

**BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES**

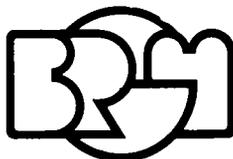
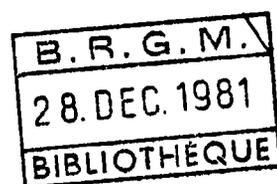
**SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL**

**B.P. 6009 - 45060 Orléans Cédex - Tél. : (38) 63.80.01**

**APPROCHE NUMÉRIQUE  
DU COMPORTEMENT D'UN FORAGE GÉOTHERMIQUE  
A PRODUCTION DIPHASIQUE EAU-VAPEUR**

par

**A. MENJOZ**



**Département géothermie**

**B.P. 6009 - 45060 Orléans Cédex - Tél. : (38) 63.80.01**

**81 SGN 712 GTH**

**Novembre 1981**

## R E S U M E

-----

L'approche du comportement d'un forage géothermique à production diphasique eau-vapeur est abordée par modèle numérique, avec pour objectif principal, la prévision et le contrôle des variables observables sur le champ, soit par enregistrement dans le forage, soit par mesure directe en tête de puits.

Après une description schématique des divers phénomènes physiques, on présente une formulation simple du problème à résoudre, en mettant en évidence les équations générales retenues ainsi que les principales relations empiriques nécessaires pouvant être utilisées.

Trois méthodes de résolution, de complexité croissante, sont examinées : deux d'entre elles, suffisamment simples, sont utilisables sur le champ avec des moyens réduits (tables, calculatrice). La dernière méthode, par modèle numérique, plus particulièrement adaptée à l'interprétation de détail des résultats d'essais, nécessite l'emploi d'un petit calculateur.

Le traitement de plusieurs exemples d'application permet enfin d'estimer la nature, l'ordre de grandeur et la variation des divers paramètres et variables caractérisant l'exploitation de l'énergie géothermique dans le domaine de la haute énergie.

# S O M M A I R E

-----

	<i>pages</i>
1 - INTRODUCTION.....	1
2 - REGIMES D'ECOULEMENT DANS UN FORAGE A PRODUCTION DIPHASIQUE.....	4
2.1. - REGIME MONOPHASIQUE LIQUIDE.....	4
2.2. - REGIME DE BULLES OU "BUBBLE FLOW".....	5
2.3. - REGIME DE PAQUETS OU "SLUG FLOW".....	5
2.4. - REGIME INTERMEDIAIRE OU "CHURN FLOW".....	5
2.5. - REGIME ANNULAIRE OU "ANNULAR FLOW".....	5
2.6. - REGIME DE BROUILLARD OU "MIST FLOW".....	7
2.7. - CRITERES DE TRANSITION.....	7
3 - FORMULATION DU PROBLEME.....	8
3.1. - GENERALITES.....	8
3.2. - CONSERVATION DE LA MASSE.....	9
3.3. - CONSERVATION DE LA QUANTITE DE MOUVEMENT.....	10
3.3.1. - Terme lié au potentiel.....	10
3.3.2. - Terme lié au frottement.....	11
3.3.3. - Terme lié à l'accélération.....	13
3.4. - CONSERVATION DE L'ENERGIE.....	13
3.5. - COUPLAGE FORAGE-RESERVOIR.....	14
3.6. - VARIATION DU DIAMETRE D'ECOULEMENT.....	15
3.7. - SYSTEME D'EQUATIONS.....	16
4 - RESOLUTION SIMPLIFIEE DU SYSTEME.....	18
4.1. - PREMIERE METHODE SIMPLIFIEE.....	18
4.2. - SECONDE METHODE SIMPLIFIEE.....	23

	pages
4.2.1. - Zone 1, liquide seul comprimé.....	23
4.2.2. - Zone 2, mélange eau et vapeur.....	23
4.3. - EXEMPLE D'APPLICATION.....	26
5 - RESOLUTION PAR MODELE NUMERIQUE.....	30
5.1. - METHODE.....	30
5.2. - ORGANIGRAMME SIMPLIFIE.....	31
5.3. - DONNEES A FOURNIR.....	33
6 - EXEMPLES D'APPLICATION.....	34
6.1. - MESA 6-1, IMPERIAL VALLEY, CALIFORNIE.....	35
6.1.1. - Données techniques d'après la littérature.....	35
6.1.2. - Données pour le calcul.....	35
6.1.3. - Résultats du calcul.....	35
6.2. - WAIRAKEI 27, NOUVELLE ZELANDE.....	38
6.2.1. - Données techniques d'après la littérature.....	38
6.2.2. - Données pour la modélisation.....	38
6.2.3. - Résultats du calcul.....	39
6.3. - ASAL 1, REPUBLIQUE DE DJIBOUTI.....	43
6.3.1. - Données techniques.....	43
6.3.2. - Données pour la modélisation.....	44
6.3.3. - Profondeur du point d'ébullition.....	44
6.3.4. - Caractéristiques de production en tête.....	48
6.3.5. - Logs de température et de pression.....	65
7 - INCIDENCE DES PROPRIETES DU FLUIDE REEL.....	72
8 - CONCLUSIONS.....	73
9 - ANNEXES.....	74
9.1. - NOMENCLATURE.....	75
9.2. - CORRELATIONS EMPIRIQUES.....	77
9.2.1. - Fraction gazeuse $\alpha$ et rapport S.....	77
9.2.2. - Gradient de pression dû au frottement.....	79

pages

9.3. - TABLES THERMODYNAMIQUES DE L'EAU ET DE LA VAPEUR.....	80
9.4. - TABLES THERMODYNAMIQUES EN FONCTION DE LA SALINITE.....	80
9.5. - TABLES DE CONVERSION UTILES.....	92
9.6. - PROGRAMME SUR CALCULATRICE HP 67.....	92
10 - BIBLIOGRAPHIE CONSULTEE.....	96

## LISTE DES FIGURES

-----

- Figure 1* : Géométrie et définition du modèle de forage
- Figure 2* : Classification schématique des différents régimes d'écoulement diphasique
- Figure 3* : Schématisation pour la première approche simplifiée
- Figure 4* : Exemple d'application de la seconde méthode  
Quelques résultats du calcul
- Figure 5* : Exemple : MESA 6-1, Imperial Valley, Californie  
Profils de pression et de température
- Figure 6* : Exemple : WAIRAKEI 27, Nouvelle Zélande  
Comparaison mesures-simulation ;  $M = 60$  kg/s
- Figure 7* : Exemple : WAIRAKEI 27, Nouvelle Zélande  
Comparaison mesures-simulation ;  $M = 55$  kg/s
- Figure 8* : Exemple : WAIRAKEI 27, Nouvelle Zélande  
Comparaison mesures-simulation ;  $M = 44$  kg/s
- Figure 9* : Asal 1 ; Evolution du débit massique total
- Figure 10* : Asal 1 ; Evolution de l'enthalpie de décharge
- Figure 11* : Asal 1 ; Evolution de la pression en tête
- Figure 12* : Résultats théoriques : profondeur d'ébullition et température en tête en fonction du débit
- Figure 13* : Résultats théoriques : influence de la température  $T_R$  et évolution de la température en tête en fonction du débit
- Figure 14* : Incidence des diverses données paramétriques sur les  
à *figure 27* variables en tête de puits
- Figure 28* : Profils de température et de pression pour les différentes  
à *figure 33* phases de débit

## 1 - INTRODUCTION

L'énergie d'origine géothermique est généralement divisée en trois grandes classes, caractérisées par la température de la ressource, fossile ou lentement renouvelable ; on distingue par exemple :

- . la géothermie basse énergie (entre 50°C et 80°C) utilisée principalement pour la fourniture des besoins de chauffage de l'habitat grâce à des dispositifs émetteurs adaptés au niveau énergétique de production ;
- . la géothermie moyenne énergie (entre 80°C et 150°C) destinée à la production d'électricité par l'intermédiaire d'une machine thermique à fluide intermédiaire binaire ;
- . la géothermie haute énergie (au-dessus de 150°C) pour la production directe d'électricité après séparation de la phase vapeur.

En matière de géothermie haute énergie, on convient habituellement de distinguer deux types de gisement :

- . les gisements de vapeur, produisant de la vapeur sèche ou surchauffée, peu répandus, tels que Larderello en Italie ou les Geysers en Californie ;
- . les gisements produisant un mélange liquide-vapeur qu'il convient de séparer ; la ressource profonde n'étant pas nécessairement constituée par une seule phase liquide comprimée.

Ce dernier type de gisement sera considéré exclusivement par la suite.

Les paramètres physiques principaux du gisement sont fournis à partir de tests de production, et d'enregistrements effectués dans les forages. Sur le plan du principe, ces paramètres sont les mêmes que ceux recherchés en géothermie basse énergie ; toutefois sur le plan pratique, la méthodologie d'acquisition et d'interprétation est plus complexe. Les difficultés sont liées à deux caractéristiques spécifiques :

- Tout d'abord, la valeur élevée de la température du fluide (200°C à 300°C), qui interdit, en l'état actuel de la technologie, toute mesure de fond par voie électrique, d'où l'acquisition et l'enregistrement des mesures par voie mécanique avec les problèmes de fiabilité que ce type de matériel impose.

- Enfin, l'existence d'un changement de phase, c'est-à-dire dans ce cas l'apparition de vapeur lorsque certaines conditions physiques sont atteintes (domaine des pressions au-dessous de la courbe de saturation). On conçoit ainsi, pour ne prendre que cet exemple, que la simple mesure du débit massique total ne pourra être réalisée par voie conventionnelle (bac déversoir ou débit-mètre par exemple). Des méthodes spéciales sont nécessaires, tenant compte notamment des conditions thermodynamiques locales (température, pression, enthalpie...).

L'existence d'un état diphasique du fluide est un facteur de complexité important dans la mesure où certains aspects de la phénoménologie sont encore du domaine de l'empirisme. Les lois physiques utilisées sont donc liées à des choix préalables, parfois contestables, qui ne confèrent pas aux solutions obtenues un caractère d'unicité absolue. En géothermie haute énergie, il s'avère donc particulièrement utile de disposer de mesures redondantes (logs de pression et de température simultanés par exemple), afin de contrôler toutes les conséquences d'une hypothèse envisagée.

Si l'on considère alors le comportement d'un fluide géothermique en mouvement depuis son réservoir d'origine jusqu'à son exutoire en surface (tête de puits), le phénomène d'ébullition et par conséquent l'apparition de la phase vapeur se manifesterait soit dans le réservoir, soit à une profondeur quelconque dans le forage. On peut, à ce stade, effectuer une classification sommaire en distinguant deux schémas généraux pour une approche par modèle de simulation :

- a) le potentiel du réservoir est suffisant pour qu'au débit d'exploitation choisi, l'ébullition ait toujours lieu à l'intérieur du forage. La pression dans le réservoir est alors toujours supérieure à la pression de vaporisation du fluide ;
- b) ou bien le réservoir est suffisamment déprimé, et le front d'ébullition progresse à l'intérieur du réservoir.

Dans cette première approche, nous retiendrons le premier schéma, en ayant pour objectif principal l'estimation par modèle de simulation de la ressource et de la production à partir de tests de courte et moyenne durée pratiqués sur le forage lui-même. Cette approche permet de considérer le comportement traditionnel d'un réservoir monophasique alimentant un forage caractérisé par une production diphasique.

Le propos de cette étude est donc de formuler le comportement hydraulique et thermique d'un mélange liquide-vapeur en écoulement dans un forage afin d'examiner l'incidence des paramètres du réservoir et du système d'exploitation en général, sur les caractéristiques de production en tête de puits. Le modèle qui en est issu est ensuite appliqué à divers cas réels pour lesquels on dispose de données. Au plan des hypothèses générales, cette première formulation suppose en outre un régime d'écoulement stationnaire dans le temps.

Trois modèles de calcul, différents par la méthode de résolution, et de complexité croissante sont proposés :

- . une première approche très simple, analytique, basée sur des variables moyennes par zone, et utilisable sur le terrain à l'aide d'une calculatrice et des tables thermodynamiques. On peut ainsi contrôler rapidement la cohérence des résultats de mesure en tête (pression, débit, etc...) et juger d'un comportement anormal ;
- . une seconde approche analytique, avec des hypothèses moins restrictives autorisant par exemple l'établissement d'abaques ou de courbes pour un pré-dépouillement des résultats sur le champ ;
- . enfin un modèle numérique complet exploitable sur micro-ordinateur.

Sur le plan des autres applications possibles de ce dernier modèle, on notera enfin qu'avec quelques modifications, celui-ci peut être adapté au calcul de la production d'un forage par air-lift (allègement de la colonne fluide provoquée dans ce cas par une émulsion avec injection d'air).

## 2 - REGIMES D'ECOULEMENT DANS UN FORAGE A PRODUCTION DIPHASIQUE

Considérons pour fixer les idées, un forage vertical captant un réservoir géothermique haute énergie, caractérisé par un fluide initialement monophasique : température 250°C et pression 80 bars par exemple. Nous admettons tout d'abord que le fluide est constitué d'eau pure ; l'influence de la salinité, ainsi que celle de la teneur en gaz non condensable, seront abordées par la suite.

L'écoulement du fluide dans le forage s'accompagne alors d'une diminution progressive de la pression dans le sens de la vitesse de l'écoulement ; et au-delà d'un certain seuil cette diminution permet l'apparition de l'ébullition. Au-delà de ce seuil, le changement de phase est continu et la proportion de vapeur augmente aux dépens de la phase liquide ; la masse total en écoulement étant conservée.

### 2.1. - REGIME MONOPHASIQUE LIQUIDE

Le fluide en écoulement demeure à l'état liquide tant que la pression locale d'écoulement demeure supérieure à la pression d'ébullition  $P_E$  correspondant à la température du fluide. Cette valeur limite de la pression est fournie par les tables thermodynamiques. Avec les données ci-dessus, et en admettant un écoulement adiabatique, donc sans échange thermique avec les formations traversées, la pression d'ébullition vaut environ 40 bars. Cette valeur définit la profondeur théorique du point d'ébullition (flashing point).

Dans la réalité, le phénomène de changement de phase n'est pas seulement lié aux conditions théoriques de saturation ; un état métastable temporaire peut subsister en donnant naissance à un retard à l'ébullition. Comme pour le cas de la solidification d'un corps, la durée de l'état métastable est liée à l'existence et à la stabilité de "germes", soit à l'intérieur du fluide, soit aux parois du forage. Par convention, nous négligerons la durée de ce déséquilibre et supposerons l'équilibre thermodynamique atteint en tout point de la colonne de fluide.

Ainsi, en régime monophasique liquide (soit entre le réservoir et la cote d'ébullition) sans échange thermique extérieur aux parois, l'écoulement se caractérisera par :

- . une variation linéaire de la pression totale en fonction de la profondeur entre  $P_F$ , pression de fond en écoulement, et  $P_E$ , pression d'ébullition, définie par la température  $T_F$  du fluide ;
- . un profil de température constant ;
- . une vitesse globale constante si la section d'écoulement ne varie pas.

L'hypothèse d'échanges thermiques adiabatiques est raisonnable si l'on considère le rapport du flux thermique convectif axial (débit) et du flux conductif d'échange radial.

La figure 1 définit la géométrie et les notations employées par la suite.

Lorsque la phase vapeur est présente (au-dessus du point d'ébullition) on définit, par convention, une séquence de régimes d'écoulement caractéristiques du degré d'homogénéité et de la distribution géométrique des deux phases (fig. 2). La traduction française de la terminologie usuelle anglo-saxonne est fournie ici à titre indicatif.

## 2.2. - REGIME DE BULLES OU "BUBBLE FLOW"

Il s'agit d'une phase considérée comme homogène, la vapeur étant à l'état dispersé dans le liquide. A leur naissance, les bulles de vapeur ont sensiblement la même taille, puis croissent de manière différente au cours de la poursuite du phénomène de vaporisation par coalescence.

## 2.3. - REGIME DE PAQUETS OU "SLUG FLOW"

Au cours du phénomène de vaporisation croissante, et par l'intermédiaire de la vitesse, la croissance des bulles de vapeur et la coalescence engendrent la formation de bulles plus importantes (paquets de vapeur) qui atteignent une taille sensiblement voisine du diamètre du forage. Ces paquets de vapeur sont transportés par le fluide qui contient encore une proportion de bulles de vapeur dispersées.

## 2.4. - REGIME INTERMEDIAIRE OU "CHURN FLOW"

Lorsque les paquets de vapeur se déplacent, la redistribution des masses volumiques, et la conservation de masse impliquent une augmentation de la vitesse de l'écoulement ; d'où l'apparition d'instabilités et le fractionnement de certains paquets de vapeur.

## 2.5. - REGIME ANNULAIRE OU "ANNULAR FLOW"

On admet ensuite que, globalement, la phase vapeur se réunit en un chenal central, la phase homogène liquide constituant un film annulaire contre la paroi du forage. Dans ce cas, et toujours en raison de la continuité de la masse, les vitesses moyennes d'écoulement des deux phases macroscopiques deviennent différentes, d'où le concept usuel de rapport de glissement ("slip ratio").

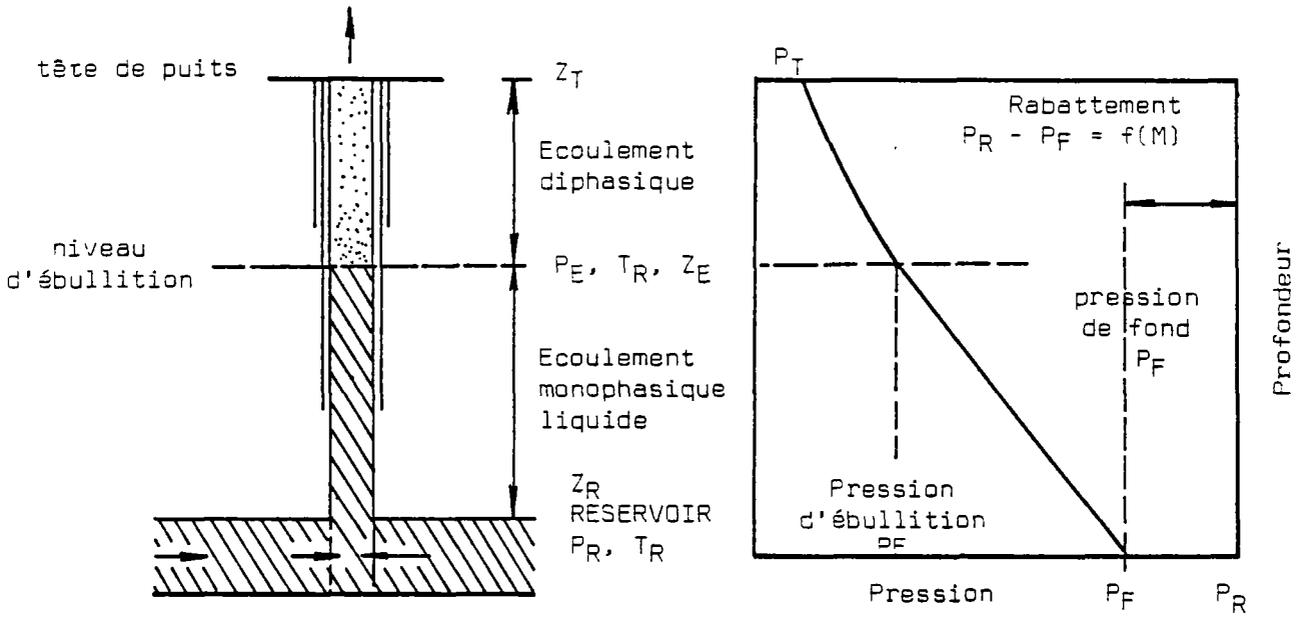


Figure 1 - Géométrie et définition du modèle de forage

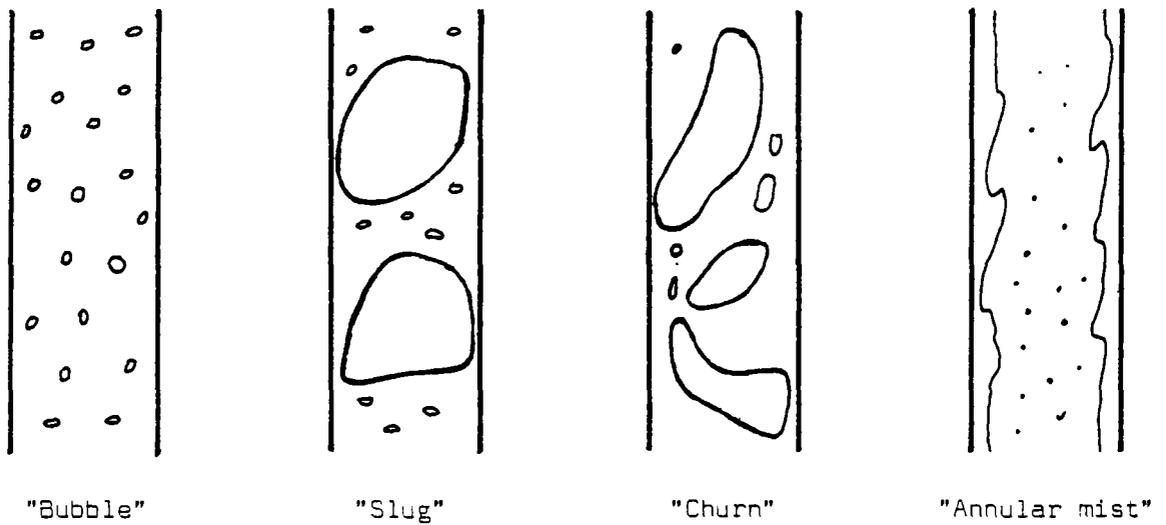


Figure 2 - Classification schématique des différents régimes d'écoulement diphasique

## 2.6. - REGIME DE BROUILLARD OU "MIST FLOW"

La disparition de film liquide annulaire peut conduire ensuite à une seule phase macroscopique gazeuse, le liquide pouvant subsister à l'état de gouttelettes dispersées.

Ces deux derniers régimes d'écoulement sont en général moins intéressants du point de vue de la production par rapport au régime de paquets, pour lequel la chute de pression globale est plus faible et le débit plus élevé.

En régime diphasique, et dans le sens de l'écoulement, le comportement du fluide sera ainsi accompagné des phénomènes suivants :

- . décroissance continue de la pression, avec un gradient vertical toutefois plus faible que dans la zone monophasique liquide (au-dessous de la cote d'ébullition)
- . décroissance continue de la température
- . augmentation de la proportion de vapeur dans le mélange
- . augmentation de la vitesse moyenne du mélange.

## 2.7. - CRITERES DE TRANSITION

Bien que la classification descriptive précédente soit généralement admise, il n'en va pas de même des critères théoriques d'apparition, d'évolution et de dégénérescence de ces différents régimes d'écoulement qui diffèrent selon les auteurs. Intuitivement, on conçoit que les paramètres à considérer sont fonctions des diverses forces en présence : forces de gravité, forces de viscosité, forces d'inertie, d'où l'introduction implicite ou explicite des deux nombres adimensionnels de Reynolds  $Re$  et de Froude  $Fr$  :

$$Re = \frac{\text{forces d'inertie}}{\text{forces de viscosité}} = \frac{\rho U^2/D}{\mu U/D^2} \quad (1)$$

$$Fr = \frac{\text{forces d'inertie}}{\text{forces de gravité}} = \frac{\rho U^2/D}{\rho g} \quad (2)$$

Cette classification, ainsi que les lois phénoménologiques associées sont donc seulement des hypothèses de travail destinées à faciliter les calculs.

On notera enfin que dans un forage réel, l'observation directe de ces phénomènes par instrumentation est encore difficilement réalisable. Les lois qui seront utilisées par la suite sont essentiellement issues d'expériences en surface ou en laboratoire ; ce qui met en relief, pour chaque référence bibliographique, l'importance des conditions opératoires : diamètres des tubes, température et ordre de grandeur des débits par exemple.

### 3 - FORMULATION DU PROBLEME

#### 3.1. - GENERALITES

Le comportement du système composé du fluide et du forage peut être abordé de manière simple en considérant les trois équations de bilan usuelles :

- . conservation de la masse (continuité et distribution des phases),
- . conservation de la quantité de mouvement (écoulement),
- . conservation de l'énergie (bilan enthalpique).

Les équations seront traduites en régime stationnaire et en fonction d'une seule variable d'espace : la profondeur (modèle unidimensionnel). La variable temps peut toutefois être présente si l'on souhaite introduire dans la formation les termes d'échange thermique avec les formations aux parois du forage.

Il convient ensuite d'adjoindre à ce système d'équations générales, des données spécifiques quant au fluide considéré, il s'agit :

- . des données thermodynamiques caractérisant l'état du mélange à l'équilibre en fonction de la température et de la pression. Les valeurs de référence sont fournies par les tables thermodynamiques de l'eau et de la vapeur : volumes spécifiques, enthalpie, entropie de chacun des deux constituants du mélange ;
- . des lois d'écoulement pour chaque régime.

Le comportement du forage est enfin précisé par les conditions aux limites de celui-ci ; c'est-à-dire par le couplage avec l'exploitation en surface d'une part, et le réservoir d'autre part :

- . en tête de puits on peut considérer soit la pression, soit le débit massique. Comme les conditions d'exploitation sont généralement fixées, en pratique, par un dispositif à étranglement : vanne ou diaphragme, nous considérerons que le débit massique total  $M$  est une donnée du problème, invariante avec la profondeur. La valeur de la pression en tête de puits sera ainsi un résultat du calcul, et une conséquence du schéma physique choisi ;
- . en fond de puits, on considèrera comme connues les variables statiques du réservoir : température  $T_R$  et pression  $P_R$ . Le couplage est assuré par la chute de pression en débit (rabattement) correspondant à un écoulement radial, monophasique liquide vers le forage.

Le modèle considéré procède ainsi dans le sens de l'écoulement, du réservoir vers la surface, et suppose par conséquent la connaissance des conditions de fond (mesures ou hypothèses).

Les résultats attendus sont de deux types :

- a) la distribution des variables température, pression, titre en fonction de la profondeur, afin de reproduire les différents logs effectués dans le forage ;
- b) les valeurs en tête de puits pour différents débits fournissant les courbes de productivité de l'ouvrage, et contrôlables par mesures directes en surface.

### 3.2. - CONSERVATION DE LA MASSE

En régime stationnaire, celle-ci s'écrit :

$$\nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (3)$$

Pour tout élément de volume élémentaire de hauteur  $dz$  défini entre deux sections droites dans le forage, l'invariance du débit massique total  $M$  conduit à écrire (voir nomenclature pour la définition des variables) :

$$M_V + M_L = 0 \quad \text{d'où} \quad dM_V = - dM_L \quad (4)$$

En fonction de la vitesse  $U_i$  de chaque phase, et des surfaces d'écoulement occupées respectives  $A_i$ , il vient :

$$M_V = A_V \cdot \rho_V \cdot U_V \quad (5)$$

$$M_L = A_L \cdot \rho_L \cdot U_L \quad (6)$$

$$M = A \cdot \overline{\rho_D} \cdot \overline{U_D} \quad (7)$$

En définissant le titre en vapeur  $X$  par la relation :

$$X = \frac{M_V}{M} \quad (8)$$

il vient encore :

$$M_V = X \cdot M \quad (9)$$

$$M_L = M - M_V = (1 - X) \cdot M \quad (10)$$

### 3.3. - CONSERVATION DE LA QUANTITE DE MOUVEMENT

En notation vectorielle la relation générale s'écrit :

$$\rho \frac{DU}{Dt} = - \nabla P - \nabla \cdot \tau - \rho g \quad (11)$$

et exprime que, par unité de volume, la somme des forces de pressions, des forces de viscosité, et des forces de gravité est égale au produit de la masse de l'unité de volume par l'accélération de celle-ci.

Soit encore, en régime stationnaire et en décomposant la dérivée convective :

$$- \nabla P = \nabla \cdot (\rho U^2) + \nabla \cdot \tau + \rho g = \nabla P_3 + \nabla P_2 + \nabla P_1 \quad (12)$$

Le gradient de pression total  $\nabla P$  est ainsi la somme de trois gradients de pression :

- le gradient de pression lié à la gravité,  $\nabla P_1$
- le gradient de pression lié au frottement,  $\nabla P_2$
- le gradient de pression lié à l'accélération,  $\nabla P_3$

#### 3.3.1. - Terme lié au potentiel (gravité) : $\nabla P_1$

$$\nabla P_1 = g \cdot \left[ \frac{A_V}{A} \cdot \rho_V + \frac{A_L}{A} \cdot \rho_L \right] \quad (13)$$

soit en utilisant la fraction  $\alpha$  définissant la surface d'écoulement occupée par la vapeur ("void fraction") :

$$\alpha = \frac{A_V}{A} \quad (14)$$

$$\nabla P_1 = g \cdot [\alpha \cdot \rho_V + (1 - \alpha) \cdot \rho_L] \quad (15)$$

On utilise également dans la littérature le complément à 1 de  $\alpha$  représentant la fraction de la surface d'écoulement occupée par le liquide et baptisée "liquid hold-up" :  $H_L = 1 - \alpha$ .

La détermination de la fraction occupée par le liquide, ou par la vapeur, dépend de corrélations empiriques (voir annexes) fonction notamment du régime d'écoulement et du rapport de glissement. Ce dernier est égal au gradient de la vitesse moyenne de la vapeur et du liquide par la relation :

$$S = \frac{U_V}{U_L} \quad (\text{"slip ratio"}) \quad (16)$$

3.3.2. - Terme lié au frottement :  $\nabla P_2$

a) Cas du fluide monophasique  
\*\*\*\*\*

Si  $\tau$  est la contrainte de cisaillement et  $f$  le facteur de frottement, la force de frottement s'écrit :

$$dF = \tau \cdot \pi \cdot D \cdot dz \quad (17)$$

$$\text{avec } \tau = \frac{f \cdot \rho \cdot U^2}{2} \quad (18)$$

$$\text{et } f = \frac{\tau}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2} \quad (19)$$

On notera que cette dernière opération n'est pas une loi de la mécanique des fluides, mais simplement une définition commode du facteur de frottement. Cette relation porte le nom de Moody, Darcy-Weisbach, ou encore Fanning (à un facteur 4 près).

$$\text{d'où : } \nabla P_2 = \frac{f}{D} \cdot \frac{\rho \cdot U^2}{2} = \frac{f \cdot W^2}{2 \cdot D \cdot \rho} \quad (20)$$

Dans ce cas, le facteur de frottement est fonction de la rugosité relative de la paroi et du nombre de Reynolds défini précédemment :

$$Re = \frac{W \cdot D}{\mu} = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu} \quad (21)$$

Selon les auteurs, d'autres relations sont parfois employées. Quelques définitions extraites de la bibliographie sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau I

*Expressions du coefficient de frottement  
en régime monophasique*

---

Blasius	$f = C/Re^n$	avec $n = 1$ laminaire $n = 0$ turbulent
Becker	$f = 0.198/Re^{0.202}$	
Fanning	$f = 64/Re$	laminaire ( $Re < 2000$ )
Collier	$f^{-0.5} = -0.8 + 2 \cdot \log (Re \cdot f^{-1})$	
Dukler	$f = 0.0056 + 0.5/Re^{0.32}$	

---

**b) Cas du mélange eau-vapeur homogène**  
 .....

On peut dans ce cas admettre une relation identique à celle de Darcy-Weisbach en utilisant une valeur moyenne de la masse volumique et de la vitesse du mélange. Le gradient de pression de frottement s'écrit alors, avec le coefficient de frottement diphasique  $\bar{f}_D$  :

$$\nabla P_2 = \frac{\bar{f}_D \cdot \bar{\rho}_D \cdot \bar{U}^2}{2 \cdot D} = \frac{\bar{f}_D \cdot W^2}{2 \cdot D \cdot \bar{\rho}_D} = \frac{f_D \cdot W \cdot \bar{V}_D}{2 \cdot D} \quad (22)$$

W est le débit massique spécifique (W = M/A).

On définit dans ce cas le volume spécifique du mélange  $\bar{V}_D$  par la relation :

$$\bar{V}_D = \frac{Q}{M} = \frac{Q_V + Q_L}{M} = X \cdot V_V + (1 - X) \cdot V_L \quad (23)$$

De la même manière qu'en monophasique, le facteur de frottement  $\bar{f}_D$  peut s'exprimer en fonction du nombre de Reynolds Re avec :

$$Re = \frac{W \cdot D}{\bar{\mu}} \quad (24)$$

où  $\bar{\mu}$  est la viscosité du mélange définie par l'une des relations suivantes :

$$\frac{1}{\bar{\mu}} = \frac{X}{\mu_V} + \frac{1 - X}{\mu_L} \quad (\text{Mc Adams}) \quad (25)$$

$$\bar{\mu} = \mu_L^\alpha \cdot \mu_V^{1-\alpha} \quad (\text{Arrhénius}) \quad (26)$$

$$\bar{\mu} = \mu_L \cdot H_L + \mu_V (1 - H_L) \quad (\text{moyenne arithmétique}) \quad (27)$$

**c) Cas du mélange diphasique à phases séparées**  
 .....

En phase non homogène, la fraction gazeuse possède une vitesse plus importante que celle de la fraction liquide. Le gradient de pression dû au frottement peut alors être exprimé à l'aide de la méthode des multiplicateurs de Martinelli-Nelson. Cette dernière exprime que le gradient de pression de frottement en régime diphasique (indice D) est proportionnel à son homologue en régime monophasique unique, liquide (indice L) ou vapeur (indice V) :

$$\nabla P_2^D = \phi_L^2 \cdot \nabla P_2^L \quad \text{par rapport au liquide seul} \quad (28)$$

$$\text{ou } \nabla P_2^D = \phi_V^2 \cdot \nabla P_2^V \quad \text{par rapport à la vapeur seule} \quad (29)$$

Les multiplicateurs  $\phi_{L,V}$  sont déterminés empiriquement ; quelques exemples de lois sont fournis en annexes.

3.3.3. - Terme lié à l'accélération :  $\nabla P_3$

$$\nabla P_3 = \frac{1}{A} \frac{d}{dz} (M_V \cdot U_V + M_L \cdot U_L) \quad (30)$$

soit encore :

$$\nabla P_3 = W^2 \cdot \frac{d}{dz} \left[ \frac{X^2}{\alpha} \cdot V_V + \frac{(1-X)^2}{1-\alpha} \cdot V_L \right] \quad (31)$$

3.4. - CONSERVATION DE L'ENERGIE

En considérant un forage vertical produisant sans pompe d'exhaure, le bilan énergétique d'un incrément dz, entre deux sections, s'écrit :

$$M \cdot \left[ dh + d \left( \frac{U^2}{2} \right) + g \cdot dz \right] = q \quad (32)$$

où h est l'enthalpie du fluide, et q l'énergie échangée par conduction aux parois du forage.

On admettra par la suite que le terme d'échange q est négligeable devant le flux convectif (comportement adiabatique). Le terme peut néanmoins être facilement introduit dans la formulation en utilisant la méthode de Ramey pour l'écoulement monophasique en basse énergie. L'échange q(z) est alors exprimé à l'aide d'un coefficient de transfert global aux parois, fonction du temps.

L'enthalpie du fluide est fonction de l'enthalpie de chaque phase (liquide et vapeur) et du titre (fraction massique en vapeur) :

$$h \# h_V \cdot X + (1 - X) \cdot h_L \quad (33)$$

En comparant les ordres de grandeur des différents termes du bilan énergétique, on peut de plus constater que les termes d'énergie cinétique et potentielle sont généralement faibles ; en sorte qu'à quelques % près le comportement du forage est sensiblement isenthalpique. Ces termes sont toutefois conservés dans la formulation du modèle général, mais cette dernière remarque est utile pour le contrôle des résultats du calcul, ou pour une approche simplifiée sans modèle numérique.

L'équation à résoudre pour chaque incrément dz est donc la suivante :

$$dh + d \left( \frac{U^2}{2} \right) + g \cdot dz = 0 \quad (34)$$

ou bien encore, en tout point, l'invariance de l'énergie totale par unité de masse :

$$E = Xh_V + (1 - X) \cdot h_L + g \cdot z + \frac{1}{2} \cdot X \cdot U_V^2 + \frac{1}{2} (1 - X) \cdot U_L^2 = \text{constante}$$

(35)

### 3.5. - COUPLAGE FORAGE-RESERVOIR

Le couplage du forage et du réservoir est simplement lié à la variation de pression consécutive au débit. On considère comme invariants :

- . la température du réservoir en débit,  $T_R$
- . la pression statique,  $P_R$
- . le titre en vapeur  $X_R = 0$ , le réservoir étant toujours monophasique liquide.

L'écoulement vers le forage et dans l'aquifère est radial (estension infinie) et suit la loi de Darcy.

Dans le cas d'un réservoir assimilé globalement à un milieu poreux, la pression hydrodynamique de fond  $P_F$  s'écrit (régime stationnaire) :

$$P_F = P_R - \frac{M \cdot V_L \cdot \mu_L}{2\pi \cdot L \cdot K} \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (36)$$

avec  $V_L$  : volume spécifique du liquide à la température  $T_R$

$\mu_L$  : viscosité du liquide

$R$  : rayon d'action (drainage)

$r$  : rayon de forage (efficace)

$K$  : perméabilité intrinsèque

$L$  : épaisseur productive équivalente.

En pratique, le rayon de drainage  $R$  dans le réservoir est souvent mal connu (écart à la symétrie radiale, production par fractures, etc...) ; de plus la détermination de la perméabilité et de l'épaisseur productive suppose la mise en oeuvre de tests conventionnels avec enregistrements de la pression.

A partir de la relation (36), on peut alors définir un paramètre global, plus macroscopique, le coefficient de rabattement :

$$C = \frac{P_R - P_F}{M} = \frac{V_L \cdot \mu_L \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right)}{2\pi \cdot K \cdot L} \quad (37)$$

et considérer sa valeur comme stable et indépendante du temps (hypothèse à contrôler en pratique). Il suffit alors de mesurer la pression de fond en production (valeur finale des logs de pression périodiques par exemple) pour définir et s'assurer de la relation pratique :

$$P_F = P_R - C \cdot M \quad (38)$$

En présence de fractures suffisamment ouvertes, c'est-à-dire dans le cas des rabattements faibles, cette dernière relation linéaire peut ne plus être valable ; on peut alors tenter d'utiliser une forme empirique suggérée par R. James pour certains forages de Nouvelle Zélande :

$$(P_R - P_F)^{0.5} = C'.M \quad (39)$$

### 3.6. - VARIATION DU DIAMETRE D'ÉCOULEMENT

Pour diverses raisons techniques et phénoménologiques, le diamètre intérieur du forage, ou la section d'écoulement est rarement constante sur toute la longueur du forage :

- . variation de diamètre interne des différents casings,
- . présence d'un annulaire tubing-casing dans le cas d'une mise en production par air-lift,
- . phénomènes de dépôts localisés (aux perforations du tubing d'émulsion, à la cote d'ébullition, en présence de rétrécissements accidentels, etc...),
- . variation brusque de diamètre au sabot du casing, etc...

La variation de pression qui accompagne le passage d'un élargissement ou d'un rétrécissement est connue d'après les formulaires de mécanique des fluides, pour un écoulement monophasique, soit :

$$dP = k \cdot \rho_L \cdot \frac{U^2}{2} \quad (40)$$

où k est un coefficient de perte de charge tabulé fonction du rapport des diamètres amont-aval.

Dans le cas d'un écoulement diphasique différentes relations empiriques ont été proposées : elles font intervenir les variables du mélange : titre, fraction volumique  $\alpha$ , vitesse de chaque phase, etc...

L'influence d'un élargissement est toutefois peu importante ; par contre, le rétrécissement consécutif à un phénomène de dépôt chimique peut modifier fortement la valeur de la chute de pression globale (réf. exemples d'applications). Le phénomène de dépôt implique en effet deux conséquences non négligeables :

- . la diminution du diamètre, d'où une limitation du débit maximum,
- . l'augmentation de la rugosité, d'où une augmentation du coefficient de frottement.

On constatera en effet, d'après l'analyse dimensionnelle de l'expression du gradient de pression lié au frottement, que celui-ci varie comme  $D^{-5}$  et  $f$ .

### 3.7. - SYSTEME D'EQUATIONS

Finalement, en fonction des hypothèses précédentes, la résolution du problème consiste à calculer pour chaque section comprise entre  $z$  et  $z + dz$  :

- . la pression  $P$
- . le gradient de pression  $\nabla P$
- . les enthalpies de la vapeur  $h_V$  et du liquide  $h_L$
- . les masses volumiques  $\rho_V$  et  $\rho_L$  (ou les volumes spécifiques  $V_V$  et  $V_L$ )
- . la fraction gazeuse  $\alpha$  ou liquide  $H_L$
- . le titre en vapeur  $X$

à l'aide des équations :

énergie :

$$X \cdot h_V + (1 - X) \cdot h_L = g \cdot z + \frac{1}{2} \cdot X \cdot U_V^2 + \frac{1}{2} (1 - X) \cdot U_L^2 = E \quad (41)$$

gradient de pression :

$$-\nabla P = \nabla P_1 + \nabla P_2 + \nabla P_3 \quad (42)$$

$$\text{où } \nabla P_1 = \bar{\rho} \cdot g = [\alpha \cdot \rho_V + (1 - \alpha) \cdot \rho_L] \cdot g \quad (43)$$

$$\nabla P_2 = \phi_L^2 \frac{f \cdot W^2 \cdot V_L}{2 \cdot D} \quad (44)$$

$$\nabla P_3 = W^2 \cdot \frac{d}{dz} \left[ \frac{X^2 \cdot V_V}{\alpha} + \frac{(1 - X)^2}{1 - \alpha} \cdot V_L \right] \quad (45)$$

Les deux équations sont fortement couplées. Par exemple, le gradient de pression est fonction du titre du mélange, qui dépend des enthalpies de chaque phase, lesquelles dépendent à leur tour de la pression. Ainsi, sans hypothèses supplémentaires, la détermination des trois variables principales : température, pression, titre, nécessite un calcul itératif. Au cours de ce processus itératif, les autres variables sont obtenues explicitement en tout point :

- $h_L, h_V, V_L, V_V, \rho_L, \rho_V$  à l'aide des tables thermodynamiques à partir de  $T$  ou  $P$ ,
- $\alpha$  et  $f$  par corrélation empirique à partir de  $X, V_L, V_V$ , etc...

Trois méthodes de résolution vont être successivement présentées avec une gradation en fonction du degré d'intégration sur la longueur du forage :

- . la première résolution simplifiée (§ 4.1) : hypothèse de paramètres moyens constants dans chacune des deux zones, monophasique et diphasique
- . seconde résolution simplifiée (§ 4.2) : hypothèse d'une variation linéaire de certains paramètres avec la profondeur
- . résolution numérique complète par calcul itératif sur chaque incrément  $dz$  issu d'une discrétisation de la longueur  $Z$ .

#### 4 - RESOLUTION SIMPLIFIEE DU SYSTEME

Sur le champ, plusieurs estimations rapides sont nécessaires à l'aide de moyens de calcul réduits :

- . l'estimation de la cote d'ébullition, afin de prévoir au mieux les profondeurs des différents paliers de mesure à respecter lors de l'exécution des logs (profils de température et de pression représentatifs au voisinage de la profondeur d'ébullition) ;
- . l'estimation de la pression et du titre en tête de puits pour un débit donné (contrôle, mesures géochimiques par exemple) ;
- . l'estimation sommaire de la courbe de production (pression-débit en tête) pour juger d'une intervention (colmatage, nettoyage, arrêt, etc...).

##### 4.1. - PREMIERE METHODE SIMPLIFIEE

Considérons la schématisation représentée à la figure 3. Le forage de longueur Z est séparé en deux zones distinctes de longueur Z<sub>1</sub> (monophasique liquide) et Z<sub>2</sub> (diphasique), de part et d'autre de la cote d'ébullition. Les propriétés du fluide seront supposées constantes dans chaque domaine :

- sur la longueur Z<sub>1</sub> au-dessous du point d'ébullition :
  - . volume spécifique V<sub>L</sub> égal à la valeur dans le réservoir V<sub>R</sub>
  - . enthalpie h = h<sub>R</sub>
  - . température T<sub>L</sub> = T<sub>R</sub>
- sur la longueur Z<sub>2</sub> :
  - . volume spécifique du mélange calculé pour la pression moyenne (P<sub>T</sub> + P<sub>E</sub>)/2
  - . enthalpie h = h<sub>R</sub>
  - . coefficient de frottement  $\bar{f}_D = f_L = f$

##### a) *Zone monophasique Z<sub>1</sub>*

En négligeant le gradient de pression dû à l'accélération, il vient :

$$P_B - P_E = \left( \rho_L \cdot g + \frac{2 \cdot f \cdot W^2}{D \cdot \rho_L} \right) \cdot Z_1 \quad (\text{avec } f : \text{Fanning})$$

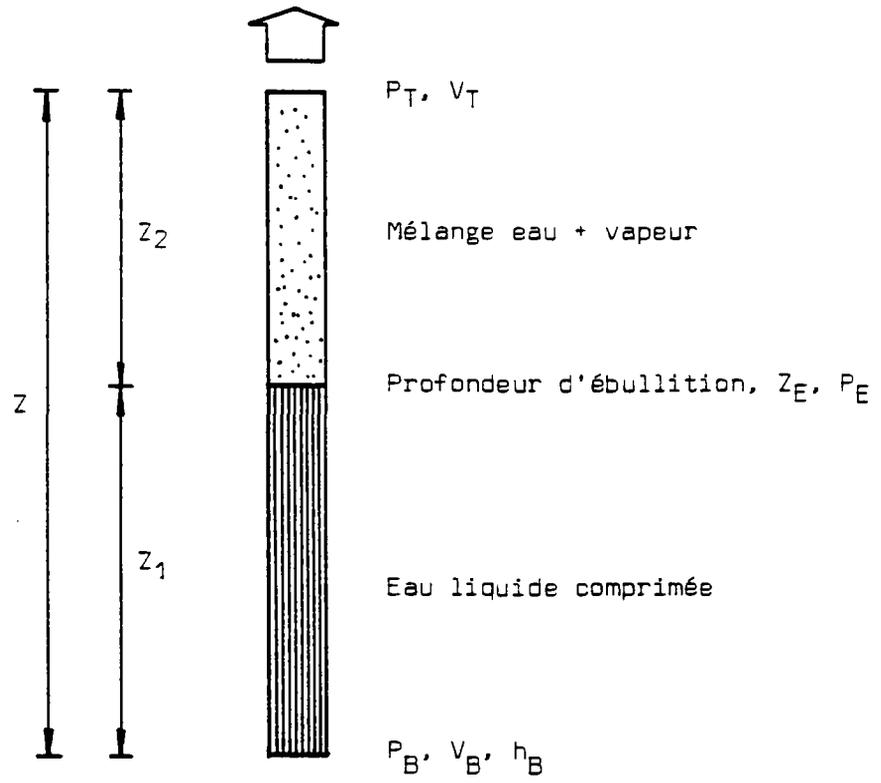


Figure 3 - Schématisation pour l'approche simplifiée

$$\text{d'où } Z_1 = \frac{P_B - P_E}{\rho_L \cdot g + \frac{2 \cdot f \cdot W^2}{D \cdot \rho_L}} = \frac{P_B - P_E}{\frac{g}{V_L} + \frac{2 \cdot f \cdot W^2 \cdot V_L}{D}} \quad (46)$$

Au plan des applications, on préférera utiliser le volume spécifique plutôt que la masse volumique, car il est fourni directement par les tables.

$P_B$  : pression de fond en débit, mesurée par log ou calculée,

$P_E$  : pression d'ébullition obtenue à partir de la valeur de  $T_R$  dans les tables,

$V_L$  : obtenu de la même manière à partir de  $T_R$

$f$  : peut être pris égal à 0.005 ou 0.01 ; son influence est très faible sur la détermination de  $Z_1$

$W$  : débit massique rapporté à la section (M/A).

Toutes les autres grandeurs étant fixées, on détermine  $Z_1$  : la distance entre le niveau d'ébullition et la base du forage, ou le niveau producteur moyen.

**b) Zone diphasique  $Z_2$**   
 .....

De la même manière que précédemment, mais en conservant le terme d'accélération, on a :

$$P_E - P_T = \left[ \frac{g}{V_D} - \frac{2 \cdot f \cdot W^2 \cdot V_D}{D} \right] \cdot Z_2 + W^2 \cdot [V_T - V_L] \quad (47)$$

$$\text{d'où } Z_2 = \frac{P_E - P_T - W \cdot (V_T - V_L)}{\frac{g}{V_D} + \frac{2 \cdot f \cdot W^2 \cdot V_D}{D}} \quad (48)$$

avec  $V_T$  : volume spécifique évalué en tête, soit en fonction de  $P_T$  et  $h_R$

$V_L$  : volume spécifique du liquide (valeur réservoir  $V_R$ )

$V_D$  : volume spécifique du mélange évalué à la pression moyenne sur la longueur  $Z_2$  :  $(P_T + P_E)/2$ .

En écrivant que la somme  $Z_1 + Z_2 = Z$  :

$$\frac{P_B - P_E}{\frac{g}{V_L} + \frac{2 \cdot f \cdot W^2 \cdot V_L}{D}} + \frac{P_E - P_T - W^2 \cdot (V_T - V_L)}{\frac{g}{V_D} + \frac{2 \cdot f \cdot W^2 \cdot V_D}{D}} = Z \quad (49)$$



- D'après les tables :

$V_{LT} = 1.0831 \cdot 10^{-3}$	m <sup>3</sup> /kg	vol. spécif. du liquide en tête
$V_{VT} = 0.4708$	m <sup>3</sup> /kg	vol. spécif. de la vapeur en tête
$h_{LT} = 143.7$	kcal/kg	enthalpie du liquide en tête
$l_T = 510$	kcal/kg	chal. latente de vap. en tête

- Calcul du titre en tête (en négligeant l'énergie cinétique) :

$$X_T = \frac{h_{LR} - h_{LT}}{l_T} = 0.204$$

- Volume spécifique du mélange en tête :

$$\rho_T = X_T \cdot \rho_{VT} + (1 - X_T) \cdot \rho_{LT} = 735.4 \quad \text{d'où } V_T = \frac{1}{\rho_T} = 1.3599 \cdot 10^{-3}$$

- Paramètres moyens en zone diphasique évalués à :  $P = \frac{P_E + P_T}{2} = 19 \text{ atm}$

$$V_{LT} = 1.1706 \cdot 10^{-3} \quad \text{d'où } \rho_{LT} = 854.26$$

$$V_{VT} = 0.1067 \quad \rho_{VT} = 9.372$$

$$h_{LT} = 213.1$$

$$l_T = 454.6$$

$$\text{d'où } \bar{X}_D = 0.076$$

$$\bar{\rho}_D = 790.05 \quad \text{et } \bar{V}_D = 1.2657 \cdot 10^{-3}$$

- En admettant  $f = 0.003$  et en remplaçant, la relation (49) devient :

$$\frac{2.758 \cdot 10^6}{7978.72 + 37.06 \cdot 10^{-6} W^2} + \frac{2.952 \cdot 10^{-6} - 130.8 \cdot 10^{-6} W^2}{7748 + 38.162 \cdot 10^{-6} W^2} = Z_1 + Z_2$$

- Par approximations successives on détermine  $W = M/A$  tel que  $Z_1 + Z_2 = 670.5$

M	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>1</sub> + Z <sub>2</sub>
100	329.83	362.37	692.2
110	326.69	358.69	685.4
120	323.31	354.74	678.0
130	319.72	350.54	670.3
140	315.93	346.11	662.0

Le débit correspondant à la pression en tête choisi est donc 130 kg/s.

- Pour ce débit, et d'après la relation (50) la pression critique vaut :

$$P_C = 5.21 \text{ atm.}$$

- On obtiendrait de la même manière pour d'autres valeurs de  $P_T$  :

$$P_T = 5 \text{ atm} \quad M = 113.5 \text{ kg/s} \quad P_C = 4.52 \text{ atm}$$

$$P_T = 6 \text{ atm} \quad M = 94.6 \text{ kg/s} \quad P_C = 3.74 \text{ atm}$$

- L'égalité  $P_T = P_C$  conduit alors au débit maximum  $M \# 119 \text{ kg/s}$   
(la profondeur du niveau d'ébullition étant de l'ordre de 354 m).

#### 4.2. - SECONDE METHODE SIMPLIFIEE

Reprenons les équations du système initial, et avec quelques simplifications, tentons de les intégrer sur la longueur du forage  $Z = Z_1 + Z_2$  (figure 3).

##### 4.2.1. - Zone 1, liquide seul comprimé

Avec les notations précédentes, nous avons obtenu la relation donnant le gradient de pression dans le liquide :

$$- \frac{dP}{dz} = \rho U \frac{dU}{dz} + \frac{2 \cdot f_L \cdot v_E^2 \cdot U^2}{D} + \rho_L \cdot g \quad (51)$$

$$\text{d'où} \quad P_B - P_E = \int_{U_B}^{U_E} \rho_L \cdot U \cdot dU + \frac{2}{D} \int_{Z_B}^{Z_E} f_L \cdot \rho_L \cdot U^2 \cdot dz + g \int_{Z_B}^{Z_E} \rho_L \cdot dz \quad (52)$$

$\rho_L$  étant supposé constant sur la longueur  $Z$ , il vient :

$$P_B - P_E = \frac{2}{D} \cdot f_L \cdot \rho_L \cdot U_B^2 \cdot Z_1 + \rho_L \cdot g \cdot Z_1 \quad (53)$$

##### 4.2.2. - Zone 2, mélange eau et vapeur

De même, en conservant le terme cinétique :

$$P_E - P_T = \int_{U_E}^{U_T} \rho_D \cdot U \cdot dU + \frac{2}{D} \int_{Z_E}^{Z_T} f_D \cdot \rho_D \cdot U^2 \cdot dz + g \int_{Z_E}^{Z_T} \rho_D \cdot dz \quad (54)$$

et en considérant une valeur moyenne sur  $Z_2$  pour  $\rho_D$  et  $f_D$  :

$$P_E - P_T = \bar{\rho}_D \frac{(U_T^2 - U_E^2)}{2} + \frac{2}{D} \cdot \bar{f}_D \cdot \bar{\rho}_D \cdot \bar{U}^2 \cdot Z_2 + \bar{\rho}_D \cdot g \cdot Z_2 \quad (55)$$

soit finalement en sommant les diverses chutes de pression :

$$P_T = P_R - C.M - \bar{\rho}_D \frac{(U_T^2 - U_L^2)}{2} - \frac{2}{D} (f_L \cdot \rho_L \cdot U_L^2 \cdot Z_1 + \bar{f}_D \cdot \bar{\rho}_D \cdot \bar{U}^2 \cdot Z_2) - (\rho_L \cdot Z_1 + \bar{\rho}_D \cdot Z_2) \cdot g \quad (56)$$

où l'on reconnaît les différents termes : rabatement, accélération, frottement et potentiel. Le calcul des valeurs moyennes introduites sur la longueur  $Z_2$  nécessite alors une estimation du titre en tête, ainsi qu'une hypothèse sur son évolution entre le niveau d'ébullition et la tête de puits.

D'après la conservation de l'énergie et en supposant le comportement adiabatique, on peut écrire :

$$X \cdot h_V + (1 - X) \cdot h_L = h_{LR}$$

$$\text{d'où } X \cdot l + h_L = h_{LR} \quad (l = \text{chaleur de vaporisation})$$

soit la valeur du titre en tête :

$$X_T = \frac{h_{LR} - h_{LT}}{l_T} \quad (57)$$

avec la définition du rapport de glissement :

$$S_T = \frac{U_{VT}}{U_{LT}}$$

On obtient également une autre expression du titre en faisant intervenir les surfaces d'écoulement respectives  $A_i$  :

$$X_T = \frac{A_{VT} \cdot \rho_{VT} \cdot U_{VT}}{A_{VT} \cdot \rho_{VT} \cdot U_{VT} + A_{LT} \cdot \rho_{LT} \cdot U_{LT}} = \frac{1}{1 + \frac{(A - A_{VT})}{A_{VT}} \cdot \frac{\rho_{LT}}{\rho_{VT}} \cdot \frac{1}{S_T}}$$

D'après la dernière équation du système initial (conservation de la masse totale), on tire :

$$\frac{\pi}{4} \cdot D \cdot \rho_L \cdot U_{LB} = A_{VT} \cdot \rho_{VT} \cdot U_{VT} + \frac{(A - A_{VT}) \cdot \rho_{LT} \cdot U_{LT}}{S_T} = M$$

par conséquent :

$$U_L = b \cdot M = \frac{4}{\pi \cdot D^2 \cdot \rho_L} \cdot M = \frac{V_L}{A} \cdot M \quad (58)$$

$$U_{VT} = a \cdot M = \frac{V_{VT} \cdot X_T + V_{LT} \cdot S_T (1 - X_T)}{A} \quad (59)$$

Valeurs moyennes

- Pour l'expression de  $\bar{\rho}_D$  on admet l'hypothèse d'une variation linéaire du titre sur la longueur  $Z_2$  :

$$\bar{\rho}_D = \frac{\rho_L + \rho_{DT}}{2} = \frac{1}{2}[\rho_L + X_T \cdot \rho_{VT} + (1 - X_T) \cdot \rho_{LT}] \quad (60)$$

- $\bar{f}_D$  généralement supérieur à  $f_L$  sera imposé comme paramètre d'entrée.
- Pour la valeur  $U_T$  en tête, on l'assimile à la vitesse du fluide homogène qui transporte la même énergie cinétique que les deux phases réelles :

$$\text{d'où } U_T = U_{VT} \cdot \sqrt{X_T + \frac{1 - X_T}{S_T^2}} = e.m \quad (61)$$

- La valeur moyenne  $\bar{U}$  qui intervient dans le terme de frottement sera définie par :

$$\bar{U} = \frac{M}{A \cdot \bar{\rho}_D} = \frac{M \cdot \bar{V}_D}{A} = d.M \quad (62)$$

Relation approchée finale

Ayant défini tous les termes, la relation fournissant la pression en tête s'écrit :

$$P_T = E - C.M - B.M^2 \quad (63)$$

avec  $E = P_R - g \cdot \left( \frac{Z_1}{V_L} + \frac{Z_2}{V_D} \right)$

$$B = \frac{1}{2 \cdot \bar{V}_D} \cdot (e^2 - b^2) + \frac{2}{D} \cdot \left( \frac{f_L \cdot Z_1 \cdot b^2}{V_L} + \frac{\bar{f}_D \cdot Z_2 \cdot d^2}{\bar{V}_D} \right)$$

$$a = \frac{V_{VT} \cdot X_T + V_{LT} \cdot S_T \cdot (1 - X_T)}{A}$$

$$b = \frac{V_L}{A}$$

$$e = a \cdot \sqrt{X_T + \frac{1 - X_T}{S_T^2}}$$

$$d = \frac{\bar{V}_D}{A}$$

$$\bar{V}_D = \frac{2}{\frac{1}{V_L} + \frac{X_T}{V_{VT}} + \frac{1 - X_T}{V_{LT}}}$$

Bien que cette relation repose sur des hypothèses parfois contestables au niveau de la physique, elle demeure suffisamment simple pour permettre d'effectuer des calculs rapides et sa résolution ne nécessite que peu d'itérations (emploi d'une calculatrice de poche programmable par exemple). On remarquera notamment que :

- . l'expression de la pression en tête est quadratique en fonction du débit massique M, comme pour le cas du forage en régime monophasique liquide unique,
- . la relation (terme B) ne dépend que de 3 paramètres arbitraires à fixer :

$$B (f_L, \bar{f}_D, S_T)$$

La résolution a été programmée sur calculatrice HP 67 et le détail du programme est fourni en annexe 9.6. L'exemple d'application traité au paragraphe suivant permettra de constater le caractère très pratique de cette méthode simplifiée.

#### 4.3. - EXEMPLE D'APPLICATION

Soit les données suivantes :

$$Z = 1\ 520\ \text{m}$$

$$D = 7'' = 0.178\ \text{m} \quad (\text{d'où } A = 0.0249\ \text{m}^2)$$

$$C = 2.28 \cdot 10^4\ \text{Pa.s/kg} \quad \text{Coefficient de rabatement}$$

$$T_R = 275\ \text{C}$$

$$P_R = 15\ \text{MPa}$$

Proposons nous de déterminer la courbe de production  $M = f(P_T)$ . Les unités, non précisées par la suite, sont celles du système MKSA. On choisit  $f_L = \bar{f}_D = 0.008$  et  $S_T = 5$ .

- Pression en tête maximale à débit nul (MDP)

en prenant pour simplifier  $\bar{V}_D = V_L$

$$P_T = E = P_R - g \cdot \frac{Z}{V_L}$$

d'après les tables :

$$\begin{aligned} T = 275 \text{ C} \quad V_L &= 1.317 \cdot 10^{-3} \\ P_E &= 5.9496 \cdot 10^6 \\ h_R &= 1.209 \cdot 10^6 \end{aligned}$$

soit  $P_T = 3.68 \text{ MPa}$ .

- Soit  $P_T = 3 \text{ MPa}$

d'après les tables :

$$\begin{aligned} V_{LT} &= 1.2163 \cdot 10^{-3} \\ V_{VT} &= 0.0666 \\ h_{LT} &= 1.007 \cdot 10^6 \\ l_T &= 1.791 \cdot 10^6 \end{aligned}$$

d'où  $X_T = 0.112$

En utilisant le programme de l'annexe 9.6, on obtient successivement :

$\bar{M}$	$Z_2$	M
10.	338.2	24.1
24.1	395.1	24.3
24.3	396.0	24.3

La poursuite du calcul pour différentes valeurs de la pression en tête conduit aux résultats présentés à la figure 4.

- Commentaires

+ Les résultats du calcul (figure 4) montrent que le débit augmente lorsque la pression en tête diminue, et en-dessous d'une certaine valeur limite de cette dernière, le débit calculé décroît. Ce résultat théorique a rarement été constaté en pratique ; le débit maximum est alors limité par un autre phénomène ("choking") défini par la vitesse maximum que peut atteindre le mélange à l'extrémité du tube de décharge (vitesse sonique ou nombre de Mach = 1). La valeur du débit est alors indépendante de la pression en tête (courbe en trait plein de la figure 4).

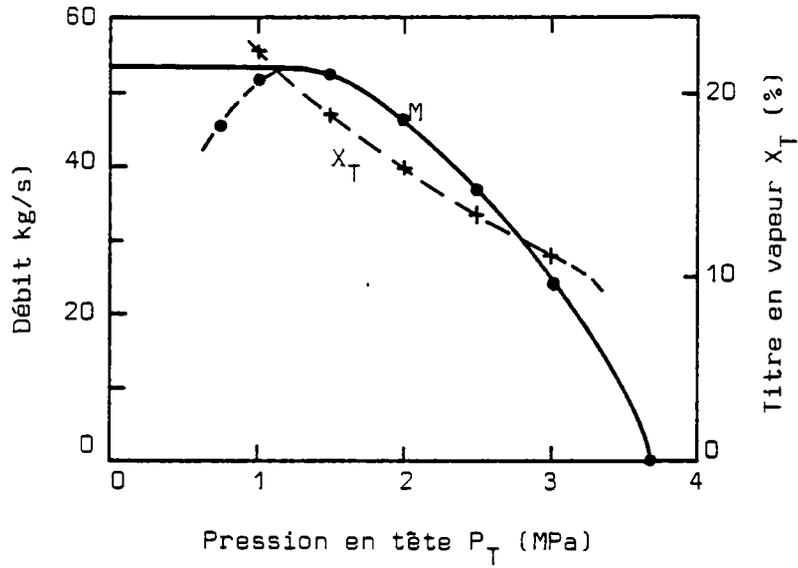
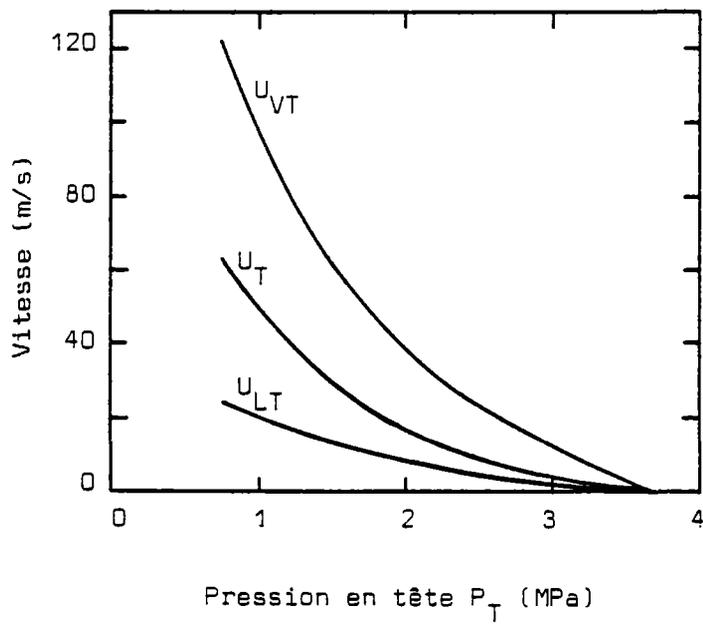


Figure 4 - Exemple d'application de la seconde méthode  
Résultats du calcul



+ La méthode peut être utilisée pour étudier l'influence des 3 paramètres imposés : facteurs de frottement  $f_L$  et  $f_D$ , avec  $f_D \neq f_L$ , et rapport de glissement en tête  $S_T$ . On montrerait ainsi, toutes choses égales par ailleurs, que le débit maximum varie peu dès que  $S_T$  est supérieur à 5 ou 6.

+ L'intérêt pratique de la méthode ne doit pas faire oublier l'importance des hypothèses utilisées : le comportement du forage est en effet uniquement fonction de valeurs moyennes (volume spécifique du mélange par exemple) déterminées à partir des paramètres de fond et en tête. Pour plus de précision, la méthode peut être appliquée successivement à chaque longueur élémentaire  $dz$  de forage, en considérant le paramètre  $S_T$  implicite ; c'est dans cet esprit qu'est abordée la troisième méthode d'approche par modèle numérique.

## 5 - RESOLUTION PAR MODELE NUMERIQUE

---

Le modèle numérique développé, baptisé FOGEDI (code numérique pour "FOrage GEothermique DIphasique") résoud le problème de l'écoulement stationnaire et adiabatique dans un forage. Le comportement physique est représenté par le système d'équations initiales (chapitre 3) et les diverses corrélations empiriques nécessaires sont extraites des références bibliographiques détaillées en annexes.

### 5.1. - METHODE

La longueur Z du forage est divisée en un certain nombre d'incréments (choix externe) ; sur chacun d'eux un calcul itératif est effectué afin de satisfaire les 3 équations de conservation. Le programme procède dans le sens de l'écoulement depuis le niveau producteur moyen (ou le toit du réservoir) jusqu'à la tête de puits. Il est donc nécessaire de connaître ou de supposer au préalable les conditions de fond :

- . température,  $T_R$
- . pression,  $P_R$
- . coefficient de rabattement, C
- . débit massique total, M.

Le programme tient compte également des variations de diamètre, et il est possible de fournir une valeur du coefficient de frottement  $f_L$  par tronçon ainsi défini.

Les paramètres thermodynamiques instantanés du fluide sont obtenus à partir de la température ou de la pression, par interpolation dans les tables stockées en mémoire.

Chaque corrélation empirique est traitée par un module séparé que l'on choisit à l'aide d'un code d'entrée.

Pour chaque valeur calculée de la pression, le modèle contrôle l'apparition des conditions critiques et, dans ce cas, s'interrompt après impression de celles-ci.

Dans sa version actuelle, le modèle possède dans ses tables les paramètres thermodynamiques de l'eau pure ; mais tout autre jeu de paramètres fonction de la salinité peut être introduit.

### 5.2. - ORGANIGRAMME SIMPLIFIE

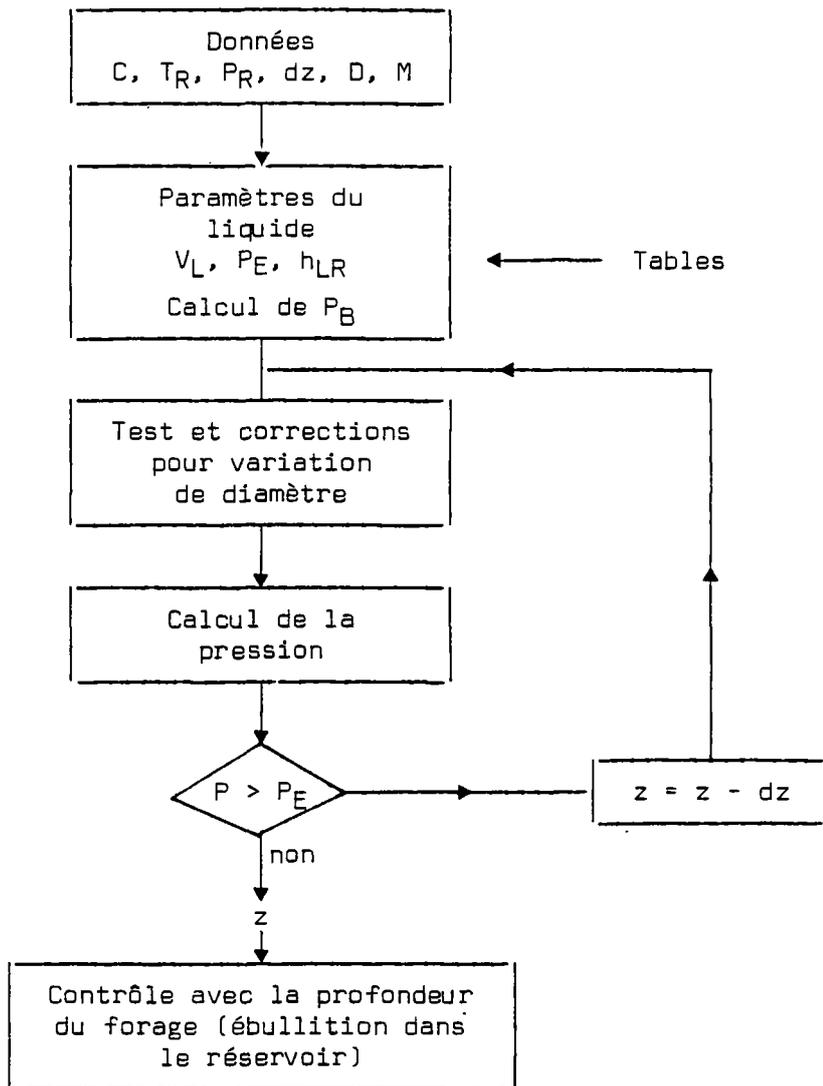
La procédure se décompose en deux parties correspondant à chacune des zones, monophasique et diphasique :

- . partie incrémentale (sur  $z$ ) fournissant la cote d'ébullition,
- . partie incrémentale et itérative au-dessus de cette dernière.

#### a) *Calcul en zone monophasique*

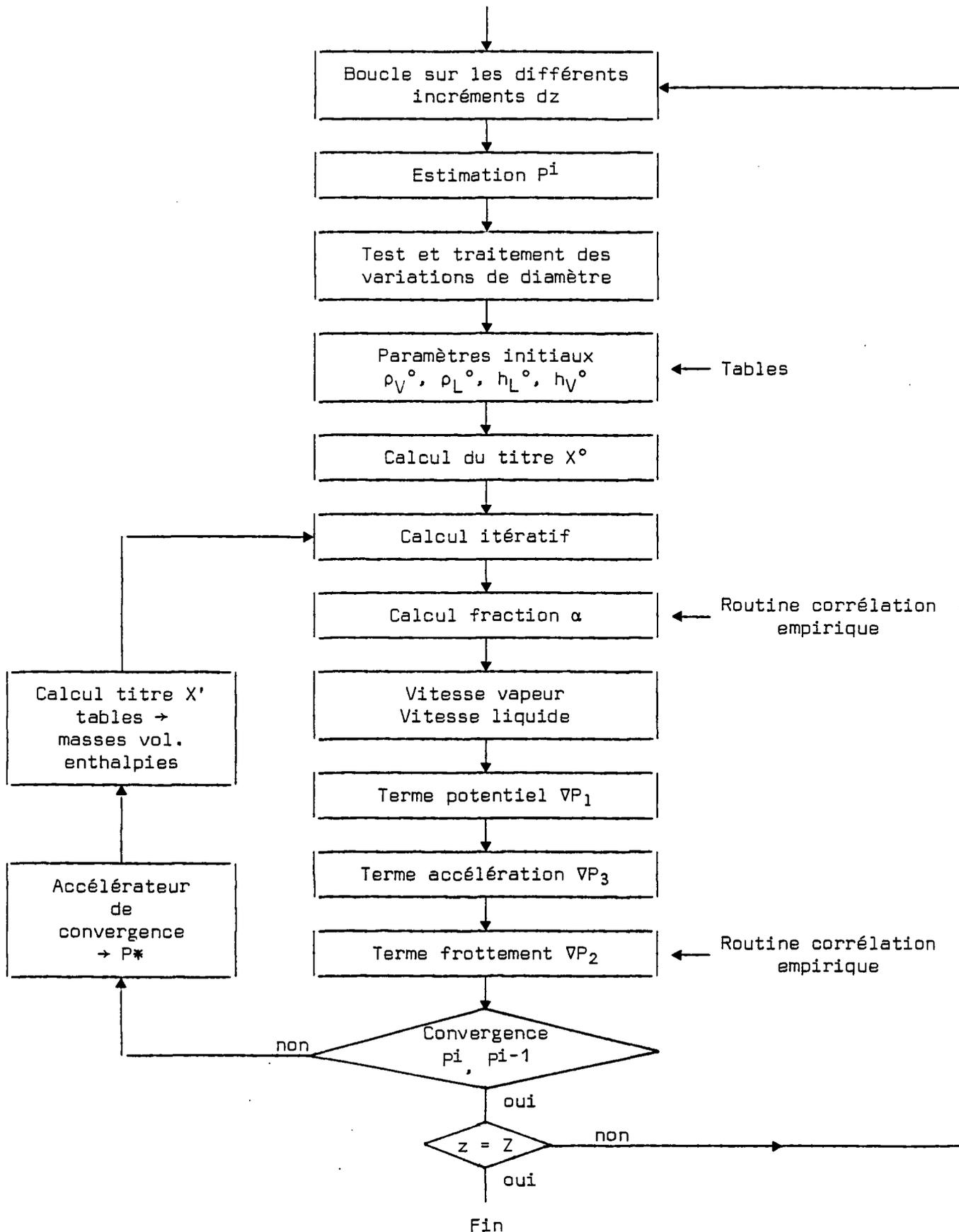
.....

Le calcul est effectué selon l'organigramme suivant :



b) Calcul en zone diphasique

La procédure générale est définie comme suit :



La durée d'exécution complète du processus numérique, sur un micro-ordinateur classique (type Zilog MCZ 1/05) est de l'ordre de 5 à 15 mn selon le nombre de pas d'espace dz.

### 5.3. - DONNEES A FOURNIR

Les données nécessaires sont de trois types :

- . géométrie de forage : nombre de tronçons et pour chacun d'eux,  $f_L$ , profondeur, diamètre ; profondeur du toit ou du niveau producteur moyen ;
- . paramètres de fond : température  $T_R$ , pression statique  $P_R$ , coefficient de rabattement C ;
- . relation empirique choisie pour la détermination de  $\alpha$  et  $\nabla P_2$ .

## 6 - EXEMPLES D'APPLICATION

Les deux premiers exemples traités, respectivement MESA 6-1 (Californie) et WAIRAKEI 27 (Nouvelle Zélande), sont destinés à vérifier les résultats du modèle numérique, sur le plan des ordres de grandeur. La littérature fournit en effet pour ces deux forages : les données physiques principales, les résultats de quelques essais et enfin les résultats de modélisation dûs à divers auteurs. Bien que les relations empiriques utilisées ici ne soient pas systématiquement celles retenues par les auteurs des références, la comparaison des résultats permet de faire une première sélection quant aux différentes expressions détaillée en annexe 9.2.

Le dernier exemple est plus intéressant sur le plan pratique car il concerne le forage Asal 1 (République de Djibouti) sur lequel le BRGM a pratiqué divers tests de courte et moyenne durée, au cours des années 1975, 1980 et 1981. On dispose dans ce cas d'un grand nombre de données (surface, log, géochimie) suffisamment redondantes pour tester les capacités du modèle et tenter d'en déduire le comportement physique du forage.

### 6.1. - MESA 6-1, IMPERIAL VALLEY, CALIFORNIE

Le forage MESA 6-1 est le premier puits implanté en 1972 dans ce champ (bassin sédimentaire étendu, avec un flux géothermique élevé). Il s'agit d'un exemple de forage profond captant un réservoir à température plutôt faible, dans le cadre de la haute énergie.

#### 6.1.1. - Données techniques d'après la littérature (T.L. GOULD, K.E. MATHIAS...)

. diamètre externe casing	20"	13 3/8	9 5/8	7"
. profondeur (m)	0-116	0-763	0-2223	2213-2443
. intervalle crépiné (m)				2238-2433
. intervalle perforé ultérieur (m)			2075-2179	
. perméabilité (mD)			230	1.5
. salinité totale (TDS) = 25 g/l				
. température $T_R$ = 198-204 C				

#### 6.1.2. - Données pour le calcul

Le débit étant assez mal connu, nous admettrons pour le calcul une valeur moyenne de 5 kg/s. La pression de fond en débit sera prise égale à 92 b.a afin de comparer les résultats avec le calcul de Nathenson, correspondant à une décharge à l'atmosphère ( $P_T = 1$  b.a).

Le coefficient de frottement moyen est de l'ordre de 0.01. La faible valeur de la température du fluide capté, soit 198°C, conduit à une pression d'ébullition basse (15 bars). La chute de pression totale en zone diphasique est ainsi particulièrement faible (de l'ordre de 14 bars pour une longueur de 1 200 m).

#### 6.1.3. - Résultats du calcul

Les profils de pression et de température, comparés aux mesures, sont représentés à la figure 5.

La profondeur d'ébullition est trouvée à 1 226 m (mesure : 1 200 m). La température obtenue en tête est de l'ordre de 100°C, et avec les hypothèses utilisées, les conditions critiques (vitesse maximale de la phase vapeur) sont atteintes à l'intérieur du forage vers 150 m de profondeur.

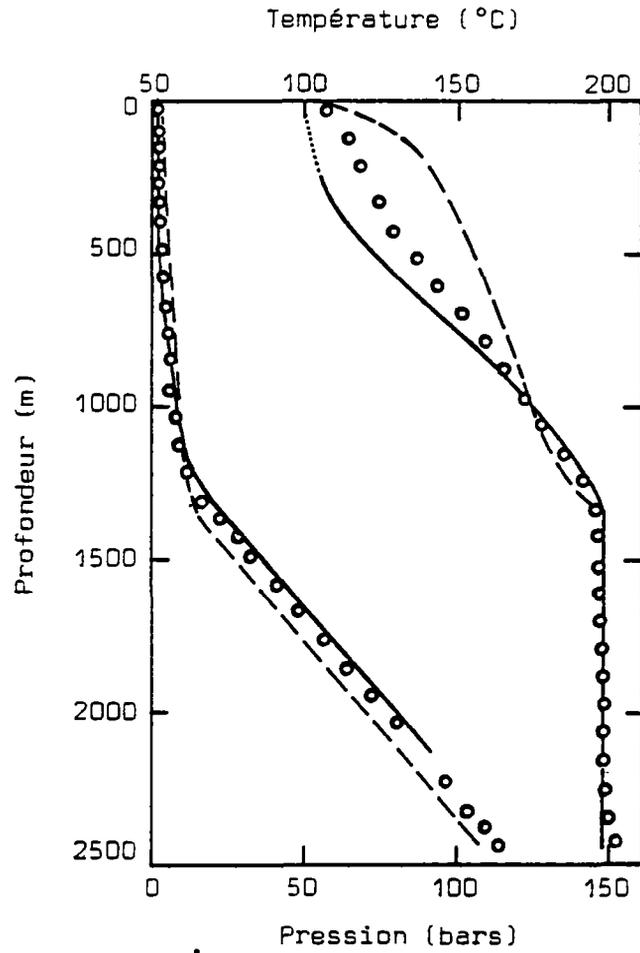


Figure 5 - Exemple MESA 6-1, Imperial Valley, Californie  
Profils de pression et de température

- modèle numérique
- - - résultats modèle Nathenson
- o o o o mesures

Ce premier calcul montre que dans ce cas, caractérisé par une basse température et un faible débit, les relations empiriques et les hypothèses de calcul sont mal adaptées au régime d'écoulement :

- . les travaux de Gould montrent en effet que les échanges thermiques aux parois ont une influence non négligeable dans ce cas ;
- . en général, l'hypothèse du comportement adiabatique (cas du modèle présenté ici) conduit à une augmentation de la teneur en vapeur lorsque l'on se rapproche de la tête de puits. Si la pression locale est connue, le titre maximum peut alors être déduit à partir du diagramme de Mollier ;
- . en présence de pertes thermiques importantes par rapport au flux convectif global, une condensation du mélange peut intervenir, bien que la pression diminue. On peut ainsi observer une variation inverse du titre en vapeur, et éventuellement une production de liquide seul en surface.

L'étude du comportement d'un tel forage nécessite donc une attention particulière au niveau de la représentation du régime d'écoulement (autres relations empiriques) ainsi que la prise en compte des échanges thermiques aux parois.

## 6.2. - WAIRAKEI 27, NOUVELLE ZELANDE

Le forage 27, dont les premiers résultats ont été obtenus en 1957, est un puits peu profond, produisant à partir d'un réservoir fracturé à température élevée. Les données expérimentales constituent un bon exemple pour mettre en évidence l'influence importante des dépôts chimiques en cours d'exploitation. D'après les résultats publiés, le "nettoyage" effectué en 1958 a permis une augmentation du débit d'environ 74 kg/s en 1957 jusqu'à 126 kg/s en 1959. Il s'agit donc d'un forage à production élevée.

### 6.2.1. - Données techniques d'après la littérature (M. NATHESON, 1974, J.H. SMITH, 1958...)

- . Température :  $T_R = 257$  C
- . Pression :  $P_R = 54.5$  b.a.
- . Perméabilité :  $K = 120$  D
- . Hauteur productive :  $L = 1$  m
- . Profondeur :  $Z = 610$  m
- . Diamètre interne :  $D = 0.204$  m (casing)  
 $D = 0.148$  m (slotted liner)
- . Rugosité relative :  $5 \cdot 10^{-4}$  (moyenne casing-slotted liner)
- . Viscosité du fluide :  $\mu = 0.104$  cp
- . On dispose également de 3 logs de température expérimentaux correspondant aux débits de 44, 55 et 60 kg/s (figures 6, 7, 8).

### 6.2.2. - Données pour la modélisation

- . A l'aide de la relation (37), le calcul du coefficient de rabattement est immédiat, on constatera que celui-ci est très faible, en sorte qu'il sera admis :

$$P_R = P_B = 54.5 \text{ b.a.} \quad \text{et} \quad T_R = 257 \text{ C.}$$

- . Le forage est divisé géométriquement en deux tronçons :

Casing	0-425 m	$D = 0.204$ m
Slotted liner	425-610 m	$D = 0.148$ m

- . En calculant un nombre de Reynolds moyen  $Re$  de  $0.4 \cdot 10^7$  et la valeur de la rugosité ci-dessus, il vient :

$$f = 0.017 \# 0.02 \quad \text{(abaque de Moody)}$$

### 6.2.3. - Résultats du calcul

Les profils de température calculés avec cette dernière hypothèse sont représentés aux figurés 6, 7 et 8 (courbes en tiretés). On constate que la comparaison avec les mesures est bonne jusqu'au sabot du casing, ainsi que pour la valeur de la pression en tête et de la température correspondante.

D'importants dépôts ont été constatés sur environ 40 m au-dessus du sabot, réduisant de manière significative la section d'écoulement (Gould, 1974). Il en résulte une détente brusque du fluide, d'où la chute de température visible sur les logs, et une augmentation du coefficient de frottement.

Dans la simulation (courbes en trait plein) ce phénomène global a été traduit par une forte augmentation du coefficient de frottement sur le tronçon 350-400 m. La valeur  $f_L$  notée sur les graphiques est une moyenne pondérée sur la hauteur totale, très peu différente de la valeur initiale déduite des mesures.

Les courbes en trait plein représentent le meilleur ajustement avec les résultats expérimentaux. On notera que dans ce cas, le débit étant suffisamment important, l'introduction des pertes thermiques aux parois n'est pas nécessaire.

On constate ainsi sur cet exemple que la procédure de calibration optimale par modèle numérique est conditionnée par deux contraintes principales :

- . l'aptitude du modèle à traduire une discrétisation des paramètres (diamètres, coefficients de frottement) par tronçon ;
- . la définition d'hypothèses ou de scénarios physiques à envisager à la lumière de toutes les observations expérimentales disponibles (physiques, géologiques, géochimiques, etc...).

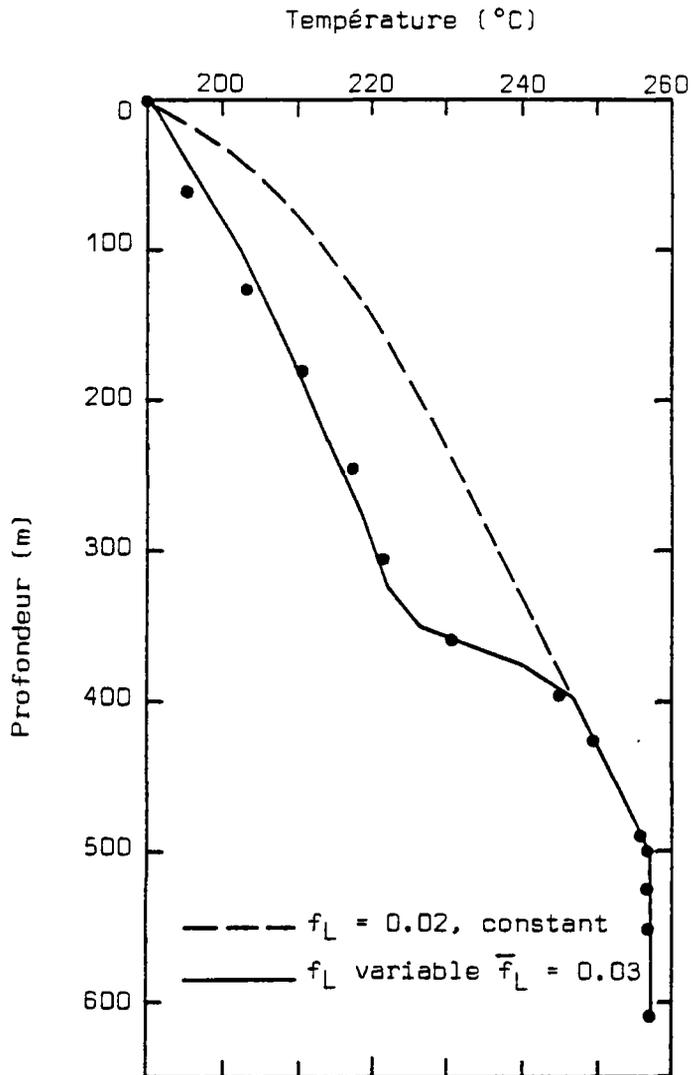


Figure 6 - Exemple WAIRAKEI 27, Nouvelle Zélande  
 Comparaison mesures-simulation ;  $M = 60 \text{ kg/s}$

	Mesures	Modèle		
M	60	60	kg/s	Données
$T_R$	257	257	C	
$P_T$	12.38	12.50	b.a	Résultats
$T_T$	190.2	189.9	C	
$X_T$	0.139	0.155		
$P_{325 \text{ m}}$	25.82	24.90	b.a	

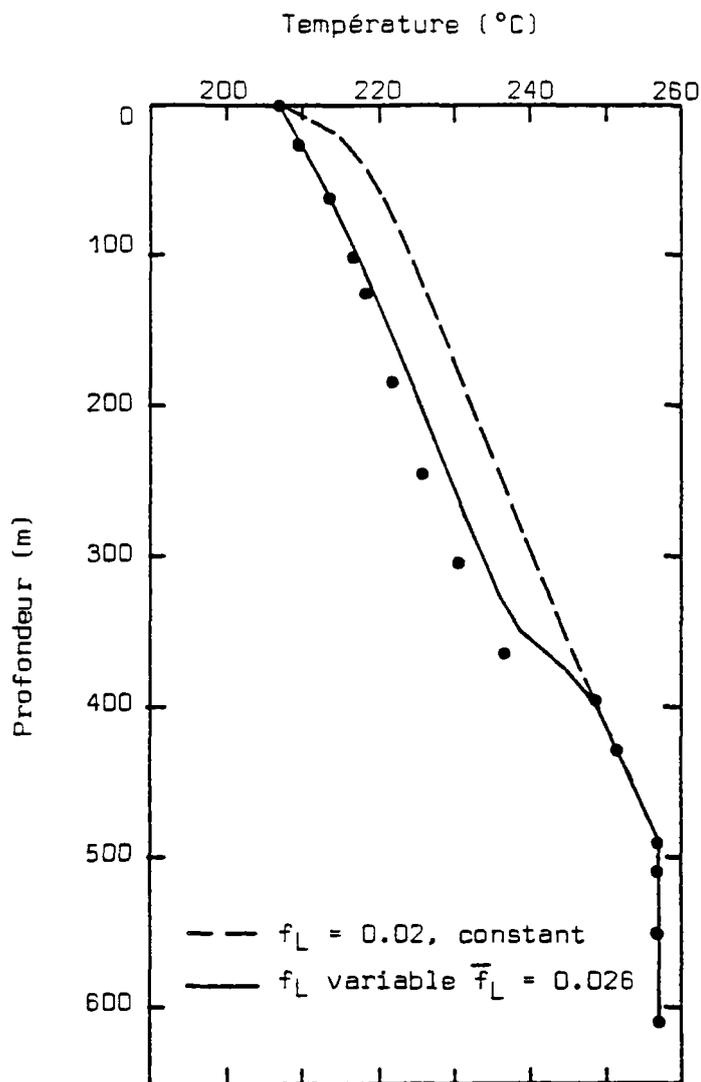


Figure 7 - Exemple WAIRAKEI 27, Nouvelle Zélande  
 Comparaison mesures-simulation ;  $M = 55$  kg/s

	Mesures	Modèle		
M	55	55	kg/s	Données
$T_R$	257	257	C	
$P_T$	17.89	17.97	b.a	Résultats
$T_T$	207.0	207.1	C	
$X_T$	0.104	0.120		
$P_{325\text{ m}}$	29.27	31.00	b.a	

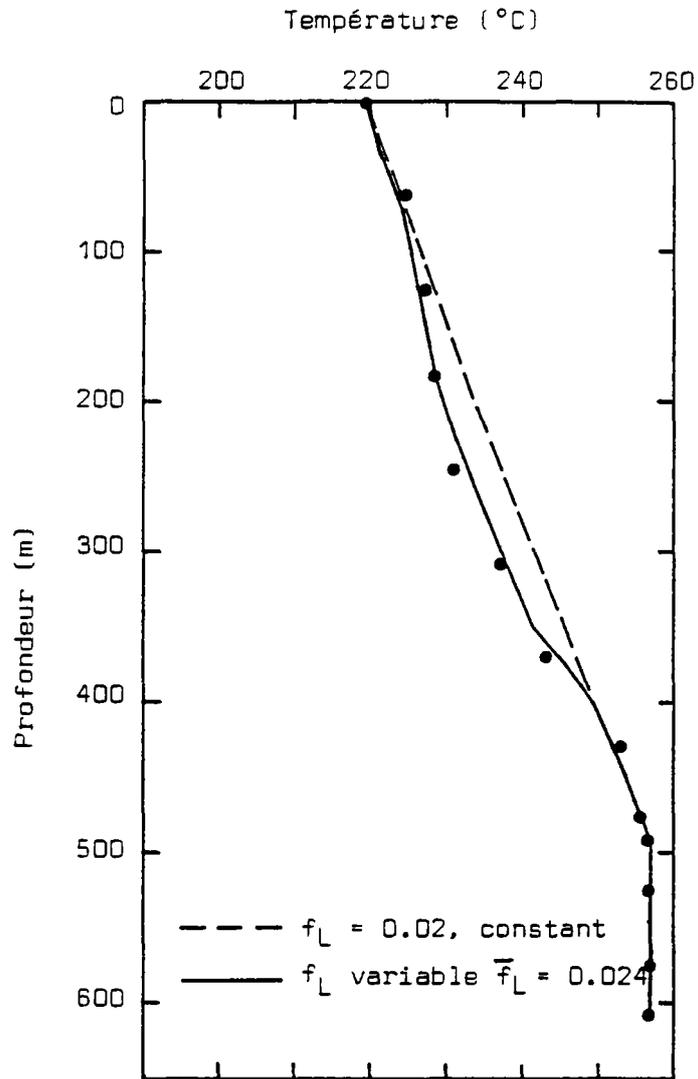


Figure 8 - Exemple WAIRAKEI 27, Nouvelle Zélande  
 Comparaison mesures-simulation ;  $M = 44$  kg/s

	Mesures ●	Modèle —		
M	44	44	kg/s	Données
$T_R$	257	257	C	
$P_T$	23.06	22.71	b.a	Résultats
$T_T$	219.5	218.9	C	
$X_T$	0.076	0.095		
$P_{325\text{ m}}$	33.41	33.00	b.a	

### 6.3. - ASAL 1, REPUBLIQUE DE DJIBOUTI

Le forage Asal 1 est un ouvrage d'exploration du champ, réalisé en 1975. Une première série de tests de production de courte durée, avec enregistrement des paramètres de fond, a été réalisée en 1975. En 1980, différents tests de contrôle ont été pratiqués afin d'estimer l'incidence de l'activité sismo-volcanique récente sur les caractéristiques de production. Enfin, durant l'année 1981, la productivité de l'ouvrage a été testée par la mise en oeuvre d'un essai de longue durée à différents débits (contrat ONU).

Comme dans le cas précédent, cet exemple constitue une illustration de ce que peuvent induire, sur le plan pratique, les phénomènes de dépôts chimiques. La cinétique des dépôts, apparemment classique compte tenu de la valeur de la salinité, s'est probablement trouvée simplifiée dans ce cas par l'apparition d'un phénomène extérieur (refroidissement violent de la tête de puits consécutif à une période de pluies torrentielles) remplissant les fonctions de "catalyseur".

#### 6.3.1. - Données techniques

- . La géométrie du forage (reprise pour la modélisation) est extraite du rapport de sondage ; elle est définie par les données suivantes :
  - \* de 1 127 m à 983 m diamètre 6", trou nu
  - \* de 983 m à 651 m diamètre 8" 1/2, trou nu
  - \* de 651 m à 297 m diamètre 7", casing
  - \* de 297 m à 80 m diamètres 2"-7", annulaire casing-tubing d'air lift
  - \* de 80 m à la surface, même annulaire avec diverses causes de restriction (collapse, dépôts). Ce tronçon sera caractérisé par la suite par un diamètre d'écoulement équivalent variable : d.eq.
  
- . Niveau producteur moyen considéré : 1 000 m
  
- . Température du fluide  $T_R = 255-260^\circ\text{C}$
  
- . L'essai de longue durée est décomposé en différentes phases consécutives, définies par le diamètre du diaphragme et du tube de décharge.
  
- . Le débit correspondant est évalué à partir de la pression mesurée à l'extrémité de ce dernier tube (pression critique de James), et du débit mesuré au déversoir situé en sortie du système séparateur-silencieux.

. L'évolution des paramètres de surface au cours du temps est représentée graphiquement aux figures 9, 10, 11 :

- \* figure 9 : évolution du débit massique total
- \* figure 10 : évolution de l'enthalpie de décharge du fluide
- \* figure 11 : évolution de la pression en tête.

. Le programme initial provoyait un essai à débit croissant, d'où la séquence des diamètres de décharge : 2", 3", 4", 5" et 6". L'examen des graphiques précédents montre une augmentation du débit durant les 3 premières phases, puis une décroissance continue de celui-ci. La cause en est attribuée au dépôt chimique progressif, et c'est précisément l'incidence de la réduction de la section d'écoulement qui va constituer l'idée directrice de l'approche présentée dans les pages suivantes. On notera, à l'appui de cette hypothèse, que l'inspection finale au terme des essais a montré une variation du diamètre supérieur d'environ 150 mm au début des essais à 103 mm après 3 mois de production, soit une variation de la section d'environ 53 %.

### 6.3.2. - Données pour la modélisation

Au plan de la géométrie, on retiendra les caractéristiques réelles (§ 6.3.1).

Les paramètres hydrodynamiques du réservoir sont issus des tests de production de courte durée (1975), soit principalement :

- . transmissivité intrinsèque : 16 D.m
- . température  $T_R = 253-260^\circ\text{C}$
- . pression statique  $P_R \# 77 \text{ kg/cm}^2 \text{ (atm)}$
- . d'où une valeur du coefficient de rabattement  $C = 0.95 \text{ atm.s/kg.}$

Afin de cerner au mieux l'évolution de la phénoménologie et du comportement du forage en production, on examinera successivement l'incidence des divers autres paramètres :

- . température de fond  $T_R$  (253 C, 255 C, 260 C)
- . diamètre de la partie supérieure du forage ( $0.12 < d_{eq} < 0.170 \text{ m}$ )
- . coefficient de frottement ( $0.01 < f < 0.05$ )

### 6.3.3. - Profondeur du point d'ébullition (flash level)

Comme ce paramètre est peu sensible à la valeur du coefficient de frottement, une valeur constante de 0.01 est utilisée.

Les courbes théoriques et les points expérimentaux sont comparés à la figure 12, en fonction du débit, et pour diverses valeurs de la température de fond TBH.

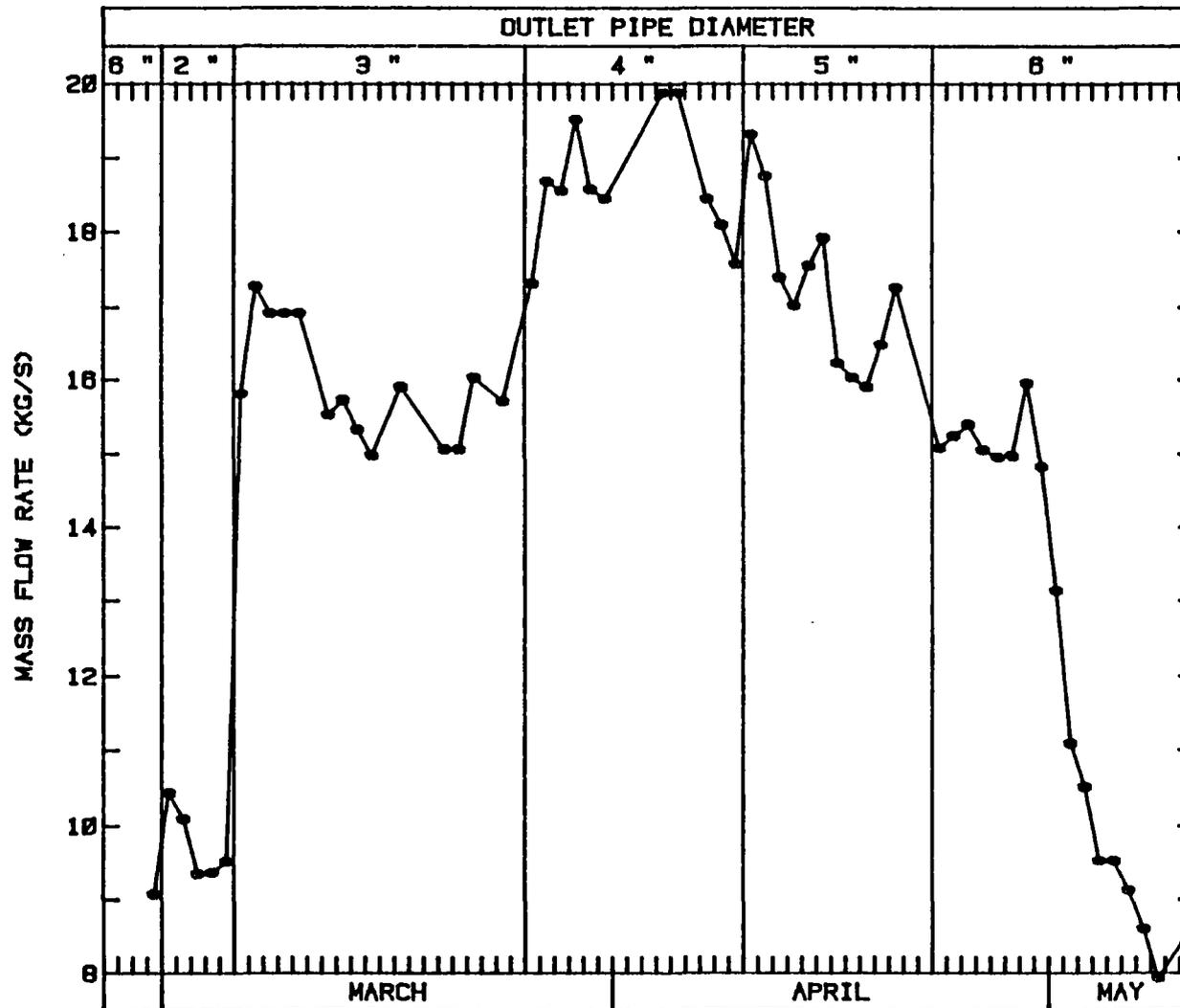


Figure 9 - MASS FLOW RATE VERSUS PRODUCTION TIME

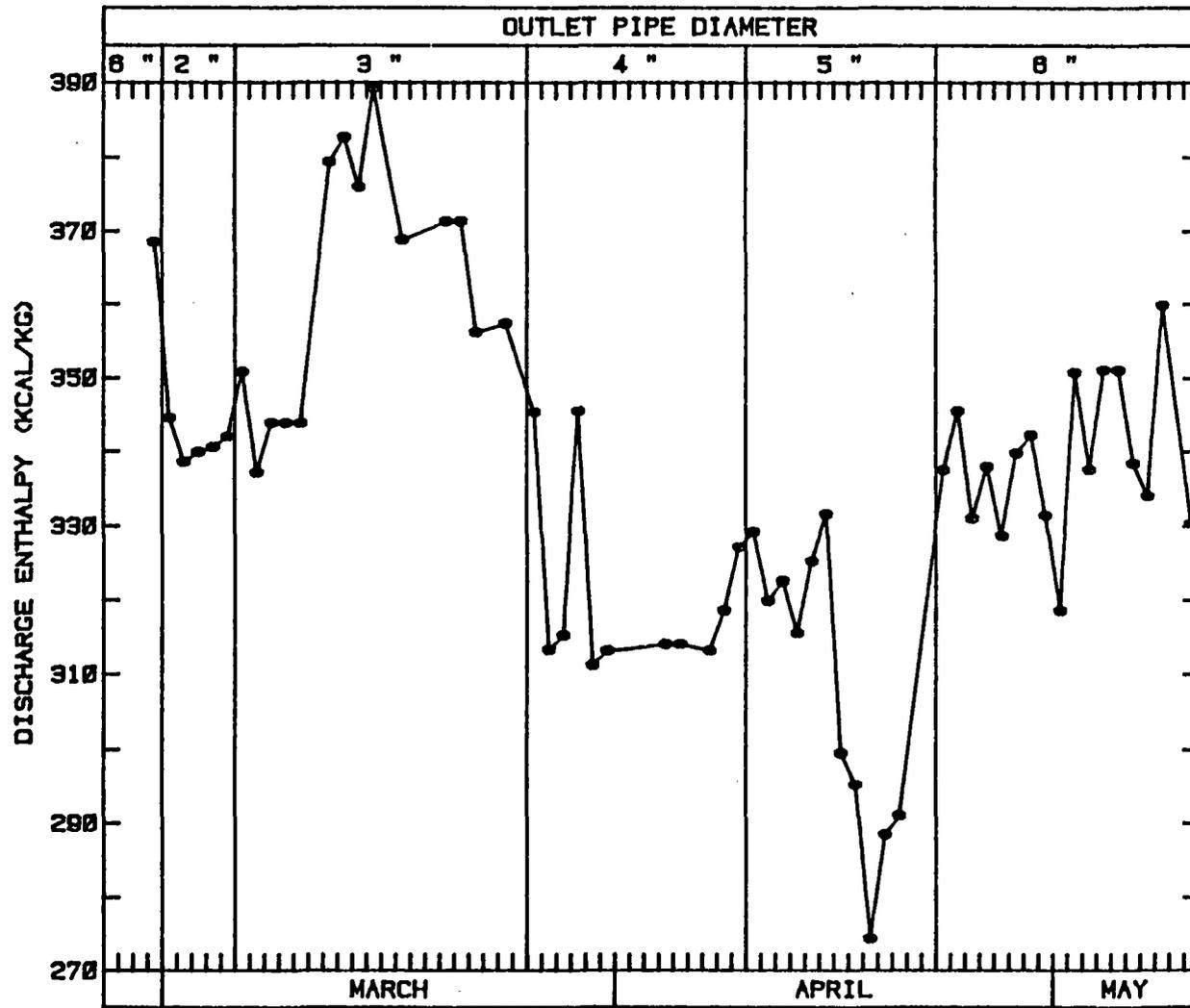


Figure 10 - DISCHARGE ENTHALPY VERSUS PRODUCTION TIME

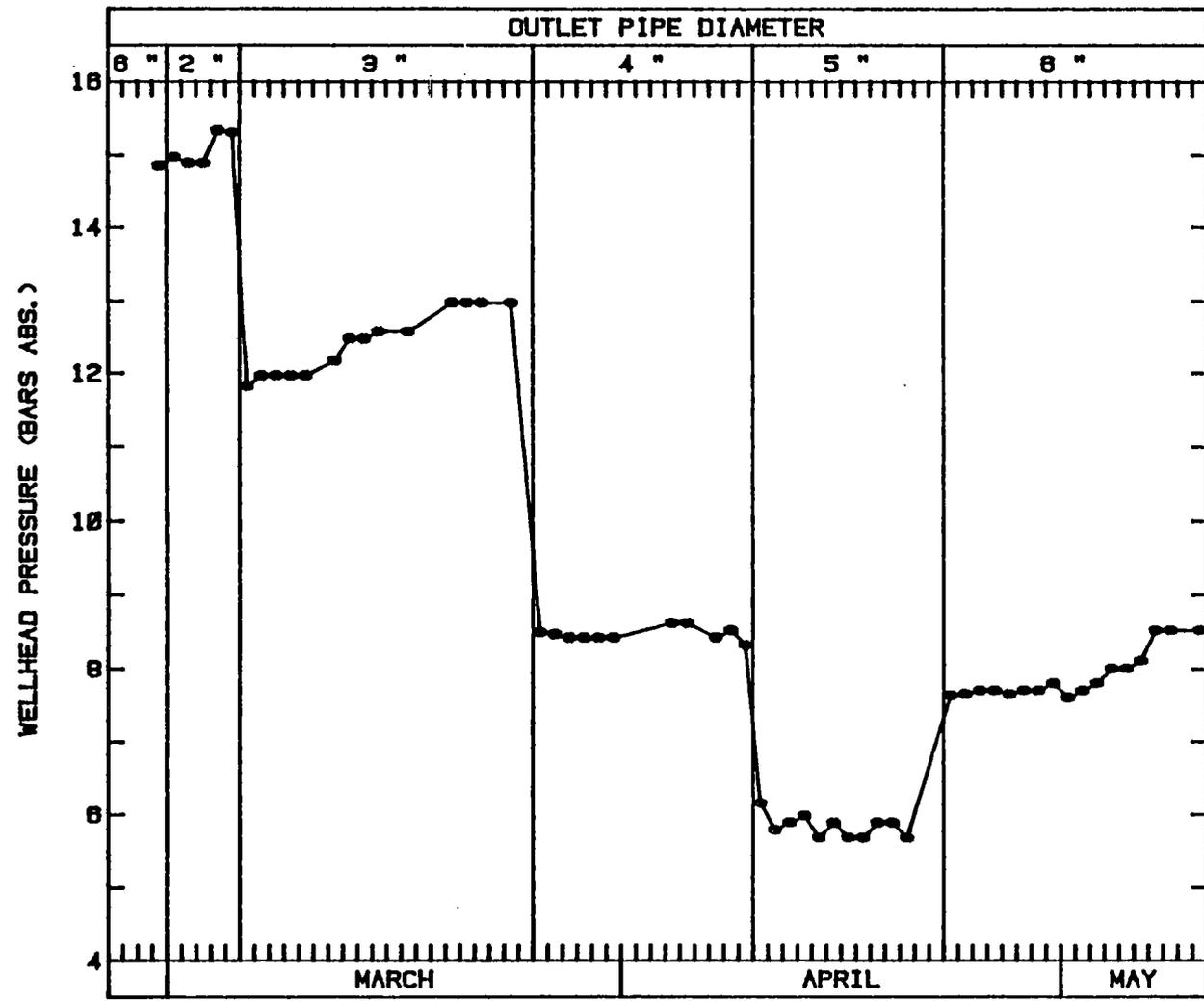


Figure 11- WELLHEAD PRESSURE VERSUS PRODUCTION TIME

On notera que la pente de ces courbes est assez faible, en sorte qu'elles ne constituent pas une méthode de détermination du débit suffisamment précise, lorsque la profondeur d'ébullition est connue.

6.3.4. - Caractéristiques de production en tête

Température en tête de puits (figures 12 et 13)

La variation de la température de tête en fonction du débit est similaire, quant à sa forme, à celle de la pression en tête de puits. La dispersion des points expérimentaux autour des courbes théoriques demeure faible (de l'ordre de 10°C) ; ce résultat est satisfaisant si l'on tient compte du fait que la mesure est effectuée à l'intérieur du tubing 2" (entre 0 et 300 m). Un déséquilibre thermique peut subsister entre le mélange comprimé immobile à l'intérieur du tubing et le fluide en écoulement dans l'annulaire.

Autres paramètres en tête de puits (figures 14 à 27)

Les courbes suivantes fournissent les valeurs des autres paramètres : pression, débit, titre, rapport de glissement, en fonction des diverses hypothèses géométriques et physiques résumées dans le tableau suivant :

Tableau II

*Données paramétriques pour  
les différents calculs théoriques*

Facteur de frottement $f_L$	Température de fond $T_R$	Diamètre équivalent (0-80 m)	Référence figure
0.01	253 C	0.12 m	14
0.01	253 C	0.13 m	15
0.01	253 C	0.15 m	16
0.01	255 C	0.12 m	17
0.01	255 C	0.13 m	18
0.01	255 C	0.15 m	19
0.01	255 C	0.17 m	20
0.01	260 C	0.12 m	21
0.01	260 C	0.13 m	22
0.01	260 C	0.15 m	23
0.015	253 C	0.12 m	24
0.02	253 C	0.12 m	25
0.03	253 C	0.12 m	26
0.05	253 C	0.12 m	27

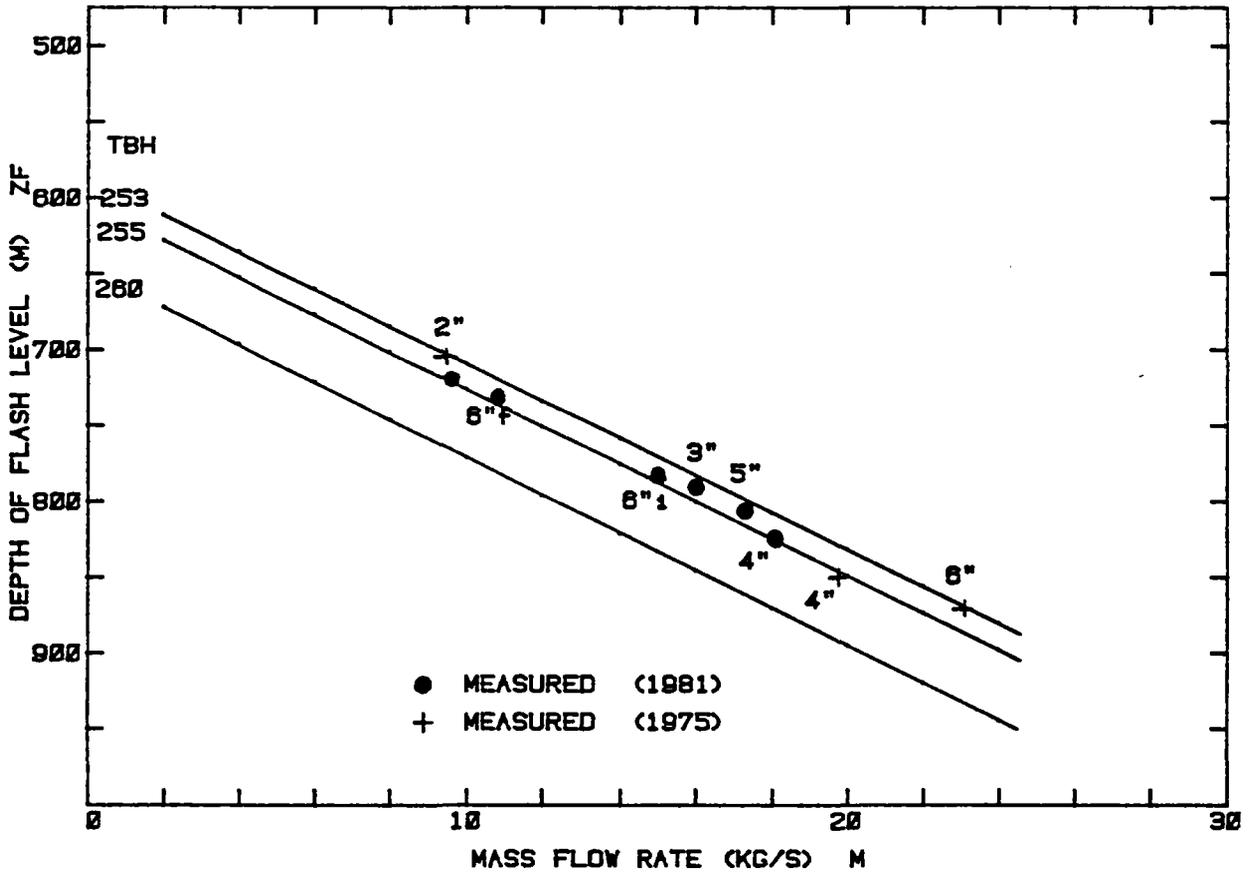
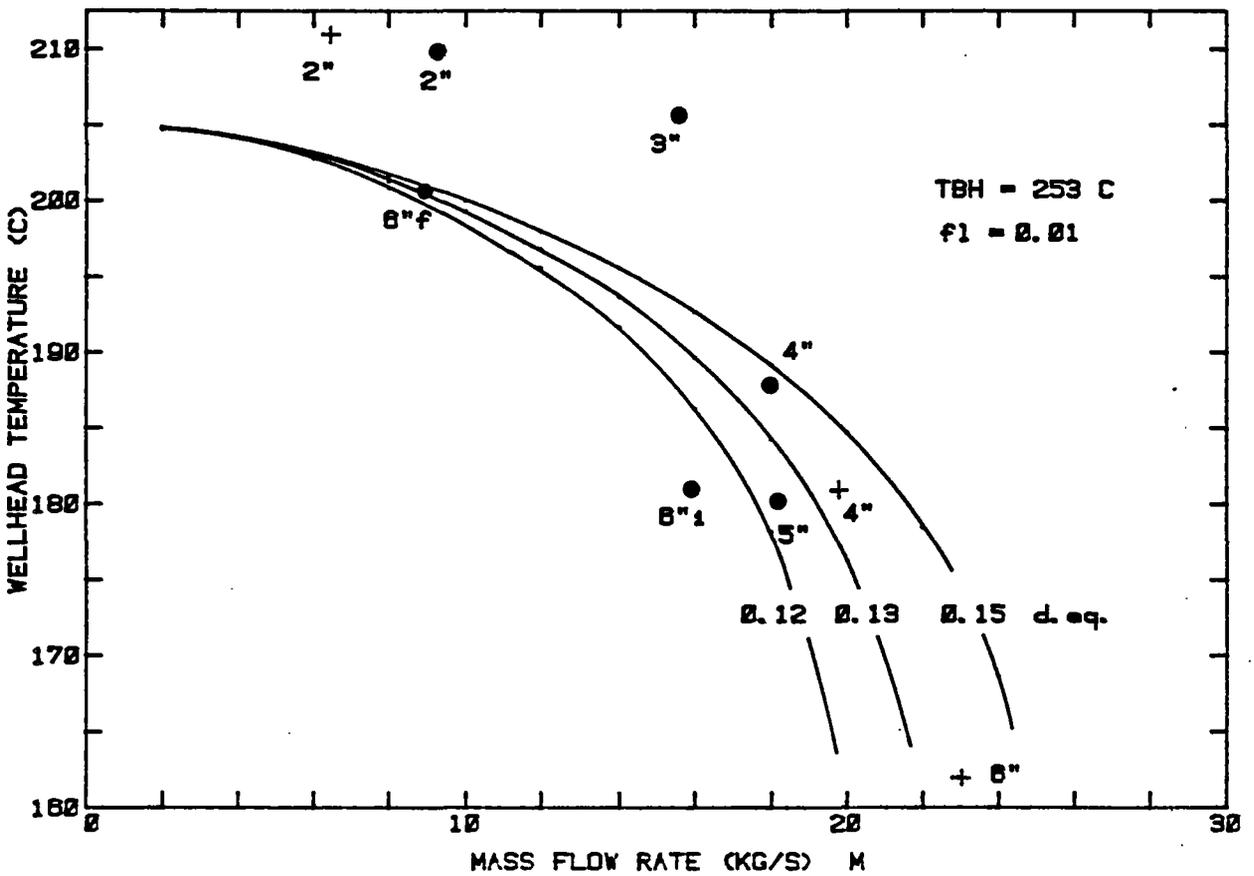


Figure 12 - THEORETICAL RESULTS, DEPTH OF FLASHING AND WELLHEAD TEMPERATURE VERSUS MASS FLOW RATE



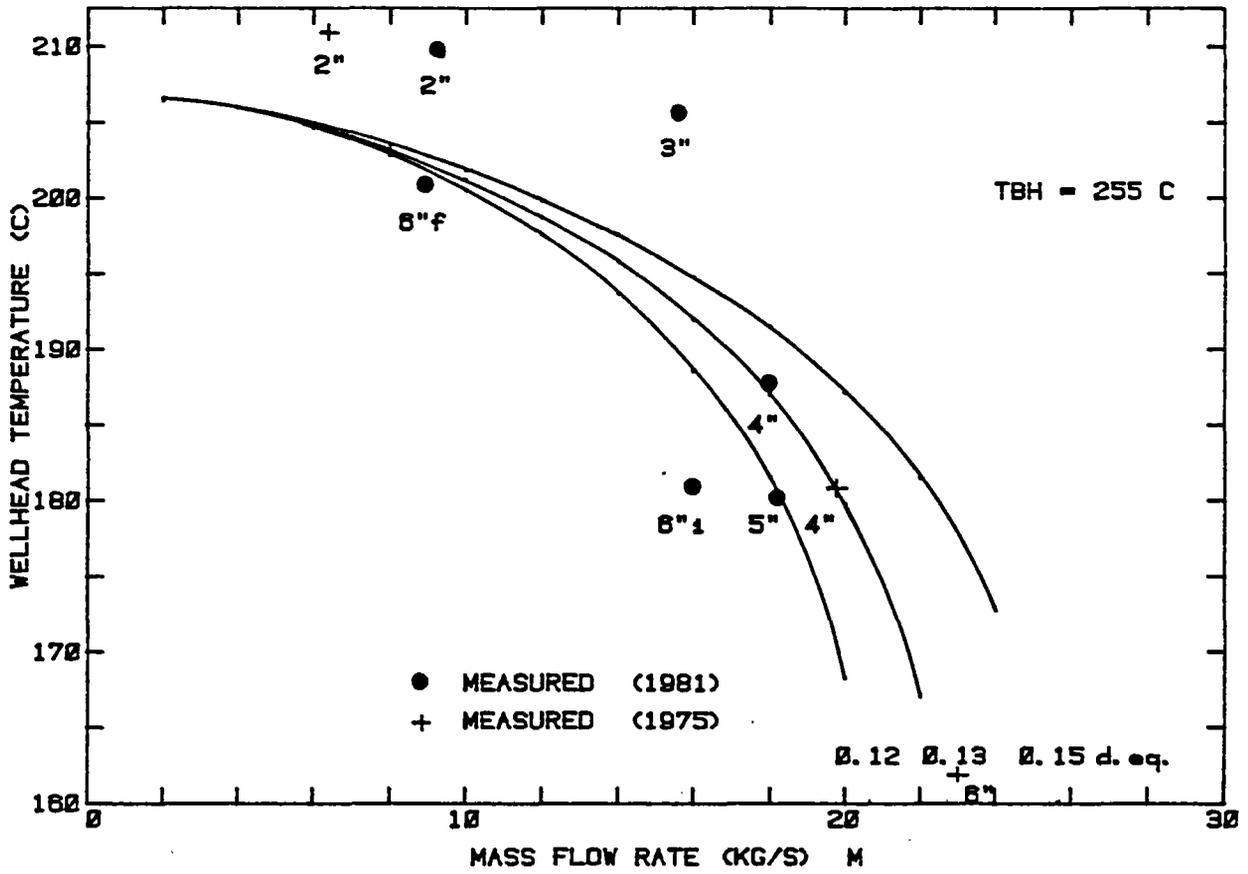
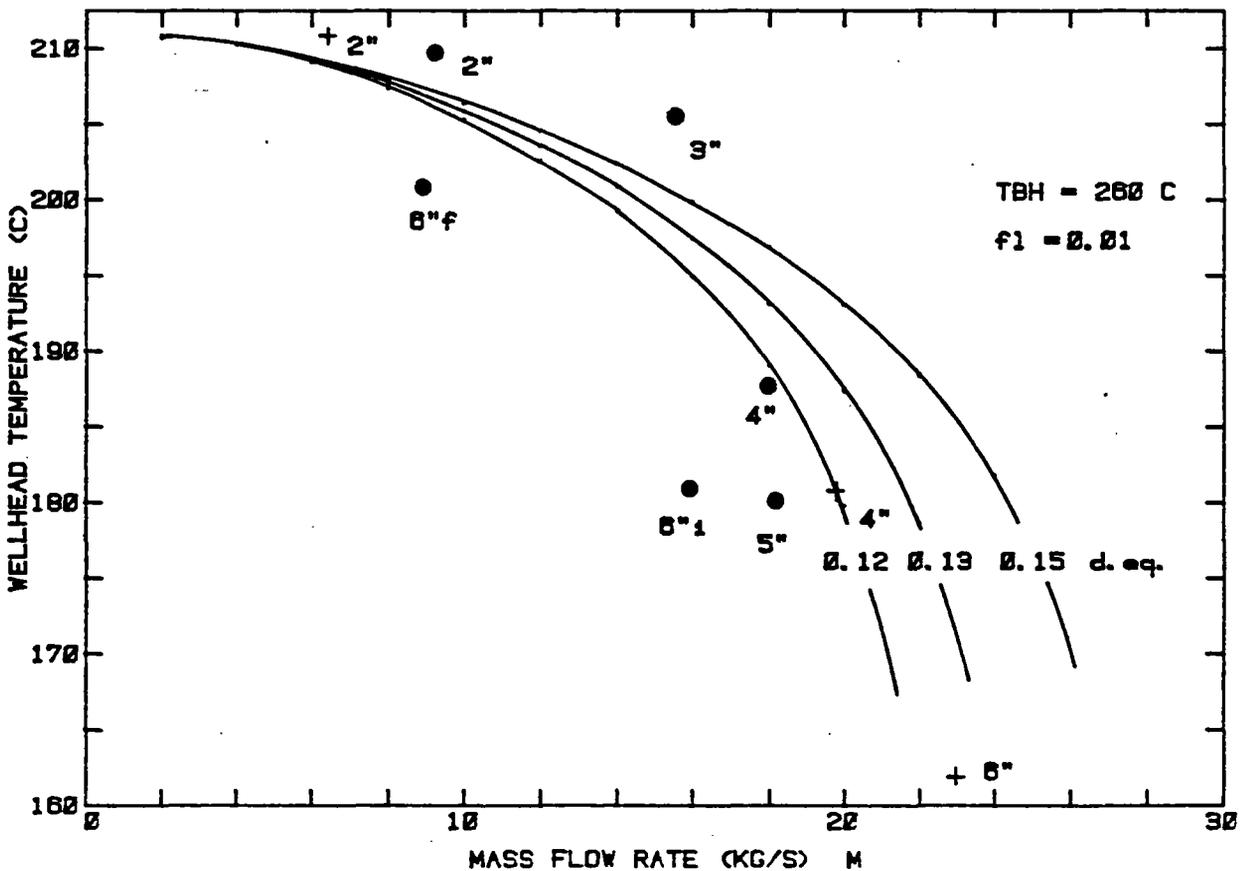


Figure 13 - THEORETICAL RESULTS, INFLUENCE OF TBH WELLHEAD TEMPERATURE VERSUS MASS FLOW RATE



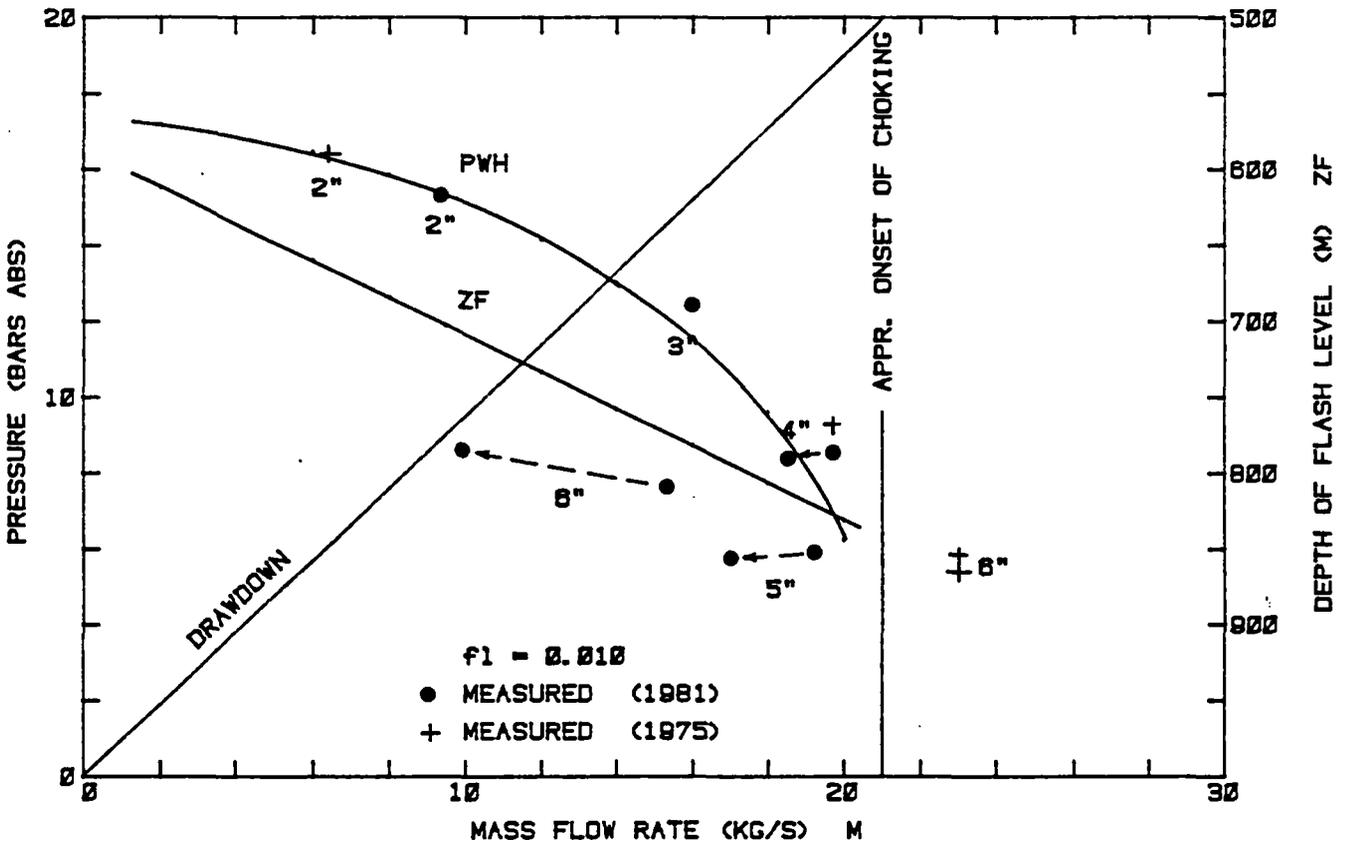
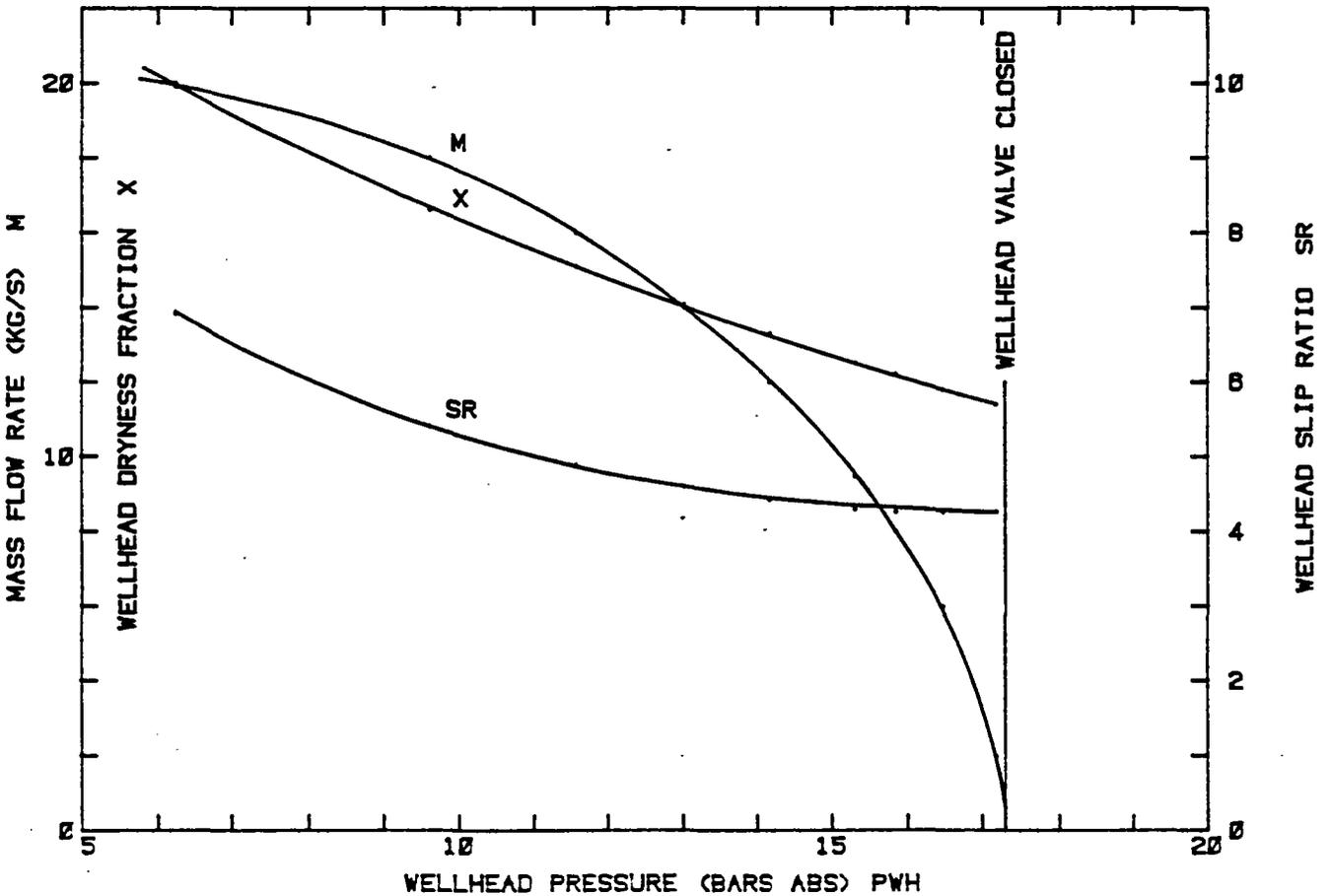


Figure 14 - THEORETICAL RESULTS : MISCELLANEOUS CURVES  
TBH = 253 C ; D.eq. = 0.120 m (Ø to 80 m)



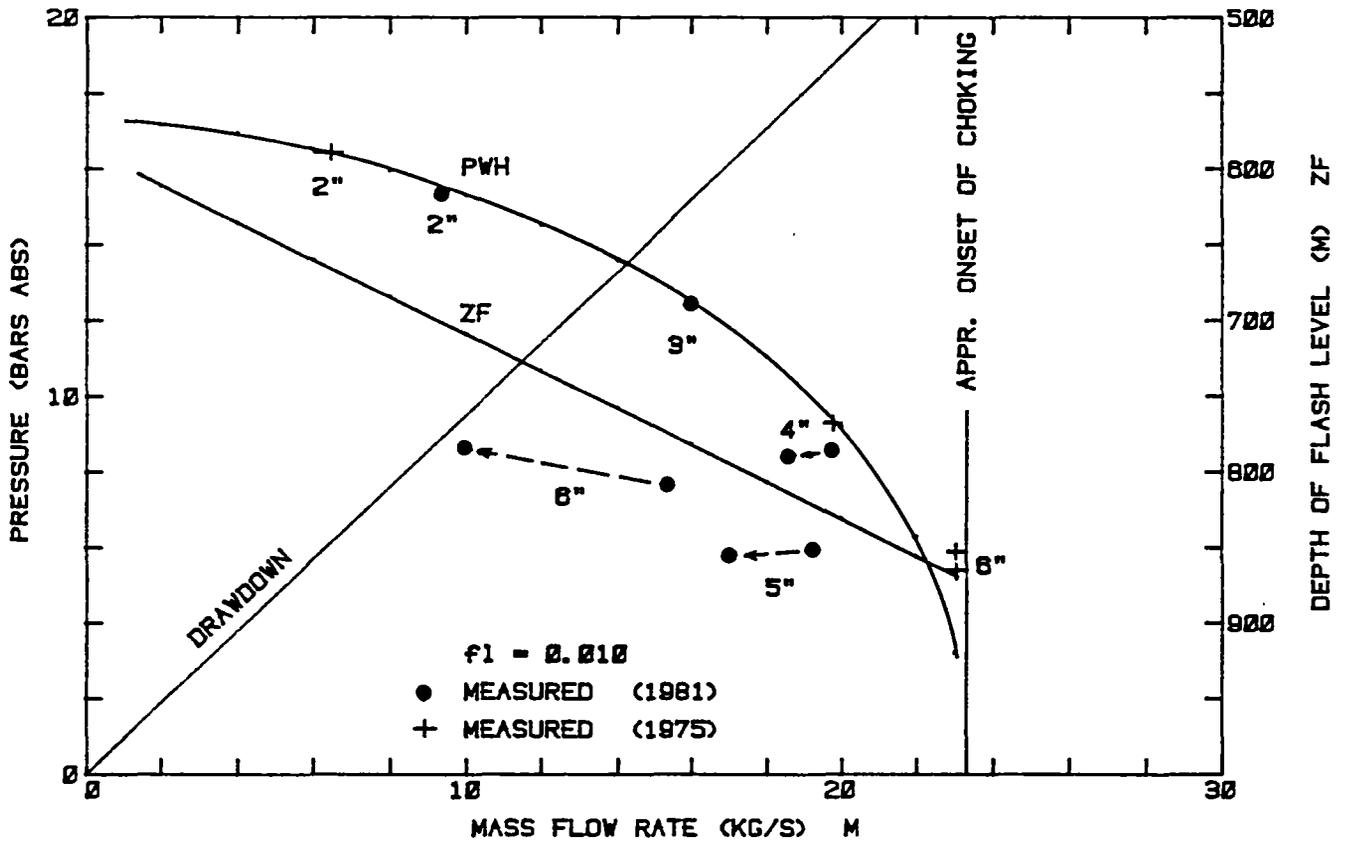
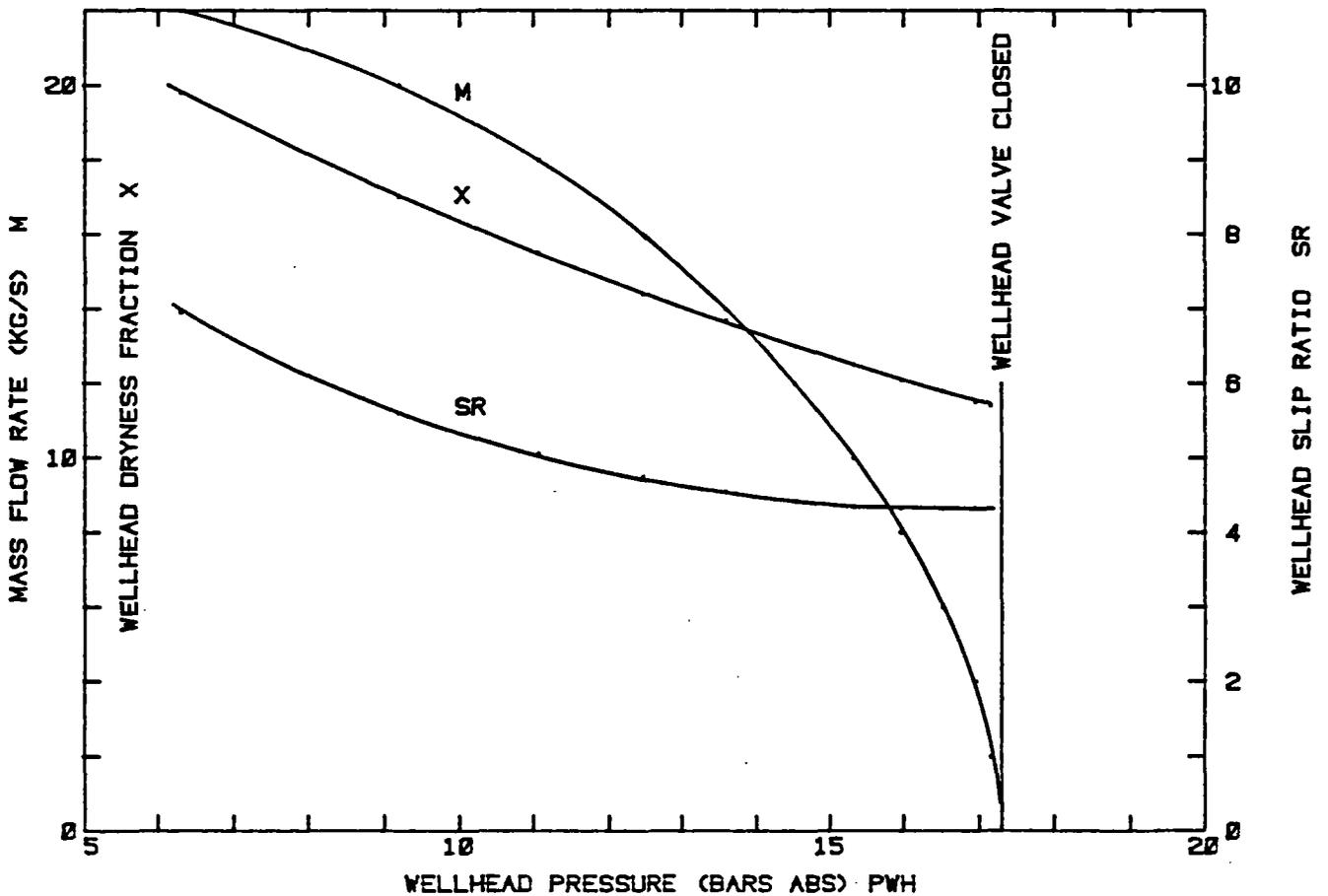


Figure 15 - THEORETICAL RESULTS : MISCELLANEOUS CURVES  
TBH = 253 C ; D. eq. = 0.130 m (0 to 80 m)



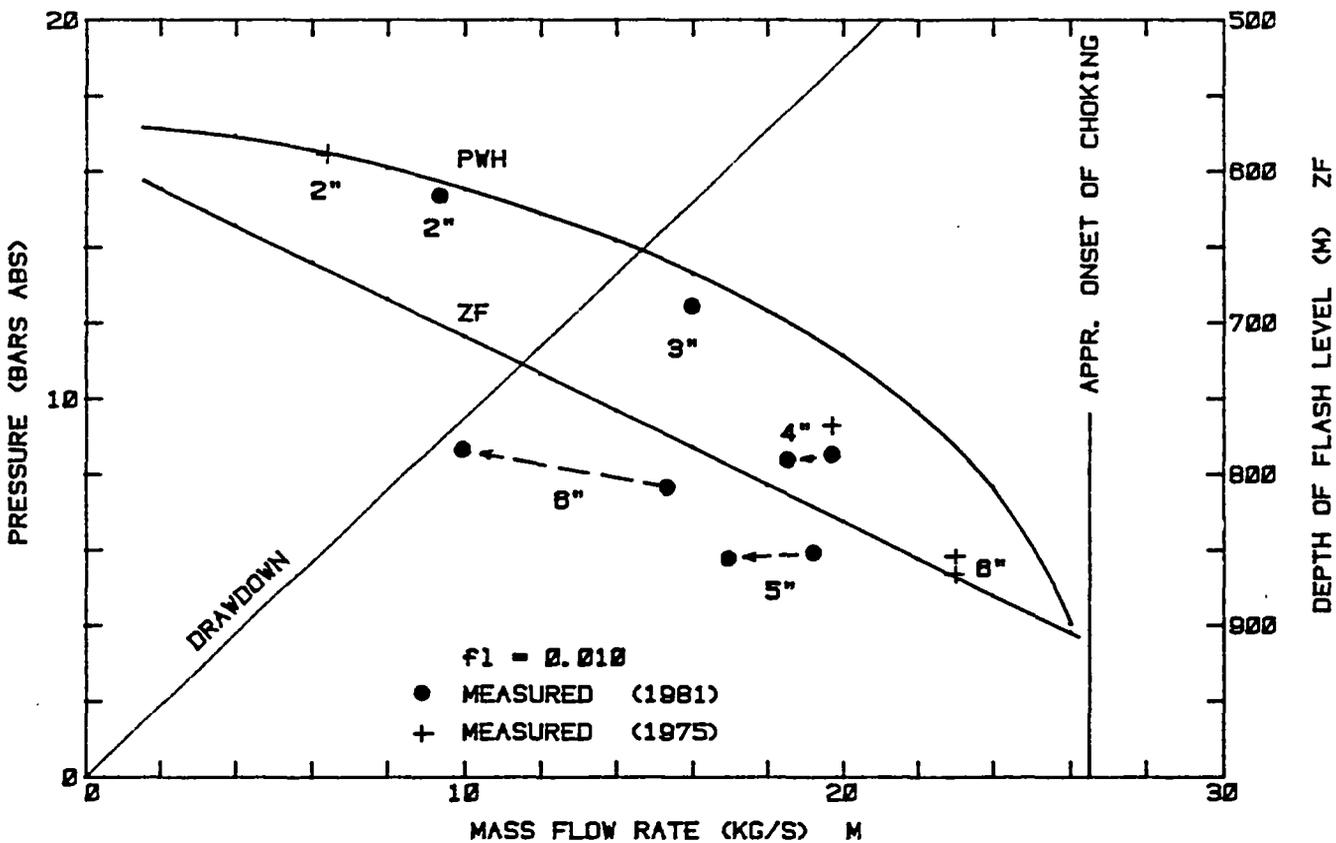
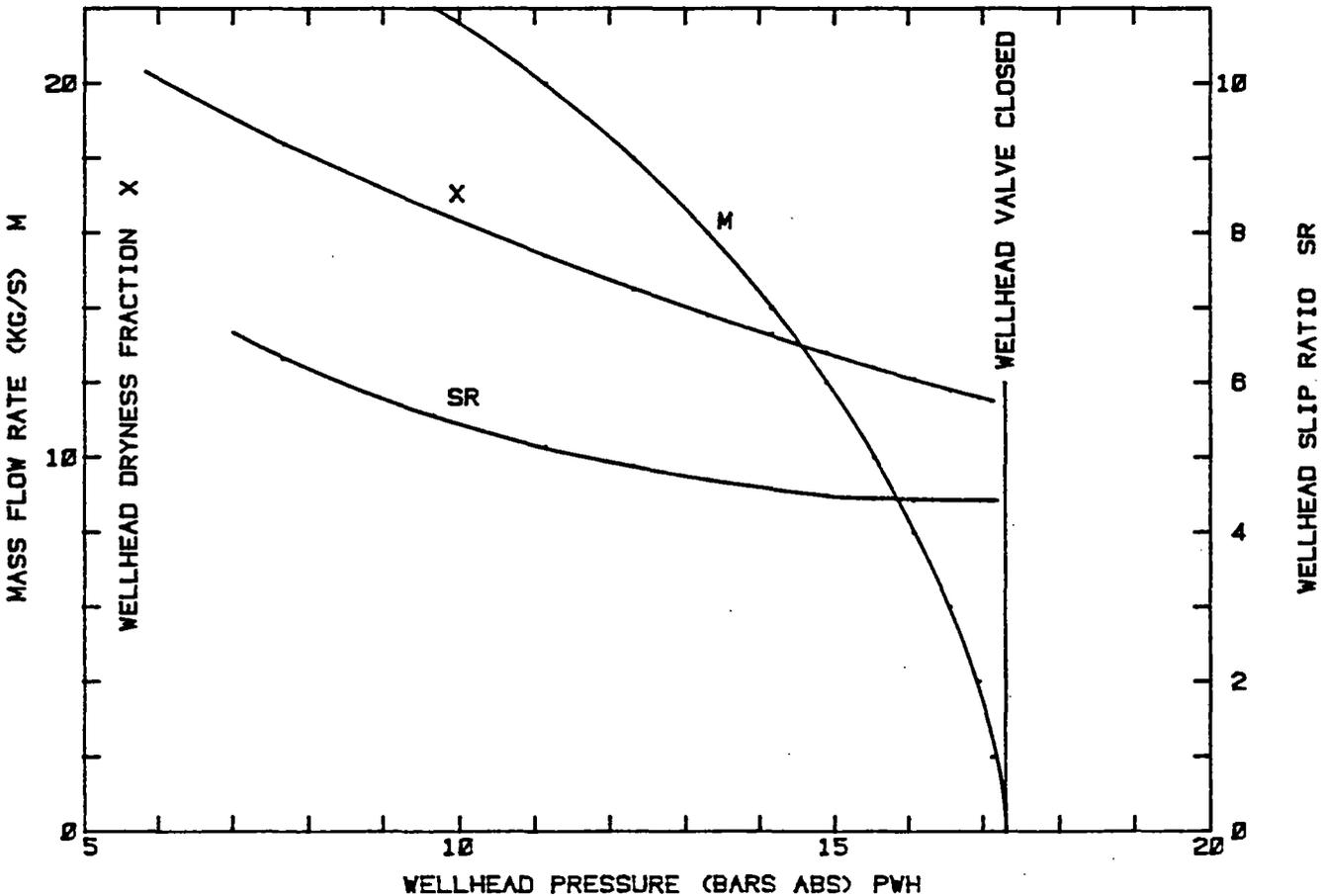


Figure 16 - THEORETICAL RESULTS : MISCELLANEOUS CURVES  
TBH = 253 C ; D.eq. = 0.151 m (0 to 80 m)



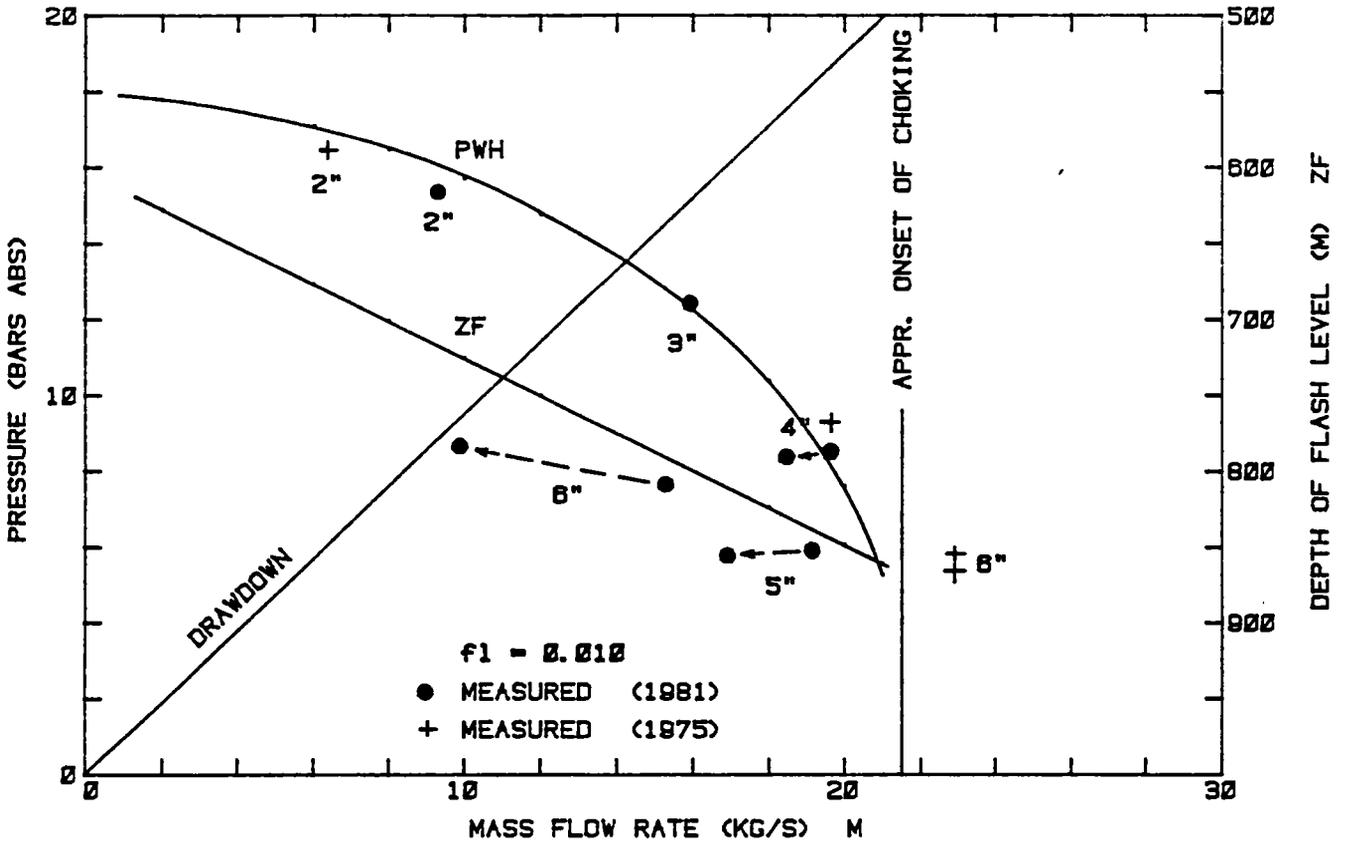
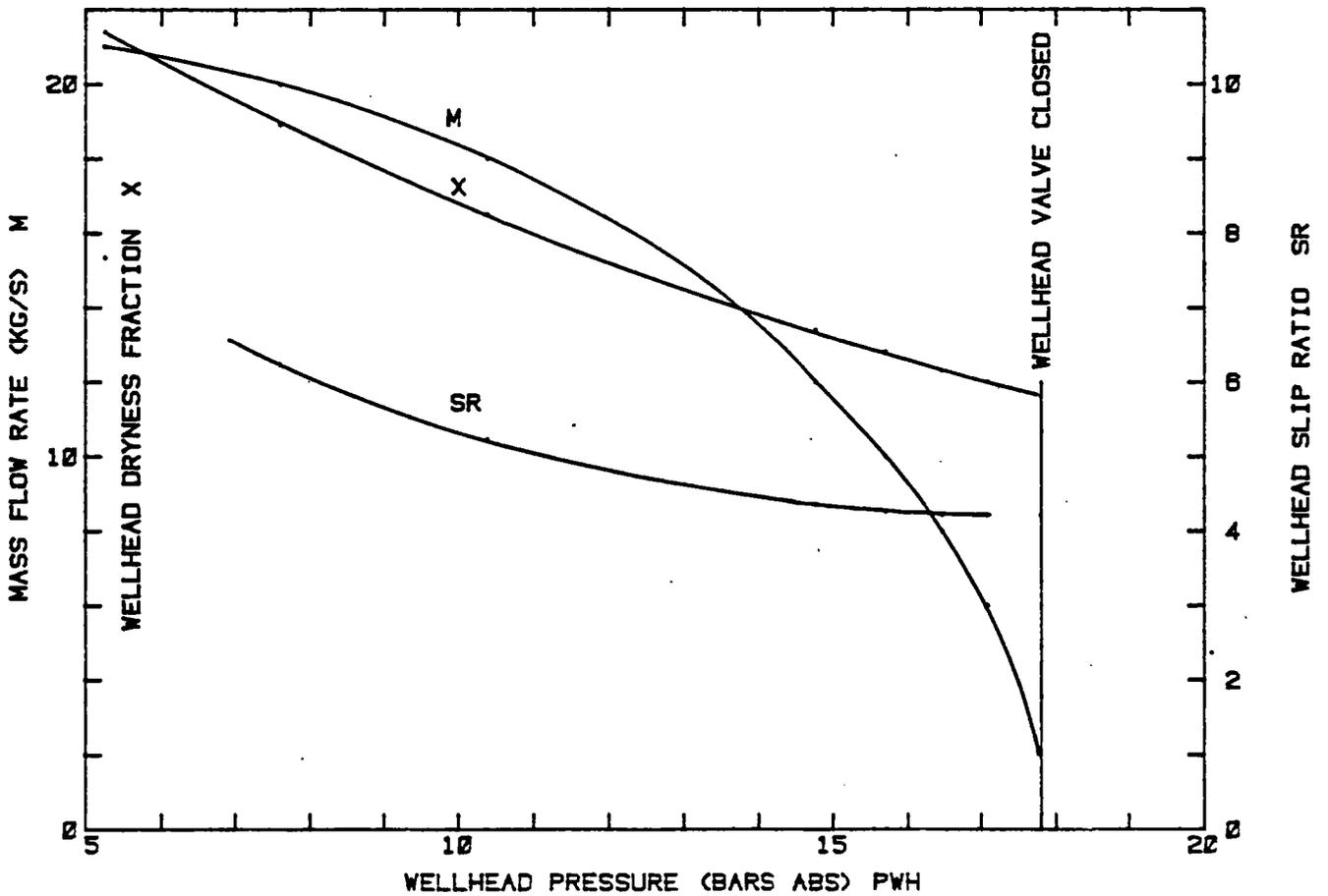


Figure 17 - THEORETICAL RESULTS ; MISCELLANEOUS CURVES  
TBH = 255 C ; D. eq. = 0.120 m (0 to 80 m)



HEWLETT  
PACKARD

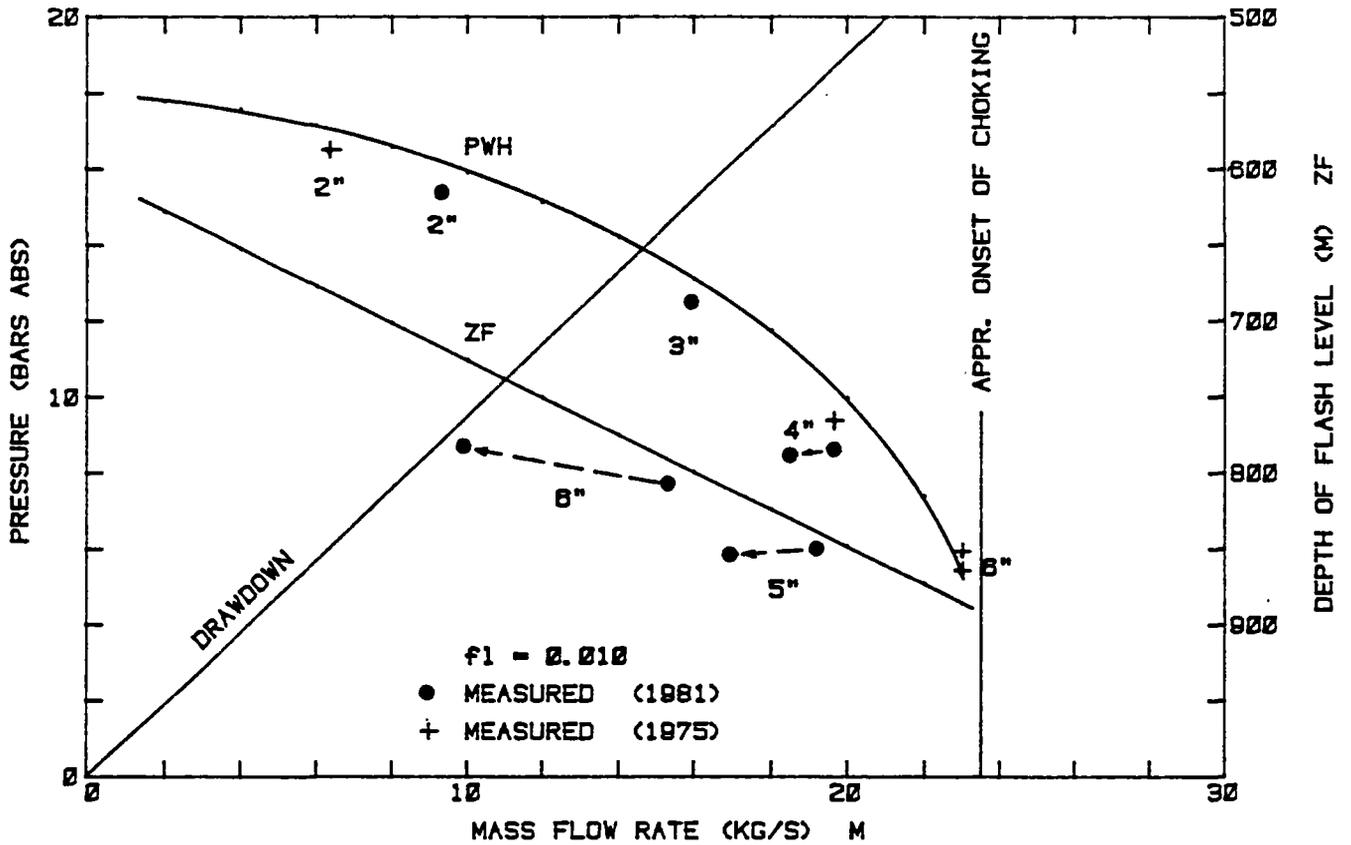
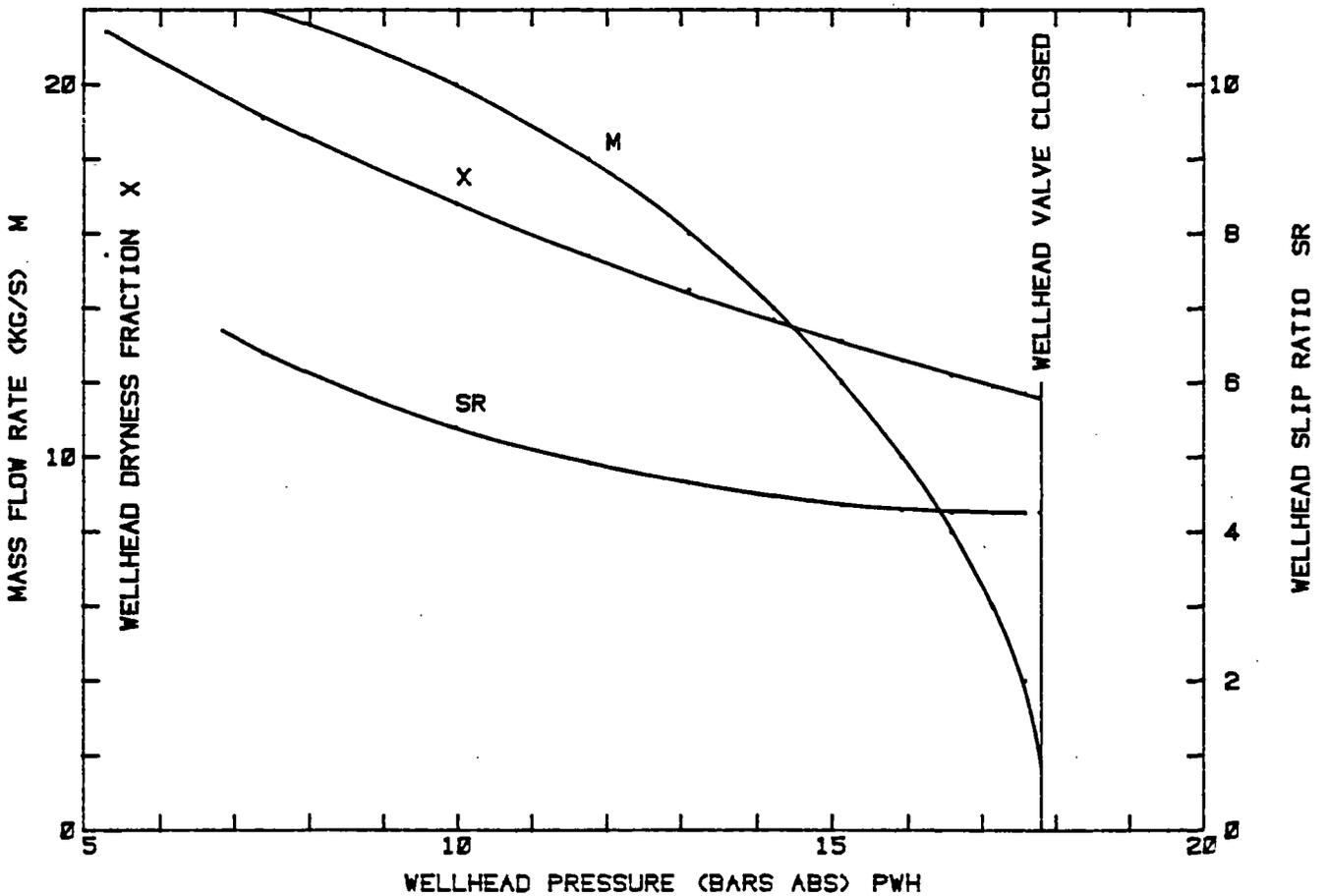


Figure 18 - THEORETICAL RESULTS ; MISCELLANEDUS CURVES  
 TBH = 255 C ; D. eq. = 0.130 m ( 0 to 80 m)



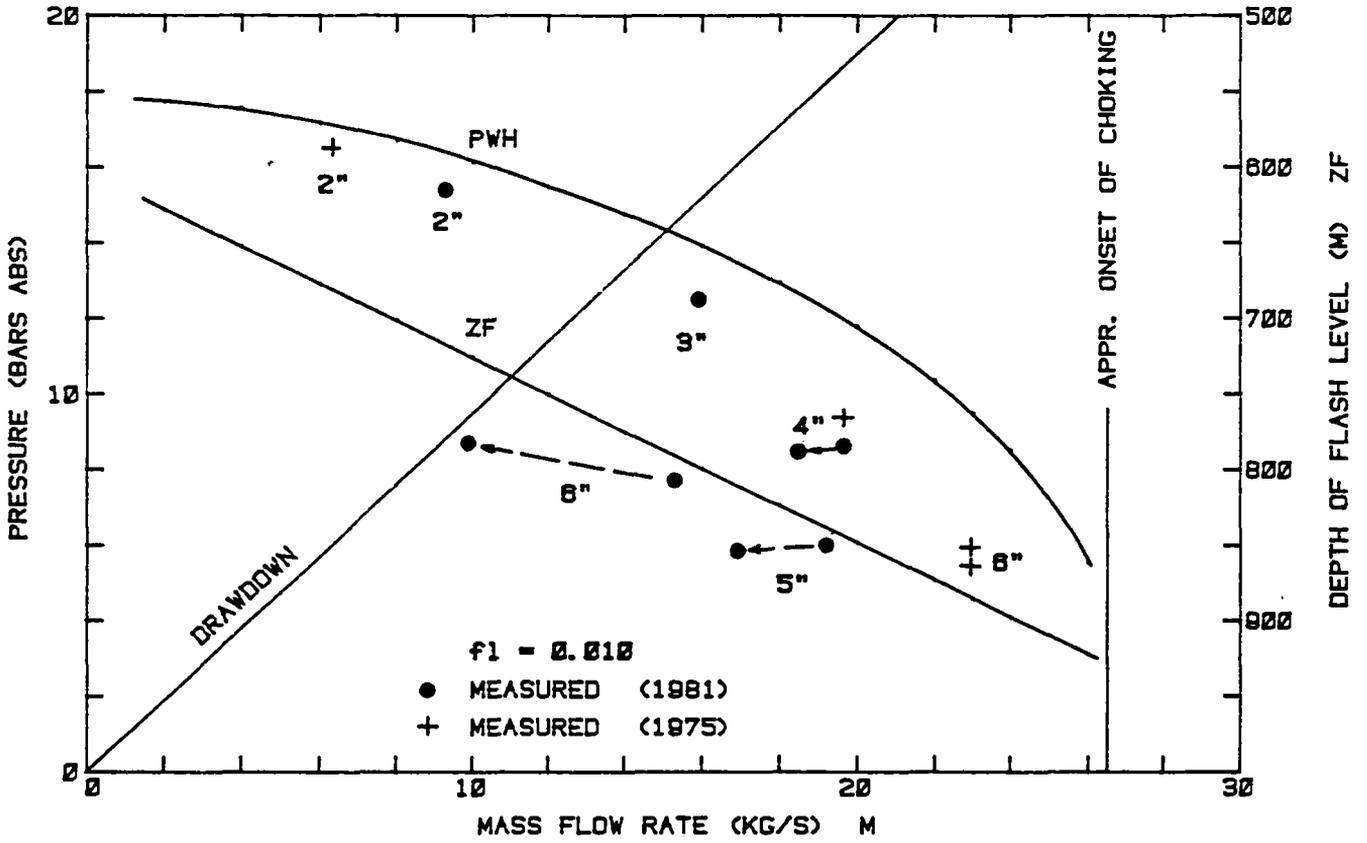
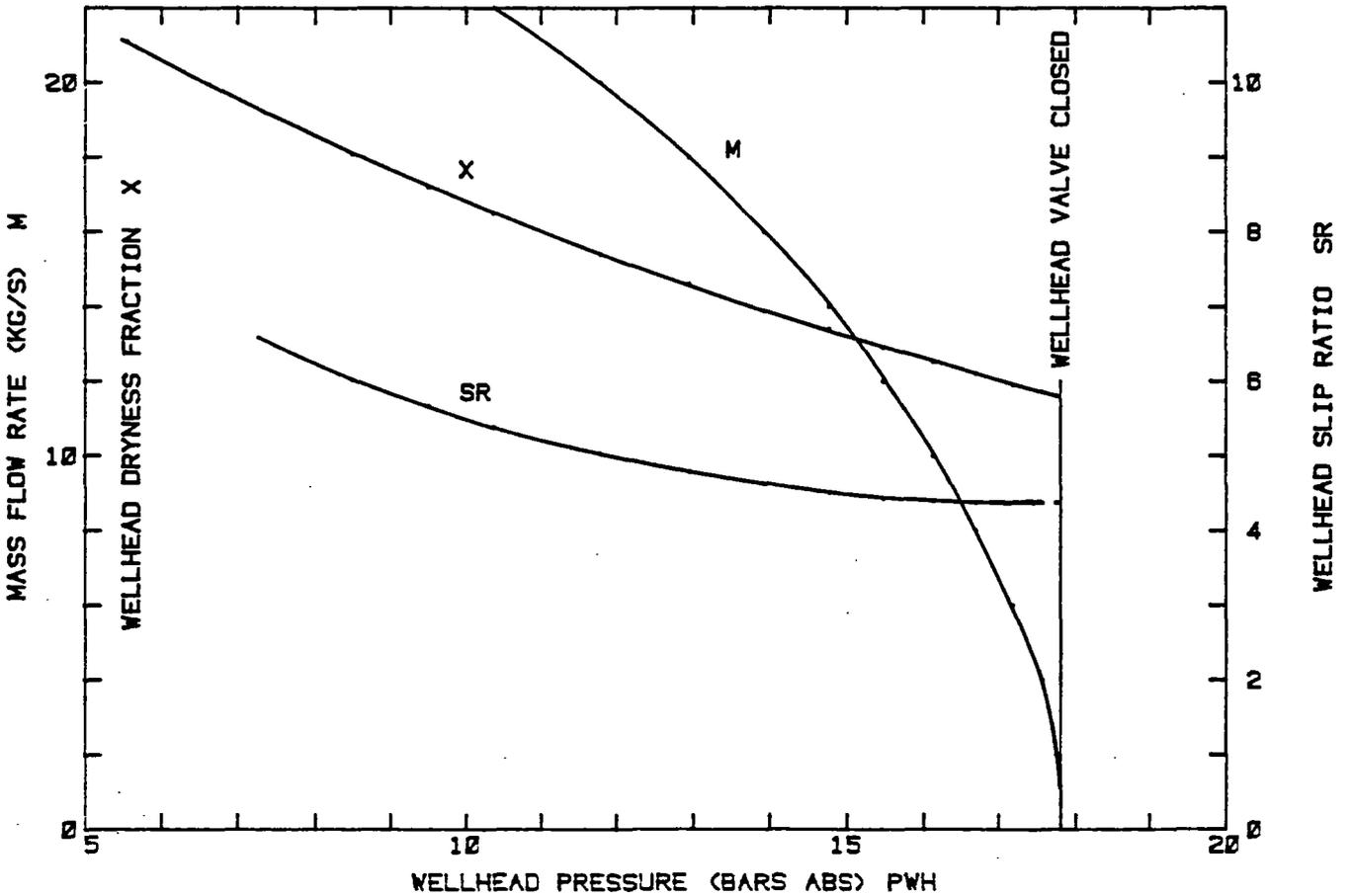


Figure 19 — THEORETICAL RESULTS : MISCELLANEOUS CURVES  
 TBH = 255 C ; D. eq. = 0.151 m ( 0 to 80 m)



HEWLETT  
PACKARD

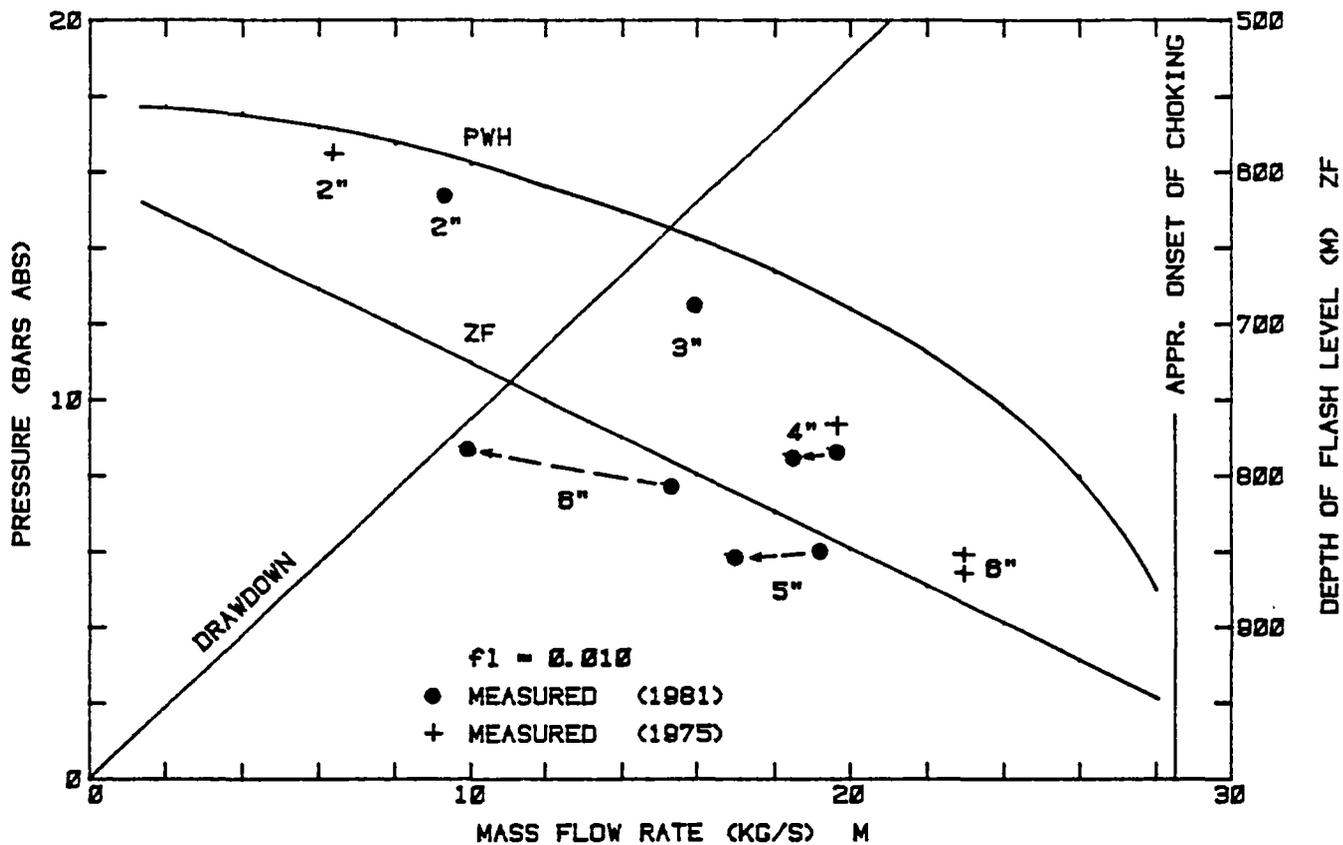
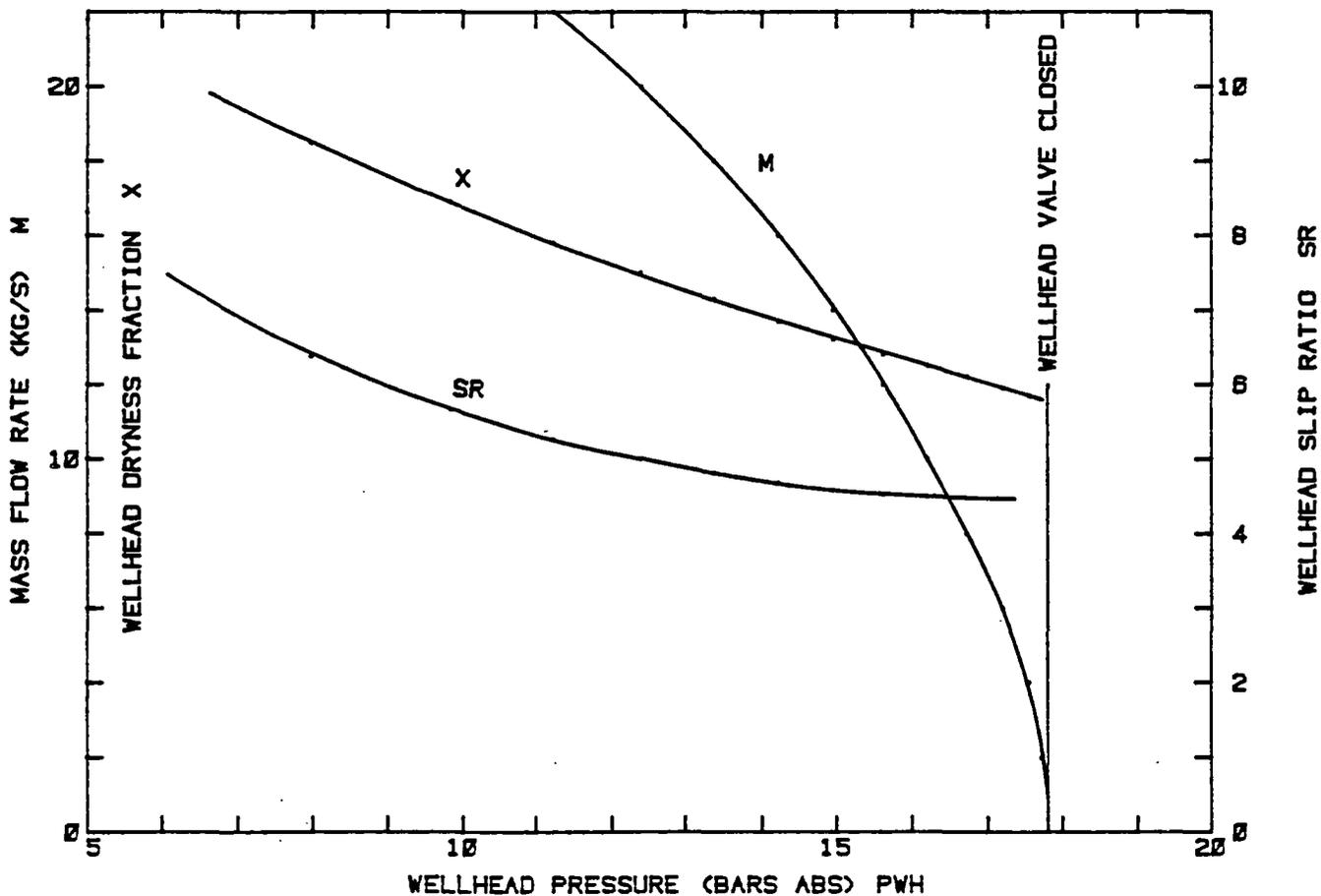


Figure 20 — THEORETICAL RESULTS ; MISCELLANEOUS CURVES  
TBH = 255 C ; D.eq. = 0.170 m ( 0 to 80 m)



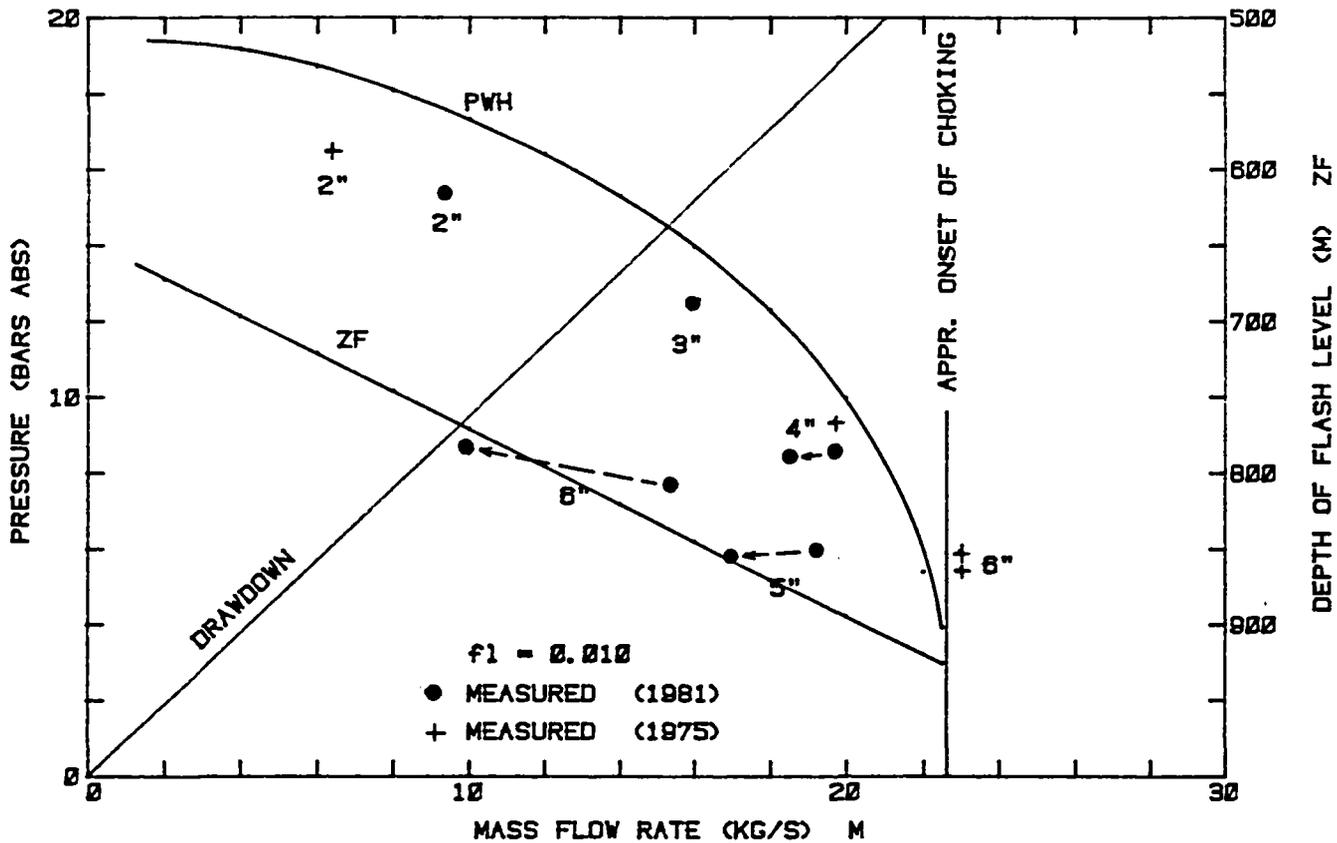
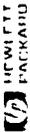
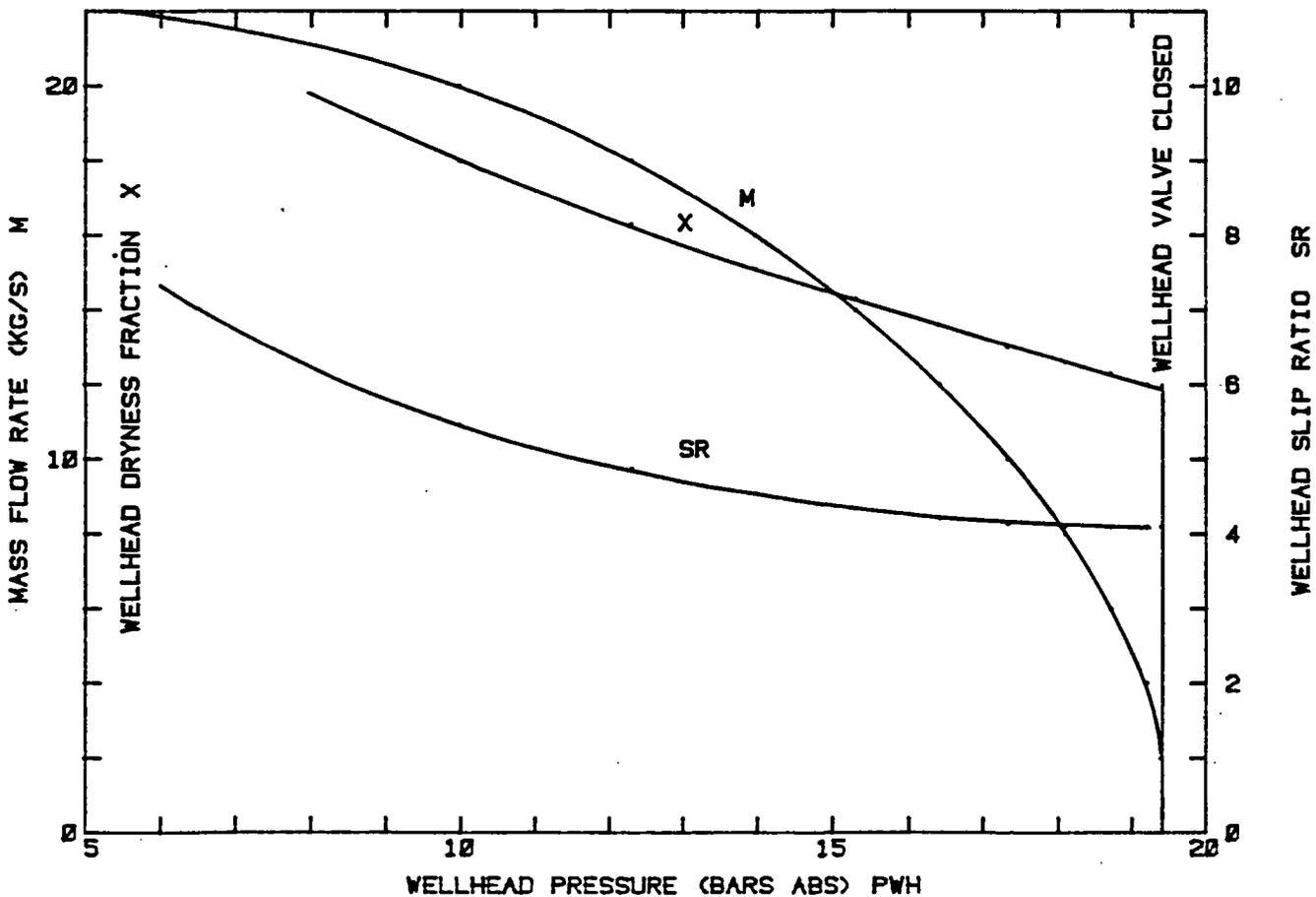


Figure 21 — THEORETICAL RESULTS, MISCELLANEOUS CURVES  
 TBH = 260 C ; D.eq. = 0.120 m ( 0 to 80 m)



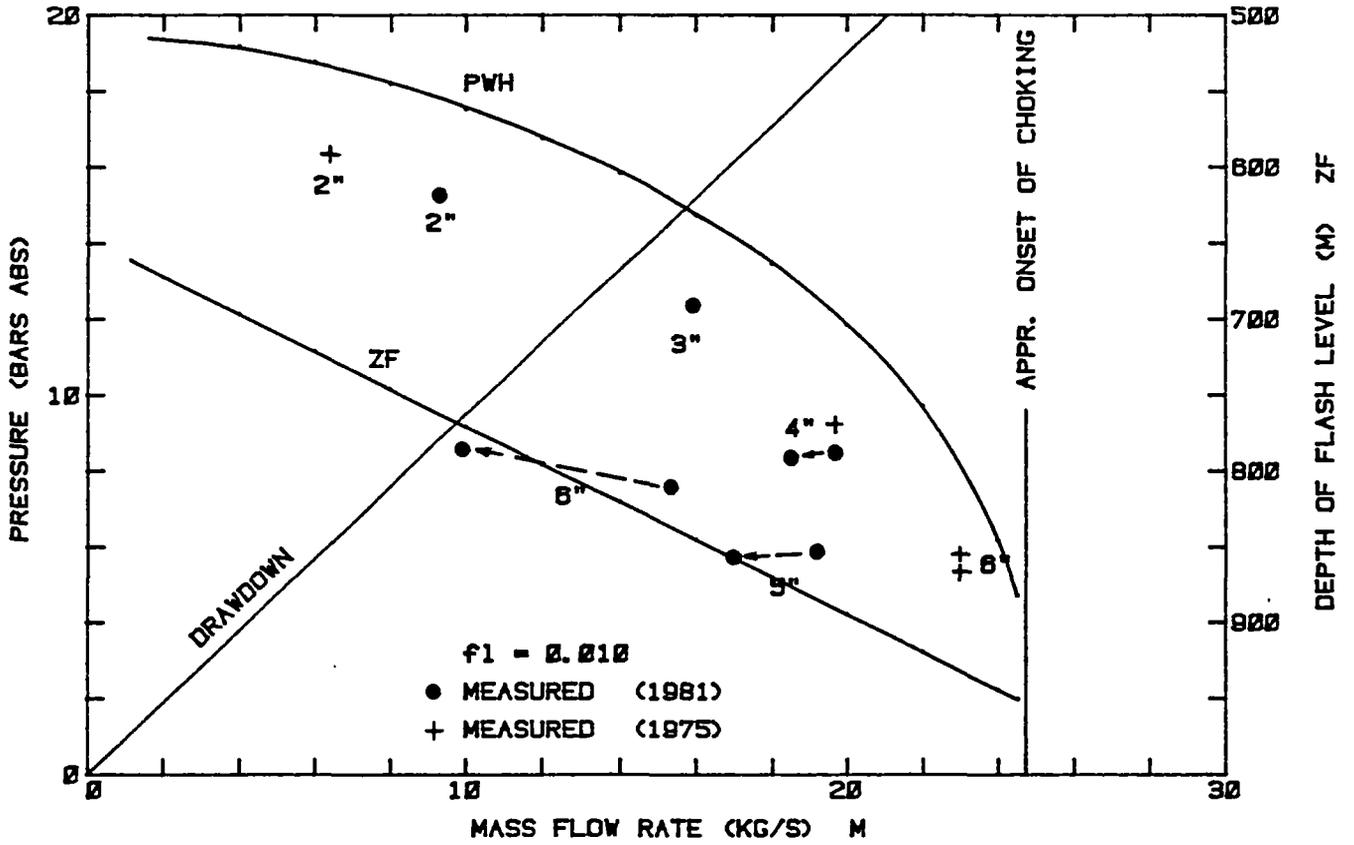
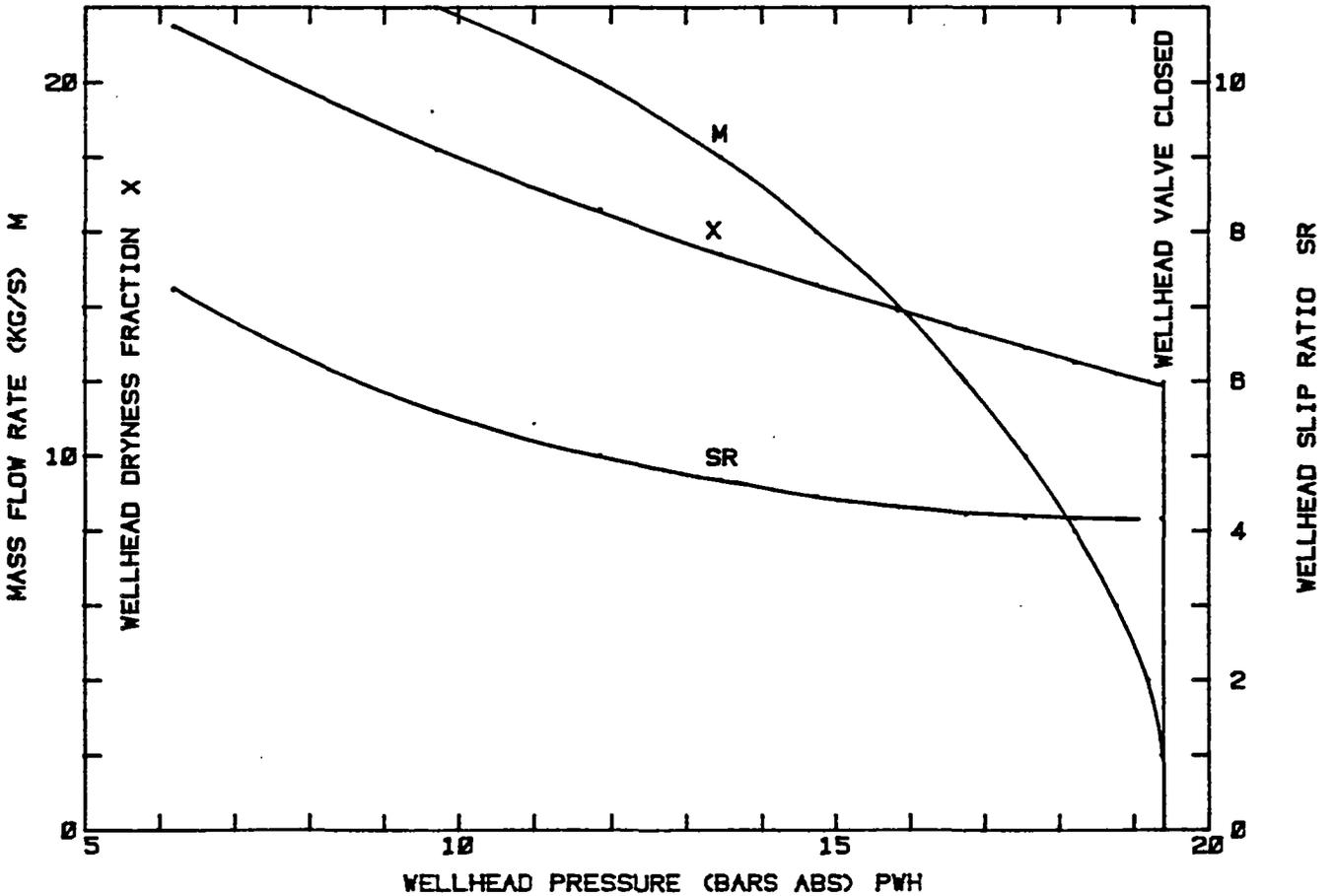


Figure 22 - THEORETICAL RESULTS, MISCELLANEOUS CURVES  
 TBH = 260 C ; D. eq. = 0.130 m (0 to 80 m)



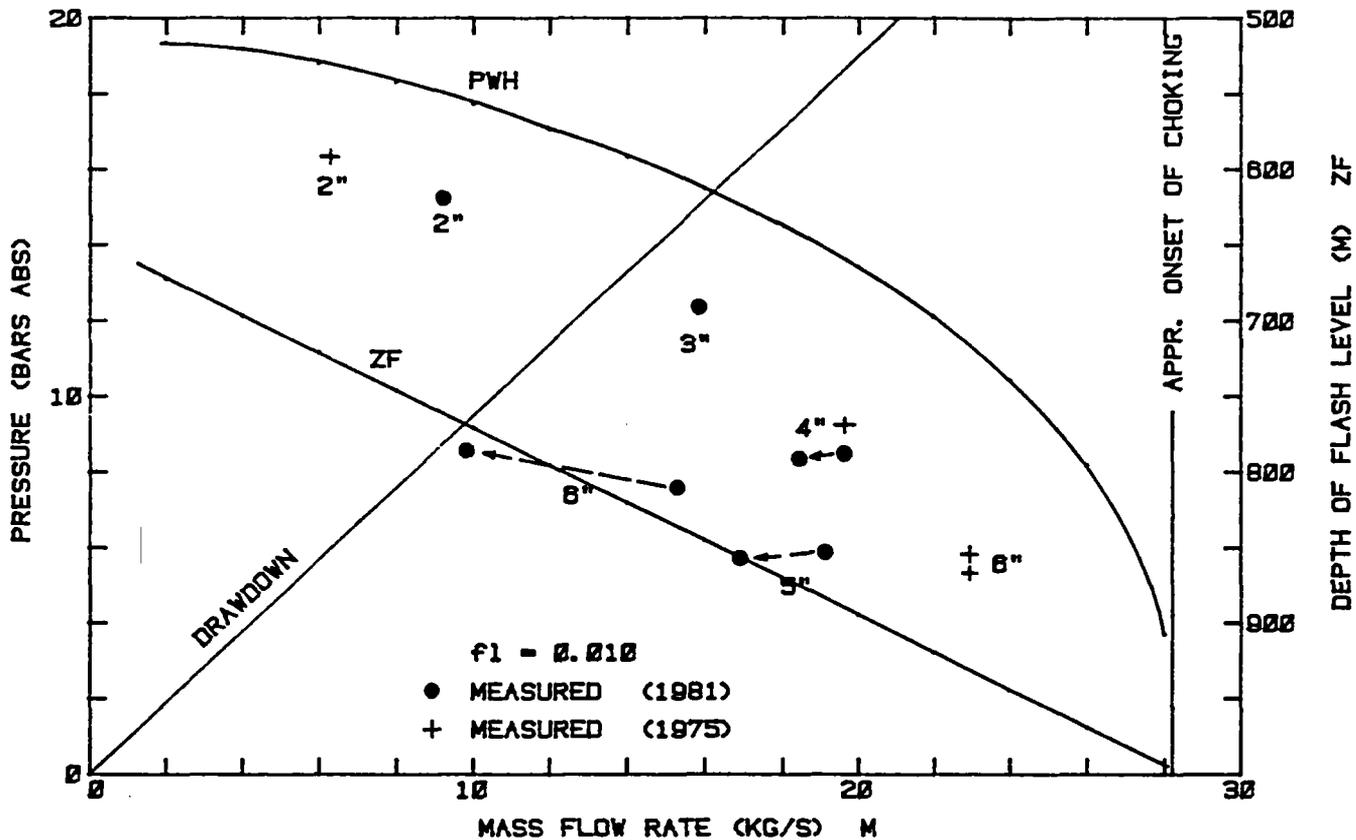
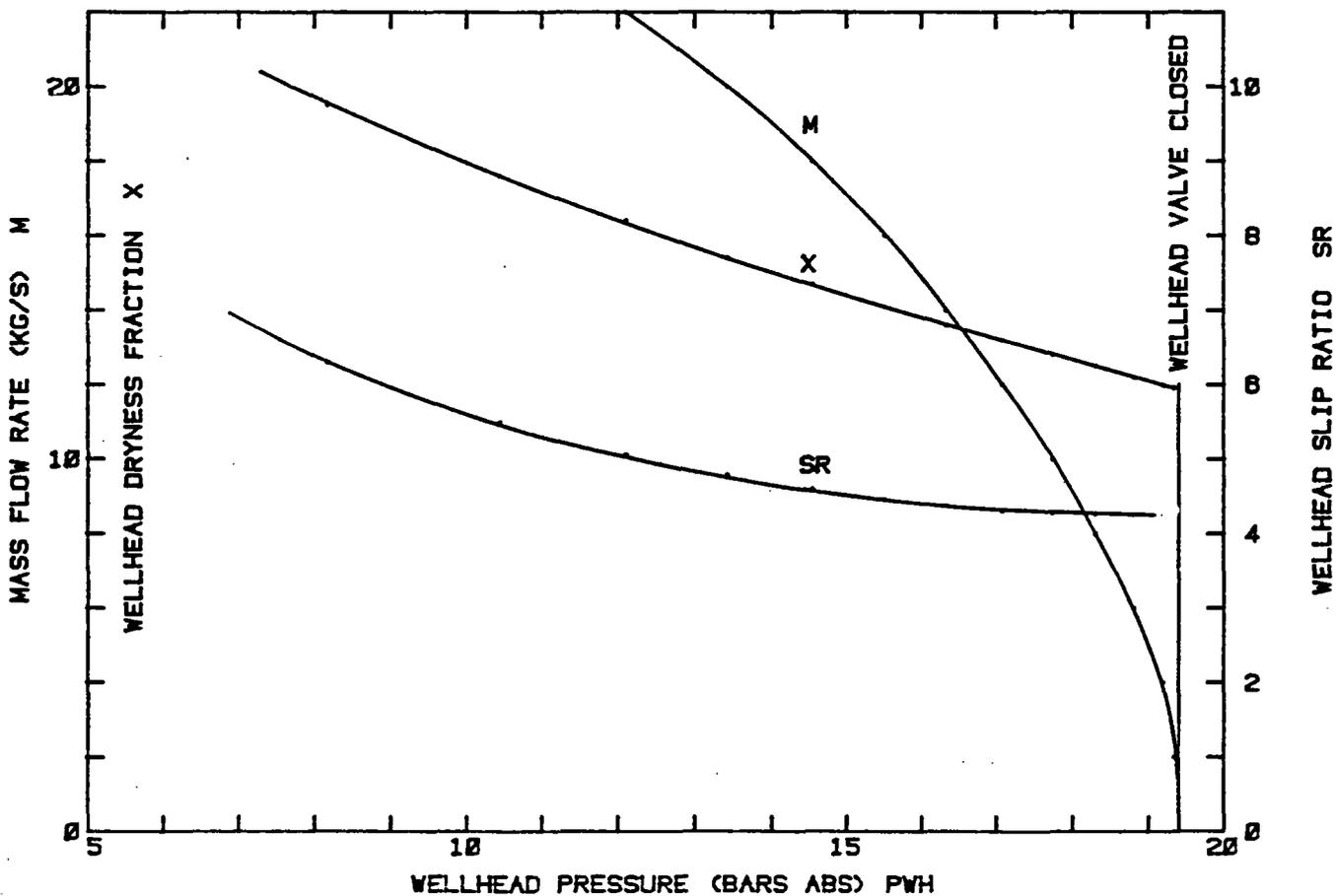


Figure 23 - THEORETICAL RESULTS, MISCELLANEOUS CURVES  
 TBH = 260 C; D. eq. = 0.151 m (0 to 80 m)



HEWLETT  
PACKARD

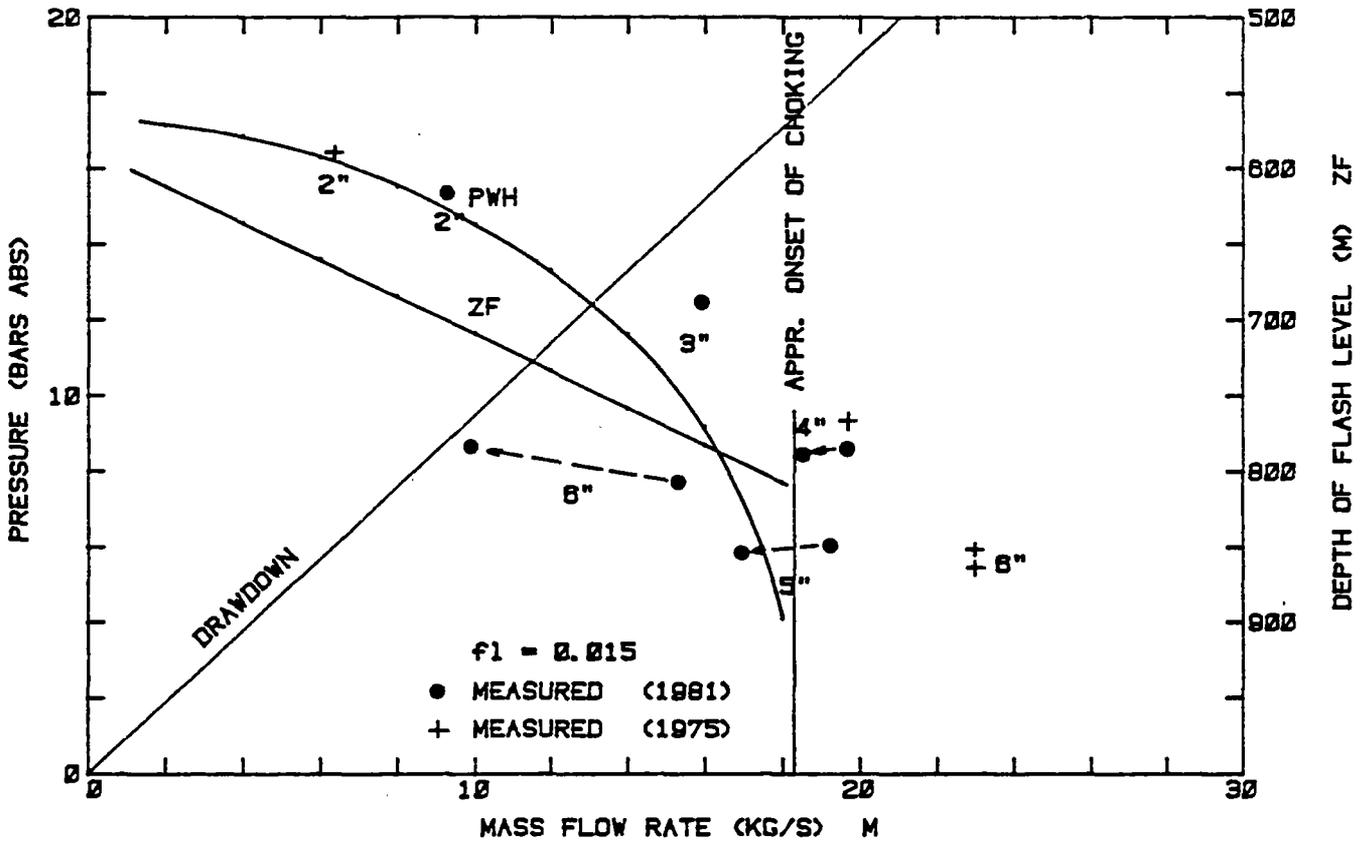
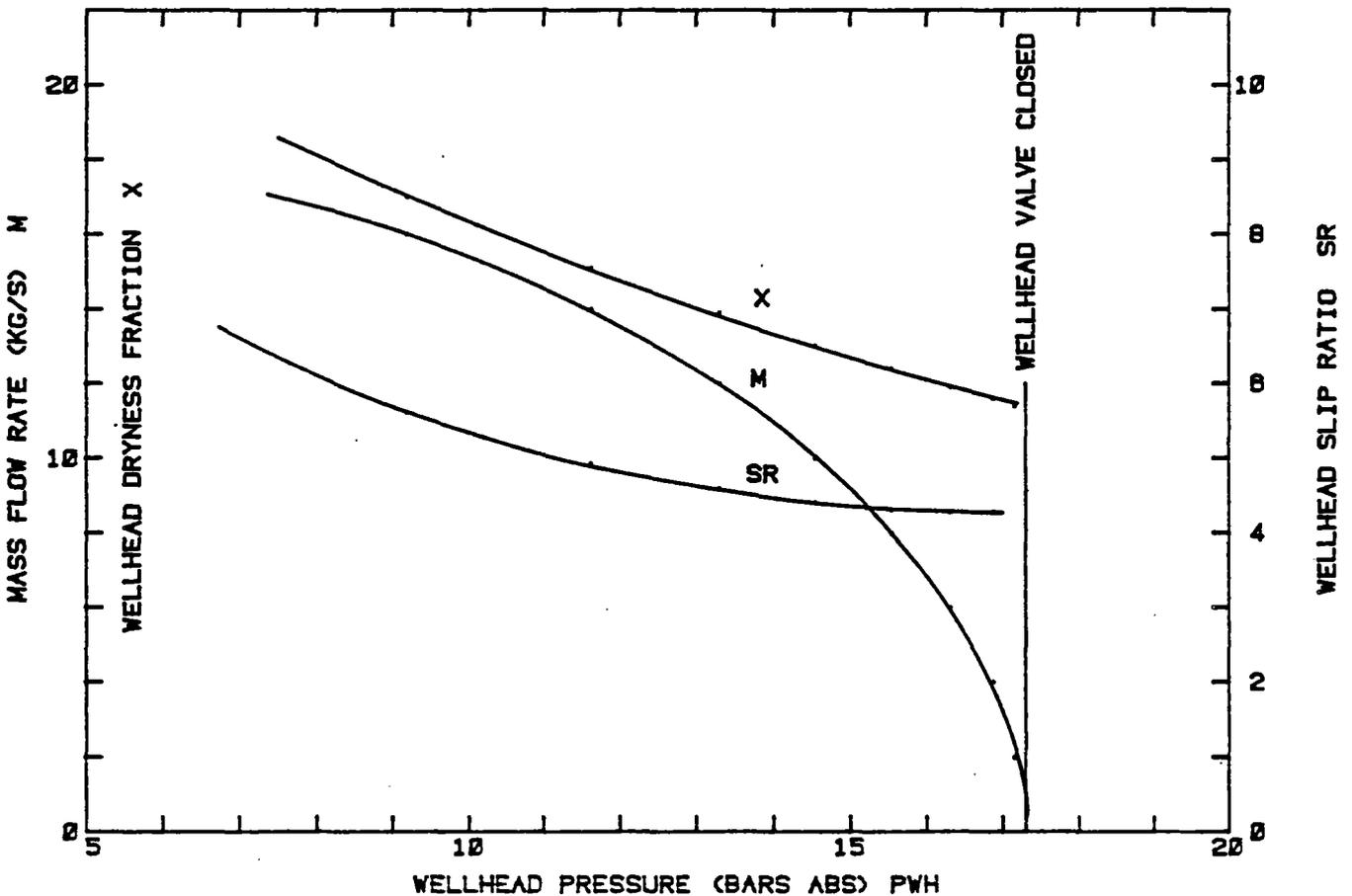


Figure 24 — THEORETICAL RESULTS ; MISCELLANEOUS CURVES  
TBH = 253 C ; D. eq. = 0.120 m ( 0 to 80 m)



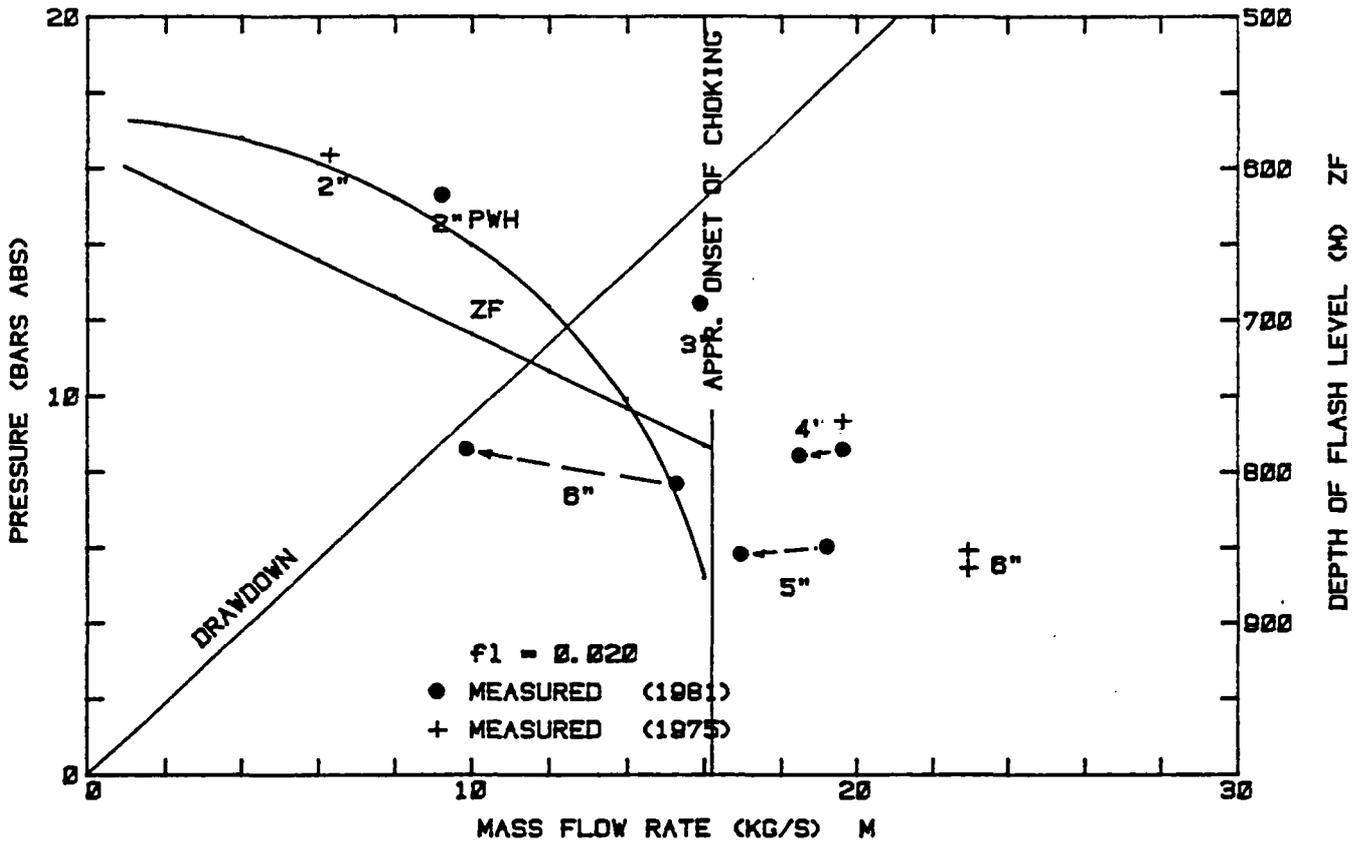
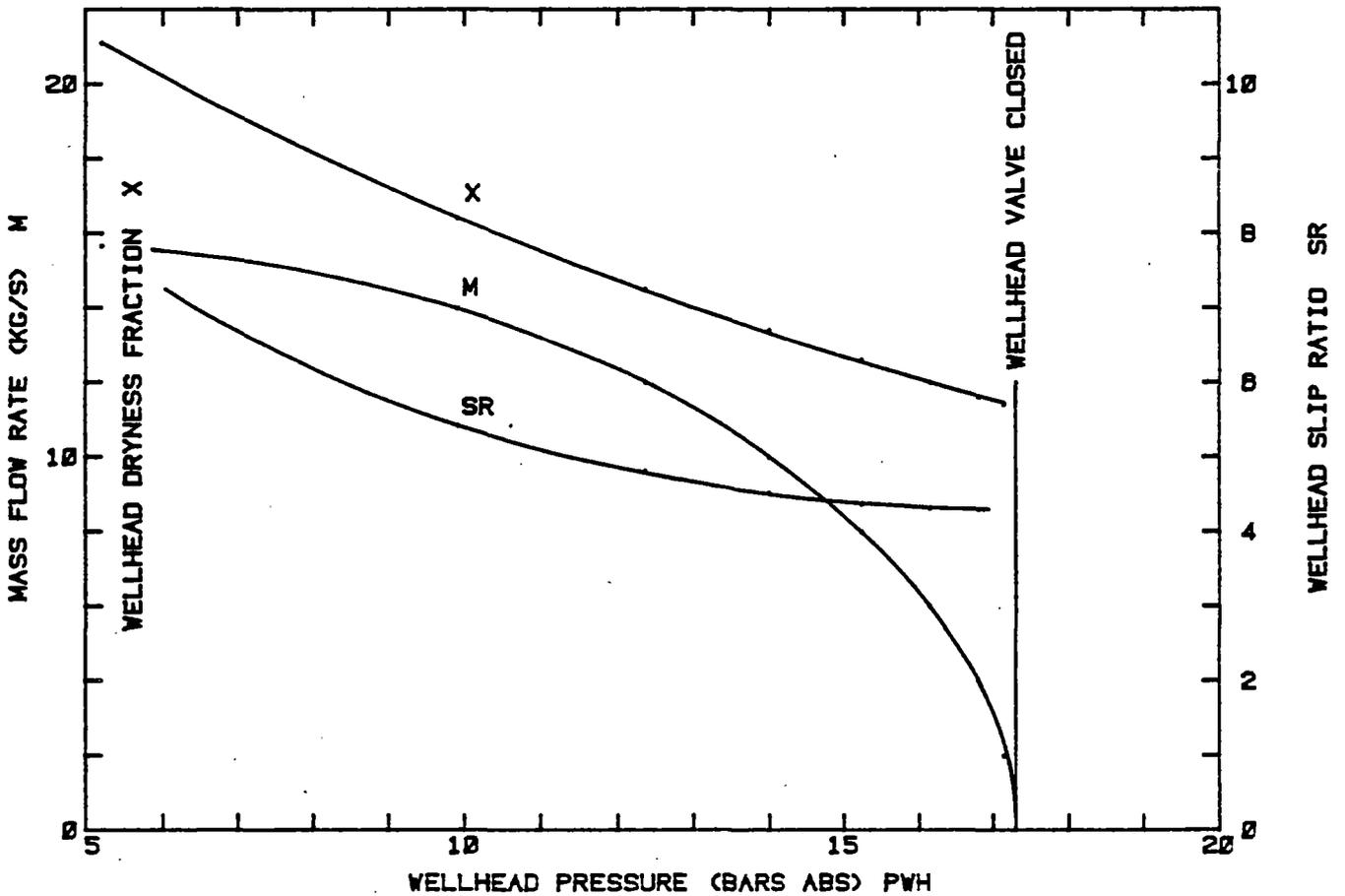


Figure 25 — THEORETICAL RESULTS ; MISCELLANEOUS CURVES  
 TBH = 253 C ; D. eq. = 0.120 m ( 0 to 80 m)



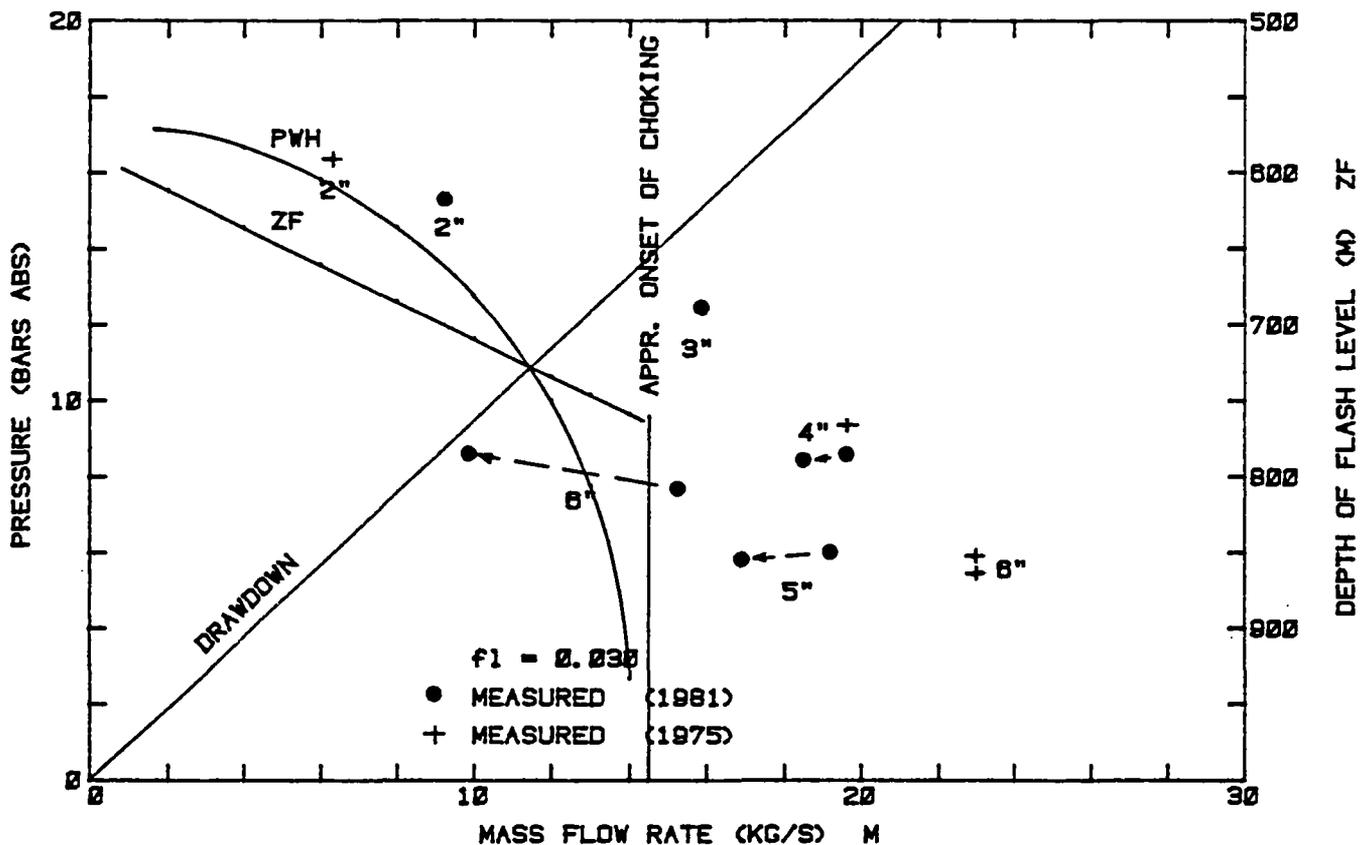
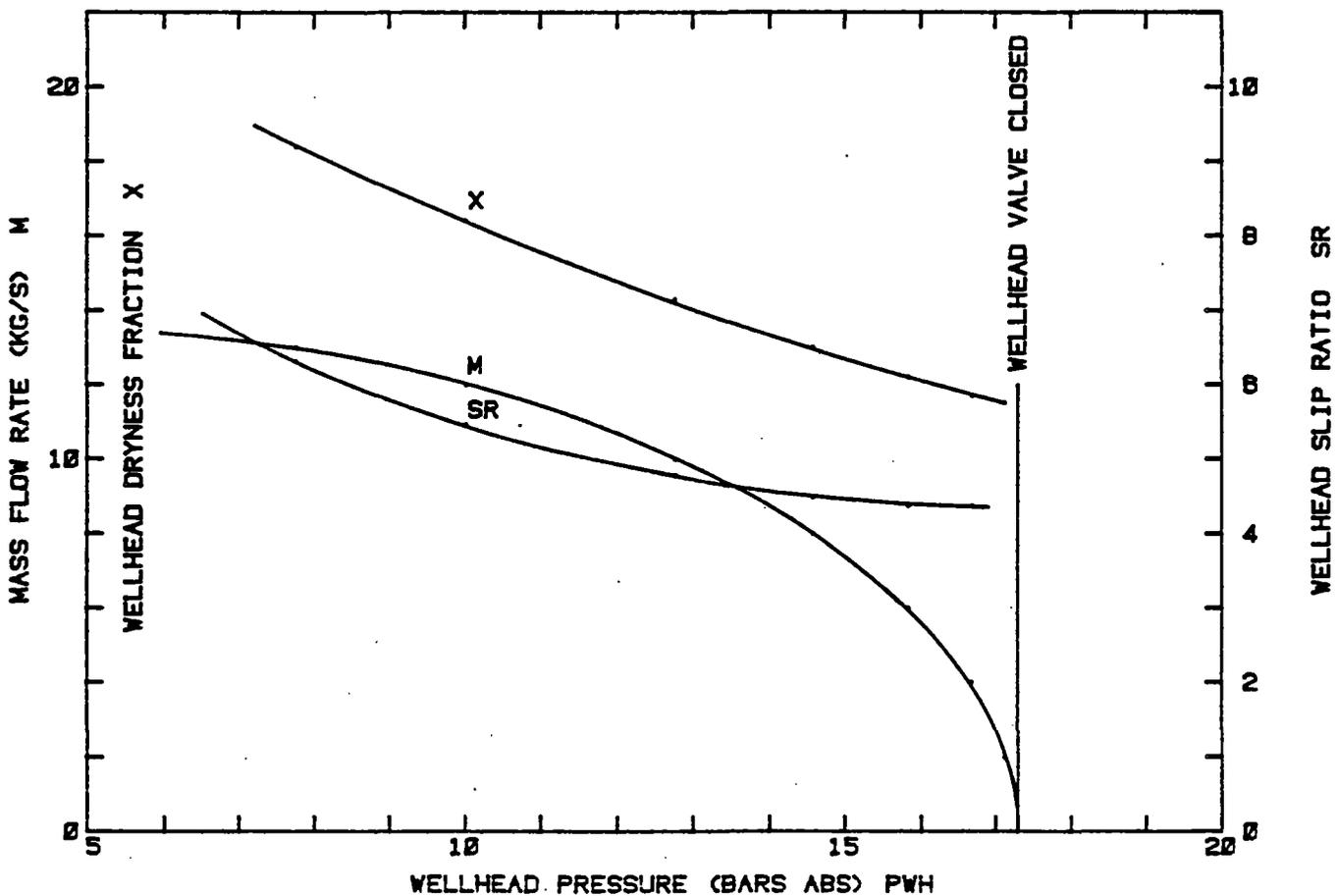


Figure 26 - THEORETICAL RESULTS ; MISCELLANEOUS CURVES  
TBH = 253 C ; D. eq. = 0.120 m ( 0 to 80 m)



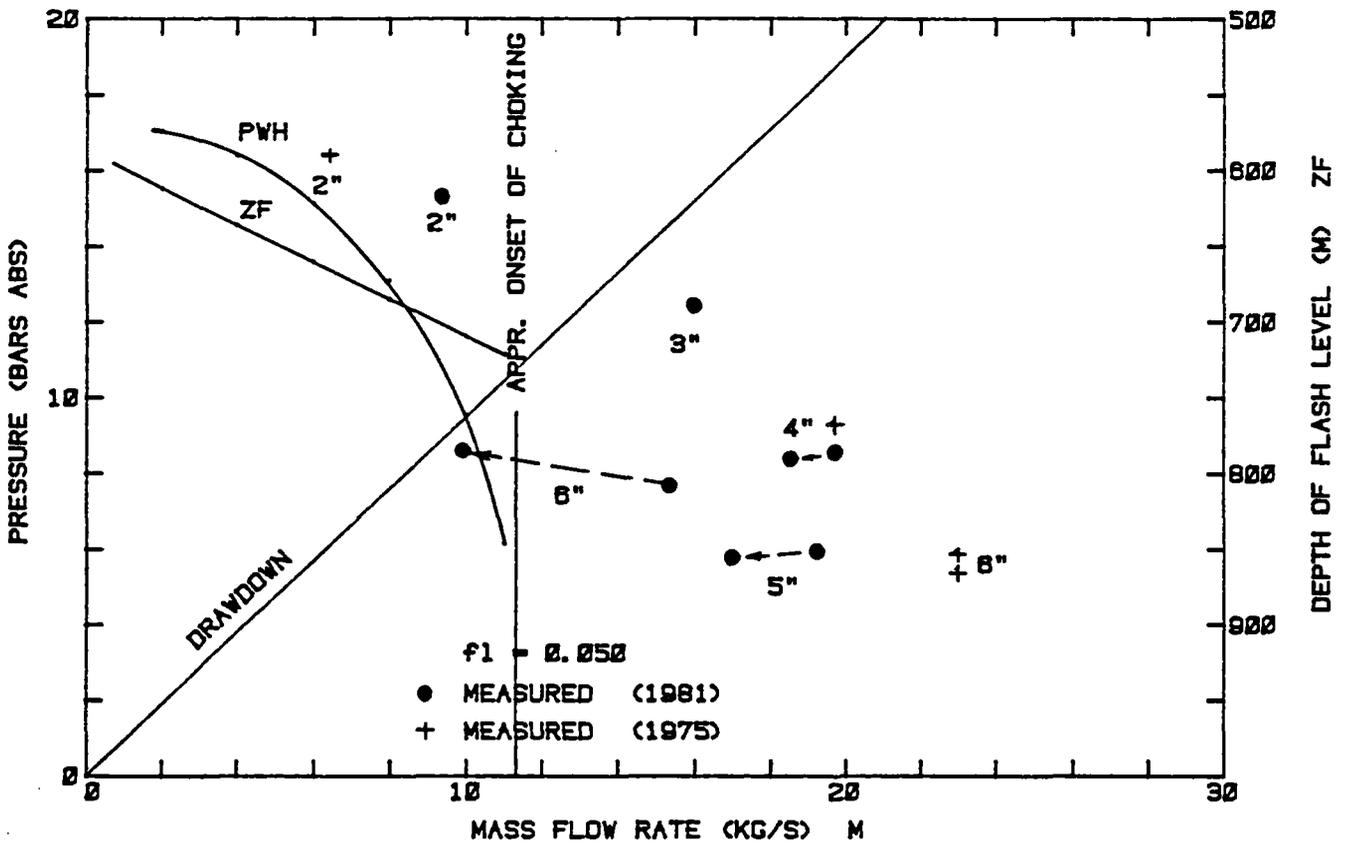
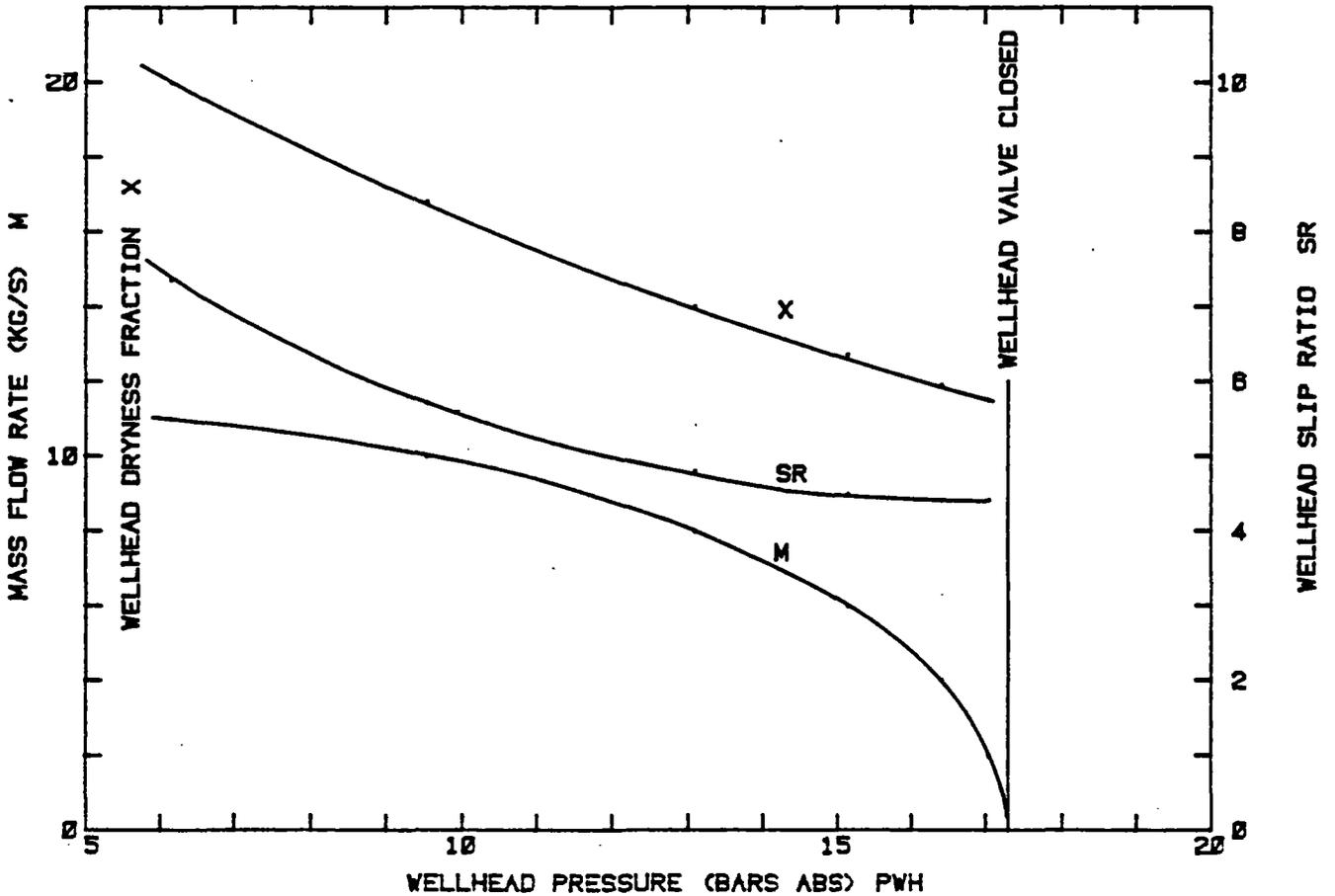


Figure 27 — THEORETICAL RESULTS ; MISCELLANEOUS CURVES  
 TBH = 253 C ; D.eq. = 0.120 m (0 to 80 m)



L'augmentation de la température de fond  $T_R$  conduit à profondeur d'ébullition plus importante, ainsi qu'à une valeur plus élevée de la pression de décharge maximum (à débit nul) ; cette fluctuation demeure toutefois modérée, entre 17.6 et 18.8 b.a et en accord avec la valeur mesurée de 18 b.a environ.

L'incidence de la section d'écoulement (diamètre équivalent) dans la partie supérieure du forage est beaucoup plus importante. La réduction du diamètre, depuis la valeur de 0.15 m correspondant au "collapse" mesuré, jusqu'au diamètre ultime supposé de 0.12 m implique une diminution du débit maximum de 25 %.

La valeur  $d_{eq} = 0.17$  m correspond, pour référence, au cas idéal, en l'absence de collapse initial.

L'incidence du coefficient de frottement est plus délicate à apprécier ; ce dernier dépend de l'augmentation de la rugosité, mais également des relations empiriques utilisées pour traduire les différents régimes d'écoulement. Dans cette approche, on a simplement testé l'influence d'une augmentation de  $f$ , depuis 0.01, valeur de travail, jusqu'à 0.05. Même pour cette faible variation, on constatera que l'effet est sérieux ; le débit maximum est réduit de 50 % environ.

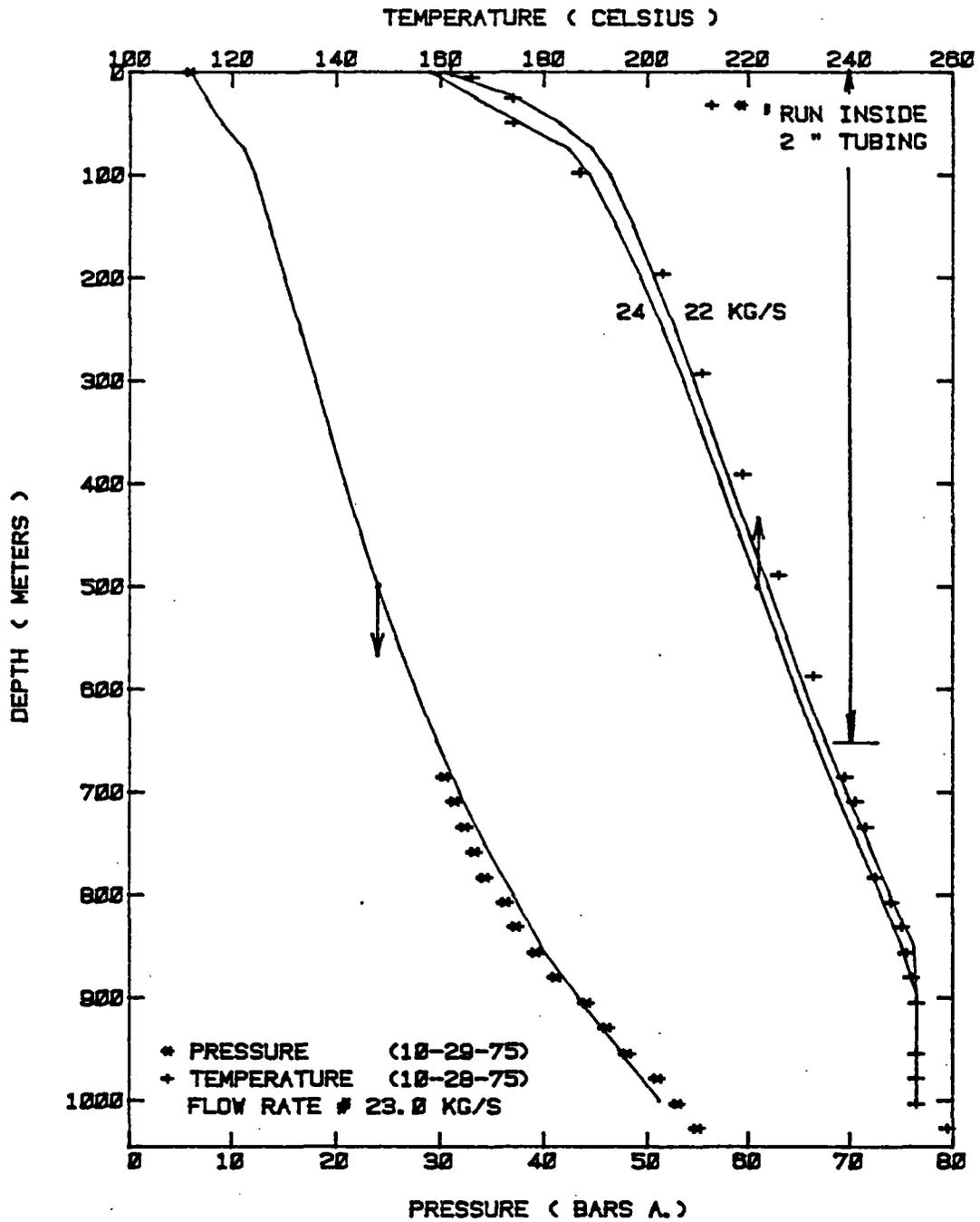
Afin de fournir une explication possible (parmi d'autres) au comportement du forage en cours de production, l'approche effectuée permet de proposer un scénario phénoménologique qui, sans être vérifié intégralement, n'est pas mis en défaut par les observations de terrain :

- . état initial et production en 2" ; diamètre d'écoulement supérieur (0.14-0.15 m/collapse initial)
- . période 3" et début 4" ; apparition des dépôts avec  $d_{eq} = 0.13$  m
- . période 4" et début 5" ; réduction progressive du diamètre équivalent jusqu'à  $d_{eq} = 0.12$  m par exemple
- . période 5" et 6" ; augmentation du coefficient de frottement et probablement nouvelle réduction de diamètre (valeur finale mesurée 0.103 m).

#### 6.3.5. - Logs de température et de pression

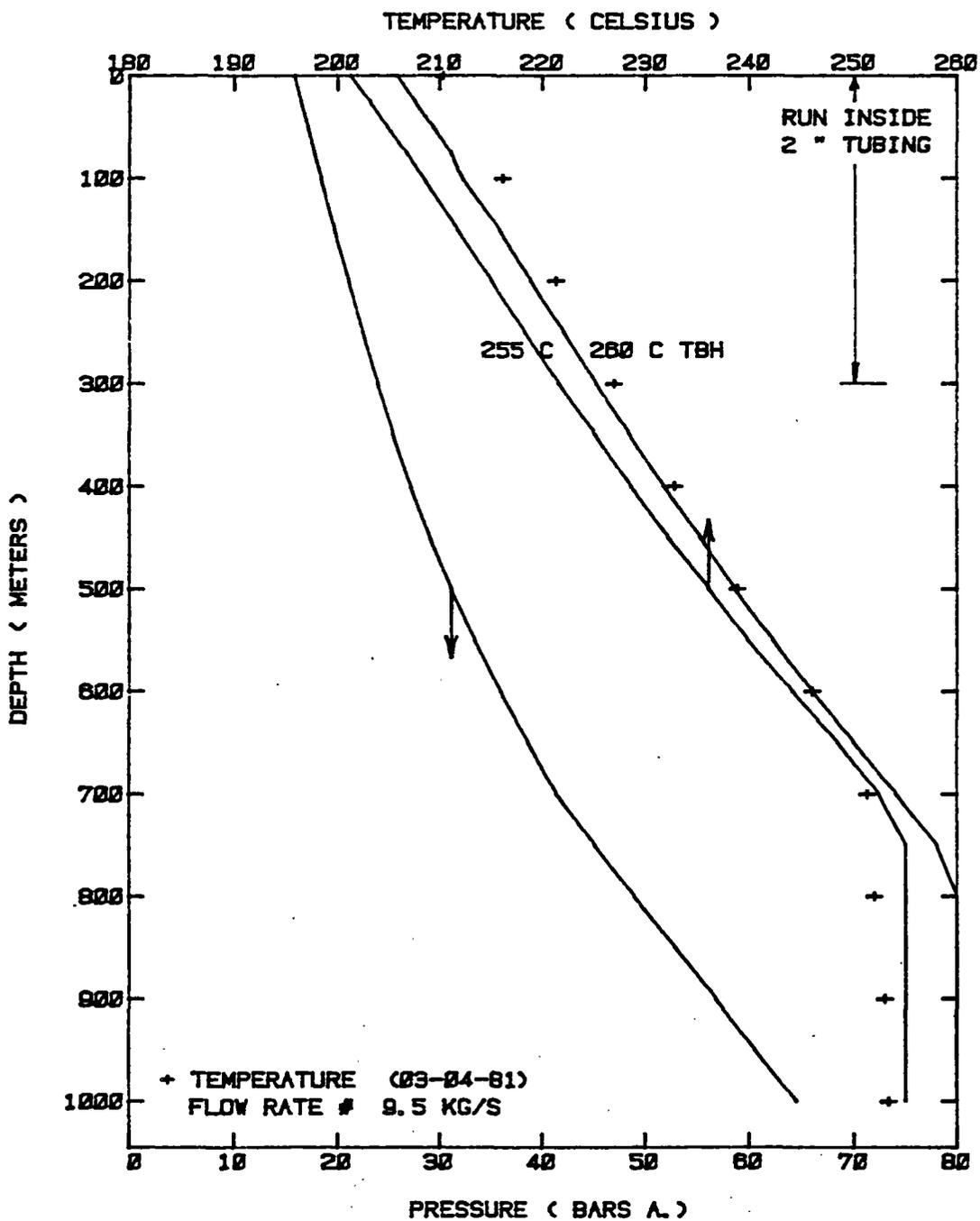
L'approche utilisée consiste tout d'abord à ajuster de manière optimale les résultats d'un enregistrement complet (température et pression) réalisé en 1975 (figure 28). Les calculs de simulation sont ensuite poursuivis avec les différents débits d'exploitation de l'essai (chapitre précédent). Pour chaque phase de l'essai on a représenté les profils de pression et de température calculés, ainsi que les points expérimentaux relatifs aux logs de température (figures 29 à 33). La dispersion moyenne de l'ajustement est d'environ 3°C, soit de l'ordre de grandeur de la précision de l'étalonnage des sondes, et de la lecture des enregistrements.

Figure 28  
COMPUTED AND EXPERIMENTAL RESULTS  
TEMPERATURE AND PRESSURE PROFILES  
PRODUCTION WITH 8 IN. OUTLET PIPE



HEWLETT  
PACKARD

Figure 29  
COMPUTED AND EXPERIMENTAL RESULTS  
TEMPERATURE AND PRESSURE PROFILES  
PRODUCTION WITH 2 IN. OUTLET PIPE



WILCOX  
PACKARD

Figure 30  
COMPUTED AND EXPERIMENTAL RESULTS  
TEMPERATURE AND PRESSURE PROFILES  
PRODUCTION WITH 3 IN. OUTLET PIPE

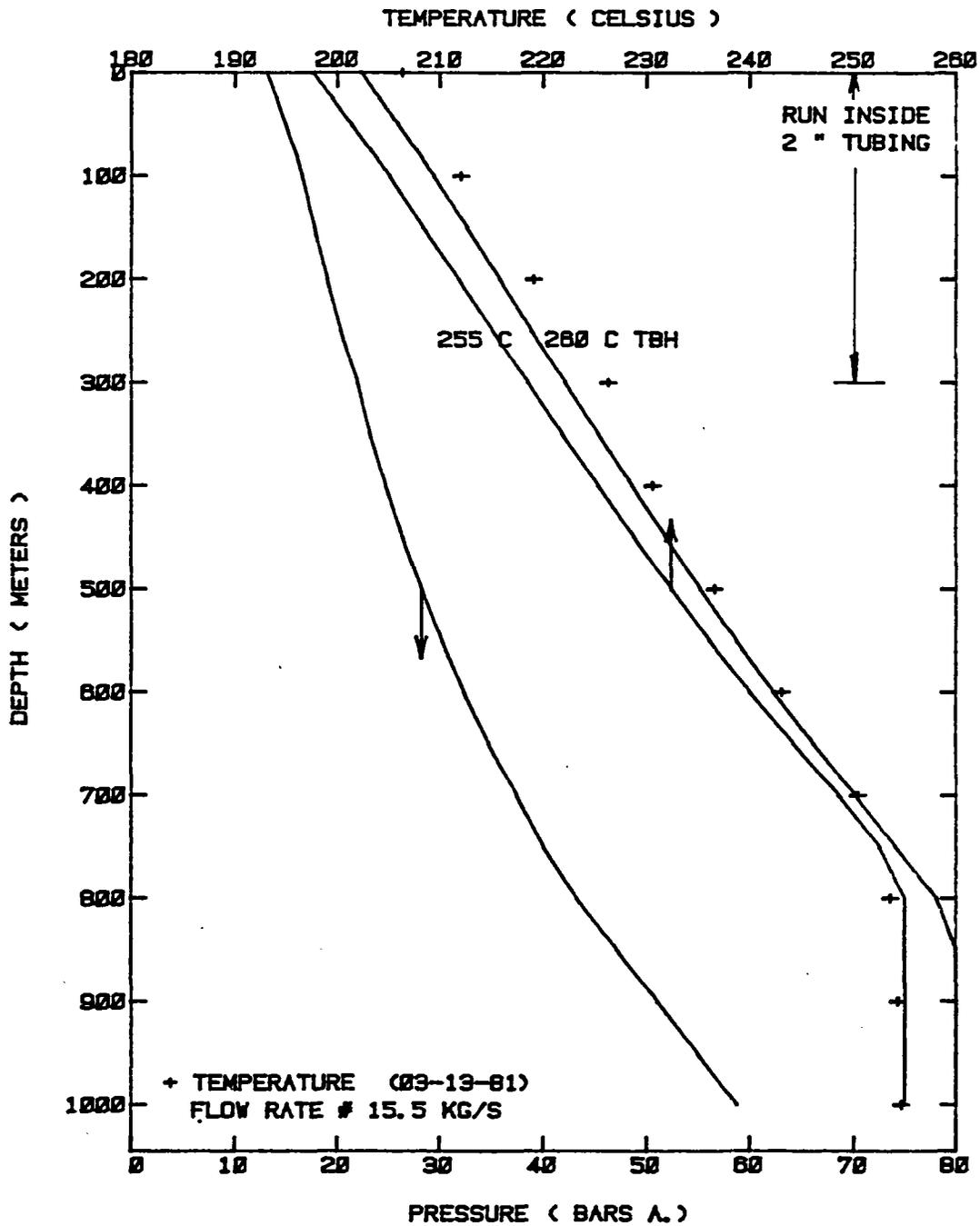
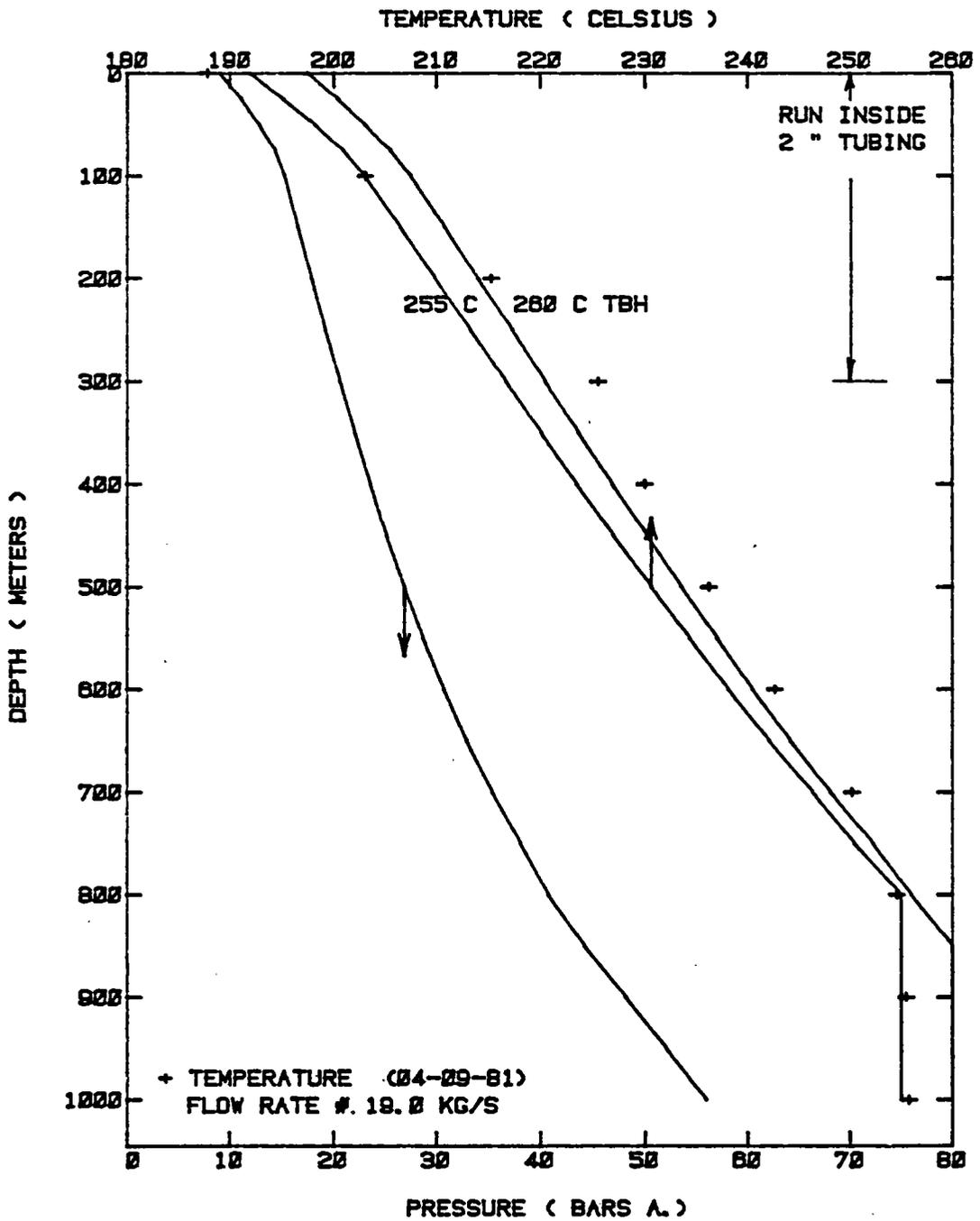


Figure 31  
COMPUTED AND EXPERIMENTAL RESULTS  
TEMPERATURE AND PRESSURE PROFILES  
PRODUCTION WITH 4 IN. OUTLET PIPE



Hewlett Packard

Figure 32  
COMPUTED AND EXPERIMENTAL RESULTS  
TEMPERATURE AND PRESSURE PROFILES  
PRODUCTION WITH 5 IN. OUTLET PIPE

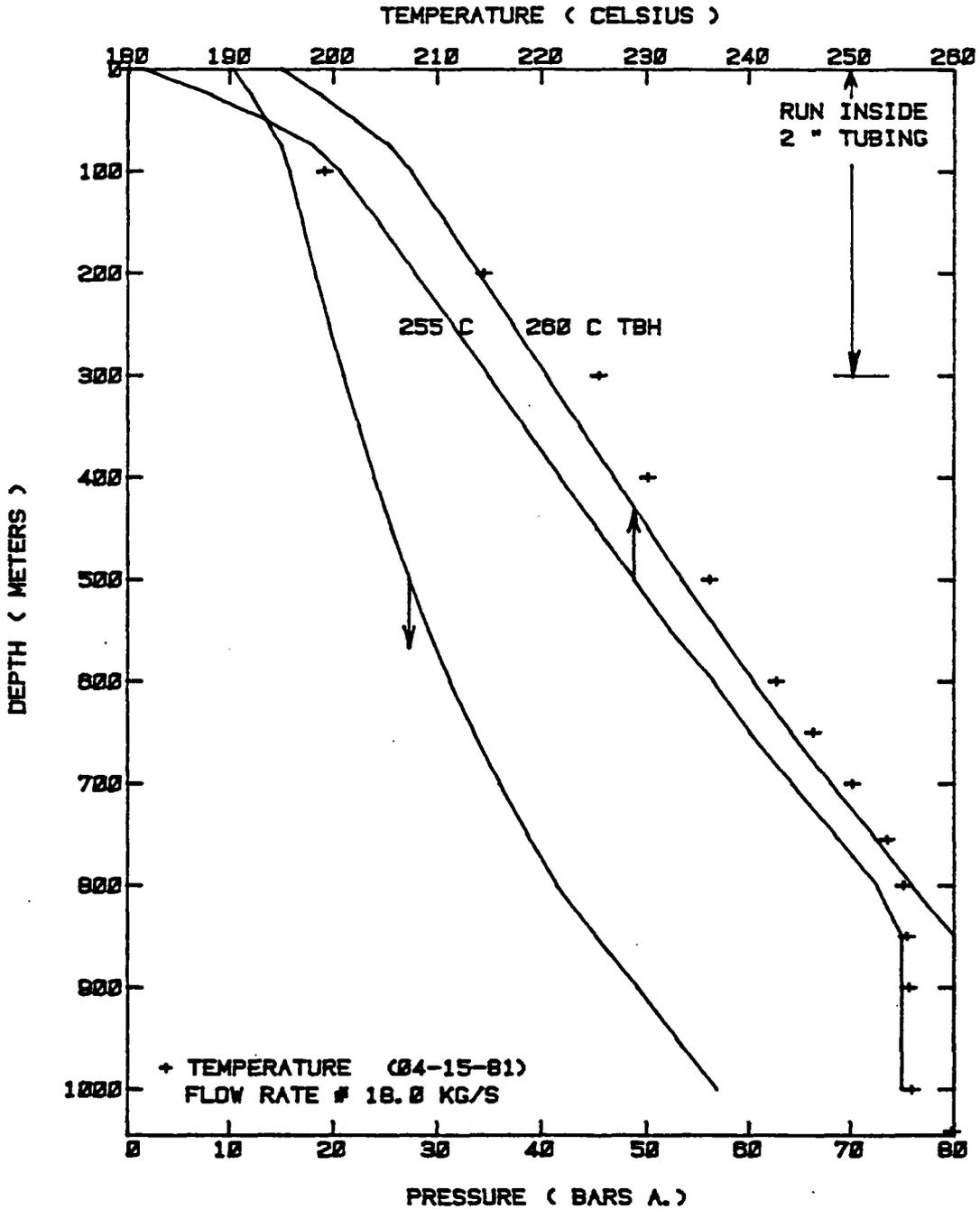
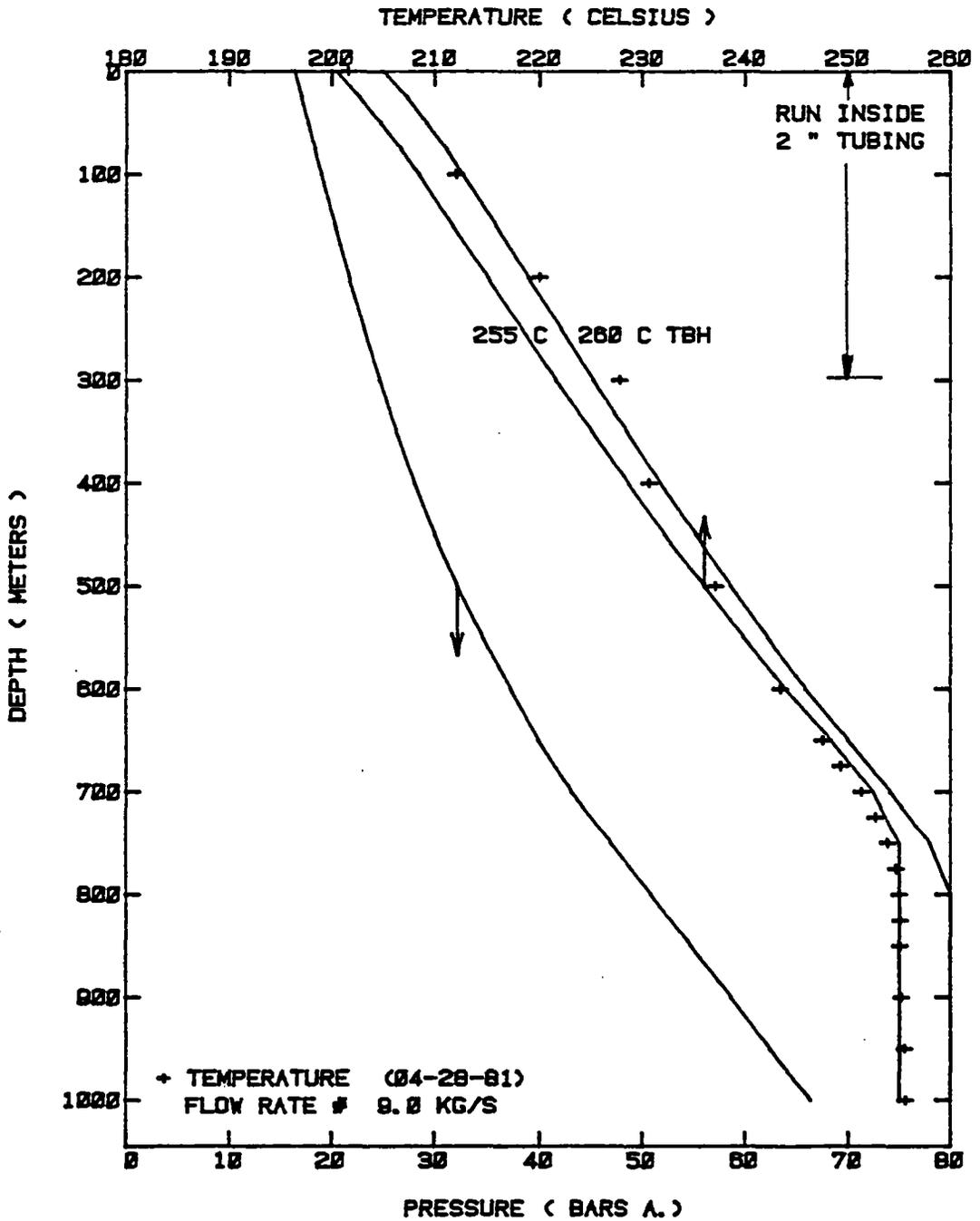


Figure 33  
COMPUTED AND EXPERIMENTAL RESULTS  
TEMPERATURE AND PRESSURE PROFILES  
PRODUCTION WITH 6 IN. OUTLET PIPE



## 7 - INCIDENCE DES PROPRIETES DU FLUIDE REEL

Pour la simplicité des calculs, on a considéré dans cette approche que le fluide géothermal était constitué d'eau pure. En réalité, les divers coefficients caractérisant le fluide sont fonction de la salinité de celui-ci. Les variables sont tabulées : densité, viscosité, enthalpie, pression de saturation, etc..., et disponibles dans la littérature. Toutefois, lorsque les calculs sont effectués par ordinateur, la recherche d'une valeur dans les tables par interpolation peut nécessiter une procédure assez longue. Il est sans doute plus simple dans ce cas de définir au préalable des fonctions d'interpolation simples, sous la forme de polynômes ou de quotient de polynômes dont l'évaluation est plus rapide.

En reprenant le cas du dernier exemple d'application (Asal 1), on constate que l'erreur sur la différence de pression est de l'ordre de 5 %, et que l'incidence sur la valeur de la pression d'ébullition est d'environ 1 bar (salinité totale = 10 % en poids).

En présence d'une certaine teneur en gaz non condensable (CO<sub>2</sub>), diverses corrections peuvent être nécessaires, lors de l'évaluation du débit massique (pression critique) ou de celle de la pression de gisement (pression partielle de CO<sub>2</sub>). R. James recommande par exemple de corriger la pression critique mesurée lorsque la teneur en CO<sub>2</sub> est supérieur à 2 % (poids).

Sur le plan pratique, on peut toutefois s'interroger quant à l'opportunité d'une correction de salinité, surtout si l'on compare l'ordre de grandeur de ce dernier effet par rapport aux hypothèses de la formulation et à la précision des mesures de terrain.

## 8 - CONCLUSIONS

L'approche du comportement d'un forage géothermique à production diphasique eau-vapeur est abordée par modèles numériques. Après une description schématique des divers phénomènes physiques, on présente une formulation simple du problème à résoudre, en mettant en évidence les équations générales retenues ainsi que les principales relations empiriques pouvant être utilisées.

Trois méthodes de résolution, de complexité croissante, sont examinées : deux d'entre elles, suffisamment simples, sont utilisables sur le champ à l'aide de tables et d'une calculatrice. La dernière méthode (modèle numérique), plus particulièrement adaptée à l'interprétation de détail des résultats, nécessite l'emploi d'un petit calculateur.

Le traitement de plusieurs exemples d'application permet ensuite d'estimer la nature, l'ordre de grandeur et la variation des divers paramètres et variables, caractéristiques de l'exploitation de la ressource géothermique en haute énergie.

On notera enfin qu'une certaine part d'empirisme est encore de règle dans ce domaine, et que la détermination de quelques paramètres, tel que le coefficient de frottement, est souvent imprécise. Il convient donc de considérer les résultats de calcul comme des estimations probables, dont l'unicité n'est pas certaine, et à vérifier à l'aide de toutes les informations disponibles.

9 - ANNEXES

## 9.1. - NOMENCLATURE

### Variables :

A	Surface ou section d'écoulement (m <sup>2</sup> )
C	Coefficient de rabattement (Pa.s/kg)
D	Diamètre interne (m)
E	Energie totale (J, cal)
Fr	Nombre de Froude
f	Facteur de frottement
g	Accélération de la pesanteur (m/s <sup>2</sup> )
h	Enthalpie (J/kg, cal/kg)
K	Perméabilité intrinsèque (m <sup>2</sup> )
l	Chaleur latente de vaporisation (J/kg, cal/kg)
L	Epaisseur productive (m)
M	Débit massique (kg/s)
P	Pression (Pa)
Q	Débit volumique (m <sup>3</sup> /s)
r	Rayon du forage (m)
R	Rayon d'action du forage (m)
S	Rapport de glissement
T	Température (C, K)
U	Vitesse du fluide (m/s)
V	Volume spécifique (m <sup>3</sup> /kg)
W	Débit massique spécifique $W = M/A$ (kg/m <sup>2</sup> , s)
X	Titre en vapeur (massique)
Z	Profondeur (m)
$\alpha$	Fraction volumique = $A_V/A$
$\mu$	Viscosité (Pa.s)
$\rho$	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )

Autres variables définies dans le texte

Indices :

T Surface, tête de puits  
R Réservoir  
E Ebullition  
F Fond de puits  
L Liquide  
V Vapeur  
D Diphasique (mélange)

Opérateurs :

$\nabla$ . Divergence  
 $\nabla$  Gradient  
 $\bar{X}$  Valeur moyenne de X sur une longueur donnée

## 9.2. - CORRELATIONS EMPIRIQUES

Les diverses relations présentées dans cette annexe constituent une liste non exhaustive des principaux résultats expérimentaux publiés dans la littérature durant ces dix dernières années.

Ces relations, baptisées "corrélations empiriques", concernent essentiellement la détermination de la fraction gazeuse  $\alpha$  (ou liquide  $H_L$ ), du rapport de glissement  $S$ , et du gradient de pression dû au frottement.

### 9.2.1. - Fraction gazeuse $\alpha$ et rapport $S$

\* Martinelli et Nelson considèrent une définition de  $\alpha$  en fonction du titre de vapeur  $X$  et de la pression :

$$\frac{M_V}{A_V} = \rho_V \cdot U_V = \frac{X}{\alpha} \cdot W \quad \text{avec } \alpha = \frac{A_V}{A} \quad \text{et } W = \frac{M}{A}$$

$$\frac{M_L}{A_L} = \rho_L \cdot U_L = \frac{1 - X}{1 - \alpha} \cdot W$$

d'où 
$$U_V = \frac{X \cdot W}{\alpha \cdot \rho_V}$$

$$U_L = \frac{(1 - X) \cdot W}{(1 - \alpha) \cdot \rho_L}$$

et 
$$S = \frac{U_V}{U_L} = \frac{X}{1 - X} \cdot \frac{1 - \alpha}{\alpha} \cdot \frac{\rho_L}{\rho_V}$$

$$\alpha = \frac{\rho_L \cdot X}{(1 - X) \cdot \rho_V \cdot S + \rho_L \cdot X} = f(\rho, X)$$

\* Moody définit le facteur  $S$  par la relation :

$$S = \left( \frac{\rho_L}{\rho_V} \right)^{1/3}$$

d'où 
$$\alpha = \frac{\rho_L \cdot X}{(1 - X) \cdot \rho_V^{2/3} \cdot \rho_L^{1/3} + \rho_L \cdot X}$$

- \* Smith propose une corrélation empirique basée sur l'hypothèse d'un mélange homogène assimilable à un fluide unique de densité variable :

$$\frac{1}{\alpha} = 1 + \frac{\rho_V}{\rho_L} \cdot K \cdot b + \frac{\rho_L}{\rho_L} \cdot (1 - K) \cdot b \left( \frac{\rho_L + K \cdot b \cdot \rho_V}{\rho_V + K \cdot b \cdot \rho_V} \right)^{1/2}$$

avec  $b = \frac{1}{X} - 1$

et  $K =$  rapport du débit liquide au débit massique total.

Pour les deux cas limites,  $K = 0$  et  $K = 1$ , on retrouve les deux expressions précédentes :

$$K = 1 \rightarrow \alpha = \frac{\rho_L \cdot X}{(1 - X) \cdot \rho_V + \rho_L \cdot X} \quad (\text{Martinelli avec } S = 1)$$

$$K = 0 \rightarrow \alpha = \frac{\rho_L \cdot X}{(1 - X) \cdot \rho_V \cdot S + \rho_L \cdot X} \quad (\text{Moody, mais avec } S = \left( \frac{\rho_L}{\rho_V} \right)^{1/2})$$

- \* Bankoff propose pour le régime de bulles, avec les mêmes hypothèses :

$$\alpha = \frac{A \cdot X \cdot \rho_L}{(1 - X) \rho_V + \rho_L \cdot X}$$

où  $A$  est un coefficient dépendant de la pression :

$$A = 0.71 + 0.00145 P$$

Cette relation est applicable pour les faibles teneurs en vapeur, inférieures à 10 %.

- \* Hagedorn et Brown utilisent une relation plus complexe où interviennent différents nombres adimensionnels (vitesse du liquide, vitesse du gaz, diamètre réduit, tension superficielle du liquide). La détermination de la fraction liquide  $(1 - \alpha) = H_L$  est alors obtenue graphiquement. Ces mêmes nombres fournissent également le type de régime d'écoulement.
- \* Parmi les références récentes, on peut encore citer les travaux de Levy, Thom, Duns, Orkiszewski, non détaillés dans cette annexe (voir bibliographie).

9.2.2. - Gradient de pression dû au frottement :  $\nabla P_2$

\* Lockhart et Martinelli ont obtenu une relation empirique en interprétant un grand nombre de données. La méthode consiste à trouver un coefficient de proportionnalité (multiplicateur  $\phi$ ) liant le gradient de pression en zone diphasique au gradient de pression dans le liquide ou la vapeur seul :

$$\nabla P_2^D = \phi_L^2 \cdot \nabla P_2^L$$

$$\text{ou } \nabla P_2^D = \phi_V^2 \cdot \nabla P_2^V$$

où les indices D, L, V signifient respectivement : diphasique, liquide, vapeur.

$$\text{avec } \phi_L^2 = 1 + \frac{C}{a} + \frac{1}{a^2}$$

$$\text{et } \phi_V^2 = 1 + C \cdot a + a^2$$

$$C = \frac{1}{S} \left( \frac{\rho_L}{\rho_V} \right)^{1/2} + S \left( \frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{1/2} \quad C = 5 \text{ à } 20$$

$$a^2 = \left( \frac{1-X}{X} \right)^2 \cdot \frac{\rho_V}{\rho_L} \cdot \frac{f_L}{f_V} = \frac{\nabla P_2^L}{\nabla P_2^V}$$

\* A partir de cette forme d'équation de base, de nombreux auteurs ont proposé une expression différente des termes C et a ci-dessus, en particulierisant chaque régime d'écoulement.

### 9.3. - TABLES THERMODYNAMIQUES DE L'EAU ET DE LA VAPEUR

Etat de saturation d'après VDI Wasserdampftafeln avec :

t, T	Température (C, K)
P	Pression (atmosphère technique = kgf/cm <sup>2</sup> )
V'	Volume spécifique du liquide (m <sup>3</sup> /kg)
V''	Volume spécifique de la vapeur (m <sup>3</sup> /kg)
ρ''	Masse volumique de la vapeur (kg/m <sup>3</sup> )
h'	Enthalpie spécifique du liquide (kcal/kg)
h''	Enthalpie spécifique de la vapeur (kcal/kg)
r	Chaleur spécifique de vaporisation (kcal/kg)
S'	Entropie du liquide (kcal/kg, C)
S''	Entropie de la vapeur (kcal/kg, C)

### 9.4. - TABLES THERMODYNAMIQUES EN FONCTION DE LA SALINITE

Les données présentées dans cette annexe sont extraites des tables de John L. HAAS et concernent l'incidence de la concentration en NaCl.

Pour plus de détails, consulter la référence :

"Thermodynamic Properties of the Coexisting Phases and Thermochemical Properties of the NaCl Component in Boiling NaCl Solutions"  
Geological Survey Bulletin 1421-B, 1976.

### Tafel 1. Sättigungszustand (Temperaturtafel)

Table 1. State of Saturation (Temperature Table)

Table 1. Etat saturé (Table de température)

Tabla 1. Estado saturado (Tabla de temperatura)

<i>t</i>	<i>T</i>	<i>p</i>	<i>v'</i>	<i>v''</i>	<i>ρ''</i>	<i>h'</i>	<i>h''</i>	<i>r</i>	<i>s'</i>	<i>s''</i>
°C	°K	at	m <sup>3</sup> /kg	m <sup>3</sup> /kg	kg/m <sup>3</sup>	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	K
0,00	273,15	0,006228	0,0010002	206,3	0,004847	- 0,01	597,5	597,5	- 0,0000	2,1873
0,01	273,16	0,006233	0,0010002	206,2	0,004851	+ 0,00	597,5	597,5	+ 0,0000	2,1872
1	274,15	0,006696	0,0010001	192,0	0,005192	+ 1,00	597,9	596,9	+ 0,0036	2,1866
2	275,15	0,007194	0,0010001	179,9	0,005558	2,00	598,4	596,4	0,0073	2,1746
3	276,15	0,007724	0,0010001	168,2	0,005946	3,01	598,8	595,8	0,0110	2,1654
4	277,15	0,008289	0,0010000	157,3	0,006358	4,01	599,2	595,2	0,0146	2,1622
5	278,15	0,008890	0,0010000	147,2	0,006795	5,02	599,7	594,7	0,0182	2,1560
6	279,15	0,009530	0,0010000	137,8	0,007258	6,02	600,1	594,1	0,0218	2,1500
7	280,15	0,010209	0,0010001	129,1	0,007748	7,02	600,6	593,5	0,0254	2,1439
8	281,15	0,010931	0,0010001	121,0	0,008267	8,03	601,0	593,0	0,0290	2,1380
9	282,15	0,011698	0,0010002	113,4	0,008816	9,03	601,4	592,4	0,0325	2,1321
10	283,15	0,012512	0,0010003	106,4	0,009396	10,03	601,9	591,8	0,0361	2,1262
11	284,15	0,013375	0,0010003	99,91	0,01001	11,03	602,3	591,3	0,0396	2,1204
12	285,15	0,014290	0,0010004	93,84	0,01066	12,03	602,7	590,7	0,0431	2,1146
13	286,15	0,015260	0,0010006	88,18	0,01134	13,03	603,2	590,1	0,0466	2,1089
14	287,15	0,016288	0,0010007	82,90	0,01206	14,03	603,6	589,6	0,0501	2,1033
15	288,15	0,017375	0,0010008	77,98	0,01282	15,03	604,1	589,0	0,0536	2,0977
16	289,15	0,018526	0,0010010	73,38	0,01363	16,03	604,5	588,5	0,0570	2,0921
17	290,15	0,019743	0,0010012	69,09	0,01447	17,03	604,9	587,9	0,0605	2,0866
18	291,15	0,02103	0,0010013	65,09	0,01536	18,03	605,4	587,3	0,0639	2,0812
19	292,15	0,02239	0,0010015	61,34	0,01630	19,03	605,8	586,8	0,0674	2,0758
20	293,15	0,02383	0,0010017	57,84	0,01729	20,03	606,2	586,2	0,0708	2,0704
21	294,15	0,02534	0,0010019	54,56	0,01833	21,03	606,7	585,6	0,0742	2,0651
22	295,15	0,02694	0,0010022	51,49	0,01942	22,03	607,1	585,1	0,0776	2,0598
23	296,15	0,02863	0,0010024	48,62	0,02057	23,03	607,5	584,5	0,0809	2,0546
24	297,15	0,03041	0,0010026	45,93	0,02177	24,02	608,0	583,9	0,0843	2,0494
25	298,15	0,03228	0,0010029	43,40	0,02304	25,02	608,4	583,4	0,0877	2,0443
26	299,15	0,03426	0,0010032	41,03	0,02437	26,02	608,8	582,8	0,0910	2,0392
27	300,15	0,03634	0,0010034	38,81	0,02576	27,02	609,3	582,3	0,0943	2,0342
28	301,15	0,03853	0,0010037	36,73	0,02723	28,02	609,7	581,7	0,0977	2,0292
29	302,15	0,04083	0,0010040	34,77	0,02876	29,02	610,1	581,1	0,1010	2,0242
30	303,15	0,04325	0,0010043	32,93	0,03037	30,01	610,6	580,6	0,1043	2,0193
31	304,15	0,04580	0,0010046	31,20	0,03205	31,01	611,0	580,0	0,1075	2,0145
32	305,15	0,04847	0,0010049	29,57	0,03382	32,01	611,4	579,4	0,1108	2,0096
33	306,15	0,05128	0,0010053	28,04	0,03566	33,01	611,9	578,9	0,1141	2,0049
34	307,15	0,05423	0,0010056	26,60	0,03759	34,01	612,3	578,3	0,1173	2,0001
35	308,15	0,05732	0,0010060	25,24	0,03961	35,00	612,7	577,7	0,1206	1,9954
36	309,15	0,06057	0,0010063	23,97	0,04172	36,00	613,2	577,2	0,1238	1,9907
37	310,15	0,06398	0,0010067	22,76	0,04393	37,00	613,6	576,6	0,1270	1,9861
38	311,15	0,06755	0,0010070	21,63	0,04624	38,00	614,0	576,0	0,1303	1,9815
39	312,15	0,07129	0,0010074	20,56	0,04865	39,00	614,4	575,5	0,1335	1,9770
40	313,15	0,07520	0,0010078	19,55	0,05116	40,00	614,9	574,9	0,1366	1,9725
41	314,15	0,07931	0,0010082	18,59	0,05379	40,99	615,3	574,3	0,1398	1,9680
42	315,15	0,08360	0,0010086	17,69	0,05652	41,99	615,7	573,7	0,1430	1,9635
43	316,15	0,08809	0,0010090	16,84	0,05938	42,99	616,2	573,2	0,1462	1,9591
44	317,15	0,09279	0,0010094	16,04	0,06236	43,99	616,6	572,6	0,1493	1,9548
45	318,15	0,09771	0,0010099	15,28	0,06546	44,99	617,0	572,0	0,1525	1,9504
46	319,15	0,10285	0,0010103	14,56	0,06869	45,99	617,4	571,4	0,1556	1,9461
47	320,15	0,10821	0,0010107	13,88	0,07206	46,98	617,9	570,9	0,1587	1,9419
48	321,15	0,11382	0,0010112	13,23	0,07557	47,98	618,3	570,3	0,1618	1,9376
49	322,15	0,11967	0,0010117	12,62	0,07922	48,98	618,7	569,7	0,1649	1,9335
50	323,15	0,12578	0,0010121	12,05	0,08302	49,98	619,1	569,1	0,1680	1,9293

Tafel I. Sättigungszustand (Temperaturtafel) (Fortsetzung)  
 State of saturation (Temperature Table) (Continuation)

<i>t</i>	<i>T</i>	<i>p</i>	<i>v'</i>	<i>v''</i>	<i>g''</i>	<i>h'</i>	<i>h''</i>	<i>r</i>	<i>s'</i>	<i>s''</i>
50	323,15	0,12578	0,0010121	12,05	0,08302	49,98	619,1	569,1	0,1680	1,9293
51	324,15	0,13216	0,0010126	11,50	0,08697	50,98	619,6	568,6	0,1711	1,9252
52	325,15	0,13881	0,0010131	10,98	0,09108	51,98	620,0	568,0	0,1742	1,9211
53	326,15	0,14575	0,0010136	10,49	0,09535	52,98	620,4	567,4	0,1773	1,9170
54	327,15	0,15298	0,0010140	10,02	0,09979	53,98	620,8	566,8	0,1803	1,9130
55	328,15	0,16051	0,0010145	9,579	0,1044	54,97	621,2	566,3	0,1834	1,9090
56	329,15	0,16836	0,0010150	9,159	0,1092	55,97	621,7	565,7	0,1864	1,9050
57	330,15	0,17654	0,0010156	8,760	0,1142	56,97	622,1	565,1	0,1894	1,9011
58	331,15	0,18505	0,0010161	8,381	0,1193	57,97	622,5	564,5	0,1925	1,8972
59	332,15	0,19391	0,0010166	8,021	0,1247	58,97	622,9	563,9	0,1955	1,8933
60	333,15	0,20313	0,0010171	7,679	0,1302	59,97	623,3	563,3	0,1985	1,8895
61	334,15	0,2127	0,0010177	7,353	0,1360	60,97	623,7	562,8	0,2015	1,8857
62	335,15	0,2227	0,0010182	7,044	0,1420	61,97	624,1	562,2	0,2045	1,8819
63	336,15	0,2331	0,0010188	6,749	0,1482	62,97	624,6	561,6	0,2074	1,8781
64	337,15	0,2438	0,0010193	6,469	0,1546	63,97	625,0	561,0	0,2104	1,8744
65	338,15	0,2550	0,0010199	6,202	0,1612	64,97	625,4	560,4	0,2134	1,8707
66	339,15	0,2667	0,0010205	5,948	0,1681	65,97	625,8	559,8	0,2163	1,8670
67	340,15	0,2787	0,0010211	5,706	0,1752	66,97	626,2	559,2	0,2193	1,8634
68	341,15	0,2913	0,0010217	5,476	0,1826	67,97	626,6	558,6	0,2222	1,8598
69	342,15	0,3043	0,0010223	5,256	0,1903	68,97	627,0	558,0	0,2251	1,8562
70	343,15	0,3178	0,0010228	5,046	0,1982	69,98	627,4	557,5	0,2281	1,8526
71	344,15	0,3318	0,0010235	4,846	0,2063	70,98	627,8	556,9	0,2310	1,8491
72	345,15	0,3463	0,0010241	4,656	0,2148	71,98	628,2	556,3	0,2339	1,8456
73	346,15	0,3613	0,0010247	4,474	0,2235	72,98	628,6	555,7	0,2368	1,8421
74	347,15	0,3769	0,0010253	4,300	0,2326	73,98	629,0	555,1	0,2397	1,8386
75	348,15	0,3931	0,0010259	4,134	0,2419	74,98	629,5	554,5	0,2425	1,8352
76	349,15	0,4098	0,0010266	3,976	0,2515	75,98	629,9	553,9	0,2454	1,8318
77	350,15	0,4272	0,0010272	3,824	0,2615	76,99	630,3	553,3	0,2483	1,8284
78	351,15	0,4451	0,0010279	3,680	0,2718	77,99	630,7	552,7	0,2511	1,8250
79	352,15	0,4637	0,0010285	3,541	0,2824	78,99	631,1	552,1	0,2540	1,8217
80	353,15	0,4829	0,0010292	3,409	0,2933	79,99	631,4	551,5	0,2568	1,8184
81	354,15	0,5028	0,0010299	3,283	0,3046	81,00	631,8	550,9	0,2597	1,8151
82	355,15	0,5234	0,0010305	3,162	0,3163	82,00	632,2	550,2	0,2625	1,8118
83	356,15	0,5447	0,0010312	3,046	0,3283	83,00	632,6	549,6	0,2653	1,8086
84	357,15	0,5667	0,0010319	2,935	0,3407	84,01	633,0	549,0	0,2681	1,8054
85	358,15	0,5894	0,0010326	2,829	0,3535	85,01	633,4	548,4	0,2709	1,8022
86	359,15	0,6129	0,0010333	2,727	0,3667	86,01	633,8	547,8	0,2737	1,7990
87	360,15	0,6372	0,0010340	2,630	0,3803	87,02	634,2	547,2	0,2765	1,7959
88	361,15	0,6623	0,0010347	2,536	0,3942	88,02	634,6	546,6	0,2793	1,7927
89	362,15	0,6882	0,0010354	2,447	0,4087	89,03	635,0	546,0	0,2821	1,7896
90	363,15	0,7149	0,0010361	2,361	0,4235	90,03	635,4	545,3	0,2848	1,7865
91	364,15	0,7425	0,0010369	2,279	0,4388	91,04	635,7	544,7	0,2876	1,7835
92	365,15	0,7710	0,0010376	2,200	0,4545	92,04	636,1	544,1	0,2903	1,7804
93	366,15	0,8004	0,0010384	2,125	0,4707	93,05	636,5	543,5	0,2931	1,7774
94	367,15	0,8307	0,0010391	2,052	0,4873	94,05	636,9	542,8	0,2958	1,7744
95	368,15	0,8619	0,0010399	1,982	0,5045	95,06	637,3	542,2	0,2986	1,7714
96	369,15	0,8941	0,0010406	1,915	0,5221	96,06	637,7	541,6	0,3013	1,7685
97	370,15	0,9274	0,0010414	1,851	0,5402	97,07	638,0	541,0	0,3040	1,7655
98	371,15	0,9616	0,0010421	1,789	0,5589	98,08	638,4	540,3	0,3067	1,7626
99	372,15	0,9969	0,0010429	1,730	0,5780	99,08	638,8	539,7	0,3094	1,7597
100	373,15	1,0332	0,0010437	1,673	0,5977	100,09	639,2	539,1	0,3121	1,7568
101	374,15	1,0707	0,0010445	1,618	0,6180	101,10	639,5	538,4	0,3148	1,7539
102	375,15	1,1092	0,0010453	1,566	0,6388	102,11	639,9	537,8	0,3175	1,7511
103	376,15	1,1489	0,0010461	1,515	0,6601	103,12	640,3	537,1	0,3202	1,7483
104	377,15	1,1898	0,0010469	1,466	0,6821	104,12	640,6	536,5	0,3229	1,7454
105	378,15	1,2318	0,0010477	1,419	0,7046	105,13	641,0	535,9	0,3255	1,7427

Tafel J. Sättigungszustand (Temperaturtafel) (Fortsetzung)  
State of saturation (Temperature Table) (Continuation)

t	T	p	r'	r''	g''	h'	h''	r	s'	s''
105	378,15	1,2318	0,0010477	1,419	0,7046	105,13	641,0	535,9	0,3255	1,7427
106	379,15	1,2751	0,0010455	1,374	0,7277	105,14	641,4	535,2	0,3251	1,7399
107	380,15	1,3190	0,0010494	1,331	0,7515	107,15	641,7	534,6	0,3300	1,7371
108	381,15	1,3654	0,0010502	1,289	0,7758	108,16	642,1	533,9	0,3335	1,7344
109	382,15	1,4125	0,0010510	1,249	0,8008	109,17	642,4	533,3	0,3362	1,7317
110	383,15	1,4609	0,0010519	1,210	0,8265	110,18	642,8	532,6	0,3388	1,7290
111	384,15	1,5107	0,0010527	1,173	0,8528	111,19	643,2	532,0	0,3414	1,7263
112	385,15	1,5618	0,0010536	1,137	0,8798	112,21	643,5	531,3	0,3441	1,7236
113	386,15	1,6144	0,0010544	1,102	0,9075	113,22	643,9	530,7	0,3467	1,7209
114	387,15	1,6684	0,0010553	1,069	0,9359	114,23	644,2	530,0	0,3493	1,7182
115	388,15	1,7239	0,0010562	1,036	0,9650	115,24	644,6	529,3	0,3519	1,7157
116	389,15	1,7809	0,0010571	1,005	0,9948	116,26	644,9	528,7	0,3545	1,7131
117	390,15	1,8395	0,0010579	0,9753	1,025	117,27	645,3	528,0	0,3571	1,7105
118	391,15	1,8996	0,0010588	0,9463	1,057	118,28	645,6	527,3	0,3597	1,7079
119	392,15	1,9613	0,0010597	0,9184	1,089	119,30	646,0	526,7	0,3623	1,7053
120	393,15	2,0246	0,0010606	0,8915	1,122	120,31	646,3	526,0	0,3649	1,7028
121	394,15	2,0896	0,0010615	0,8655	1,155	121,33	646,6	525,3	0,3674	1,7003
122	395,15	2,1562	0,0010625	0,8405	1,190	122,34	647,0	524,6	0,3700	1,6978
123	396,15	2,2246	0,0010634	0,8162	1,225	123,36	647,3	524,0	0,3726	1,6953
124	397,15	2,2948	0,0010643	0,7928	1,261	124,37	647,7	523,3	0,3751	1,6928
125	398,15	2,3667	0,0010652	0,7702	1,298	125,39	648,0	522,6	0,3777	1,6903
126	399,15	2,4405	0,0010662	0,7484	1,336	126,41	648,3	521,9	0,3802	1,6878
127	400,15	2,5162	0,0010671	0,7273	1,375	127,43	648,7	521,2	0,3828	1,6854
128	401,15	2,5937	0,0010681	0,7069	1,415	128,44	649,0	520,5	0,3853	1,6830
129	402,15	2,6732	0,0010691	0,6872	1,455	129,46	649,3	519,8	0,3878	1,6805
130	403,15	2,7546	0,0010700	0,6681	1,497	130,48	649,6	519,2	0,3904	1,6781
131	404,15	2,8380	0,0010710	0,6497	1,539	131,50	650,0	518,5	0,3929	1,6758
132	405,15	2,9235	0,0010720	0,6319	1,583	132,52	650,3	517,8	0,3954	1,6734
133	406,15	3,0110	0,0010730	0,6146	1,627	133,54	650,6	517,1	0,3979	1,6710
134	407,15	3,101	0,0010740	0,5980	1,672	134,57	650,9	516,4	0,4004	1,6687
135	408,15	3,192	0,0010750	0,5818	1,719	135,59	651,2	515,6	0,4029	1,6663
136	409,15	3,286	0,0010760	0,5662	1,766	136,61	651,5	514,9	0,4054	1,6640
137	410,15	3,383	0,0010770	0,5511	1,815	137,63	651,9	514,2	0,4079	1,6617
138	411,15	3,481	0,0010780	0,5364	1,864	138,66	652,2	513,5	0,4104	1,6594
139	412,15	3,582	0,0010790	0,5222	1,915	139,68	652,5	512,8	0,4129	1,6571
140	413,15	3,685	0,0010801	0,5085	1,967	140,71	652,8	512,1	0,4154	1,6548
141	414,15	3,791	0,0010811	0,4952	2,019	141,73	653,1	511,4	0,4178	1,6526
142	415,15	3,898	0,0010821	0,4823	2,073	142,76	653,4	510,6	0,4203	1,6503
143	416,15	4,009	0,0010832	0,4698	2,129	143,78	653,7	509,9	0,4228	1,6481
144	417,15	4,122	0,0010843	0,4577	2,185	144,81	654,0	509,2	0,4252	1,6458
145	418,15	4,237	0,0010853	0,4460	2,242	145,84	654,3	508,4	0,4277	1,6436
146	419,15	4,355	0,0010864	0,4346	2,301	146,87	654,6	507,7	0,4301	1,6414
147	420,15	4,476	0,0010875	0,4236	2,361	147,90	654,9	507,0	0,4326	1,6392
148	421,15	4,599	0,0010886	0,4129	2,422	148,93	655,1	506,2	0,4350	1,6370
149	422,15	4,725	0,0010897	0,4025	2,484	149,96	655,4	505,5	0,4374	1,6349
150	423,15	4,854	0,0010908	0,3924	2,548	150,99	655,7	504,7	0,4399	1,6327
151	424,15	4,985	0,0010919	0,3827	2,613	152,02	656,0	504,0	0,4423	1,6305
152	425,15	5,120	0,0010930	0,3732	2,679	153,05	656,3	503,2	0,4447	1,6284
153	426,15	5,257	0,0010941	0,3640	2,747	154,08	656,6	502,5	0,4471	1,6263
154	427,15	5,397	0,0010953	0,3551	2,816	155,12	656,8	501,7	0,4496	1,6241
155	428,15	5,540	0,0010964	0,3464	2,886	156,15	657,1	501,0	0,4520	1,6220
156	429,15	5,687	0,0010976	0,3380	2,958	157,19	657,4	500,2	0,4544	1,6199
157	430,15	5,836	0,0010987	0,3299	3,032	158,22	657,6	499,4	0,4568	1,6178
158	431,15	5,988	0,0010999	0,3219	3,106	159,26	657,9	498,7	0,4592	1,6158
159	432,15	6,144	0,0011011	0,3142	3,182	160,30	658,2	497,9	0,4616	1,6137
160	433,15	6,303	0,0011022	0,3068	3,260	161,33	658,4	497,1	0,4640	1,6116

Tafel 1. Sättigungszustand (Temperaturtafel) (Fortsetzung)  
 State of saturation (Temperature Table) (Continuation)

t	T	p	v'	v''	ρ''	h'	h''	r	s'	s''
160	433.15	6,303	0,0011022	0,3068	3,260	161,33	658,4	497,1	0,4640	1,6116
161	434.15	6,464	0,0011034	0,2995	3,339	162,37	658,7	496,3	0,4663	1,6096
162	435.15	6,630	0,0011046	0,2924	3,420	163,41	658,9	495,5	0,4687	1,6075
163	436.15	6,798	0,0011058	0,2856	3,502	164,45	659,2	494,7	0,4711	1,6055
164	437.15	6,970	0,0011070	0,2789	3,586	165,49	659,5	494,0	0,4735	1,6034
165	438.15	7,146	0,0011082	0,2724	3,671	166,54	659,7	493,2	0,4758	1,6014
166	439.15	7,325	0,0011095	0,2661	3,758	167,58	659,9	492,4	0,4782	1,5994
167	440.15	7,507	0,0011107	0,2600	3,847	168,62	660,2	491,6	0,4806	1,5974
168	441.15	7,693	0,0011119	0,2540	3,937	169,67	660,4	490,8	0,4829	1,5954
169	442.15	7,883	0,0011132	0,2482	4,029	170,71	660,7	490,0	0,4853	1,5934
170	443.15	8,076	0,0011145	0,2426	4,123	171,76	660,9	489,1	0,4876	1,5914
171	444.15	8,274	0,0011157	0,2371	4,218	172,81	661,1	488,3	0,4900	1,5895
172	445.15	8,474	0,0011170	0,2317	4,316	173,85	661,4	487,5	0,4923	1,5875
173	446.15	8,679	0,0011183	0,2265	4,415	174,90	661,6	486,7	0,4947	1,5855
174	447.15	8,888	0,0011196	0,2215	4,515	175,95	661,8	485,9	0,4970	1,5836
175	448.15	9,100	0,0011209	0,2165	4,618	177,00	662,0	485,0	0,4993	1,5817
176	449.15	9,317	0,0011222	0,2117	4,723	178,05	662,3	484,2	0,5017	1,5797
177	450.15	9,538	0,0011235	0,2071	4,829	179,10	662,5	483,4	0,5040	1,5778
178	451.15	9,762	0,0011248	0,2025	4,937	180,16	662,7	482,5	0,5063	1,5759
179	452.15	9,991	0,0011262	0,1981	5,048	181,21	662,9	481,7	0,5086	1,5740
180	453.15	10,224	0,0011275	0,1938	5,160	182,27	663,1	480,8	0,5110	1,5721
181	454.15	10,462	0,0011289	0,1896	5,274	183,32	663,3	480,0	0,5133	1,5702
182	455.15	10,703	0,0011302	0,1855	5,391	184,38	663,5	479,1	0,5156	1,5683
183	456.15	10,949	0,0011316	0,1815	5,509	185,44	663,7	478,3	0,5179	1,5664
184	457.15	11,200	0,0011330	0,1776	5,629	186,50	663,9	477,4	0,5202	1,5645
185	458.15	11,455	0,0011344	0,1739	5,752	187,56	664,1	476,5	0,5225	1,5626
186	459.15	11,714	0,0011358	0,1702	5,877	188,62	664,3	475,7	0,5248	1,5608
187	460.15	11,978	0,0011372	0,1666	6,003	189,68	664,5	474,8	0,5271	1,5589
188	461.15	12,247	0,0011386	0,1631	6,132	190,74	664,7	473,9	0,5294	1,5571
189	462.15	12,521	0,0011401	0,1596	6,264	191,81	664,8	473,0	0,5317	1,5552
190	463.15	12,799	0,0011415	0,1563	6,397	192,87	665,0	472,1	0,5340	1,5534
191	464.15	13,082	0,0011430	0,1531	6,533	193,94	665,2	471,2	0,5362	1,5515
192	465.15	13,370	0,0011444	0,1499	6,671	195,01	665,4	470,3	0,5385	1,5497
193	466.15	13,662	0,0011459	0,1468	6,812	196,07	665,5	469,4	0,5408	1,5479
194	467.15	13,960	0,0011474	0,1438	6,955	197,14	665,7	468,5	0,5431	1,5461
195	468.15	14,263	0,0011489	0,1408	7,100	198,21	665,8	467,6	0,5453	1,5442
196	469.15	14,571	0,0011504	0,1380	7,248	199,29	666,0	466,7	0,5476	1,5424
197	470.15	14,884	0,0011519	0,1352	7,398	200,36	666,2	465,8	0,5499	1,5406
198	471.15	15,203	0,0011534	0,1324	7,551	201,43	666,3	464,9	0,5521	1,5388
199	472.15	15,526	0,0011549	0,1298	7,706	202,51	666,5	464,0	0,5544	1,5370
200	473.15	15,855	0,0011565	0,1272	7,864	203,59	666,6	463,0	0,5567	1,5352
201	474.15	16,190	0,0011581	0,1246	8,025	204,66	666,7	462,1	0,5589	1,5335
202	475.15	16,530	0,0011596	0,1221	8,188	205,74	666,9	461,1	0,5612	1,5317
203	476.15	16,875	0,0011612	0,1197	8,354	206,82	667,0	460,2	0,5634	1,5299
204	477.15	17,226	0,0011628	0,1173	8,522	207,90	667,1	459,2	0,5657	1,5281
205	478.15	17,583	0,0011644	0,1150	8,694	208,99	667,3	458,3	0,5679	1,5264
206	479.15	17,945	0,0011660	0,1128	8,868	210,07	667,4	457,3	0,5702	1,5246
207	480.15	18,314	0,0011676	0,1106	9,045	211,16	667,5	456,4	0,5724	1,5229
208	481.15	18,688	0,0011693	0,1084	9,225	212,24	667,6	455,4	0,5747	1,5211
209	482.15	19,068	0,0011709	0,1063	9,408	213,33	667,8	454,3	0,5769	1,5194
210	483.15	19,454	0,0011726	0,1042	9,593	214,42	667,9	453,4	0,5791	1,5176
211	484.15	19,846	0,0011743	0,1022	9,782	215,51	668,0	452,5	0,5814	1,5159
212	485.15	20,244	0,0011760	0,1003	9,974	216,60	668,1	451,5	0,5836	1,5141
213	486.15	20,648	0,0011777	0,09834	10,17	217,70	668,2	450,5	0,5858	1,5124
214	487.15	21,058	0,0011794	0,09646	10,37	218,79	668,3	449,5	0,5880	1,5107
215	488.15	21,475	0,0011811	0,09463	10,57	219,89	668,4	448,5	0,5903	1,5089

Tafel 1. Sättigungszustand (Temperaturtafel) (Fortsetzung)  
 State of saturation (Temperature Table) (Continuation)

<i>t</i>	<i>T</i>	<i>p</i>	<i>v'</i>	<i>v''</i>	<i>q''</i>	<i>h'</i>	<i>h''</i>	<i>r</i>	<i>s'</i>	<i>s''</i>
215	488,15	21,475	0,0011811	0,09463	10,57	219,89	668,4	448,5	0,5903	1,5089
216	489,15	21,898	0,0011829	0,09283	10,77	220,99	668,4	447,5	0,5925	1,5072
217	490,15	22,328	0,0011846	0,09107	10,98	222,09	668,5	446,4	0,5947	1,5055
218	491,15	22,764	0,0011864	0,08936	11,19	223,19	668,6	445,4	0,5969	1,5038
219	492,15	23,206	0,0011882	0,08768	11,41	224,29	668,7	444,4	0,5991	1,5021
220	493,15	23,656	0,0011900	0,08604	11,62	225,39	668,7	443,4	0,6014	1,5004
221	494,15	24,112	0,0011918	0,08443	11,84	226,50	668,8	442,3	0,6036	1,4987
222	495,15	24,574	0,0011936	0,08286	12,07	227,60	668,9	441,3	0,6058	1,4970
223	496,15	25,044	0,0011954	0,08132	12,30	228,71	668,9	440,2	0,6080	1,4953
224	497,15	25,520	0,0011973	0,07982	12,53	229,82	669,0	439,2	0,6102	1,4936
225	498,15	26,004	0,0011992	0,07835	12,76	230,94	669,0	438,1	0,6124	1,4919
226	499,15	26,494	0,0012010	0,07691	13,00	232,05	669,1	437,0	0,6146	1,4902
227	500,15	26,992	0,0012029	0,07550	13,24	233,16	669,1	436,0	0,6168	1,4885
228	501,15	27,496	0,0012048	0,07412	13,49	234,28	669,2	434,9	0,6190	1,4868
229	502,15	28,008	0,0012068	0,07277	13,74	235,40	669,2	433,8	0,6212	1,4851
230	503,15	28,528	0,0012087	0,07145	14,00	236,52	669,2	432,7	0,6234	1,4834
231	504,15	29,054	0,0012117	0,07016	14,25	237,64	669,3	431,6	0,6256	1,4817
232	505,15	29,588	0,0012127	0,06889	14,52	238,77	669,3	430,5	0,6278	1,4800
233	506,15	30,130	0,0012147	0,06765	14,78	239,9	669,3	429,4	0,6300	1,4784
234	507,15	30,679	0,0012167	0,06643	15,05	241,0	669,3	428,3	0,6322	1,4767
235	508,15	31,236	0,0012187	0,06525	15,33	242,1	669,3	427,2	0,6344	1,4750
236	509,15	31,801	0,0012207	0,06408	15,61	243,3	669,3	426,0	0,6366	1,4733
237	510,15	32,373	0,0012228	0,06294	15,89	244,4	669,3	424,9	0,6388	1,4717
238	511,15	32,954	0,0012249	0,06182	16,18	245,6	669,3	423,8	0,6410	1,4700
239	512,15	33,542	0,0012270	0,06073	16,47	246,7	669,3	422,6	0,6432	1,4683
240	513,15	34,138	0,0012291	0,05965	16,76	247,8	669,3	421,5	0,6454	1,4667
241	514,15	34,743	0,0012312	0,05860	17,06	249,0	669,3	420,3	0,6475	1,4650
242	515,15	35,355	0,0012334	0,05757	17,37	250,1	669,3	419,1	0,6497	1,4633
243	516,15	35,976	0,0012355	0,05656	17,68	251,3	669,2	418,0	0,6519	1,4617
244	517,15	36,606	0,0012377	0,05558	17,99	252,4	669,2	416,8	0,6541	1,4600
245	518,15	37,243	0,0012399	0,05461	18,31	253,6	669,1	415,6	0,6563	1,4583
246	519,15	37,889	0,0012422	0,05366	18,64	254,7	669,1	414,4	0,6585	1,4567
247	520,15	38,544	0,0012444	0,05272	18,97	255,9	669,1	413,2	0,6607	1,4550
248	521,15	39,207	0,0012467	0,05181	19,30	257,0	669,0	412,0	0,6628	1,4533
249	522,15	39,879	0,0012490	0,05092	19,64	258,2	668,9	410,8	0,6650	1,4517
250	523,15	40,560	0,0012513	0,05004	19,99	259,3	668,9	409,5	0,6672	1,4500
251	524,15	41,250	0,0012536	0,04918	20,33	260,5	668,8	408,3	0,6694	1,4483
252	525,15	41,949	0,0012560	0,04833	20,69	261,7	668,7	407,1	0,6716	1,4467
253	526,15	42,656	0,0012584	0,04750	21,05	262,8	668,6	405,8	0,6738	1,4450
254	527,15	43,373	0,0012608	0,04669	21,42	264,0	668,6	404,6	0,6759	1,4433
255	528,15	44,099	0,0012632	0,04590	21,79	265,2	668,5	403,3	0,6781	1,4417
256	529,15	44,834	0,0012656	0,04511	22,17	266,3	668,4	402,0	0,6803	1,4400
257	530,15	45,579	0,0012681	0,04435	22,55	267,5	668,3	400,7	0,6825	1,4383
258	531,15	46,332	0,0012706	0,04360	22,94	268,7	668,2	399,4	0,6847	1,4367
259	532,15	47,096	0,0012731	0,04286	23,33	269,9	668,0	398,1	0,6869	1,4350
260	533,15	47,869	0,0012756	0,04213	23,73	271,1	667,9	396,8	0,6890	1,4333
261	534,15	48,652	0,0012782	0,04142	24,14	272,3	667,8	395,5	0,6912	1,4316
262	535,15	49,444	0,0012808	0,04073	24,55	273,5	667,7	394,2	0,6934	1,4300
263	536,15	50,246	0,0012834	0,04004	24,97	274,6	667,5	392,9	0,6956	1,4283
264	537,15	51,058	0,0012861	0,03937	25,40	275,8	667,4	391,5	0,6978	1,4266
265	538,15	51,880	0,0012887	0,03871	25,83	277,0	667,2	390,2	0,7000	1,4249
266	539,15	52,713	0,0012914	0,03806	26,27	278,2	667,1	388,8	0,7021	1,4232
267	540,15	53,555	0,0012942	0,03743	26,72	279,5	666,9	387,4	0,7043	1,4215
268	541,15	54,407	0,0012969	0,03680	27,17	280,7	666,7	386,1	0,7065	1,4199
269	542,15	55,270	0,0012997	0,03619	27,63	281,9	666,5	384,7	0,7087	1,4182
270	543,15	56,144	0,0013025	0,03559	28,10	283,1	666,3	383,3	0,7109	1,4165

Tafel 1. Sättigungszustand (Temperaturtafel) (Fortsetzung)  
 State of saturation (Temperature Table) (Continuation)

<i>t</i>	<i>T</i>	<i>p</i>	<i>v'</i>	<i>v''</i>	<i>q''</i>	<i>h'</i>	<i>h''</i>	<i>r</i>	<i>s'</i>	<i>s''</i>
270	543.15	56.144	0,0013025	0,03559	28.10	283.1	666.3	383.3	0,7109	1,4165
271	544.15	57.027	0,0013053	0,03500	28.57	284.3	666.2	381.8	0,7131	1,4148
272	545.15	57.922	0,0013082	0,03442	29.06	285.5	666.0	380.4	0,7153	1,4131
273	546.15	58.827	0,0013111	0,03385	29.55	286.7	665.7	379.0	0,7175	1,4114
274	547.15	59.742	0,0013141	0,03329	30.04	288.0	665.5	377.6	0,7197	1,4096
275	548.15	60.669	0,0013170	0,03274	30.55	289.2	665.3	376.1	0,7219	1,4079
276	549.15	61.607	0,0013200	0,03220	31.06	290.4	665.1	374.6	0,7241	1,4062
277	550.15	62.555	0,0013231	0,03166	31.58	291.7	664.8	373.2	0,7262	1,4045
278	551.15	63.515	0,0013261	0,03114	32.11	292.9	664.6	371.7	0,7284	1,4028
279	552.15	64.486	0,0013292	0,03063	32.65	294.2	664.4	370.2	0,7306	1,4010
280	553.15	65.468	0,0013324	0,03013	33.19	295.4	664.1	368.7	0,7329	1,3993
281	554.15	66.461	0,0013356	0,02963	33.75	296.7	663.8	367.2	0,7351	1,3976
282	555.15	67.466	0,0013388	0,02914	34.31	297.9	663.5	365.6	0,7373	1,3958
283	556.15	68.482	0,0013420	0,02867	34.88	299.2	663.3	364.1	0,7395	1,3941
284	557.15	69.511	0,0013453	0,02820	35.47	300.4	663.0	362.5	0,7417	1,3923
285	558.15	70.550	0,0013487	0,02773	36.06	301.7	662.7	361.0	0,7439	1,3906
286	559.15	71.602	0,0013520	0,02728	36.66	303.0	662.4	359.4	0,7461	1,3888
287	560.15	72.666	0,0013554	0,02683	37.27	304.3	662.0	357.8	0,7483	1,3870
288	561.15	73.741	0,0013589	0,02639	37.89	305.5	661.7	356.2	0,7506	1,3852
289	562.15	74.829	0,0013624	0,02596	38.52	306.8	661.4	354.6	0,7528	1,3835
290	563.15	75.929	0,0013659	0,02554	39.16	308.1	661.0	352.9	0,7550	1,3817
291	564.15	77.041	0,0013695	0,02512	39.81	309.4	660.7	351.3	0,7572	1,3799
292	565.15	78.166	0,0013732	0,02471	40.48	310.7	660.3	349.6	0,7595	1,3781
293	566.15	79.303	0,0013769	0,02430	41.15	312.0	660.0	347.9	0,7617	1,3763
294	567.15	80.452	0,0013806	0,02390	41.83	313.3	659.6	346.3	0,7640	1,3744
295	568.15	81.615	0,0013844	0,02351	42.53	314.6	659.2	344.6	0,7662	1,3726
296	569.15	82.790	0,0013882	0,02313	43.24	315.9	658.8	342.8	0,7684	1,3708
297	570.15	83.978	0,0013921	0,02275	43.96	317.3	658.4	341.1	0,7707	1,3689
298	571.15	85.179	0,0013960	0,02238	44.69	318.6	657.9	339.4	0,7730	1,3671
299	572.15	86.394	0,0014000	0,02201	45.43	319.9	657.5	337.6	0,7752	1,3652
300	573.15	87.621	0,0014041	0,02165	46.19	321.3	657.1	335.8	0,7775	1,3634
301	574.15	88.862	0,0014082	0,02129	46.96	322.6	656.6	334.0	0,7798	1,3615
302	575.15	90.116	0,0014123	0,02094	47.75	324.0	656.2	332.2	0,7820	1,3596
303	576.15	91.384	0,0014166	0,02060	48.54	325.3	655.7	330.4	0,7843	1,3577
304	577.15	92.665	0,0014208	0,02026	49.36	326.7	655.2	328.5	0,7866	1,3558
305	578.15	93.960	0,0014252	0,01993	50.18	328.0	654.7	326.7	0,7889	1,3539
306	579.15	95.269	0,0014296	0,01960	51.02	329.4	654.2	324.8	0,7912	1,3520
307	580.15	96.592	0,0014341	0,01928	51.88	330.8	653.7	322.9	0,7935	1,3500
308	581.15	97.929	0,0014387	0,01896	52.75	332.2	653.1	321.0	0,7958	1,3481
309	582.15	99.281	0,0014433	0,01864	53.64	333.6	652.6	319.1	0,7981	1,3461
310	583.15	100.646	0,0014480	0,01833	54.54	335.0	652.1	317.1	0,8004	1,3442
311	584.15	102.03	0,0014527	0,01803	55.46	336.4	651.5	315.1	0,8027	1,3422
312	585.15	103.42	0,0014576	0,01773	56.40	337.8	650.9	313.1	0,8051	1,3402
313	586.15	104.83	0,0014625	0,01743	57.36	339.2	650.3	311.1	0,8074	1,3382
314	587.15	106.25	0,0014675	0,01714	58.33	340.6	649.7	309.1	0,8098	1,3362
315	588.15	107.69	0,0014726	0,01686	59.33	342.1	649.1	307.0	0,8121	1,3341
316	589.15	109.15	0,0014778	0,01657	60.34	343.5	648.5	305.0	0,8145	1,3321
317	590.15	110.62	0,0014831	0,01629	61.37	344.9	647.8	302.9	0,8169	1,3300
318	591.15	112.10	0,0014885	0,01602	62.43	346.4	647.1	300.7	0,8192	1,3280
319	592.15	113.60	0,0014939	0,01575	63.50	347.9	646.5	298.6	0,8216	1,3259
320	593.15	115.12	0,0014995	0,01548	64.60	349.3	645.8	296.4	0,8240	1,3238
321	594.15	116.65	0,0015052	0,01522	65.72	350.8	645.0	294.2	0,8264	1,3216
322	595.15	118.20	0,0015109	0,01496	66.86	352.3	644.3	292.0	0,8288	1,3195
323	596.15	119.76	0,0015168	0,01470	68.03	353.8	643.6	289.8	0,8313	1,3173
324	597.15	121.34	0,0015228	0,01445	69.23	355.3	642.8	287.5	0,8337	1,3151
325	598.15	122.93	0,0015289	0,01419	70.45	356.8	642.0	285.2	0,8362	1,3129

Tafel I. Sättigungszustand (Temperaturtafel) (Fortsetzung)  
State of saturation (Temperature Table) (Continuation)

t	T	p	v'	v''	g''	h'	h''	r	s'	s''
325	598,15	122,93	0,0015289	0,01419	70,45	356,8	642,0	285,2	0,8362	1,3129
326	599,15	124,55	0,0015352	0,01395	71,70	358,4	641,2	282,8	0,8386	1,3107
327	600,15	126,17	0,0015416	0,01370	72,97	359,9	640,4	280,5	0,8411	1,3084
328	601,15	127,82	0,0015481	0,01346	74,28	361,5	639,5	278,1	0,8436	1,3061
329	602,15	129,48	0,0015547	0,01322	75,62	363,0	638,7	275,6	0,8461	1,3038
330	603,15	131,16	0,0015615	0,01299	76,99	364,6	637,8	273,2	0,8486	1,3015
331	604,15	132,86	0,0015684	0,01276	78,39	366,2	636,8	270,6	0,8511	1,2991
332	605,15	134,57	0,0015755	0,01253	79,83	367,8	635,9	268,1	0,8536	1,2967
333	606,15	136,30	0,0015827	0,01230	81,30	369,4	634,9	265,5	0,8562	1,2943
334	607,15	138,05	0,0015902	0,01208	82,81	371,0	633,9	262,9	0,8588	1,2918
335	608,15	139,82	0,0015978	0,01185	84,36	372,7	632,9	260,2	0,8614	1,2893
336	609,15	141,61	0,0016055	0,01163	85,95	374,3	631,8	257,5	0,8640	1,2867
337	610,15	143,41	0,0016135	0,01142	87,58	376,0	630,7	254,7	0,8666	1,2841
338	611,15	145,23	0,0016217	0,01120	89,26	377,7	629,6	251,9	0,8692	1,2815
339	612,15	147,07	0,0016301	0,01099	90,99	379,4	628,4	249,1	0,8719	1,2788
340	613,15	148,93	0,0016387	0,01078	92,76	381,1	627,2	246,2	0,8746	1,2761
341	614,15	150,81	0,0016476	0,01057	94,58	382,8	626,0	243,2	0,8773	1,2733
342	615,15	152,71	0,0016567	0,01037	96,46	384,6	624,8	240,2	0,8800	1,2705
343	616,15	154,63	0,0016661	0,01016	98,39	386,3	623,5	237,1	0,8827	1,2676
344	617,15	156,56	0,0016758	0,009962	100,4	388,1	622,1	234,0	0,8855	1,2647
345	618,15	158,52	0,0016858	0,009763	102,4	389,9	620,7	230,8	0,8883	1,2618
346	619,15	160,50	0,0016961	0,009566	104,5	391,8	619,3	227,6	0,8912	1,2588
347	620,15	162,49	0,0017067	0,009371	106,7	393,6	617,9	224,3	0,8940	1,2557
348	621,15	164,51	0,0017178	0,009178	109,0	395,5	616,4	220,9	0,8969	1,2526
349	622,15	166,55	0,0017292	0,008988	111,3	397,4	614,8	217,4	0,8999	1,2494
350	623,15	168,61	0,0017411	0,008799	113,6	399,3	613,3	213,9	0,9028	1,2462
351	624,15	170,69	0,0017532	0,008609	116,2	401,4	611,6	210,3	0,9060	1,2429
352	625,15	172,80	0,0017661	0,008420	118,8	403,5	609,9	206,4	0,9093	1,2394
353	626,15	174,92	0,0017796	0,008232	121,5	405,6	608,1	202,5	0,9126	1,2359
354	627,15	177,07	0,0017937	0,008045	124,3	407,8	606,3	198,5	0,9159	1,2323
355	628,15	179,24	0,0018085	0,007859	127,2	410,0	604,4	194,4	0,9193	1,2287
356	629,15	181,43	0,0018241	0,007674	130,3	412,2	602,4	190,2	0,9226	1,2249
357	630,15	183,65	0,0018406	0,007490	133,5	414,5	600,3	185,9	0,9260	1,2210
358	631,15	185,88	0,0018580	0,007306	136,9	416,7	598,2	181,5	0,9295	1,2170
359	632,15	188,15	0,0018764	0,007123	140,4	419,0	596,0	177,0	0,9330	1,2129
360	633,15	190,43	0,0018959	0,006940	144,1	421,4	593,6	172,3	0,9365	1,2086
361	634,15	192,74	0,0019167	0,006757	148,0	423,8	591,2	167,4	0,9401	1,2041
362	635,15	195,08	0,0019388	0,006573	152,1	426,2	588,6	162,4	0,9439	1,1995
363	636,15	197,44	0,0019626	0,006388	156,5	428,8	585,9	157,1	0,9477	1,1946
364	637,15	199,82	0,0019882	0,006201	161,3	431,4	583,0	151,6	0,9517	1,1896
365	638,15	202,24	0,0020160	0,006012	166,3	434,2	579,9	145,7	0,9559	1,1842
366	639,15	204,67	0,0020464	0,005819	171,9	437,1	576,6	139,5	0,9603	1,1784
367	640,15	207,14	0,0020802	0,005621	177,9	440,3	573,0	132,7	0,9650	1,1723
368	641,15	209,63	0,0021181	0,005416	184,6	443,6	569,0	125,4	0,9700	1,1656
369	642,15	212,15	0,0021618	0,005201	192,3	447,3	564,6	117,3	0,9756	1,1582
370	643,15	214,69	0,0022136	0,004973	201,1	451,5	559,6	108,1	0,9818	1,1499
371	644,15	217,27	0,0022778	0,004723	211,7	456,3	553,6	97,3	0,9892	1,1402
372	645,15	219,87	0,0023636	0,004439	225,3	462,3	546,2	83,9	0,9982	1,1283
373	646,15	222,50	0,0024963	0,004084	244,9	470,7	536,0	65,3	1,0109	1,1120
374	647,15	225,16	0,0028427	0,003466	288,5	488,9	515,0	26,2	1,0388	1,0792
374,15	647,30	225,56		0,003170	315,5		503,3	0,0		1,0012

Kritische Daten (Constants at critical point; constantes du point critique):

Temperatur (Température) . . . . . 374,15 °C                      Enthalpie . . . . . 503,3 kcal/kg  
 Druck (Pressure; Pression) . . . . . 225,56 kp/cm<sup>2</sup>            Entropie . . . . . 1,0612 kcal/kg grd  
 Spez. Volumen (Spec. Vol.: Volume spécifique) 0,00317 m<sup>3</sup>/kg

Table 1. NaCl concentration: 0.0000 mol/kg H<sub>2</sub>O      0.00 wt percent      0.000 mol percent

t (°C)	p (bars)	$\rho^L$ (g cm <sup>-3</sup> )	$\bar{V}_2^L$ (cm <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> )	$\bar{S}_2^L$ (J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$\bar{H}_2^L$ (J mol <sup>-1</sup> )	$v^L$ (cm <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> )	$s^L$ (J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$\Delta S$ (J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$s^G$	$H^L$ (J mol <sup>-1</sup> )	$\Delta H$ (J mol <sup>-1</sup> )	$H^G$
80.	0.474	0.972	17.91	-21.806	-16732.	18.54	19.296	117.814	137.110	6017.	41606.	47624.
85.	0.578	0.969	17.61	-22.754	-17700.	18.60	20.356	115.534	135.890	6395.	41378.	47773.
90.	0.701	0.965	17.29	-23.737	-18684.	18.66	21.405	113.307	134.712	6773.	41148.	47921.
95.	0.845	0.962	16.94	-24.762	-19689.	18.73	22.443	111.131	133.574	7153.	40913.	48066.
100.	1.013	0.958	16.58	-25.836	-20717.	18.80	23.465	109.010	132.475	7532.	40677.	48209.
105.	1.208	0.955	16.19	-26.966	-21772.	18.87	24.480	106.931	131.411	7914.	40436.	48349.
110.	1.433	0.951	15.78	-28.157	-22855.	18.94	25.479	104.901	130.381	8294.	40193.	48487.
115.	1.691	0.947	15.34	-29.416	-23970.	19.02	26.467	102.915	129.382	8676.	39947.	48622.
120.	1.985	0.943	14.87	-30.745	-25119.	19.10	27.444	100.971	128.414	9058.	39697.	48754.
125.	2.321	0.939	14.38	-32.151	-26305.	19.19	28.409	99.065	127.475	9441.	39443.	48883.
130.	2.701	0.935	13.86	-33.636	-27530.	19.27	29.365	97.196	126.561	9824.	39185.	49009.
135.	3.131	0.931	13.31	-35.204	-28796.	19.36	30.311	95.362	125.674	10209.	38922.	49131.
140.	3.614	0.926	12.72	-36.859	-30105.	19.45	31.248	93.561	124.809	10595.	38655.	49249.
145.	4.155	0.922	12.11	-38.602	-31459.	19.55	32.177	91.791	123.967	10982.	38382.	49364.
150.	4.760	0.917	11.45	-40.438	-32861.	19.65	33.097	90.049	123.146	11370.	38104.	49474.
155.	5.433	0.912	10.76	-42.367	-34312.	19.75	34.009	88.336	122.345	11759.	37821.	49580.
160.	6.180	0.907	10.03	-44.392	-35813.	19.85	34.914	86.648	121.561	12150.	37531.	49682.
165.	7.008	0.902	9.25	-46.516	-37368.	19.96	35.811	84.984	120.795	12543.	37236.	49779.
170.	7.920	0.897	8.43	-48.739	-38977.	20.08	36.703	83.343	120.045	12938.	36933.	49871.
175.	8.925	0.892	7.56	-51.064	-40642.	20.19	37.587	81.722	119.310	13334.	36624.	49958.
180.	10.027	0.887	6.64	-53.491	-42366.	20.31	38.466	80.122	118.588	13732.	36307.	50040.
185.	11.234	0.882	5.66	-56.024	-44149.	20.44	39.340	78.539	117.879	14133.	35983.	50116.
190.	12.552	0.876	4.62	-58.662	-45994.	20.56	40.208	76.974	117.182	14536.	35651.	50186.
195.	13.989	0.870	3.52	-61.408	-47903.	20.70	41.072	75.424	116.496	14941.	35310.	50250.
200.	15.551	0.865	2.35	-64.262	-49876.	20.83	41.931	73.888	115.819	15348.	34960.	50309.
205.	17.245	0.859	1.10	-67.227	-51916.	20.98	42.786	72.366	115.152	15758.	34602.	50360.
210.	19.080	0.853	-0.22	-70.304	-54025.	21.13	43.637	70.855	114.492	16171.	34233.	50405.
215.	21.063	0.847	-1.64	-73.494	-56205.	21.28	44.485	69.354	113.839	16587.	33855.	50442.
220.	23.201	0.840	-3.14	-76.799	-58457.	21.44	45.330	67.862	113.192	17006.	33466.	50473.
225.	25.504	0.834	-4.75	-80.221	-60784.	21.60	46.172	66.378	112.550	17429.	33066.	50495.
230.	27.979	0.827	-6.47	-83.762	-63189.	21.78	47.011	64.900	111.911	17854.	32655.	50509.
235.	30.635	0.821	-8.32	-87.425	-65673.	21.95	47.848	63.428	111.276	18284.	32231.	50514.
240.	33.480	0.814	-10.29	-91.212	-68240.	22.14	48.684	61.959	110.643	18717.	31794.	50511.
245.	36.524	0.807	-12.42	-95.126	-70892.	22.34	49.518	60.492	110.011	19153.	31344.	50497.
250.	39.776	0.799	-14.70	-99.172	-73633.	22.54	50.352	59.027	109.378	19595.	30880.	50474.
255.	43.245	0.792	-17.16	-103.352	-76466.	22.75	51.184	57.560	108.744	20040.	30400.	50440.
260.	46.940	0.784	-19.83	-107.672	-79396.	22.98	52.016	56.092	108.108	20490.	29905.	50395.
265.	50.872	0.776	-22.71	-112.138	-82427.	23.21	52.849	54.620	107.469	20945.	29394.	50339.
270.	55.051	0.768	-25.84	-116.756	-85664.	23.46	53.682	53.142	106.824	21405.	28864.	50269.
275.	59.487	0.759	-29.24	-121.534	-88814.	23.72	54.516	51.658	106.174	21871.	28316.	50187.
280.	64.191	0.751	-32.96	-126.483	-92184.	24.00	55.352	50.165	105.516	22342.	27749.	50091.
285.	69.175	0.742	-37.03	-131.612	-95682.	24.29	56.189	48.661	104.851	22820.	27160.	49980.
290.	74.449	0.732	-41.51	-136.938	-99318.	24.60	57.030	47.145	104.175	23304.	26550.	49854.
295.	80.025	0.723	-46.46	-142.475	-103106.	24.93	57.874	45.615	103.488	23795.	25916.	49711.
300.	85.917	0.712	-51.95	-148.247	-107058.	25.28	58.722	44.067	102.790	24294.	25257.	49551.
305.	( 92.136)	0.702	-58.07	(-154.278)	(-111194.)	25.67	( 59.576)	( 42.501)	(102.077)	( 24801.)	( 24572.)	( 49373.)
310.	( 98.696)	0.691	-64.93	(-160.601)	(-115537.)	26.08	( 60.436)	( 40.914)	(101.350)	( 25318.)	( 23859.)	( 49177.)
315.	(105.612)	0.679	-72.69	(-167.260)	(-120114.)	26.52	( 61.304)	( 39.303)	(100.607)	( 25844.)	( 23116.)	( 48960.)
320.	(112.898)	0.667	-81.53	(-174.307)	(-124963.)	27.01	( 62.181)	( 37.664)	( 99.846)	( 26382.)	( 22341.)	( 48723.)
325.	(120.571)	0.654	-91.68	(-181.815)	(-130133.)	27.54	( 63.070)	( 35.995)	( 99.066)	( 26932.)	( 21531.)	( 48463.)

NOTE.—Data contained in parentheses were calculated by extrapolation of the functions beyond their range.

Table 3. NaCl concentration: 0.9006 mol/kg H<sub>2</sub>O 5.00 wt percent 1.597 mol percent

t (°C)	p (bars)	$\rho^L$ (g cm <sup>-3</sup> )	$\bar{V}_2^L$ (cm <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> )	$\bar{S}_2^L$ (J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$\bar{H}_2^L$ (J mol <sup>-1</sup> )	$v^L$ (cm <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> )	$s^L$	$\epsilon S$ (J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$s^G$	$H^L$	$\epsilon H$	$H^G$
80.	0.459	1.006	24.17	-10.305	-15920.	18.55	19.044	118.339	137.382	5655.	41973.	47628.
85.	0.560	1.003	20.02	-10.462	-16618.	18.61	20.080	116.083	136.163	6013.	41765.	47778.
90.	0.679	1.000	19.86	-10.621	-17318.	18.67	21.105	113.881	134.986	6373.	41553.	47927.
95.	0.819	0.996	19.69	-10.788	-18022.	18.73	22.120	111.730	133.850	6734.	41339.	48073.
100.	0.982	0.993	19.50	-10.967	-18731.	18.79	23.124	109.628	132.752	7096.	41120.	48217.
105.	1.171	0.989	19.30	-11.161	-19447.	18.86	24.110	107.580	131.690	7457.	40902.	48358.
110.	1.388	0.986	19.08	-11.372	-20172.	18.93	25.085	105.577	130.662	7818.	40679.	48497.
115.	1.638	0.982	18.85	-8.381	-19680.	19.00	26.100	103.566	129.666	8199.	40434.	48634.
120.	1.924	0.978	18.60	-9.004	-20568.	19.07	27.046	101.654	128.701	8599.	40208.	48767.
125.	2.249	0.974	18.33	-9.683	-21482.	19.15	27.981	99.783	127.764	8919.	39978.	48898.
130.	2.618	0.970	18.04	-10.419	-22423.	19.23	28.904	97.949	126.853	9279.	39745.	49025.
135.	3.034	0.966	17.73	-11.215	-23392.	19.31	29.817	96.152	125.969	9640.	39509.	49149.
140.	3.502	0.962	17.40	-12.072	-24390.	19.40	30.719	94.389	125.108	10001.	39268.	49269.
145.	4.027	0.958	17.05	-12.991	-25419.	19.48	31.611	92.658	124.270	10363.	39023.	49386.
150.	4.613	0.953	16.67	-13.973	-26480.	19.57	32.494	90.958	123.452	10725.	38774.	49499.
155.	5.266	0.949	16.27	-15.018	-27573.	19.66	33.368	89.287	122.655	11088.	38519.	49607.
160.	5.991	0.944	15.84	-16.125	-28699.	19.76	34.234	87.643	121.876	11452.	38260.	49712.
165.	6.792	0.940	15.38	-17.292	-29857.	19.86	35.091	86.024	121.115	11816.	37995.	49812.
170.	7.677	0.935	14.88	-18.520	-31048.	19.96	35.940	84.430	120.370	12182.	37725.	49907.
175.	8.651	0.930	14.36	-19.804	-32272.	20.06	36.782	82.859	119.641	12549.	37449.	49997.
180.	9.719	0.925	13.79	-21.144	-33527.	20.17	37.617	81.308	118.925	12917.	37166.	50083.
185.	10.889	0.920	13.19	-22.534	-34813.	20.28	38.445	79.777	118.223	13286.	36877.	50163.
190.	12.167	0.915	12.55	-23.972	-36128.	20.39	39.267	78.265	117.533	13657.	36581.	50238.
195.	13.559	0.910	11.86	-25.452	-37471.	20.51	40.084	76.770	116.854	14029.	36278.	50307.
200.	15.073	0.904	11.13	-26.969	-38840.	20.63	40.894	75.291	116.185	14403.	35967.	50370.
205.	16.715	0.899	10.34	-28.516	-40232.	20.76	41.700	73.825	115.526	14780.	35647.	50427.
210.	18.493	0.893	9.49	-30.086	-41644.	20.89	42.501	72.373	114.875	15158.	35320.	50478.
215.	20.414	0.888	8.59	-31.670	-43071.	21.02	43.298	70.933	114.231	15538.	34983.	50522.
220.	22.487	0.882	7.62	-33.259	-44510.	21.16	44.092	69.503	113.595	15922.	34637.	50558.
225.	24.718	0.876	6.58	-34.840	-45954.	21.30	44.882	68.082	112.963	16307.	34281.	50588.
230.	27.116	0.870	5.46	-36.402	-47398.	21.45	45.669	66.668	112.337	16696.	33914.	50610.
235.	29.689	0.864	4.25	-37.928	-48834.	21.61	46.455	65.260	111.715	17088.	33536.	50624.
240.	32.446	0.857	2.95	-39.403	-50252.	21.76	47.238	63.857	111.095	17484.	33146.	50629.
245.	35.394	0.851	1.55	-40.806	-51643.	21.93	48.021	62.457	110.478	17883.	32743.	50626.
250.	38.544	0.844	0.03	-42.114	-52993.	22.10	48.803	61.058	109.861	18287.	32327.	50614.
255.	41.904	0.837	-1.60	-43.302	-54288.	22.28	49.586	59.658	109.245	18695.	31897.	50592.
260.	45.462	0.830	-3.38	-44.338	-55512.	22.47	50.370	58.257	108.627	19108.	31451.	50559.
265.	49.290	0.823	-5.31	-45.187	-56643.	22.67	51.157	56.851	108.007	19527.	30989.	50516.
270.	53.336	0.816	-7.41	-45.807	-57658.	22.87	51.946	55.439	107.385	19952.	30509.	50462.
275.	57.631	0.808	-9.69	-46.148	-58527.	23.08	52.740	54.018	106.758	20384.	30011.	50395.
280.	62.184	0.801	-12.20	-46.153	-59215.	23.31	53.539	52.586	106.126	20824.	29492.	50316.
285.	67.007	0.793	-14.94	-45.751	-59683.	23.55	54.346	51.141	105.487	21273.	28951.	50224.
290.	72.110	0.784	-17.96	-44.860	-59978.	23.79	55.162	49.679	104.841	21732.	28387.	50119.
295.	77.505	0.776	-21.29	-43.378	-59740.	24.06	55.989	48.197	104.186	22202.	27797.	49998.
300.	83.203	0.767	-24.98	-41.184	-59194.	24.34	56.831	46.691	103.522	22685.	27178.	49862.
305.	(89.218)	0.757	-29.09	(-38.130)	(-58148.)	24.64	(57.690)	(45.157)	(102.847)	(23183.)	(26528.)	(49711.)
310.	(95.560)	0.748	-33.68	(-34.030)	(-56488.)	24.96	(58.570)	(43.590)	(102.159)	(23698.)	(25844.)	(49542.)
315.	(102.245)	0.738	-38.85	(-28.658)	(-54070.)	25.30	(59.476)	(41.983)	(101.459)	(24234.)	(25122.)	(49356.)
320.	(109.286)	0.727	-44.70	(-21.728)	(-50715.)	25.67	(60.414)	(40.330)	(100.744)	(24795.)	(24356.)	(49152.)
325.	(116.657)	0.716	-51.36	(-12.877)	(-46193.)	26.07	(61.392)	(38.622)	(100.014)	(25386.)	(23542.)	(48928.)

NOTE.—Data contained in parentheses were calculated by extrapolation of the functions beyond their range.

Table 6. NaCl concentration: 1.9012 mol/kg H<sub>2</sub>O 10.00 wt percent 3.312 mol percent

t (°C)	p (bars)	d <sup>L</sup> (g cm <sup>-3</sup> )	$\bar{V}_s^L$ (cm <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> )	$\bar{S}_s^L$ (J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$\bar{H}_s^L$ (J mol <sup>-1</sup> )	$\bar{V}^L$ (cm <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> )	$S^L$ (J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$\Delta S$ (J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$S^G$	$H^L$ (J mol <sup>-1</sup> )	$\Delta H$ (J mol <sup>-1</sup> )	$H^G$
80.	0.442	1.041	21.20	-22.599	-15732.	18.59	18.400	119.298	137.699	5279.	42354.	47633.
85.	0.540	1.038	21.12	-22.468	-16330.	18.64	19.421	117.060	136.481	5621.	42163.	47784.
90.	0.655	1.035	21.03	-22.330	-16925.	18.70	20.430	114.876	135.306	5964.	41969.	47933.
95.	0.790	1.032	20.93	-22.189	-17518.	18.76	21.429	112.743	134.172	6308.	41772.	48080.
100.	0.947	1.029	20.82	-22.049	-18111.	18.82	22.418	110.650	133.076	6654.	41572.	48225.
105.	1.129	1.025	20.71	-21.910	-18705.	18.88	23.391	108.626	132.017	6998.	41371.	48368.
110.	1.336	1.022	20.58	-21.775	-19299.	18.94	24.352	106.640	130.992	7342.	41166.	48509.
115.	1.579	1.018	20.44	-21.640	-19859.	19.01	25.443	104.555	129.998	7742.	40905.	48646.
120.	1.855	1.014	20.28	-21.504	-20448.	19.08	26.365	102.671	129.036	8061.	40701.	48782.
125.	2.168	1.011	20.11	-21.368	-21059.	19.15	27.274	100.828	128.102	8419.	40494.	48914.
130.	2.524	1.007	19.93	-21.232	-21692.	19.23	28.171	99.024	127.195	8756.	40285.	49043.
135.	2.925	1.003	19.73	-21.093	-22350.	19.30	29.057	97.258	126.314	9097.	40072.	49169.
140.	3.376	0.999	19.52	-21.000	-23042.	19.38	29.931	95.527	125.454	9435.	39857.	49292.
145.	3.862	0.995	19.29	-20.863	-23741.	19.46	30.794	93.829	124.624	9773.	39637.	49411.
150.	4.447	0.990	19.03	-20.960	-24276.	19.54	31.647	92.164	123.811	10112.	39414.	49526.
155.	5.076	0.986	18.76	-21.690	-25236.	19.63	32.490	90.529	123.019	10450.	39188.	49638.
160.	5.774	0.982	18.47	-22.474	-26228.	19.72	33.324	88.922	122.246	10789.	38957.	49745.
165.	6.547	0.977	18.15	-23.310	-27245.	19.80	34.148	87.342	121.491	11128.	38721.	49848.
170.	7.399	0.973	17.80	-24.194	-28288.	19.90	34.963	85.788	120.751	11467.	38481.	49946.
175.	8.337	0.968	17.43	-25.125	-29357.	19.99	35.771	84.258	120.028	11807.	38235.	50042.
180.	9.367	0.963	17.04	-26.100	-30451.	20.09	36.570	82.750	119.320	12147.	37984.	50132.
185.	10.494	0.959	16.60	-27.113	-31569.	20.19	37.362	81.263	118.625	12489.	37728.	50216.
190.	11.725	0.954	16.14	-28.160	-32708.	20.29	38.146	79.796	117.942	12831.	37465.	50296.
195.	13.066	0.949	15.64	-29.235	-33866.	20.40	38.925	78.347	117.272	13174.	37194.	50370.
200.	14.524	0.944	15.10	-30.331	-35041.	20.50	39.697	76.915	116.612	13519.	36921.	50439.
205.	16.106	0.939	14.52	-31.441	-36229.	20.62	40.464	75.498	115.962	13865.	36638.	50502.
210.	17.819	0.934	13.90	-32.554	-37425.	20.73	41.226	74.095	115.322	14213.	36347.	50560.
215.	19.670	0.928	13.22	-33.662	-38625.	20.85	41.984	72.705	114.689	14563.	36048.	50610.
220.	21.665	0.923	12.49	-34.752	-39823.	20.97	42.738	71.326	114.064	14915.	35740.	50655.
225.	23.814	0.918	11.71	-35.810	-41013.	21.09	43.490	69.955	113.445	15270.	35423.	50693.
230.	26.123	0.912	10.86	-36.820	-42185.	21.22	44.239	68.593	112.832	15627.	35096.	50723.
235.	28.601	0.906	9.94	-37.765	-43331.	21.36	44.987	67.237	112.222	15989.	34758.	50747.
240.	31.254	0.901	8.95	-38.625	-44440.	21.49	45.735	65.885	111.620	16354.	34408.	50762.
245.	34.093	0.895	7.87	-39.375	-45498.	21.63	46.483	64.535	111.019	16724.	34046.	50770.
250.	37.124	0.889	6.71	-39.988	-46491.	21.78	47.234	63.186	110.419	17099.	33671.	50769.
255.	40.357	0.882	5.44	-40.432	-47400.	21.93	47.987	61.835	109.822	17479.	33281.	50760.
260.	43.801	0.876	4.07	-40.671	-48205.	22.09	48.745	60.479	109.224	17867.	32875.	50741.
265.	47.464	0.870	2.57	-40.661	-48881.	22.25	49.509	59.117	108.627	18262.	32452.	50713.
270.	51.356	0.863	0.94	-40.352	-49398.	22.42	50.282	57.745	108.027	18665.	32009.	50675.
275.	55.487	0.857	-0.84	-39.685	-49721.	22.59	51.065	56.360	107.426	19079.	31546.	50626.
280.	59.865	0.850	-2.79	-38.589	-49808.	22.78	51.862	54.959	106.821	19505.	31061.	50566.
285.	64.502	0.843	-4.93	-36.981	-49609.	22.97	52.675	53.536	106.211	19944.	30550.	50494.
290.	69.407	0.835	-7.29	-34.760	-49063.	23.17	53.508	52.089	105.597	20400.	30010.	50410.
295.	74.542	0.828	-9.89	-31.804	-48096.	23.37	54.365	50.611	104.976	20874.	29440.	50313.
300.	80.067	0.820	-12.76	-27.968	-46616.	23.59	55.253	49.095	104.348	21370.	28834.	50203.
305.	( 85.844)	0.812	-15.96	(-23.071)	(-44512.)	23.82	( 56.178)	( 47.535)	(103.712)	( 21892.)	( 28187.)	( 50079.)
310.	( 91.935)	0.804	-19.53	(-16.891)	(-41647.)	24.06	( 57.147)	( 45.920)	(103.067)	( 22446.)	( 27495.)	( 49941.)
315.	( 98.352)	0.796	-23.52	(-9.151)	(-37845.)	24.32	( 58.171)	( 44.241)	(102.412)	( 23038.)	( 26749.)	( 49787.)
320.	(105.108)	0.787	-28.01	( 0.494)	(-32887.)	24.60	( 59.263)	( 42.483)	(101.746)	( 23675.)	( 25942.)	( 49617.)
325.	(112.218)	0.778	-33.10	( 12.485)	(-26494.)	24.89	( 60.438)	( 40.630)	(101.068)	( 24369.)	( 25063.)	( 49431.)

NOTE.—Data contained in parentheses were calculated by extrapolation of the functions beyond their range.

Table 11. NaCl concentration: 3.0191 mol/kg H<sub>2</sub>O 15.00 wt percent 5.159 mol percent

t (°C)	p (bars)	$\rho^L$ (g cm <sup>-3</sup> )	$\bar{V}_2^L$ (cm <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> )	$\bar{S}_2^L$ (J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$\bar{H}_2^L$ (J mol <sup>-1</sup> )	$\bar{V}_2^G$ (cm <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> )	$\bar{S}_2^G$	$\Delta S$	$\bar{S}_2^G$	$\Delta H$	$\bar{H}_2^G$	
								(J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )		(J mol <sup>-1</sup> )		
80.	0.423	1.076	22.05	-30.098	-15216.	18.65	17.528	120.557	138.085	4886.	42753.	47639.
85.	0.516	1.075	22.03	-29.741	-15734.	18.70	18.538	118.331	136.869	5212.	42579.	47791.
90.	0.626	1.072	22.00	-29.370	-16246.	18.75	19.538	116.159	135.696	5539.	42402.	47941.
95.	0.755	1.069	21.97	-28.990	-16753.	18.81	20.527	114.037	134.564	5868.	42222.	48089.
100.	0.905	1.065	21.93	-28.602	-17256.	18.87	21.506	111.964	133.470	6198.	42038.	48236.
105.	1.074	1.062	21.88	-28.208	-17754.	18.93	22.472	109.942	132.413	6527.	41853.	48380.
110.	1.260	1.059	21.83	-27.807	-18249.	18.99	23.425	107.966	131.390	6857.	41665.	48522.
115.	1.510	1.055	21.76	-22.415	-18844.	19.05	24.362	105.776	130.400	7285.	41376.	48661.
120.	1.774	1.051	21.69	-22.567	-17552.	19.12	25.285	103.915	129.440	7604.	41194.	48798.
125.	2.074	1.046	21.61	-22.761	-18278.	19.19	26.194	102.096	128.510	7923.	41010.	48932.
130.	2.414	1.044	21.51	-23.002	-19024.	19.26	27.289	100.317	127.607	8241.	40823.	49064.
135.	2.798	1.040	21.41	-23.289	-19790.	19.33	28.153	98.577	126.730	8556.	40634.	49192.
140.	3.229	1.036	21.29	-23.624	-20579.	19.40	29.004	96.873	125.877	8875.	40442.	49317.
145.	3.713	1.032	21.15	-24.008	-21390.	19.46	29.844	95.204	125.048	9191.	40248.	49439.
150.	4.254	1.028	21.01	-24.441	-22224.	19.55	30.672	93.568	124.240	9507.	40051.	49558.
155.	4.856	1.024	20.84	-24.922	-23082.	19.63	31.489	91.964	123.453	9822.	39853.	49672.
160.	5.524	1.020	20.66	-25.450	-23963.	19.71	32.296	90.390	122.685	10137.	39647.	49783.
165.	6.263	1.015	20.46	-26.023	-24867.	19.80	33.092	88.843	121.936	10452.	39439.	49891.
170.	7.079	1.011	20.24	-26.638	-25794.	19.88	33.879	87.324	121.204	10766.	39228.	49994.
175.	7.976	1.007	20.00	-27.293	-26742.	19.97	34.657	85.830	120.487	11081.	39012.	50092.
180.	8.961	1.002	19.74	-27.983	-27710.	20.06	35.427	84.359	119.786	11395.	38792.	50187.
185.	10.040	0.998	19.45	-28.704	-28696.	20.15	36.186	82.911	119.099	11710.	38566.	50277.
190.	11.217	0.993	19.14	-29.450	-29698.	20.24	36.942	81.484	118.425	12026.	38336.	50362.
195.	12.500	0.988	18.80	-30.214	-30714.	20.34	37.689	80.075	117.764	12342.	38100.	50442.
200.	13.895	0.984	18.42	-30.990	-31740.	20.43	38.429	78.684	117.114	12659.	37858.	50517.
205.	15.409	0.979	18.01	-31.768	-32772.	20.53	39.164	77.310	116.474	12976.	37609.	50587.
210.	17.047	0.974	17.57	-32.538	-33806.	20.64	39.894	75.950	115.844	13297.	37354.	50651.
215.	18.817	0.969	17.09	-33.289	-34835.	20.74	40.621	74.602	115.223	13619.	37090.	50710.
220.	20.726	0.964	16.56	-34.008	-35854.	20.85	41.344	73.266	114.610	13944.	36819.	50762.
225.	22.781	0.959	15.99	-34.679	-36854.	20.96	42.065	71.940	114.005	14271.	36538.	50809.
230.	24.989	0.954	15.37	-35.286	-37826.	21.07	42.785	70.621	113.406	14601.	36248.	50849.
235.	27.358	0.949	14.69	-35.809	-38761.	21.18	43.505	69.307	112.812	14936.	35947.	50883.
240.	29.895	0.944	13.96	-36.224	-39645.	21.30	44.227	67.997	112.224	15275.	35634.	50909.
245.	32.609	0.938	13.15	-36.506	-40465.	21.42	44.952	66.687	111.640	15620.	35309.	50929.
250.	35.507	0.933	12.28	-36.625	-41202.	21.55	45.682	65.377	111.059	15971.	34970.	50940.
255.	38.597	0.927	11.33	-36.546	-41839.	21.67	46.419	64.062	110.481	16330.	34615.	50944.
260.	41.889	0.922	10.29	-36.227	-42350.	21.81	47.165	62.739	109.904	16697.	34243.	50940.
265.	45.389	0.916	9.15	-35.623	-42710.	21.94	47.923	61.406	109.329	17076.	33852.	50928.
270.	49.108	0.910	7.91	-34.676	-42884.	22.08	48.696	60.058	108.754	17466.	33440.	50906.
275.	53.053	0.905	6.55	-33.321	-42834.	22.22	49.487	58.691	108.178	17871.	33004.	50875.
280.	57.235	0.899	5.06	-31.482	-42513.	22.37	50.301	57.300	107.601	18293.	32542.	50835.
285.	61.663	0.893	3.42	-29.064	-41866.	22.52	51.143	55.878	107.021	18734.	32050.	50784.
290.	66.346	0.887	1.62	-25.958	-40825.	22.67	52.019	54.420	106.439	19200.	31523.	50723.
295.	71.295	0.880	-0.37	-22.030	-39308.	22.83	52.936	52.917	105.853	19693.	30957.	50651.
300.	76.519	0.874	-2.57	-17.117	-37214.	23.00	53.902	51.359	105.261	20220.	30347.	50567.
305.	( 82.030)	0.868	-5.00	(-11.019)	(-34420.)	23.17	( 54.929)	( 49.736)	(104.665)	( 20787.)	( 29684.)	( 50471.)
310.	( 87.839)	0.861	-7.71	(-3.492)	(-30772.)	23.35	( 56.030)	( 48.032)	(104.062)	( 21403.)	( 28960.)	( 50363.)
315.	( 93.957)	0.854	-10.72	( 5.772)	(-26076.)	23.53	( 57.222)	( 46.231)	(103.452)	( 22076.)	( 28164.)	( 50242.)
320.	(100.397)	0.847	-14.08	( 17.159)	(-20088.)	23.73	( 58.524)	( 44.311)	(102.835)	( 22824.)	( 27283.)	( 50107.)
325.	(107.171)	0.840	-17.85	( 31.161)	(-12495.)	23.93	( 59.964)	( 42.245)	(102.209)	( 23660.)	( 26298.)	( 49959.)

NOTE.—Data contained in parentheses were calculated by extrapolation of the functions beyond their range.

9.5. - FACTEURS DE CONVERSION UTILES

			bar	atm*	psi
Pression	1 bar	=	1	1.01972	14.5038
	1 atm*	=	0.980665	1	14.2233
	1 psi	=	0.068948	0.070307	1

			m3/kg	ft3/lb	
Volume spécifique	1 m3/kg	=	1	16.0185	
	1 ft3/lb	=	0.062428	1	

			kJ/kg	kcal/kg	BTU/lb
Enthalpie spécifique	1 kJ/kg	=	1	0.238846	0.429923
	1 kcal/kg	=	4.1868	1	1.8
	1 BTU/lb	=	2.326	0.555556	1

\* L'unité atm utilisée dans cette étude correspond à l'atmosphère technique soit 1 atm = 1 kgf/cm<sup>2</sup>.

9.6. - PROGRAMME SUR CALCULATRICE HP 67

Cette annexe comprend le "listing" complet du programme correspondant à la seconde méthode simplifiée (paragraphe 4.2). Il est exécutable sur calculatrices programmables Hewlett Packard : HP 67 ou HP 97 :

- mode opératoire
- liste des instructions.





# Program Listing I

STEP	KEY ENTRY	KEY CODE	COMMENTS	STEP	KEY ENTRY	KEY CODE	COMMENTS
001	*LSLH	21 11	← $V_L$	057	RCL3	36 03	
002	STO1	35 01	Calcul $Z_1$ et $Z_2$	058	=	-24	
003	RCLD	36 14		059	+	-55	
004	=	05		060	1/X	52	
005	.	31		061	2	02	
006	+	-24		062	x	-35	
007	RCLD	36 00		063	STO6	35 06	
008	x	-35		064	RCLD	36 14	
009	3	03		065	X <sup>2</sup>	53	
010	2	02		066	Pi	16-24	
011	x	-35		067	x	-35	
012	Pi	16-24		068	1/X	52	
013	X <sup>2</sup>	53		069	4	04	
014	=	-24		070	x	-35	
015	R/S	51	← $M$	071	STO9	35 09	
016	STO9	35 09		072	1	01	
017	X <sup>2</sup>	53		073	RCL5	36 05	
018	x	-35		074	-	-45	
019	RCL2	36 02		075	RCL5	36 05	
020	RCL1	36 01		076	x	-35	
021	=	-24		077	RCL5	36 05	
022	+	-55		078	x	-35	
023	1/X	52		079	RCL5	36 05	
024	RCLH	36 11		080	RCL4	36 04	
025	R/S	51	← $P_E$	081	x	-35	
026	-	-45		082	+	-55	
027	RCL6	36 12		083	RCL9	36 09	
028	RCL9	36 09		084	x	-35	
029	x	-35		085	Pi	16-51	
030	-	-45		086	STO8	35 08	
031	x	-35		087	Pi	16-51	
032	Pi	16-51		088	RCL1	36 01	
033	STO4	35 04		089	RCL9	36 09	
034	Pi	16-51		090	x	-35	
035	CHS	-22		091	Pi	16-51	
036	RCLC	36 13		092	STO1	35 01	
037	+	-55		093	Pi	16-51	
038	Pi	16-51		094	1	01	
039	STO5	35 05		095	RCL5	36 05	
040	Pi	16-51		096	-	-45	
041	RTN	24	→ $Z_E$	097	RCL5	36 05	
042	*LBL6	21 12	← $V_{LT}$	098	X <sup>2</sup>	53	
043	STO3	35 03	← $V_{VT}$	099	=	-24	
044	R/S	51	← $X_T$	100	RCL5	36 05	
045	STO4	35 04		101	+	-55	
046	R/S	51		102	JX	54	
047	STO5	35 05		103	Pi	16-51	
048	RCL4	36 04		104	RCL8	36 08	
049	+	-24		105	x	-35	
050	RCL1	36 01		106	STO2	35 02	
051	1/X	52		107	Pi	16-51	
052	+	-55		108	RCL6	36 06	
053	RCL5	36 05		109	RCL9	36 09	
054	CHS	-22		110	x	-35	
055	1	01		111	Pi	16-51	
056	+	-55		112	STO3	35 03	

REGISTERS

0	$f_2$	1	$V_L$	2	g	3	$V_{LT}$	4	$V_{VT}$	5	$X_T$	6	$\bar{V}_D$	7	B	8	$\bar{f}_D$	9	$M, 1/A$
S0	a	S1	b	S2	c	S3	d	S4	$Z_1$	S5	$Z_2$	S6		S7		S8		S9	
A	$P_E$	B	C	C	Z	D	D	E	$S_T$	I	-								

# Program Listing II



STEP	KEY ENTRY	KEY CODE	COMMENTS	STEP	KEY ENTRY	KEY CODE	COMMENTS
113	X <sup>2</sup>	53		165	x	-35	
114	RCL5	36 05		170	RCLB	36 12	
115	x	-35		171	X <sup>2</sup>	53	
116	P2S	16-51		172	+	-55	
117	RCL9	36 08		173	JX	54	
118	x	-35		174	RCLB	36 12	
119	RCL6	36 06		175	-	-45	
120	÷	-24		176	2	02	
121	P2S	16-51		177	÷	-24	
122	RCL1	36 01		178	RCL7	36 07	
123	X <sup>2</sup>	53		179	÷	-24	→ M
124	RCL4	36 04		180	R/S	51	
125	x	-35		181	P2S	16-51	
126	P2S	16-51		182	STO9	35 09	
127	RCL0	36 00		183	RCL2	36 02	
128	x	-35		184	x	-35	→ U <sub>T</sub>
129	RCL1	36 01		185	R/S	51	
130	÷	-24		186	RCL9	36 09	
131	+	-55		187	RCL0	36 00	
132	2	02		188	x	-35	→ U <sub>VT</sub>
133	x	-35		189	R/S	51	
134	RCLD	36 14		190	RCL5	36 15	
135	÷	-24		191	÷	-24	→ U <sub>LT</sub>
136	P2S	16-51		192	P2S	16-51	
137	RCL2	36 02		193	RTN	24	
138	X <sup>2</sup>	53		194	R/S	51	
139	RCL1	36 01					
140	X <sup>2</sup>	53					
141	-	-45					
142	2	02					
143	÷	-24					
144	P2S	16-51		200			
145	RCL6	36 06					
146	÷	-24					
147	+	-55					
148	STO7	35 07					
149	P2S	16-51					
150	RCL4	36 04					
151	RCL5	36 05					
152	P2S	16-51					
153	RCL6	36 06					
154	÷	-24					
155	X <sup>2</sup>	-41		210			
156	RCL1	36 01					
157	÷	-24					
158	+	-55					
159	RCL2	36 02					
160	x	-35					
161	CHS	-22					
162	RCLA	36 11					
163	+	-55					
164	R/S	51	← P <sub>T</sub>				
165	-	-45		220			
166	4	04					
167	x	-35					
168	RCL7	36 07					

LABELS					FLAGS	SET STATUS			
A	B	C	D	E	0	FLAGS		TRIG	DISP
a	b	c	d	e	1	ON	OFF		
0	1	2	3	4	2	0	1	DEG	FIX
						1	2	GRAD	SCI
						2	3	RAD	ENG
							X		X

10 - BIBLIOGRAPHIE CONSULTEE

|

ANDEEN G. B., GRIFFITH P.  
MOMENTUM FLUX IN TWO-PHASE FLOW.  
J. HEAT TRANSFER, MAY 1968.

ARMSTEAD H. C.  
VARIATIONS ON A THEME BY MOLLIER  
GEOTHERMAL ENERGY MAGAZINE, VOL. 4, NO. 8, AUGUST 1976.

ASHFORD F. E., PIERCE P. E.  
DETERMINING MULTIPHASE PRESSURE DROPS AND FLOW CAPACITIES  
IN DOWN-HOLE SAFETY VALVES  
J. P. T., SEPT. 1975.

ASHFORD F. E.  
AN EVALUATION OF CRITICAL MULTIPHASE FLOW PERFORMANCE THROUGH  
WELLHEAD CHOKES.  
J. P. T., AUGUST 1974.

BODVARSSON G., RYLEY D. J.  
THE MEASUREMENTS OF THE WEIGHT DISCHARGE FROM GEOTHERMAL STEAM WELLS  
REPRINTED FROM JOKULL, REYKJAVIK 1966.

BRILL J. P., SCHMIDT Z., COBERLY W. A.  
ANALYSIS OF TWO-PHASE TESTS IN LARGE-DIAMETER FLOW LINES  
IN PRUDHOE BAY FIELD.  
SPEJ JUNE 1981.

BROWN K. E.  
THE TECHNOLOGY OF ARTIFICIAL LIFT METHODS  
PETROLEUM PUBLISHING COMPANY 1977

CHISHOLM D.  
PRESSURE GRADIENTS DUE TO FRICTION DURING THE FLOW OF EVAPORATING  
TWO-PHASE MIXTURES IN SMOOTH TUBES AND CHANNELS  
INT. J. HEAT TRANSFER, VOL. 16, PP 347-358, 1973.

CORNISH R. E.  
THE VERTICAL MULTIPHASE FLOW OF OIL AND GAS AT HIGH RATES.  
J. P. T., JULY 1976.

DUNS JR., ROS N. C. J.  
VERTICAL FLOW OF GAS AND LIQUID MIXTURES IN WELLS.

EARLOUGHER R. C.  
ADVANCES IN WELL TEST ANALYSIS.  
SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS OF AIME, 1977.

GOULD T. L.  
VERTICAL TWO-PHASE STEAM-WATER FLOW IN GEOTHERMAL WELLS  
FALL ANNUAL MEETING, SAN FRANCISCO, DECEMBER 10, 1976.

GOULD T. L.  
TWO-PHASE FLOW THROUGH VERTICAL, INCLINED, OR CURVED PIPE.  
J. P. T. , AUGUST 1974.

GOULD T. L.  
COMPOSITIONAL TWO-PHASE FLOW IN PIPELINES.  
S. P. E. J. , MARCH 1979.

GRIFFITH P. , WALLIS G. B.  
TWO-PHASE SLUG FLOW  
JOURNAL OF HEAT TRANSFER, 308, AUGUST 1961.

GRINGARTEN A. C.  
WELL TESTING ANALYSIS IN FLASHING GEOTHERMAL WELLS  
BRGM 77 SGN 651 GTH.

GRINGARTEN A. C.  
WELLTESTING IN TWO-PHASE GEOTHERMAL WELLS  
S. P. E. , PAPER 7480.

GROOTHUIS H. , HENDAL W. F.  
HEAT TRANSFER IN TWO-PHASE FLOW  
CHEMIC. ENSIN. SCI. , VOL. 11, PP 212-220, 1959.

HAAS J. L.  
THERMODYNAMIC PROPERTIES OF THE COEXISTING PHASES AND THERMOCHEMICAL  
PROPERTIES OF THE NACL COMPONENT IN BOILING NACL SOLUTIONS.  
GEOLOGICAL SURVEY BULLETIN 1421-B 1976.

HAGEDORN A. R. , BROWN K. E.  
THE EFFECT OF LIQUID VISCOSITY IN TWO-PHASE VERTICAL FLOW  
J. P. T. , FEBRUARY 1964.

HARBAN D. C.  
GEOTHERMAL WELL TESTING

JAMES R.  
POSSIBLE SERIOUS EFFECT OF THE PRESENCE OF STEAM ON HOT-WATER  
FLOW MEASUREMENTS UTILIZING AN ORIFICE METER.

JAMES R.  
CONTROL ORIFICES REPLACE STEAM TRAPS ON OVERLAND TRANSMISSION  
PIPELINES.

JAMES R.  
CHOKES DESIGN FOR GEOTHERMAL BORES.

JAMES R.  
RAPID ESTIMATION OF ELECTRIC POWER POTENTIAL OF DISCHARGING  
GEOTHERMAL WELLS.

JAMES R.  
FACTORS CONTROLLING BOREHOLE PERFORMANCE.  
UNITED NATIONS SYMPOSIUM ON DEVELOPMENT AND UTILIZATION OF  
GEOTHERMAL RESOURCES, PISA 1970, VII/6.

JASTER H., KOSKY F. G.  
CONDENSATION HEAT TRANSFER IN A MIXED FLOW REGIME  
INT. J. HEAT MASS TRANSFER, VOL. 19, 1976.

KEENAN J. H., KEYES F. G.  
THERMODYNAMIC PROPERTIES OF STEAM  
JOHN WILEY AND SONS INC., 1959.

KERMIT E. B., BEGGS H. D.  
GAS LIFTING DIRECTIONALLY DRILLED WELLS  
PET. ENGINEER, JULY 1977.

LAMERS M. D.  
MEASUREMENT REQUIREMENTS AND METHODS FOR GEOTHERMAL RESERVOIR  
SYSTEM PARAMETERS (AN APPRAISAL)  
LBL-9090, GREMP-6, UC-66B, AUGUST 1979.

MATHIAS K. E.  
THE MESA GEOTHERMAL FIELD-A PRELIMINARY EVALUATION OF FIVE  
GEOTHERMAL WELLS.

MATTHEWS C. S., RUSSELL D. G.  
PRESSURE BUILDUP AND FLOW TESTS IN WELLS.  
SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS OF AIME, 1967.

MILLER C. W.  
WELLBORE STORAGE EFFECTS IN GEOTHERMAL WELLS  
S. P. E. J., DECEMBER 1980.

MILLER C. W.  
A NUMERICAL MODEL OF TRANSIENT TWO-PHASE FLOW IN A GEOTHERMAL  
WELL.  
GEOTH. RES. COUNCIL, ANNUAL MEETING, RENO, NEVADA, SEPT 24-27, 1979.

NARASIMHAN T. N., WITHERSPOON P. A.  
GEOTHERMAL WELL TESTING.  
LBL-8290, JANUARY 1979.

NATHENSON M.  
FLASHING FLOW IN HOT-WATER GEOTHERMAL WELLS  
JOUR. RESEARCH U. S. GEOL. SURVEY, VOL. 2, NO. 6, PP 743-751, NOV-DEC 1974.

ODEH A. S., JONES L. G.  
TWO-RATE FLOW TEST, VARIABLE-RATE CASE, APPLICATION TO GAS-LIFT  
AND PUMPING WELLS  
J. P. T., JANUARY 1974.

OGASAWARA H.  
A THEORETICAL PREDICTION OF TWO-PHASE CRITICAL FLOW.  
BULLETIN OF JSME, VOL. 10, NO. 38, 1967.

ORKISEWSKI J.  
PREDICTING TWO-PHASE PRESSURE DROPS IN VERTICAL PIPE.  
J. P. T., JUNE 1967.

PASCAL H.  
ANALYSIS OF SIMULTANEOUS GAS-LIQUID FLOW THROUGH AN ORIFICE  
AND ITS APPLICATION TO FLOW METERING.  
REVUE DE L'INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE, VOL. 23, NO. 4, JUIL. 1978.

ROS N. C. J.  
SIMULTANEOUS FLOW OF GAS AND LIQUID AS ENCOUNTERED IN WELL TUBING  
J. P. T., OCTOBER 1961.

RYLEY D. J.  
THE MASS DISCHARGE OF A GEOFLUID FROM A GEOTHERMAL RESERVOIR  
WELL SYSTEM WITH FLASHING FLOW IN THE BORE.  
GEOTHERMICS, VOL. 9, PP 221-235, 1980.

RYLEY D. J.  
TWO-PHASE CRITICAL FLOW IN GEOTHERMAL STEAM WELLS  
INT. J. MECH. SCI., VOL. 6, PP 273-285, 1964.

SHERIFF N., GUMLEY P.  
HEAT-TRANSFER AND FRICTION PROPERTIES OF SURFACES WITH DISCRETE  
ROUGHNESSES.  
INT. J. HEAT MASS TRANSFER, VOL. 9, PP 1297-1320, 1966.

SMITH S. L.  
VOID FRACTION IN TWO PHASE FLOW: A CORRELATION BASED UPON  
AN EQUAL VELOCITY HEAD MODEL  
BERKELEY NUCLEAR LABORATORIES RD/B/N1250.

SUGIURA T., FAROUQ ALI S. M.  
A COMPREHENSIVE WELLBORE STEAM-WATER MODEL FOR STEAM INJECTION  
AND GEOTHERMAL APPLICATIONS.  
S. P. E PAPER 7966.

TIEN C. L., ROHANI A. R.  
ANALYSIS OF THE EFFECTS OF VAPOR PRESSURE DROP ON HEAT PIPE  
PERFORMANCE.  
INT. J. HEAT MASS TRANSFER, VOL. 17, 1974.

VDI-WASSERDAMPFTAFELN  
SPRINGER-VERLAG, 1968.

WALLIS G. B., RICHTER H. J.  
AN ISENTROPIC STREAMTUBE MODEL FOR FLASHING TWO-PHASE  
VAPOR-LIQUID FLOW.  
J. HEAT TRANSFER, VOL. 100, NOV. 1978.

ZIVI S. M.  
ESTIMATION OF STEADY-STATE STEAM VOID-FRACTION BY MEANS OF  
THE PRINCIPLE OF MINIMUM ENTROPY PRODUCTION.  
J. HEAT TRANSFER, MAY 1964.

ZUBER N., FINDLAY J. A.  
AVERAGE VOLUMETRIC CONCENTRATION IN TWO-PHASE FLOW SYSTEMS.  
JOURNAL OF HEAT TRANSFER, NOV. 1965