

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
74, rue de la Fédération - 75-PARIS-15^e - Tél. 783 94-00

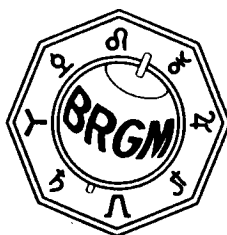
DIRECTION DU SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
B.P. 818 - 45-Orléans-La Source - Tél. 66-06-60

MANUEL PRATIQUE DES POMPAGES D'ESSAI

(2^e édition)

par

Guy TRUPIN



Département d'Hydrogéologie
45 - Orléans-La Source
B.P. 818 Tél. 66-06-60

SERVICE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL AQUITAINE
Avenue Docteur-Albert-Schweitzer
33 - Pessac - Tél. 91-30-26

69 SGL 258 HYD

- RESUME -

Les pompages d'essai en régime transitoire occupent aujourd'hui une place importante parmi les techniques d'investigations hydrogéologiques et les méthodes d'évaluation des ressources en eau souterraine.

Il est en effet de plus en plus nécessaire de parvenir à une connaissance quantitative des disponibilités en eau et à une prévision d'évolution des niveaux. La valeur des résultats auxquels conduisent ces pompages d'essai est fonction de la qualité de leur exécution et de la précision des mesures faites.

L'ignorance ou la sous-estimation des difficultés techniques rencontrées pendant un pompage d'essai sont la cause d'échecs fréquents qui ne permettent aucune interprétation sûre.

Ce "manuel pratique des pompages d'essai", qui est la réédition mise à jour d'un précédent rapport diffusé en 1964, rappelle l'ensemble des instructions et conseils qui permettent la préparation et la réalisation de mesures précises aptes à donner le maximum de validité aux résultats d'interprétation.

L'élaboration de cet ouvrage a été entreprise dans le cadre des études générales méthodologiques du Département d'hydrogéologie et des travaux d'inventaire des ressources hydrauliques du Service géologique régional Aquitaine.

AVANT - PROPOS

L'application des pompages d'essai en régime transitoire à l'étude des couches aquifères s'est largement développée au cours des cinq dernières années dans le cadre des travaux hydrogéologiques du B.R.G.M. A ce progrès, le "Manuel pratique des essais de pompage" élaboré par M. G. TRUPIN et paru en 1964 n'a pas été étranger, et l'épuisement rapide de cet ouvrage, malgré plusieurs réimpressions, témoigne de la faveur qu'il a rencontré parmi les hydrogéologues, tant dans le B.R.G.M. qu'à l'extérieur.

La présente réédition, entièrement refondue, a tiré profit de ce développement récent et elle a bénéficié en particulier des enseignements apportés par les nombreuses opérations réalisées au Service géologique régional Aquitaine. L'hydrodynamique théorique des puits a également accompli des progrès rapides qui ont élargi le champ d'application des pompages d'essai en offrant des possibilités d'interprétation dans des conditions de plus en plus complexes, mais qui imposent de mieux adapter les programmes et les dispositifs des essais aux conditions hydrogéologiques. Ce capital d'expériences et de connaissances nouvelles ont ainsi enrichi la seconde édition de ce Manuel, en venant s'ajouter à l'héritage de l'équipe du Centre des études hydrogéologiques du Maroc dont la première édition s'était heureusement inspirée.

Cet ouvrage prend place dans un ensemble cohérent de publications méthodologiques (aide-mémoires théoriques et instructions techniques) en cours d'élaboration par le Département d'hydrogéologie dans le domaine de l'hydrodynamique souterraine : hydrodynamique des ouvrages de captage et évaluation des paramètres des aquifères en particulier. Ces ouvrages doivent se compléter mutuellement, aussi s'est-on efforcé de restreindre le plus possible leurs recouvrements. C'est pourquoi l'"Abrégé sur l'hydraulique des puits" joint à la première édition du Manuel n'a pas été repris ici. C'est pourquoi aussi on a volontairement traité de manière succincte des opérations se situant à l'amont et à l'aval de l'exécution d'un pompage d'essai : programmation d'une part, interprétation (pour évaluer des paramètres) d'autre part. Ces opérations

ne sont d'ailleurs pas indépendantes, car elles nécessitent également une conception claire des buts de l'essai et une connaissance suffisante des conditions hydrogéologiques. Ces sujets sont traités respectivement dans deux rapports par Mme J. FORKASIEWICZ.

En se consacrant principalement à l'exécution des pompages d'essai, ce manuel occupe une place essentielle dans la série d'ouvrage annoncée. Le choix des programmes d'essais ou des méthodes d'interprétation se prête mal à des standards trop rigides, et les controverses à ce sujet ne sont pas closes. On se trouve sur un terrain plus solide lorsqu'il s'agit de fixer les modalités d'exécution garantissant la qualité et la précision des résultats d'observation. Trop souvent des défauts ou des accidents affectant le déroulement d'un pompage d'essai, affaiblissent ou même suppriment toute possibilité d'interprétation des données. Le coût relativement élevé de ces opérations rend d'ailleurs d'autant plus nécessaire de mettre tout en oeuvre pour valoriser au maximum leurs résultats.

Ce manuel aidera sans aucun doute les hydrogéologues et les techniciens chargés de réaliser ou de surveiller des pompages d'essai à atteindre ce but.

Je remercie M. G. TRUPIN d'avoir mené à bien, en sus de ses tâches au Service géologique régional Aquitaine, cet important travail.

J. MARGAT

TABLE

	<u>Pages</u>
AVANT PROPOS.....	
RESUME.....	1
INTRODUCTION	5

CHAPITRE 1

1.1 - <u>LE SYSTEME CAPTANT DES FORAGES</u>	8
1.1.1 - Tubes crépinés.....	8
1.1.1.1 - Calcul du pourcentage de vide d'un tubage crépiné...	8
1.1.1.2 - Détermination de la longueur du tube crépiné.....	9
1.1.1.3 - Nature du tube crépiné.....	11
1.1.2 - Massif filtrant.....	12
1.2 - <u>LES PIEZOMETRES</u>	13
1.3 - <u>LES APPAREILS DE POMPAGE</u>	14
1.3.1 - Puissance du moteur entraînant la pompe.....	15
1.3.2 - Pompage par émulsion.....	15
1.3.3 - Tubes guide de mesure.....	17
1.3.4 - Evacuation de l'eau pompée.....	18

CHAPITRE 2

2.1 - <u>LE MATERIEL DE MESURE</u>	20
2.1.1 - Sonde électrique.....	20
2.1.2 - Double décimètres.....	22
2.1.3 - Baromètre enregistreur et pluviomètre.....	22
2.1.4 - Thermomètre à mercure.....	22
2.2 - <u>LE MATERIEL D'INTERPRETATION</u>	24
2.2.1 - Dossier du pompage d'essai.....	24
2.2.1.1 - Composition du dossier.....	24

	<u>Pages</u>
2.2.2 - Papier bilogarithmique (log/log).....;	26
2.2.3 - Courbe de référence.....	26
2.2.4 - Papier semi-logarithmique.....	27

CHAPITRE 3

3.1 - <u>NATURE ET FREQUENCE DES OBSERVATIONS</u>	30
3.2 - <u>AVANT LE POMPAGE D'ESSAI</u>	31
3.3 - <u>PENDANT LE POMPAGE</u>	32
3.3.1 - Mesure du temps.....	32
3.3.2 - Mesure des niveaux.....	32
3.3.2.1 - Mesure du niveau piézométrique.....	33
3.3.2.2 - Mesure du niveau dynamique.....	33
3.3.2.3 - Enregistrement des niveaux.....	33
3.3.2.4 - Mesure et téléenregistrement des niveaux.....	34
3.3.3 - Mesure des rabattements par ligne d'air et limnimètre à mercure.....	34
3.3.3.1 - Description de l'installation..	36
3.3.3.2 - Manipulation et fonctionnement d'un limnimètre à mercure.....	36
3.3.4 - Mesure des débits.....	39
3.3.4.1 - Mesure des faibles débits par réservoirs (méthode volumétrique).....	41
3.3.4.2 - Mesure des débits par compteur totalisateur.....	45
3.3.4.3 - Mesure des débits à l'aide d'un déversoir.....	46
3.3.4.4 - Mesure des débits par système déprimogène.....	51
3.3.4.5 - Mesure des débits à la "Danaïde".....	54
3.3.5 - Conduite d'un pompage d'essai.....	60
3.3.5.1 - Système d'étude comportant un puits de pompage et quatre piézomètres.....	60
3.3.5.2 - Système d'étude comportant un puits de pompage sans piézomètre.....	61

CHAPITRE 4

4.1 - <u>GENERALITES</u>	63
4.2 - <u>CONSTRUCTION DES DIAGRAMMES</u>	63

	<u>Pages</u>
4.3 - <u>ETUDE ET RESULTATS D'UN POMPAGE D'ESSAI</u>	65
4.3.1 - Méthode de THEIS.....	65
4.3.1.1 - Détermination du coefficient d'emmagasinement..	66
4.3.1.2 - Construction de la courbe théorique de THEIS...	66
4.3.1.3 - Courbe représentative du pompage d'essai.....	66
4.3.1.4 - Détermination des valeurs $1/u$ et $W(u)$	67
4.3.1.5 - Calcul de la transmissivité.....	67
4.3.1.6 - Calcul du coefficient d'emmagasinement.....	68
4.3.2 - Méthode d'approximation logarithmique de JACOB.....	68
4.3.2.1 - Schématisation du graphique de JACOB.....	68
4.3.2.2 - Calcul de la transmissivité.....	70
4.3.2.3 - Calcul du coefficient d'emmagasinement.	70
4.3.2.4 - Etude de la remontée.....	71
4.3.2.5 - Vérification de l'approximation logarithmique..	71
4.4 - <u>COMPARAISON DES RESULTATS</u>	72
CONCLUSION.....	74
BIBLIOGRAPHIE.....	75
<u>ANNEXE 1</u> - Dossier du pompage d'essai.....	78
<u>ANNEXE 2</u> - Feuille bilogarithmique - courbe de référence.....	86
<u>ANNEXE 3</u> - Feuille semi-logarithmique.....	88
<u>ANNEXE 4</u> -	
4.1 - Tableaux de conversion des temps en secondes.....	91
4.2 - Volume des tubes selon leur diamètre.....	94
4.3 - Tableau de conversion des pouces en millimètres.....	95
4.4 - Tableau de conversion des l/s en m ³ /h.....	96
4.5 - Tableau de conversion des m ³ /h en l/s.....	98
<u>ANNEXE 5</u> - Calcul du débit par système déprimogène.....	100
<u>ANNEXE 6</u> - Calcul du débit de la Danaïde.....	111

	<u>Pages</u>
<u>ANNEXE 7</u> -	
7.1 - Représentation bilogarithmique de la descente.....	116
7.2 - Détermination par superposition des valeurs $1/u$ et $W(u)$	117
7.3 - Représentation semi-logarithmique de la descente.....	118
7.4 - Représentation semi-logarithmique de la remontée.....	119

- INTRODUCTION -

Le développement sans cesse croissant de la consommation d'eau pose des problèmes chaque jour plus nombreux, et l'exploitation rationnelle des eaux souterraines implique une connaissance de plus en plus précise des réservoirs aquifères dont les caractéristiques peuvent être déterminées par l'étude des pompages d'essai.

Cette détermination est basée sur la connaissance des lois de l'hydraulique des puits : on sait que la mise en route d'un pompage crée un abaissement du niveau d'eau dans le puits ; il en résulte, entre l'eau du puits et l'eau de la nappe , une différence de pression qui détermine aussitôt un écoulement à travers la paroi du puits. La surface piézométrique évolue alors selon un cône de rabattement qui, de proche en proche, s'étend, se creuse, en fonction :

- du débit puisé
- de la durée du pompage
- des caractéristiques hydrauliques des terrains dans lesquels se développe la baisse de niveau.

On doit à C.V. THEIS [1] la première analyse du processus suivant lequel une nappe captive libère son eau sous l'effet d'une dépression engendrée par un pompage en régime transitoire ; c'est à dire en régime d'écoulement ou d'alimentation encore non stabilisé, variable avec le temps [2].

Un pompage d'essai, en régime transitoire, interprété : selon la méthode de C.V. THEIS, la simplification de C.E. JACOB [3], ou les nombreuses méthodes dérivées mises au point depuis, permet de déterminer les principales caractéristiques hydrauliques de l'aquifère :

- la transmissivité qui est le produit de la perméabilité par l'épaisseur de l'aquifère, se définit comme la quantité d'eau susceptible de s'écouler par unité de front de l'aquifère, sous l'effet d'une différence de pression unitaire [4].

- le coefficient d'emménagement qui est la quantité d'eau susceptible d'être extraite d'un prisme d'aquifère de section unitaire, sous l'effet d'une baisse de pression égale à l'unité [4], pendant une durée définie.

La connaissance de ces caractéristiques est indispensable pour envisager l'exploitation des nappes d'eau souterraine ou l'amélioration des captages existants, pour prévoir les rabattements provoqués sur des ouvrages situés à proximité d'un nouveau point de puisage, et plus généralement pour prévoir les effets de toute perturbation apportée au régime naturel d'une nappe par des exploitations ou des aménagements hydrauliques, notamment en utilisant des méthodes de simulation. Quel que soit le but du pompage d'essai, il est essentiel pour aboutir à des résultats représentatifs de la réalité, de faire des observations précises et méthodiques. Faute de mesures fidèles et programmées, accompagnant une description rigoureuse de l'appareillage et du déroulement des opérations de nombreux pompages d'essai longs et coûteux sont restés et resteront inexploités. Le but essentiel de ce manuel est de présenter les dispositions à prendre pour réaliser pratiquement ces mesures et observations.

On examinera au chapitre 1 les équipements propres au forage testé et le matériel de pompage utilisé, qui doivent obéir à un certain nombre de conditions pour permettre un déroulement correct de l'essai.

Le matériel de mesure recommandé pour contrôler avec précision et efficacité l'évolution de la nappe aux différents stades de l'essai fait l'objet du chapitre 2.

Le chapitre 3, traite de la préparation, l'organisation et la conduite d'un pompage d'essai, et décrit plus particulièrement les divers appareils et méthodes de mesures de temps, de niveaux, de débits.

L'exemple d'un essai réel, exposé au chapitre 4, illustre l'exploitation et la première interprétation des résultats, dans un cas où la schématisation du système aquifère est simple.

Il sortirait du cadre de ce manuel de pénétrer davantage dans le domaine des interprétations.

- CHAPITRE 1 -

1.1 - LE SYSTEME CAPTANT DES FORAGES

1.2 - LES PIEZOMETRES

1.3 - LES APPAREILS DE POMPAGE

1.1 - LE SYSTEME CAPTANT DES FORAGES

Pour obtenir à l'exploitation un rendement correct représentatif des possibilités réelles de la nappe, un captage en terrain bouillant peu consolidé ou à granulométrie hétérogène, doit nécessairement comprendre un tube crépiné entouré d'un massif filtrant de gravier calibré, dont le but est :

- de soutenir les terrains
- d'éviter l'ensablement du forage en s'opposant au passage d'éléments fins
- de diminuer les pertes de charge en permettant une ouverture plus grande des crépines .

En terrain compact très cohérent à fissures ouvertes dénuées de remplissage de sable ou d'argile, crépine et massif filtrant sont inutiles.

1.1.1 - Tubes crépinés -

Le choix de la crépine est une étape importante qui conditionne en partie le rendement et la longévité de fonctionnement de l'ouvrage. Son diamètre, sa longueur, l'ouverture des fentes, sont des éléments déterminés par la nature du terrain et le débit maximal à extraire.

La courbe granulométrique des terrains permet de déduire la largeur des ouvertures de la crépine :

- En l'absence d'un massif de gravier l'ouverture des fentes sera égale au diamètre moyen des grains du terrain, tel que 50 % en poids, des particules lui soient de diamètre supérieur.
- En présence d'un massif de gravier, l'ouverture théorique des fentes de la crépine devra être inférieure au diamètre de la plus fine particule du gravier utilisé.

1.1.1.1 - Calcul du pourcentage de vide d'un tubage crépiné

Ce pourcentage, ou indice de vide, est le rapport de la surface totale des ouvertures, sur la surface totale de l'élément considéré.

Un tube crépiné dont l'indice de vide est inférieur à 5 %, conduit souvent à des vitesses trop élevées d'entrée de l'eau qui mettent en danger la longévité de la crépine.

Pour déterminer l'indice de vide, il est pratique d'opérer sur un élément de crépine d'un mètre de long délimité par deux repères à la craie.

- On calcule :

- Surface développée de l'élément de tube
- Surface d'une fente
- Nombre de fentes
- Surface totale des fentes

- Puis on obtient :

$$\text{indice de vide (en \%)} = \frac{\text{Surface totale des fentes} \times 100}{\text{Surface développée du tube}} \quad (1)$$

Ce calcul est important pour les tubes crépinés réalisés sur le chantier à l'aide du chalumeau et de la scie à métaux ; le contrôle doit être rigoureux car les ouvertures sont irrégulières et dépendent de la dextérité de l'ouvrier. En général ce procédé est à prohiber car l'indice de vide est très souvent inférieur à 7 %.

1.1.1.2 - Détermination de la longueur du tube crépiné

La surface totale des fentes, donc la longueur du tube crépiné, conditionne le débit maximal qu'il est théoriquement possible d'extraire d'un forage.

Il est nécessaire de s'assurer que la longueur de la crépine, en fonction de la hauteur du terrain aquifère, permet d'obtenir le débit escompté sans entraînement excessif d'éléments très fins de terrain.

En considérant :

$$s = \frac{Q}{v} \quad (2)$$

Avec :

- s = surface d'ouverture de la crépine en m²
- Q = débit d'exploitation en m³/h
- v = vitesse d'entrée de l'eau dans la crépine en m/h

La vitesse v doit être inférieure à la vitesse critique indiquée dans le tableau ci-après, en fonction du diamètre des particules de terrain. (d'après R.C. SMITH et W.S. TYLER in S. COTTEZ). [5]

Nature des éléments	∅ des particules en mm	Vitesses critiques en m/s
Sables silteux.....	0,01 à 0,10	0,01 à 0,02
Sables fins.....	0,10 à 0,20	0,02 à 0,035
Sables moyens.....	0,25 à 0,50	0,04 à 0,07
Gros sable.....	0,50 à 1,00	0,075 à 0,10
Très gros sable.....	1,00 à 2,00	0,11 à 0,17
Graviers fins.....	2,00 à 4,00	0,18 à 0,80

Exemple de calcul :

On pense exploiter à 100 m³/h un forage crépiné en 150 mm de diamètre dont le pourcentage d'ouverture est de 20 %. Les terrains aquifères sont des "sables fins" de granulométrie comprise entre 0,10 et 0,20 mm.

L'équation (2) s'écrit :

$$s = \frac{100}{0,02 \times 3\ 600} = 1,4 \text{ m}^2 \quad (3)$$

La surface des ouvertures représentant 20 % de la surface totale du tubage crépiné, la crépine aura pour surface totale :

$$\text{Surface totale crépinée} = \frac{1,4 \times 100}{20} = 7 \text{ m}^2 \quad (4)$$

Ce qui représente un tubage crépiné de longueur :

$$\frac{7}{3,14 \times 0,150} = 15 \text{ m} \quad (5)$$

Certains auteurs retiennent comme surface efficace d'ouverture des crépines, la moitié de la surface totale des fentes. La longueur réelle du tubage crépiné sera donc double de la longueur théorique calculée.

Dans l'exemple choisi, pour obtenir, sans danger pour le forage, le débit 100 m³/h souhaité, il faudra 30 m de tubage crépiné, à condition bien entendu, que la hauteur de terrain aquifère soit suffisante.

1.1.1.3 - Nature du tube crépiné -

C'est la qualité chimique de l'eau qui détermine la nature de la crépine à employer. Les principales causes de corrosion chimique sont d'après [6]

- un ph faible associé à une faible alcalinité, une faible dureté et une forte teneur en gaz carbonique .
- une forte teneur en oxygène dissous .
- la présence d'hydrogène sulfuré, de gaz sulfureux .
- la présence d'acides organiques ou de sulfate de fer .

Les métaux ou alliages qui résistent le mieux à l'attaque chimique sont par ordre décroissant :

- le monel
- le bronze
- l'acier inoxydable
- le cuivre
- le laiton
- le fer galvanisé

La corrosion électrolytique est à craindre lorsque deux métaux différents sont reliés électriquement dans une solution conductrice. Il est donc recommandé d'employer surtout pour les eaux salines, des crépines formées de matériaux monométalliques [7] page 504.

Les crépines en matière plastique sont insensibles à la corrosion, mais pour résister à l'écrasement elles ont souvent près de 10 mm d'épaisseur. Comme d'autre part, leurs ouvertures sont généralement faites par "trait de scie" les pertes de charge à l'entrée de la crépine sont élevées.

1.1.2 - Massif filtrant -

Appelé par le pompage, l'eau dans son mouvement vers le forage, entraîne des particules de terrain de grosseurs différentes qui, se déposant autour du tubage colmaterait les crépines, ensablent le puits ou, plus simplement, si elles étaient remontées détruiraient rapidement la pompe. Pour éviter ces accidents on entoure le tube crépiné d'une gaine de graviers, qui diminue la vitesse de l'eau dans les terrains périphériques du forage, et favorise le dépôt des particules fines, selon un ordre granulométrique décroissant, du terrain vers les crépines.

Le matériau composant le massif de gravier doit être propre, bien lavé composé exclusivement de graviers siliceux ronds ou roulés; Le gravier concassé, qui présente un moins bon coefficient de vide, est à proscrire au même titre qu'un matériau calcaire qui pourrait être détruit si une acidification s'avérait nécessaire pour nettoyer le forage ou augmenter son débit.

L'épaisseur optimale théorique d'un massif filtrant est comprise entre 75 et 200 mm.

Un massif filtrant efficace provoque le dépôt des éléments supérieurs au quart du diamètre des éléments les plus fins qu'il contient, si ces éléments sont dans la proportion de 20 % au moins.

Ainsi : Un massif filtrant, dont les gravillons les plus petits ont un diamètre de 2 mm, arrêtera au début du développement des particules de :

$$2/4 = 0,5 \text{ mm}$$

Lorsque une quantité suffisante d'éléments de 0,5 mm seront stabilisés, ceux-ci entraîneront à leur tour l'arrêt de particules plus fines jusqu'à l'immobilisation totale du terrain aquifère, qui se matérialisera par une eau pompée parfaitement claire.

Certains auteurs pensent que la courbe granulométrique idéale du gravier mis en place serait celle du terrain multiplié par 10 en tous points en négligeant les 10 % de grains les plus fins.

1.2 - LES PIEZOMETRES

Ils peuvent être des puits ou forages inexploités captant la même nappe à proximité du forage d'essai, mais ce sont en général des sondages de faible diamètre créés de toutes pièces, équipés sommairement, qui pénètrent dans la couche aquifère, pour étudier sur une zone plus grande les variations du niveau piézométrique engendrées par le pompage d'essai. Ils offrent l'avantage d'être à l'abri de perturbations inévitables sur le forage d'essai : pertes de charge, instabilité du niveau, surface de suintement.

Les piézomètres sont indispensables pour contrôler l'évolution du cône de rabattement autour du puits de pompage. Ils sont nécessaires pour évaluer le coefficient d'emmagasinement, et ils permettent d'apprécier des variations éventuelles de la transmissivité sur une zone plus étendue.

En raison de la forme du cône de rabattement, l'implantation théorique des piézomètres devrait se faire à des distances géométriquement croissantes. En pratique, l'objectif de l'étude, guide leur position. Avant de les implan-

ter il est souhaitable en supposant des valeurs de T et S, de prévoir, en fonction du temps et du débit de pompage, les rabattements possibles à des distances données pour éviter d'implanter des piézomètres hors de la zone que pourra atteindre le cône de rabattement.

En terrain homogène, s'ils sont situés à moins de deux fois la hauteur de la nappe, les piézomètres traverseront complètement les terrains aquifères ; les autres à plus grande distance du puits de pompage pourront pénétrer de quelques mètres seulement dans la nappe. En terrain hétérogène, pour éviter des mesures de pression à niveaux différents, et par là de graves erreurs sur la valeur des caractéristiques hydrauliques, le crépinage du piézomètre doit être identique à celui du puits de pompage, il aura la même longueur, et sera placé face aux mêmes terrains que la crépine du puits d'essai. Dans tous les cas de réalisation de piézomètres, il est indispensable de relever soigneusement la description géologique des terrains traversés et la position des tubages mis en place.

L'orientation, par rapport à la direction d'écoulement de la nappe, des rayons sur lesquels seront implantés les piézomètres, n'a pas une importance primordiale mais il est parfois utile de disposer de piézomètres sur un rayon aval en vue de préciser la position du point de stagnation, qui permet de calculer la largeur du "front d'alimentation", dans le cas où l'on parviendrait à un régime quasi-permanent [8] .

1.3. - LES APPAREILS DE POMPAGE

L'interprétation des essais de pompage en régime transitoire exige un débit aussi constant que possible, il faut donc classer les groupes de pompage en fonction de la régularité de leur régime.

On utilisera de préférence, une pompe immergée alimentée par un courant électrique dont le voltage est invariable, ou une pompe à axe vertical actionnée par un moteur électrique ou thermique à régime constant. Pour obtenir un entraînement régulier, la transmission moteur-pompe sera un arbre rigide relié par des cardans, ou à la rigueur une série de courroies trapézoïdales bien tendues et en bon état. Les courroies plates sont à déconseiller ; elles obligent à de fréquents réglages de tension qui nuisent à la régularité du débit.

1.3.1 - Puissance du moteur entraînant la pompe -

Théoriquement, la puissance en CV, nécessaire à un moteur, pour élever à une hauteur connue, un débit donné, s'obtient à partir de la formule :

$$\text{Puissance en CV} = \frac{\text{débit en l/s} \times \text{hauteur en m}}{75} \quad (6)$$

ce qui est une puissance théorique.

Pour avoir la puissance pratique, compte tenu du rendement des différentes parties de l'installation, il est nécessaire de prendre une marge de sécurité car pour un essai de pompage il faut éviter d'utiliser les pompes en limite de puissance, donc :

$$\text{Puissance pratique en CV} = \frac{\text{débit en l/s} \times \text{hauteur en m}}{50} \quad (7)$$

1.3.2 - Pompage par émulsion -

Ce procédé consiste à introduire dans le sondage un tube d'amenée d'air qui sera descendu bien en dessous du niveau piézométrique. Un diffuseur à nombreux orifices distribue et mélange à son extrémité inférieure, l'air le plus intimement possible dans la masse d'eau environnante. L'émulsion, air + eau, grâce à son poids spécifique moins élevé, monte dans le tube de refoulement, et, si la quantité d'air est suffisante l'eau s'écoule en surface (fig. 1).

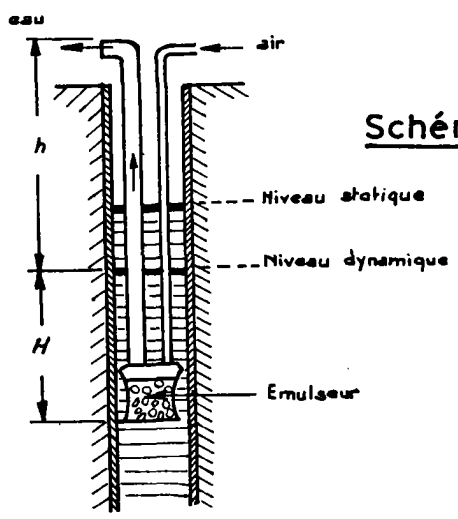


Schéma d'installation d'un émulseur

Figure 1

Avant d'effectuer un pompage par émulsion, que l'on appelle aussi pompage par air lift, il convient de déterminer la profondeur d'immersion de l'émulseur qui est liée aux coefficients α et α'

$$\alpha = \frac{H}{H + h} \quad \text{avec } 0,4 < \alpha < 0,6 \quad (8), \quad \alpha' = \frac{H}{h} \quad \text{avec } 0,8 < \alpha' < 1,2 \quad (9)$$

H est la profondeur en mètre de l'immersion du tube d'air sous le niveau dynamique.

h est la hauteur en mètre du refoulement, mesurée, du niveau dynamique à l'orifice d'écoulement.

La profondeur d'immersion de l'émulseur est limitée par la pression d'air des compresseurs qui sur la plupart des chantiers est voisine de 7 kg/cm^2 ; le diamètre intérieur du tube d'évacuation de l'émulsion conditionne la capacité du compresseur, c'est-à-dire la quantité d'air qu'il est nécessaire pour élever à une hauteur connue un débit donné. Ces valeurs qui interprètent les chiffres de la Sté WORTHINGTON sont représentés par le tableau ci-après : [9]

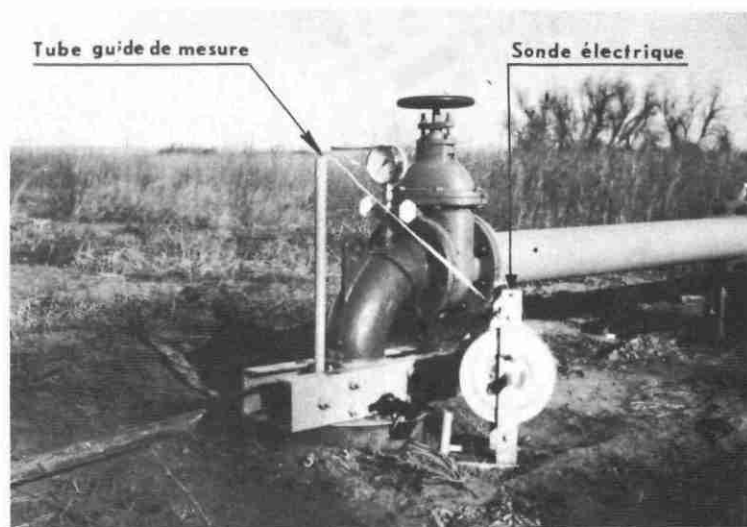
Ø Intérieur du tube d'évacuation de l'émulsion	Capacité d'évacuation d'eau par air/lift	Consommation d'air par minute (c'est-à-dire capacité minimal en lit/minute du compresseur) pour élévation des débits considérés à des hauteurs de :				
		18 mètres	38 mètres	76 mètres	137 mètres	197 mètres
<u>en pouces</u>	<u>lit/heure</u>					
3"	de 9 000 à 18 000	de 355 à 710	de 630 à 1 250	de 1 000 à 2 000	de 2 000 à 4 000	de 3 300 à 6 600
4"	de 18 000 à 27 000	de 710 à 1 070	de 1 250 à 1 900	de 2 000 à 3 000	de 4 000 à 6 000	de 6 600 à 10 000
5"	de 32 000 à 45 000	de 1 250 à 1 770	de 2 250 à 3 200	de 3 600 à 5 100	de 7 000 à 10 000	de 12 000 à 16 000
6"	de 45 000 à 90 000	de 1 770 à 3 550	de 3 200 à 6 300	de 5 100 à 10 000	de 10 000 à 20 000	de 16 500 à 33 000
7"	de 90 000 à 115 000	de 3 550 à 4 500	de 6 300 à 8 000	de 10 000 à 13 000	de 20 000 à 25 000	de 33 000 à 42 000
8"	de 115 000 à 138 000	de 4 500 à 5 450	de 8 000 à 9 700	de 13 000 à 16 000	de 25 000 à 30 000	de 42 000 à 51 000

La puissance du compresseur se calcule approximativement en considérant que 10 CV fournissent 1 000 litres d'air à la minute.

Si le pompage par air/lift offre d'indiscutables avantages et permet d'effectuer des essais de pompage sur des forages de faible diamètre ou sur des sondages déformés par la poussée des terrains, l'essai de pompage par émulsion, qui apparaît comme une succession régulière de sorties plus ou moins brutales de mélange air et eau à la façon des geysers, doit être considéré comme le plus mauvais moyen de soumettre un forage aux essais. L'expérience montre que les observations effectuées pendant la "descente" sont trop perturbées par les phénomènes mécaniques ou physiques et par là difficilement exploitables. Dans tous les cas de pompage d'essai à l'émulsion on devra suivre la remontée du niveau avec une particulière attention.

1.3.3 - Tubes guide de mesure -

PHOTO 1



Un tube guide de mesure est un tube de 1" ou 1" 1/4 ouvert aux deux extrémités, placé à l'intérieur du forage entre la pompe et le tubage (photo 1) ; il permet d'effectuer les mesures de niveaux à l'abri des chutes d'eau provenant des horizons découverts par le cône de rabattement ; il élimine les turbulences, protège et guide la sonde électrique au cours de ses nombreux va et vient en descente et remontée. La pose d'un tube guide de mesure doit être exigée sur tous les forages livrés aux essais.

1.3.4 - Evacuation de l'eau pompée -

C'est souvent le problème matériel le plus difficile à résoudre car l'eau sortant du forage doit être rejetée suffisamment loin pour éviter son retour à la nappe et son "recyclage".

Pour un essai de courte durée l'irrigation contrôlée et judicieuse des terrains situés à une centaine de mètres du forage est suffisante. Des travaux plus importants, lorsque l'essai est de longue durée, s'avèrent nécessaires pour éviter que l'eau pompée n'influence le déroulement normal de l'étude.

Chaque fois que cela est possible, il est recommandé de conduire l'eau jusqu'à un cours d'eau superficiel naturel ou artificiel (ruisseau, canal, égout, rigole de drainage ou collature) assurant son évacuation lointaine afin d'en empêcher la stagnation sur le sol, même assez loin du forage.

D'autre part, pour éviter que les premières mesures de remontée du niveau, soient perturbées par la vidange de la colonne de refoulement qui se traduit par un relèvement brutal, momentané et parfois important du niveau, il convient de s'assurer que la pompe est équipée d'un clapet de pied en parfait état de fonctionnement.

- C H A P I T R E 2 -

2.1 - Le matériel de mesure

2.2 - Le matériel d'interprétation

2.1 - LE MATERIEL DE MESURE

- "Sondes électriques" (1) (une pour le forage plus une pour chaque piézomètre, plus une de secours)
- Double-décamètres (autant que de sondes électriques, plus un de secours)
- 1 mètre ruban
- 2 compte-secondes (1 tour de cadran pour 60 secondes)
- 1 réveil avec minuterie sonore
- 1 baromètre enregistreur
- 1 pluviomètre
- 1 thermomètre à mercure (-10 à +60°) dans un étui robuste
- 6 flacons en plastique pour prises d'échantillons
- Matériel pour prélèvement bactériologique
- Petit outillage approprié (scie à métaux, pince coupante, lime, marteau, clous, chatterton, couteau de poche, piles de rechange pour sondes électriques)

2.1.1 Sonde électrique -

L'appareil est formé de deux électrodes (appelées tête de sonde) reliées, par deux fils conducteurs isolés, à un milliampèremètre ou à un signal sonore ou lumineux alimenté par une pile sèche, le tout enroulé et fermé dans un boîtier.

Le fonctionnement de l'appareil est simple : le fil est déroulé jusqu'à ce que les deux électrodes touchent le plan d'eau, à ce moment le circuit électrique se ferme, ce qui se traduit par le fonctionnement du signal indicateur : déviation de l'aiguille du milliampèremètre, allumage de la lampe-témoin, etc...

Il existe de nombreux modèles de ces appareils qui se différencient surtout par la nature et la graduation de leur câble.

La sonde lumineuse "OTT" à câble gradué au centimètre permet de

(1) - dénomination donnée couramment aux limnimètres à contact électrique.

lire facilement et immédiatement les valeurs mesurées. Cet appareil présenté avec un câble de 50, 100 ou 200 mètres est actuellement très utilisé. Il est assez robuste, mais coûte cher.

La sonde transistorisée "Rossignol" a un embout de plus faible encombrement qui permet des mesures à l'intérieur d'un tube de 15 mm de diamètre, elle est moins pratique à l'emploi, son câble n'a qu'une graduation métrique, son succès est dû à sa robustesse et à son prix, quatre fois inférieur à celui de la précédente.

Le pluviomètre, à flotteur et contre-poids, genre HWK, qui indique directement sur un cadran la profondeur du plan d'eau, est plus spécialement utilisé sur les piézomètres. Son installation demande une verticalité presque parfaite et un espace libre important.

De nombreuses sondes électriques de fabrication sommaire sont encore utilisées, mais l'allongement du câble, reliant les deux électrodes à l'indicateur de contact, est leur principal défaut.



Avec un peu d'entretien, et quelques précautions pendant la manoeuvre du câble (éviter de le laisser glisser sur l'extrémité des tubages, photo n° 2.) une sonde électrique de bonne fabrication rendra des services appréciés pendant plusieurs années.

2.1.2 Double décamètres-

L'emploi d'un double décamètre fixé le long du câble de la sonde électrique permet de déterminer rapidement la valeur du niveau dynamique ou du rabattement lorsque le câble du limnimètre n'est pas gradué.

On utilise de préférence des double-décamètres souples, en toile armée et plastifiée, qui résistent bien à l'eau. De temps à autre il est nécessaire de vérifier s'ils n'ont pas subi d'allongement en les comparant à un double-décamètre en acier. A titre indicatif, il est bon de savoir que les double-décamètres en bon état et de bonne qualité, constitués d'une armature de fibre de verre tissée à double enrobage plastique, subissent sous 50 kg de tension un allongement résiduel de 0,11 % (1 mm par mètre), et qu'ils se dilatent pour une tension de 5,8 kg sous une température de 25° de 0,01 % (1 mm pour 10 m) passant à 0,05 % pour une température de 55°.

2.1.3 Baromètre enregistreur et pluviomètre -

De nombreux exemples illustrent la relation qui existe entre la pression atmosphérique et le niveau de l'eau dans les puits. Quand la pression diminue (orage), le niveau d'eau monte ; puis quand la pression atmosphérique augmente le niveau d'eau descend. En nappe libre, les variations peuvent être de quelques centimètres, mais en nappes captives elles atteignent parfois 20 à 30 centimètres. L'enregistrement de la pression atmosphérique permet souvent d'expliquer une évolution anormale des niveaux d'eau pendant les essais. De même pour un pompage d'essai, de moyenne ou longue durée, en nappe libre, l'installation d'un pluviomètre fournira d'utiles indications.

2.1.4 Thermomètre à mercure -

Pour faciliter les mesures de température et protéger efficacement le thermomètre on aura avantage à réaliser un étui cylindrique (fig. 2) fermé à sa base dans lequel le thermomètre sera maintenu par deux rondelles de caoutchouc percées en leur centre et rentrant en force dans l'étui, elles le bloqueront et amortiront les chocs. Une ouverture latérale effectuée sur le tube permettra la lecture de la température qui sera encore facilitée par le fait

qu'une quantité d'eau se trouve enfermée dans le récipient que forme la partie inférieure de l'étui dans laquelle plonge le réservoir à mercure. La seule précaution à prendre est de laisser le thermomètre quelques dizaines de secondes dans l'eau avant de le retirer pour faire ensuite une lecture facilitée et sans risque d'erreurs dues à un accès parfois difficile de l'exutoire des puits ou forages testés.

Thermomètre à mercure et son étui réservoir.

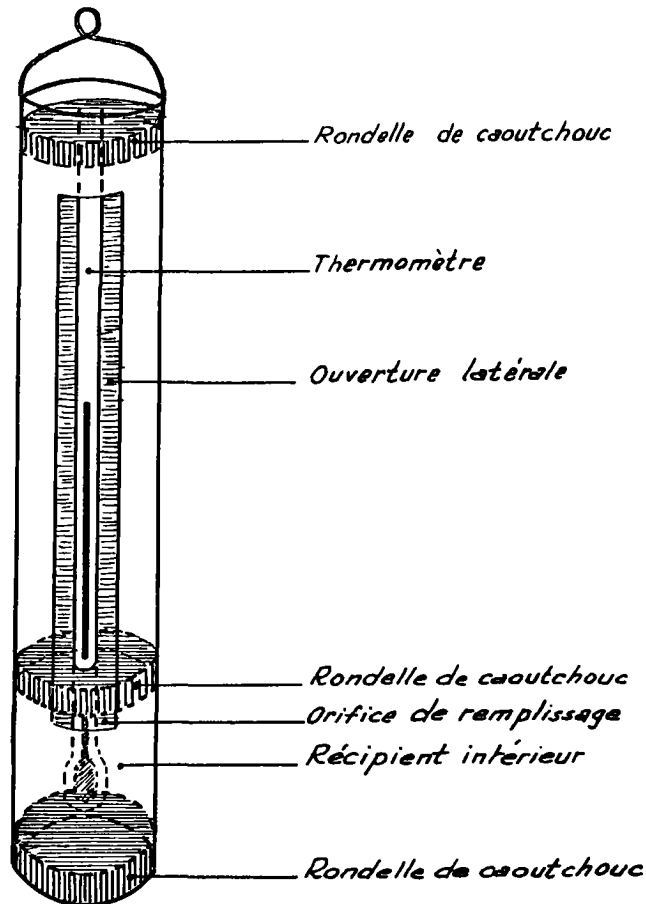


Figure 2

2.2 LE MATERIEL D'INTERPRETATION

- Dossier du pompage d'essai
- Bloc de papier bilogarithmique log/log
- Bloc de papier semi logarithmique
- Courbe de référence
- Règle à calculer

2.2.1 Dossier du pompage d'essai - (Annexe 1)

Il sert à consigner selon une forme normalisée les renseignements et les résultats d'observations relatifs à tout pompage d'essai réalisé dans le cadre d'opérations hydrogéologiques. Il peut également constituer l'annexe d'un rapport.

Le dossier du pompage d'essai regroupe toutes les informations obtenues directement, avant pendant et après le pompage proprement dit, il a été conçu pour être rempli sur le terrain par l'opérateur responsable du pompage d'essai qui barrera toutes les mentions inutiles.

2.2.1.1 Composition du dossier -

Il se présente comme une chemise de liasse à deux volets de format 21 x 27 pouvant contenir un certain nombre de feuilles d'observations et d'autres pièces annexes.

Les deux volets de la chemise de liasse comportent, outre différents renseignements généraux sur l'essai, des rubriques relatives :

- aux caractéristiques de l'ouvrage
- au dispositif de pompage
- aux dispositifs de mesure et aux piézomètres.

Cinq feuillets d'observation venant en feuilles intercalaires ont été conçus pour consigner:

- Feuillelet 1 : Les observations d'essai de puits à n'utiliser que pour les essais à plusieurs paliers de pompage successifs.

- Feuille 2 : Les observations faites avant le début du pompage, particulièrement les mesures de niveaux des ouvrages au repos qui sont très importantes pour interpréter des pompages d'essai de longue durée.

- Feuille 3 : Les observations faites pendant le pompage dans le puits d'essai. Ce sont toutes les mesures, de temps-colonnes 1-2-3 ; de niveaux-colonne 4 ; et de débit-colonnes 5-6 ; réalisés pendant la période de marche de la pompe.

- Feuille 4 : Les observations faites, pendant le pompage, dans les piézomètres.

- Feuille 5 : Les observations faites après l'arrêt du pompage, dans le puits ou les piézomètres:

REMARQUES :

1) Chacun de ces cinq feuillets peut être utilisé en plusieurs exemplaires à numéroter à partir de 1.

2) Sur les feuilles d'observations on reporte :

- des résultats de mesures brutes opérées sur le terrain (heure, lecture de niveau, lecture de temps pour mesure de débit).

- des résultats de calculs servant aux interprétations et aux constructions graphiques ($Q, t, t', 1 + \frac{t_p}{t}$).

- Seuls les premiers doivent obligatoirement être reportés sur le terrain sous la responsabilité de l'opérateur.

3) Le choix de l'unité de temps (heure, minute ou seconde) est laissé aux opérateurs pour l'expression de t et t' .

4) Feuille d'observation en pompage pour les piézomètres (feuille 4), elle peut être indistinctement utilisée soit pour deux piézomètres, soit pour un piézomètre, le tableau de droite devenant alors la suite du tableau de gauche.

5) Les calculs de rabattements spécifiques (rapportés au débit) ne sont pas recommandés, aussi n'a-t-il pas été prévu de colonne spéciale. Leurs valeurs peuvent néanmoins être portées par l'opérateur qui le jugerait nécessaire dans la colonne "observations".

6) Indication des niveaux :

Il est recommandé de ne consigner dans les feuilles d'observations que les données résultant de lecture : soit la profondeur, soit le rabattement lorsqu'il est lu directement.

Dans le cas où l'on indique la profondeur, il n'est pas nécessaire de réserver une colonne distincte pour le rabattement, puisque les valeurs de profondeur peuvent aussi bien être portées directement sur les graphiques.

7) Dans le feuillet 5, observations après pompage, remontées, il est pratique de remplacer $\frac{t}{t'}$ par la notation $1 + \frac{tp}{t'}$, la durée du pompage tp étant fixée une fois pour toutes ; l'emploi de la règle à calculer en est grandement facilité.

Le dossier du pompage d'essai a été mis au point au département d'hydrogéologie du B.R.G.M.,

2.2.2 - Papier logarithmique (log/log) -

L'annexe 2 reproduit une feuille de papier bilogarithmique log/log c'est à dire logarithmique dans les deux sens, tirée d'un bloc "Précis n° 147" qui permet la représentation graphique des pompages d'essais et leur interprétation selon la méthode de THEIS.

2.2.3 - Courbe de référence - (annexe 2) -

C'est une courbe calculée par THEIS puis modifiée par Y. EMSELLEM 10 qui en inversant la variable réduite reportée en abscisse, permet d'éliminer un grand nombre de calculs fastidieux.

L'axe des ordonnées (axe vertical) porte les valeurs $W(u)$ et l'axe des abscisses (axe horizontal) porte les valeurs $1/u$ qui entrent dans le calcul des coefficients de transmissivité et d'emmagasinement. La courbe de référence est construite à partir des valeurs indiquées par le tableau ci-après [10]

$1/u$	$W(u)$
0,143	0,0001
0,2	0,0011
0,5	0,049
1	0,22
2	0,56
5	1,22
10	1,82
20	2,47
50	3,36
100	4,04
200	4,73
500	5,64
1 000	6,33

$1/u$	$W(u)$
2 000	7,02
5 000	7,94
10 000	8,63
20 000	9,33
50 000	10,24
100 000	10,93
200 000	11,63
500 000	12,54
1 000 000	13,23
2 000 000	13,93
5 000 000	14,84
10 000 000	15,53
infini	infini

2.2.4 - Papier semi-logarithmique -

L'annexe 3 donne une reproduction d'une feuille de papier semi-logarithmique tirée d'un bloc "Précis n° 150" qui permet la représentation graphique de la majorité des pompages d'essai en régime transitoire. Des indications utiles à la compréhension de la suite du texte y ont été reportées.

L'axe des abscisses est divisé en quatre cycles logarithmiques. Chaque cycle correspond à l'intervalle de temps compris entre :

- pour le 1er cycle les temps 10^2 à 10^3 secondes
(0,036 à 0,36 heure)
- pour le 2e cycle les temps 10^3 à 10^4 secondes
(0,36 à 2h 46 mn)
- pour le 3e cycle les temps 10^4 à 10^5 secondes
(2h 26 mn à 28h)
- pour le 4e cycle les temps 10^5 à 10^6 secondes
(28h à 11 jours et 14h)

Selon cette division on représente sur la feuille le déroulement des essais de pompage de 2 minutes à 11 jours.

L'axe des ordonnées divisé arithmétiquement permet le report des niveaux dynamiques, des rabattements ou des rabattements spécifiques.

- C H A P I T R E 3 -

METHODE D'EXECUTION

PREPARATION, ORGANISATION

ET

CONDUITE DU POMPAGE D'ESSAI

Pour mener à bien la tâche qui lui est confiée, le technicien doit adopter une méthode de travail qui tient compte du but de l'étude, des moyens mis à sa disposition et de l'évolution de l'essai.

3.1 - NATURE ET FREQUENCE DES OBSERVATIONS

L'ensemble du matériel décrit au chapitre 2 servira à faire des observations de natures différentes mais qui exigent toutes une bonne précision :

- Mesure des temps
- Mesure des niveaux d'eau
- Mesures des débits

La fréquence de ces observations dépend de la méthode d'interprétation que l'on entend suivre. Le tableau ci-dessous en propose le rythme minimal variable pour les interprétations de pompages en régime transitoire.

En début d'essai un opérateur entraîné pourra en faire de plus nombreuses, elles s'avèrent parfois très utiles pour la compréhension de certains phénomènes.

En comptant à partir du début de la descente ou du début de la remontée	Mesure des rabattements	Mesure des débits
0 à 5 minutes	chaque 30 secondes	toutes les 2 minutes
5 à 15 minutes	chaque 30 minutes	toutes les 5 minutes
15 à 30 minutes	toutes les 2 minutes	toutes les 5 minutes
30 à 60 minutes	toutes les 3 minutes	toutes les 6 minutes
1 heure à 2 heures	toutes les 5 minutes	toutes les 5 minutes
2 heures à 6 heures	toutes les 10 minutes	toutes les 10 minutes
6 heures à 12 heures	toutes les 30 minutes	toutes les 30 minutes
au-delà de 12 heures	toutes les heures	toutes les heures

Remarque 1

Pendant la descente, et au-delà des 30 premières minutes il est essentiel qu'à chaque mesure de niveau corresponde une mesure de débit.

Remarque 2

Au début de la descente ou de la remontée les mesures, avec des observateurs bien entraînés, peuvent être plus nombreuses.

3.2 - AVANT LE POMPAGE D'ESSAI

- Mesurer et noter la profondeur totale de chacun des ouvrages
- Mettre en place les sondes électriques
- Toutes les 6 heures, pendant une durée si possible égale à 2 fois celle du pompage prévu, et au moins 24 heures avant l'essai, faire des mesures de niveaux piézométriques sur l'ensemble des ouvrages. Consigner ces observations sur un même tableau (annexe 1 feuillet 2)
- S'assurer de la pose d'un tube piézométrique sur la station de pompage qui protégera et guidera la sonde électrique, stabilisera le plan d'eau et par conséquent facilitera la prise de mesures exactes.
- Etalonner la pompe pour que les débits désirés pendant l'essai soient obtenus rapidement et sans manoeuvres inutiles. Lorsque la conduite d'évacuation est équipée d'une vanne, compter et noter le nombre de tours d'ouverture qui correspond à chacun des débits voulus.
- Vérifier que l'eau pompée soit évacuée suffisamment loin pour éviter son retour dans le puits par réinfiltration.
- Laisser le forage au repos 24 heures avant l'essai de pompage
- Relever les coupes géologiques, les diamètres et les longueurs des différents tubages pleins ou crépinés qui équipent les ouvrages, y compris la colonne de refoulement de la pompe.
- Faire un plan d'ensemble du système d'observation (situation et distance entre les différents ouvrages)

3.3 - PENDANT LE POMPAGE D'ESSAI

3.3.1 - Mesure du temps -

A partir de l'origine du pompage on décompte les temps t_p exprimés en secondes, où s'effectuent les opérations de mesures des niveaux et des débits, (chiffres reportés sur les feuilles d'observation en pompage, colonnes 1, 2 et 3 du feuillet 3 pour le puits d'essai, colonnes 1 et 2 du feuillet 4 pour les piézomètres).

En annexe 4+1 un tableau donne la conversion des temps en secondes.

A l'arrêt du pompage, lorsque commence la remontée des niveaux, on décompte le temps t' en secondes écoulé depuis l'arrêt des pompes. (Ces chiffres se reportent colonnes 1, 2 et 3, feuillet 5, feuille d'observation après pompage).

En colonne 5 de la feuille d'observation en pompage - Puits - (feuillet 3) on reporte le temps nécessaire pour débiter un certain volume (remplissage d'une cuve étalonnée ou enregistrement d'un volume déterminé par compteur totalisateur).

Il est recommandé durant l'essai de décompter les temps en fonction de l'heure officielle (pour la France G.M.T. + 1). Cette précaution permet de réajuster facilement les calculs en cas de panne de matériel d'horlogerie du chantier. Et il est d'autre part important d'avoir un décompte de temps à partir de l'heure officielle pour interpréter par exemple l'influence éventuelle des marées sur le niveau dynamique du pompage d'essai. Pour la commodité du calcul des temps t_p et t' il semble préférable de commencer l'essai à une heure ronde (9h ou 10h par exemple).

3.3.2 - Mesures des niveaux -

Les courbes d'interprétation des pompages d'essais, selon la méthode simplifiée de JACOB, peuvent se construire en utilisant la variation dans le temps du niveau dynamique.

Il faut donc se limiter pendant l'essai à suivre rigoureusement l'évolution du niveau d'eau sous l'effet du pompage.

3.3.2.1 - Mesure du niveau piézométrique -

Quelques instants avant la mise en route du pompage il est indispensable de mesurer à compter d'un repère qui restera l'origine invariable des mesures de niveaux pendant toute la durée de l'essai, la profondeur du niveau d'eau au repos de l'ensemble des puits et piézomètres d'observation. Cette mesure s'inscrit sur la première ligne des feuilles d'observation pour le temps $t=0$ correspondant au début du pompage ; colonne 4 pour la feuille du puits et colonne 3 pour la feuille du piézomètre.

3.3.2.2 - Mesure du niveau dynamique -

Le niveau dynamique est la distance qui, à un instant donné, sépare le repère d'origine des mesures, du plan d'eau abaissé sous l'effet du pompage.

Sur le puits d'essai, la mesure s'effectue à l'intérieur du tube guide (cf. §13.3), l'indication lue sur le câble gradué de la sonde électrique s'inscrit colonne 4 de la feuille d'observation en pompage, feuillet 3.

Pour les piézomètres cette mesure se fait directement à l'intérieur du tubage et se reporte sur le feuillet 4 colonne 3.

Durant "la descente" la valeur des niveaux dynamiques s'accroît ; pendant "la remontée" elle décroît, pour retrouver ou tendre à retrouver le niveau piézométrique d'origine défini au paragraphe précédent.

3.3.2.3 - Enregistrement des niveaux -

L'enregistrement graphique des niveaux est peu utilisé pour les pompages d'essai de courte ou moyenne durée. Le limnigraphe enregistreur peut se justifier pour suivre l'évolution du plan d'eau de piézomètres situés loin du puits de pompage et pour des essais de longue durée. Il entraîne un manque de précision dans le repérage des temps et nécessite des piézomètres de diamètre supé-

rieur à 150 mm.

3.3.2.4 - Mesure et télé-enregistrement des niveaux -

L'appareil mis au point par la Société ISMA et utilisé par le S.G.R. JURA ALPES [11] permet de suivre simultanément l'évolution des niveaux sur 12 ouvrages différents. L'organe de mesure installé sur le piézomètre est un fluvio-mètre AP 4 à flotteur et contre-poids qui entraînent un potentiomètre torique relié par câble à l'enregistreur potentiométrique POLYCOMP. (Photo 3).

L'enregistreur qui est actionné par un moteur synchrone peut inscrire 12 traces différentes. Chaque trace est en réalité constituée par une succession de points venant s'imprimer toutes les deux secondes. Dans le cas de l'utilisation des 12 traces on a donc une mesure répétée toutes les 24 secondes pour un appareil de lecture donné.



L'amplitude de l'inscription sur le diagramme est de 250 cm à l'échelle 1/10.

Si l'inscription suit le rythme pré-établi d'un cycle en 24 secondes on peut régler le déroulement du papier entre les vitesses extrêmes de 30 mm/h à 19 200 mm/h. On dispose en effet des vitesses : 30, 60, 120, 240, 480, 960, 1 920 mm/h, vitesses que l'on peut par simple jeu d'un levier multiplier par 10 sans arrêter l'appareil. Ce détail est précieux pour l'utilisation lors d'essai de débit car on peut choisir une échelle de temps très grande lors du début de la

réaction qui est très brutale et qui nécessite le plus de précision, et ultérieurement adopter une "vitesse de croisière" plus réduite.

3.3.3 - Mesure des rabattements par ligne d'air et limnimètre à mercure -

Ce procédé à employer en dernier ressort permet de connaître, avec une certaine approximation, le rabattement occasionné par un pompage lorsque le diamètre de la pompe ne permet pas le passage de la tête de sonde.

SCHEMA D'INSTALLATION D'UN LIMNIMETRE A MERCURE

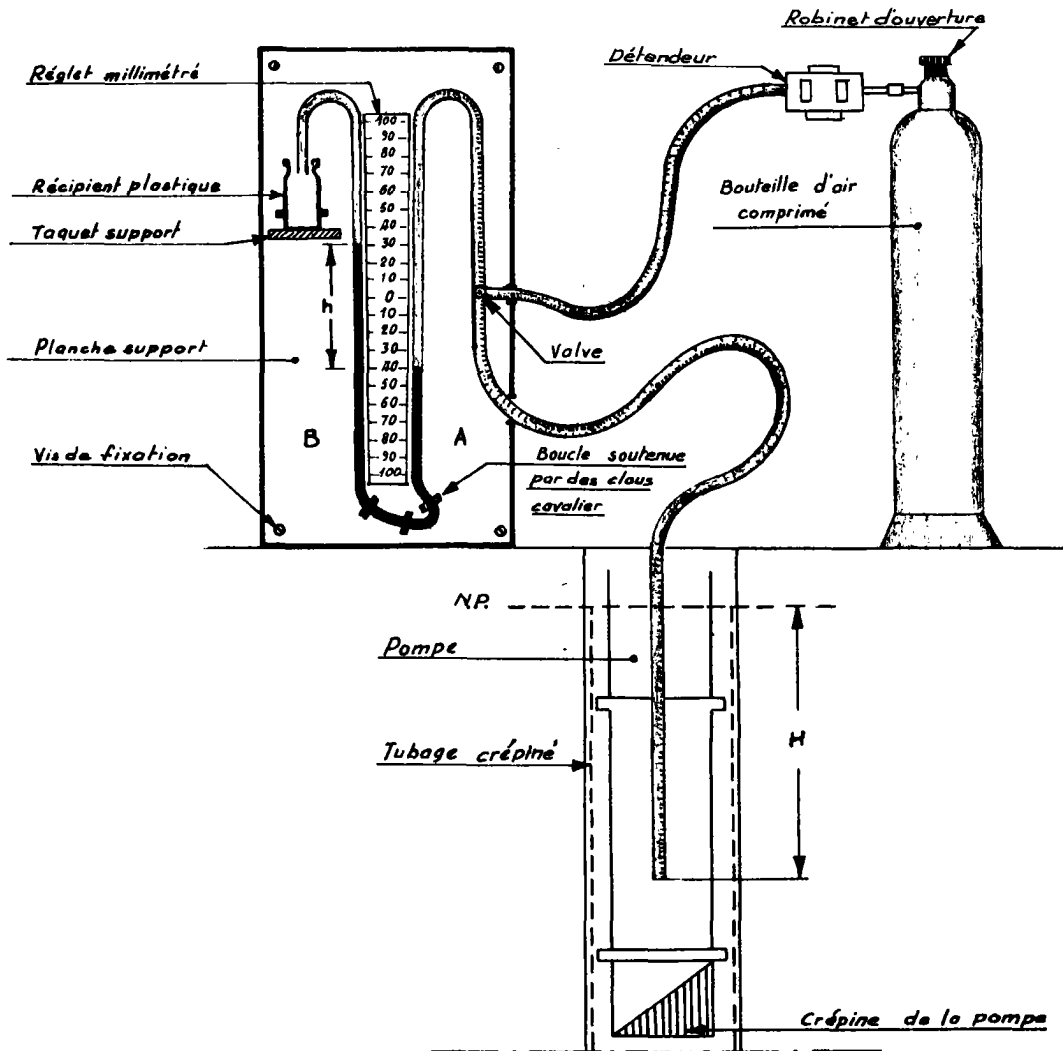


Figure 3

3.3.3.1 - Description de l'installation (fig.3)

Un tube de polychlorure de vinyle de deux millimètres de diamètre, dont l'extrémité inférieure se trouve environ un mètre au-dessus des crépines de la pompe, est fixé le long des colonnes de refoulement. Des colliers de serrage tous les deux mètres le maintiennent suffisamment tendu pour éviter sa détérioration.

En surface, le tube se raccorde sur un T dont la barre verticale est une valve d'auto, qui par l'intermédiaire d'un détendeur et d'un raccord souple est branché sur une bouteille d'air comprimé.

Au deuxième bras du T est fixé un tube vinyle de 4 millimètres de diamètre qui court le long de deux réglés gradués, d'un mètre de long, mis en opposition. Il est nécessaire de prévoir un récipient de récupération du mercure, de volume suffisant, de le fixer solidement et de le mettre à la pression atmosphérique. Ce flacon de plastique recueillera éventuellement le mercure chassé par suite d'une ouverture trop brusque de la bouteille d'air comprimé.

3.3.3.2 - Manipulation et fonctionnement d'un limnimètre à mercure -

Le gaz comprimé de la bouteille est envoyé dans le tube vinyle sous pression réduite par le détendeur réglable. Le mercure repoussé dans le tube en U sous la pression de l'air voit son niveau descendre en A et remonter en B (l'ouverture de la bouteille d'air comprimé doit se faire doucement pour éviter que le mercure repoussé trop brutalement soit évacué dans le récipient plastique.

La pression de l'air est maintenue jusqu'à stabilisation des niveaux de mercure dans les deux colonnes. Ce point correspond à l'évacuation totale de l'eau renfermée dans le tube vinyle qui est alors complètement rempli d'air.

Lorsque l'on ferme la bouteille, l'air maintenu par la valve, qui l'empêche de s'échapper vers l'extérieur, sera d'autant plus comprimé dans le tube limnimétrique que la hauteur d'eau dans le forage sera plus grande par rapport au pied du tube. Cette compression se traduit par une descente du mercure en A

et une remontée en B. La valeur de cette pression est lue sur le réglelet gradué central.

A chaque variation du niveau d'eau dans le forage correspond une pression plus ou moins grande dans le tube vinyle provoquant une différence plus ou moins grande entre les niveaux A et B du mercure.

En réalisant cette installation il faut veiller à rendre particulièrement étanches les raccords du tube vinyle avec les parties métalliques (valve et détendeur). On obtient ce résultat en usant de raccords tronconiques dont la grande base aura un diamètre double de celui du tube souple que l'on raccordera en force après l'avoir trempé dans de l'eau bouillante.

Pour remédier aux fuites éventuelles, il est recommandé de mettre le limnimètre en pression par une brève ouverture de la bouteille d'air comprimé avant chaque lecture des niveaux A et B du mercure.

Avant l'installation de la pompe il est nécessaire de mesurer, le niveau piézométrique selon le procédé classique (cf. §33.2.1). Pour simplifier les conversions des hauteurs de mercure en hauteurs d'eau, il est possible avant l'immersion du tube vinyle de régler, en allongeant ou diminuant la boucle du bas, les deux niveaux de mercure A et B de part et d'autre de la graduation zéro des réglelets millimétrés.

Si les deux réglelets sont placés en opposition, la hauteur de mercure h est le résultat de l'addition des deux valeurs lues en A et en B.

Lorsque l'immersion de la ligne d'air est totale, le mercure descend en A et remonte en B. La hauteur h (somme de A + B) de mercure, correspondant à la hauteur H d'immersion sous le niveau piézométrique sera :

$$h \times 13,6 = H \tag{10}$$

13,6 densité du mercure

H maximum avant la mise en route des essais.

Pendant le pompage, H diminue, et la somme de A + B tend vers 0

A + B = 0 quand la ligne d'air est dénoyée.

A l'arrêt du pompage et pendant toute la remontée A + B croît et tend à reprendre sa valeur première.

Les renseignements obtenus se portent sur des feuilles d'observations spéciales.

REMARQUE 1 :

Les réglés sont mis en opposition car les risques d'erreurs sont moins grands dans une addition que dans une soustraction.

Si les réglés sont mis en continuité et que les graduations croissent de haut en bas, la hauteur H devient :

$$(A - B) \times 13,6 = H$$

Si les graduations croissent de bas en haut,

$$(B - A) \times 13,6 = H$$

REMARQUE 2 :

En général on utilise du mercure pour remplir le tube en U mais pour de faibles hauteurs d'immersion on peut le remplir d'eau ou de tout autre liquide dont on connaît la densité, et l'on a :

$$h \times d = H \quad (11)$$

d est la densité du liquide

pour l'eau h = H car d = 1

REMARQUE 3 :

Pour un limnimètre de deux mètres d'amplitude monté avec une boucle d'un mètre, le tube de vinyle ayant 4 mm de diamètre, il faut prévoir 600 g de mercure.

3.3.4 - Mesure des débits -

Pendant une période donnée de pompage, le débit extrait doit être aussi constant que possible. Cette condition nécessaire à la compréhension des informations recueillies peut être obtenue en équipant la conduite de refoulement d'un appareillage conçu par M. BERKALOFF (figure 4).

Cet appareil est destiné à absorber et renvoyer au forage de façon permanente un excédent de débit volontairement créé, qui recycle une quantité variable d'eau et laisse s'écouler vers le dispositif de mesure un débit rigoureusement constant.

La vanne amont est réglée pour laisser passer un débit nettement plus important que celui de la vanne aval. L'eau mise en pression entre les deux vannes remonte dans le bac de trop plein et retourne au forage. Toute variation du régime de la pompe fait varier en plus ou en moins ce débit recyclé, mais n'a plus d'influence sur le débit mesuré après la vanne de réglage.

En règle générale lorsque les pompages d'essai ont pour but la connaissance des caractéristiques hydrauliques du terrain aquifère, il suffit de les réaliser à un seul débit qui sera maintenu pendant toute la durée du pompage.

Plusieurs paliers de débit sont nécessaires lorsqu'il s'agit de déterminer les caractéristiques du puits pour en déduire le rendement maximal de l'ouvrage. Il sortirait de l'objet de ce manuel d'aller plus avant dans la description de ces méthodes d'étude; notons seulement que certains auteurs préconisent la réalisation de courts pompages non enchainés mais à différents débits. D'autres au contraire réalisent des pompages successifs à débits croissants. L'annexe 3 montre qu'au début du pompage pour un intervalle de temps court (2 minutes - 1 heure) le tronçon de courbe représentative est à peu près de longueur égale à celui déterminé par un intervalle de temps bien plus long (1 heure - 24 heures)

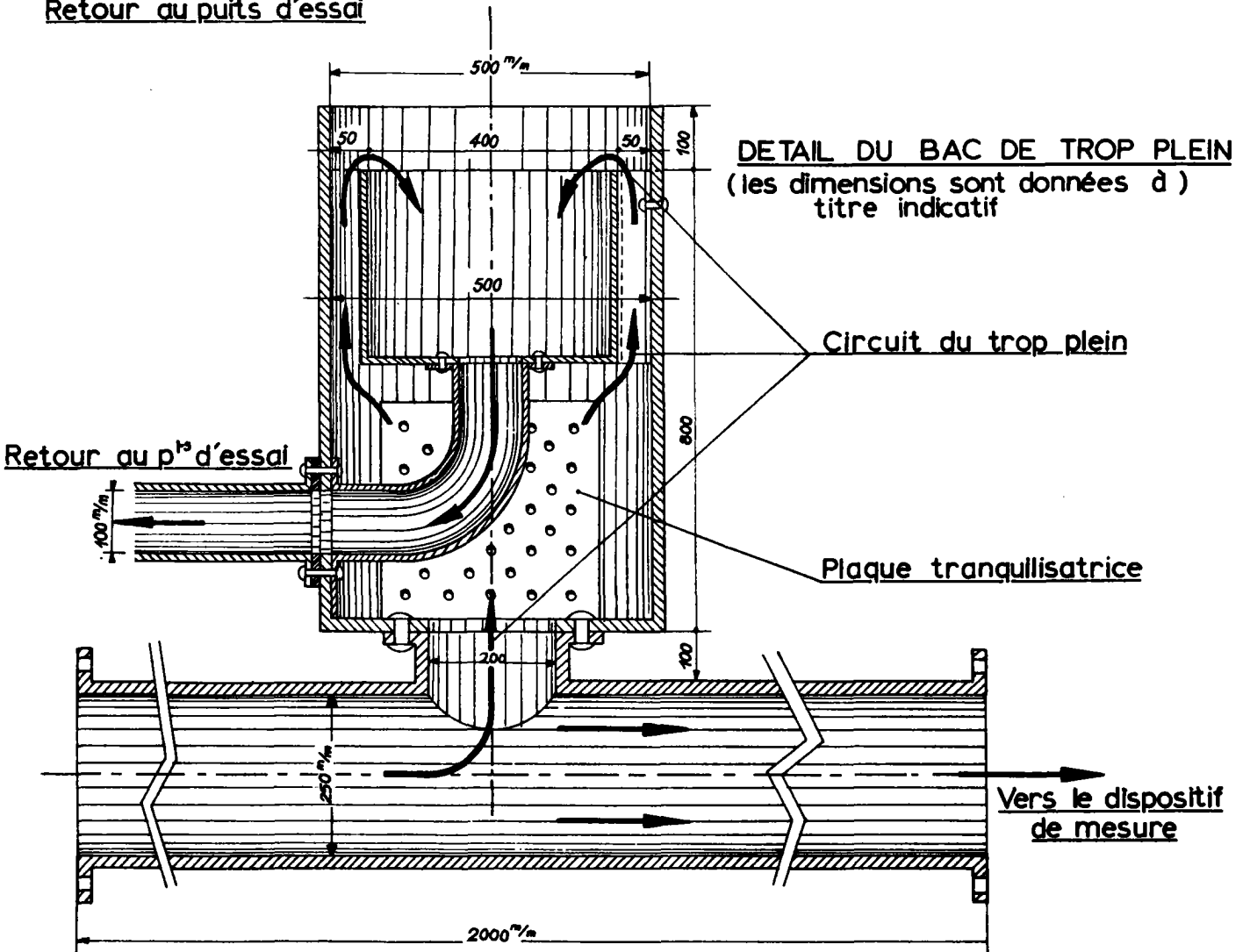
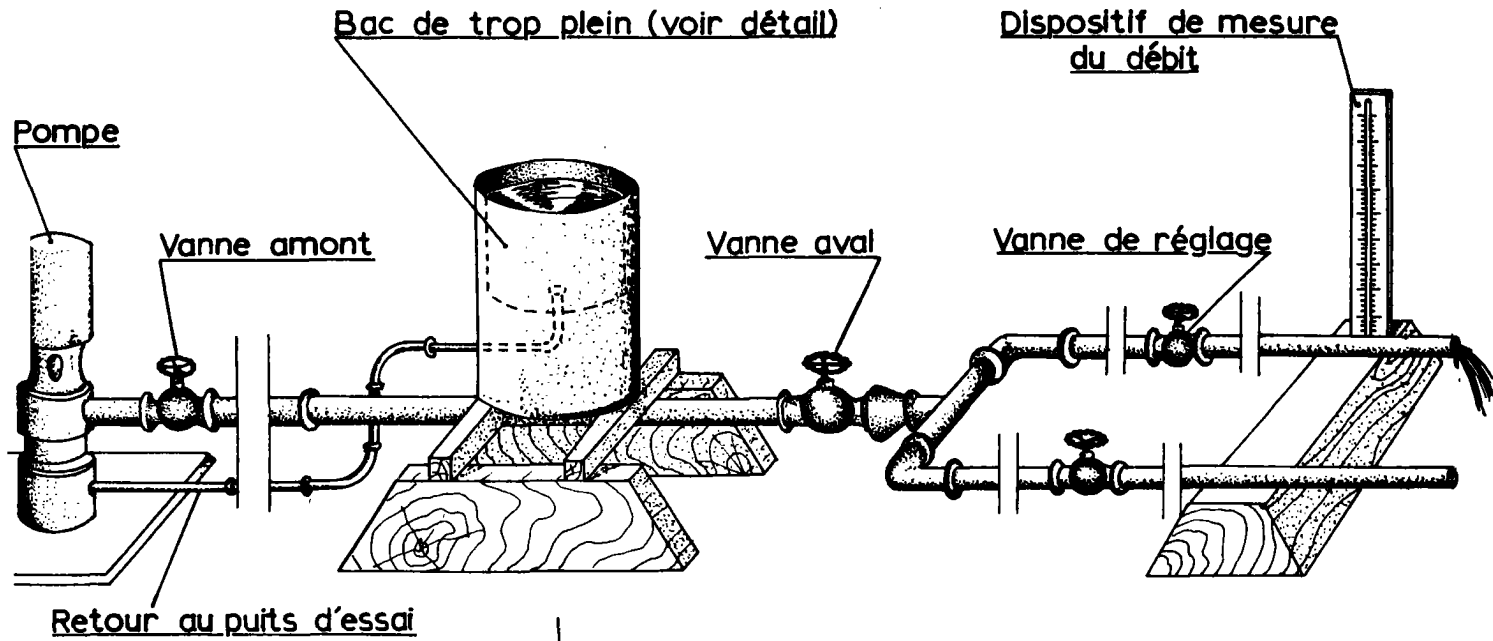


Figure 4

Pour cette raison les durées des paliers ne seront pas égales. Le premier palier est très court (1 heure environ). Le second deux à trois heures.

Pour obtenir les variations de débit on peut jouer sur la puissance ou la vitesse du moteur, ou adjoindre une vanne à l'équipement provisoire du forage. Dans ce cas il faut, avant les essais, déterminer les différentes positions de la vanne qui correspondent aux débits désirés. Cette opération doit avoir lieu au moins 24 heures avant les essais car le pompage ne doit débuter que lorsque la nappe est vraiment au repos.

Les changements de débits doivent s'effectuer en une seule manoeuvre, il est inutile d'essayer par des manipulations successives d'obtenir exactement le débit désiré. Si le repérage d'ouverture de la vanne a été correctement fait, l'opération demande 30 secondes.

La mesure des débits peut être faite par quatre méthodes :

- Mesure des faibles débits par réservoir (méthode volumétrique)
- Mesure des débits par compteurs totalisateurs
- Mesure des débits à l'aide du déversoir
- Mesure des débits par les méthodes des orifices calibrés.

3.3.4.1 - Mesure des faibles débits par réservoirs (méthode volumétrique)

Cette mesure s'effectue au moyen d'une cuve dont on connaît le volume V. Elle consiste à observer avec un chronomètre marquant le cinquième de seconde le temps t que met la cuve pour se remplir.

On a alors :

$$Q = \frac{V}{t} \quad (12)$$



PHOTO 4 : Méthode volumétrique pour la mesure des faibles débits.

Pour obtenir une bonne précision dans la mesure du débit, il faut que le temps de remplissage soit supérieur à 20 secondes - (L'annexe 4.2 donne les volumes de cuves cylindriques).

Pour les très faibles débits on décompte les temps jusqu'au moment où la cuve déborde. Pour des débits plus importants où le remplissage de la cuve crée d'importants remous, il est préférable de ne pas la remplir complètement, d'attendre que le niveau se stabilise, et de déterminer le volume d'eau qui correspond au temps mesuré.

Une méthode plus rigoureuse consiste à équiper la cuve de mesure d'un tube tranquilisateur extérieur percé de deux trous superposés (fig? 5).

Cuve de mesure du débit

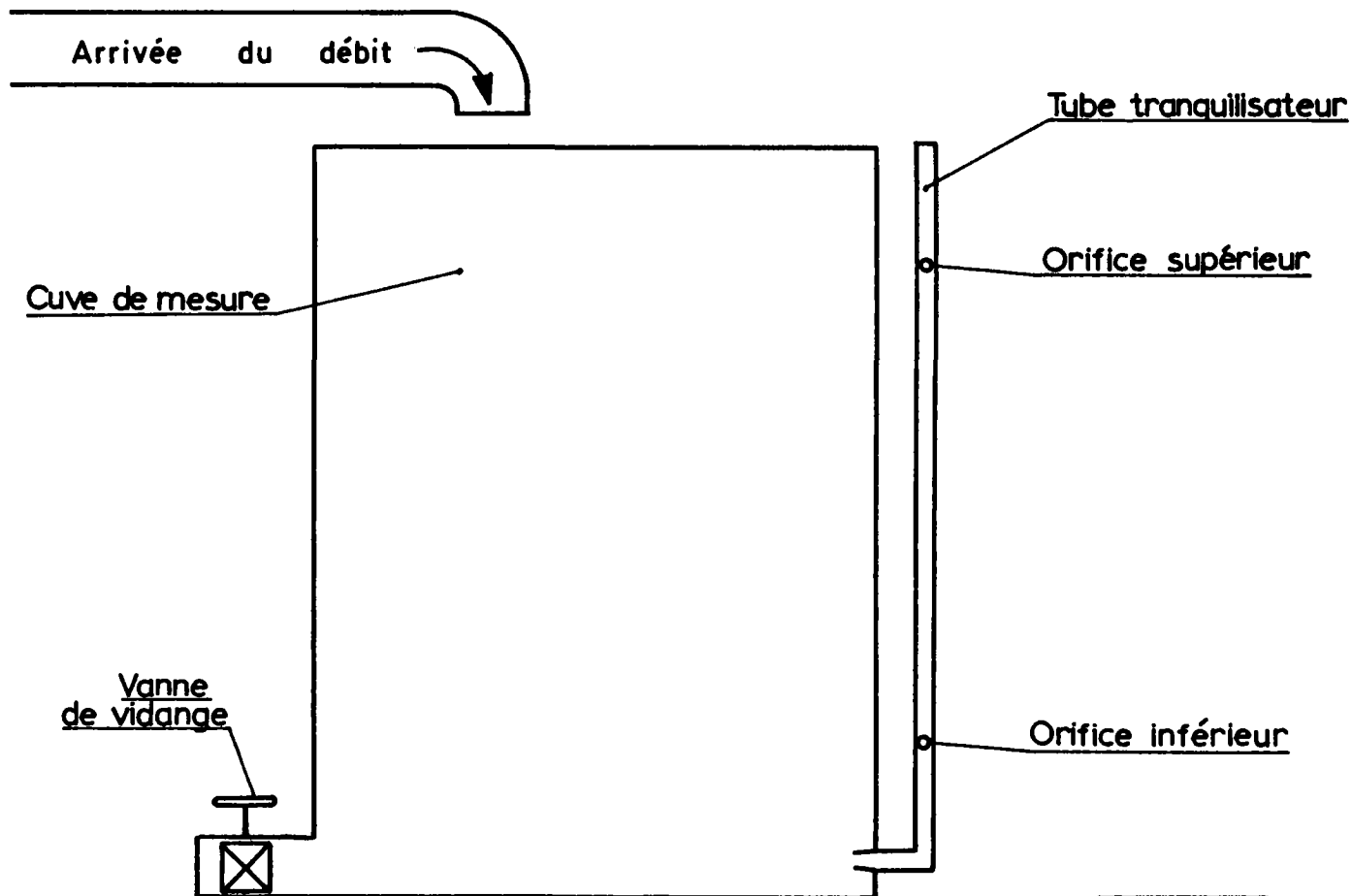
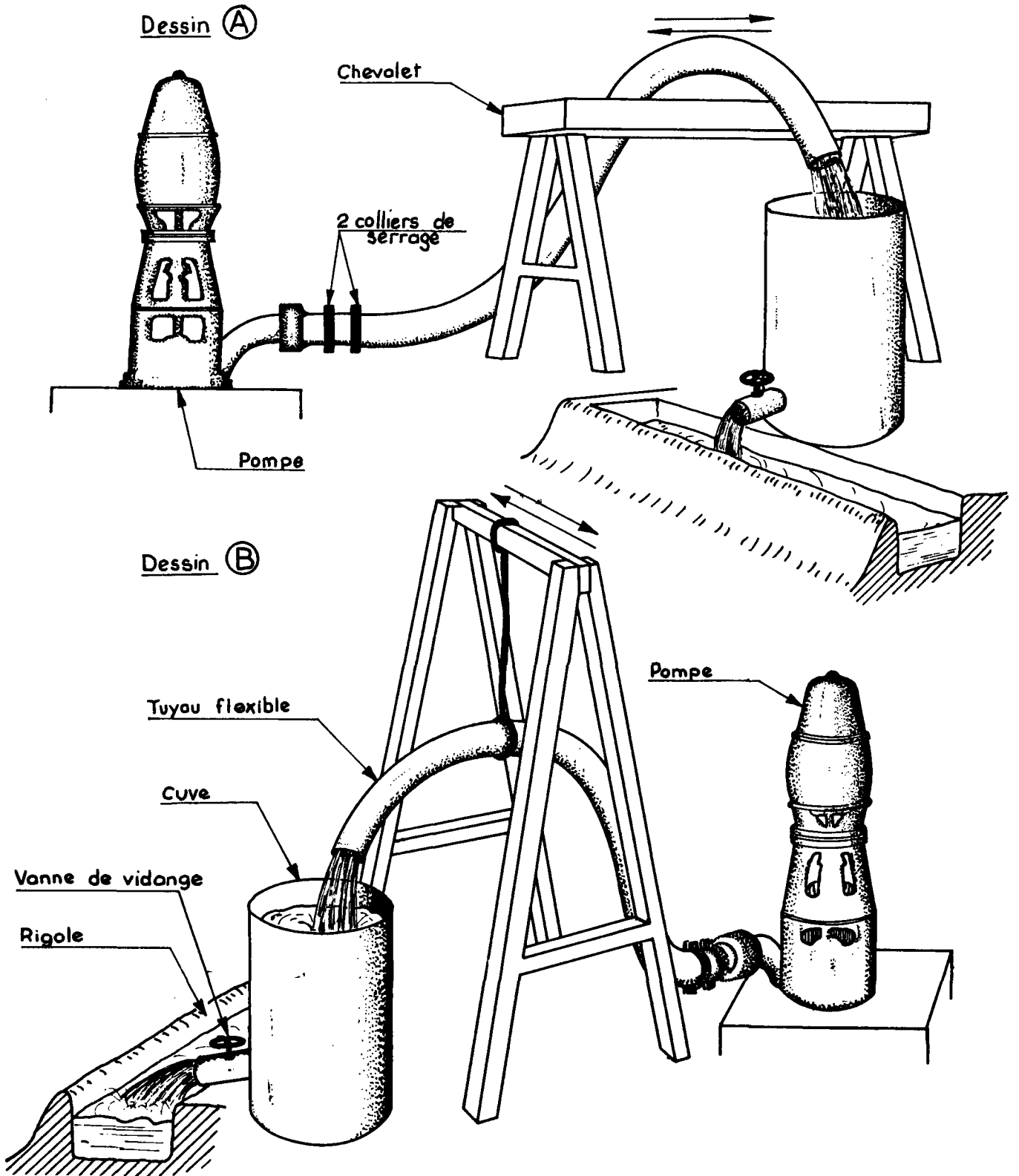


Figure 5

Pour mesurer le débit, le chronomètre est déclenché au moment où l'eau s'écoule par l'orifice inférieur, il est arrêté à l'instant précis où l'eau atteint l'orifice supérieur. La hauteur, séparant les deux orifices, détermine le volume reçu dans la cuve pendant le temps mesuré.

Chaque fois que l'on opère par remplissage d'une cuve il faut veiller à ce que la hauteur manométrique ne change pas ; c'est à dire ne pas lever le tuyau flexible d'écoulement pour le présenter à la cuve. Il est pratique de réaliser l'aménagement représenté en fig. 6. et photo 4.



AMENAGEMENT PERMETTANT DE CONSERVER
UNE HAUTEUR MANOMETRIQUE CONSTANTE

Figure 6

A la sortie de la pompe est fixé un tuyau flexible dont l'autre extrémité repose sur un chevalet (dessin A) ou est soutenue par un portique (dessin B) ; en position normale l'eau s'écoule dans le canal. Lorsque l'on désire mesurer le débit, par une translation latérale, on amène l'extrémité du flexible au-dessus de la cuve ; cette opération terminée on ramène, toujours par translation, le tuyau dans sa première position. Une vanne de vidange au fond de la cuve permet de la vider sans ennui.

3.3.4.2 - Mesure des débits par compteur totalisateur -

Pour être précises les mesures de débit par compteur totalisateur demandent certaines conditions et installations particulières (fig. 7)

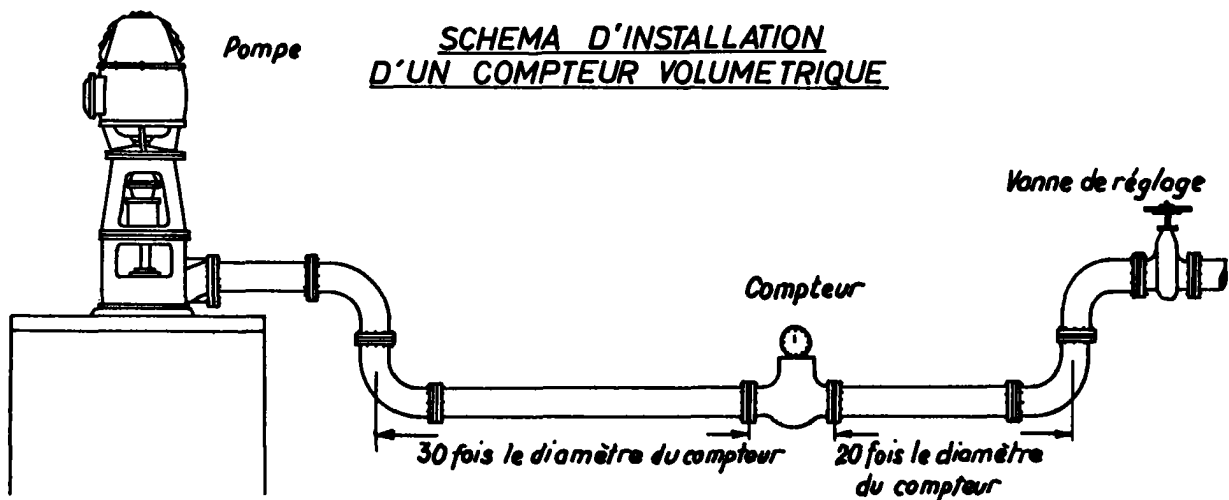


Figure 7

En premier lieu il faut s'assurer que le compteur est étalonné ; d'autre part, pour les compteurs à hélices, les ailettes intérieures étant relativement fragiles, cet équipement ne convient pas pour des forages "remontant" des particules de terrain.

Les débits obtenus sont de deux sortes :

- Débit instantané qui est le temps mis par la trotteuse centrale pour faire un tour de cadran correspondant à l'unité de volume.
- Débit moyen qui est le quotient d'un volume enregistré pour un temps donné (généralement 1 heure).

A titre indicatif le tableau ci-dessous donne la relation qui existe entre le diamètre en mm et le débit en l/s et m³/h dans des compteurs à hélices du type Woltmann.

: Diamètre in-	: 40	: 50	: 60	: 80	: 100	: 150	: 200	: 250	: 300	:
: térieur en mm:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
: Débit en l/s	: 1,39	: 2,22	: 3,9	: 5,56	: 8,61	: 20,8	: 34,7	: 55	: 80,5	:
: Débit en m ³ /h:	: 5	: 8	: 14	: 20	: 31	: 75	: 125	: 198	: 290	:

3.3.4.3 - Mesure des débits à l'aide d'un déversoir -

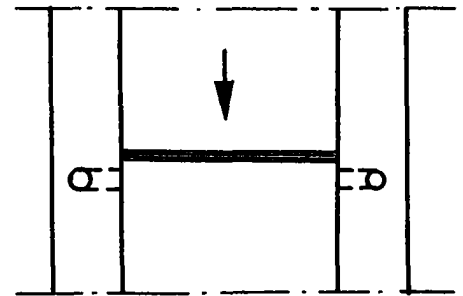
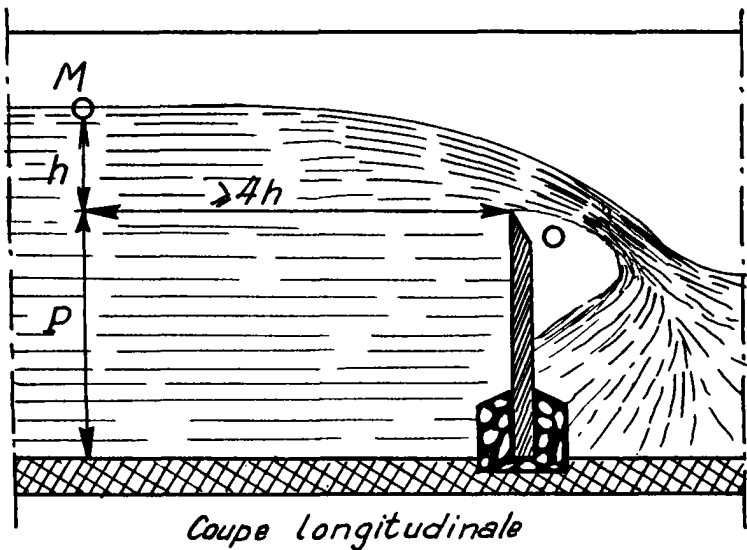
Seuls seront abordés les résultats donnés par des déversoirs rectangulaires en minces parois, dans lesquels la nappe déversante ne touche que l'arête amont du seuil, et sans contractions latérales, c'est-à-dire : déversoir dont la section est égale à la section du canal amenant l'eau.

Ce déversoir est constitué par une tôle mince (2 à 5 mm) encastrée verticalement dans le canal. La partie supérieure de la tôle biseautée de manière à fournir une arête vive, doit être rigoureusement horizontale.

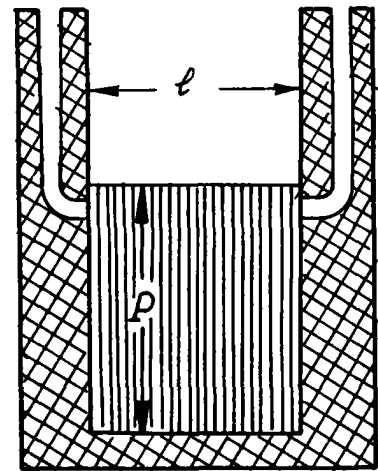
Un orifice d'aération, percé dans chaque paroi latérale en aval de la tôle, assure la libre circulation de l'air sous la lame versante (fig. 8)

DEVERSOIR A LAME
(Nappe libre)

Figure 8



Vue de dessus



Coupe profil

Il est indispensable que la largeur l du seuil soit au moins égale à $4 h$ (h est la hauteur de l'eau au-dessus de l'arête du déversoir).

Il est essentiel d'autre part que l'ouvrage soit soustrait à toute action perturbatrice qui provoquerait des oscillations ou des vibrations des niveaux d'eau. On obtient ce résultat en créant en amont du déversoir un bassin annexe dont la sortie est commandée par des chicanes, et en équipant le canal amenant l'eau au déversoir de flotteurs tranquillisateurs.

Dans un tel ouvrage l'expression du débit est donnée par la formule :

$$Q = m.l.h\sqrt{2 g h} \quad (13)$$

où :

Q est le débit en m³/seconde

m un coefficient de débit

l la largeur en mètres du déversoir

h la hauteur d'eau en mètres au-dessus du seuil mesurée en un point M avant l'abaissement de la surface libre (M à 4 h en amont du déversoir)

g 9,8 pesanteur due à l'attraction terrestre.

La valeur de m, coefficient de débit, est fonction de la profondeur P, du fond du canal au-dessus de l'arête, (P est appelé hauteur de pelle) et de la hauteur h.

A la suite de nombreuses expériences, BAZIN a donné pour le coefficient de débit m, lorsqu'il n'y a pas de contractions latérales, la formule suivante :

$$m = \left(0,405 + \frac{0,003}{h}\right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{P + h}\right)^2\right] \quad (14)$$

h et P doivent être exprimées en mètres.

La formule s'applique pour des charges h variant de 0,05 à 0,70 m.

Le tableau ci-dessous traduit selon A. CAUVIN la formule précédente [12]

h	Valeurs de m pour les profondeurs suivantes du fond du canal au-dessous du seuil (hauteur de pelle P)									
	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,80	1,00	1,50	2,00	très grande
0,05	0,458	0,453	0,451	0,450	0,449	0,449	0,449	0,448	0,448	0,448
0,06	0,456	0,450	0,447	0,445	0,445	0,444	0,443	0,443	0,443	0,443
0,08	0,456	0,447	0,443	0,441	0,440	0,438	0,438	0,437	0,437	0,436
0,10	0,459	0,447	0,442	0,439	0,437	0,435	0,434	0,433	0,433	0,432
0,12	0,462	0,448	0,442	0,438	0,436	0,433	0,432	0,430	0,430	0,429
0,14	0,466	0,450	0,443	0,438	0,435	0,432	0,430	0,428	0,428	0,427
0,16	0,471	0,453	0,444	0,438	0,435	0,431	0,429	0,427	0,426	0,425
0,18	0,476	0,456	0,445	0,439	0,435	0,431	0,428	0,426	0,425	0,423
0,20	0,480	0,459	0,447	0,440	0,436	0,431	0,428	0,425	0,423	0,421
0,22	0,484	0,462	0,449	0,442	0,437	0,431	0,428	0,424	0,423	0,420
0,24	0,488	0,465	0,452	0,444	0,438	0,432	0,428	0,424	0,422	0,419
0,26	0,492	0,468	0,455	0,446	0,440	0,432	0,429	0,424	0,422	0,419
0,28	0,496	0,472	0,457	0,448	0,441	0,433	0,429	0,424	0,422	0,418
0,30	0,500	0,475	0,460	0,450	0,443	0,434	0,430	0,424	0,421	0,417
0,35	"	0,482	0,465	0,455	0,447	0,437	0,431	0,424	0,421	0,416
0,40	"	0,489	0,472	0,459	0,451	0,440	0,433	0,424	0,421	0,414
0,45	"	0,495	0,477	0,464	0,455	0,442	0,435	0,425	0,421	0,413
0,50	"	0,500	0,482	0,468	0,459	0,445	0,437	0,426	0,421	0,412
0,55	"	0,505	0,486	0,473	0,462	0,448	0,439	0,427	0,421	0,411
0,60	"	0,510	0,491	0,476	0,466	0,451	0,441	0,428	0,421	0,410
0,65	"	"	0,495	0,481	0,470	0,454	0,444	0,429	0,422	0,409
0,70	"	"	0,498	0,484	0,473	0,456	0,446	0,430	0,423	0,408

En opérant convenablement, on peut calculer le débit à 1 ou 2 % près.

La mesure de h, souvent difficile à obtenir, est plus aisée si l'on prend la précaution d'équiper le canal, sur une de ses faces latérales extérieures, d'une prise de pression reliée à un tube en verre fixé sur un réglet gradué en millimètres (fig 9)

Mesure de la hauteur d'eau au-dessus du seuil
du déversoir rectangulaire

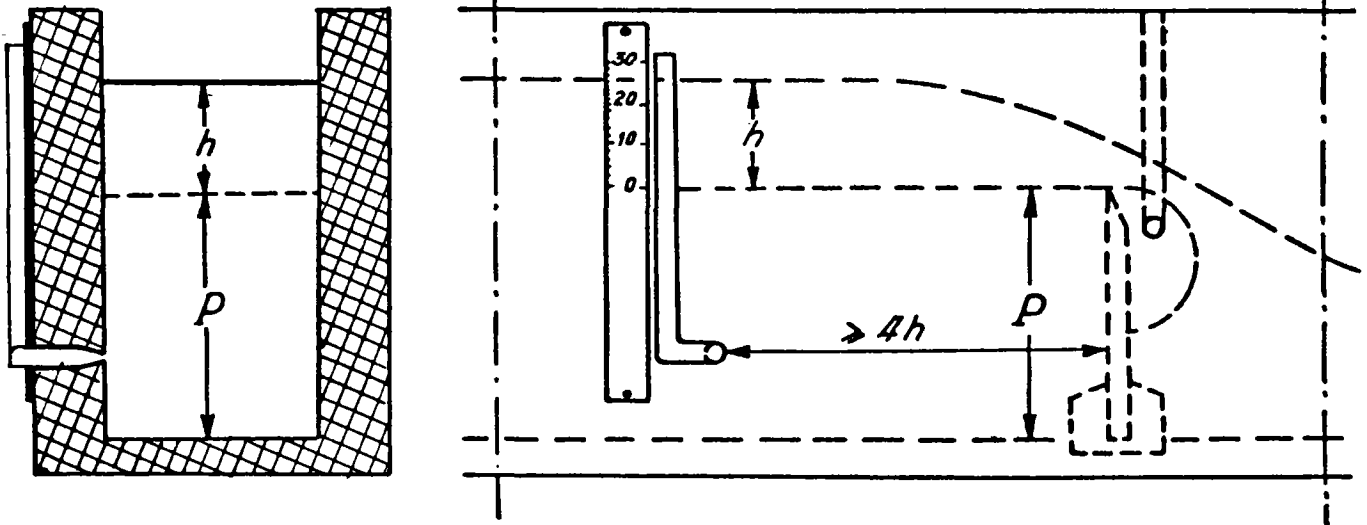


Figure 9

Avant l'essai on remplit le canal de façon telle que le niveau de l'eau soit exactement au bord de l'arête biseautée ; à ce moment $h \neq 0$; on fixe le zéro du régllet à la hauteur du niveau indiqué dans le tube en verre. Par le principe des vases communicants, lorsque h augmente dans le canal, le niveau suit le tube en verre. Si l'on prend la précaution de réaliser une prise de pression d'un diamètre 4 à 5 fois inférieur au diamètre du tube en verre, les mesures de h sont faciles et précises.

Il est d'autre part souhaitable de pouvoir, en plus des lectures instantanées réalisées, posséder un enregistrement graphique du débit. En s'inspirant du principe du débit-mètre, et en utilisant un enregistreur de niveau de genre OTT a réduction 1/1, on peut réaliser un appareil qui, branché sur la prise de pression, permet d'avoir l'inscription graphique de la courbe de variation des hauteurs h dans le canal, et par là, après conversion des hauteurs, en débit, permet de posséder une courbe d'évolution du débit en fonction du temps.

3.3.4.4 - Mesure des débits par système déprimogène

On dit aussi que c'est une méthode de calcul du débit par orifice à écoulement libre qui est couramment, mais imparfaitement, appelée "méthode du tube de Pitot".

Il faut au préalable réaliser l'installation suivante :

On branche sur l'exhaure de l'ouvrage un tube rectiligne d'un diamètre connu D se terminant par un diaphragme calibré de diamètre d . Une prise de pression, sur l'axe du tube rectiligne reliée à un tube transparent manométrique, permet de mesurer la hauteur h correspondant à la pression régnant à l'intérieur du tube (fig. 10).

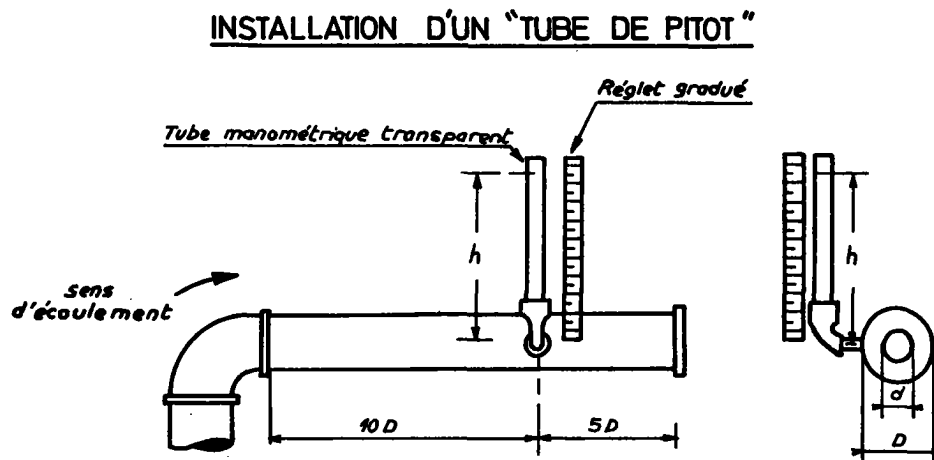


Figure 10

Pour que la mesure de h soit correcte il faut que certaines conditions soient remplies [14].

- le tube portant le diaphragme doit être parfaitement horizontal, avoir une longueur d'au-moins cinq diamètres en aval de la prise de pression, et dix diamètres en amont;

- l'ouverture du diaphragme doit être parfaitement circulaire, l'arête doit être vive sans arrondi ni cassure.

- le jet doit être libre et la pression suffisante pour qu'il ne soit pas dispersé.

- le tube horizontal doit être entièrement plein d'eau et le tube manométrique exempt de bulle d'air.

Si ces conditions sont remplies le débit est :

$$Q = C d^2 \sqrt{h} \quad (15)$$

Avec :

Q débit en m³/heure

C coefficient numérique sans dimension

d diamètre du diaphragme en cm

h hauteur d'eau lue au tube manométrique en cm

La courbe étalonnée ci-après permet de déterminer la valeur du coefficient numérique C (figure 11).

En ordonnée on porte le rapport $\frac{d}{D}$ (d = diamètre du diaphragme, D = diamètre du tube rectiligne, exprimés en centimètres), on joint le point obtenu et la courbe étalonnée, et en rabattant sur l'axe des abscisses on obtient la valeur du coefficient C.

Calcul du coefficient numérique C

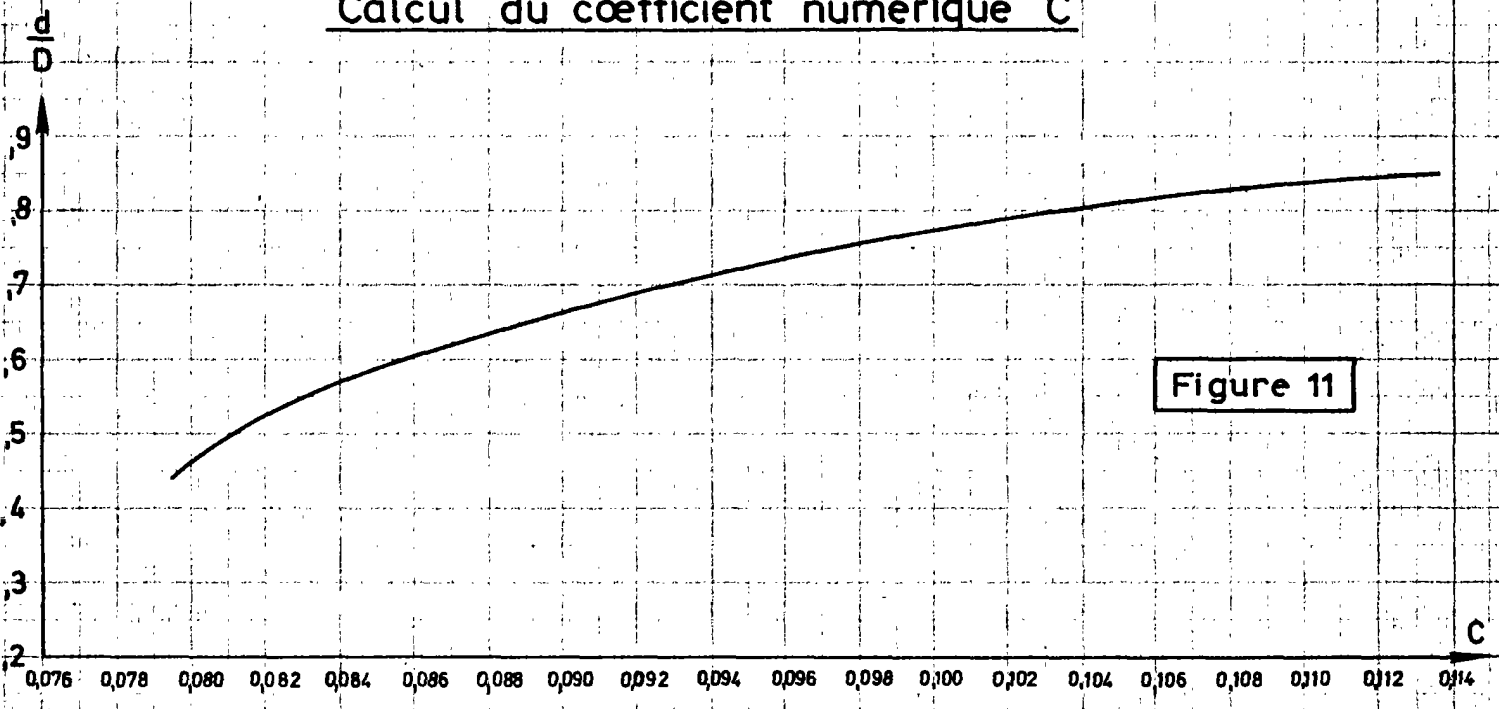


Figure 11

Exemple :

Tube 8 pouces pour un diaphragme 6 pouces :

$$\frac{d}{D} = \frac{6}{8} = 0,75 \quad (16)$$

On reporte cette valeur sur l'axe des ordonnées, on joint la courbe, on rabat sur l'axe des abscisses et nous avons : C = 0,0975

La résolution de l'équation (15), pour différentes combinaisons de diaphragmes (ou orifices) d et de tube d'amené D, est représentée par les tableaux et les courbes de l'annexe 5 qui sont, pour des systèmes déprimogènes

donnés l'expression du débit Q en m^3/h en fonction de la hauteur h en cm, lue au manomètre.

3.3.4.5 - Mesure des débits à la danaïde -

La danaïde est un récipient cylindrique (figure 12) ouvert à sa partie supérieure, percé à sa base d'un ou plusieurs orifices parfaitement circulaires à arêtes vives.

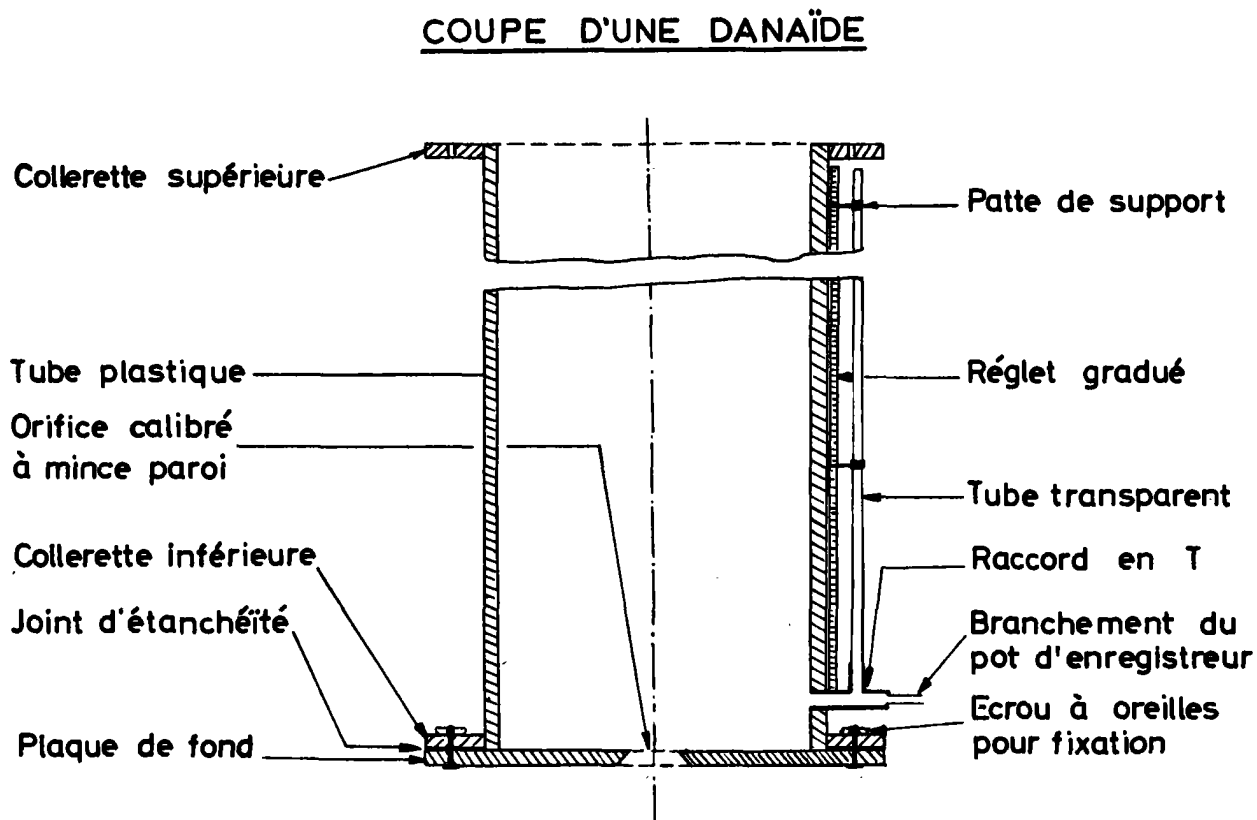


Figure 12

Si la danaïde est alimentée par un courant d'eau à débit constant, au bout d'un certain temps, le niveau de l'eau se stabilise à une certaine hauteur, qui dépend, du débit d'alimentation et de la section de l'orifice calibré.

La construction qui paraît le mieux convenir aux besoins de l'hydrogéologue est constituée d'éléments de tube plastique de 10 mm d'épaisseur et de hauteur comprise en 0,6 et 1 mètre. Chaque extrémité des tubes se termine

par une bride extérieure qui permet, par boulonnage et joints appropriés, de juxtaposer autant d'éléments qu'il est possible et nécessaire d'utiliser pour obtenir une hauteur h concordant au débit recherché.

Le niveau d'eau à l'intérieur de la "Danaïde" est observé dans un tube plastique transparent qui, fixé sur la face extérieure de l'appareil devant un régllet gradué en millimètres, communique avec l'intérieur de la "Danaïde" par un T dont un côté de la branche horizontale pourra être relié à un pot de mesure pour permettre éventuellement l'enregistrement graphique de hauteur d'eau h dans la "Danaïde".

Les orifices calibrés à arêtes vives (fig. 13), sont percés au centre (pour une "Danaïde" simple), et sur une même circonférence (pour une "Danaïde" multiple), des plaques circulaires qui, par assemblage rapide à l'aide de boulons en laiton et écrous à oreilles, se fixent sur une des collerettes et constituent la plaque de fond de la "Danaïde". Un jeu de plusieurs plaques percées d'orifices de sections différentes permet des possibilités de mesures très étendues.

La proportionnalité entre le débit Q et la racine carrée de la hauteur h de l'eau dans la "Danaïde" simple (à un orifice) se traduit par :

$$Q = \mu \Delta \sqrt{2 gh} \quad (16)$$

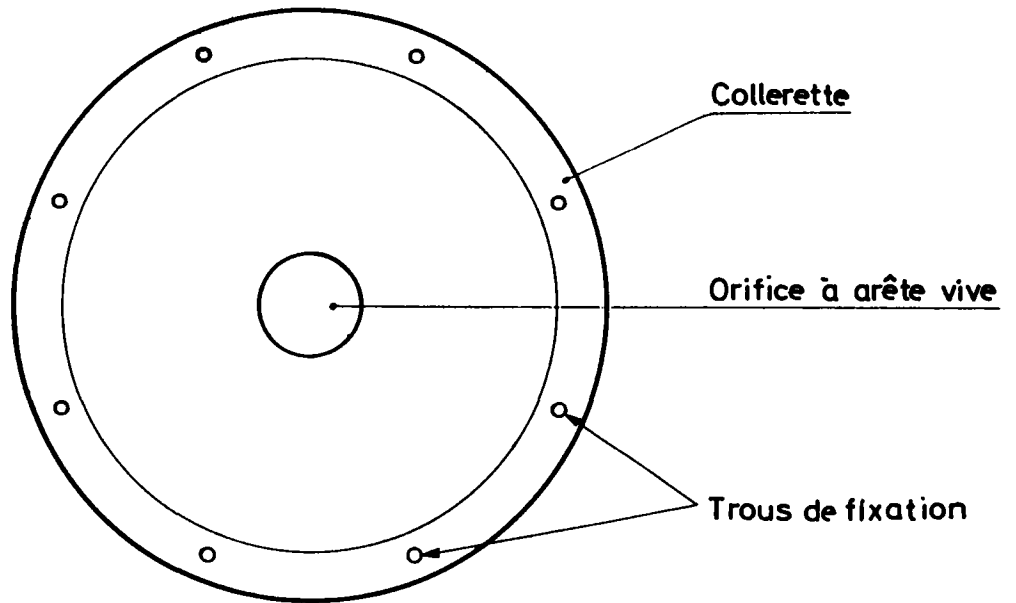
Q est le débit passant par l'orifice de la "Danaïde"	- m ³ /s
s est la surface de l'orifice d'écoulement	- m ²
g accélération de la pesanteur	- 9,81
h hauteur de l'eau dans la "Danaïde"	- m
μ coefficient de débit donné par le tableau ci-après	- sans dimension

Pour une "Danaïde" multiple (à plusieurs orifices) le débit est :

$$Q = \mu \sum \Delta \sqrt{2 gh} \quad (17)$$

$\sum \Delta$ est la somme des surfaces des orifices d'écoulement.

Plaque de fond pour DANAÏDE simple (1 orifice)



Plaque de fond pour DANAÏDE multiple (plusieurs orifices)

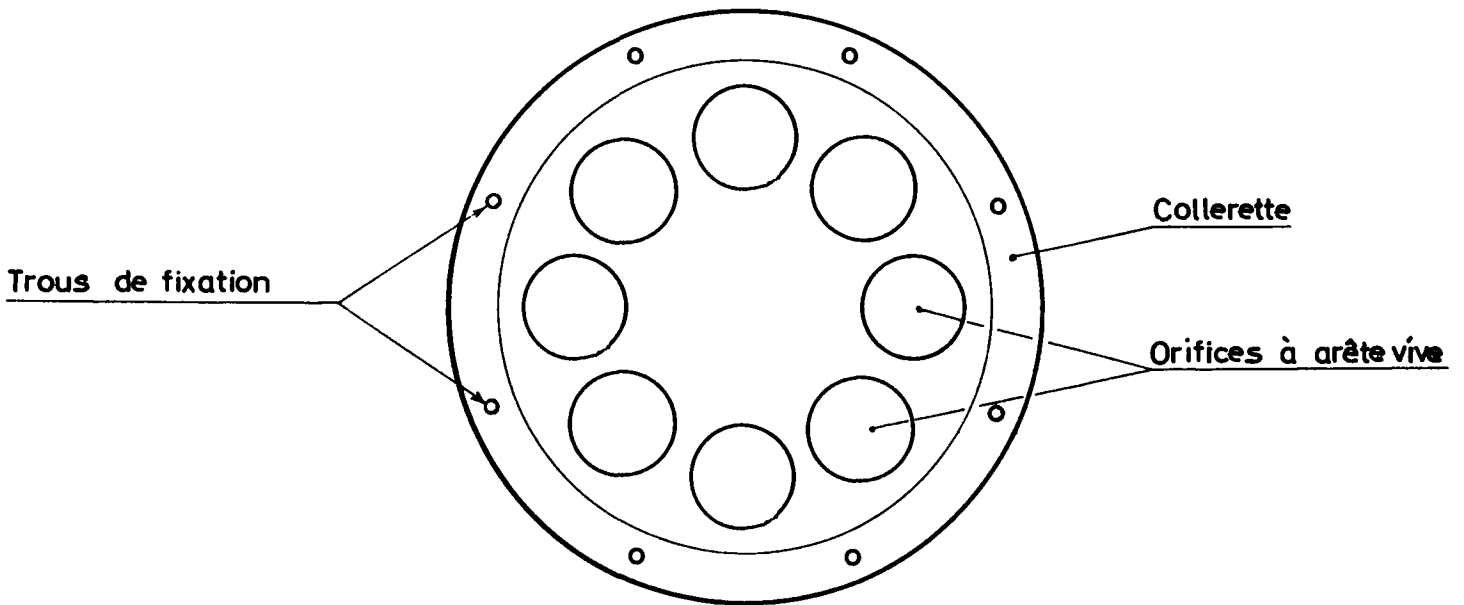


Figure 13

Cette relation est valable quand tous les orifices d'écoulement sont répartis sur une même circonférence par rapport à l'axe du fond de la "Danaïde" et quand ils sont tous de même section.

Les valeurs de M coefficient de débit (selon A. LENCASTRE) sont données ci-dessous ; la charge h est la hauteur d'eau au centre de l'orifice. 17

h	Diamètre de l'orifice en mm									
	6	9	12	15	21	30	36	45	60	120
0,12			0,637	0,631	0,624	0,618	0,612	0,606		
0,15		0,643	633	627	621	615	610	605	0,600	0,596
0,30	0,644	631	623	617	612	608	605	603	600	598
0,60	632	621	614	610	607	604	601	600	599	599
0,90	627	617	611	606	604	603	601	600	599	599
1,20	0,623	0,614	0,609	0,605	0,603	0,602	0,600	0,599	0,599	0,598
1,50	621	613	608	605	603	601	599	599	598	598
3,00	611	606	603	601	599	598	598	597	597	597
6,00	601	600	599	598	597	596	596	596	596	596
15,00	596	596	595	595	594	594	594	594	594	594

La hauteur h de l'eau dans la "Danaïde" est souvent limitée par les installations de pompage ; il faut donc choisir au préalable une plaque de fond possédant l'orifice calibré convenant le mieux à la mesure à effectuer.

Les tableaux ci-après donnent les débits en l/s en fonction des diamètres des orifices sous une charge $h = 0,15$ m et une charge $h = 0,60$ m. Une meilleure précision sera obtenue avec une hauteur h la plus grande possible.

CALCUL DU DEBIT EN l/s POUR UN ORIFICE DONNE SOUS UNE CHARGE DE 0,15 m

∅ ori- fice en mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0,085	0,103	0,122	0,143	0,166	0,190	0,215	0,243	0,272	0,302
20	0,335	0,369	0,404	0,441	0,479	0,519	0,561	0,605	0,649	0,696
30	0,744	0,793	0,845	0,898	0,951	1,007	1,064	1,123	1,184	1,247
40	1,310	1,374	1,441	1,510	1,579	1,650	1,723	1,798	1,875	1,955
50	2,030	2,112	2,195	2,278	2,364	2,451	2,538	2,628	2,721	2,814
60	2,909	3,005	3,081	3,181	3,283	3,372	3,462	3,620	3,728	3,837
70	3,949	4,062	4,178	4,293	4,414	4,530	4,650	4,773	4,896	5,023
80	5,105	5,279	5,410	5,541	5,674	5,819	5,947	6,085	6,225	6,367

CALCUL DU DEBIT EN l/s POUR UN ORIFICE DONNE SOUS UNE CHARGE DE 0,60 m

∅ ori- fice en mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0							0,061	0,083	0,107	0,137
10	0,167	0,201	0,238	0,279	0,323	0,370	0,421	0,474	0,531	0,591
20	0,665	0,733	0,790	0,864	0,939	1,018	1,100	1,186	1,275	1,367
30	1,462	1,560	1,662	1,766	1,874	1,985	2,100	2,216	2,338	2,463
40	2,589	2,718	2,843	2,989	3,130	3,272	3,419	3,569	3,722	3,878
50	4,036	4,200	4,366	4,539	4,707	4,883	5,062	5,244	5,429	5,618
60	5,808	6,003	6,203	6,404	6,610	6,817	7,029	7,245	7,462	7,682
70	7,906	8,134	8,366	8,599	8,837	9,077	9,320	9,568	9,817	10,071
80	10,328	10,587	10,850	11,117	11,387	11,660	11,935	12,214	12,496	12,782

Après avoir équipé la "Danaïde" d'une plaque de fond convenant au débit à mesurer, on la glisse sous l'exhaure de la pompe en la posant sur un support qui pourra être un trépied ou plus simplement deux briques qui permettront de la relever au minimum d'une vingtaine de centimètres, afin que le jet passant par l'orifice ne soit pas freiné par l'effet du sol. Il faut ensuite attendre quelques dizaines de secondes que l'équilibre se crée dans la "Danaïde" et lire la hauteur d'eau h devant le réglet millimétré.

PHOTO 5 : Mesure du débit
à la Danaïde



Ces hauteurs pourront être enregistrées en reliant la "Danaïde" à un pot de mesure surmonté d'un appareil traditionnel d'enregistrement des niveaux d'eau. Par le principe des vases communicants, le niveau de l'eau dans la "Danaïde" correspondant à une charge h sur l'orifice, se retrouvera dans le pot de mesure de l'enregistreur. Toute variation de h amènera une variation d'égale valeur du niveau de l'eau dans le pot de mesure. L'étalonnage préalable de l'appareil permet de posséder, en fonction du temps, un graphique des variations de h , dont la précision et l'échelle seront celles de l'appareil enregistreur.

Les observations ponctuelles, ou enregistrées à l'aide de la "Danaïde" sont des valeurs de h (hauteur d'eau au-dessus de l'orifice calibré) qui, reportées dans les équations (16) ou (17) permettent de connaître le débit de façon précise. A partir de la résolution de ces équations et connaissant la section des orifices perçant les plaques de fond, il est possible de tracer des courbes de débit en fonction des hauteurs h d'eau dans la "Danaïde" (annexe 6).

3.3.5 - Conduite d'un pompage d'essai -

Pour mener à bien les diverses observations et mesures préconisées aux chapitre précédents, le pompage d'essai, à l'exclusion de toute étude interprétative, demande la participation d'un personnel suffisamment nombreux et entraîné pendant une période variant en fonction de l'importance, du but et de la durée de l'essai.

3.3.5.1 - Système d'étude comportant un puits de pompage et quatre piézomètres

- Avant l'essai

Une mission de reconnaissance pour prévoir les divers moyens de mesures, s'assurer des possibilités d'évacuation de l'eau pompée, relever le plan de situation des lieux, prendre contact avec les propriétaires riverains, et fixer avec le maître d'oeuvre et l'entrepreneur les diverses étapes du pompage d'essai.

..... 1 journée d'ingénieur.

- 24 heures avant la mise en route du pompage.

Mise en place des sondes électriques et éventuellement des appareils enregistreurs de niveaux. Relevé de niveaux piézométriques. Réglage de la pompe au débit qui sera celui du pompage d'essai, test des appareils de mesure du débit. Mesure toutes les quatre heures des niveaux d'eau des différents ouvrages. Surveillance rigoureuse de la mise au repos de la nappe. Préparation du dossier du pompage d'essai avec notamment relevés : des coupes géologiques, des diamètres et des longueurs des différents tubages pleins ou crépinés mis en place. Mesures annexes telles que : barométrie, température, pluviométrie, marées.

..... 2 journées de techniciens.

- Première demi-journée de mise en route du pompage.

Mesures très fréquentes des niveaux et des débits, prise d'échantillons d'eau, mesure de température.

1 ingénieur..... 0,5 journée d'ingénieur
3 techniciens..... 1,5 journée de technicien.

- Par 24 heures, de pompage, supplémentaires

Surveillance de l'essai, mesure des réactions piézométriques de la nappe, mesures des débits, prélèvements d'échantillons d'eau, mesure de la pression barométrique des températures, de la pluviométrie.

..... 0,5 journée d'ingénieur
..... 3 journées de technicien.

- Première demi-journée d'arrêt du pompage

Mesures fréquentes des niveaux piézométriques

1 ingénieur..... 0,5 journée d'ingénieur
3 techniciens..... 1,5 journée de technicien

- Par 24 heures supplémentaires de surveillance de la remontée

..... 0,5 journée d'ingénieur
..... 3 journées de technicien.

Soit un pompage de 72 heures suivi d'une remontée de 72 heures , on obtient un temps équivalent à :

4 journées d'ingénieur - 20 journées de technicien

3.3.5.2 - Système d'étude comportant un puits de pompage sans piézomètre -

- Avant l'essai..... 1 journée d'ingénieur
- 24 heures avant l'essai..... 1 journée de technicien
- Par 24 heures de pompage ou de remontée.... 0,5 journée d'ingénieur
2 journées de technicien.

Soit pour un essai de 72 heures, suivi d'une remontée de 72 heures :

4 journées d'ingénieur - 13 journées de technicien

- C H A P I T R E 4 -

EXPLOITATION DES RESULTATS

.....

Application au calcul des caractéristiques
hydrauliques de l'aquifère

4.I. - GENERALITES

L'interprétation des résultats d'un pompage d'essai pour déterminer les caractéristiques hydrauliques d'un aquifère, ou mettre en évidence et prévoir certains effets du pompage aux limites, et en divers points de la nappe se base sur les résultats des travaux de toute une école d'hydrauliciens qui, à la suite de THEIS, ont, depuis 1934, analysé et formulé les effets d'un pompage dans un puits sur la nappe souterraine environnante en fonction de l'espace et du temps (donc en régime transitoire).

Pour appliquer leurs théories et obtenir des solutions analytiques aisément formulables, les divers auteurs qui ont travaillé dans ce domaine ont toujours dû définir des schémas d'aquifère impliquant des conditions plus ou moins simplificatrices par rapport au cas réel.

Dans le schéma initialement défini par THEIS, par exemple :

- l'aquifère est homogène, isotrope et d'extension latérale infinie (donc définissable par une seule valeur de T et de S)
- la nappe est parfaitement captive
- le rayon du puits est négligeable par rapport aux autres distances envisageables (épaisseur et extension de la nappe).

Malgré ces conditions restrictives, le schéma de THEIS a été longtemps le seul existant et le seul pratiquement utilisé comme base d'interprétation ; il est en effet très fréquemment applicable au moins dans les premiers instants d'un pompage. Toutefois actuellement il existe un nombre assez important d'autres solutions répondant à des problèmes plus compliqués et que l'hydrogéologue ne doit pas ignorer au moment de l'interprétation.

En pratique, celle-ci consiste essentiellement à ajuster les séries de mesures enregistrées sur les diverses fonctions, solutions connues en retenant principalement celles qui répondent à un cas le plus voisin possible du cas réel dans lequel l'hydrogéologue a opéré son essai.

Le procédé d'ajustement le plus fréquemment employé est un procédé graphique que nous illustrerons ci-après en prenant comme exemple la solution de THEIS et son approximation logarithmique dite de JACOB.

Il est bien entendu que : d'une part cette méthode d'ajustement graphique peut être généralisée à toutes les autres solutions, d'autre part il n'est pas exclu d'envisager des processus d'ajustement par voie purement numérique (méthode des moindres carrés par exemple).

4.2. - PRINCIPES DE L'AJUSTEMENT GRAPHIQUE - APPLICATION A LA SOLUTION DE THEIS

4.2.1. - Méthode d'identification ou encore dite de la courbe universelle

Dans cette méthode, valable pour toute solution analytique, on reporte sur graphiques bilogarithmiques de mêmes modules d'une part la courbe (ou la série de courbes) représentative de la solution (en l'occurrence ici la fonction de puits de THEIS), d'autre part la série de valeurs mesurées en cours d'essai, c'est-à-dire : en abscisses les temps, en ordonnées les rabattements (figure I4). L'ajustement se fait en cherchant à superposer au mieux la courbe définie par les points de mesure à un segment de la "courbe type" représentative de la solution.

4.2.2. - Méthode de JACOB

La solution de THEIS admettant pour une certaine gamme de valeurs des paramètres une approximation logarithmique la méthode proposée par JACOB consiste à pratiquer un ajustement linéaire en opérant sur un graphique tracé sur papier semi-logarithmique à partir des points mesures. Les temps sont figurés en abscisses, les rabattements ou plus simplement les niveaux dynamiques, en ordonnée divisée arithmétiquement (figure I5).

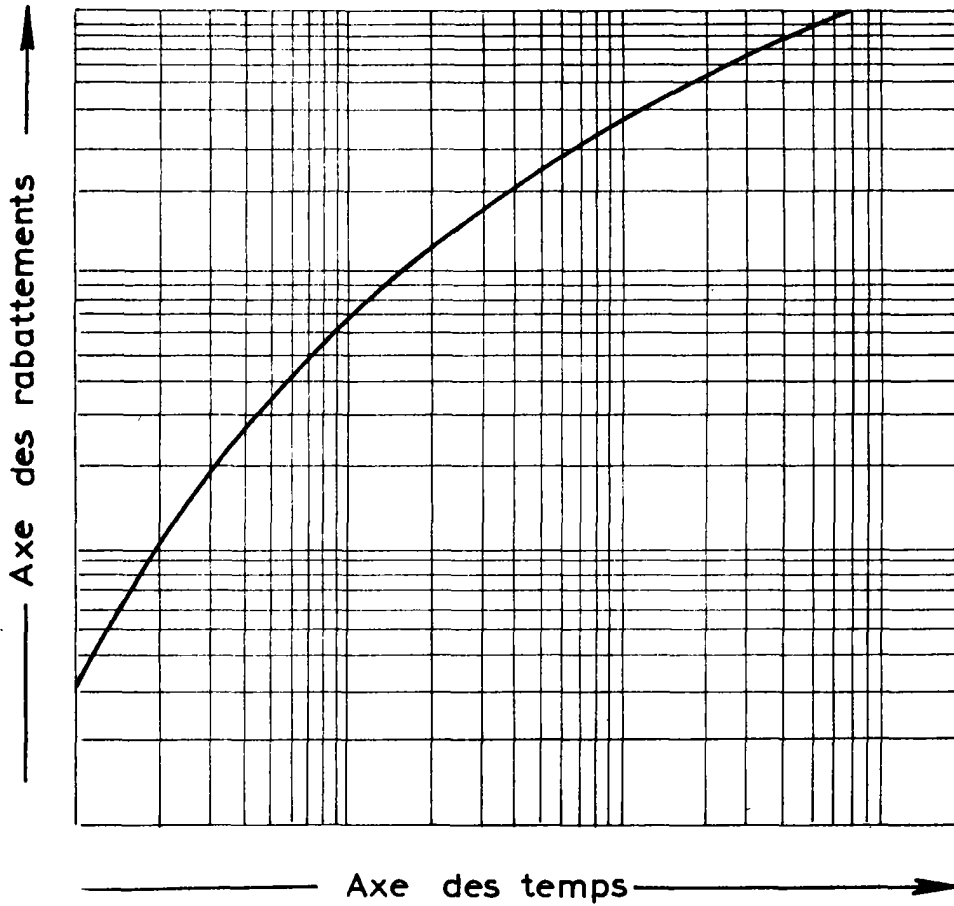


Figure 14

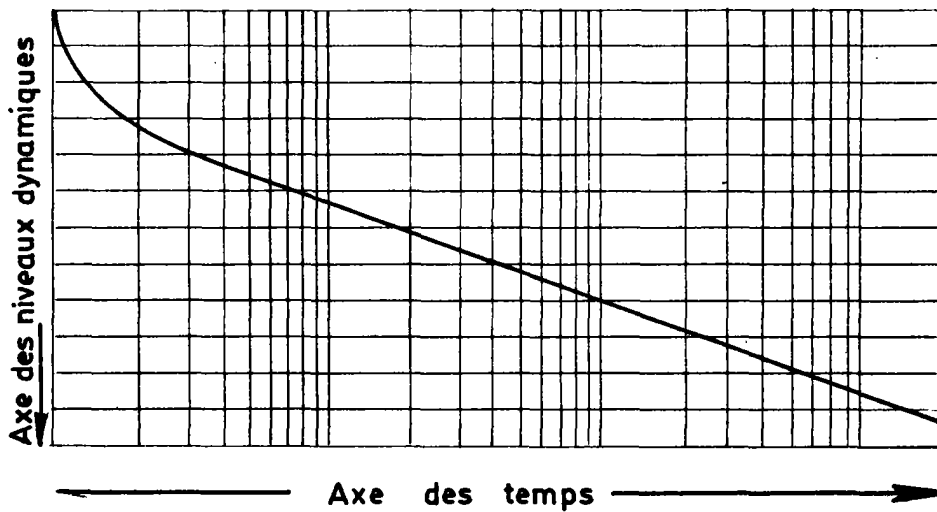


Figure 15

L'échelle des ordonnées (rabattement ou niveau) doit être compatible avec l'approximation des mesures. Il est souhaitable de ne jamais choisir d'échelle supérieure à 1/1.

En pratique dès que l'échelle est supérieure à 1/10 il faut représenter sur le graphique la marge d'approximation de la mesure en centrant sur le point correspondant à la mesure lue, un tiret vertical de longueur égale à la marge d'approximation.

Par exemple, pour une échelle 1/1 et si on considère que l'approximation sur la mesure est de 0,5 cm les points seront complétés par un tiret vertical de 2,5 mm de part et d'autre.

4.3 - ETUDE ET RESULTATS D'UN POMPAGE D'ESSAI

La présentation des résultats d'un pompage d'essai, choisi volontairement simple et dans un aquifère captif homogène, servira d'exemple de calcul de la transmissivité T et du coefficient d'emménagement S.

Les mesures et observations faites ont été reportées sur un dossier de pompage d'essai et les représentations graphiques (annexe 7) sont celles d'un piézomètre situé à 20 m du forage d'essai sous l'influence d'un pompage à débit constant de 13,6 l/s.

4.3.1 - Méthode de THEIS -

L'équation formulée par THEIS, s'écrit après les modifications apportées par Y. EMSELLEM [10].

$$T = \frac{0,08 Q}{\Delta} W(u) \quad (18)$$

avec :

T = transmissivité m^2/s
0,08 = mis à la place de $\frac{1}{4rc}$
Q = débit du pompage m^3/s
 Δ = rabattement à un instant considéré m
W(u) = ordonnée du point de coïncidence lue sur la courbe théorique.

4.3.1.1 - Détermination du coefficient d'emmagasinement

Le coefficient d'emmagasinement S est un nombre sans dimension numériquement égal au rapport entre :

- la hauteur de la tranche d'eau souterraine restituable par le système sous l'effet d'une dépression créée dans la couche aquifère, et
- la hauteur d'abaissement du niveau piézométrique correspondant à cette dépression.

Son équation est :

$$S = \frac{4 T t}{r^2 (1/u)} \quad (19)$$

avec :

S = coefficient d'emmagasinement	s. d
T = transmissivité	m ² /s
t = temps correspondant au rabattement de l'instant considéré	s
r = distance séparant le piézomètre du forage	m

4.3.1.2 - Construction de la courbe théorique de THEIS

C'est la courbe de l'annexe 2 qui permet de déterminer les valeurs W (u) et 1/u. Elle est tracée sur papier quadrillé dont les deux axes sont gradués logarithmiquement. Les valeurs, 1/u sont inscrites en abscisse, W (u) reportées en ordonnée.

4.3.1.3 - Courbe représentative du pompage d'essai (annexe 7.1)

Elle est tracée sur papier log/log à divisions identiques à celles utilisées pour la courbe de référence, l'axe des abscisses porte les valeurs du temps t, de pompage, l'échelle doit être choisie pour permettre la représentation des premières minutes de l'essai. L'axe des ordonnées

porte les valeurs du rabattement.

4.3.1.4 - Détermination des valeurs $1/u$ et $W(u)$

Après avoir tracé la courbe représentative de l'essai on la superpose à la courbe de référence, par glissement on cherche la meilleure et la plus longue coïncidence possible entre les deux courbes en veillant tout particulièrement à ce que les axes respectifs des deux diagrammes soient rigoureusement parallèles (annexe 7.2).

Chaque point des deux courbes en coïncidence sera défini par ses coordonnées sur chaque diagramme.

Exemple : pour le point A pris en considération :

$$\begin{array}{l} \text{Sur la courbe de référence} \\ \text{Sur la courbe représentative} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} 1/u = 6,4 \\ W(u) = 1,45 \\ \Delta = 0,76 \text{ m} \\ t = 60 \text{ s} \end{array} \right.$$

REMARQUE :

Lorsque les deux courbes sont en coïncidence le point A peut être choisi en n'importe quel point du diagramme.

4.3.1.5 - Calcul de la transmissivité

Connaissant $W(u)$ on applique l'équation (18) qui pour le piézomètre 1 donne la valeur :

$$T = \frac{0,08 \times 0,0136}{0,76} \times 1,45 = 0,00208 \neq 2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

4.3.1.6 - Calcul du coefficient d'emmagasinement

Pour un piézomètre à 20 m l'équation (19) du coefficient d'emmagasinement s'écrit :

$$S = \frac{4 \times 2 \times 10^{-3} \times 60}{400 \times 6,4} = 0,000186 \# 2 \times 10^{-4}$$

4.3.2 - Méthode d'approximation logarithmique de JACOB

La construction graphique se fait sur papier semi-logarithmique ; l'axe des abscisses porte les valeurs du temps t de pompage qui dans l'exemple choisi est de 18 000 secondes.

Pour permettre l'inscription de toutes les observations faites pour le piézomètre 1, l'axe logarithmique des temps sera gradué de la façon suivante :

10 (10 ¹)	secondes à l'origine	du premier cycle logarithmique		
100 (10 ²)	"	"	du second	"
1 000 (10 ³)	"	"	du troisième	"
10 000 (10 ⁴)	"	"	du quatrième	"

Au temps 10 secondes correspond un niveau d'eau de 10,20 m, à l'arrêt du pompage (à 18 000 secondes) le niveau se situe à 12,61 m sous le sol. Le report de toutes ces mesures sera possible en graduant au 1/20 et de haut en bas l'axe des ordonnées (annexe 7.3)

4.3.2.1 - Schématisation du graphique de JACOB

Généralement, le tracé sur papier semi-logarithmique de la courbe des niveaux d'eau en fonction du temps de pompage ne se fait pas selon une représentation rectiligne rigoureuse identique au schéma de la figure 15.

Au début du pompage la vidange du tubage et la mise en mouvement de la colonne d'eau sont des facteurs parasites qui perturbent la réaction

réelle de la nappe, et comme d'autre part la validité de l'approximation logarithmique de JACOB nécessite des conditions particulières telles que : $U \ll 0,02$, c'est à dire exigent, pour des conditions de géométrie et de diffusivité déterminées, l'écoulement d'un temps t_{ap} tel que la courbe observée en début de pompage puisse être confondue avec son approximation logarithmique représentée par une droite qui, théoriquement est supposée être l'asymptote à la ligne des profondeurs.

Malgré la réalisation de toutes ces conditions, on se trouve parfois en présence d'une dispersion des points sur le graphique semi-logarithmique, et même dans l'hypothèse de la droite unique, c'est à dire du régime transitoire pur, il est possible de tracer plusieurs droites différentes qui permettent de calculer les valeurs extrêmes de la transmissivité.

Le choix du tracé de la droite est important, sa pente, que l'on désigne par d . ND représente, pour un cycle logarithmique, la variation du niveau dynamique exprimée en mètres, elle permet le calcul de la transmissivité (figure 16).

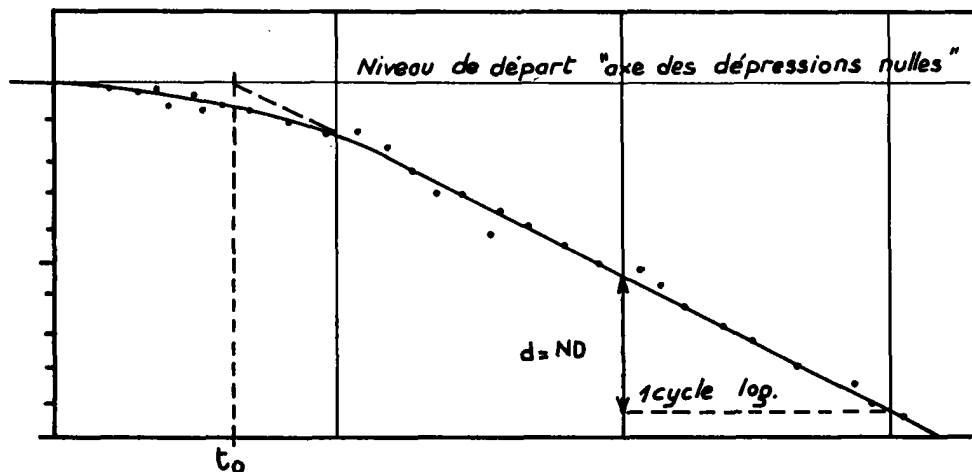


Figure 16

De même la connaissance de l'instant t_0 (figure 16) qui est le temps correspondant à l'abscisse du point d'intersection de la droite tracée, avec l'axe des dépressions nulles, conduit à la connaissance du coefficient d'emman-

gasinement pour des mesures faites sur un piézomètre.

4.3.2.2 - Calcul de la transmissivité

L'équation formulée par JACOB, ramenée à sa forme pratique s'écrit :

$$T = \frac{0,183}{d.ND} Q \quad (21)$$

Avec :

T = transmissivité m^2/s
0,183 = constante
d.ND = pente pour un cycle logarithmique de la droite asymptote à la ligne des dépressions. m
Q = débit du pompage m^3/h

pour d.ND = 0,58 on écrit :

$$T = \frac{0,183}{0,58} \times 0,0136 = 4,27 \times 10^{-3} \quad m^2/s$$

4.3.2.3 - Calcul du coefficient d'emmagasinement

Le coefficient d'emmagasinement s'obtient à partir du diagramme d'observation du piézomètre :

$$S = \frac{2,25 \times T \times t_0}{r^2} \quad (22)$$

Avec :

S = coefficient d'emmagasinement $s.d$
T = transmissivité m^2/s
2,25 = constante
r = distance séparant le piézomètre du forage m
 t_0 = temps correspondant à l'abscisse d'un point d'intersection de l'asymptote à la ligne des profondeurs avec l'axe des dépressions nulles. s

Dans l'exemple choisi avec $t_0 = 10$ secondes

$$S = \frac{2,25 \times 4,27 \times 10^{-3} \times 10}{400} = 2,4 \times 10^{-4}$$

4.3.2.4 - Etude de la remontée

Le report graphique des observations faites pendant la remontée du niveau, permet également le calcul de la transmissivité.

L'axe logarithmique porte les valeurs $1 + \frac{t_p}{t'}$, les niveaux d'eau sont inscrits à la même échelle qu'en "descente" sur l'axe des ordonnées (annexe 7.4) Comme précédemment l'équation de la transmissivité s'écrit :

$$T = \frac{0,183}{d.ND} Q$$

où :

d.ND est la pente, pour un cycle logarithmique, de l'asymptote à la ligne des profondeurs

Q est le débit du pompage mesuré pendant la descente

Pour le piézomètre 1 :

$$T = \frac{0,183}{0,54} \times 0,0136 = 4,59 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

4.3.2.5 - Vérification de l'approximation logarithmique

La détermination de T et S à partir d'observations faites sur un piézomètre situé à une distance r d'un forage d'essai, s'accompagne obligatoirement de la vérification de l'approximation logarithmique, c'est à dire de l'instant t_{ap} à compter duquel l'approximation que l'on fera sur T et S sera inférieure à 2 % . Il s'agit de résoudre :

$$U = \frac{r^2 S}{4 T t_{ap}} \quad (20)$$

avec $U \leq 0,02$

Dans l'exemple du piézomètre 1 :

$$0,02 = \frac{400 \times 1,86 \times 10^{-4}}{4 \times 2 \times 10^{-3} \times t_{ap}}$$

$$t_{ap} = \frac{400 \times 1,86 \times 10^{-4}}{4 \times 2 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^{-2}} \quad \# \quad 500 \text{ secondes}$$

Pour le piézomètre 1, l'approximation logarithmique de JACOB est validée au delà de 500 secondes ; ce calcul est indispensable pour toute détermination de T et S faite à partir d'un piézomètre, t_{ap} sera d'autant plus grand que la distance puits de pompage-piézomètre sera plus grande.

4.4 - COMPARAISON DES RESULTATS

:	Méthode exacte de THEIS	:	Méthode approximative de JACOB	:	:
:	:	:	:	:	:
:	$T = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$:	$T = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$:	DESCENTE
:	$S = 2 \times 10^{-4}$:	$S = 2 \times 10^{-4}$:	:
:	:	:	$T = 4,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$:	REMONTÉE
:	:	:	:	:	:

REMARQUES :

Il est superflu d'exprimer les valeurs de T et S avec des décimales qui n'ont dans le cas présent aucune valeur significative.

La méthode de THEIS qui fait intervenir dans l'équation (18) la valeur du rabattement conduit parfois à une fausse détermination de T , car le rabattement peut être aggravé sous l'effet d'une cause étrangère à l'aquifère (pertes de charge par exemple). Dans ce cas la représentation de JACOB est plus rigoureuse, l'équation (21) ne fait intervenir que la pente de l'asymptote sans que sa position sur le graphique ait d'incidence sur la valeur de T .

Par contre la méthode de JACOB est difficilement applicable pour interpréter un essai de courte durée dont l'effet est observé sur un piézomètre lointain. La vérification de l'approximation logarithmique nécessitera l'écoulement d'un temps t_{ap} parfois supérieur à la durée du pompage.

Les deux méthodes sont donc complémentaires et leur emploi est subordonné à une connaissance approfondie ; de l'environnement géologique, et des opérations techniques qui ont précédé le pompage d'essai.

CONCLUSION

L'enrichissement prévisible du catalogue des schémas hydrauliques traitables, accroîtra à l'avenir, et sans aucun doute, les possibilités d'interprétation des cas de plus en plus complexes.

La programmation des pompages d'essai en sera influencée, mais les règles d'opération décrites aux chapitres précédents demeureront et leur respect est essentiel.

Les données acquises par des mesures précises, faites lors d'un pompage d'essai correctement suivi, possèdent une valeur intrinsèque, même lorsque les possibilités d'interprétation se trouvent restreintes par la validité des formules actuellement disponibles. Il a déjà été possible de réinterpréter de manière plus correcte des données de pompages anciens, initialement mal interprétés, mais dont les mesures avaient été bien faites.

Ainsi apparaît le rôle important dévolu au technicien chargé de conduire le pompage d'essai, qui dans tous les cas doit s'astreindre à des observations fidèles, précises et continues.

L'interprétation des données d'un pompage d'essai ne peut se ramener à l'application de quelques recettes simples, elle exige du discernement, un esprit d'analyse et aussi un certain sens du "diagnostic". Il sortirait du cadre de ce manuel de développer davantage les méthodes d'interprétation qui font l'objet d'autres ouvrages en préparation au B.R.G.M.

BIBLIOGRAPHIE

1 - C.V. THEIS -

The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground water storage. Transaction Amer. Geophys. Union Vol. 16 p. 520 (1935).

2 - Département d'Hydrogéologie

Formulaire de l'hydrogéologue

Rapport inédit n° 68 SGL 202 HYD du B.R.G.M. - 2e cahier § 1.2.5.9.2 tirage de Juin 1967.

3 - C.E. JACOB -

Flow of ground water. Engeneering Hydraulics.

Proceeding of the fourth hydraulics conference

Iowa Institute of Hydraulic research - 12-15 June 1949, Hunter Roux édit. chap. V.

4 - P. POUCHAN -

Etude des nappes à l'aide du régime transitoire

Thèse de 3e cycle n° 44 de la Faculté des Sciences de Bordeaux.

Editions TEX(1959).

5 - S. COTTEZ -

Les massifs filtrants pour puits et forages d'eau

Rapport inédit du B.R.G.M. n° DS 65 A 26. (1965)

6 - G.A. LEONARDS -

Les Fondations - chapitre drainage rédigé par C. MANSUR et R. KAUFMAN

Edition Dunod Paris (1968).

7 - G. CASTANY -

Prospection et exploitation des eaux souterraines Dunod éditeur

(Paris 1968).

- 8 - J. MARGAT -
Notions générales sur l'hydraulique des puits
Rapport inédit n° DS 64 A 60 du B.R.G.M. (1964).
- 9 - F. VITRAC -
Répertoire des pompes et moyens de puisage dans les forages
Rapport inédit du B.R.G.M. n° DS 64 A 23.(1964)
- 10 - Y. EMSELLEM -
L'interprétation des essais de débit des nappes d'eau souterraines
Annales des Mines -(Juin 1965).
- 11 - J.J. COLIN , G. LIENDHARDT, H. KOLZ -
Application de la télé mesure à la surveillance des essais de débit
(utilisation de la sonde limnimétrique transmetteuse AP4 (HWK) et de
l'appareil POLYCOMP)
Note inédite du B.R.G.M. -(1967).
- 12 - A. CAUVIN -
Notions d'hydrauliques - pages 60 à 64
Eyrolles éditeur (Paris 1960).
- 13 - AFNOR -
Mesure des débits instantanés des fluides
Norme française homologuée NF x 10 - 101
Editée par l'Association française de normalisation 23, rue Notre
Dame des Victoires - Paris 2e (Paris septembre 1949)
Tirage 8 mai 1968.
- 14 - A.T. TROSKOLANSKI -
Théorie et pratique des mesures hydrauliques - chapitre XXXI § 3
pages 431 à 436 - Edition Dunod (Paris 1962).

15 - G. TRUPIN -

Der Einsatz von Danaïden (n° 3 Bohrtechnik Brunnenbau Rohrleitungs-
gsbau) Berlin (1968).

Traduction allemande par H.R. LANGGUTH du rapport inédit "La Danaïde"
n° DS S.G.R. 67 A 51 du B.R.G.M.

16 - G. TRUPIN -

Etude expérimentale des variations de pression provoquées par les
marées océaniques dans un aquifère captif.

Diplome d'études supérieures présenté à la Faculté des Sciences
de Bordeaux. (1969)

17 - A. LENCASTRE -

Manuel d'hydraulique générale

Edition Eyrolles - Paris (1961).

- A N N E X E 1 -

DOSSIER DU POMPAGE D'ESSAI (°)

(°) Une version adaptée à la mise en mémoire des données est en cours de mise au point au département d'hydrogéologie du B.R.G.M.

B.R.G.M./HYDROGEOLOGIE

P O M P A G E D' E S S A I

du..... au..... 19..

Dénomination de l'ouvrage :

Localisation : FRANCE : indice B.R.G.M.

Opérateur : autre pays.....

Demandeur ou maître d'oeuvre :

--	--	--

--

RENSEIGNEMENTS GENERAUX

But de l'essai :

Référence relative au programme de l'essai :

Durée de l'essai :

- durée du pompage : t =

- durée des observations après arrêt du pompage :

Autres pompages d'essai effectués antérieurement dans le même ouvrage :

date : référence :

date : référence :

date : référence :

Référence relative aux conditions hydrogéologiques :

CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE

Nature : puits / forage date d'exécution :/inconnue

Diamètre foré, au niveau de la couche aquifère :

Diamètre intérieur du tubage ou cuvelage, au niveau du plan d'eau :

Profondeur totale, rapportée au sol :

Crépines, type : entre..... et..... m de profon.

entre..... et..... m de profon.

avec / sans massif filtrant

Captage de la couche aquifère : parfait / imparfait / doute

Traitements opérés : développement : oui / non

acidification : oui / non

Observations :

DISPOSITIF DE POMPAGE

Source d'énergie : réseau électrique / groupe électrogène / moteur à explosion

Pompe : centrifuge / rotative / alternative / électrique immergée /

avec / sans clapet de retour d'eau

Crépine d'aspiration à la profondeur de : m

Refoulement d'eau :

- diamètre de la colonne de refoulement ou d'aspiration au niveau du plan d'eau libre : $2 R_c =$ m

- distance de refoulement à partir du puits : L = m

- lieu d'évacuation de l'eau pompée :

B.R.G.M.

FEUILLE D'OBSERVATION D'ESSAI DE PUIT

N°

Pompage d'essai de :

du au 19..

B.R.G.M.

indice ou

Origine des mesures de niveaux :

Nombre de paliers de pompage :

Date	Heure et minute	Débit Q en m ³ /h (1) l/s (2)	Profondeur du plan d'eau ou dépression en m (1)	Profondeur du plan d'eau avant pompage : m
				OBSERVATIONS (notamment : début ou fin d'un palier de pompage)

Feuille 1

(1) barrer la mention inutile

(2) indiquer Q = 0 lorsque le pompage est arrêté.

Pompage d'essai de : Observateur :
Origine des mesures de niveaux :

puits ou : indice
piézomètre : B.R.G.M.
n° : ou

en cas de pompage antérieur dans cet ouvrage :
débit pompé :
date et heure d'arrêt du pompage :

1	2	3	4
date	heure et minute	profondeur du plan d'eau en m.	Observations

Feuille 2

puits ou : indice
piézomètre : B.R.G.M.
n° : ou

en cas de pompage antérieur dans cet ouvrage :
débit pompé :
date et heure d'arrêt du pompage :

1	2	3	4
date	heure et minute	profondeur du plan d'eau en m.	Observations

Pompage d'essai de : du au

Origine des mesures de niveaux : B.R.G.M.

Profondeur initiale du plan d'eau : indice ou

1	2	3	4	5	6	7
date	heure et minute	temps t depuis le début du pompage en h (1) min. s.	profondeur (1) ou dépression en m	temps (1) pour remplir...m ³ en s, ou lecture de compteur ou charge en cm.	débit calculé Q en m ³ /h (1) m ³ /s	Observations (incidents de pompage, prise d'échantillon d'eau, mesure de température etc...)
		0				début du pompage

Feuillet 3

(1) barrer les mentions inutiles

Pompage d'essai de :

piézomètre n°.....		indice B.R.G.M. ou <input type="text"/>	
1	2	3	4
: temps t : date : depuis le : et : début du : (1) ou : heure : pompage : rabat- : : en h (1) : tement : : min, s. : en m.		: profondeur : initiale....m : origine des : mesures..... :	
0		début du pom- page	

Feuillet 4

piézomètre n°.....		indice B.R.G.M. ou <input type="text"/>	
1	2	3	4
: temps t : date : depuis le : et : début du : (1) ou : heure : pompage : rabat- : : en h (1) : tement : : min, s. : en m.		: profondeur : initiale....m : origine des : mesures..... :	
0		début du pom- page	

(1) barrer les mentions inutiles

N°

(Remontée des niveaux)

Pompage d'essai de : indice
 Après pompage de durée $t_p =$ j ou s (1) B.R.G.M.
 au débit (Constant /Moyen) $Q =$ m³/h ou m³/s (1) ou

.....

1	2	3	4	5	6
Date	Heure et minute	temps t' depuis l'arrêt du pompage en h (1) min, s.	$1 + \frac{t_p}{t'}$	Profon- deur (1) ou rabat. résiduel en m.	Observations
		0			Arrêt du pompage

FEUILLET 5

(1) Barrer les mentions inutiles

DISPOSITIFS DE MESURE

Débit pompé :

- cuve de m³
- compteur gradué en.....
- ajutage cylindrique de diamètre D = m
- opercule à orifice de diamètre d = m
- déversoir rectangulaire de longueur L =
-

Niveau de l'eau dans le puits d'essai :

- lecture directe par échelle / limnimètre électrique / flotteur / ligne d'air manométrique / ligne mouillée /.....
- enregistrement par limnigraphe à flotteur / ligne d'air manométrique
- repère auquel sont rapportées les mesures de profondeur du niveau de l'eau :
 - hauteur par rapport au sol : + ou -..... m
 - altitude absolue : m

Niveau piézométrique dans la couche aquifère :

Indiquer les modalités de mesure, définies comme ci-dessus, dans la colonne "Observations" du tableau suivant :

PIEZOMETRES

Indice B.R.G.M. ou	Distan- ce au puits en m.	Pro- fondeur totale depuis le sol en m.	Hauteur ouverte testée de.... à ...m de profon- deur	Sensi- bilité (1) en minute	à hauteur du repè- re par rapport au sol en m (2)	Altitude absolue du repère	Observations (notamment : mo- dalités de mesure de profondeur du plan d'eau.
			à				
			à				
			à				
			à				

(1) temps de remontée compensant les 9/10 d'un abaissement instantané (test de sensibilité)

(2) repère auquel sont rapportées les mesures de profondeur du niveau de l'eau.

COMPOSITION DU DOSSIER	Nombre
Plan de situation	
Coupes techniques (puits, piézomètres)	
Feuilles d'observation d'essai de puits (paliers de débit suc)	
Feuilles d'observation avant pompage	
Feuilles d'observation en pompage - puits	
Feuilles d'observation en pompage - piézomètres	
Feuilles d'observation après pompage	
Autres pièces (limnigrammes, etc...)	

Responsable et collaborateurs de l'essai :

Rédacteur du dossier : Le.....19..

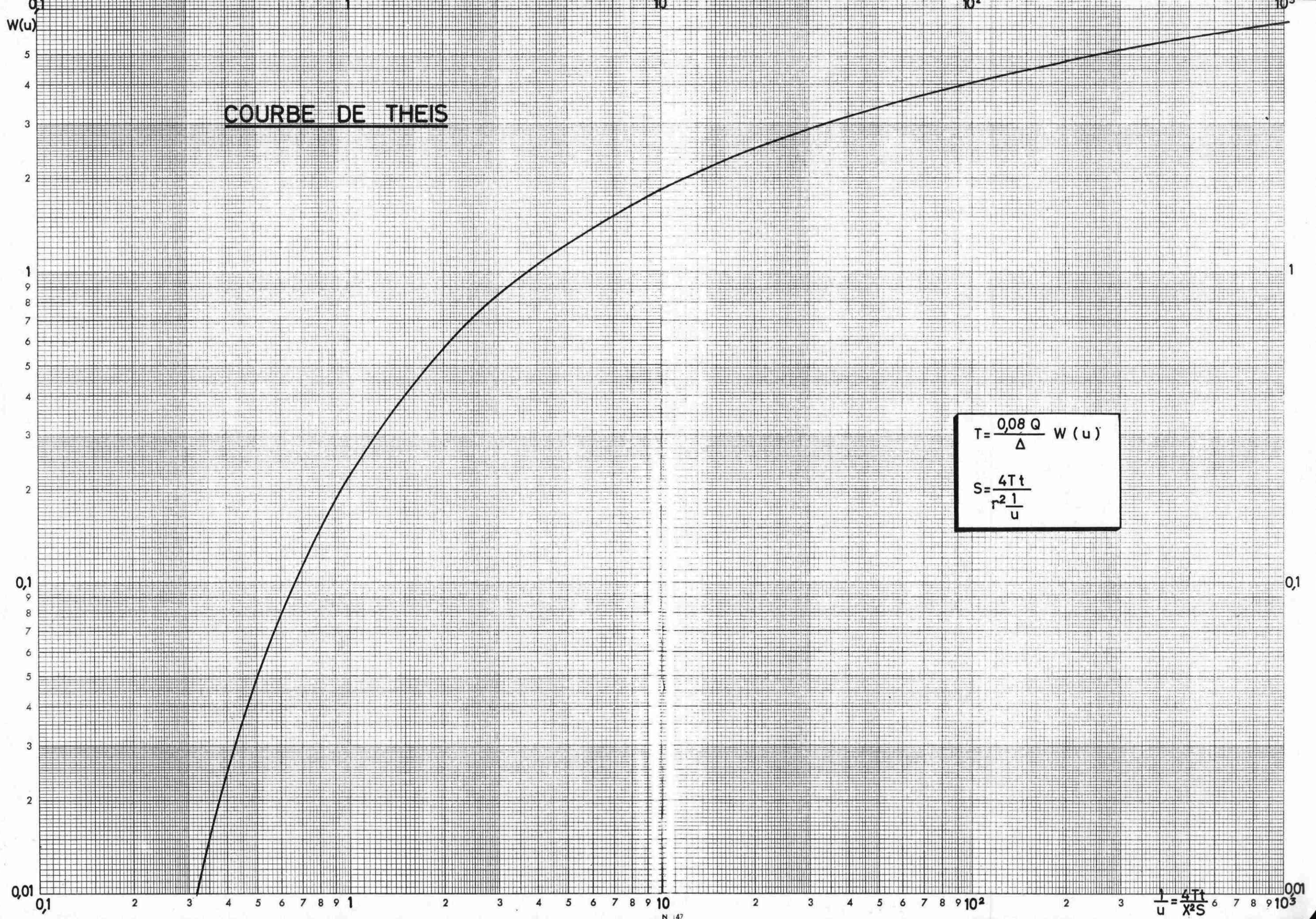
Signature :

- A N N E X E 2 -

FEUILLE BILOGARITHMIQUE

COURBE DE REFERENCE

COURBE DE THEIS

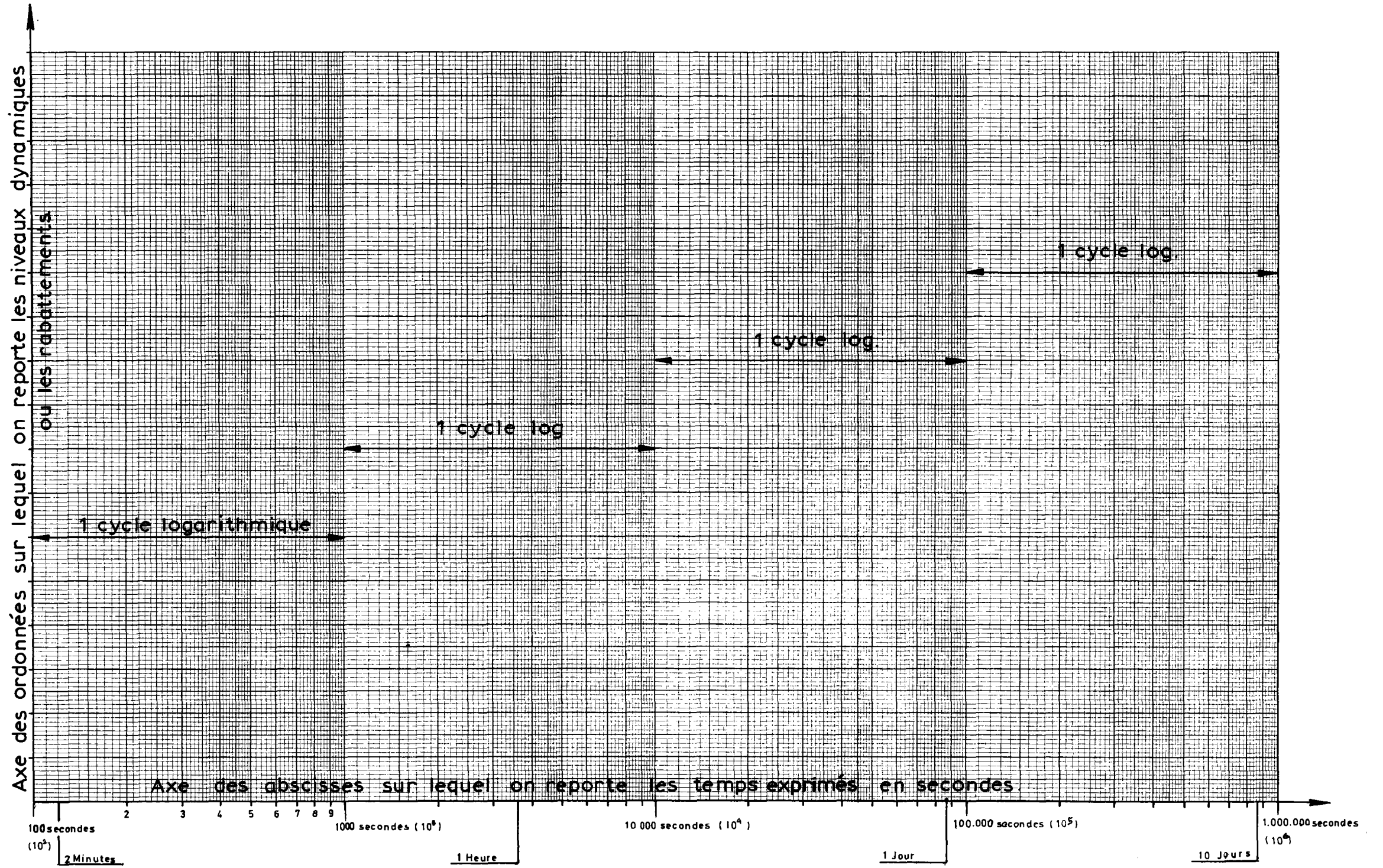


$$T = \frac{0,08 Q}{\Delta} W(u)$$
$$S = \frac{4Tt}{r^2} \frac{1}{u}$$

$$\frac{1}{u} = \frac{4Tt}{r^2 S}$$

- A N N E X E 3 -

FEUILLE SEMI-LOGARITHMIQUE



- A N N E X E 4 -

4.1 - Tableaux de conversion des temps en secondes

4.2 - Volume des tubes selon leur diamètre, en litres par m de longueur

4.3 - Tableau de conversion des pouces en millimètres

4.4 - Tableau de conversion des litres /seconde. en mètres cubes/heure

4.5 - Tableau de conversion des mètres cubes/heure en litres/seconde

4.1 - TABLEAUX DE CONVERSION DES TEMPS EN SECONDES

01 mn	60	46 mn	2 760	1h 29	5 340
02	120	47	2 820	1h 30	5 400
03	180	48	2 880	31	5 460
04	240	49	2 940	32	5 520
05	300	50	3 000	33	5 580
06	360	51	3 060	34	5 640
07	420	52	3 120	1h 35	5 700
08	480	53	3 180	36	5 760
09	540	54	3 240	37	5 820
10	600	55	3 300	38	5 880
11	660	56	3 360	39	5 940
12	720	57	3 420	1h 40	6 000
13	780	58	3 480	41	6 060
14	840	59	3 540	42	6 120
15	900	60	3 600	43	6 180
16	960	1h 01	3 660	44	6 240
17	1 020	1h 02	3 720	1h 45	6 300
18	1 080	03	3 780	46	6 360
19	1 140	04	3 840	47	6 420
20	1 200	05	3 900	48	6 480
21	1 260	06	3 960	49	6 540
22	1 320	07	4 020	1h 50	6 600
23	1 380	08	4 080	51	6 660
24	1 440	09	4 140	52	6 720
25	1 500	1h 10	4 200	53	6 780
26	1 560	11	4 260	54	6 840
27	1 620	12	4 320	1h 55	6 900
28	1 680	13	4 380	56	6 960
29	1 740	14	4 440	57	7 020
30	1800	15	4 500	58	7 080
31	1 860	16	4 560	59	7 140
32	1920	17	4 620	1h 60	7 200
33	1 980	18	4 680	05	7 500
34	2 040	19	4 740	10	7 800
35	2 100	1h 20	4 800	2h 15	8 100
36	2 160	21	4 860	20	8 400
37	2 220	22	4 920	25	8 700
38	2 280	23	4 980	2h 30	9 000
39	2 340	24	5 040	35	9 300
40	2 400	1h 25	5 100	40	9 600
41	2 460	26	5 160	2h 45	9 900
42	2 520	27	5 220	50	10 200
43	2 580	28	5 280	55	10 500
44	2 640			3h 00	10 800
45	2 700			05	11 100

4.1 - TABLEAUX DE CONVERSION DES TEMPS EN SECONDES

(suite)

3h 10	: 11 400	19h 00	: 68 400	63h 00	: 226 800
15	: 11 700	30	: 70 200	64h 00	: 230 400
20	: 12 000	20h 00	: 72 000	65h 00	: 234 000
25	: 12 300	30	: 73 800	66h 00	: 237 600
3h 30	: 12 600	21h 00	: 75 600	67h 00	: 241 200
35	: 12 900	30	: 77 400	68h 00	: 244 800
40	: 13 200	22h 00	: 79 200	69h 00	: 248 400
3h 45	: 13 500	30	: 81 000	70h 00	: 252 000
50	: 13 800	23h 00	: 82 800	71h 00	: 255 600
55	: 14 100	30	: 84 600	72h 00	: 259 200
:	:	24h 00	: 86 400	73h 00	: 262 800
4h 00	: 14 400	25h 00	: 90 000	74h 00	: 266 400
15	: 15 300	26h 00	: 93 600	75h 00	: 270 000
4h 30	: 16 200	27h 00	: 97 200	76h 00	: 273 600
45	: 17 100	28h 00	: 100 800	77h 00	: 277 200
5h 00	: 18 000	29h 00	: 104 400	78h 00	: 280 800
15	: 18 900	30h 00	: 108 000	79h 00	: 284 400
5h 30	: 19 800	31h 00	: 111 600	80h 00	: 288 000
45	: 20 700	32h 00	: 115 200	81h 00	: 291 600
6h 00	: 21 600	33h 00	: 118 800	82h 00	: 295 200
15	: 22 500	34h 00	: 122 400	83h 00	: 298 800
6h 30	: 23 400	35h 00	: 126 000	84h 00	: 302 400
45	: 24 300	36h 00	: 129 600	85h 00	: 306 000
7h 00	: 25 200	37h 00	: 133 200	86h 00	: 309 600
15	: 26 100	38h 00	: 136 800	87h 00	: 313 200
7h 30	: 27 000	39h 00	: 140 000	88h 00	: 316 800
45	: 27 900	40h 00	: 144 000	89h 00	: 320 400
8h 00	: 28 800	41h 00	: 147 600	90h 00	: 324 000
30	: 30 600	42h 00	: 151 200	91h 00	: 327 600
9h 00	: 32 400	43h 00	: 154 800	92h 00	: 331 200
30	: 34 200	44h 00	: 158 400	93h 00	: 334 800
10h 00	: 36 000	45h 00	: 162 000	94h 00	: 338 400
30	: 37 800	46h 00	: 165 600	95h 00	: 342 000
11h 00	: 39 600	47h 00	: 169 200	96h 00	: 345 600
30	: 41 400	48h 00	: 172 800	97h 00	: 349 200
12h 00	: 43 200	49h 00	: 176 400	98h 00	: 352 800
30	: 45 000	50h 00	: 180 000	99h 00	: 356 400
13h 00	: 46 800	51h 00	: 183 600	100h 00	: 360 000
30	: 48 600	52h 00	: 187 200	101h 00	: 363 600
14h 00	: 50 400	53h 00	: 190 800	102h 00	: 367 200
30	: 52 200	54h 00	: 194 400	103h 00	: 370 800
15h 00	: 54 000	55h 00	: 198 000	104h 00	: 374 400
30	: 55 800	56h 00	: 201 600	105h 00	: 378 000
16h 00	: 57 600	57h 00	: 205 200	106h 00	: 381 600
30	: 59 400	58h 00	: 208 800	107h 00	: 385 200
17h 00	: 61 200	59h 00	: 212 400	108h 00	: 388 800
30	: 63 000	60h 00	: 216 000	109h 00	: 392 400
18h 00	: 64 800	61h 00	: 219 600	110h 00	: 396 000
30	: 66 600	62h 00	: 223 200	111h 00	: 399 600
:	:	:	:	:	:

4.1 - TABLEAUX DE CONVERSION DES TEMPS EN SECONDES

(suite)

112h 00	:	403 200
113h 00	:	406 800
114h 00	:	410 400
115h 00	:	414 000
116h 00	:	417 600
117h 00	:	421 200
118h 00	:	424 800
119h 00	:	428 400
120h 00	:	432 000
121h 00	:	435 600
122h 00	:	439 200
123h 00	:	442 800
124h 00	:	446 400
125h 00	:	450 000
126h 00	:	453 600
127h 00	:	457 200
128h 00	:	460 800
129h 00	:	464 400
130h 00	:	468 000
131h 00	:	471 600
132h 00	:	475 200
133h 00	:	478 800
134h 00	:	482 400
135h 00	:	486 000
136h 00	:	489 600
137h 00	:	493 200
138h 00	:	496 800
139h 00	:	500 400
140h 00	:	504 000
141h 00	:	507 600
142h 00	:	511 200
143h 00	:	514 800
144h 00	:	518 400
146h 00	:	525 600
148h 00	:	532 800
150h 00	:	540 000
152h 00	:	547 200
154h 00	:	554 400
156h 00	:	561 600

158h 00	:	568 800
160h 00	:	576 000
162h 00	:	583 200
164h 00	:	590 400
166h 00	:	597 600
168h 00	:	604 800
170h 00	:	612 000
172h 00	:	619 200
174h 00	:	626 400
176h 00	:	633 600
178h 00	:	640 800
180h 00	:	648 000
182h 00	:	655 200
184h 00	:	662 400
186h 00	:	669 600
188h 00	:	676 800
190h 00	:	684 000
192h 00	:	691 200
194h 00	:	698 400
196h 00	:	705 600
198h 00	:	712 800
200h 00	:	720 000
202h 00	:	727 200
204h 00	:	734 400
206h 00	:	741 600
208h 00	:	748 800
210h 00	:	756 000
212h 00	:	763 200
214h 00	:	770 400
216h 00	:	777 600
218h 00	:	784 800
220h 00	:	792 000
222h 00	:	799 200
224h 00	:	806 400
226h 00	:	813 600
228h 00	:	820 800
230h 00	:	828 000
232h 00	:	835 200
234h 00	:	842 400

236h 00	:	849 600
238h 00	:	856 800
240h 00	:	864 000
242h 00	:	871 200
244h 00	:	878 400
246h 00	:	885 600
248h 00	:	892 800
250h 00	:	900 000
252h 00	:	907 200
254h 00	:	914 400
256h 00	:	921 600
258h 00	:	928 800
260h 00	:	936 000
262h 00	:	943 200
264h 00	:	950 400
266h 00	:	957 600
268h 00	:	964 800
270h 00	:	972 000
272h 00	:	979 200
274h 00	:	986 400
276h 00	:	993 600
278h 00	:	1000 800
280h 00	:	1008 000
282h 00	:	1015 200
284h 00	:	1022 400
286h 00	:	1029 600
288h 00	:	1036 800
290h 00	:	1044 000
292h 00	:	1051 200
294h 00	:	1058 400
296h 00	:	1065 600
298h 00	:	1072 800
300h 00	:	1080 000
302h 00	:	1087 200
304h 00	:	1094 400
306h 00	:	1101 600
308h 00	:	1108 800
310h 00	:	1116 000
312h 00	:	1123 200

4.3 - TABEAU DE CONVERSION DES POUCES EN MILLIMETRES

Pouces	0	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8
0		3,17	6,35	9,52	12,70	15,87	19,05	22,22
1	25,40	28,57	31,75	34,92	38,10	41,27	44,45	47,62
2	50,80	53,97	57,15	60,32	63,50	66,67	69,85	73,02
3	76,20	79,37	82,55	85,72	88,90	92,07	95,25	98,42
4	101,60	104,77	107,95	111,12	114,30	117,47	120,65	123,82
5	127,00	130,17	133,35	136,52	139,70	142,87	146,05	149,22
6	152,40	155,57	158,75	161,92	165,10	168,27	171,45	174,62
7	177,80	180,97	184,15	187,32	190,50	193,67	196,85	200,02
8	203,20	206,37	209,55	212,72	215,90	219,07	222,25	225,42
9	228,60	231,77	234,95	238,12	241,30	244,47	247,65	250,82
10	254,00	257,17	260,35	263,52	266,70	269,87	273,05	276,22
11	279,40	282,57	285,75	288,92	292,10	295,27	298,45	301,62
12	304,80	307,97	311,15	314,32	317,50	320,67	323,85	327,02
13	330,20	333,37	336,55	339,72	342,90	346,07	349,25	352,42
14	355,60	358,77	361,95	365,12	368,30	371,47	374,65	377,82
15	381,00	384,17	387,35	390,52	393,70	396,87	400,05	403,22
16	406,40	409,57	412,75	415,92	419,10	422,27	425,45	428,62
17	431,80	434,97	438,15	441,32	444,50	447,67	450,85	454,02
18	457,20	460,37	463,55	466,72	469,90	473,07	476,25	479,42
19	482,60	485,77	488,95	492,12	495,30	498,47	501,65	504,82
20	508,00	511,17	514,35	517,52	520,70	523,87	527,05	530,22
21	533,40	536,57	539,75	542,92	546,10	549,27	552,45	555,62
22	558,80	561,97	565,15	568,32	571,50	574,67	577,85	581,02
23	584,20	587,37	590,55	593,72	596,90	600,07	603,25	606,42
24	609,60	612,77	615,95	619,12	622,30	625,47	628,65	631,82
25	635,00	638,17	641,35	644,52	647,70	650,87	654,05	657,22
26	660,40	663,57	666,75	669,92	673,10	676,27	679,45	682,62
27	685,80	688,97	692,15	695,32	698,50	701,67	704,85	708,02
28	711,20	714,37	717,55	720,72	723,90	727,07	730,25	733,42
29	736,60	739,77	742,95	746,12	749,30	752,47	755,65	758,82
30	762,00	765,17	768,35	771,52	774,70	777,87	781,05	784,22

4.4 - TABLEAUX DE CONVERSION DES LITRES/SECONDE EN METRES CUBES/HEURE

l/s :	m ³ /h	l/s :	m ³ /h	l/s :	m ³ /h	l/s :	m ³ /h
1	3,6	41	147,6	81	291,6	121	435,6
2	7,2	42	151,2	82	295,2	122	439,2
3	10,8	43	154,8	83	298,8	123	442,8
4	14,4	44	158,4	84	302,4	124	446,4
5	18,0	45	162,0	85	306,0	125	450,0
6	21,6	46	165,6	86	309,6	126	453,6
7	25,2	47	169,2	87	313,2	127	457,2
8	28,8	48	172,8	88	316,8	128	460,8
9	32,4	49	176,4	89	320,4	129	464,4
10	36,0	50	180,0	90	324,0	130	468,0
11	39,6	51	183,6	91	327,6	131	471,6
12	43,2	52	187,2	92	331,2	132	475,2
13	46,8	53	190,8	93	334,8	133	478,8
14	50,4	54	194,4	94	338,4	134	482,4
15	54,0	55	198,0	95	342,0	135	486,0
16	57,6	56	201,6	96	345,6	136	489,6
17	61,2	57	205,2	97	349,2	137	493,2
18	64,8	58	208,8	98	352,8	138	496,8
19	68,4	59	212,4	99	356,4	139	500,4
20	72,0	60	216,0	100	360,0	140	504,0
21	75,6	61	219,6	101	363,6	141	507,6
22	79,2	62	223,2	102	367,2	142	511,2
23	82,8	63	226,8	103	370,8	143	514,8
24	86,4	64	230,4	104	374,4	144	518,4
25	90,0	65	234,0	105	378,0	145	522,0
26	93,6	66	237,6	106	381,6	146	525,6
27	97,2	67	241,2	107	385,2	147	529,2
28	100,8	68	244,8	108	388,8	148	532,8
29	104,4	69	248,4	109	392,4	149	536,4
30	108,0	70	252,0	110	396,0	150	540,0
31	111,6	71	255,6	111	399,6	151	543,6
32	115,2	72	259,2	112	403,2	152	547,2
33	118,8	73	262,8	113	406,8	153	550,8
34	122,4	74	266,4	114	410,4	154	554,4
35	126,0	75	270,0	115	414,0	155	558,0
36	129,6	76	273,6	116	417,6	156	561,6
37	133,2	77	277,2	117	421,2	157	565,2
38	136,8	78	280,8	118	424,8	158	568,8
39	140,4	79	284,4	119	428,4	159	572,4
40	144,0	80	288,0	120	432,0	160	576,0

4.4 - TABLEAUX DE CONVERSION DES LITRES/SECONDE EN METRES CUBES/HEURE

(suite)

l/s	m ³ /h	l/s	m ³ /h	l/s	m ³ /h	l/s	m ³ /h
161	579,6	201	723,6	241	867,6	281	1011,6
162	583,2	202	727,2	242	871,2	282	1015,2
163	586,8	203	730,8	243	874,8	283	1018,8
164	590,4	204	734,4	244	878,4	284	1022,4
165	594,0	205	738,0	245	882,0	285	1026,0
166	597,6	206	741,6	246	885,6	286	1029,6
167	601,2	207	745,2	247	889,2	287	1033,2
168	604,8	208	748,8	248	892,8	288	1036,2
169	608,4	209	752,4	249	896,4	289	1040,4
170	612,0	210	756,0	250	900,0	290	1044,0
171	615,6	211	759,6	251	903,6	291	1047,6
172	619,2	212	763,2	252	907,2	292	1051,2
173	622,8	213	766,8	253	910,8	293	1054,8
174	626,4	214	770,4	254	914,4	294	1058,4
175	630,0	215	774,0	255	918,0	295	1062,0
176	633,6	216	777,6	256	921,6	296	1065,6
177	637,2	217	781,2	257	925,2	297	1069,2
178	640,8	218	784,8	258	928,8	298	1072,8
179	644,4	219	788,4	259	932,4	299	1076,4
180	648,0	220	792,0	260	936,0	300	1080,0
181	651,6	221	795,6	261	939,6	301	1083,6
182	655,2	222	799,2	262	943,2	302	1087,2
183	658,8	223	802,8	263	946,8	303	1090,8
184	662,4	224	806,4	264	950,4	304	1094,4
185	666,0	225	810,0	265	954,0	305	1098,0
186	669,6	226	813,6	266	957,6	306	1101,6
187	673,2	227	817,2	267	961,2	307	1105,2
188	676,8	228	820,8	268	964,8	308	1108,8
189	680,4	229	824,4	269	968,4	309	1112,4
190	684,0	230	828,0	270	972,0	310	1116,0
191	687,6	231	831,6	271	975,6	311	1119,6
192	691,2	232	835,2	272	979,2	312	1123,2
193	694,8	233	838,8	273	982,8	313	1126,8
194	698,4	234	842,4	274	986,4	314	1130,4
195	702,0	235	846,0	275	990,0	315	1134,0
196	705,6	236	849,6	276	993,6	316	1137,6
197	709,2	237	853,2	277	997,2	317	1141,2
198	712,8	238	856,8	278	1000,8	318	1144,8
199	716,4	239	860,4	279	1004,4	319	1148,4
200	720,0	240	864,0	280	1008,0	320	1152,0

4.5 - TABLEAUX DE CONVERSION DES METRES CUBES/HEURE EN LITRES/SECONDE

m ³ /h	l/s
1	0,277
2	0,555
3	0,833
4	1,111
5	1,388
6	1,666
7	1,944
8	2,222
9	2,500
10	2,777
11	3,050
12	3,33
13	3,61
14	3,88
15	4,16
16	4,44
17	4,72
18	5,00
19	5,27
20	5,55
21	5,83
22	6,11
23	6,38
24	6,66
25	6,94
26	7,22
27	7,50
28	7,77
29	8,05
30	8,33
31	8,61
32	8,88
33	9,16
34	9,44
35	9,72
36	10,00
37	10,27
38	10,55
39	10,83
40	11,11

m ³ /h	l/s
41	11,38
42	11,66
43	11,94
44	12,21
45	12,50
46	12,77
47	13,05
48	13,33
49	13,61
50	13,88
51	14,16
52	14,44
53	14,72
54	15,00
55	15,27
56	15,55
57	15,83
58	16,11
59	16,38
60	16,66
61	16,94
62	17,21
63	17,50
64	17,77
65	18,05
66	18,33
67	18,61
68	18,88
69	19,16
70	19,44
71	19,72
72	20,00
73	20,27
74	20,55
75	20,83
76	21,11
77	21,38
78	21,66
79	21,94
80	22,22

m ³ /h	l/s
81	22,50
82	22,77
83	23,05
84	23,33
85	23,61
86	23,88
87	24,16
88	24,44
89	24,72
90	25,00
91	25,27
92	25,55
93	25,83
94	26,11
95	26,38
96	26,66
97	26,94
98	27,21
99	27,50
100	27,77
101	28,05
102	28,33
103	28,61
104	28,88
105	29,16
106	29,44
107	29,72
108	30,00
109	30,27
110	30,55
111	30,83
112	31,11
113	31,38
114	31,66
115	31,94
116	32,21
117	32,50
118	32,77
119	33,05
120	33,33

m ³ /h	l/s
121	33,61
122	33,88
123	34,16
124	34,44
125	34,72
126	35,00
127	35,27
128	35,55
129	35,83
130	36,11
131	36,38
132	36,66
133	36,94
134	37,21
135	37,50
136	37,77
137	38,05
138	38,33
139	38,61
140	38,88
141	39,16
142	39,44
143	39,72
144	40,00
145	40,27
146	40,55
147	40,83
148	41,11
149	41,38
150	41,66
151	41,94
152	42,22
153	42,50
154	42,77
155	43,05
156	43,33
157	43,61
158	43,88
159	43,16
160	44,44

4.5 - TABLEAUX DE CONVERSION DES METRES CUBES/HEURE EN LITRES/SECONDE

(suite)

m^3/h	l/s	m^3/h	l/s	m^3/h	l/s	m^3/h	l/s
161	44,72	201	55,83	250	69,44	650	180,55
162	45,00	202	56,11	260	72,11	660	183,33
163	45,27	203	56,38	270	75,00	670	186,11
164	45,55	204	56,66	280	77,77	680	188,88
165	45,83	205	56,94	290	80,55	690	191,66
166	46,11	206	57,22	300	83,33	700	194,44
167	46,38	207	57,50	310	86,11	710	197,22
168	46,66	208	57,77	320	88,88	720	200,00
169	46,94	209	58,05	330	91,66	730	202,77
170	47,22	210	58,33	340	94,44	740	205,55
171	47,50	211	58,61	350	97,22	750	208,33
172	47,77	212	58,88	360	100,00	760	211,11
173	48,05	213	59,16	370	102,77	770	213,88
174	48,33	214	59,44	380	105,55	780	216,66
175	48,61	215	59,72	390	108,33	790	219,44
176	48,88	216	60,00	400	111,11	800	222,22
177	49,16	217	60,27	410	113,88	810	225,00
178	49,44	218	60,55	420	116,66	820	227,77
179	49,72	219	60,83	430	119,44	830	230,55
180	50,00	220	61,11	440	122,11	840	233,33
181	50,27	221	61,38	450	125,00	850	236,11
182	50,55	222	61,66	460	127,77	860	238,88
183	50,83	223	61,94	470	130,55	870	241,66
184	51,11	224	62,21	480	133,33	880	244,44
185	51,38	225	62,50	490	136,11	890	247,22
186	51,66	226	62,77	500	138,88	900	250,00
187	51,94	227	63,05	510	141,66	910	252,77
188	52,21	228	63,33	520	144,44	920	255,55
189	52,50	229	63,61	530	147,22	930	258,33
190	52,77	230	63,88	540	150,00	940	261,11
191	53,05	231	64,16	550	152,77	950	263,88
192	53,33	232	64,44	560	155,55	960	266,66
193	53,61	233	64,72	570	158,33	970	269,44
194	53,88	234	65,00	580	161,11	980	272,11
195	54,16	235	65,27	590	163,88	990	275,00
196	54,44	236	65,55	600	166,66	1000	277,77
197	54,72	237	65,83	610	169,44	1010	280,54
198	55,00	238	66,11	620	172,22	1020	283,31
199	55,27	239	66,38	630	175,00	1030	286,18
200	55,55	240	66,66	640	177,77	1040	288,95

- A N N E X E 5 -

CALCUL DU DEBIT PAR SYSTEME DEPRIMOGENE (°)

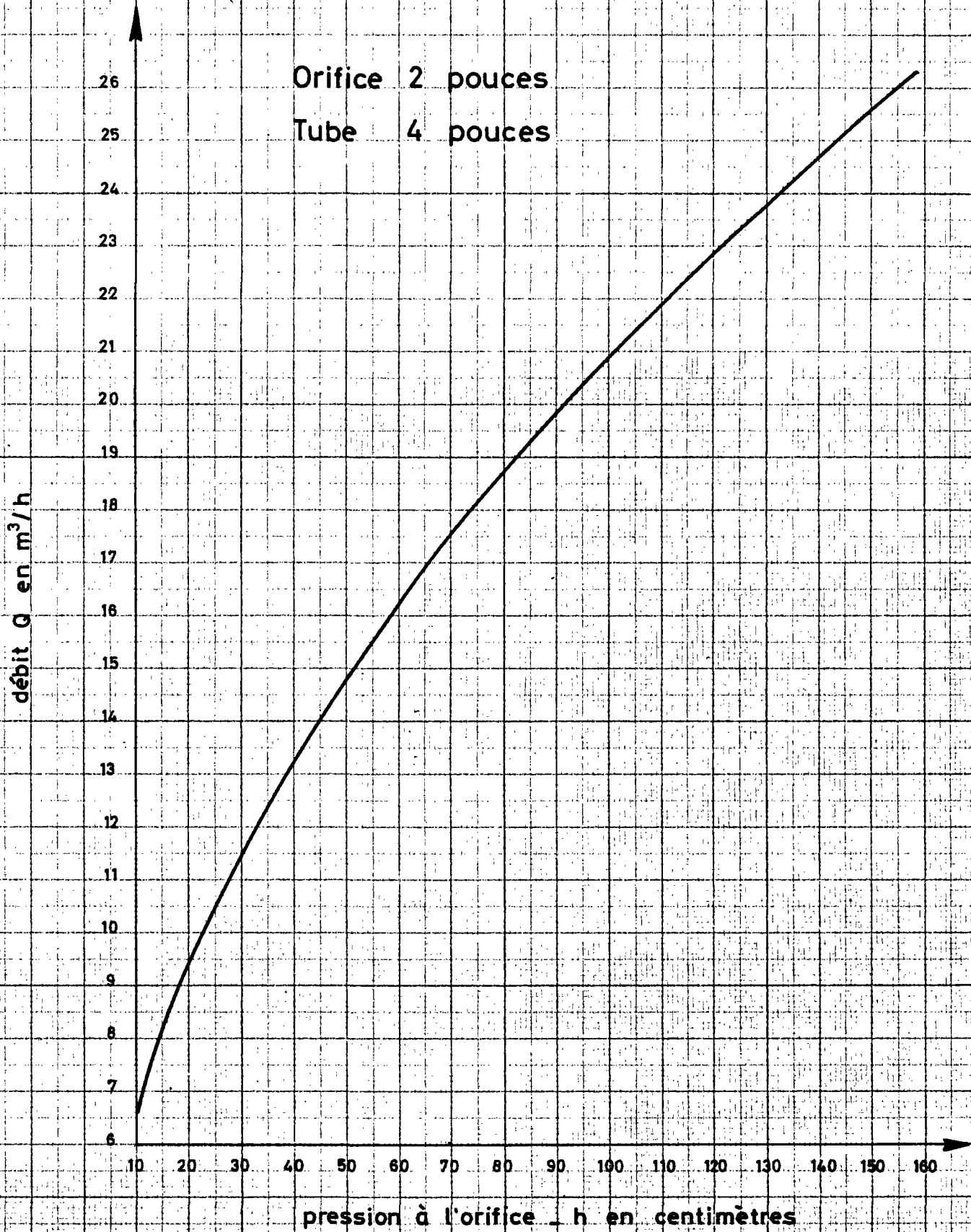
("TUBE DE PITOT")

TABLEAUX ET COURBES DU DEBIT Q EN m³/h EN
FONCTION DE LA HAUTEUR h EN cm LUE AU MANOMETRE

(°) Des tableaux et des courbes complémentaires font l'objet du rapport B.R.G.M.
n° 69 SGL 259 AQI "Mesure et calcul du débit par système déprimogène".

Orifice 2 pouces Tube 4 pouces

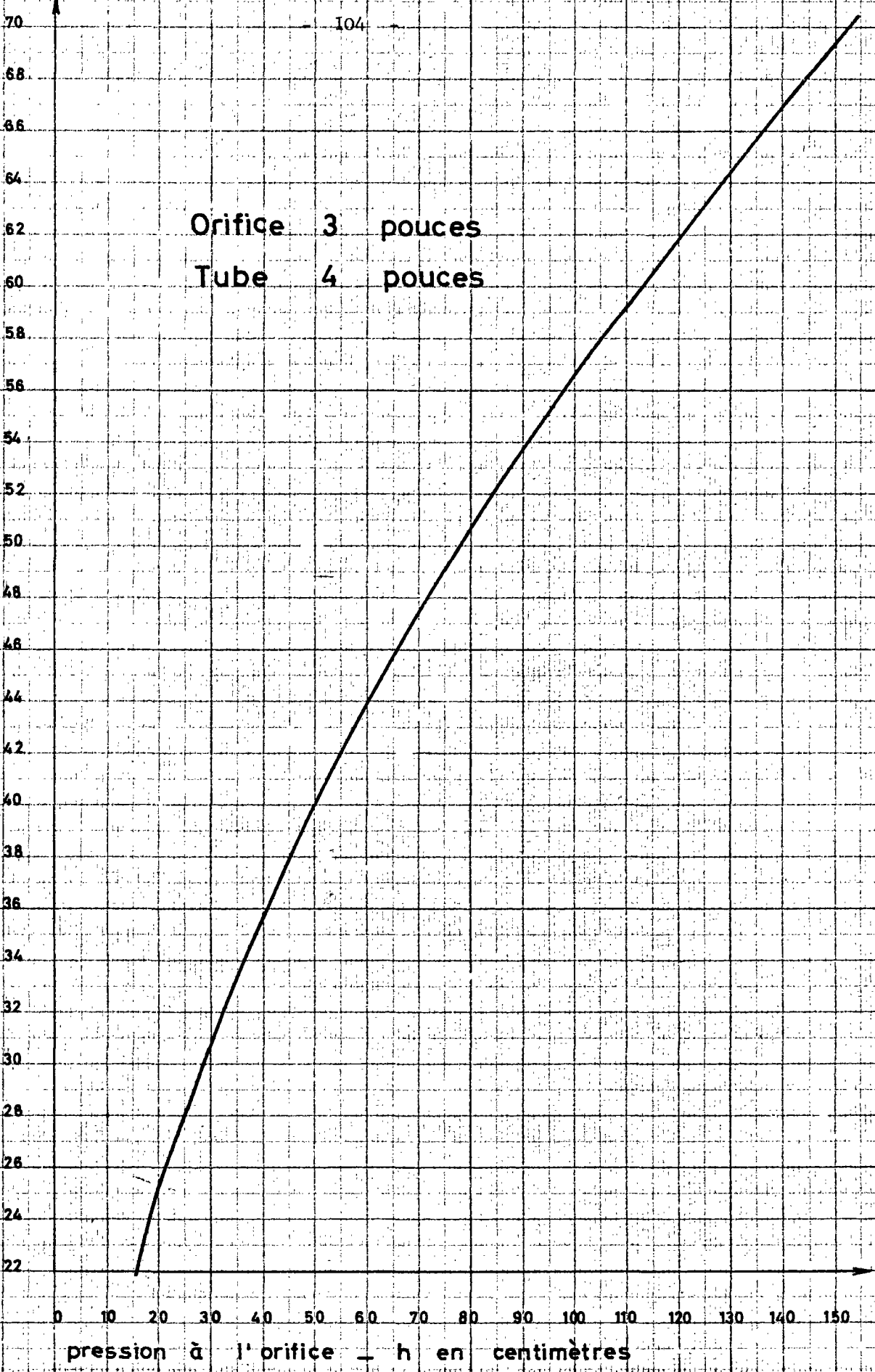
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	6,610	6,932	7,241	7,537	7,821	8,096	8,361	8,619	8,868	9,111
20	9,348	9,579	9,804	10,025	10,240	10,451	10,658	10,862	11,061	11,278
30	11,449	11,638	11,825	12,008	12,189	12,366	12,542	12,715	12,885	13,054
40	13,220	13,384	13,547	13,707	13,865	14,022	14,177	14,330	14,482	14,632
50	14,781	14,928	15,073	15,218	15,361	15,502	15,642	15,781	15,919	16,056
60	16,191	16,326	16,459	16,591	16,722	16,853	16,982	17,110	17,237	17,363
70	17,489	17,613	17,737	17,860	17,981	18,103	18,223	18,342	18,461	18,579
80	18,696	18,813	18,929	19,044	19,158	19,272	19,385	19,497	19,608	19,720
90	19,830	19,940	20,050	20,158	20,266	20,374	20,481	20,587	20,693	20,798
100	20,903	21,007	21,111	21,214	21,317	21,419	21,521	21,622	21,723	21,823
110	21,923	22,023	22,122	22,220	22,318	22,416	22,513	22,610	22,707	22,803
120	22,898	22,993	23,088	23,183	23,277	23,370	23,464	23,556	23,649	23,741
130	23,833	23,925	24,016	24,107	24,197	24,287	24,377	24,466	24,555	24,644
140	24,733	24,821	24,909	24,996	25,084	25,171	25,257	25,344	25,430	25,516
150	25,601	25,686	25,771	25,856	25,940	26,024	26,108	26,192	26,275	26,358



Orifice 3 pouces Tube 4 pouces

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	17,90	18,77	19,61	20,41	21,18	21,97	22,64	23,34	24,02	24,68
20	25,31	25,94	26,55	27,15	27,73	28,31	28,87	29,42	29,96	30,49
30	31,00	31,52	32,02	32,52	33,01	33,49	33,97	34,44	34,90	35,35
40	35,80	36,24	36,69	37,12	37,55	37,98	38,40	38,81	39,22	39,63
50	40,03	40,40	40,82	41,21	41,60	41,99	42,37	42,74	43,12	43,48
60	43,85	44,22	44,58	44,94	45,29	45,64	45,99	46,34	46,68	47,03
70	47,37	47,70	48,04	48,37	48,70	49,03	49,35	49,68	50,00	50,32
80	50,64	50,95	51,27	51,58	51,89	52,19	52,50	52,80	53,11	53,40
90	53,71	54,01	54,30	54,60	54,89	55,18	55,47	55,76	56,04	56,33
100	56,61	56,89	57,17	57,45	57,73	58,01	58,28	58,56	58,83	59,10
110	59,14	59,64	59,91	60,18	60,45	60,71	60,97	61,23	61,49	61,75
120	62,01	62,27	62,53	62,79	63,04	63,29	63,55	63,80	64,05	64,30
130	64,54	64,79	65,04	65,25	65,53	65,78	66,02	66,26	66,50	66,74
140	66,98	67,22	67,46	67,70	67,94	68,17	68,41	68,64	68,87	69,10
150	69,33	69,57	69,80	70,02	70,25	70,48	70,71	70,94	71,16	71,38

Débit Q en m^3/h



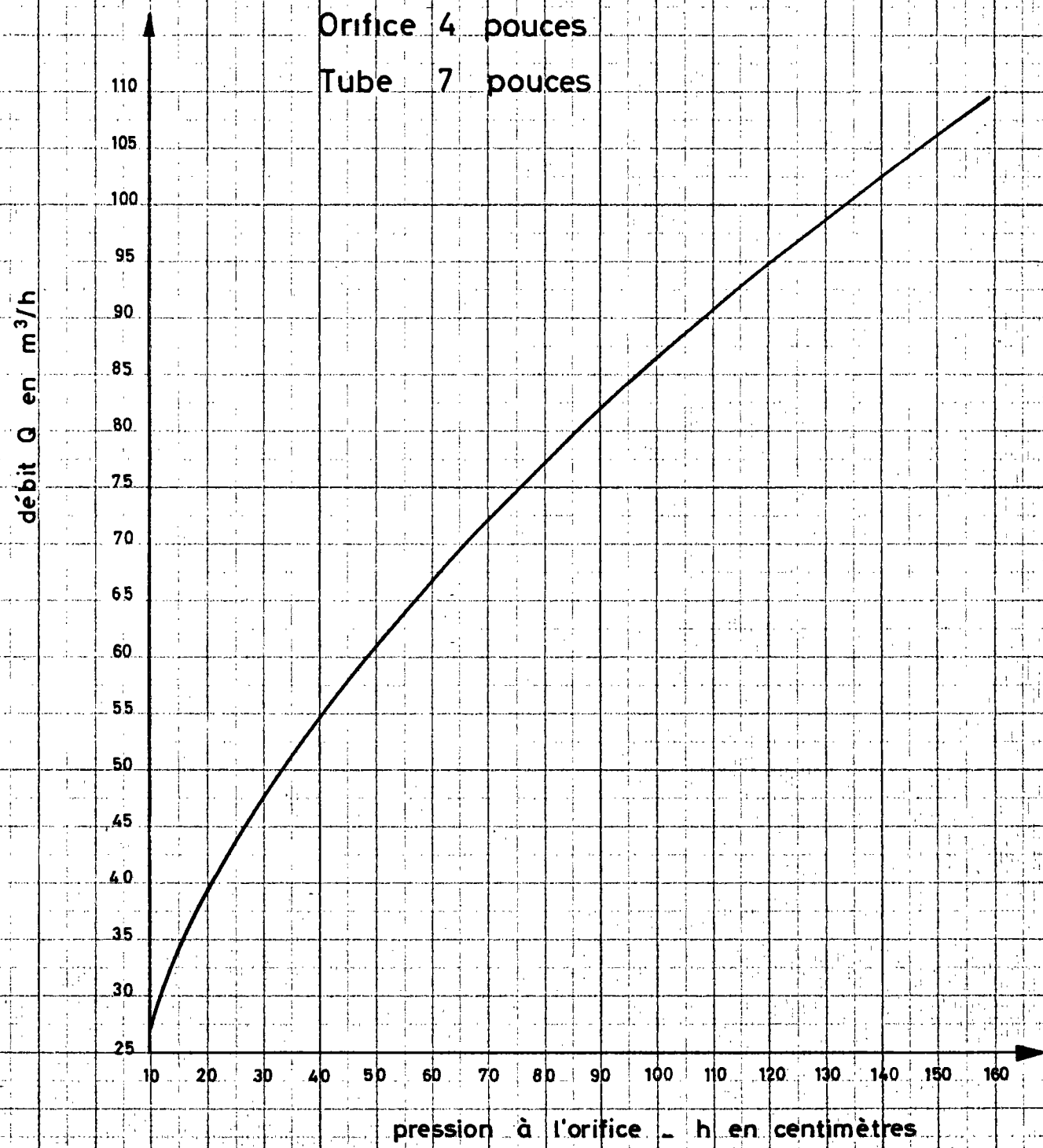
Orifice 3 pouces
Tube 4 pouces

104

pression à l'orifice - h en centimètres

Orifice 4 pouces Tube 7 pouces

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	27,42	28,76	30,04	31,26	32,44	33,58	34,68	35,75	36,79	37,80
20	38,78	39,73	40,67	41,58	42,48	43,35	44,22	45,06	45,88	46,69
30	47,49	48,28	49,05	49,81	50,56	51,30	52,02	52,74	53,45	54,15
40	54,84	55,52	56,19	56,86	57,52	58,17	58,81	59,44	60,07	60,70
50	61,31	61,92	62,53	63,12	63,72	64,30	64,89	65,48	66,04	66,60
60	67,16	67,72	68,27	68,82	69,37	69,71	70,44	70,97	71,50	72,03
70	72,55	73,06	73,58	74,08	74,59	75,09	75,59	76,09	76,58	77,07
80	77,56	78,06	78,52	79,00	79,47	79,94	80,41	80,88	81,34	81,80
90	82,26	82,72	83,17	83,62	84,07	84,51	84,96	85,40	85,84	86,27
100	86,71	87,14	87,57	88,00	88,43	88,85	89,27	89,69	90,11	90,53
110	90,94	91,35	91,76	92,17	92,58	92,98	93,39	93,79	94,19	94,59
120	94,99	95,38	95,77	96,16	96,55	96,94	97,33	97,72	98,10	98,48
130	98,86	99,24	99,27	100,00	100,37	100,75	101,20	101,49	101,86	102,23
140	102,60	102,96	103,33	103,69	104,05	104,41	104,77	105,13	105,49	105,84
150	106,20	106,55	106,90	107,25	107,60	107,95	108,30	108,65	108,99	109,34

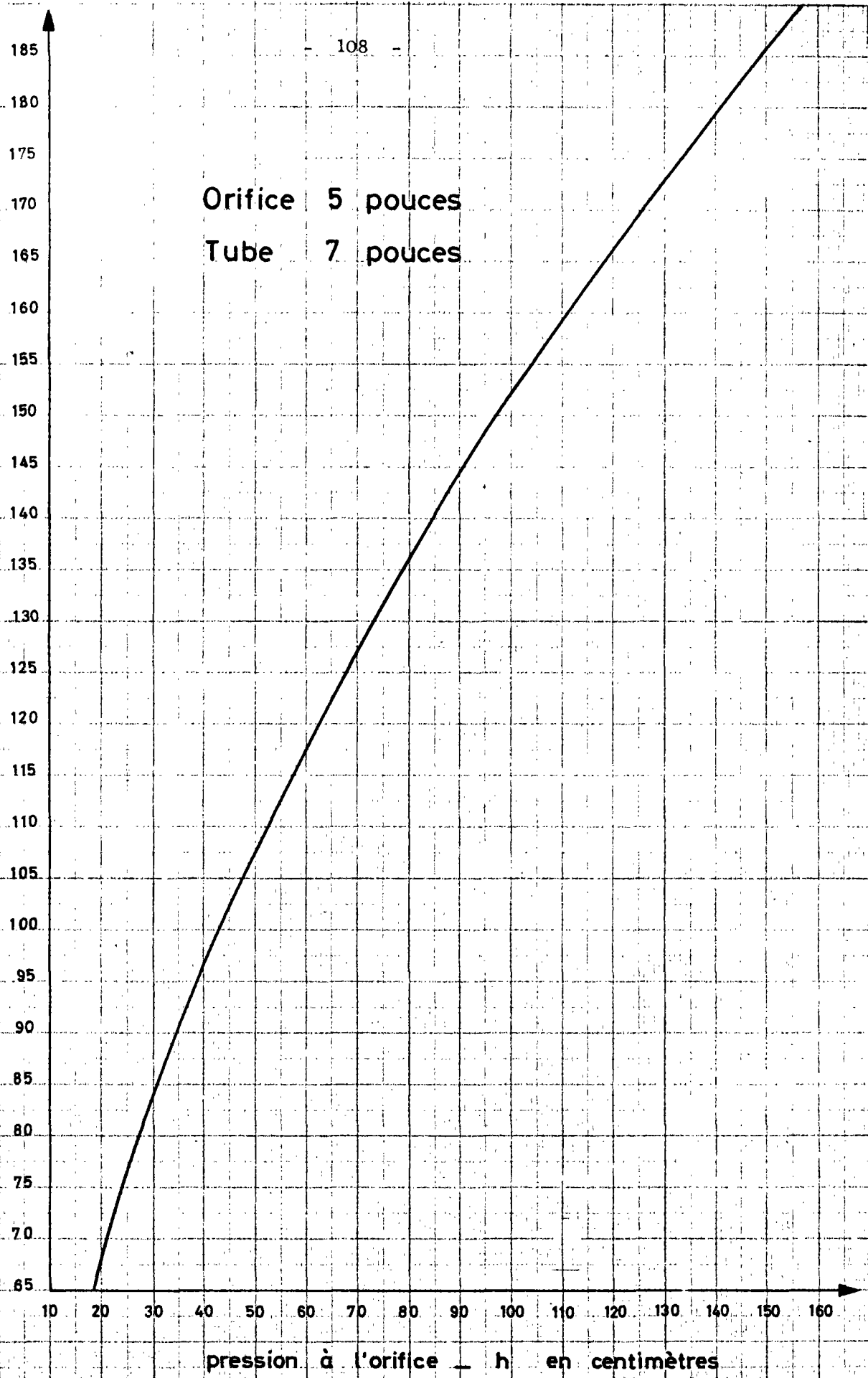


Orifice 5 pouces Tube 7 pouces

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	47,94	50,28	52,52	54,66	56,73	58,72	60,64	62,51	64,23	66,09
20	67,80	69,48	71,11	72,71	74,27	75,81	77,31	78,78	80,23	81,65
30	83,04	84,41	85,77	87,09	88,40	89,69	90,97	92,22	93,46	94,68
40	95,89	97,08	98,26	99,42	100,57	101,70	102,83	103,94	105,04	106,13
50	107,21	108,27	109,33	110,37	111,41	112,44	113,46	114,46	115,46	116,45
60	117,44	118,41	119,38	120,34	121,29	122,23	123,17	124,10	125,02	125,94
70	126,85	127,75	128,65	129,54	130,42	131,30	132,17	133,04	133,90	134,76
80	135,61	136,45	137,29	138,12	138,96	139,78	140,60	141,41	142,24	143,03
90	143,83	144,63	145,42	146,21	146,99	147,77	148,55	149,32	150,09	150,85
100	151,61	152,37	153,12	153,87	154,61	155,36	156,09	156,83	157,56	158,29
110	159,01	159,73	160,45	161,17	161,88	162,59	163,29	163,99	164,69	165,39
120	166,08	166,77	167,46	168,15	168,83	169,51	170,18	170,86	171,53	172,20
130	172,87	173,53	174,19	174,85	175,50	176,16	176,81	177,46	178,10	178,75
140	179,39	180,03	180,67	181,30	181,93	182,57	183,19	183,82	184,44	185,07
150	185,69	186,30	186,92	187,53	188,15	188,76	189,36	189,97	190,57	191,18

Orifice 5 pouces
Tube 7 pouces

debit Q en m³/h



pression à l'orifice — h — en centimètres

Orifice 6 pouces Tube 8 pouces

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	71,61	75,10	78,44	81,65	84,73	87,70	90,58	93,37	96,07	98,71
20	101,27	103,77	106,21	108,60	110,94	113,23	115,47	117,67	119,83	121,95
30	124,03	126,08	128,10	130,09	132,04	133,97	135,87	137,75	139,59	141,42
40	143,22	145,--	146,76	148,49	150,21	151,91	153,59	155,25	156,89	158,52
50	160,13	161,72	163,30	164,86	166,41	167,94	169,46	170,97	172,46	173,94
60	175,41	176,86	178,31	179,74	181,16	182,57	183,97	185,36	186,74	188,10
70	189,46	190,81	192,15	193,48	194,80	196,11	197,42	198,71	200,00	201,27
80	202,54	203,81	205,06	206,31	207,55	208,78	210,00	211,22	212,43	213,64
90	214,83	216,02	217,20	218,38	219,55	220,72	221,88	223,03	224,17	225,32
100	226,45	227,58	228,70	229,82	230,93	232,04	233,14	234,24	235,33	236,42
110	237,50	238,58	239,65	240,72	241,78	242,84	243,89	244,94	245,99	247,03
120	248,07	249,10	250,12	251,15	252,16	253,18	254,19	255,20	256,20	257,20
130	258,19	259,18	260,17	261,16	262,13	263,11	264,08	265,05	266,02	266,98
140	267,94	268,89	269,85	270,80	271,74	272,68	273,62	274,56	275,49	276,42
150	277,34	278,27	279,19	280,10	281,02	281,93	282,84	283,74	284,64	285,54

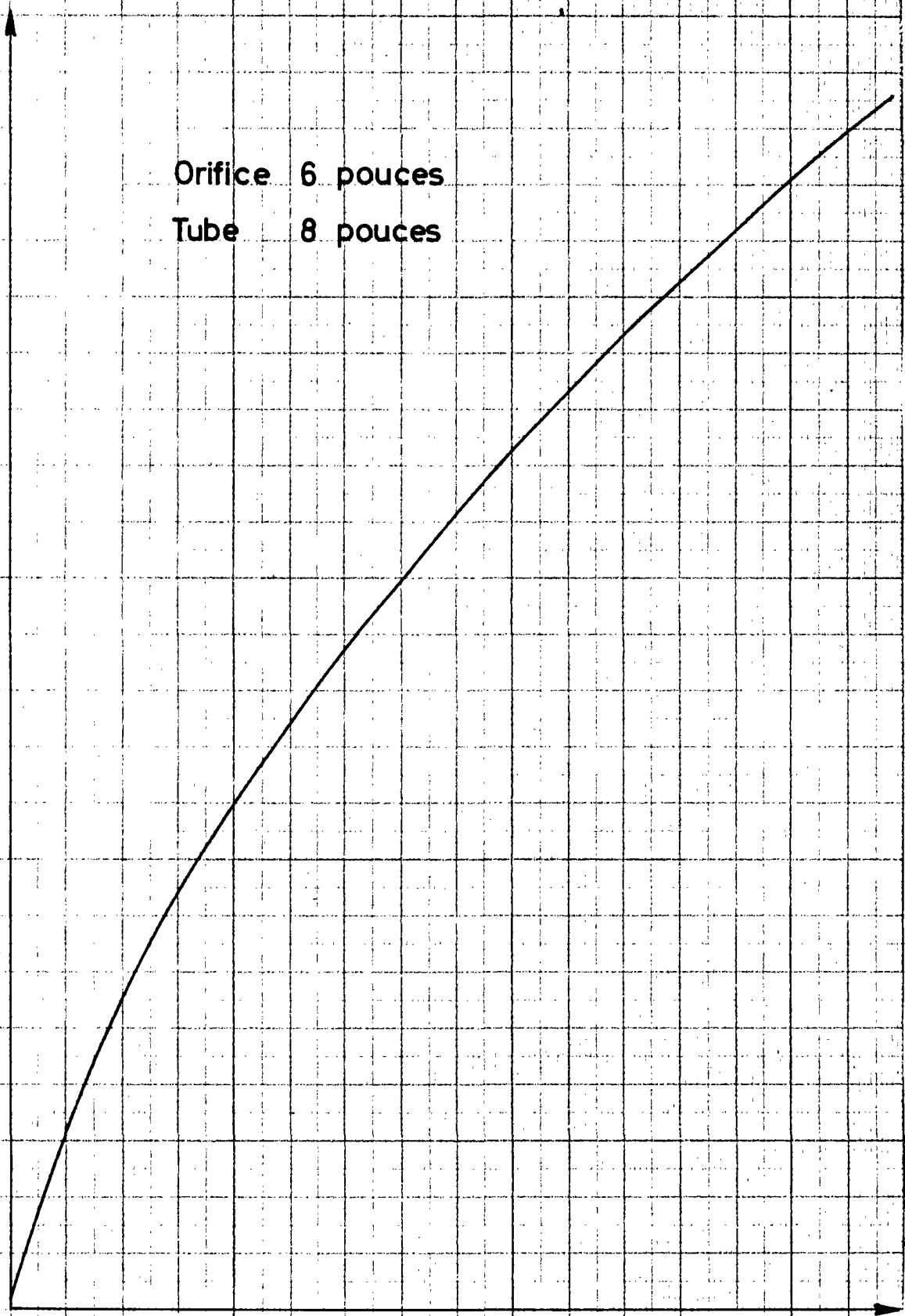
debit Q en m³/h

Orifice 6 pouces
Tube 8 pouces

290
280
270
260
250
240
230
220
210
200
190
180
170
160
150
140
130
120
110
100
90
80
70

10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160

pression à l'orifice - h en centimetres

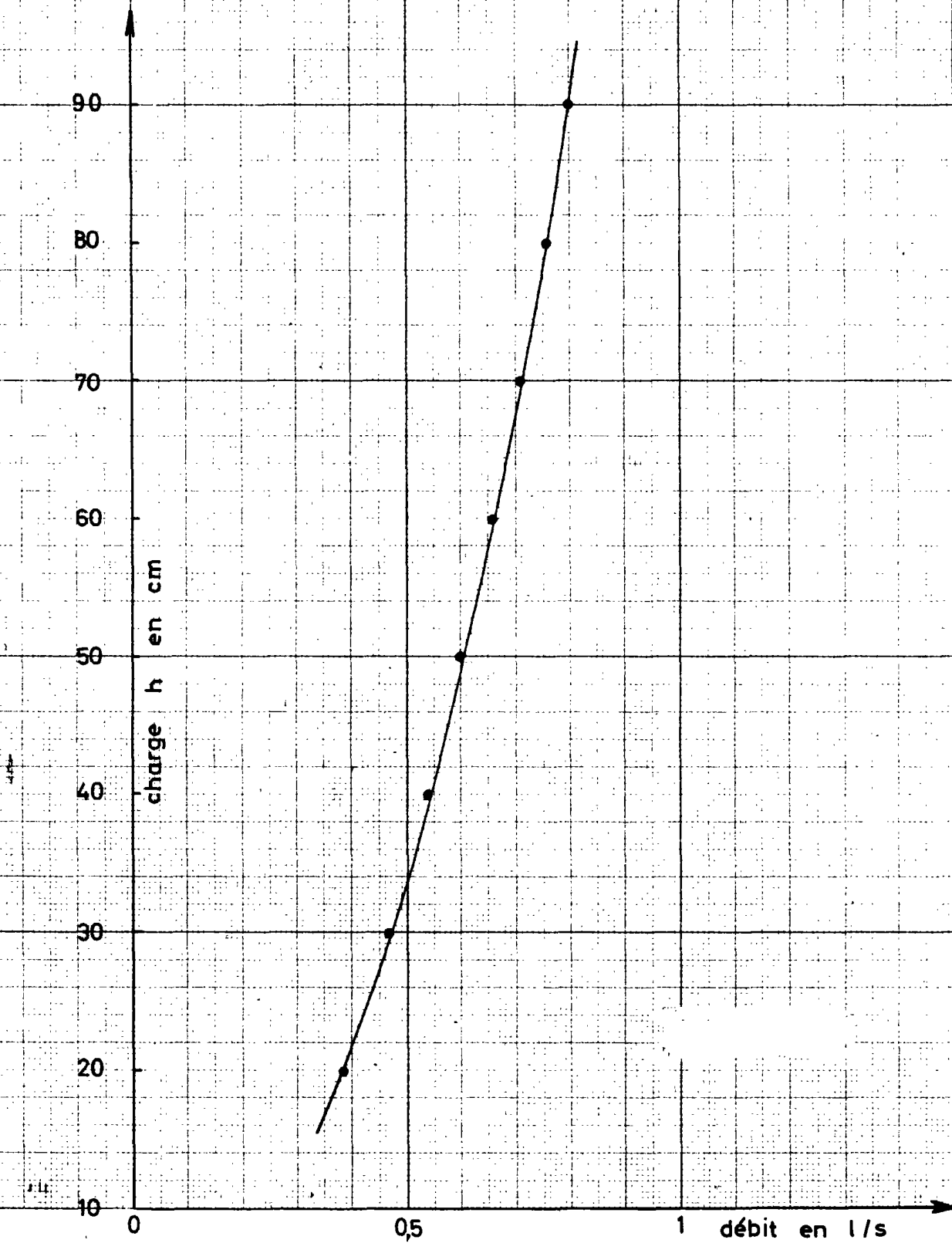


- A N N E X E 6 -

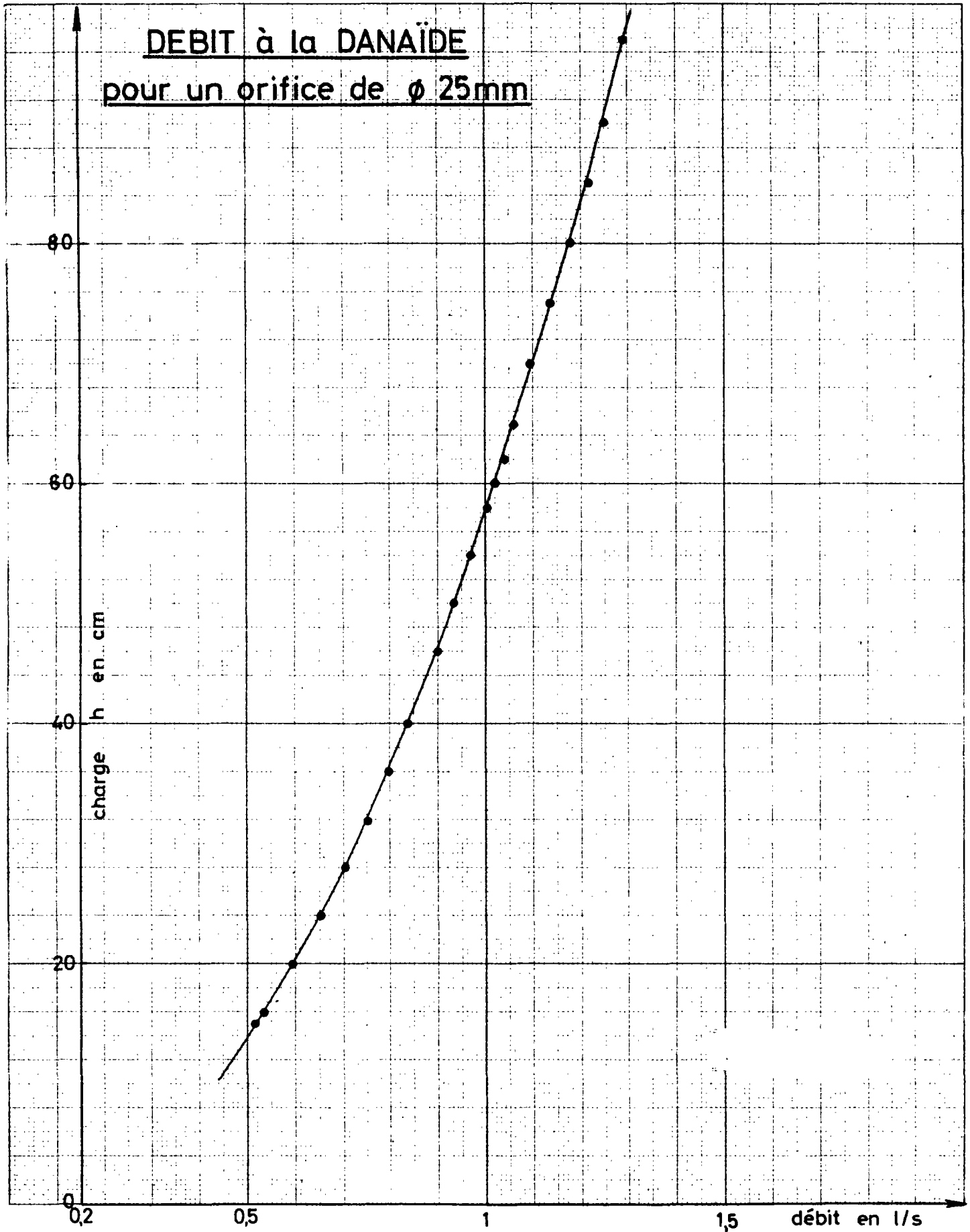
CALCUL DU DEBIT A LA DANAIDE

COURBES DE TRANSFORMATION DES HAUTEURS h
LUES AU MANOMETRE, EN VALEURS Q DU DEBIT

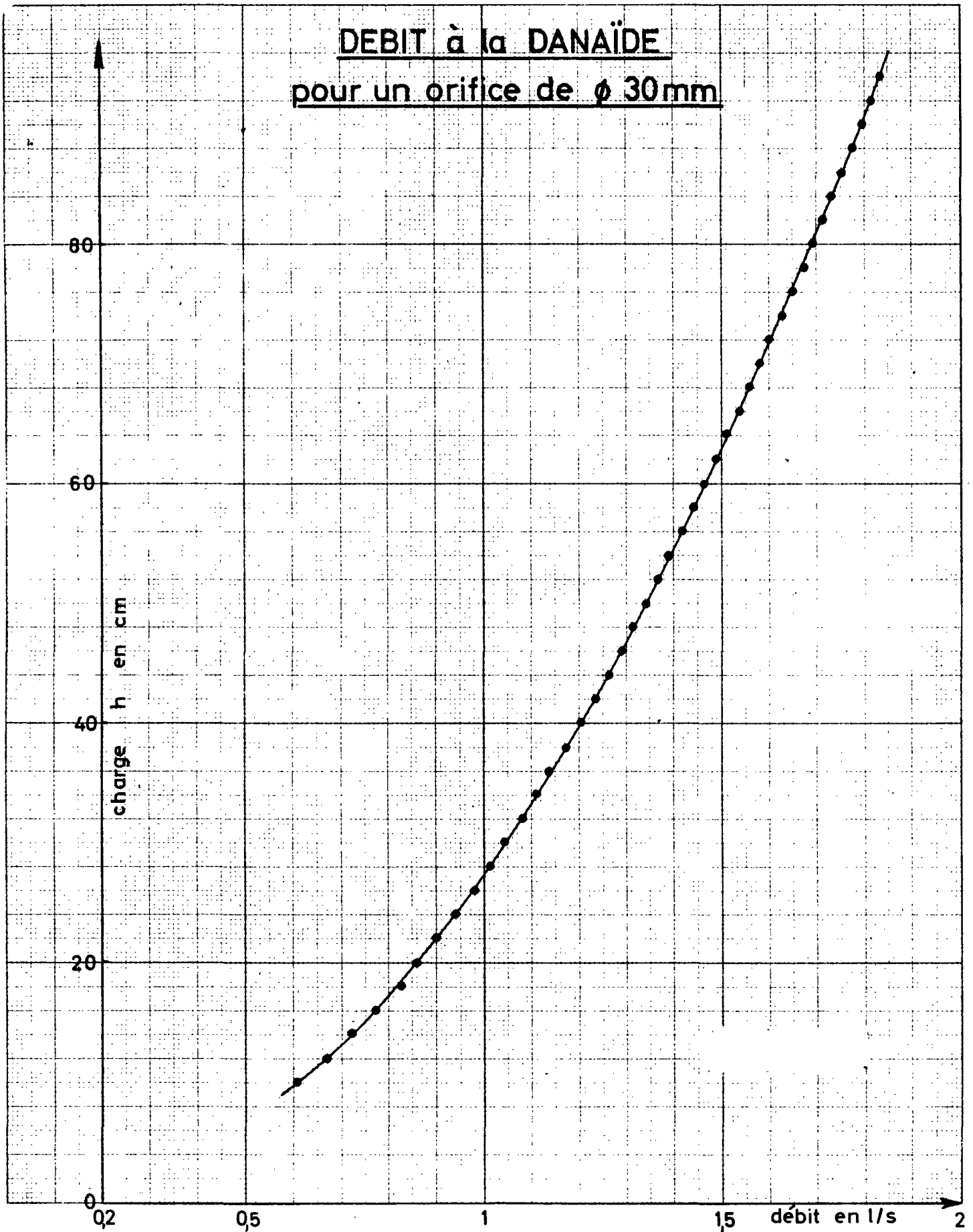
DEBIT à la DANAÏDE
pour un orifice de ϕ 20mm



DEBIT à la DANAÏDE
pour un orifice de ϕ 25mm



DEBIT à la DANAÏDE
pour un orifice de ϕ 30mm

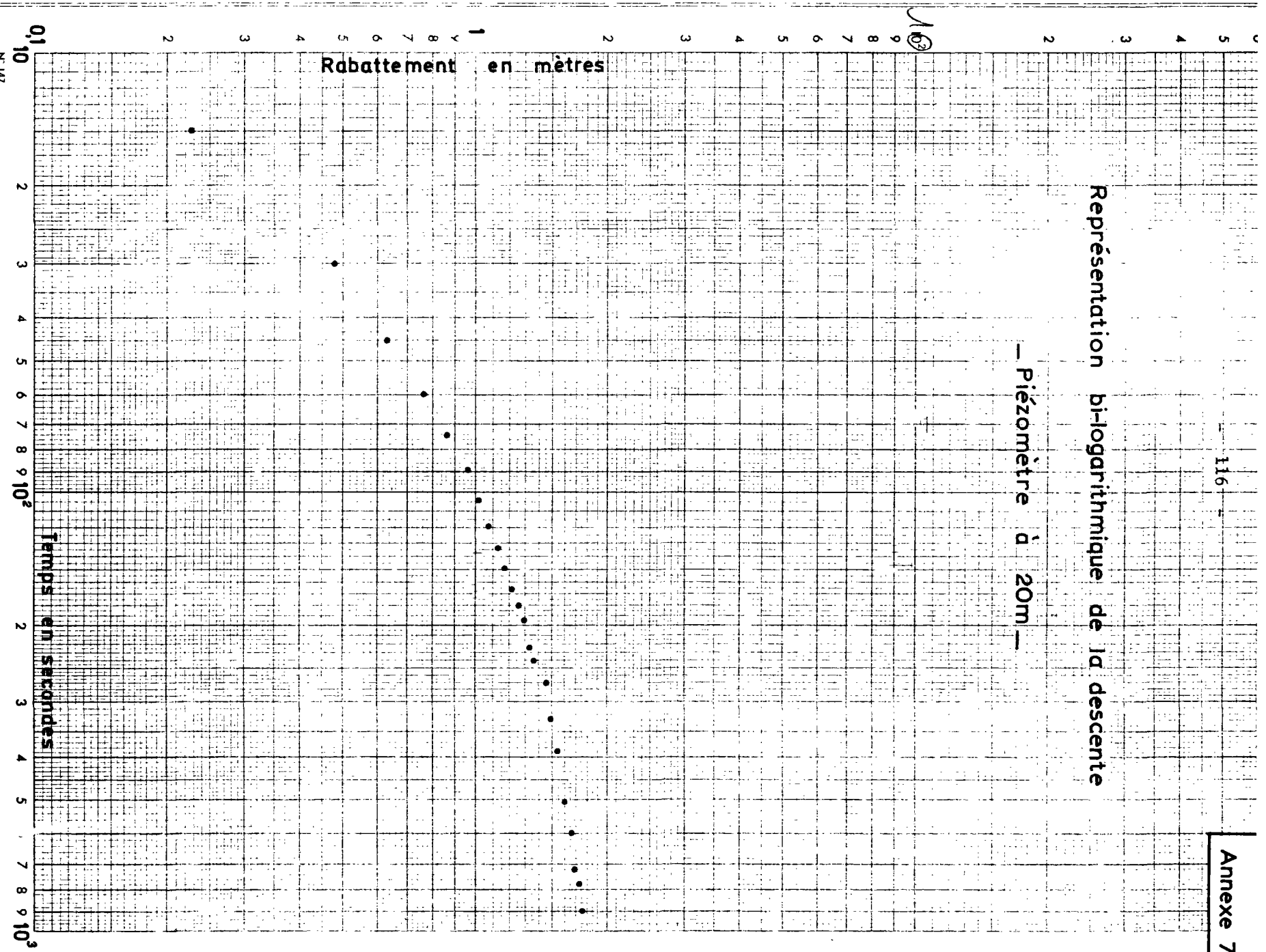


- A N N E X E 7 -

- 7.1 - Représentation bilogarithmique de la descente (piézomètre à 20 m)
- 7.2 - Détermination par superposition des valeurs $1/u$ et $W(u)$
- 7.3 - Représentation semi-logarithmique de la descente (piézomètre à 20 m)
- 7.4 - Représentation semi-logarithmique de la remontée (piézomètre à 20 m)

Représentation bi-logarithmique de 1d descente

— Piézomètre à 20m —



N° 147

Δ en m.

