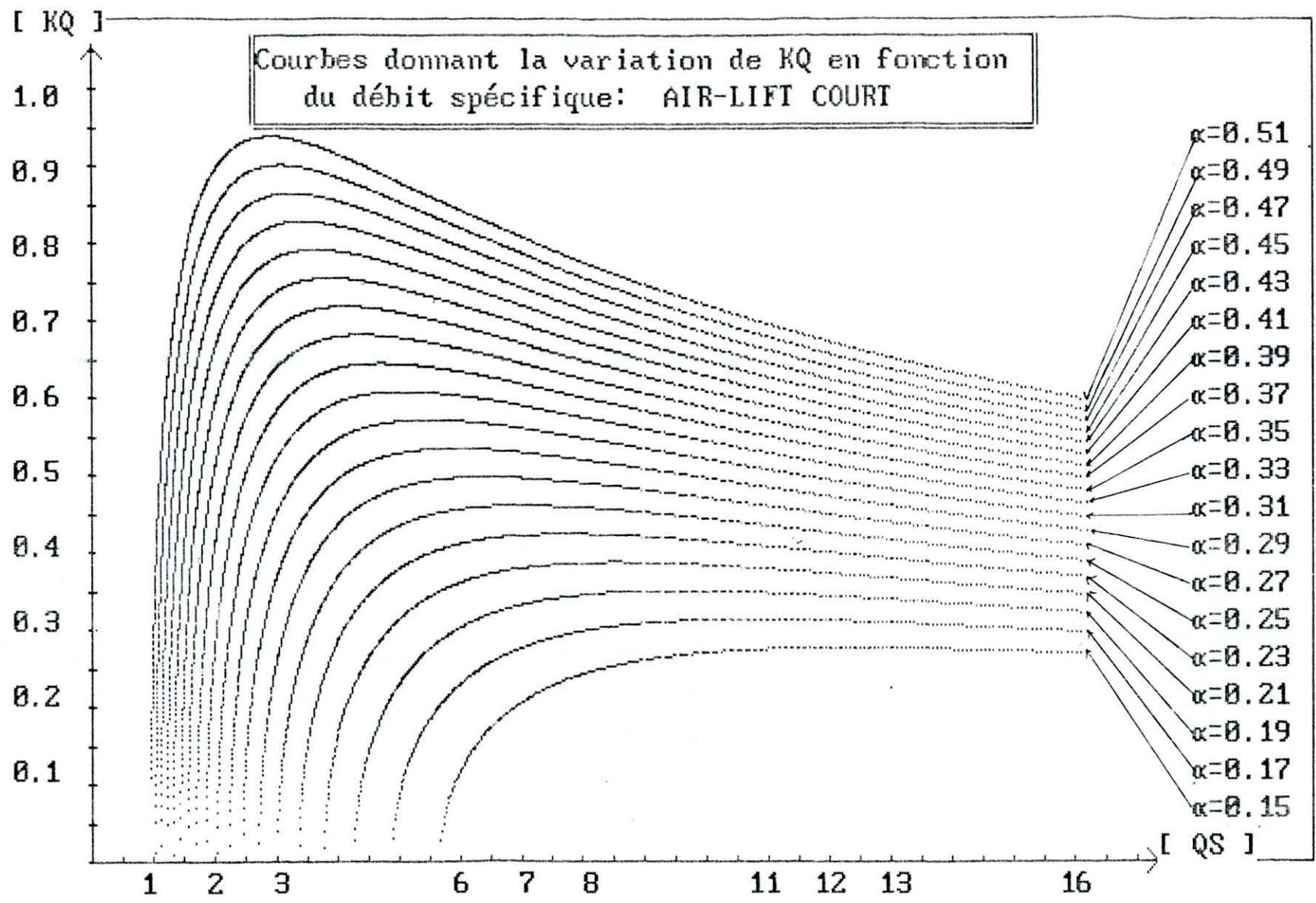


fig A-7-5

Fig B.7-1



B.7-1



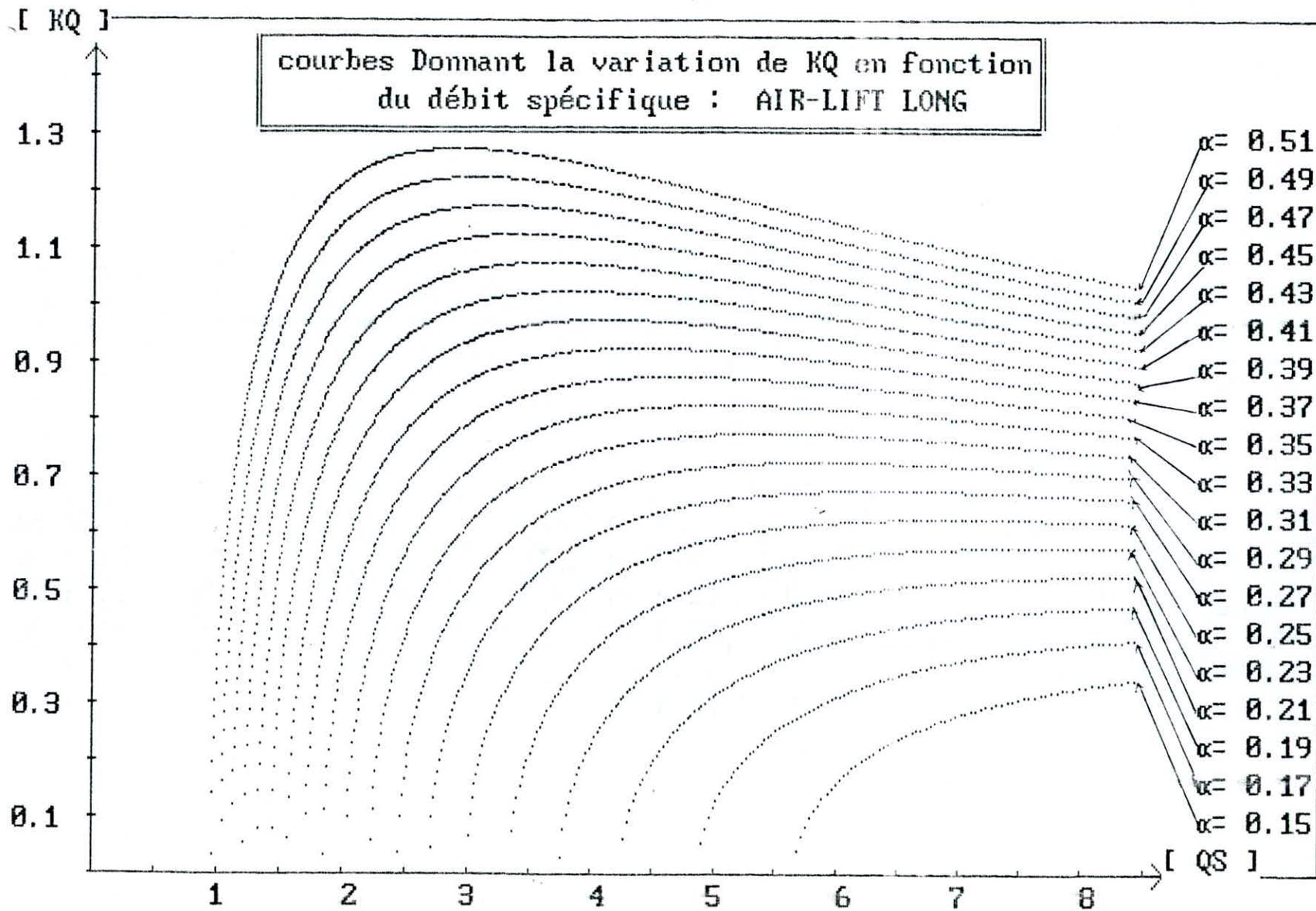
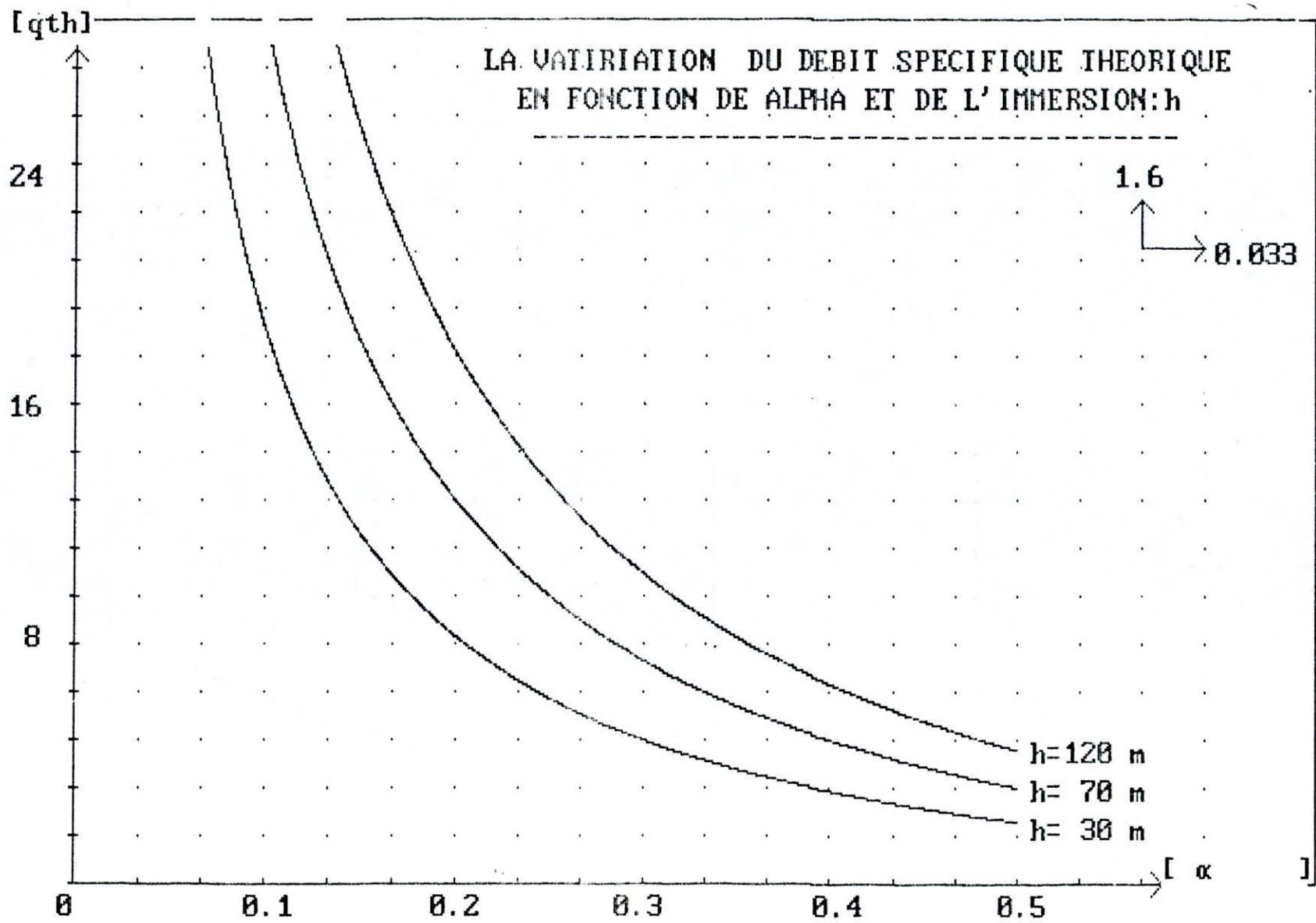


Fig B. 7. 2

B. 7. 2

Fig. c.7



c.7.

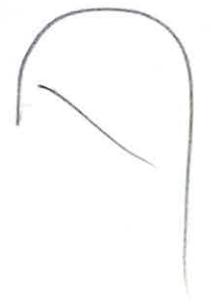
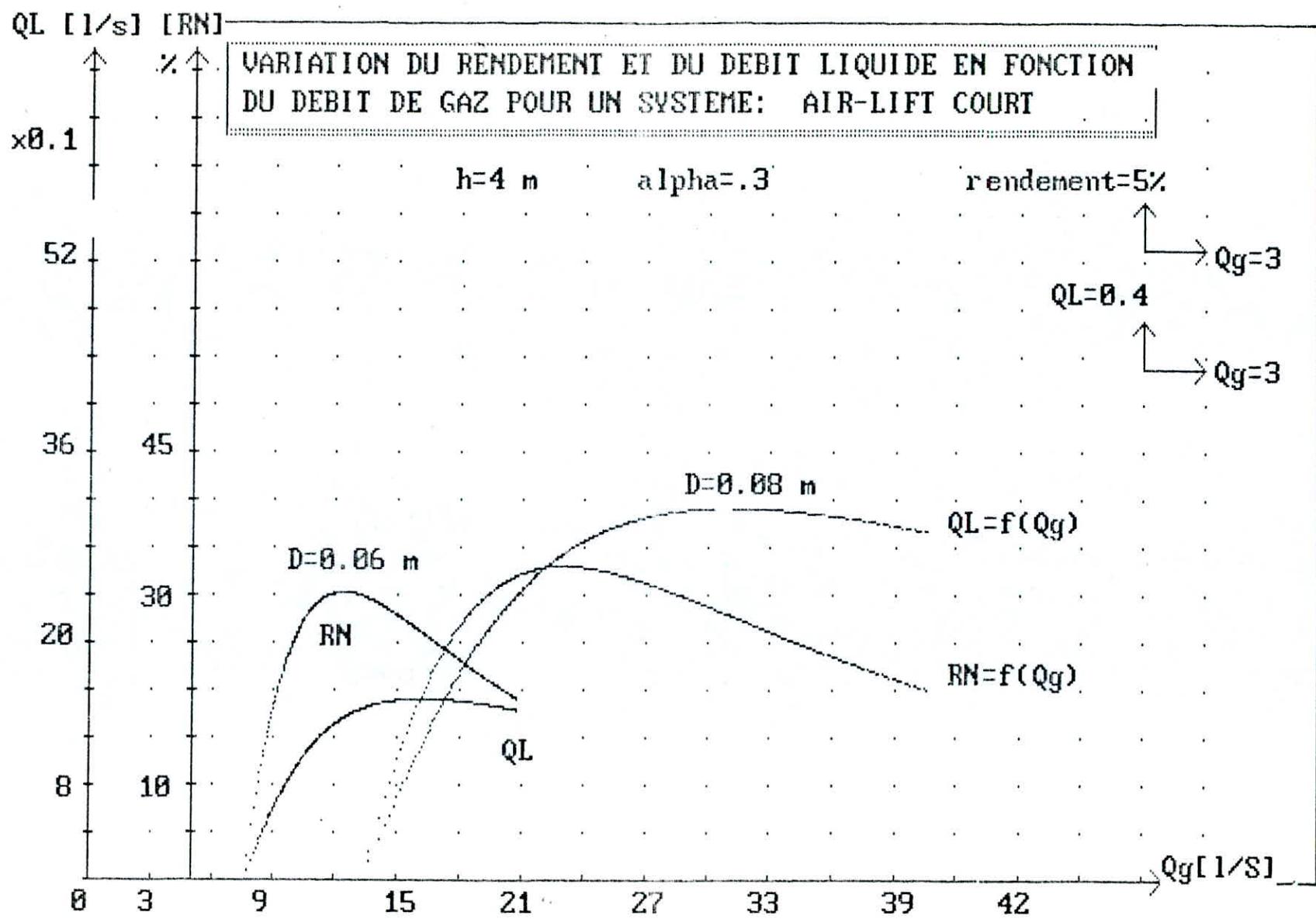
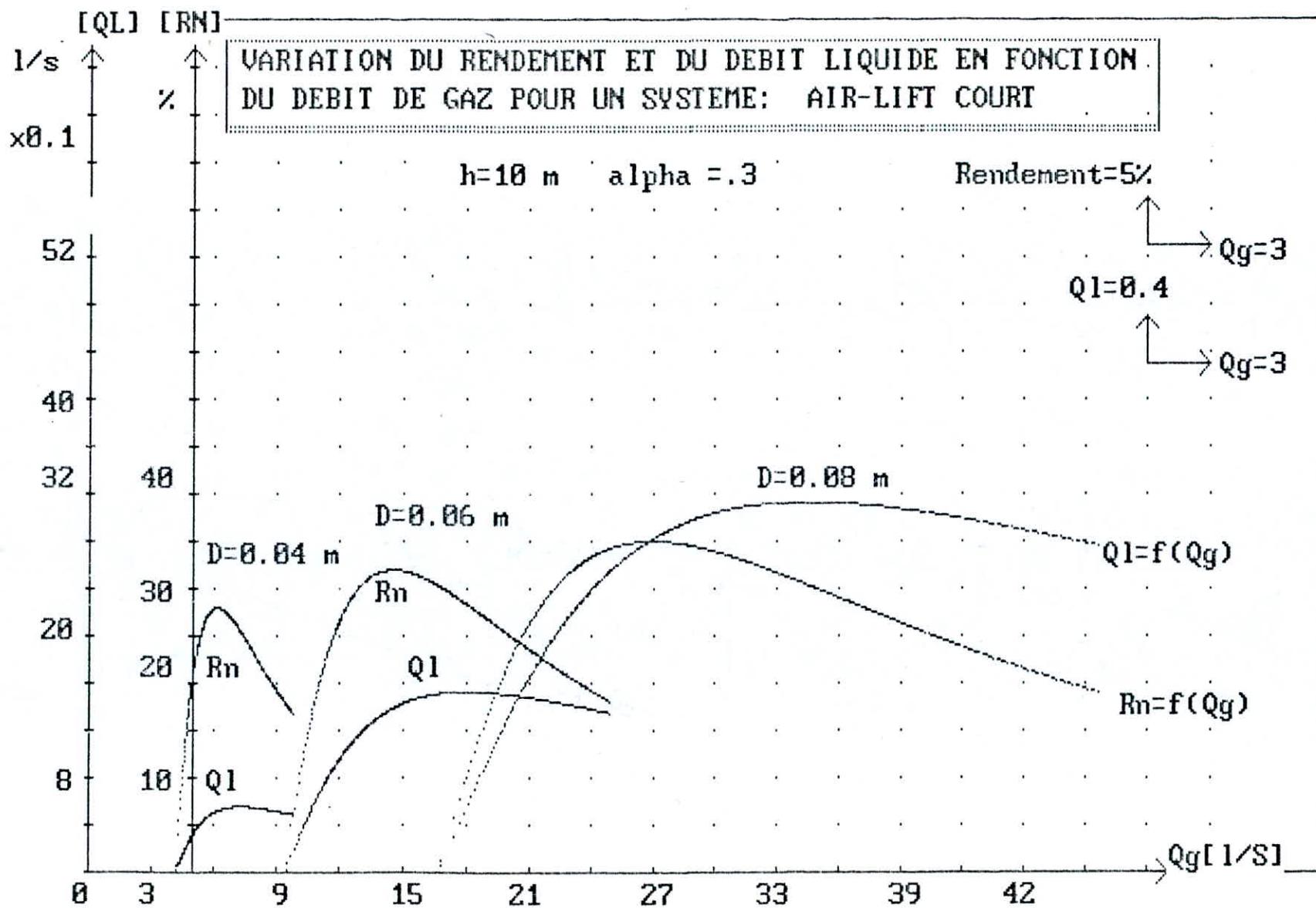


Fig D.7.1



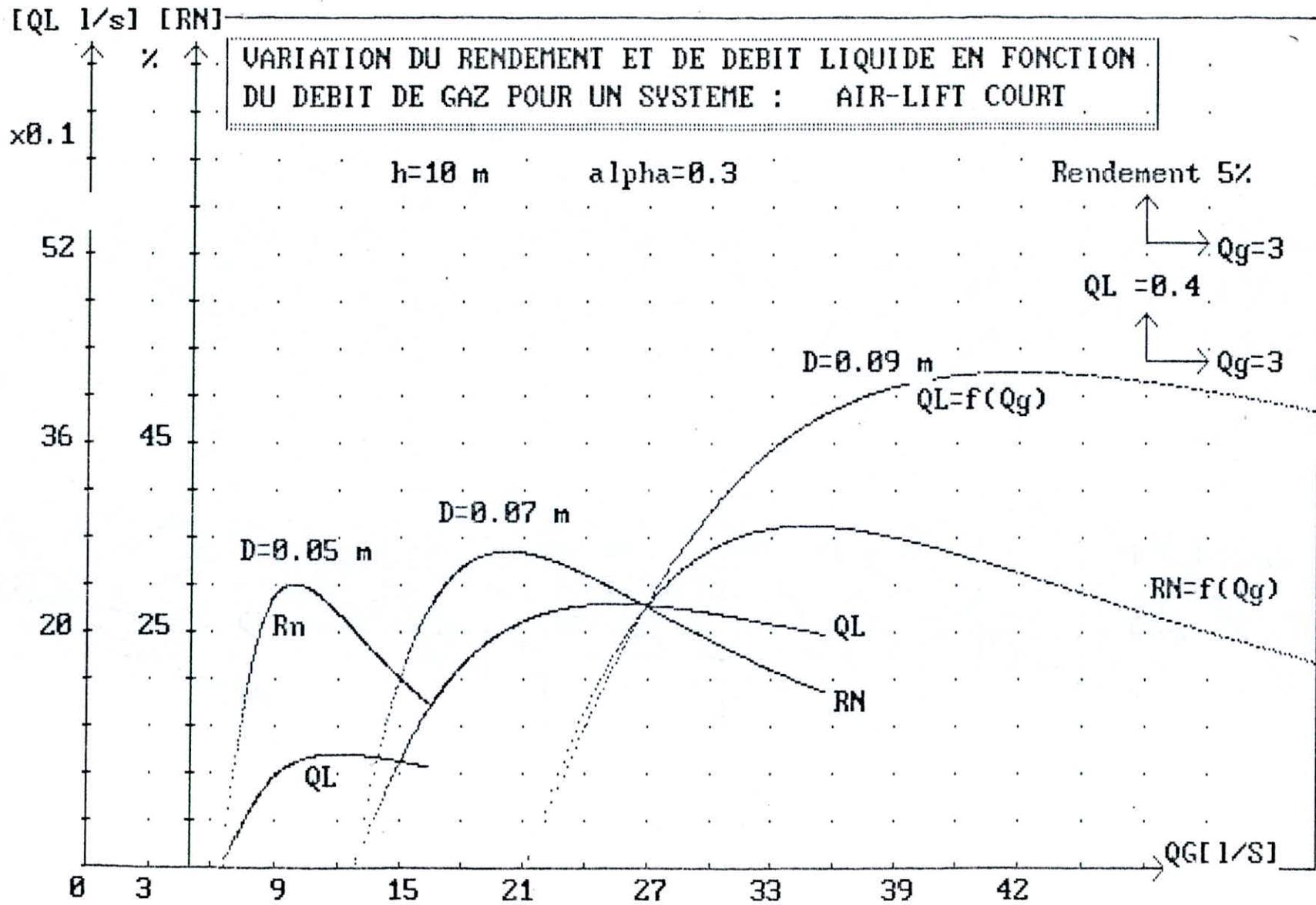
D.7.1

Fig D.7.3



D.7.3.

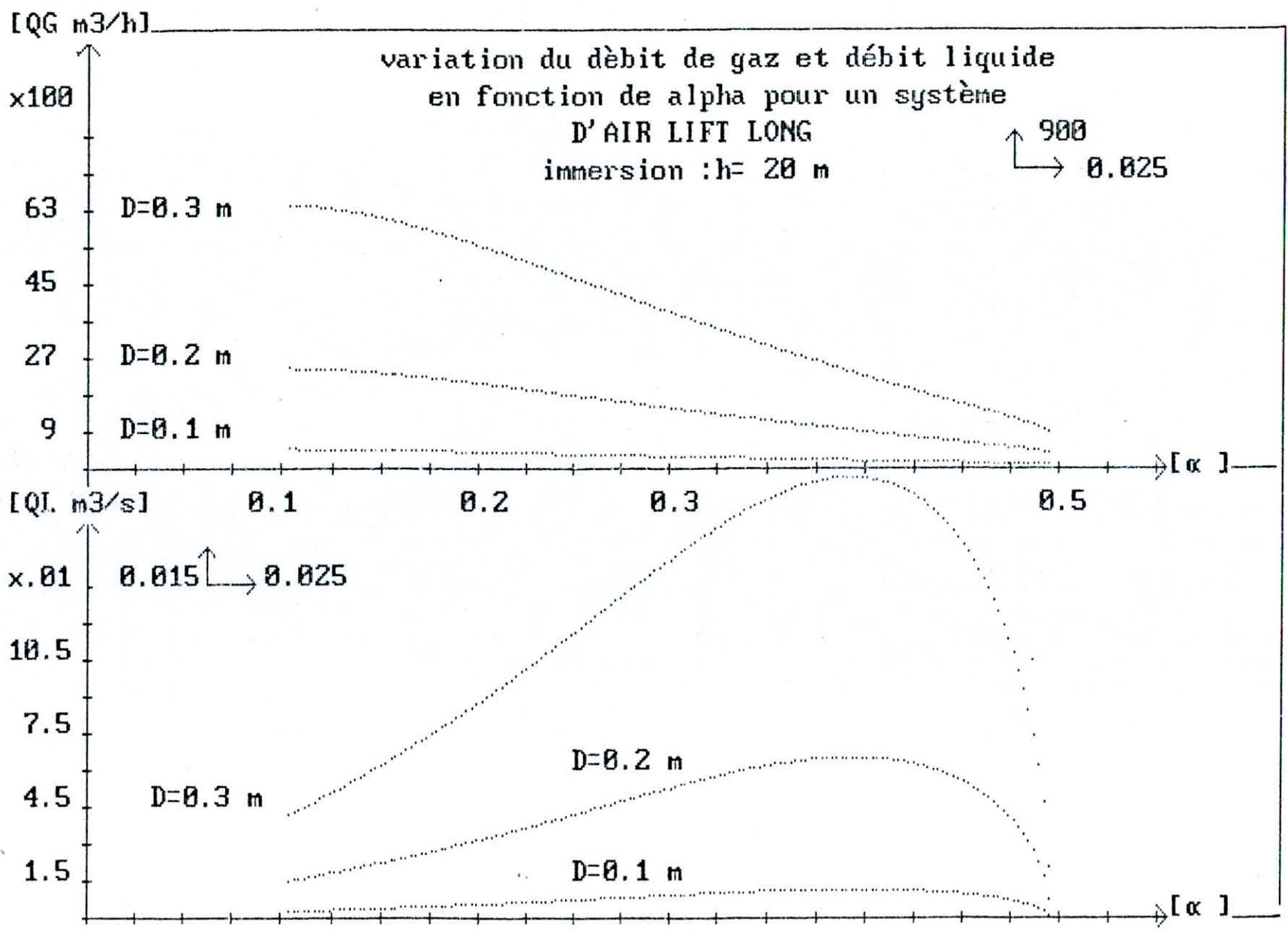
Fig. D.7.4



D.7.4

Q

fig. F.7



F.7

TABLEAUX DE CALCUL DE L'AIR-LIFT

qs ! KQ ! $Q_b(m^3/s)$! $Q_d(m^3/s)$! Rn

=====>> AIR-LIFT LONG <<=====

ALPHA=0.28 D(m)=0.10 h(m)=110

88.097	0.275	0.003	0.355	0.086
20.225	0.524	0.005	0.220	0.265
12.384	0.619	0.006	0.191	0.361
7.583	0.690	0.007	0.167	0.460
4.643	0.675	0.007	0.146	0.514

ALPHA=0.40 D(m)=0.10 h(m)=110

88.097	0.330	0.003	0.384	0.056
20.225	0.645	0.006	0.225	0.186
12.384	0.779	0.008	0.192	0.264
7.583	0.909	0.009	0.164	0.360
4.643	0.993	0.010	0.142	0.456
2.118	0.797	0.008	0.113	0.460

ALPHA=0.45 D(m)=0.10 h(m)=110

88.097	0.351	0.003	0.394	0.047
20.225	0.689	0.007	0.226	0.161
12.384	0.837	0.008	0.191	0.233
7.583	0.986	0.010	0.162	0.322
4.643	1.099	0.011	0.138	0.420
2.118	1.018	0.010	0.109	0.493
1.297	0.400	0.004	0.093	0.227

TABLEAUX DE CALCUL DE L'AIR-LIFT

qs ! KQ ! $Q_b(l/s)$! $Q_d(m^3/s)$! Rn

=====>> AIR-LIFT LONG <<=====

ALPHA=0.45 D(m)=0.06 h(m)=28

9.133	0.931	0.003	0.035	0.185
4.596	1.101	0.003	0.026	0.300
1.723	0.872	0.002	0.016	0.385
1.562	0.763	0.002	0.015	0.356
1.416	0.611	0.002	0.014	0.304
1.284	0.365	0.001	0.013	0.196

ALPHA=0.48 D(m)=0.06 h(m)=28

9.133	0.970	0.003	0.036	0.170
4.596	1.160	0.003	0.026	0.279
1.723	1.018	0.003	0.016	0.397
1.562	0.936	0.003	0.015	0.384
1.416	0.827	0.002	0.014	0.359
1.284	0.679	0.002	0.014	0.313

ALPHA=0.50 D(m)=0.06 h(m)=28

9.133	0.995	0.003	0.036	0.160
4.596	1.198	0.003	0.026	0.266
1.723	1.104	0.003	0.016	0.398
1.562	1.035	0.003	0.015	0.392
1.416	0.944	0.003	0.014	0.377
1.284	0.825	0.002	0.014	0.348

TABLEAUX DE CALCUL DE L'AIR-LIFT

qs ! KQ ! Q_0 (m3/s) ! Q_1 (m3/s) ! Rn

=====>> AIR-LIFT LONG <<=====

ALPHA=0.15 D(m)=0.10 h(m)=70

22.898	0.336	0.003	0.170	0.369
17.060	0.362	0.004	0.155	0.435
14.021	0.373	0.004	0.146	0.477
8.585	0.345	0.003	0.124	0.522
6.396	0.224	0.002	0.108	0.386

ALPHA=0.19 D(m)=0.10 h(m)=70

22.898	0.394	0.004	0.179	0.309
17.060	0.432	0.004	0.163	0.373
14.021	0.453	0.004	0.153	0.417
8.585	0.473	0.005	0.130	0.511
6.396	0.430	0.004	0.117	0.517
4.320	0.098	0.001	0.094	0.147

ALPHA=0.21 D(m)=0.10 h(m)=70

22.898	0.419	0.004	0.183	0.285
17.060	0.463	0.005	0.166	0.346
14.021	0.489	0.005	0.155	0.390
8.585	0.525	0.005	0.132	0.493
6.396	0.503	0.005	0.119	0.522
4.320	0.322	0.003	0.101	0.394

TABLEAUX DE CALCUL DE L'AIR-LIFT

qs ! KQ ! Q_0 (m3/s) ! Q_1 (m3/s) ! Rn

=====>> AIR-LIFT LONG <<=====

ALPHA=0.15 D(m)=0.20 h(m)=50

29.121	0.311	0.017	0.801	0.341
17.831	0.359	0.020	0.652	0.483
13.285	0.374	0.021	0.572	0.574
10.918	0.372	0.021	0.521	0.626
6.686	0.254	0.014	0.389	0.574

ALPHA=0.18 D(m)=0.20 h(m)=50

29.121	0.349	0.020	0.853	0.289
17.831	0.410	0.023	0.693	0.417
13.285	0.439	0.025	0.610	0.507
10.918	0.449	0.025	0.558	0.568
6.686	0.403	0.023	0.434	0.654
4.981	0.231	0.013	0.348	0.469

ALPHA=0.20 D(m)=0.20 h(m)=50

29.121	0.372	0.021	0.883	0.261
17.831	0.442	0.025	0.717	0.381
13.285	0.477	0.027	0.631	0.468
10.918	0.493	0.028	0.578	0.528
6.686	0.477	0.027	0.455	0.649
4.981	0.370	0.021	0.380	0.604

-----TABLEAUX DE CALCUL DE L'AIR-LIFT-----

qs	KQ	Q_e (m3/s)	Q_f (m3/s)	Rn
----	----	--------------	--------------	----

=====>> AIR-LIFT LONG <<=====

ALPHA=0.15 D(m)=0.25 h(m)=20				
16.709	0.363	0.036	0.857	0.425
10.231	0.368	0.036	0.632	0.584
7.623	0.314	0.031	0.497	0.633
6.265	0.206	0.020	0.390	0.530
ALPHA=0.28 D(m)=0.25 h(m)=20				
16.709	0.562	0.055	1.142	0.224
10.231	0.652	0.064	0.876	0.339
7.623	0.690	0.067	0.737	0.425
6.265	0.700	0.069	0.652	0.488
3.836	0.615	0.060	0.454	0.616
2.858	0.367	0.036	0.326	0.513
ALPHA=0.30 D(m)=0.25 h(m)=20				
16.709	0.586	0.057	1.176	0.206
10.231	0.685	0.067	0.903	0.313
7.623	0.730	0.071	0.762	0.396
6.265	0.747	0.073	0.675	0.457
3.836	0.694	0.068	0.477	0.600
2.858	0.514	0.050	0.361	0.589

-----TABLEAUX DE CALCUL DE L'AIR-LIFT-----

qs	KQ	Q_e (m3/s)	Q_f (m3/s)	Rn
----	----	--------------	--------------	----

=====>> AIR-LIFT LONG <<=====

ALPHA=0.15 D(m)=0.15 h(m)=60				
20.364	0.347	0.009	0.382	0.430
15.173	0.369	0.010	0.341	0.510
12.470	0.375	0.010	0.316	0.560
7.635	0.315	0.009	0.254	0.584
5.689	0.043	0.001	0.195	0.104
ALPHA=0.19 D(m)=0.15 h(m)=60				
20.364	0.409	0.011	0.407	0.357
15.173	0.445	0.012	0.364	0.434
12.470	0.464	0.013	0.337	0.488
7.635	0.463	0.013	0.276	0.596
5.689	0.389	0.011	0.240	0.575
ALPHA=0.21 D(m)=0.15 h(m)=60				
20.364	0.437	0.012	0.418	0.327
15.173	0.479	0.013	0.373	0.401
12.470	0.502	0.014	0.346	0.454
7.635	0.522	0.014	0.284	0.576
5.689	0.476	0.013	0.249	0.598
3.842	0.134	0.004	0.189	0.222

TABLEAUX DE CALCUL DE L'AIR-LIFT

qs ! KQ ! Q_e (m3/s) ! Q_f (m3/s) ! Rn

=====>> AIR-LIFT LONG <<=====

ALPHA=0.15 D(m)=0.10 h(m)=80

25.431	0.326	0.003	0.187	0.353
18.947	0.354	0.004	0.171	0.418
15.572	0.368	0.004	0.161	0.460
9.535	0.362	0.004	0.139	0.526
7.104	0.286	0.003	0.125	0.464

ALPHA=0.19 D(m)=0.10 h(m)=80

25.431	0.379	0.004	0.195	0.295
18.947	0.419	0.004	0.178	0.357
15.572	0.442	0.004	0.168	0.400
9.535	0.475	0.005	0.145	0.499
7.104	0.453	0.004	0.132	0.524
4.798	0.275	0.003	0.113	0.371

ALPHA=0.21 D(m)=0.10 h(m)=80

25.431	0.404	0.004	0.199	0.272
18.947	0.448	0.004	0.181	0.331
15.572	0.475	0.005	0.171	0.374
9.535	0.523	0.005	0.147	0.478
7.104	0.517	0.005	0.134	0.519
4.798	0.402	0.004	0.116	0.464

TABLEAUX DE CALCUL DE L'AIR-LIFT

qs ! KQ ! Q_e (m3/s) ! Q_f (m3/s) ! Rn

=====>> AIR-LIFT LONG <<=====

ALPHA=0.28 D(m)=0.50 h(m)=120

58.081	0.334	0.185	13.828	0.159
35.564	0.416	0.230	11.283	0.242
26.497	0.471	0.261	10.004	0.310
21.777	0.509	0.282	9.237	0.363
13.334	0.606	0.335	7.569	0.526
9.935	0.657	0.364	6.710	0.644

ALPHA=0.30 D(m)=0.50 h(m)=120

58.081	0.346	0.192	14.142	0.146
35.564	0.432	0.239	11.515	0.224
26.497	0.490	0.271	10.195	0.287
21.777	0.530	0.294	9.405	0.337
13.334	0.634	0.351	7.691	0.492
9.935	0.691	0.382	6.811	0.605

ALPHA=0.35 D(m)=0.50 h(m)=120

58.081	0.375	0.208	14.870	0.120
35.564	0.470	0.260	12.046	0.185
26.497	0.534	0.296	10.632	0.239
21.777	0.580	0.321	9.786	0.281
13.334	0.699	0.387	7.959	0.417
9.935	0.769	0.426	7.027	0.520

TABLEAUX DE CALCUL DE L'AIR-LIFT

qs ! KQ ! Q_0 (m3/s) ! Q_1 (m3/s) ! Rn

=====>> AIR-LIFT LONG <<=====

ALPHA=0.10 D(m)=0.15 h(m)=50

94.504	0.153	0.004	0.570	0.182
77.668	0.167	0.005	0.528	0.214
47.558	0.202	0.006	0.437	0.314
29.121	0.235	0.006	0.362	0.441
17.831	0.250	0.007	0.296	0.572
13.285	0.229	0.006	0.258	0.603
10.918	0.184	0.005	0.230	0.543

ALPHA=0.27 D(m)=0.15 h(m)=50

94.504	0.261	0.007	0.814	0.065
77.668	0.286	0.008	0.748	0.078
47.558	0.358	0.010	0.607	0.120
29.121	0.443	0.012	0.494	0.183
17.831	0.537	0.015	0.403	0.271
13.285	0.592	0.016	0.356	0.338
10.918	0.625	0.017	0.328	0.388
6.686	0.675	0.018	0.265	0.519
4.981	0.656	0.018	0.231	0.579
3.364	0.484	0.013	0.186	0.530

ALPHA=0.35 D(m)=0.15 h(m)=50

94.504	0.298	0.008	0.895	0.047
77.668	0.327	0.009	0.820	0.056
47.558	0.412	0.011	0.661	0.087
29.121	0.513	0.014	0.534	0.134
17.831	0.628	0.017	0.432	0.204
13.285	0.700	0.019	0.380	0.258
10.918	0.747	0.020	0.349	0.300
6.686	0.846	0.023	0.281	0.422
4.981	0.874	0.024	0.245	0.499
3.364	0.832	0.023	0.203	0.575
1.868	0.105	0.003	0.132	0.112

TABLEAUX DE CALCUL DE L'AIR-LIFT

qs ! KQ ! Q_g(l/s) ! Q_l(m³/s) ! Rn

=====>> AIR-LIFT COURT <<=====

ALPHA=0.15 D(m)=0.06 h(m)=10

39.433	0.205	0.566	0.034	0.136
24.136	0.244	0.673	0.028	0.198
18.810	0.261	0.720	0.025	0.235
16.161	0.269	0.743	0.023	0.258
11.513	0.275	0.761	0.020	0.307
9.607	0.267	0.737	0.018	0.324

ALPHA=0.20 D(m)=0.06 h(m)=10

39.433	0.242	0.669	0.037	0.103
24.136	0.294	0.811	0.030	0.154
18.810	0.320	0.883	0.027	0.185
16.161	0.334	0.924	0.026	0.207
11.513	0.361	0.996	0.022	0.258
9.607	0.367	1.015	0.020	0.284

ALPHA=0.30 D(m)=0.06 h(m)=10

39.433	0.304	0.839	0.042	0.066
24.136	0.374	1.034	0.034	0.101
18.810	0.413	1.141	0.031	0.124
16.161	0.437	1.206	0.029	0.140
11.513	0.488	1.348	0.025	0.181
9.607	0.512	1.415	0.023	0.206

TABLEAUX DE CALCUL DE L'AIR-LIFT

qs ! KQ ! Q_g(l/s) ! Q_l(m³/s) ! Rn

=====>> AIR-LIFT COURT <<=====

ALPHA=0.15 D(m)=0.06 h(m)= 4

31.647	0.223	0.615	0.029	0.144
19.370	0.259	0.715	0.023	0.209
15.096	0.272	0.751	0.020	0.246
12.970	0.276	0.762	0.019	0.269
9.240	0.263	0.727	0.016	0.308
7.710	0.234	0.646	0.014	0.307

ALPHA=0.20 D(m)=0.06 h(m)= 4

31.647	0.265	0.732	0.032	0.109
19.370	0.317	0.875	0.026	0.162
15.096	0.341	0.941	0.023	0.196
12.970	0.353	0.974	0.021	0.217
9.240	0.368	1.016	0.018	0.268
7.710	0.364	1.005	0.016	0.291

ALPHA=0.30 D(m)=0.06 h(m)= 4

31.647	0.334	0.923	0.037	0.069
19.370	0.408	1.128	0.029	0.106
15.096	0.447	1.236	0.026	0.131
12.970	0.471	1.300	0.024	0.147
9.240	0.517	1.429	0.021	0.191
7.710	0.537	1.482	0.019	0.216

TABLEAUX DE CALCUL DE L'AIR-LIFT

qs ! KQ ! Q_0 (m3/s) ! Q_1 (m3/s) ! Rn

=====>> AIR-LIFT LONG <<=====

ALPHA=0.15 D(m)=0.10 h(m)=100

30.497	0.306	0.003	0.218	0.325
22.722	0.337	0.003	0.201	0.387
18.674	0.355	0.004	0.191	0.430
11.435	0.374	0.004	0.168	0.515
8.519	0.344	0.003	0.154	0.514
5.754	0.085	0.001	0.130	0.151

ALPHA=0.27 D(m)=0.10 h(m)=100

30.497	0.435	0.004	0.239	0.201
22.722	0.490	0.005	0.218	0.248
18.674	0.528	0.005	0.205	0.284
11.435	0.617	0.006	0.178	0.383
8.519	0.658	0.007	0.163	0.445
5.754	0.672	0.007	0.146	0.508
3.194	0.434	0.004	0.121	0.394

ALPHA=0.35 D(m)=0.10 h(m)=100

30.497	0.503	0.005	0.248	0.154
22.722	0.570	0.006	0.224	0.193
18.674	0.617	0.006	0.210	0.223
11.435	0.736	0.007	0.179	0.311
8.519	0.802	0.008	0.164	0.372
5.754	0.865	0.009	0.145	0.451
3.194	0.816	0.008	0.122	0.508
2.625	0.715	0.007	0.115	0.473

TABLEAUX DE CALCUL DE L'AIR-LIFT

qs ! KQ ! Q_0 (l/s) ! Q_1 (m3/s) ! Rn

=====>> AIR-LIFT COURT <<=====

ALPHA=0.15 D(m)=0.08 h(m)= 5

32.945	0.219	1.243	0.058	0.150
20.164	0.256	1.454	0.046	0.219
15.715	0.270	1.532	0.041	0.260
13.502	0.275	1.560	0.038	0.286
9.618	0.267	1.513	0.031	0.335
8.027	0.243	1.375	0.028	0.342

ALPHA=0.20 D(m)=0.08 h(m)= 5

32.945	0.261	1.479	0.065	0.112
20.164	0.313	1.773	0.052	0.169
15.715	0.337	1.911	0.046	0.204
13.502	0.350	1.983	0.043	0.228
9.618	0.367	2.083	0.036	0.285
8.027	0.366	2.074	0.033	0.313

ALPHA=0.30 D(m)=0.08 h(m)= 5

32.945	0.329	1.863	0.075	0.071
20.164	0.402	2.280	0.060	0.109
15.715	0.441	2.501	0.053	0.135
13.502	0.464	2.634	0.050	0.153
9.618	0.512	2.905	0.042	0.199
8.027	0.533	3.021	0.038	0.227

TABLEAUX DE CALCUL DE L'AIR-LIFT

qs ! KQ ! Q_g(l/s) ! Q_g(m³/s) ! Rn

=====>> AIR-LIFT COURT <<=====<<=<

ALPHA=0.19 D(m)=0.03 h(m)= 4

31.647	0.257	0.126	0.006	0.103
19.370	0.306	0.149	0.005	0.149
15.096	0.328	0.160	0.005	0.176
9.240	0.349	0.171	0.004	0.230
5.315	0.261	0.127	0.003	0.225

ALPHA=0.21 D(m)=0.03 h(m)= 4

31.647	0.273	0.133	0.006	0.094
19.370	0.327	0.160	0.005	0.136
15.096	0.353	0.172	0.005	0.163
9.240	0.385	0.188	0.004	0.217
5.315	0.333	0.162	0.003	0.242
4.216	0.218	0.106	0.003	0.184

ALPHA=0.23 D(m)=0.03 h(m)= 4

31.647	0.299	0.140	0.007	0.086
19.370	0.347	0.169	0.005	0.126
15.096	0.376	0.183	0.005	0.150
9.240	0.418	0.204	0.004	0.205
5.315	0.392	0.191	0.003	0.246
4.216	0.315	0.154	0.003	0.224

TABLEAUX DE CALCUL DE L'AIR-LIFT

qs ! KQ ! Q_g(l/s) ! Q_g(m³/s) ! Rn

=====>> AIR-LIFT COURT <<=====<<=<

ALPHA=0.15 D(m)=0.20 h(m)=18

49.815	0.186	10.442	0.680	0.151
30.490	0.226	12.635	0.545	0.228
23.762	0.245	13.718	0.486	0.278
20.415	0.256	14.320	0.452	0.311
14.544	0.273	15.307	0.383	0.393
12.137	0.276	15.462	0.348	0.437

ALPHA=0.20 D(m)=0.20 h(m)=18

49.815	0.219	12.282	0.762	0.112
30.490	0.269	15.071	0.610	0.171
23.762	0.295	16.554	0.544	0.211
20.415	0.311	17.445	0.507	0.239
14.544	0.344	19.263	0.431	0.310
12.137	0.357	20.022	0.394	0.353

ALPHA=0.30 D(m)=0.20 h(m)=18

49.815	0.273	15.314	0.895	0.069
30.490	0.340	19.030	0.712	0.108
23.762	0.377	21.112	0.633	0.135
20.415	0.400	22.424	0.590	0.154
14.544	0.453	25.388	0.501	0.205
12.137	0.480	26.917	0.458	0.238

7.7 - Réalisation des modèles d'Air-Lift au
Laboratoire

A la base de toutes ces conclusions, on est passé de la théorie à la pratique pour y construire un air-lift réel au laboratoire.

Comme c'est présenté sur la figure G page 67, l'air-lift que nous avons construit, comporte une conduite de refoulement (8) de diamètre 0,070 m et de longueur = 5 m, liée au séparateur (9) de dimension 0,08-1 m sur une extrémité et de l'autre au mélangeur (7) perforé, de trous de diamètre 10 mm.

La conduite (4) de diamètre 0,060 m, est une conduite d'alimentation, où plusieurs niveaux d'alimentations sont possibles en plaçant des trop pleins (x) à plusieurs hauteurs d'immersions (h) voulues, (5) est une conduite de vidange connectant les trop pleins de la conduite (4).

On alimente l'air-lift à l'aide d'une pompe de 2,5 l/s et de 15 m de hauteur de refoulement, une vanne est placée à une conduite reliant la pompe et le réservoir (3), cette vanne permet de régler le début d'alimentation.

Le réservoir (3) est de grande dimension ($\phi 700$) par rapport au débit de la pompe, pour y éviter les déversements, ce réservoir possède un trop plein, déversant l'excès, l'eau entre du réservoir (3) à la conduite (4) perforée en son extrémité haut et bouché pour éviter le phénomène de vortex. (1) est le réservoir d'eau du laboratoire où la pompe aspire l'eau.

Les conduites (6) et (7) respectivement d'alimentation et de refoulement sont liées par un flexible qui facilite les petits mouvements du système lors d'injection d'air comprimé.

(10) est un déviation triangulaire comptant les débits d'eau refoulés

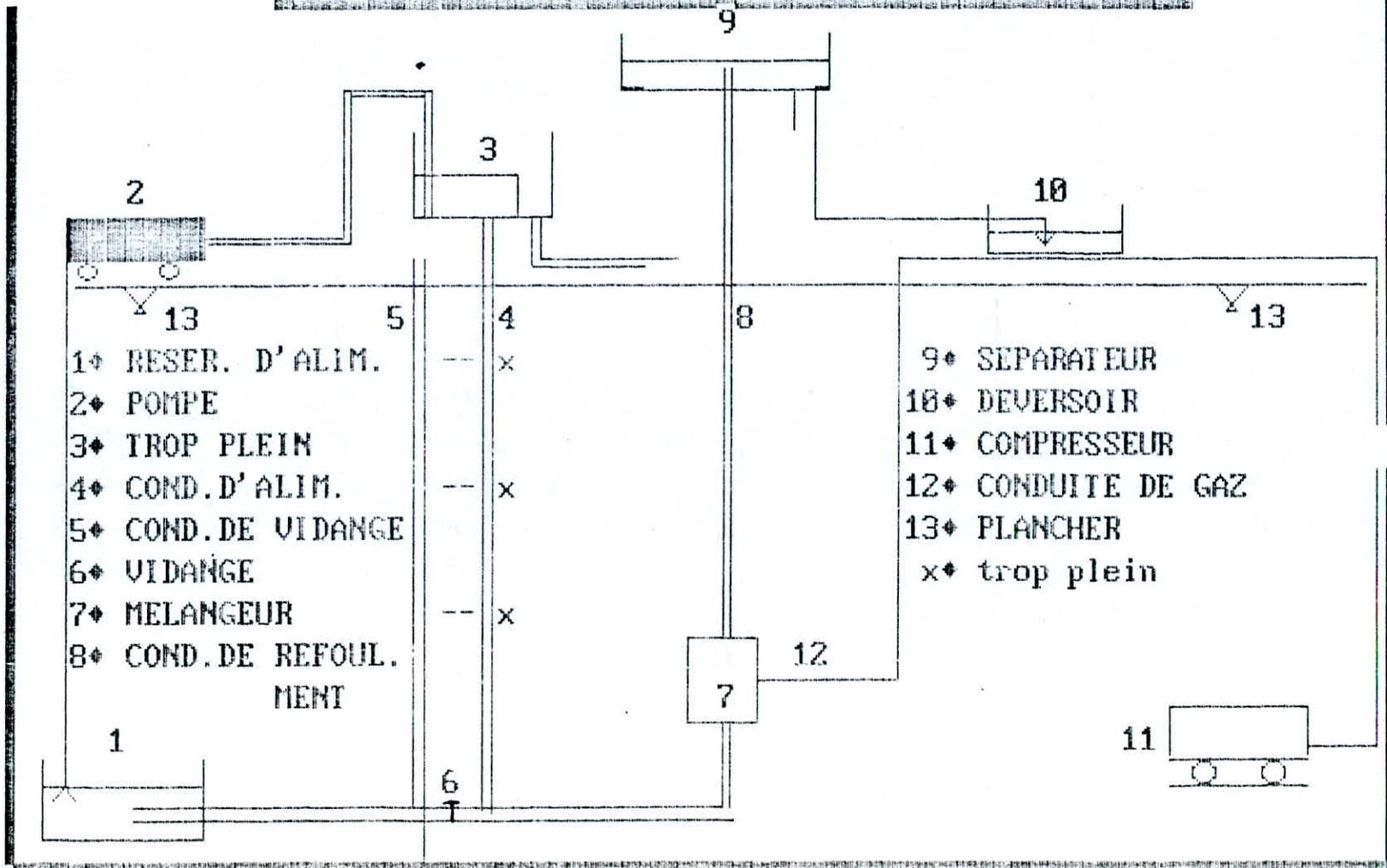
(11) est le compresseur du laboratoire, fournissant une pression de 7 bars, une conduite d'air (12) reliant le compresseur au mélangeur de 50 m de longueur dont 5 m sont disposés verticalement, parallèlement à la conduite de refoulement, pour le non retour d'eau vers le compresseur, en cas d'arrêt d'injection d'air.

Pour le comptage du débit d'air, un diaphragme (débitmètre) est réalisé dans une conduite de 40 cm, placée avant l'introduction de l'air dans le mélangeur.

La section contractée du débitmètre est de 24 cm d'où le coefficient de contraction

$$m = \frac{\text{section contractée}}{\text{section de la conduite}} = 0,6.$$

LE SYSTEME D'AIR-LIFT UTILISE AU LABORATOIRE



- 1♦ RESER. D'ALIM.
- 2♦ POMPE
- 3♦ TROP PLEIN
- 4♦ COND. D'ALIM.
- 5♦ COND. DE VIDANGE
- 6♦ VIDANGE
- 7♦ MELANGEUR
- 8♦ COND. DE REFOUL. MENT

- 9♦ SEPARATEUR
- 10♦ DEVERSOIR
- 11♦ COMPRESSEUR
- 12♦ CONDUITE DE GAZ
- 13♦ PLANCHER
- x♦ trop plein

Fig 5

Page 67

Fig. 6

Dans la présente étude nous venons de faire connaître une nouvelle technologie: Pompage par L'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.

En outre par cette présente thèse nous avons exposé une méthode détaillée de calcul de l'air-lift et pour faciliter cette dernière tâche, on a informatisé l'air-lift en donnant les programmes généraux de son calcul.

Les richesses minières s'infiltreront et s'écouleront 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 solides précieux et cet or noir des océans, la est le problème, puisque aucune pompe ni aucun système connu ne pourrait faciliter cette tâche, sauf L'AIR-LIFT puisque on a réussi à faire fonctionner ce système en vraie grandeur (air-lift étagé) dans l'océan pacifique à 4500 m de profondeur, c'était un pompage en triphasique avec une section variable (HOUILLE BLANCHE 6/7 1979).

Nous espérons que l'introduction de cette nouvelle technologie dans notre pays permettra une exploitation raisonnable et économique de nos ressources pour un meilleur développement.

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

```

10 CLS :KEY OFF
20 A$=" !-----! "
30 T$=" !-----!"
40 PRINT " ";:PRINT A$
50 PRINT " ";:PRINT " ! TABLEAUX DE CALCUL DE L'AIR-LIFT !"
60 PRINT " ";:PRINT A$
70 PRINT " ";:PRINT " ! qs ! KQ ! Qg(m3/s) ! Ql(m3/s) ! Rn !"
80 PRINT " ";:PRINT A$
90 PRINT " ";:PRINT " !"
100 PRINT " ";:PRINT " !"
"
110 PRINT " ";:PRINT A$
120 DIM A(20),B(20),QN(50),QL(50),QG(50),K(50),R(50),Q(50)
130 M=1
140 V$=" ###.### "
150 G$=" HH.### "
160 D$=STRING$(55,"-")
170 B$="CH.##J"
180 F$=" - "
190 C$=INKEY$:IF C$ (<) " " THEN 190 ELSE CLS
200 DATA .15,.27,.5
210 DATA .08,.1,.15,.20,.25,.28,.3,.35,.38,.42,.48,.5
220 C$=INKEY$:IF C$ (<) " " THEN 220 ELSE CLS
230 SCREEN 3
240 PRINT " AIR-LIFT LONG OU COURT ? "
250 PRINT " POUR L'AIR-LIFT LONG ENTRER LA LETTRE l "
260 PRINT " POUR L'AIR-LIFT COURT ENTRER LA LETTRE c "
270 INPUT N$
280 INPUT "h=";H
290 INPUT "d=";D
300 CLS:PRINT
310 PRINT
320 IF N$="L" THEN GOTO 370
330 PRINT T$
340 PRINT " ! =====>> AIR-LIFT COURT <<=====!"
350 PRINT T$
360 GOTO 400
370 PRINT T$
380 PRINT " ! =====>> AIR-LIFT LONG <<=====!"
390 PRINT T$
400 RESTORE 200
410 FOR I=1 TO 3
420 READ A(I)
430 NEXT I
440 RESTORE 210
450 FOR J=1 TO 12
460 READ B(J)
470 IF N$="L" THEN GOTO 510
480 Q(J)=.767*B(J)^(-2.2)
490 QN(J)=Q(J)*(1+9810*H/10^5/2)
500 GOTO 530

```

```

500 GOTO 530
510 Q(J)=60*EXP(-9.810001*B(J))
520 QN(J)=Q(J)*(1+9810*H/10^5/2)
530 NEXT J
540 'PRINT D$
550 K$=" HH.HH"
560 FOR I=1 TO 3
570 PRINT "      !";: PRINT STRING$(42,"-");
580 PRINT "!"
590 PRINT "      !";: PRINT " ALPHA=";
600 PRINT USING "H.HH";A(I);:PRINT " ";
610 PRINT "D(m)=";:PRINT USING "H.HH" ;D ;
620 PRINT " ";
630 PRINT "h(m)=";:PRINT USING "HH";H;:PRINT " !"
640 PRINT "      !";: PRINT STRING$(42,"-");
650 PRINT "!"
660 FOR J= 1 TO 12
670 IF (QN(J)+(1-1/A(I)))<0 THEN GOTO 820
680 IF N$="L" THEN GOTO 740
690 K(J)=3.68*SQR(A(I))*SQR(QN(J)+(1-1/A(I)))/(1+QN(J))
700 QL(J)=K(J)*SQR(9.810001*D^5)
710 QG(J)=QN(J)*QL(J)+2.5*(1-A(I))*(1+9810*H/10^5/2)*D^2
720 R(J)=(1-A(I))/A(I)*H*QL(J)/QG(J)/10^5*9810/LOG(1+9810*H/10^5)
730 GOTO 780
740 K(J)=5*SQR(A(I))*SQR(QN(J)+(1-1/A(I)))/(1+QN(J))
750 QL(J)=K(J)*SQR(9.810001*D^5)
760 QG(J)=QN(J)*QL(J)+2.5*(1-A(I))*(1+9810*H/10^5/2)*D^2
770 R(J)=(1-A(I))/A(I)*H*QL(J)/QG(J)/10^5*9810/LOG(1+9810*H/10^5)
780 PRINT "      !";
790 PRINT USING V$;QN(J);
800 PRINT USING G$;K(J);QL(J);QG(J);R(J);
810 PRINT " !"
820 NEXT J
830 GOTO 870
840 'PRINT F$;
850 PRINT "      !";:PRINT STRING$(42,"-");
860 PRINT "!"
870 NEXT I
880 PRINT "      !";:PRINT STRING$(42,"-");
890 PRINT "!"
900 A$=INKEY$;IF A$<>" " THEN 900 ELSE 910
910 END

```

```

10 CLS:SCREEN 2:KEY OFF
20 LOCATE 4,25 :PRINT "PROJET DE FIN D'ETUDE"
30 LOCATE 5,25 :DRAW"r2001400
40 LOCATE 12,25 :PRINT"PROMOTEUR :Mr METRIVELLI "
50 LOCATE 12,25 :DRAW"r200
60 LOCATE 14,10 :PRINT"ELEVES INGENIEURs          SEHBOUB M.          TOUAHRI B.
"
70 LOCATE 20,10 :PRINT"programme generale pour le calcul graphiue D'AIR LIFT
80 A#=INKEY#:IF A#<>" THEN 90 ELSE 80
90 CLS :KEY OFF:          SCREEN 3
100 LOCATE 7,58:PRINT" KQ "          ;
110 LOCATE 9,62:PRINT" qs "          ;
120 LOCATE 2,15:PRINT " courbes Donnant la variation de KQ en fonction "
130 LOCATE 3,15:PRINT "          du dbit spcifique : AIR-LIFT LONG "
140 FOR J=0 TO 380 STEP .8
150 PSET(120+J,50):PSET(120+J,52)
160 PSET(120,J/10+12):PSET(118,J/10+12)
170 PSET(120+J,12)
180 PSET(500,J/10+12):PSET(502,J/10+12)
190 NEXT
200 A=20:B= 25
210 X=60:Y=180
220 B#="#.#":D#="#.#"
230 GOSUB 3950
240 D#="##.##"
250 N=19
260 FOR X=.2 TO .6 STEP .05
270 FOR Y= .2 TO .8 STEP .0005
280 QS=60*EXP(-9.810001 *Y )
290 IF (QS+(1-1/X ))<0 THEN GOTO 360
300 KQ=5*SQR(X)*SQR(QS+(1-1/X))/(1+QS)
310 LOCATE 3,70:PRINT USING D#;KQ;
320 LOCATE 2,70:PRINT USING D#;QS;
330 PSET(40+QS*60,365-KQ*180)
340 LOCATE N-1 ,70 :PRINT CHR$(224)" =";
350 LOCATE N-1 ,73:PRINT USING D#;X;
360 NEXT
370 N=N-1
380 NEXT
390 LOCATE 4,5:END
400 A#=INKEY#:IF A#<>" THEN 410 ELSE 400
410 CLS :KEY OFF
420 D#="##.##"
430 LOCATE 2,15:PRINT" Courbes donnant la variation de KQ en fonction "
440 LOCATE 3,15:PRINT "          du debit specifique: AIR-LIFT COURT "
450 FOR J=0 TO 380 STEP .9
460 PSET(120+J,50):PSET(120+J,52)
470 PSET(120,J/10+12):PSET(118,J/10+12)
480 PSET(120+J,12)
490 PSET(500,J/10+12):PSET(502,J/10+12)
500 NEXT
510 B#="#.##":D#="##.##"
520 X=30:Y=300
530 A=33/2:B=15:J=0
540 GOSUB 3950:K=1:M=0
550 DIM V3(5000),U3(800),Q4(5000),Q5(200)
560 FOR S=.15 TO .52 STEP .02
570 FOR Y=.25 TO .9 STEP 6.000001E-04
580 QS=.767*Y^(-2.2)
590 IF (QS+(1-1/S))<0 GOTO 640
600 KQ=3.68*SQR(S)*SQR(QS+(1-1/S))/(1+QS)
610 LOCATE 2,70:PRINT USING D#;QS
620 LOCATE 3,70:PRINT USING D#;KQ;

```

```

630 PSET(40+QS*30,365-KQ*330)
640 NEXT
650 LOCATE 20-J,65-M :PRINT CHR$(224)" =";
660 LOCATE 20-J,68-M :PRINT USING "#.##";S;
670 LOCATE 23-K,73 :PRINT CHR$(224)" =";
680 LOCATE 23-K,75 :PRINT USING "#.##";S;
690 K=K+1
700 NEXT:LOCATE 3,5:END
710 A#=INKEY$:IF A#<>" THEN 720 ELSE 710
720 CLS:KEY OFF :SCREEN 3
730 D#="##.##"
740 LOCATE 2,10:PRINT "variation du coefficient du dbit spcifique [q]"
750 LOCATE 3,10:PRINT " en fonction de Alpha pour les DEUX SYSTEMES"
760 LOCATE 4,10:PRINT " COURT ET LONG :VALEURS EXPERIMENTALES"
770 FOR J=0 TO 385 STEP .9
780 PSET(70+J,60):PSET(70+J,62)
790 PSET(70,J/10+12):PSET(72,J/10+12)
800 PSET(70+J,12)
810 PSET(455,J/10+12):PSET(457,J/10+12)
820 NEXT
830 GOSUB 3570
840 D#="##.##"
850 LOCATE 1,1 :PRINT "[ qs ]" ;
860 LOCATE 25,70:PRINT "[ ]" ;
870 LOCATE 25,72:PRINT CHR$(224);
880 LOCATE 11,67:PRINT"S COURT"
890 LOCATE 20,5:PRINT"Systeme long"
900 LOCATE 7,67 :PRINT"S LONG "
910 LOCATE 15,25:PRINT"Systeme court"
920 FOR A=.12 TO .5 STEP .0002
930 Q1(A)=60*EXP(-9.810001*A)
940 PSET(-110+A*1300,390-Q1(A)*20)
950 NEXT
960 FOR A=.12 TO .5 STEP .0002
970 Q2(A)=.767*A^(-2.2)
980 PSET(-100+A*1200,400-Q2(A)*4.5)
990 NEXT
1000 A#=INKEY$:IF A#<>" THEN 1010 ELSE 1000
1010 CLS:SCREEN 3
1020 LOCATE 2,15:PRINT "LA VARIATION DU DEBIT LIQUIDE EN FONCTION"
1030 LOCATE 3,15:PRINT "DU DEBIT GAZ POUR L'AIR LIFT :(( LONG )) "
1040 LOCATE 4,15:PRINT " POUR DIFFERENTS DIAMETRES "
1050 FOR J=0 TO 385 STEP 2
1060 PSET(100+J/1.1,60):PSET(100+J/1.1,62)
1070 PSET(100,J/8+13):PSET(102,J/9+15)
1080 PSET(100+J/1.1,13):PSET(400+J/2.5,50):PSET(400+J/2.5,52)
1090 PSET(452,J/8+13):PSET(450,J/9+13):NEXT
1100 B#="##.##":D#="##.##"
1110 A=20: B=30
1120 X=30: Y=150
1130 GOSUB 3950
1140 PA=10^5:R=1000
1150 G=9.810001:HA=PA/R*G*H :LINE(150,70)-(150,90)
1160 PSET(550,100):DRAW"u20g5e5f5h5d20r30h5f5g5e5"
1170 LOCATE 1,1 :PRINT "QL[m3/s]";
1180 LOCATE 23,71:PRINT "QG[m3/h]";
1190 M=22:J=20
1200 D#="###.##":K=0
1210 LOCATE 2,70:INPUT "h=";H
1220 LOCATE 3,70:PRINT CHR$(224):LOCATE 3,71:INPUT"=";A
1230 FOR D=.25 TO .65 STEP .05
1240 FOR B=.12+K TO .8 STEP .0005

```

```

250 QS=60*EXP(-9.810001*B)
260 QN=60*EXP(-9.810001*B)*(PA+R*G*H/2)/PA
270 IF (QN+(1-1/A))<0 THEN GOTO 1330
280 QL=5*SQR(A)*SQR((QN+(1-1/A)))/(1+QN)*SQR(9.810001*D^5)
290 LOCATE 8,72:PRINT USING D#;QL ;
300 QG=(QN*QL+2.5*D^2*(1-A)*(1+R*G*H/2/PA))*3600
310 LOCATE 9,72:PRINT USING D#;QG ;
320 PSET(40+QG*.015*.8,365-QL*.16*3600)
330 NEXT :NEXT
340 LOCATE 5,10:END
350 A#=INKEY#:IF A#<>" "THEN 1360 ELSE 1350
360 CLS:KEY OFF: SCREEN 3
370 LOCATE 2,60:PRINT"LIQUIDE";
380 LOCATE 3,60:PRINT"GAZ";
390 LOCATE 2,15:PRINT"variation de debit de gaz en fonction de alpha:AIR-LIFT
ONG"
400 GOSUB 3760
410 LOCATE 4,40:INPUT "h=";H:PA=10^5
420 R=1000;G=9.810001;HA=PA/R/G
430 FOR D=.4 TO .7 STEP .1
440 FOR B=.1 TO .9 STEP .004
450 QS=60*EXP(-9.810001*B)
460 QN=60*EXP(-9.810001*B)*(PA+R*G*H/2)/PA
470 IF (QN+(1-1/B))<0 THEN GOTO 1590
480 QL=5*SQR(B)*SQR((QN+(1-1/B)))/(1+QN)*SQR(9.810001*D^5)
490 QG=(QN*QL +2.5*D^2*(1-B)*(1+G*R*H/2/PA))*3600
500 PSET(40+B*1000,395-QL* 200)
510 PSET(40+B*1000,200-QG* .02/4.6)
520 D#="##.##"
530 LOCATE 1,1 :PRINT"[QGx 30]":LOCATE 14,1:PRINT "[QLx1.5]";
540 LOCATE 13,73:PRINT"[ ]":LOCATE 13,74:PRINT CHR$(224);
550 LOCATE 25,73:PRINT"[ ]":LOCATE 25,74:PRINT CHR$(224);
560 LOCATE 3,60:PRINT "QG=";QG;
570 LOCATE 1,71:PRINT"[q1 ]"
580 LOCATE 4,60:PRINT "q1=";QL;
590 LOCATE 5,50:PRINT "b=";B: NEXT
600 NEXT D:LOCATE 5,2:'END
610 A#=INKEY#:IF A#<>" "THEN 1620 ELSE 1610
620 CLS:KEY OFF :SCREEN 5
630 GOSUB 3760
640 LOCATE 1,1 :PRINT"[QGx.01]":LOCATE 14,1:PRINT "[QLx.2]";
650 LOCATE 13,73:PRINT"[ ]":LOCATE 13,74:PRINT CHR$(224);
660 LOCATE 25,73:PRINT"[ ]":LOCATE 25,74:PRINT CHR$(224);
670 D#=" #.## "
680 LOCATE 5,20:INPUT "h=";H
690 FOR D=.05 TO .08 STEP .01
700 FOR A=.12 TO .8 STEP .01
710 QS=.767*A^(-2.2)
720 QN=.767*A^(-2.2)*(10^5+9810*H/2)/10^5
730 IF (QN+(1-1/A))<0 THEN GOTO 1810
740 QL=3.68*SQR(A)*SQR((QN+(1-1/A)))/(1+QN) *SQR(9.810001*D^5)
750 QG=(QN*QL+2.5*D^2*(1-A)*(1+9810*H/10^5))*3600
760 PSET(5+A*1100,370-QL*5000)
770 PSET(5+A*1100,170-QG*.2 )
780 LOCATE 5,50:PRINT "q1=";QL;
790 LOCATE 6,50:PRINT "qg=";QG;
800 LOCATE 7,50:PRINT " a="; A;
810 NEXT:NEXT
820 LOCATE 2,20: PRINT" DEBIT DE GAS EN FONCTION DE ALPHA";
830 LOCATE 3,20: PRINT" =====AIR-LIFT COURT===== ";
840 LOCATE 14,20: PRINT" DEBIT DE LIQUIDE EN FONCTION DE ALPHA";
850 LOCATE 15,20: PRINT" =====AIR-LIFT COURT===== ";
860 LOCATE 5,10:'END
870 A#=INKEY#:IF A#<>" "THEN 1870 ELSE 1860

```

```

1880 CLS:KEY OFF:SCREEN 3
1890 A=20:B=30:GOSUB 3950
1900 PA=10^5:R=1000:G=9.810001
1910 HA=PA/(R*G):N=1:M=18
1920 LOCATE 1 ,10:PRINT"[RN]":LOCATE 23,71:PRINT "QG[1/S]";
1930 LOCATE 1 ,5:PRINT"[QL]"
1940 LOCATE 3,15:PRINT "DU DEBIT DE GAZ POUR UN SYSTEME:D'AIR-LIFT COURT"
1950 LOCATE 2,15:PRINT "          VARIATION DU RENDEMENT EN FONCTION "
1960 PSET(550,100):DRAW"u20g5e5f5h5d20r30h5f5g5e5"
1970 PSET(550,150):DRAW"u20g5e5f5h5d20r30h5f5g5e5"
1980 FOR J= 0 TO 450 STEP 2
1990 PSET(105+J,50):PSET(105+J,52):PSET(105+J,14)
2000 PSET(105,J/12+14):PSET(105,J/12+14):PSET(555,J/12+14)
2010 NEXT :N=1
2020 LOCATE 5,50:INPUT "d=";D
2030 LOCATE 5,50:INPUT "H=";H
2040 FOR A =.2 TO .5 STEP .1
2050 FOR B =.35 TO .95 STEP .001
2060     QN =.767*B^(-2.2)*(PA+R*G*H/2)/PA
2070     IF (QN +(1-1/A ))<0 GOTO 2160
2080     QL =3.68*SQR(A)*SQR((QN +(1-1/A)))/(1+QN )*SQR(9.810001*D^5)*1000
2090     QG =QN*QL+2.5*(1-A)*(1+R*G*H/PA/2)*D^2*1000
2100     RN=H*(1-A)/(A*QG/QL*HA*LOG(1+R*G*H/PA))
2110     PSET(40+QG *10,365-RN*400)
2120     PSET(40+QG *10,365-QL* 50)
2130     LOCATE 9 ,20:PRINT"rn*100=";RN*100 ;
2140     LOCATE 10,20:PRINT"qg  =";QG ;
2150     LOCATE 11,20:PRINT"ql  =";QL ;
2160 NEXT
2170 LOCATE M,73:PRINT H ;"m";
2180 LOCATE M,70:PRINT"h=";
2190 GOTO 2200
2200 M=M+1:N=N+1:NEXT
2210 LOCATE 6,1:'END
2220 CLS:SCREEN 1
2230 LOCATE 9,12:INPUT"d=";D :SCREEN 3
2240 IF D>.5 GOTO 2260
2250 GOTO 1880
2260 A#=INKEY#:IF A#<>" "THEN 3140 ELSE 2260
2270 CLS:KEY OFF:SCREEN 3
2280 CLS:KEY OFF:SCREEN, 3
2290 X=4:Y=12
2300 B#="###":D#="###"
2310 A=16:B=18
2320 GOSUB 3950
2330 PA=10^5:R=1100
2340 G=9.810001
2350 HA=PA/R/G :M=24
2360 LOCATE 1 ,1:PRINT" QL[1/s]";
2370 LOCATE 24,72:PRINT" QG[1/s]";
2380 LOCATE 2,13:PRINT "variation du rendement et debit liquide en fonction"
2390 LOCATE 3,13:PRINT " du debit de gaz pour un systeme D'AIR-LIFT LONG "
2400 FOR J= 0 TO 450 STEP 2
2410 PSET(120+J/1.1,50):PSET(120+J/1.1,52):PSET(120+J/1.1,14)
2420 PSET(120,J/12+14):PSET(118,J/12+14):PSET(530,J/12+14)
2430 PSET(120,J/13+60):PSET(118,J/13+60):PSET(355,J/13+60)
2440 PSET(120+J/1.9,95):PSET(118+J/1.9,93):NEXT
2450 LOCATE 6,60:INPUT "h=";H
2460 LOCATE 8,60:INPUT "a=";A
2470 LOCATE 7,60:INPUT"d=";D:PRINT " "
2480 FOR B =.08 TO .8 STEP .001
2490     QN= 60*EXP(-9.810001*B)*PA/(PA+G*R*H/2)
2500     IF (QN+(1-1/A))<0 GOTO 2600
2510     QL= 5*SQR(A)*SQR((QN+(1-1/A)))/(1+QN)*SQR(9.810001*D^5)*1000

```

```

2520 QG= QL*QN+2.5*(1-A)*(1+R*G*H/2/PA)*D^2*1000
2530 RN=H*(1-A)/(A*QG/QL*HA*LOG(1+R*G*H/PA))
2540 PSET(40+QG,365-QL*6)
2550 PSET(40+QG,365-RN*400)
2560 D$="##.##"
2570 LOCATE 21,60:PRINT"QG=";QG
2580 LOCATE 22,60:PRINT"q1=";QL;
2590 LOCATE 20,60:PRINT "rn*100=";RN*100
2600 NEXT
2610 LOCATE M,70:PRINT CHR$(224);"=";
2620 M=M-1
2630 A$=INKEY$:IF A$<>" "THEN 2650 ELSE 2630
2640 CLS:KEY OFF:SCREEN 3
2650 LOCATE 2,30:PRINT "LA VARIATION DU DEBIT SPECIFIQUE THEORIQUE"
2660 LOCATE 3,30:PRINT " EN FONCTION DE ALPHA ET DE L'IMMERSION:h "
2670 LOCATE 4,30:PRINT " ----- "
2680 D$="##.##"
2690 A=20:B=30:GOSUB 3950
2700 LOCATE 23,71:PRINT "[ ]"
2710 LOCATE 23,73:PRINT CHR$(224)
2720 PSET(550,100):DRAW"u20g5e5f5h5d20r30h5f5g5e5"
2730 LOCATE 1,2:PRINT "[Qst]";
2740 PA=10^5:R=1000:G=9.810001
2750 HA=PA/R/G
2760 M=22:N=25:C=.04
2770 LOCATE 8,70:INPUT "h=";H
2780 LOCATE M,N+6:PRINT "h=";
2790 FOR A= C TO .5 STEP .0002
2800 QT=H*(1-A)/A/HA/LOG((R*G*H+PA)/PA)
2810 LOCATE 9,63:PRINT"QT=";QT
2820 LOCATE 10,63:PRINT "A=";A
2830 PSET(40+A*900,365-QT*12)
2840 NEXT:C=C+.04
2850 LOCATE M,N+8:PRINT H:N=N+12:GOTO 2770
2860 A$=INKEY$:IF A$<>" "THEN 2870 ELSE 2860
2870 CLS:KEY OFF:SCREEN 3
2880 LOCATE 2,10:PRINT "LA VATION DU DEBIT LIQUIDE EN FONCTION "
2890 LOCATE 3,10:PRINT "DU DEBIT DE GAZ POUR UN SYSTEME D'AIR-LIFT"
2900 LOCATE 4,10:PRINT "===== COURT ===== "
2910 A=20:B=25:GOSUB 3950
2920 LOCATE 8,15:INPUT"D=";D
2930 LOCATE 23,71:PRINT "[QG m3/h]"
2940 PSET(550,100):DRAW"u20g5e5f5h5d20r30h5f5g5e5"
2950 LOCATE 1,5:PRINT "[QL m3/s]"
2960 PA=10^5:R=1000:G=9.810001
2970 HA=PA/R/G
2980 M=20:N=22:D=.2
2990 FOR A=.1 TO .5 STEP .1
3000 H=A*10
3010 D$=" ##.##"
3020 FOR B=.2 TO .9 STEP .0005
3030 QS=.767*B^(-2.2)/(PA+R*G*H/2)*PA
3040 IF (1+QS-1/A) <0 GOTO 3130
3050 Q1=3.68*SQR(A)*SQR(1+QS-1/A)
3060 QL=1/(1+QS)*Q1*1000*SQR(9.810001*D^5)
3070 QG=(QL*QS/1000 +2.5*(1-A)*(1+R*G*H/2/PA)*D^2)*3600
3080 LOCATE 4,52:PRINT"QL=";QL ;
3090 LOCATE 5,52:PRINT"QG="; QG;
3100 LOCATE 2,55:PRINT "DEBIT LIQ" ;
3110 LOCATE 3,55:PRINT "DEBIT GAZ" ;
3120 PSET(40+QG*800/3600,365-QL*20/5)
3130 NEXT B:M=M-2:N=N+5
3140 NEXT:GOTO 2920:'end

```

```

3150 CLS:KEY OFF:SCREEN 3
3160 X=200:Y=100
3170 A=20:B=25:GOSUB 3950
3180 DIM G(100),HA(100),QL(100),QG(100),QS(100),QN(111)
3190 FOR I=1 TO 6:READ G(I)
3200 NEXT
3210 DATA 1020,1040,1063,1130,1150,1180
3220 DATA 1000,1100,1200,1300,1400,1500
3230 FOR I=1 TO 6
3240 A=.58:D=.08:H=A*12
3250 PA=10^5:R=9.810001:HA(I)=PA/R/G(I)
3260 GOSUB 3380 :NEXT
3270 FOR I=7 TO 11:READ G(I)
3280 DATA 1019,1060,1080,1100,1146:NEXT
3290 FOR I=7 TO 11
3300 A=.472:H=A*12:HA(I)=PA/R/G(I)
3310 GOSUB 3380:NEXT
3320 FOR I=12 TO 13:READ G(I)
3330 NEXT
3340 DATA 1030,1080
3350 FOR I=12 TO 13
3360 A=.345:H=A*12:HA(I)=PA/R/G(I)
3370 GOSUB 3380:NEXT:END
3380 ' sou programme
3390 FOR B=.15 TO .8 STEP .005
3400 QS =.767*B^(-2.2 )
3410 QS(I)=.767*B^(-2.2 )*(R*G(I)*H/2+PA)/PA
3420 IF (1-G(I)/(1+QS(I))/A/1000)<0 GOTO 3530
3430 ' IF (QS(I)+1-1/A)<0 GOTO 3480
3440 QL(I)=3.68*SQR(A)*SQR( 1- G(I)/(1+QS(I))/A/1000)*SQR(R*D^5)*60
3450 ' QL(I)=3.68*SQR(A)*SQR(QS(I)+1-1/A)/(QS(I)+1)*SQR(R*D^5)*60/H
3460 ' QL(I)=3.68*SQR(A)*SQR( 1- G(I)/(1+QS)/A/1000)*SQR(R*D^5)*60/H
3470 QN(I)=.767*B^(-2.2 )*(R*G(I)*H/2+PA)/PA
3480 QG(I)=QL(I)*QS(I)+2.5*(1-A)*(1+9810*H/2/PA)*60
3490 PSET( QG(I)*2 ,1200-QL(I)*1200)
3500 LOCATE 6,60:PRINT "g("; I ;")="; G(I)
3510 LOCATE 4,60:PRINT "ql("; I ;")="; 1500-QL(I)*1200
3520 LOCATE 5,60:PRINT "qg="; QG(I)*2 :LOCATE 7,60:PRINT "a=";A
3530 NEXT
3540 RETURN
3550 END
3560 CLS:SCREEN 3
3570 LINE(10,10)-(10,390):LINE(10,390)-(590,390)
3580 FOR I=10 TO 590 STEP 30
3590 FOR J=390 TO -200 STEP -20
3600 LINE(I,388)-(I,392):LINE(8,J)-(12,J)
3610 NEXT:NEXT
3620 PSET(10,15):DRAW" g5e5f 5
3630 PSET(550,390):DRAW" h5f 5g5
3640 LINE(10,10)-(620,10):LINE(620,10)-(620,390)
3650 LINE(490,130)-(490,150):LINE(490,150)-(520,150)
3660 LINE(490,90)-(490,110):LINE(490,110)-(520,110)
3670 PSET(490,130):DRAW" G5E5F5
3680 PSET(520,150):DRAW" H5F5G5
3690 PSET(490,90):DRAW" G5E5F5
3700 PSET(520,110):DRAW" H5F5G5
3710 FOR I=10 TO 590 STEP 30
3720 FOR J=10 TO 390 STEP 20
3730 PSET(I,J)
3740 NEXT:NEXT
3750 RETURN
3760 FOR I=40 TO 590 STEP 135/((.35 *8 /2)/4

```

```
3770 FOR J=395 TO 240 STEP -16
3780 'FOR K=200 TO 0 STEP -20
3790 LINE(I,393)-(I,397):LINE(38,J)-(42,J)
3800 LINE(I,198)-(I,202):LINE(38,J-195)-(42,J-195)
3810 NEXT:NEXT:'NEXT
3820 LINE(40,10)-(40,395):LINE(40,395)-(635,395):PSET(40,15):DRAW" g5e5f5
3830 LINE(40,10)-(635,10):LINE(635,10)-(635,390) :PSET(520,86):DRAW" g5e5h5
3840 PSET(500,70):DRAW" u16g4e4f4h4d16r24h4f4g4e4"
3850 PSET(100,250):DRAW" u16g4e4f4h4d16r24h4f4g4e4"
3860 LINE(40,200)-(630,200)
3870 PSET(575,395):DRAW" g5e5h5
3880 PSET(40,222):DRAW" G5E5F5
3890 PSET(575,200):DRAW" G5E5H5
3900 FOR I=10 TO 620 STEP 30
3910 FOR J=10 TO 390 STEP 20
3920 'PSET(I,J)
3930 NEXT:NEXT
3940 RETURN
3950 LINE(40,5)-(40,365):LINE(40,365)-(635,365)
3960 PSET(560,365):DRAW" h5f5g5
3970 PSET(40,17):DRAW" g5e5f5
3980 LINE(40,5)-(635,5):LINE(635,5)-(635,365)
3990 FOR I=365 TO 15 STEP -A
4000 LINE( 38, I)-( 42, I)
4010 NEXT : 'LINE( 88, I)-( 92, I):'NEXT
4020 FOR I= 40 TO 590 STEP B
4030 LINE( I, 363)-( I, 365):NEXT
4040 FOR I=40 TO 605 STEP B
4050 FOR J=365 TO 10 STEP -A
4060 PSET(I,J)
4070 NEXT:NEXT
4080 RETURN
```

```

10 PRINT "!-----";
20 PRINT "-----!"
30 PRINT "!          COMPARAISON DES RESULTATS EXPERIMENTAUX et THEORIQUES";
40 PRINT "          !"
50 PRINT "!-----";
60 PRINT "-----!"
70 PRINT "!..... D(m):diamètre de la conduite de refoulement ";
80 PRINT ".....!"
90 PRINT "!..... h(m):immersion absolue .....";
100 PRINT ".....!"
110 PRINT "!..... a:alpha : immersion relative ....";
120 PRINT ".....!"
130 PRINT "!..... qr:débit spécifique réel.....";
140 PRINT ".....!"
150 PRINT "!..... qc:débit spécifique théorique ....";
160 PRINT ".....!"
170 PRINT "!..... Er.q:erreur relative sur le débit spécifique";
180 PRINT ".....!"
190 PRINT "!..... Qlr:débit liquide réel .....";
200 PRINT ".....!"
210 PRINT "!..... Qlc:débit liquide théorique ...";
220 PRINT ".....!"
230 PRINT "!..... Er.Q:erreur relative sur le débit liquide ";
240 PRINT ".....!"
250 DIM D(100),H(100),A(100),QS1(200),K1(200),QL1(100)
260 DIM L1(100),Q1(100),QE1(100),E1(100)
270 'diamètres
280 DATA .1,.1,.15,.15,.15,.15,.15,.15,.15,.15,.15,.15,.15,.15,.15,.15
290 DATA .15,.15,.153,.153,.25,.25,.25,.25,.25,.25,.25,.25
300 'imm.absolue
310 DATA 7.67,6.67,6.5,5,3.7,3.85,7,4.59,6.77,6.58,5.7,7.75,8,6,4.6
320 DATA 61,51.4,43.8,35.00,42.90,33.00,4.32,6.2,6.2,6.2,8,8,8
330 'alpha
340 DATA .415,.36,.57,.4,.33,.4,.35,.235,.33,.337,.292,.397,.4,.492,.23
350 DATA .318,.257,.206,.165,.174,.134,.138,.300,.376,.6,.4,.5,.6
360 'q.débits spécifiques
370 DATA 5.88,9.00,2.32,6.24,10.70,7.20,8.10,19.00,8.00,8.10,11.80,6.06
380 DATA 4.70,4.05,19.00,16.30,22.00,35.50,55.80,50.00,69.50
390 DATA 47.50,12.10,7.25,2.25,6.25,3.44,2.23
400 'QL.débits liquides
410 DATA 23.04,20.16,65.16,39.96,30.25,40.32,42.72,26.64,39.96,42.72
420 DATA 31.68,57.24,46.08,42.48,26.64,55.08,45.00,40.32
430 DATA 30.24,31.68,26.75,58.32,90.00,140.40,122.4,120.90
440 DATA 150.72,150.32
450 RESTORE 280
460 FOR I=1 TO 28
470 READ D(I)
480 NEXT I
490 RESTORE 310
500 FOR I=1 TO 28
510 READ H(I)
520 NEXT I
530 RESTORE 340
540 FOR I=1 TO 28
550 READ A(I)
560 NEXT I
570 RESTORE 370
580 FOR I=1 TO 28
590 READ Q1(I):NEXT I
600 RESTORE 410
610 FOR I=1 TO 28
620 READ QE1(I):NEXT I

```

```

30 RESTORE 410
40 D#=STRING$(78,"-")
50 PRINT "!";
60 PRINT STRING$(78,"#");
70 PRINT "!";
80 PRINT "! D(m) ";!";" h(m) ";!";" a ";!";" qr ";!";"
90 PRINT " qc ";!";" Er.q ";!";" QLR ";!";" QLc ";!";" Er.Q !";
00 PRINT "!";
10 PRINT STRING$(78,"#");
20 PRINT "!";
30 FOR I=1 TO 28
40 PRINT D(I),H(I),A(I)
50 IF H(I)<10 GOTO 810
60 QS1(I)=60*EXP(-9.810001*A(I))*(1+9810*H(I)/200000!)
70 IF (QS1(I)+1-1/A(I))<0 THEN GOTO 980
80 K1(I)=SQR(A(I))*SQR(QS1(I)+1-1/A(I))/(1+QS1(I))*SQR(9.810001*D(I)^5)
90 QL1(I)=5*K1(I)*3600
00 GOTO 850
10 QS1(I)=.767*A(I)^(-2.2)*(1+9810*H(I)/200000!)
20 IF (QS1(I)+1-1/A(I))<0 THEN GOTO 980
30 K1(I)=SQR(A(I))*SQR(QS1(I)+1-1/A(I))/(1+QS1(I))*SQR(9.810001*D(I)^5)
40 QL1(I)=3.68*K1(I)*3600
50 L1(I)=ABS((QL1(I)-QE1(I))/QL1(I))
50 E1(I)=ABS((QS1(I)-Q1(I))/QS1(I))
70 PRINT "!";
80 PRINT USING "##.### ";D(I);H(I);A(I);
90 PRINT USING "###.## ";Q1(I);QS1(I);E1(I);
00 PRINT USING "###.## ";QE1(I);QL1(I);
10 PRINT USING "###.##";L1(I);
20 PRINT "!"
30 GOTO 950
40 PRINT "test négatif"
50 PRINT "!";
50 PRINT STRING$(78,"#");
70 PRINT "!";
80 NEXT I
90 A#=INKEY$:IF A#<>" " THEN 990 ELSE 1030
000 PRINT
100 PRINT
200 PRINT
300 PRINT " !#####!"
400 PRINT " ! CALCUL DE LA MOYENNE DES ERREURES !"
500 PRINT " !#####!"
60 PRINT
700 PRINT " !#####!"
80 PRINT " ! moyenne des erreurs relatives !"
90 PRINT " ! sur le débit spécifique !"
000 PRINT " ! Err.moy = somme Ege/N !"
10 PRINT " !#####!"
20 SQ=0
30 FOR I=1 TO 28
40 SQ=E1(I)+SQ
50 NEXT I:MQ=SQ/28
60 PRINT
70 PRINT " !#####!"
80 PRINT " ! Err.moy sur qe=";:PRINT USING "#.##";MQ;
90 PRINT " !"
000 PRINT " !#####!"
10 MQ=0
20 PRINT
30 PRINT
40 PRINT " !#####!"
50 PRINT " ! moyenne des erreurs relatives !"
50 PRINT " ! sur le débit liquide !"
70 PRINT " ! Err.moy = somme EQe/N !"
80 PRINT " !#####!"

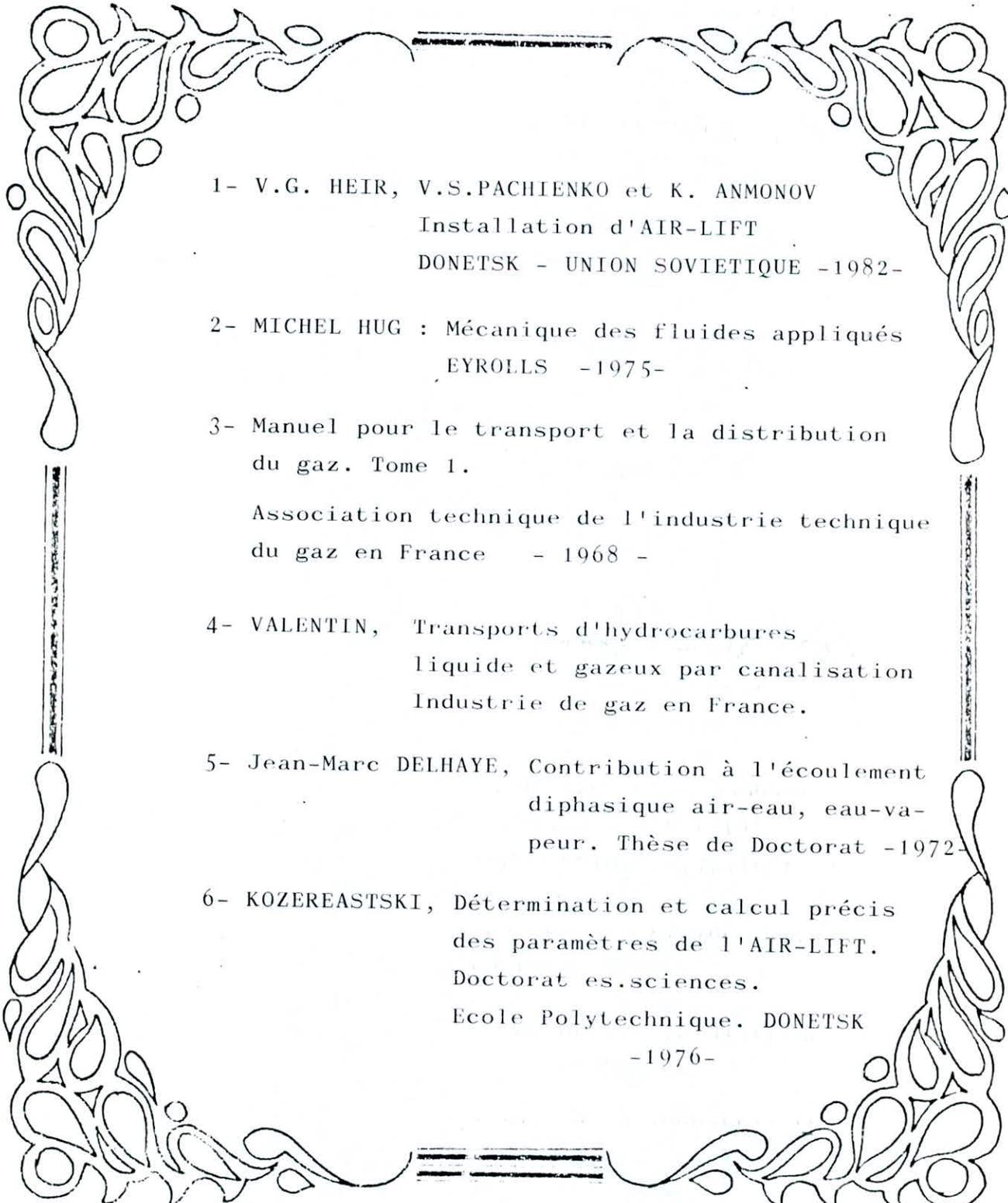
```

```

1290 FOR I=1 TO 28
1300 SL=L1(I)+SL
1310 NEXT I:ML=SL/28
1320 PRINT
1330 PRINT "          !#####!"
1340 PRINT "          ! Err.moy sur QLe =";:PRINT USING "#.##";ML;
1350 PRINT " !"
1360 PRINT "          !#####!"
1370 PRINT
1380 PRINT
1390 PRINT "          !#####!"
1400 PRINT "          ! CALCUL DU COEFFICIENT DE CORRELATION ENTRE LES !"
1410 PRINT "          ! DEBITS SPECIFIQUES ET DEBITS LIQUIDES REELS ET !"
1420 PRINT "          ! EXPERIMENTAUX !"
1430 PRINT "          !#####!"
1440 PRINT
1450 PRINT
1460 FOR I=1 TO 28
1470 SQ1=SQ1+Q1(I)*QS1(I)
1480 SX2=SX2+Q1(I)
1490 SY2=SY2+QS1(I)
1500 SX4=SX4+Q1(I)^2
1510 SY4=SY4+QS1(I)^2
1520 SQ2=SQ2+QE1(I)*QL1(I)
1530 SX8=SX8+QE1(I)
1540 SY8=SY8+QL1(I)
1550 SY10=SY10+QL1(I)^2
1560 SX10=SX10+QE1(I)^2
1570 NEXT I
1580 PRINT "          !#####!"
1590 PRINT "          ! LE COEFFICIENT DE CORRELATION est noté ' r ' !"
1600 PRINT "          !#####!"
1610 PRINT
1620 PRINT "          !#####!"
1630 PRINT "          !r=(n.Sx.y-Sx.Sy)/sqr((n.Sx^2-(Sx)^2)(n.sy^2-(Sy)^2)) !"
1640 PRINT "          !#####!"
1650 PRINT
1660 R1=(28*SQ1-SX2*SY2)/SQR((28*SX4-SX2^2)*(28*SY4-SY2^2))
1670 R2=(28*SQ2-SX8*SY8)/SQR((28*SX10-SX8^2)*(28*SY10-SY8^2))
1680 PRINT "          !#####!"
1690 PRINT "          !coefficient de correlation sur le debit spécifique'rq'"
1700 PRINT "          !#####!"
1710 PRINT
1720 PRINT "          !#####!"
1730 PRINT "          ! rq=";:PRINT USING "#.##";R1;
1740 PRINT "          !"
1750 PRINT "          !#####!"
1760 PRINT
1770 PRINT "          !#####!"
1780 PRINT "          ! coefficient de correlation sur le debit liquide'rQL'"
1790 PRINT "          !#####!"
1800 PRINT
1810 PRINT "          !#####!"
1820 PRINT "          ! rQL=";:PRINT USING "#.##";R2;
1830 PRINT "          !"
1840 PRINT "          !#####!"
1850 PRINT
1860 PRINT
1900 END

```

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

- 
- 1- V.G. HEIR, V.S.PACHIENKO et K. ANMONOV
Installation d'AIR-LIFT
DONETSK - UNION SOVIETIQUE -1982-
- 2- MICHEL HUG : Mécanique des fluides appliqués
EYROLLS -1975-
- 3- Manuel pour le transport et la distribution
du gaz. Tome 1.
Association technique de l'industrie technique
du gaz en France - 1968 -
- 4- VALENTIN, Transports d'hydrocarbures
liquide et gazeux par canalisation
Industrie de gaz en France.
- 5- Jean-Marc DELHAYE, Contribution à l'écoulement
diphase air-eau, eau-va-
peur. Thèse de Doctorat -1972-
- 6- KOZEREASTSKI, Détermination et calcul précis
des paramètres de l'AIR-LIFT.
Doctorat es.sciences.
Ecole Polytechnique. DONETSK
-1976-



7- HEIR, Les bases théoriques de l'AIR-LIFT
DONETSK -1980-

8- Gaz - lift: Technique de l'industrie du gaz
en France.

Revue :

1)- La houille blanche : N° 6/7 -1979-
N° 3 -1984-

2)- AICHE Journal (Vol. 26, n° 3) May 1980
Modelling Flow Pattern Transitions for
Steady Upward Gas-liquid Flow in vertical
tubes.

A.E. DUKLER University of Houston
TEXAS.

