

**MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DE LA RECHERCHE**

**BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES**

**SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL**

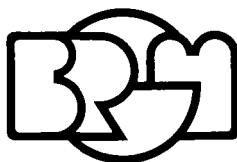
**B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01**

Document public

# **LES MOYENS D'EXHAURE POUR PUITS ET FORAGES D'EAU**

par

**B. HÉNOU**



**Département EAU**

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

Rapport du B.R.G.M.

**83 SGN 468 EAU**

Juin 1983

## R É S U M É

Ce rapport se veut être une synthèse destinée à apporter aux techniciens géologues et hydrogéologues, ayant à aborder le problème des moyens d'exhaure pour puits et forages d'eau et amenés à émettre un avis sur le choix d'une pompe, un complément de connaissance d'ordre général sur l'ensemble du matériel actuellement disponible.

Ils auront ainsi à leur disposition les notions de base qui leur permettront de s'orienter vers la solution la meilleure et de les guider dans la recherche des données techniques de chaque appareillage (qui ne peuvent figurer dans ce document) auprès des fabricants ou dans les revues spécialisées.

## S O M M A I R E

	pages
<u>1. CLASSIFICATION ET DESCRIPTION DES POMPES</u>	2
<u>1.1. DEFINITION D'UNE POMPE HYDRAULIQUE</u>	2
<u>1.2. MODE DE CLASSEMENT</u>	2
<u>1.2.1. LES POMPES VOLUMETRIQUES</u>	2
- Définition générale	
- Définition AFNOR	
<u>1.2.1.1. Les pompes traditionnelles</u>	3
. Treuil à seau	
. Pompes à godets	
. Pompes à chapelets hydrauliques	
. Pompes à bande élévatrice	
<u>1.2.1.2. Les pompes alternatives</u>	5
- Définition	
- Corps de pompes en surface	
- Exemples de pompes à main	
. Pompes à balancier à simple effet	
. Pompes à cylindre horizontal à double effet	
. Pompes semi-rotatives à double effet	
- Corps de pompe immergé	
. Pompes à piston	
. Pompes à diaphragme	
<u>1.2.1.3. Les pompes rotatives</u>	11
- Définition	
- Corps de pompe immergé	
- Corps de pompe en surface	
. Pompes à vis	
. Pompes à engrenages	
. Pompes à palette	
. Pompes à plateau excentrique	

	pages
1.2.2. <u>LES POMPES ROTODYNAMIQUES</u>	12
1.2.2.1. <u>Définition</u>	12
1.2.2.2. <u>Principe des pompes centrifuges</u>	12
1.2.2.3. <u>Pompes à hélice</u>	14
1.2.2.4. <u>Pompes centrifuge et héliocentrifuge</u>	14
- Pompes centrifuges à axe horizontal	
. <i>Pompes centrifuges à corps en volute</i>	
. <i>Pompes centrifuges à turbines et diffuseurs</i>	
. <i>Pompes centrifuges auto-amorçantes</i>	
. <i>Pompes centrifuges à flux mixte</i>	
- Pompes centrifuges à axe vertical	
. <i>Pompes centrifuges axe vertical, moteur en surface</i>	
. <i>Pompes centrifuges immergées ou groupe électro-pompe</i>	
- Limites normales d'utilisation	
1.2.2.5. <u>Choix des pompes rotodynamiques en fonction des conditions d'utilisation</u>	21
. <i>Pompes à axe horizontal ou à axe vertical</i>	
. <i>Corps de pompe en surface ou immergé</i>	
. <i>Pompes centrifuges monocellulaire et pluri-cellulaires</i>	
1.2.2.6. <u>Indications à fournir aux constructeurs de pompes</u>	23
1.2.3. <u>LES AUTRES TYPES DE POMPES</u>	26
1.2.3.1. <u>Pompes à jet ou éjecteurs</u>	26
1.2.3.2. <u>Les émulseurs ou pompage à air lift</u>	26
 2. <u>CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES POMPES</u>	 28
2.1. <u>HAUTEUR MANOMETRIQUE TOTALE</u>	28
2.1.1. <u>DEFINITION</u>	28
2.1.2. <u>PERTES DE CHARGE DANS LES CONDUITES</u>	28
2.1.3. <u>PERTES DE CHARGE DUES AUX ACCESSOIRES DE TUYAUTERIES</u>	28
2.2. <u>HAUTEUR D'ASPIRATION</u>	30

2.3. <u>COURBES CARACTERISTIQUES D'UNE POMPE</u>	31
2.3.1. <u>COURBE DEBIT-HAUTEUR</u>	31
2.3.2. <u>COURBE PUISSANCE</u>	34
2.3.3. <u>COURBE DE RENDEMENT</u>	34
2.3.4. <u>COURBE DE NPSH</u>	36
2.3.5. <u>POINT DE FONCTIONNEMENT D'UNE POMPE</u>	36
2.4. <u>VITESSE DE ROTATION DES POMPES CENTRIFUGES</u>	36
2.5. <u>PUISSANCE ABSORBEE PAR LES POMPES - PUISSANCES DES MOTEURS</u>	37
 3. <u>DIFFÉRENTES ÉNERGIES D'UTILISATION</u>	 39
3.1. <u>ENERGIE HUMAINE ET ANIMALE</u>	39
3.1.1. <u>ENERGIE HUMAINE</u>	39
3.1.2. <u>ENERGIE ANIMALE</u>	39
3.1.3. <u>AVANTAGE ET INCONVENIENT DE L'EXHAURE TRADITIONNELLE</u>	40
3.1.4. <u>IMPORTANCE DE LA POMPE A MAIN DANS L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE</u>	41
3.1.5. <u>CHOIX D'UNE POMPE A MOTRICITE HUMAINE</u>	41
3.1.5.1. <u>En fonction des conditions d'utilisation</u>	41
3.1.5.2. <u>En fonction des sujétions et maintenance</u>	44
3.2. <u>LES EOLIENNES</u>	45
3.2.1. <u>GENERALITES</u>	45
3.2.2. <u>NOTIONS THEORIQUES</u>	45
3.2.3. <u>EOLIENNES A AXE VERTICAL</u>	46
3.2.4. <u>EOLIENNES A AXE HORIZONTAL</u>	48
3.2.4.1. <u>Eoliennes multipale à vitesse lente</u>	48
3.2.4.2. <u>Eoliennes rapides ou aéromoteur</u>	50

3.3. <u>LES POMPES A ENERGIE SOLAIRE</u>	53
3.3.1. <u>GENERALITES</u>	53
3.3.2. <u>LA FILIERE THERMODYNAMIQUE</u>	53
3.3.3. <u>LA FILIERE PHOTOVOLTAIQUE</u>	55
3.3.3.1. <u>Principe</u>	55
3.3.3.2. <u>Avantages présentés</u>	57
3.4. <u>LES POMPES A MOTEURS ELECTRIQUES</u>	60
3.4.1. <u>CHOIX DU TYPE DE COURANT EN FONCTION DE LA PUISSANCE DES MOTEURS</u>	60
3.4.2. <u>LES DIFFERENTS TYPES DE MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS</u>	60
3.5. <u>LES POMPES A MOTEURS THERMIQUES</u>	62
3.5.1. <u>LES MOTEURS A ESSENCE</u>	62
3.5.2. <u>LES MOTEURS DIESEL</u>	62
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	64

## LISTE DES FIGURES

1. Treuil et seau (OMS).
2. Pompe à godets (OMS).
3. Pompe à chapelet (OMS).
4. Pompe à bande élévatrice (Ets CHAMPENOIS).
5. Pompes alternatives - aspirante élévatoire foulante.
6. Pompe à balancier simple effet (A. MABILLOT).
7. Pompe à cylindre horizontal - double effet (A. MABILLOT).
8. Pompe semi-rotative - double effet.
9. Pompe à piston immergée (OMS).
10. Pompe à diaphragme (doc. Ets VERGNET).
11. Pompe à rotor hélicoïdale (OMS).
12. Pompes à vis, à engrenages, à palettes, à plateau excentrique (AFNOR).
13. Variation de vitesse.
14. Relation entre le nombre d'étiage et les courbes débit-hauteur.
15. Pompes à hélices.
16. Pompes centrifuges et hélicocentrifuges.
17. Pompe centrifuge - corps en volute.
18. Pompes centrifuges à turbines et diffuseurs (A. MABILLOT).
19. Pompe centrifuge - axe vertical, moteur en surface.
20. Pompe centrifuge immergée (A. MABILLOT).
21. Indications à fournir pour le choix d'un type de pompe (Ets PLEUGER).
22. Pompe à éjecteurs.
23. Pompes à émulseurs.
24. Pertes de charge nomogramme (B. GENETIER).
25. Courbes caractéristiques d'une pompe (doc. pompes PEME).

26. Formes des courbes.
27. Places d'utilisation pour pompes de forages 4" et 6".
28. Courbes caractéristiques de pompes aspirantes, suivant la puissance du moteur choisi.
29. Caractéristiques de trois pompes à main françaises de conception différente.
30. Courbe de fréquence des vents et de vitesse-durée.
31. Energie totale disponible annuelle par mesure de surface, en fonction de la vitesse nominale.
32. Conditions d'emploi d'une éolienne.
33. Eolienne multipale à vitesse lente.
34. Aérogénérateur.
35. Carte d'ensoleillement du monde.
36. Angles à respecter pour éviter des ombres néfastes sur les panneaux solaires.
37. Filière thermodynamique (doc. SOFRETES).
38. Flux photovoltaïque (doc. GUINARD).
39. Performance d'un type de pompe photovoltaïque pour forage (doc.SOFRETES).



## I N T R O D U C T I O N

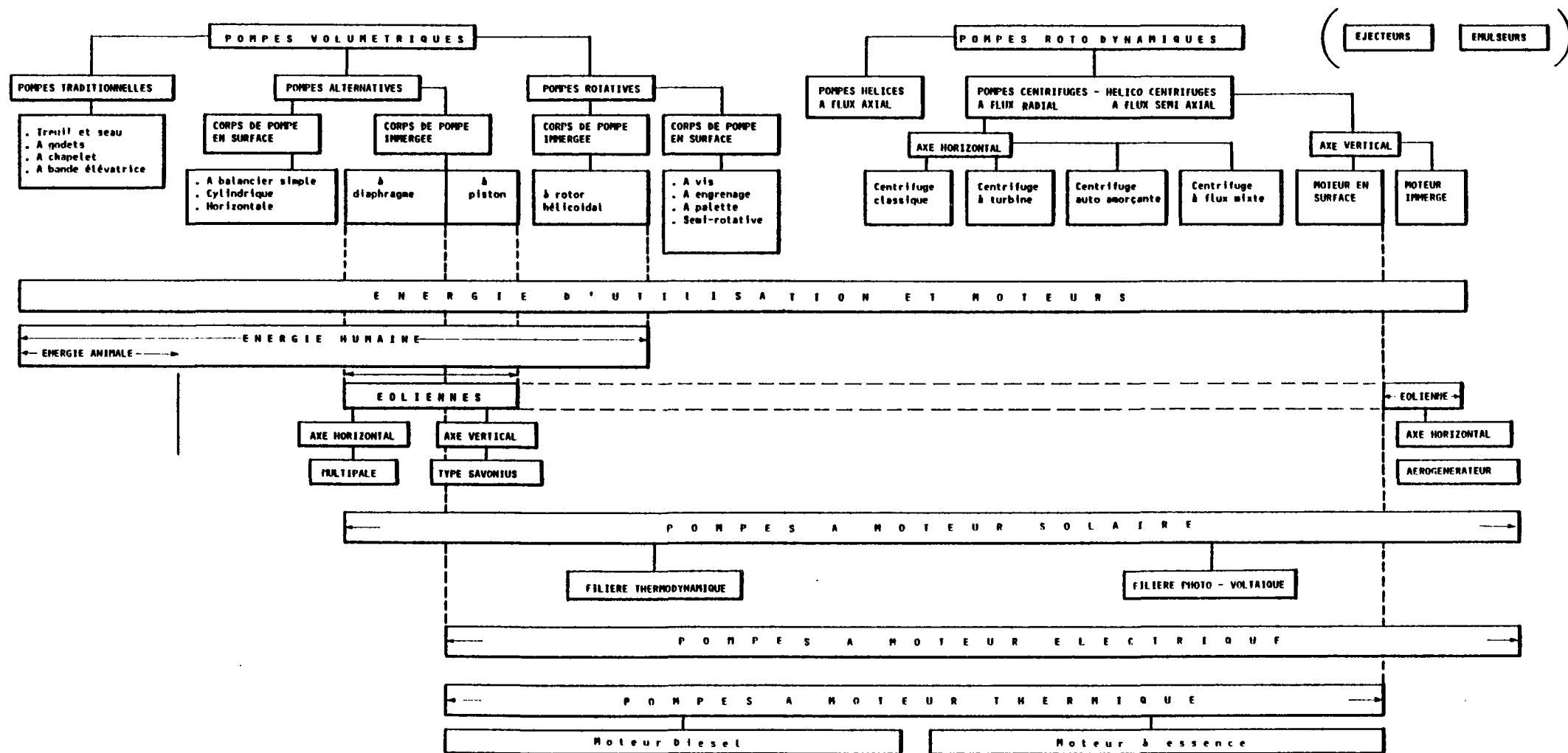
Ce rapport, destiné à pallier une lacune dans la documentation technique du BRGM en ce qui concerne les moyens d'exhaure et les énergies d'utilisation correspondantes, donne un aperçu général dans ce domaine. Il a été élaboré en s'appuyant plus particulièrement sur trois publications détaillant chacune une partie de l'ensemble des pompes, publications auxquelles ont été empruntés de nombreux passages.

Ces ouvrages sont les suivants :

- PNU/Environnement - OMS - Pompes à main destinées à l'approvisionnement en eau potable dans les pays en voie de développement .- Série des documents techniques 10, du Centre International de référence pour l'alimentation en eau collective, préparé par F.E. Mc JUNKIN, La Haye, Pays-Bas, octobre 1979.
- SOGREAH - MINISTERE DE LA COOPERATION .- Les pompes et les petites stations de pompages .- Collection Technique Rurales en Afrique, deuxième édition, novembre 1978, 216 p.
- A. MABILLLOT .- Le forage d'eau .- Guide pratique, Crépines Johnson, France, 80 Naintre, 1979, 237 p.

Le tableau synthétique ci-après résumant les différents types de pompe et les énergies et utilisations servira de guide lors de la consultation du présent rapport.

# LE MATERIEL D'EXHAIRE ET LES ENERGIES D'UTILISATION



## 1. CLASSIFICATION ET DESCRIPTION DES POMPES

### 1.1. DEFINITION D'UNE POMPE HYDRAULIQUE

Une pompe hydraulique est une machine destinée à accroître l'énergie d'un liquide en vue de provoquer son élévation de pression et son déplacement dans un circuit.

### 1.2. MODE DE CLASSEMENT

Il existe un très grand nombre de types de pompes. Ces différents types peuvent tous se rattacher, à quelques exceptions près, à deux grandes catégories suivant la technique utilisée et correspondant à la classification suivie par la norme AFNOR-E-44001. Ces deux catégories sont :

- *Les pompes volumétriques* dans lesquelles nous avons intégré les pompes traditionnelles à main dont l'importance est encore considérable dans l'approvisionnement en eau potable dans les pays en voie de développement.
- *Les pompes rotodynamiques* appelées encore turbo-pompes.

Il existe d'autres moyens d'exhaure dont l'utilisation est soit exceptionnelle : pompes à éjecteurs, soit occasionnelle pour essais en cours de forations par émulseurs ou air lift.

#### 1.2.1. LES POMPES VOLUMETRIQUES

##### - Définition générale

Les pompes volumétriques donnent un volume constant à n'importe quelle hauteur de refoulement.

##### - Définition AFNOR

Ce sont des pompes dans lesquelles l'accroissement d'énergie est obtenu dans des chambres dont le volume augmente (phase d'aspiration) puis diminue (phase de refoulement) de telle sorte que l'écoulement procède par volume engendré successif.

### 1.2.1.1. Les pompes traditionnelles

Ce type de pompes d'une technologie très simple est surtout adapté pour des puits et fonctionne manuellement ou par traction animale.

#### . Treuil et seau (fig. 1)

C'est le moyen d'exhaure le plus simple.

#### . Pompes à godets (fig. 2)

"De petits godets sont fixés à une chaîne sans fin tournant autour de deux pignons ; chaque godet puise l'eau du puits, la transporte jusqu'au sommet et la vide dans le dégorgeoir lorsqu'il passe au-dessus du pignon supérieur" (1).

#### . Pompes à chapelets hydrauliques (fig. 3)

"Dans le chapelet hydraulique, des disques de caoutchouc fixés à une chaîne sans fin passant sur un pignon sont poussés vers le haut à travers un tuyau pour faire monter l'eau mécaniquement jusqu'au dégorgeoir" (2).

#### . Pompes à bande élévatrice (fig. 4)

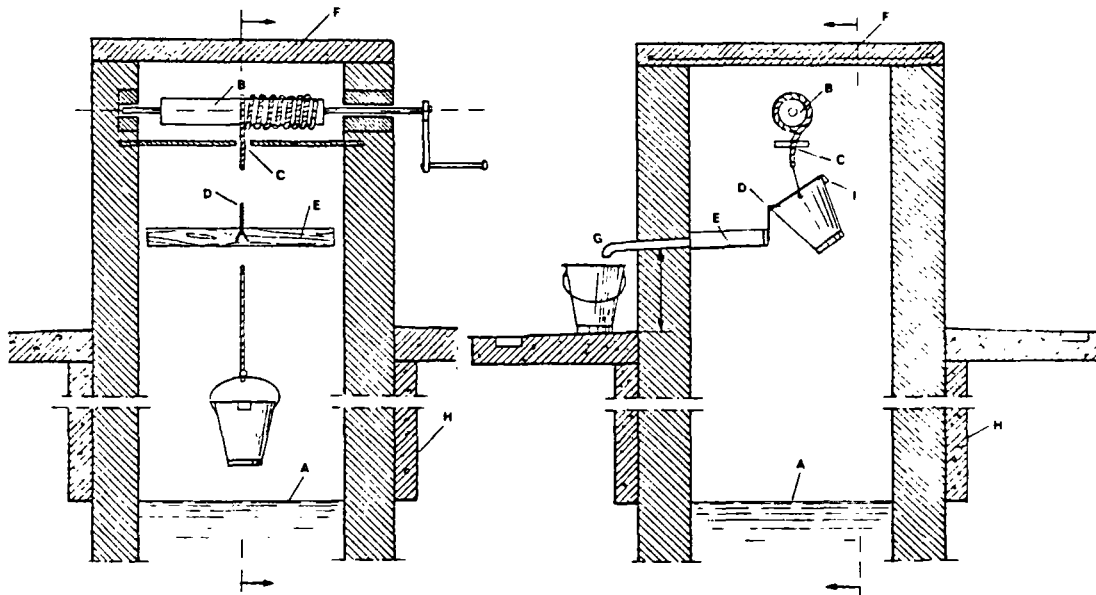
C'est une variante des systèmes évoqués précédemment. Un cas intéressant est la pompe "l'Africain" des établissements CHAMPENOIS. "Les godets sont remplacés par une ceinture faisant office d'éponge et se dégorge de l'eau par la pression exercée sur l'éponge par le pignon supérieur" (1).

"Les principes de fonctionnement énoncés dans les trois exemples précédents se retrouvent dans les dispositifs traditionnels d'irrigation, dans les pays en voie de développement, actionnés par des animaux, tels que la roue persane, la sakia, la noria, et d'autres encore dans lesquels les godets peuvent être remplacés par des récipients de terre cuite ou des boîtes de bois ou de métal et où le mouvement horizontal circulaire de l'animal peut être transformé par un engrenage en un mouvement rotatif vertical destiné à entraîner la chaîne" (2).

---

(1) Extrait de OMS, p. 39.

(2) Extrait de OMS, p. 40.

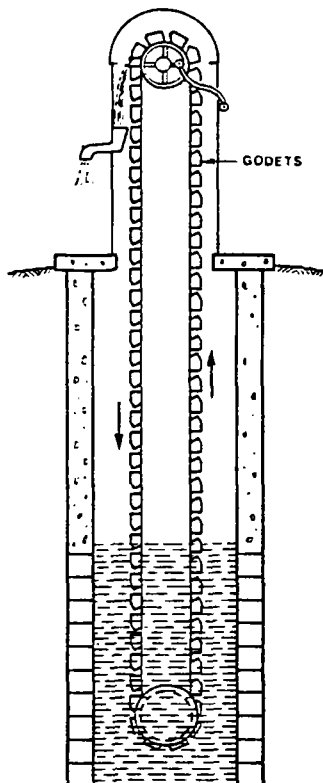
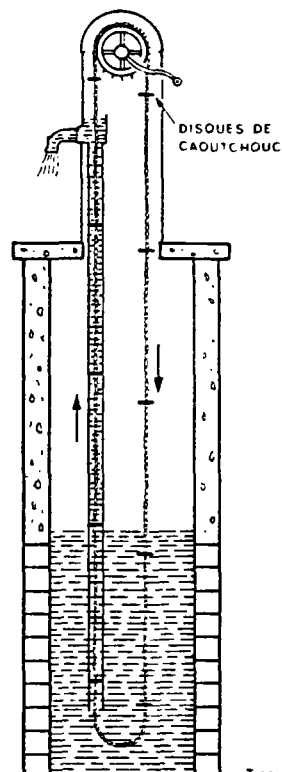
PUITS D'EXTRACTION PAR TREUIL ET SEAUFigure 1

Tiré de la Série de  
Monographies de  
l'OMS No 42

A = NIVEAU DE L'EAU DANS  
LE PUIT  
B = TREUIL  
C = TROU DE GUIDAGE POUR  
LA CORDE

D = CHROCHET D'ARRET  
E = AUGES  
F = COUVERCLE ÉTANCHE  
AMOVIBLE  
G = DÉGORGEOIR

H = ARGILE COMPACTÉE  
OU GLACIS DE BÉTON  
I = LEST FIXÉ AU BORD SUPÉRIEUR  
DU SEAU POUR ASSURER UN MOUVEMENT  
DE BASCULE À LA SURFACE DE L'EAU

Figure 2POMPE A GODETSFigure 3CHAPELET HYDRAULIQUE

Tiré de la Série de  
Monographies de  
l'OMS No 42

### 1.2.1.2. Les pompes alternatives

#### - Définition

Ce sont des pompes volumétriques dans lesquelles la variation de volume des chambres est obtenue par un mouvement alternatif d'un organe d'impulsion.

Les pompes alternatives se décomposent en deux catégories suivant leur utilisation et la profondeur d'aspiration : corps de pompe en surface ou immergé . Si la profondeur d'aspiration est supérieure à 7 m, la partie hydraulique de la pompe doit être descendue dans le puits ou le forage (fig.5).

#### - Corps de pompes en surface

Ces pompes sont représentées essentiellement par les pompes à piston dont le principe de fonctionnement est le suivant : le système se compose d'un corps de pompes cylindrique dans lequel se meut un piston qui produit l'aspiration ou le refoulement selon qu'il agrandit ou qu'il diminue la capacité du corps de pompe. Il y a deux clapets : l'un pour l'aspiration, l'autre pour le refoulement. Le piston est manoeuvré par une tige animée d'un mouvement alternatif produit par un vilebrequin, une manivelle ou un excentrique, actionnés à la main ou mécaniquement. Il existe des pompes à simple effet : une aspiration et un refoulement par course et des pompes à double effet : une aspiration et un refoulement pendant la course-aller, et idem pour la course-retour du piston.

Le volume exhauré par ces pompes est fonction de leur fonctionnement, à simple ou double effet, du diamètre et de la longueur du piston.

#### - Exemples de pompes à main

##### . Pompes à balancier à simple effet (fig. 6)

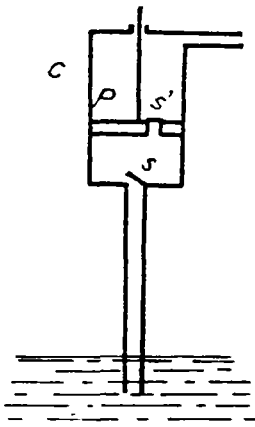
Les pompes ayant un piston de 90 mm de diamètre sont capables de fournir un débit de 1,7 m<sup>3</sup>/h.

##### . Pompes à cylindre horizontal à double effet (fig. 7)

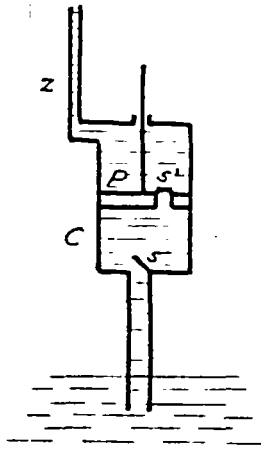
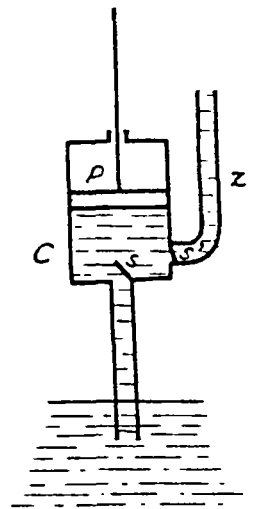
Leur débit varie de 2 m<sup>3</sup>/h pour un piston de 80 mm à 9 m<sup>3</sup>/h pour un piston de 130 mm.

##### . Pompes semi-rotatives à double effet (fig. 8)

Plus connues sous le nom de pompes "JAPY", elles peuvent refouler jusqu'à 25 m. Selon leurs dimensions, le débit varie de 1 m<sup>3</sup> à 10 m<sup>3</sup>/h.

Figure 5 : Pompes alternatives

Pompe Aspirante

Pompe Aspirante  
et ElevatoirePompe Aspirante  
FoulanteFigure 4

Pompe à bande élévatrice

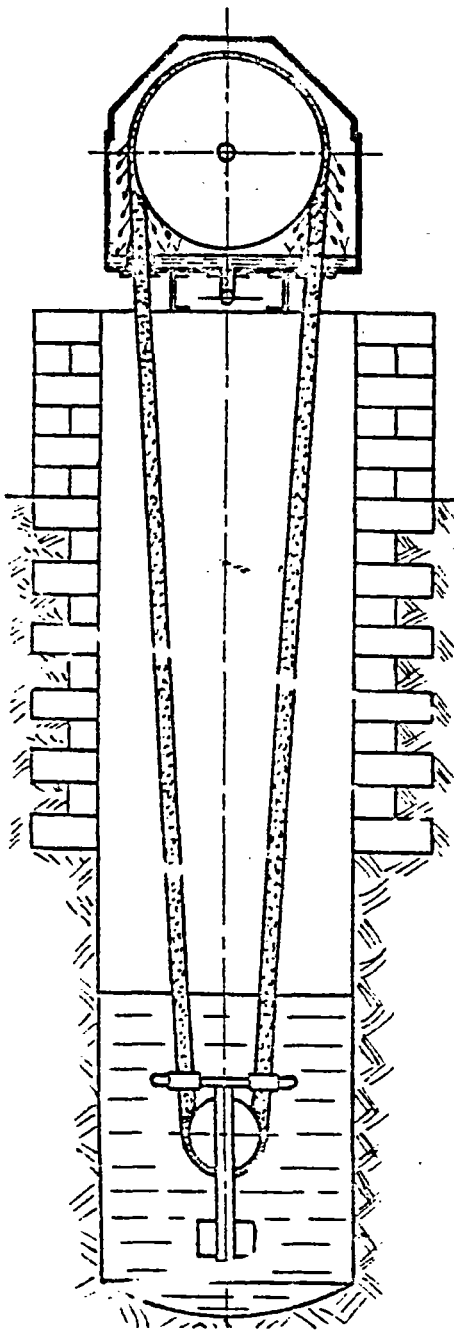
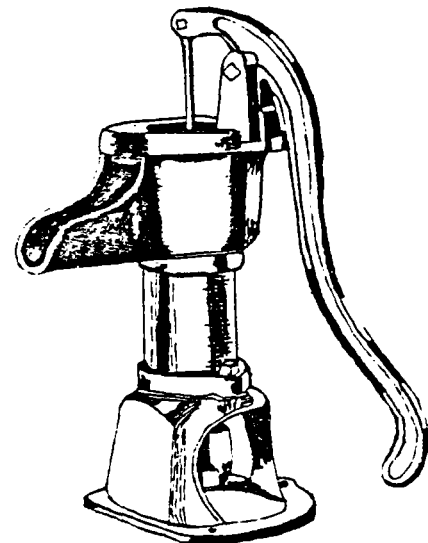
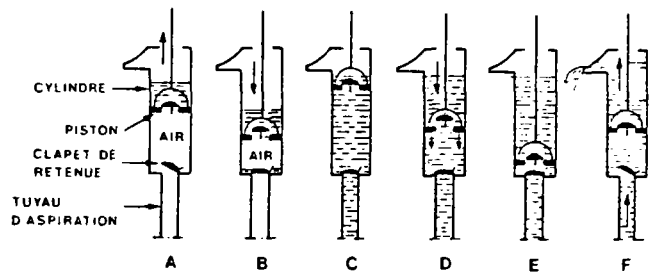
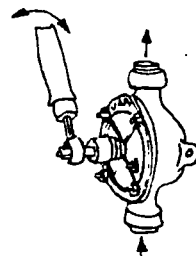
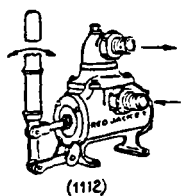


ILLUSTRATION DU FONCTIONNEMENT D'UNE POMPE A PISTON

Figure 6Pompe à Balancier  
simple effetFigure 7

Pompe à Double effet



Pompes semi-rotatives à double effet.

Figure 8

## - Corps de pompe immergé

### . Pompes à piston (fig. 9)

Le piston est actionné par une tringle de manoeuvre entraînée depuis la surface par un balancier ou un volant à manivelle ou excentrique. Il n'y a théoriquement pas de limite de profondeur pour leur utilisation. Mais les débits deviennent de plus en plus faibles.

Exemple de débit exhauré en fonction des caractéristiques de la pompe pour 60 coups/minute :

Ø mm du piston	Profondeur (m)	Débit (m <sup>3</sup> /h)
90	2	4,0
90	5	4,1
90	10	4,1
80	15	2,7
70	20	2,1
50	30	1,3
40	50	0,6

### . Pompes à diaphragme (ou à membrane) (fig. 10)

L'exemple le plus connu est fourni par l'Hydro-pompe de VERGNET-MENGIN.

Un manchon flexible à diaphragme est placé à l'intérieur d'un cylindre rigide plongé dans le puits. L'utilisation d'un système pilote hydraulique actionné par une pédale à pied permet au manchon flexible de se tendre et de se contracter alternativement, poussant ainsi l'eau du cylindre rigide vers la surface.

Débit donné pour une cadence de 60 coups/minute :

Débit (m <sup>3</sup> /h)	1,4	1,2	0,8	0,45
Hauteur manométrique (m)	10	30	50	70
Ø du cylindre immergé (mm)	92	92	92	92

Débit théorique pour chaque mouvement de levier :  $3 \cdot 10^{-4}$  m<sup>3</sup>. La conception de cette pompe est originale par son absence de tringlerie. Par ailleurs, on peut installer deux pompes sur un même forage à condition que celui-ci soit tubé en 5" intérieur.



*POMPE ELEVATOIRE DE PUIITS PROFOND*

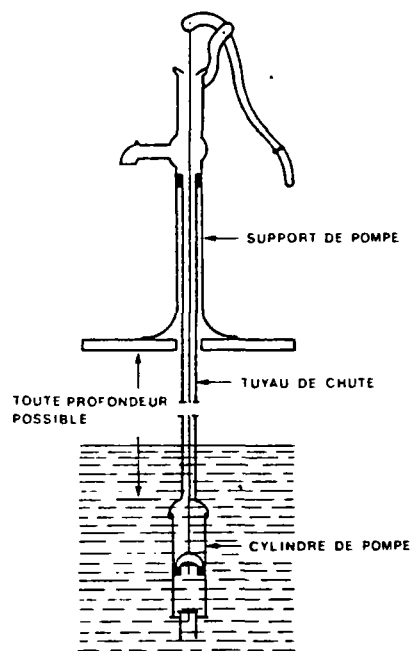
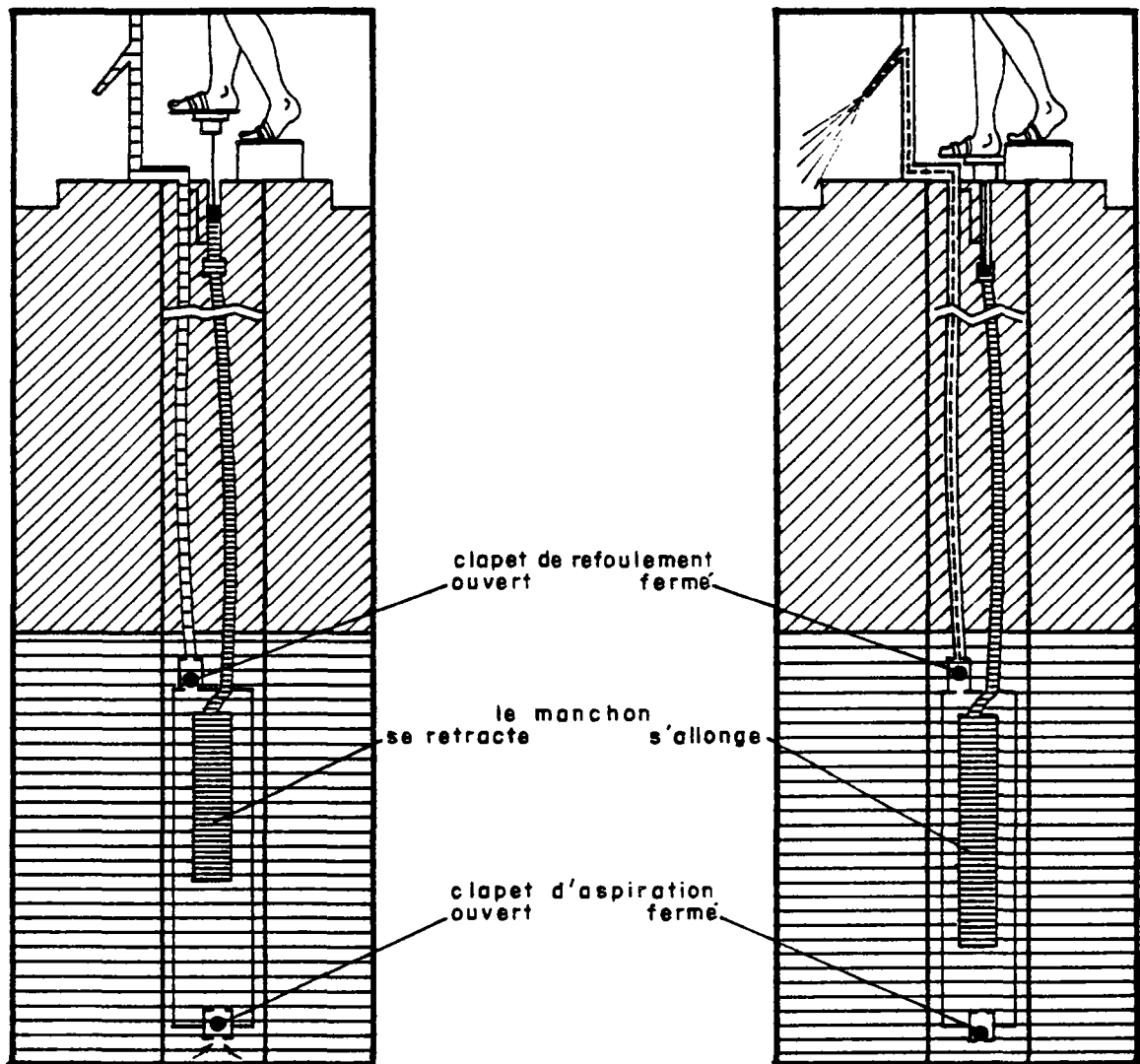


Figure 9 : Pompe à piston immergé

## HYDROPOMPE VERGNET : Principe de fonctionnement

Figure 10



### Aspiration :

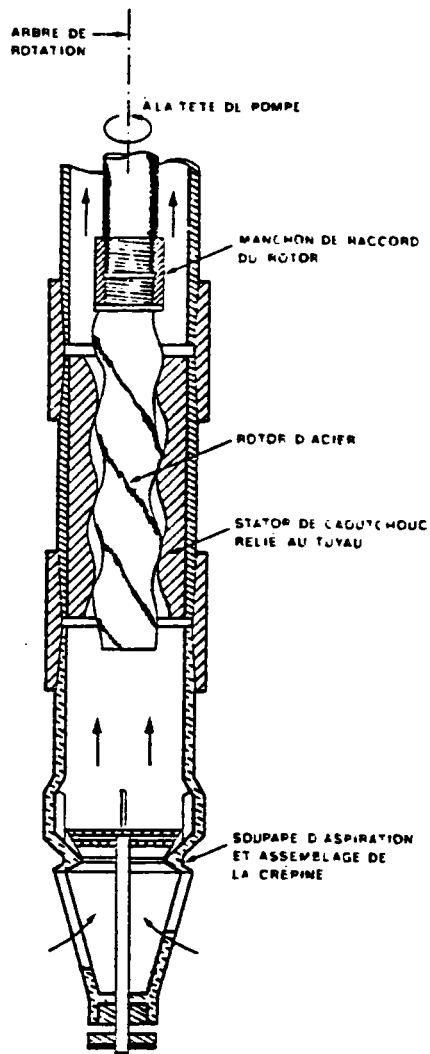
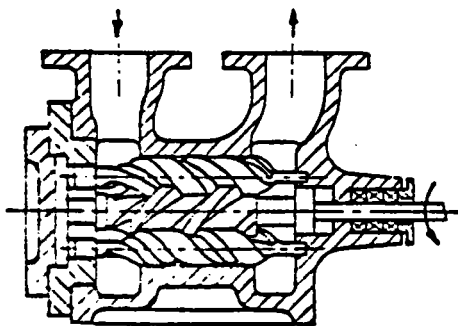
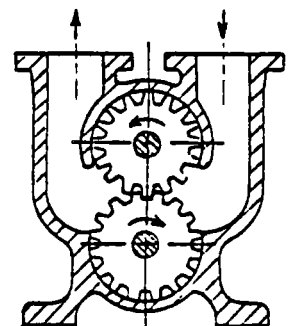
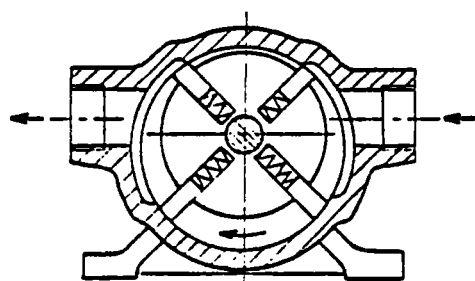
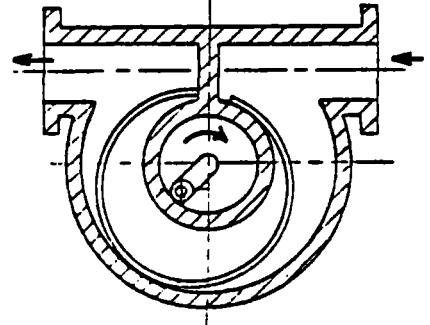
la pédale remonte, le manchon se rétracte: l'eau est aspirée dans le corps de pompe en acier inoxydable.

### Refoulement :

la pédale descend. On exerce une pression hydraulique en circuit fermé sur le manchon élastique qui se dilate et refoule l'eau vers la surface.

**Figure 11**

POMPE A ROTOR HELICOIDAL

**Pompe à vis****Pompe à engrenages****Figure 12****Pompe à palettes****Pompe à plateau excentrique**

### 1.2.1.3. Les pompes rotatives

Intermédiaires dans leur exécution entre les pompes alternatives et les pompes centrifuges, leur principe de fonctionnement les classe cependant parmi les pompes volumétriques en ce sens que leur débit est indépendant de la pression de refoulement.

#### - Définition AFNOR

Une pompe volumétrique rotative est une pompe dans laquelle les volumes engendrés sont créés par un ensemble d'organes animés d'un mouvement rotatif continu.

#### - Corps de pompe immergé

La pompe rotative hélicoïdale consiste en un rotor hélicoïdal à filetage simple tournant dans un stator hélicoïdal à filetage double. Les surfaces hélicoïdales engrenées poussent le liquide vers le haut (fig. 11).

Ce type de pompe est conçu pour être actionné à la main pour des forages de diamètre 3" (75 mm) ou plus (1) [1, p. 38].

#### - Corps de pompe en surface (AFNOR) (fig. 12)

Ce type de pompe est peu utilisé pour l'alimentation en eau potable. Il est cité à titre d'exemple pour les plus usités.

##### . Pompes à vis

C'est une pompe volumétrique rotative dans laquelle les volumes sont engendrés par la rotation d'une ou plusieurs vis dans un corps, le liquide s'écoulant axialement.

##### . Pompes à engrenages

C'est une pompe dans laquelle les volumes sont engendrés par les dentures de plusieurs engrenages en rotation dans un corps.

##### . Pompes à plateau excentrique

C'est une pompe dans laquelle les volumes sont engendrés par le déplacement d'un plateau entraîné par un excentrique, ce plateau restant tangent à la surface intérieure du corps de la pompe.

---

(1) OMS, p. 38

### 1.2.2. LES POMPES ROTODYNAMIQUES

#### 1.2.2.1. Définition

Ce sont des pompes dont le fonctionnement est basé sur le principe du passage continu du liquide et de la transmission de l'énergie par différence de pressions dans les éléments de la roue.

Ces pompes donnent des débits qui varient en raison inverse des hauteurs de refoulement. Ce sont actuellement les plus employées en forage d'eau.

#### 1.2.2.2. Principe des pompes centrifuges (A. MABILLOT)

L'eau introduite par l'orifice d'aspiration arrive au centre des corps de pompe. Elle est entraînée en rotation par les aubes de la roue tournant à grande vitesse.

La force centrifuge projette l'eau à la périphérie du corps de pompe d'où elle s'échappe par l'orifice de refoulement, sa vitesse étant transformée en pression.

Le vide partiel, ainsi créé à l'aspiration, assure l'arrivée continue de l'eau, sous la poussée de la pression atmosphérique.

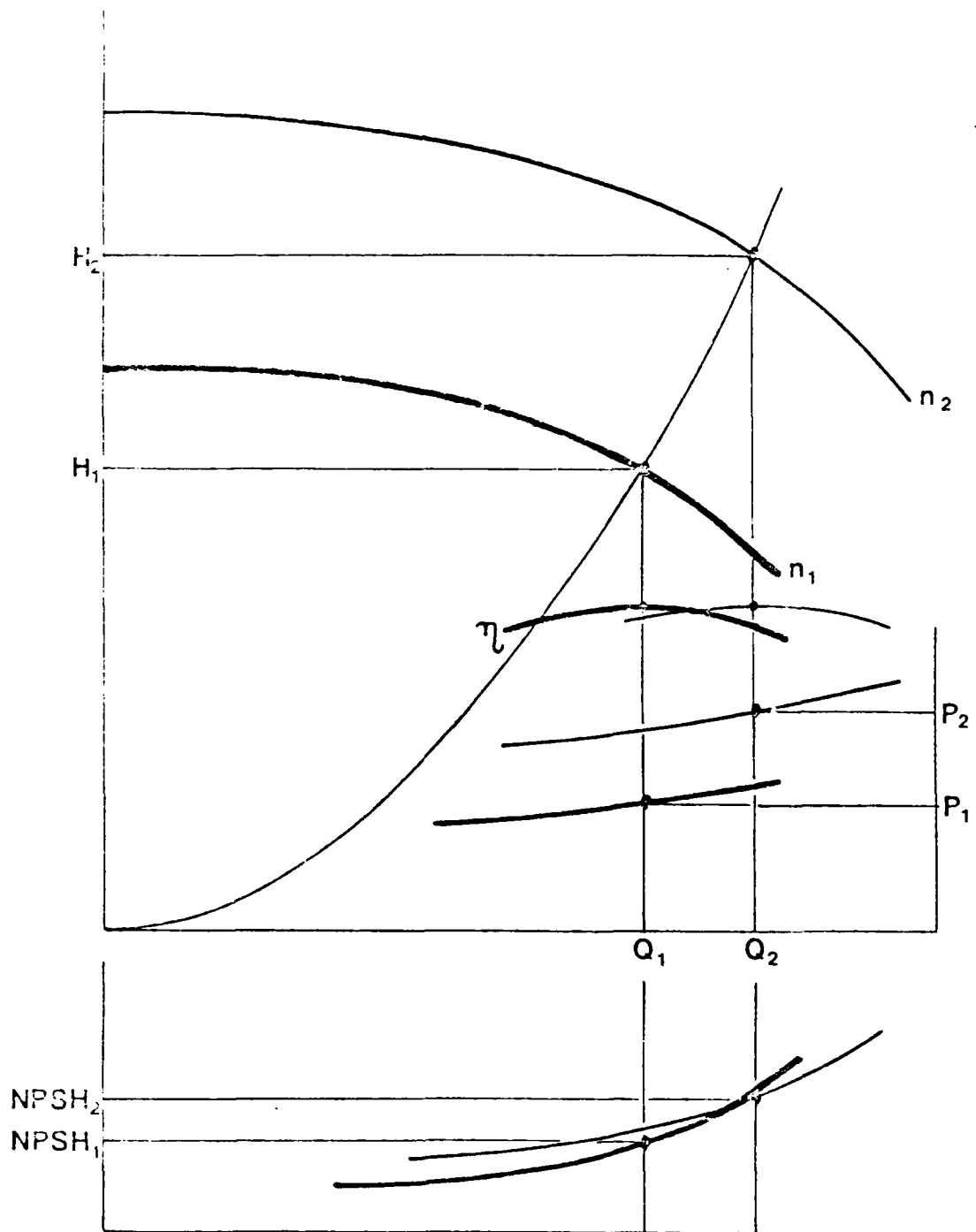
La hauteur de refoulement est fonction de la vitesse de l'eau à la sortie de la pompe. Cette vitesse est fonction du diamètre et du nombre de tours par minute du rotor.

En général, on peut dire que :

- pour une même vitesse de rotation
  - . le débit est fonction du diamètre du rotor
  - . la hauteur manométrique produite varie comme le carré du diamètre du rotor
  - . la puissance absorbée varie comme le cube du diamètre du rotor.
- si l'on fait varier la vitesse de rotation (fig. 13)
  - . le débit est proportionnel au rapport des vitesses
  - . la hauteur manométrique produite est proportionnelle au carré du rapport des vitesses
  - . la puissance absorbée est proportionnelle au cube du rapport des vitesses.
- couplage de plusieurs pompes
  - . on peut monter plusieurs pompes en série ou assembler, sur le même arbre, plusieurs roues ou turbines de telle sorte que le refoulement de l'une se fait dans l'aspiration de celle qui la suit.

Figure 13

## Variation de VITESSE



$$\begin{aligned}
 H_2 &= H_1 \left[ \frac{n_2}{n_1} \right]^2 \\
 Q_2 &= Q_1 \left[ \frac{n_2}{n_1} \right] \\
 P_2 &= P_1 \left[ \frac{n_2}{n_1} \right]^3 \\
 NPSH_2 &= NPSH_1 \left[ \frac{n_2}{n_1} \right]^2 \quad \text{si } \frac{n_2}{n_1} > 1
 \end{aligned}$$

Dans ce cas, le débit du groupe est égal à celui du premier élément.

La hauteur manométrique, produite par le groupe, est égale à la somme des hauteurs manométriques des divers éléments. Cette règle est constante pour les pompes multicellulaires à axe vertical.(fig. 14).

Si les pompes sont couplées en parallèle, c'est l'inverse :

- le débit du groupe est égal à la somme des débits des divers éléments
- la hauteur manométrique est égale à la moyenne des hauteurs manométriques des divers éléments.

#### **\* Amorçage**

Une pompe centrifuge ne peut fonctionner que si le corps de pompe est plein de liquide.

Il est donc indispensable de remplir au préalable la pompe et son tuyau d'aspiration.

#### **\* Réglage**

Il suffit de placer une vanne sur le refoulement pour faire varier le débit.

Si l'on ferme complètement cette vanne sans arrêter la pompe, le débit est nul et le rotor brasse l'eau dans le corps de pompe. L'énergie ainsi dépensée se transforme en chaleur, ce qui, au bout de peu de temps nécessite l'arrêt de la pompe.

#### **1.2.2.3. Pompes à hélice (fig. 15)**

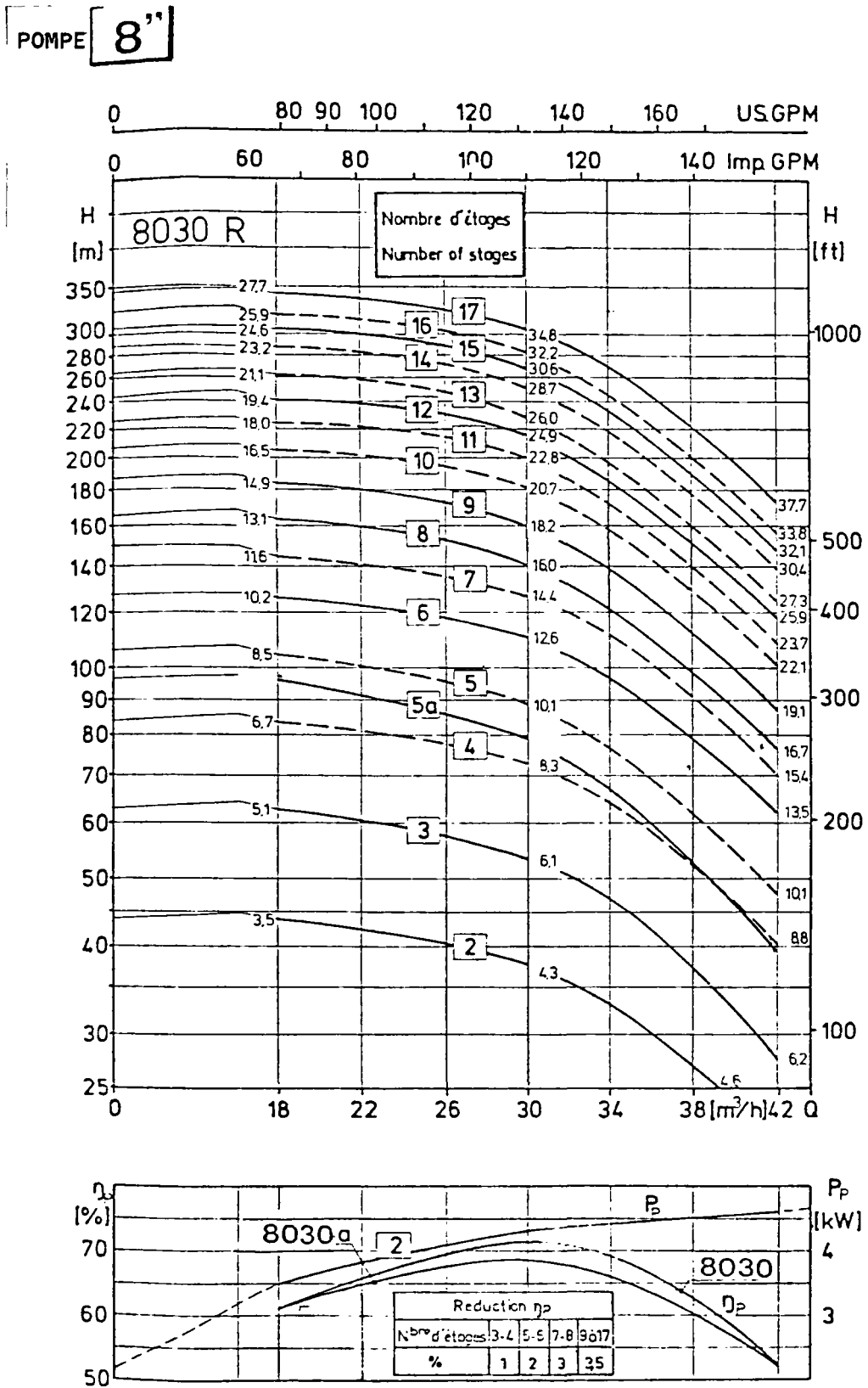
"Ces machines comportent un seul rotor en forme d'hélice de bateau. Les pales de l'hélice produisent un flux axial.

Leur emploi est généralement limité à de très grands débits :  $15.10^3 \text{ m}^3/\text{h}$  obtenus à de faibles profondeurs : 10 à 12 m. En raison de l'encombrement important du corps de pompe, elles ne sont guère utilisables en forages."

#### **1.2.2.4. Pompes centrifuge et hélicocentrifuge**

Ce sont des pompes dans lesquelles l'accroissement d'énergie est obtenu par passage du liquide dans une roue constituée par un ensemble d'aubes (fig. 16).

**Figure 14** : Relation entre le nombre d'étage et les courbes débit-hauteur





Dans ces pompes, l'écoulement moyen se fait en s'écartant de l'axe de la roue vers sa périphérie :

- de façon radiale dans les pompes centrifuges
- de façon semi-axiale dans les pompes hélicocentrifuges.

- Pompes centrifuges à axe horizontal (après A. MABILLOT)

. Pompes centrifuges corps en volute (fig. 17)

"La partie tournante est constituée par une roue à aubes installées directement dans le corps de pompe. Celui-ci en forme de volute ou spirale est construit de telle sorte que l'aspiration se produise dans l'axe de la turbine. La section de l'espace annulaire entre le rotor et la périphérie s'accroît dans le sens de la rotation jusqu'à l'orifice de refoulement. La vitesse de l'eau qui est maximale à l'entrée de l'orifice d'aspiration se transforme partiellement en pression disponible à la sortie.

Ces pompes sont employées de préférence pour les gros débits et de faibles hauteurs de refoulement".

. Pompes centrifuges à turbines et diffuseurs (fig. 18)

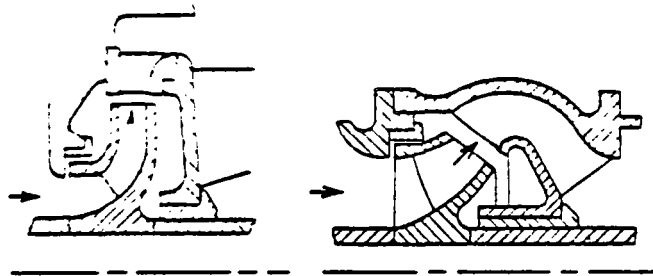
"Au lieu d'être en volute, le corps de pompe est à section circulaire ou organe fixe, le diffuseur est introduit entre le rotor et le boîtier. Cet élément fixé, lui aussi, des ailettes déterminant une série d'évents de section croissante du centre vers l'extérieur. C'est à l'intérieur de chacun de ces événements que s'opère la réduction de vitesse et l'accroissement correspondant de la pression d'eau."

. Pompes centrifuges auto-amorçantes

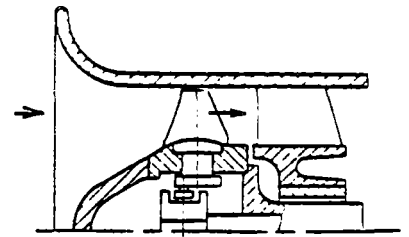
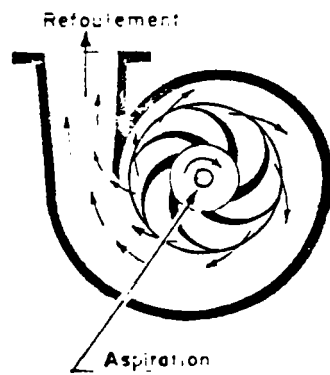
"Si les pompes volumétriques peuvent aspirer et refouler tous les liquides, y compris l'air, les pompes centrifuges ne peuvent s'amorcer qu'après remplissage du corps de pompe ; si une rentrée d'air se produit sur l'aspiration, la pompe se désamorce. Pour pallier cet inconvénient, il suffit de placer sur le refoulement une chambre dont le volume est supérieur à celui de la pompe et du tuyau d'aspiration et de la remplir d'eau au premier démarrage, ainsi les réamorçages se feront ensuite automatiquement."

Figure 16

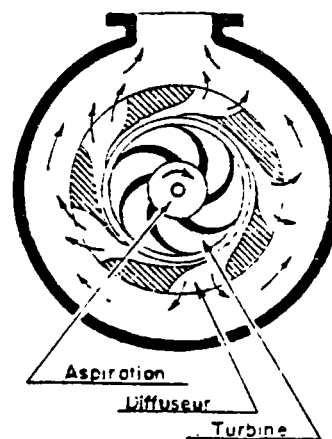
Pompes centrifuges et hélicocentrifuges

Figure 15

Pompes hélices

Figure 17 : Pompe centrifuge corps en voluteFigure 18

Pompes centrifuges à turbines et diffuseurs.



. Pompes centrifuges à flux mixte

Certaines roues sont conçues pour ajouter au flux radial, spécifiquement centrifuge, un flux axial qui permet d'améliorer les caractéristiques de performance de la machine.

Cette conception est plus spécialement appliquée dans les pompes à axe vertical qui équipent la plupart des forages d'eau.

- Pompes centrifuges à axe vertical

"Ce sont les pompes les plus employées dans les forages d'eau.

Ces pompes ont toutes un ou plusieurs étages (multicellulaires) comprenant chacun une roue à flux, radial ou semi-axial, tournant dans un diffuseur. Le nombre des étages variant avec la puissance demandée."

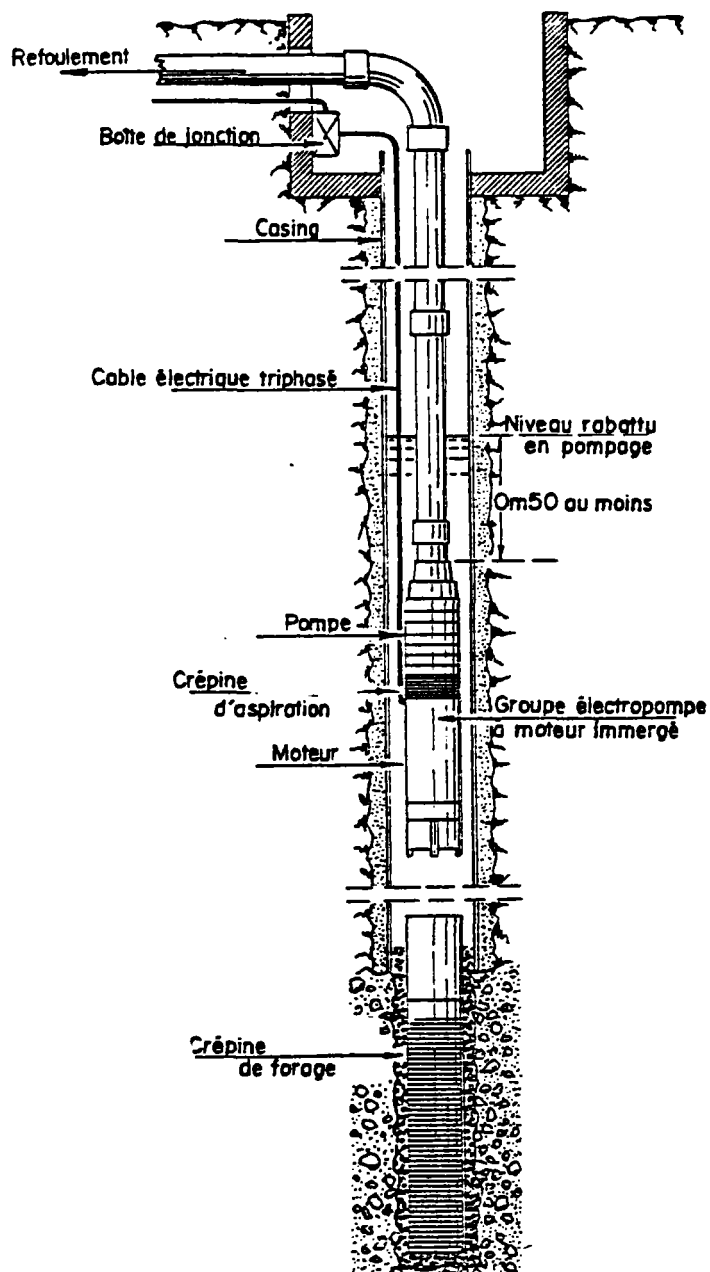
. Pompes centrifuges, axe vertical, moteur en surface (fig. 19)

"Le corps de pompe est suspendu au bas de la colonne de refoulement, il est généralement muni d'un clapet de pied.

La tête, installée au niveau du sol, supporte tout le poids de la colonne et de la pompe, pluies d'eau. Elle peut, selon le cas, recevoir un moteur électrique à axe vertical, une poulie à axe vertical, ou un renvoi d'angle sur un arbre horizontal muni d'une poulie ou entraîné par un moteur à axe horizontal, électrique ou thermique.

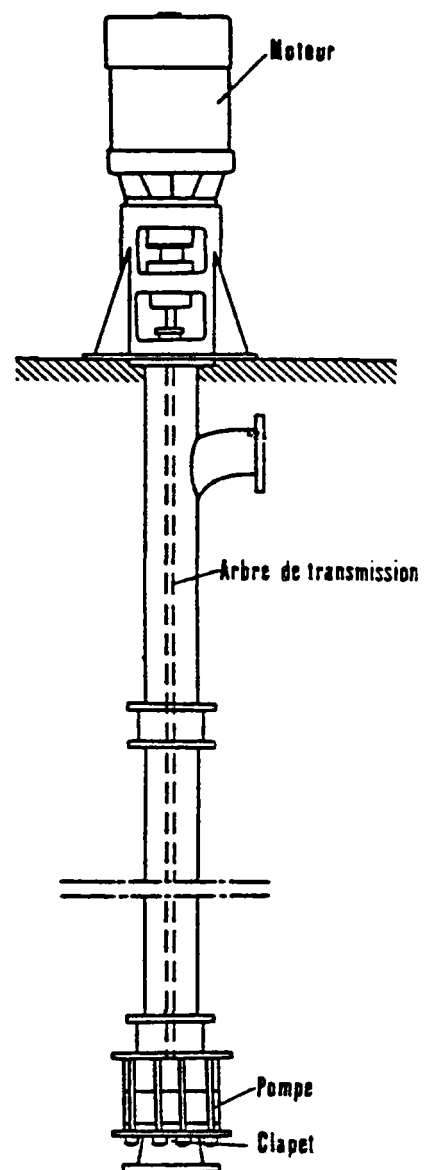
La colonne, tuyauterie de refoulement, renferme l'arbre de transmission tournant dans des paliers avec coussinets semi-élastiques généralement lubrifiés par l'eau."

A titre d'exemple, sur les caractéristiques des pompes centrifuges à axe vertical, on peut donner un tableau représentant, pour des pompes de 6" et de 8", le débit exhauré pour une vitesse de rotation donnée, à ces valeurs on fera correspondre les hauteurs manométriques atteintes avec un étage et dix étages.



**Figure 20**

Pompe centrifuge immergée



**Figure 19**

Pompe centrifuge  
axe vertical  
moteur en surface

## Corps de pompe diamètre 6"

Vitesse de rotation (tr/mn)	3500	2900	2650	2400	2200	2000	1750	1450
Débit (m <sup>3</sup> /h)	24	20	18	16	15	14	12	10
Hauteur manométrique totale								
1 étage (m)	17	12	10	8,0	7,5	5,5	4,5	2,8
10 étages	170	120	100	80	75	55	45	28

## Corps de pompe diamètre 8"

Vitesse de rotation (tr/mn)	3500	2900	2650	2400	2200	2000	1750	1450
Débit (m <sup>3</sup> /h)	80	70	65	60	55	50	42	36
Hauteur manométrique totale								
1 étage (m)	30	20	17	13	11	9,0	8,2	5,2
10 étages	-	-	170	130	110	90	82	52

. Pompes centrifuges immergées ou groupe électro-pompe (fig. 20)

"Ces pompes centrifuges se composent d'un ensemble monobloc, pompe et moteur, tout entier plongé dans l'eau et suspendu, par la conduite de refoulement à la plate-forme du puits ou forage.

Les pompes immergées tendent de plus en plus à remplacer les groupes composés d'une pompe verticale à moteur en surface. Leur utilisation a été longtemps freinée par les problèmes d'étanchéité et de longévités des moteurs électriques.

Les progrès techniques permettent de les utiliser actuellement en toute sécurité.

Ces pompes se décomposent de bas en haut :

- la butée axiale destinée à compenser le poids du moteur ainsi que la réaction de poussée axiale due au fonctionnement de la pompe,
- le moteur électrique à axe vertical,
- la collerette d'aspiration de la pompe munie d'une crépine,
- la pompe centrifuge multicellulaire à turbines radiales ou semi-axiales,

- le clapet de non retour, éventuellement monté sur le refoulement de la pompe,
- le tube de refoulement, et le câble électrique servant à alimenter le moteur."

Exemple des caractéristiques d'une pompe immergée de 4" : à 2850 tr/mn courant de période 50 Hz. Ce tableau donne le débit exhauré en fonction de la puissance du moteur et de la hauteur manométrique totale d'utilisation :

Hauteur manométrique totale (m)

Nombre d'étages	Puissance minimale de la pompe kW	Débit (m <sup>3</sup> /h)		
		0,6	1,2	1,8
7	0,55	35	28	12
11	0,55	53	43,5	22
23	0,75	110	88	40
34	1,1	161	126	54
53	1,5	240	180	84
63	2,2	285	210	100

#### - Limites normales d'utilisation

- . débit : 1 à 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/h
- . hauteur manométrique totale : 10 à 10<sup>3</sup> m
- . viscosité : 3 x 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s.

#### 1.2.2.5. Choix des pompes rotodynamiques en fonction des conditions d'utilisation

Les conditions particulières d'utilisation influent sur le choix de la pompe qui peut être, soit verticale ou horizontale, soit immergée ou en surface, soit monocellulaire ou multicellulaire.

##### . Pompes à axe horizontal ou à axe vertical

On choisira des pompes centrifuges à axe horizontal toutes les fois que l'alimentation pourra se faire en charge, ou que les conditions d'aspiration (hauteur d'aspiration inférieure à 6 ou 7 m) ou d'amorçage se trouveront satisfaites.

. Corps de pompe : en surface ou immergé

La contrainte du choix est fonction tout d'abord du mode d'alimentation : les pompes immergées sont alimentées électriquement. Les pompes immergées tendent de plus en plus à remplacer les groupes composés d'une pompe verticale et d'un moteur thermique.

Actuellement, les groupes électropompes immergés constituent le moyen de pompage le plus économique, le plus simple et le plus sûr pour l'exploitation par forages des nappes souterraines : le prix d'un groupe électropompe immergé, pour un forage de 10", refoulant à 15 m est d'environ la moitié de celui d'une pompe verticale avec un moteur en surface ; pour un refoulement de 20 m, le prix de la pompe immergée est égale 1/3 et pour 40 m de refoulement le prix est le quart (SOGREAH).

. Pompes centrifuges monocellulaires et pluricellulaires

Dans le choix de ce type de pompes, il faudra tenir compte de la vitesse de rotation de la pompe dont l'augmentation fera élever la hauteur de refoulement.

Le rapport de la SOGREAH recommande le choix suivant :

- "pour des hauteurs d'élévation inférieures à 60 m, on utilisera en principe une pompe monocellulaire,
- pour des hauteurs d'élévation comprises entre 60 et 90 m
  - . si les moteurs sont électriques :  
on fera une étude économique entre la pompe monocellulaire à vitesse élevée (2900 tr/mn) et la pompe multicellulaire tournant à vitesse faible (1450 tr/mn)
  - . si les moteurs sont thermiques :  
il faut préférer a priori la solution multicellulaire à faible vitesse,
- pour des hauteurs d'élévation supérieures à 90 m, il faudra utiliser des pompes multicellulaires".

### 1.2.2.6. Indications à fournir aux constructeurs de pompes

Les indications suivantes sont nécessaires pour définir le type de pompe qui correspond au débit désiré et dont les dimensions conviennent au puits (fig. 21) :

Type de puits :  
forage - puits - réservoir  
profondeur du puits

$Q$  = Débit désiré de la pompe : .....  
(en l/mn ou en  $m^3/h$ )

$W_h$  = Niveau statique de l'eau dans le puits : .....  
(mesuré depuis le bord supérieur du puits, lorsqu'on ne retire pas d'eau)

$W_t$  = Niveau dynamique de l'eau dans le puits : .....  
(mesuré depuis le bord supérieur du puits, en période de pompage après un certain temps de fonctionnement au débit demandé)

= Hauteur géométrique verticale au-dessus du bord supérieur du puits : ....  
Pour des réservoirs à pression, indiquer les limites de l'interrupteur manométrique.  
Emplacement du réservoir à pression au-dessus du bord supérieur du puits ..... m

Puits avec  
refoulement libre au niveau du sol  
refoulement dans un réservoir surélevé  
refoulement dans un réservoir sous pression

$d$  = Tuyauterie de refoulement au-dessus de la surface du sol : .....  
a) diamètre intérieur ( $d$ ) : .....  
b) longueur totale : ..... verticale  
..... horizontale  
c) y-a-t-il à la fin de la conduite de pression un écoulement libre, un robinet à flotteur, un clapet de fermeture ou autre ?

$ET_p$  = Profondeur d'installation désirée de la pompe à partir du raccord du tuyau de refoulement : .....m  
(La pompe doit fonctionner si possible 2 à 3 m au-dessous du niveau minimum  $W_t$  et non pas dans l'intervalle de filtration).

$B_w$  = Diamètre intérieur utilisable du puits en profondeur d'installation de la pompe : .....

= Y-a-t-il des rétrécissements dans le puits :  
La paroi du puits se rétrécit jusqu'à .....mm

$B_t$  = Profondeur d'installation utilisable du puits avec le diamètre  $B_w$  mesuré depuis le bord supérieur du puits : .....



Genre du filtre :.....

Position et longueur du filtre :.....

**Nature du courant :**

Courant triphasé/courant monophasé

Tension de service (entre deux phases)

volts

Fréquence

périodes

S'il y a des chutes de tension - tension minimum

volts

**Type de démarrage :**

Direct - étoile-triangle - auto-transformateur

**Commande :**

à la main

à distance

automatique, par interrupteur à flotteur

automatique, par interrupteur à pression

automatique, par minuterie

appareillage de protection contre marche à sec

**Qualité de l'eau :**

S'il ne s'agit pas d'eau claire et froide,

fournir les données (si possible une analyse), surtout

en ce qui concerne la teneur en sable

g/litre

Teneur d'acide carbonique libre

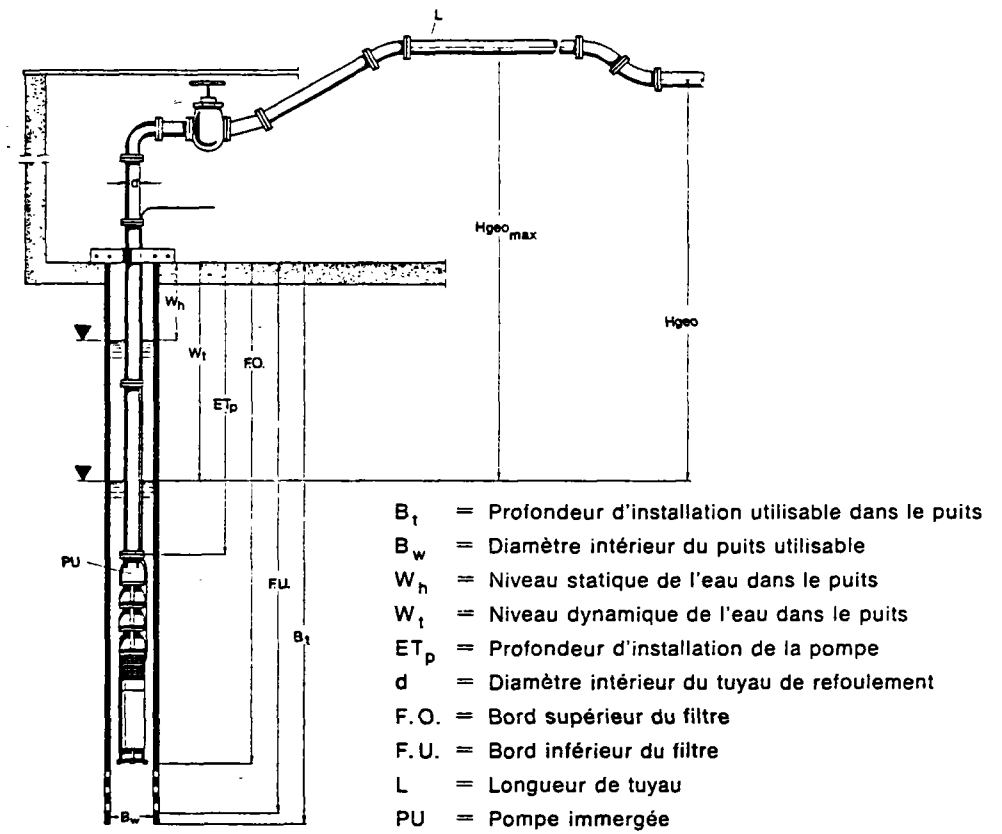
mg/litre

Dureté en carbonates

°DH

Valeur pH

Figure 21



### 1.2.3. LES AUTRES TYPES DE POMPES

#### 1.2.3.1. Pompes à jet ou éjecteurs (fig. 22)

Un injecteur est un appareil dans lequel un fluide sous pression (fluide moteur) aspire et transmet une partie de son énergie d'un autre fluide (fluide aspiré), le mélange étant refoulé à une pression intermédiaire. Il comprend une tuyère motrice, un mélangeur équipé à son extrémité d'un clapet avec une crépine et un diffuseur ; l'eau sous pression est fournie par une pompe centrifuge placée au sol dont une partie du débit est envoyée dans la tuyère motrice et l'autre partie correspondant au débit aspiré est évacuée dans le tube de sortie.

"L'équipement permet d'élever de l'eau sur d'assez grandes hauteurs sans organes tournant au fond.

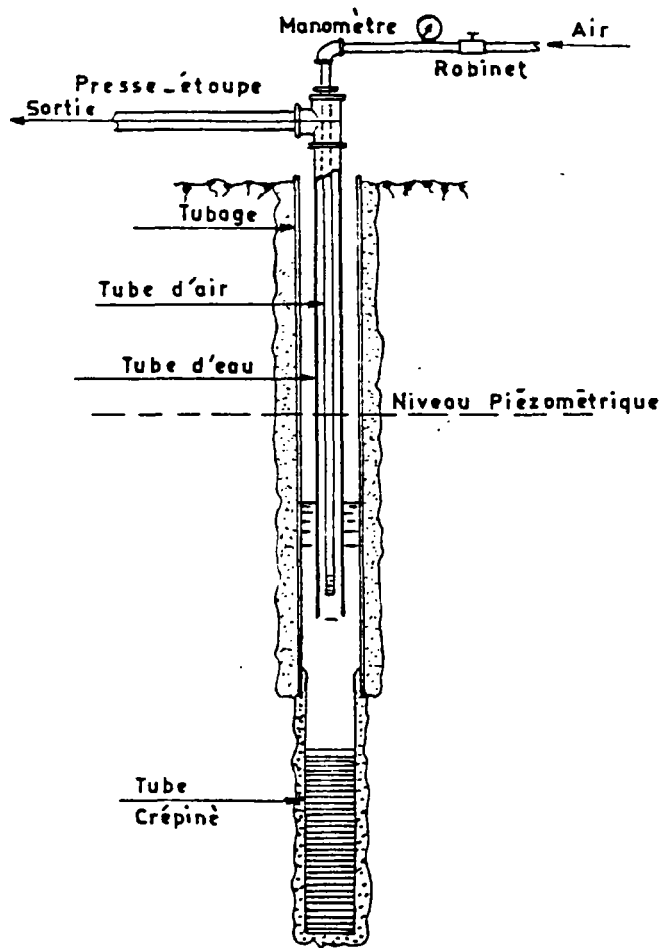
Ces appareils n'ont pas un bon rendement, mais ils sont utiles pour les forages tubés en très petits diamètres. Certains constructeurs fournissent des éjecteurs entrant dans des tubes de 2", et mêmes moins (Le forage d'eau)".

#### 1.2.3.2. Les émulseurs ou pompage par air-lift (fig. 23)

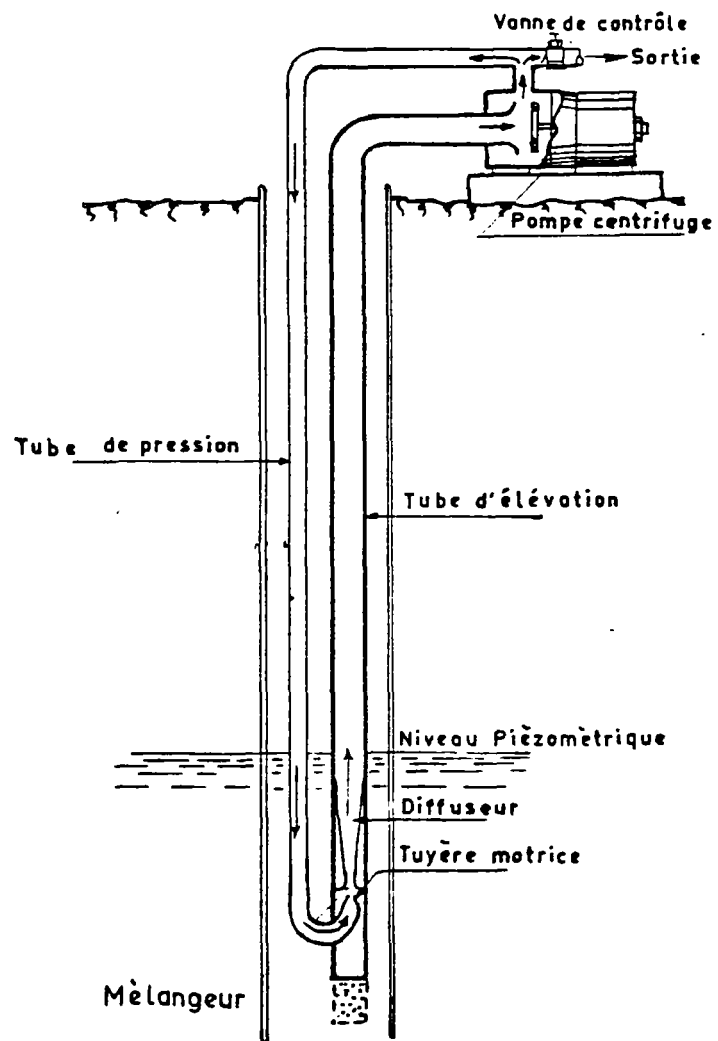
##### - Principe

Ce procédé consiste à émulsionner l'eau avec de l'air comprimé de façon à obtenir un mélange dont la densité est inférieure à celle de l'eau.

Ce mode de pompage permet d'effectuer des essais à faibles débits (2 à 10 l/s) dans des forages de faibles diamètres, mais on obtient une succession de sorties plus ou moins brutales de mélange d'air et d'eau, aussi les mesures de niveau effectuées en cours de pompages sont très perturbées. Ce procédé est le plus mauvais moyen de pompage pour réaliser des essais. Cependant ce procédé permet d'exécuter des essais préliminaires ou des essais à très faible débit à grande profondeur dans des tubages de faibles diamètres. Par contre les remontées sont en général bonnes et parfaitement interprétables.



Emulseurs

Figure 23

Pompe à éjecteurs

Figure 22

## 2. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES POMPES

### 2.1. HAUTEUR MANOMETRIQUE TOTALE

#### 2.1.1. DEFINITION

La hauteur manométrique totale d'une pompe est la différence de pression en mètres de colonne de liquide entre les orifices d'aspiration et de refoulement.

Lors du pompage d'un liquide, la pompe ne doit pas seulement fournir une pression équivalente à celle correspondant à la différence des niveaux entre l'aspiration et le refoulement (hauteur géométrique totale d'élévation) mais également la pression nécessaire pour vaincre les pertes de charge dans la crépine, les conduites d'aspiration, les conduites de refoulement ainsi que les accessoires qu'elles comportent : coudes, tés, vannes, etc...

#### 2.1.2. PERTES DE CHARGE DANS LES CONDUITES

Ces pertes de charge sont :

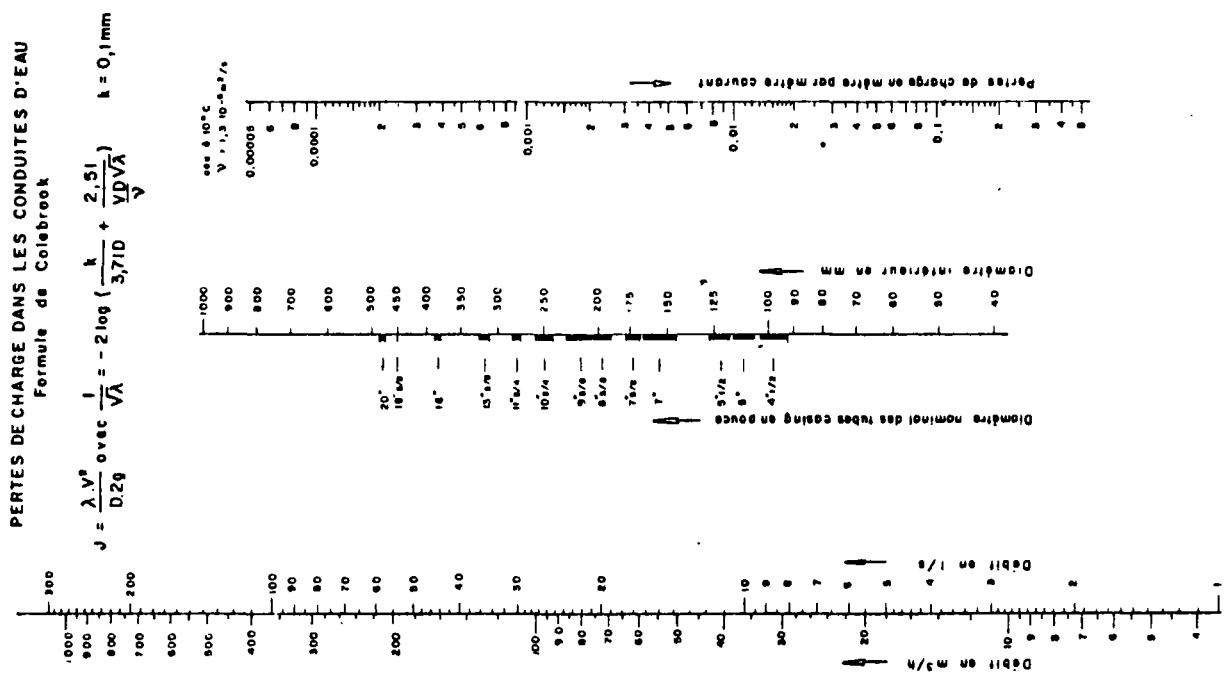
- proportionnelles à la longueur
- indépendantes de la pression intérieure
- fonction de la nature et de l'état des parois
- fonction de la vitesse d'écoulement
- inversement proportionnelles au diamètre de la conduite.

Dans le rapport méthodologique "Calcul des ouvrages de captages" de J. FORKASIEWICZ, sont fournies les formules et les **tables**, extraites du formulaire de Pont-à-Mousson (1973) pour calculer ces pertes de charge. Dans cette note, B. GENETIER a dressé un nomogramme qui permet de déterminer graphiquement ces pertes de charge (fig. 24).

#### 2.1.3. PERTES DE CHARGE DUES AUX ACCESSOIRES DE TUYAUTERIES

Elles sont provoquées par des modifications du contour de la veine liquide comme par exemple rétrécissement, élargissement, changement de direction. Elles sont proportionnelles au carré de la vitesse, et dépendent de la nature et de la forme de l'incidence de parcours.

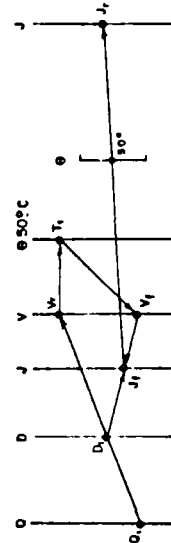
Partes de charge en mètre par mètre courant à la température choisie



**N.B.** - Les plages noires représentent les valeurs des onduleurs intérieurs des tubages cosing désignés par le diamètre extérieur en pouces (diamètre nominal).

Monogramme dressé par B. Genetier (SGN/Myd) d'après les tables du formulaire Ponté Mousson (1973)

12-1976



**Calcul de la perte de charge dans une conduite de diamètre D où passe un débit  $Q_1$  d'eau chaude à  $50^\circ\text{C}$**

- Joindre  $Q_0$  à  $D_0$  pour obtenir la vitesse réelle d'écoulement  $V_r$ ;
- L'horizontale passant par  $V_r$  coupe la verticale 50°C en  $T_1$ ;
- Le droite à 45° passant par  $T_1$  fournit la vitesse fictive  $V_f$ ;
- En joignant  $D_{01}$  et  $V_f$  on obtient la perte de charge fictive  $J_f$ ;
- Joindre  $J_f$  à 50°C pour obtenir la perte de charge réelle  $J_r$ .

Pertes de charge exprimées en longueur équivalente de tuyauterie droite en m

Ø de tuyauterie	Clapet de pied crépine	Coude à 90° à visser	Coude à 90° à bride	Robinet à soupape	Vanne à passage direct	Clapet de retenue
25	4	1		10		6
32	5	1,3		13		7
40	7	1,6		16		8
50	9	2	0,7	20	0,5	10
65	11	2,6	0,9	26	0,6	10
80	15	3,2	1,1	34	0,7	10
100	20	4	1,4	45	0,9	12
125	26		1,7		1,1	15
150	34		2,1		1,4	18
200	46		2,6		1,8	24

## 2.2. HAUTEUR D'ASPIRATION (A. MABILLOT)

"Aucune pompe installée au niveau de la mer ne peut aspirer de l'eau ayant une température de zéro degré centigrade à une profondeur supérieure à 10,33 m. Cette valeur, n'est d'ailleurs jamais atteinte à cause des facteurs suivants qui la réduisent sensiblement :

- pertes de charge de la conduite d'aspiration
- pertes de charge dues à l'altitude  
la pression atmosphérique qui, au niveau de la mer est de 0°, est égale au poids d'une colonne d'eau d'une hauteur de 10,33 m est réduite de 1,16 mm par mètre d'altitude
- pertes de charge dues à la température de l'eau
- pertes de charge dues à la construction de la pompe  
(NPSH = Net Positive Suction Head)."

Le NPSH ou charge nette à l'aspiration est la perte de pression correspondant au fonctionnement interne d'une pompe centrifuge. On distingue le NPSH disponible et le NPSH requis. Le NPSH disponible est une grandeur qui caractérise l'installation et le fluide véhiculé. Le NPSH requis est une caractéristique de la pompe ; il est fonction de la vitesse d'utilisation et du débit pour une vitesse de rotation déterminée.

La plupart des constructeurs de pompes français l'indiquent par une courbe supplémentaire ajoutée aux courbes caractéristiques de leurs pompes.

On doit toujours avoir le NPSH disponible supérieur au NPSH requis. Dans le cas contraire, il y aura perte de rendement, risque de désamorçage, vaporisation partielle de l'air dissous, cavitation, etc...

### **2.3. COURBES CARACTERISTIQUES D'UNE POMPE** (fig. 25)

Pour chaque type de pompe, le constructeur a plusieurs courbes caractéristiques (pour une vitesse de rotation donnée) qui constituent la fiche d'identité de la pompe.

#### **2.3.1. COURBE DEBIT-HAUTEUR**

La courbe débit-hauteur présente les variations de la hauteur manométrique totale d'élévation susceptible d'être fournie par la pompe en fonction du débit. Ces courbes sont des paraboles.

Deux points particuliers sont à considérer :

- le point nominal, correspondant au point de calcul, et pour lequel le rendement passe par un maximum,
- le point à débit nul qui fixe la forme de la courbe. Suivant la position relative du point à débit nul et du point nominal, la courbe peut présenter une des trois formes principales suivantes (fig. 26 ) :
  - . courbe plate
  - . courbe légèrement tombante
  - . courbe très tombante.

La forme de la courbe dépend, d'une part du choix des paramètres de calcul, et d'autre part de la vitesse spécifique de la pompe ; c'est-à-dire du rapport entre le débit et la hauteur pour une vitesse donnée.



Figure 25 : Courbes caractéristiques  
d'une pompe (doc. pompes PEME)

4"  
101 mm

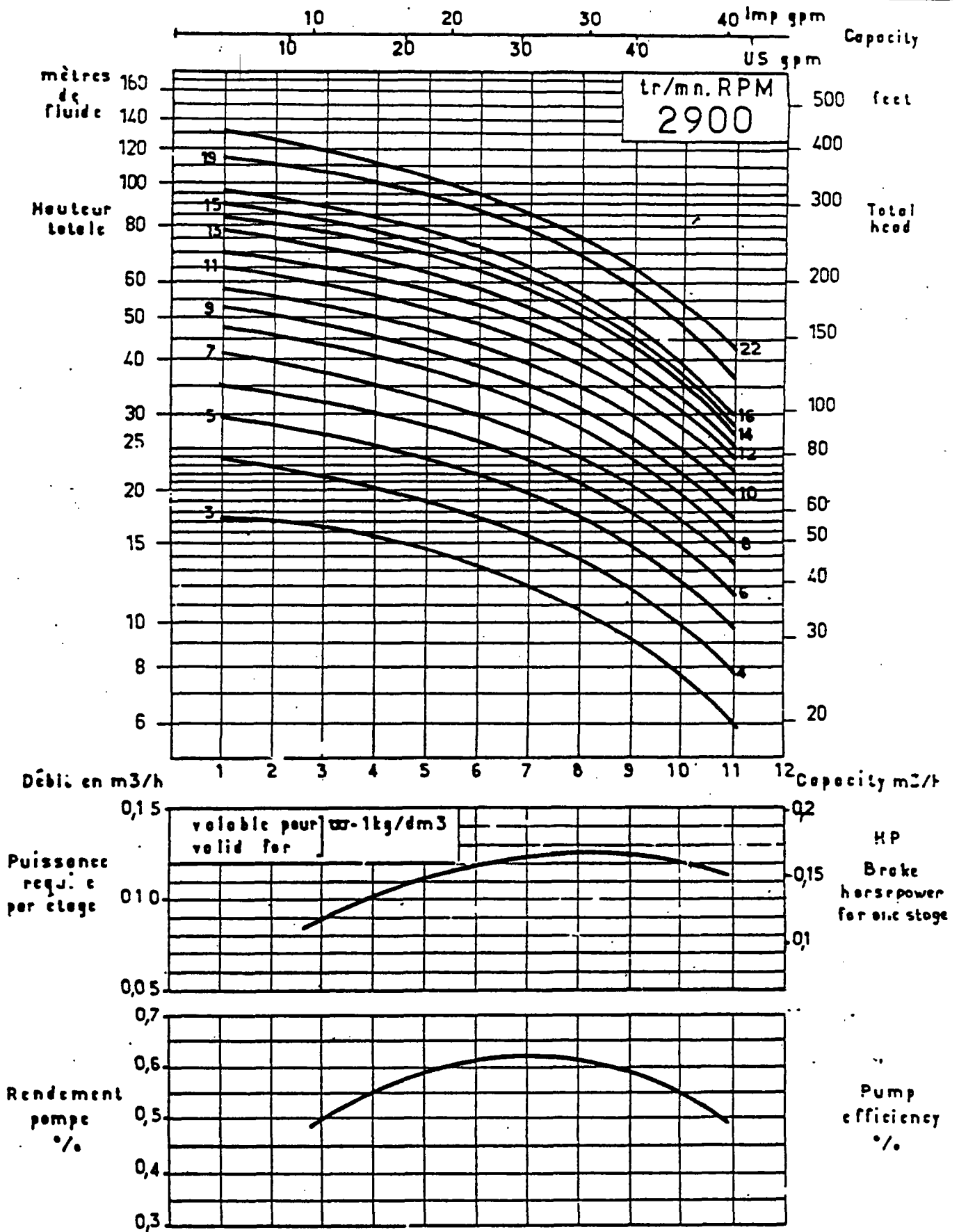
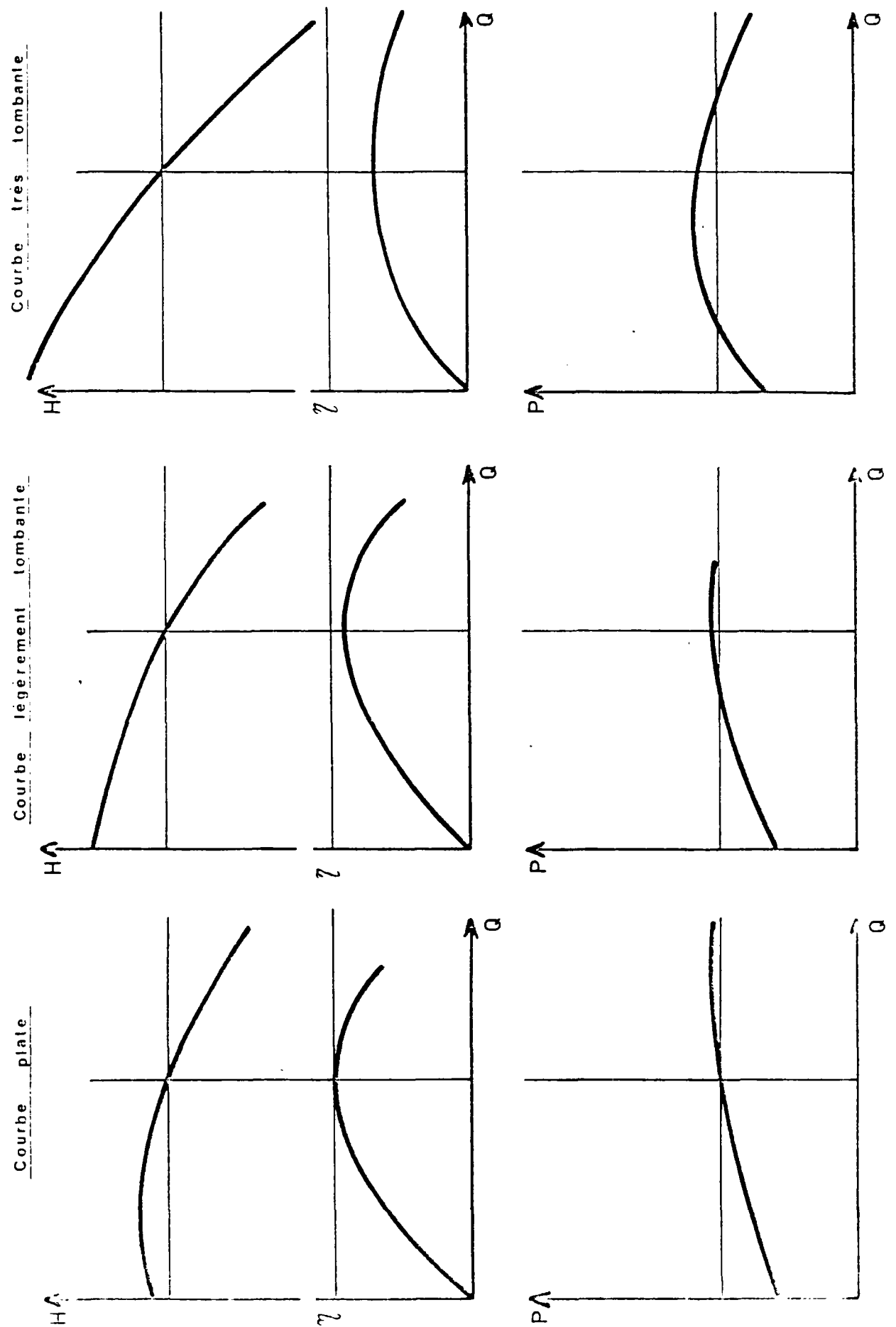


Figure 26 : Formes des courbes



Pour les pompes centrifuges, les paraboles sont plus ou moins plongeantes. Pour les pompes hélico-centrifuges ou hélices, les paraboles se relèvent plus nettement dans le domaine des faibles débits. D'un point de vue général, les courbes seront d'autant plus tombantes que la vitesse spécifique des pompes sera élevée.

Pour un forage de diamètre donné (4" ou 6" par exemple), on peut définir des plages d'utilisation correspondantes aux possibilités offertes par les pompes existantes sur le marché. Cette plage recoupe l'ensemble des courbes paraboliques débit-hauteur définies en (2.3.1.) pour des nombres d'étages variables selon les caractéristiques de la pompe (fig. 27).

### 2.3.2. COURBE PUISSANCE

La courbe de puissance absorbée par la pompe est également d'allure parabolique. Elle passe par un maximum pour un débit dont la position par rapport au débit nominal est liée à la forme de la courbe caractéristique.

Ce débit est plus grand que le débit nominal pour une courbe plate, sensiblement égal pour une courbe légèrement tombante, et plus petit pour une courbe très tombante.

### 2.3.3. COURBE DE RENDEMENT

La courbe de rendement d'allure parabolique passe par l'origine 0, et par un maximum pour le débit nominal de la pompe. Elle se déduit des courbes précédentes en fonction du débit :

$$\eta = \frac{\text{Puissance utile } P_u}{\text{Puissance absorbée par la pompe}} = \frac{Q \cdot H \cdot \rho \cdot g}{\rho}$$

Formule pratique :

$$P = \frac{Q \cdot H}{368 \cdot \eta} \cdot \sigma$$

P = puissance absorbée sur l'arbre de la pompe en kW

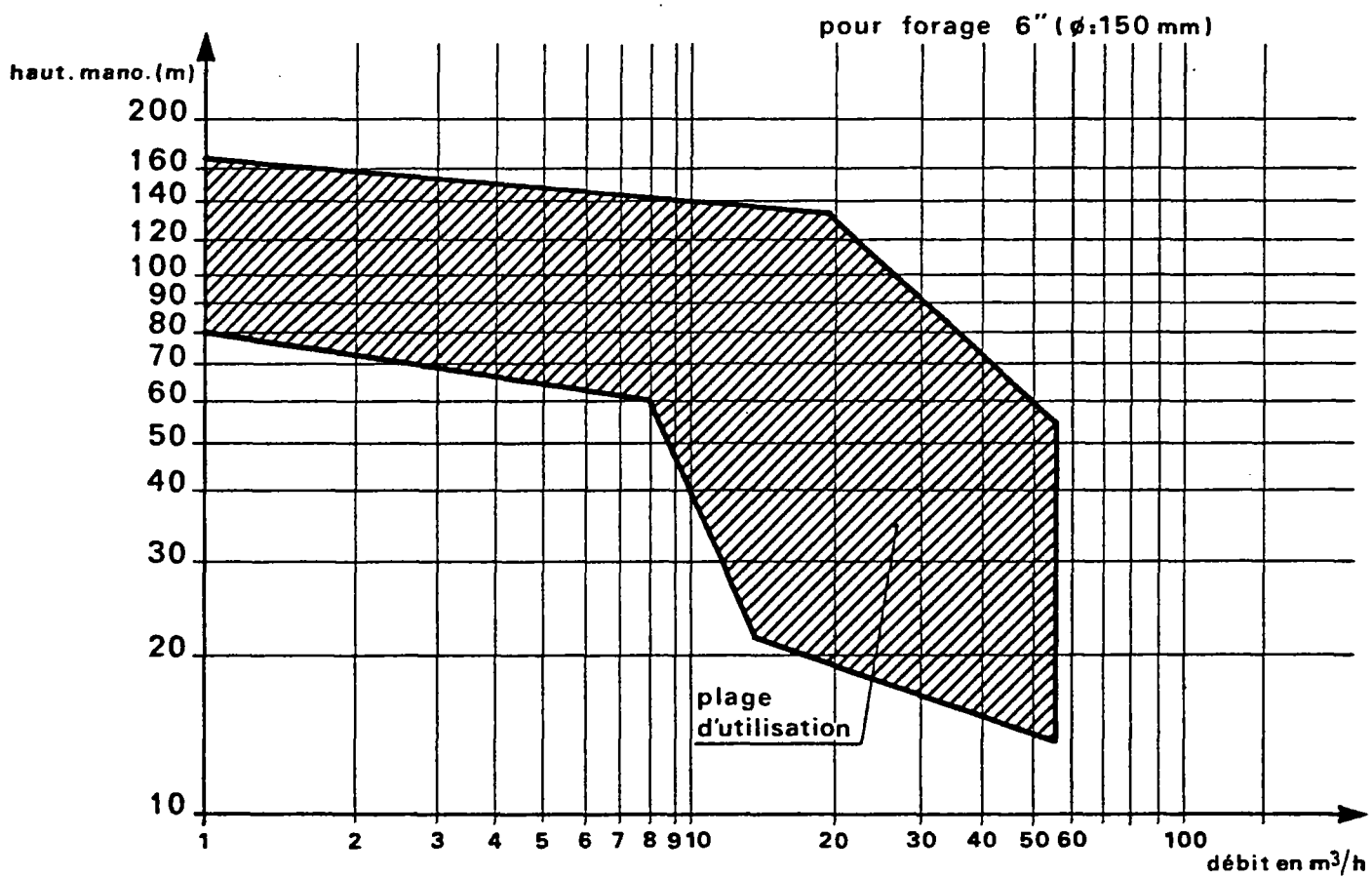
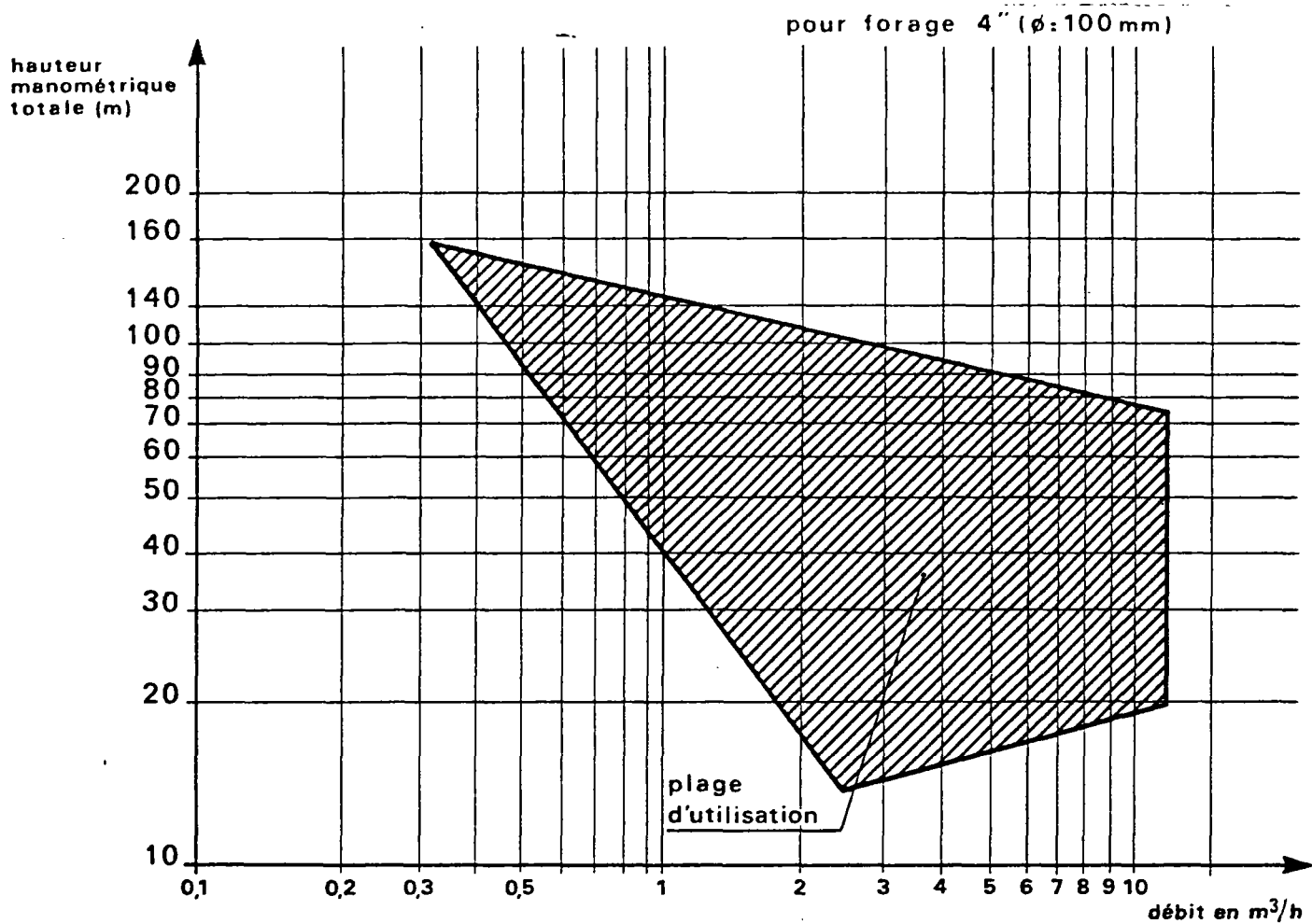
Q = débit en m<sup>3</sup>/h

H = hauteur manométrique totale en mètre de colonne liquide

σ = poids spécifique du liquide kg/m<sup>3</sup>

η = rendement de la pompe.

Figure 27 : Plage d'utilisation pour pompes de forages 4" et 6"



Les meilleures pompes centrifuges ont des rendements de 0,80 à 0,85.

S'il s'agit d'un groupe électro-pompe, l'intensité du courant électrique triphasé qui l'alimente sera :

$$I = \frac{1000 P}{E \sqrt{3} \cos \varphi}$$

I = intensité en ampère

P = puissance en kilowatt

E = tension en volts entre phase

$\cos \varphi$  = facteur de puissance, en moyenne 0,8.

#### 2.3.4. COURBE DE NPSH requis ou de hauteur de charge nette absolue

La courbe NPSH requis, d'allure parabolique représente en fonction du débit et pour une vitesse de rotation donnée l'abaissement de la ligne de charge entre la bride d'aspiration de la pompe et le point dans la pompe pour lequel la pression absolue passe par un minimum.

#### 2.3.5. POINT DE FONCTIONNEMENT D'UNE POMPE

L'utilisateur ou l'ingénieur se pose souvent le problème suivant : connaître le débit et la hauteur manométrique engendrés par une pompe donnée débitant dans un réseau ou une conduite.

La perte de charge totale d'une conduite, en fonction du débit du liquide peut être portée sur un graphique. La courbe ainsi obtenue est appelée : courbe caractéristique de la conduite. Puisque la perte de charge est proportionnelle au carré du débit, la courbe sera une parabole. Dans un tel graphique, on peut également représenter la hauteur géométrique d'élévation en fonction du débit, ce qui permet de déterminer de façon simple, la somme de la hauteur géométrique et de la hauteur équivalente en pertes de charge.

### 2.4. VITESSE DE ROTATION DES POMPES CENTRIFUGES

Les courbes caractéristiques des pompes centrifuges sont tracées pour un fonctionnement à une vitesse donnée. Les vitesses généralement retenues sont celles données par les moteurs asynchrones les plus courants :

- à 50 Hz : moteur 2 pôles : environ 2800 tr/mn  
           moteur 4 pôles : environ 1450 tr/mn  
           moteur 6 pôles : environ 970 tr/mn
- à 60 Hz : moteur 2 pôles : environ 3500 tr/mn  
           moteur 4 pôles : environ 1750 tr/mn

Lorsque la vitesse varie de  $n_1$  tr/mn à  $n_2$  tr/mn, les points  $Q_1$ ,  $N_1$ ,  $P$ , des courbes de fonctionnement à la vitesse  $n_1$  deviennent à la vitesse  $n_2$  (fig. 13) :

$$Q_2 = \frac{n_2}{n_1} Q_1 \quad H_2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 H_1 \quad P_2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 P_1$$

Par exemple, une pompe qui tournerait deux fois plus vite verrait son débit multiplier par 2, sa hauteur multipliée par 4 et sa puissance absorbée multipliée par 8.

On conçoit donc aisément qu'une pompe peut toujours tourner à une vitesse inférieure à la vitesse pour laquelle elle a été définie. Inversement, un fonctionnement à une vitesse supérieure demande une étude particulière et l'accord du constructeur de pompe.

## 2.5. PUISSANCE ABSORBÉE PAR LES POMPES - PUISSANCE DES MOTEURS (fig.28) (d'après SOGREAH)

Pour de petites puissances, le moteur est généralement livré avec la pompe. Pour de grosses puissances, il incombe souvent à l'utilisateur de choisir les caractéristiques du moteur.

La puissance absorbée par la pompe sera calculée par la formule déjà décrite en 2.3.3. :

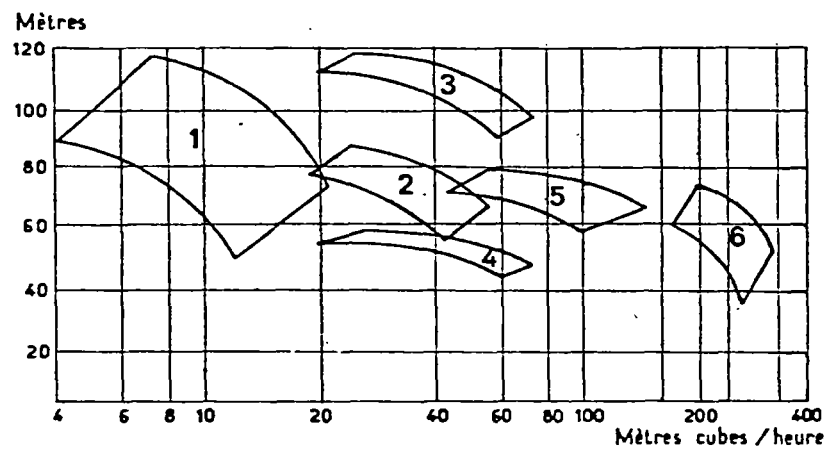
$$P = Q.H.\sigma/368 \eta$$

Il conviendra cependant pour calculer la puissance du moteur de tenir compte des pertes diverses de transmission, d'erreurs éventuelles pour la détermination des pertes de charge et du couple de démarrage.

A cet effet, les majorations à prévoir en fonction de la puissance absorbée par la pompe sont au moins :

- de 30 % pour une puissance de 5 CV (6,8 kW)
- de 20 % pour une puissance comprise entre 5 et 25 CV
- de 10 % pour une puissance supérieure à 25 CV (34 kW).

A titre indicatif, le rendement théorique d'un moteur thermique est de l'ordre de 0,30 (rendement thermique) et celui d'un moteur électrique de 0,90 (non compris les organes de transmission éventuels).



: Courbes caractéristiques de pompes aspirantes (pour chaque type, les enveloppes délimitent des plages de performance variables suivant la puissance du moteur choisi).

- 1 : multicellulaire, moteur 4 à 10 ch,
- 2 : » » 15 à 20 ch,
- 3 : » » 25 à 30 ch, même rotor,
- 4 : » » 15 à 20 ch,
- 5 : » » 30 à 50 ch,
- 6 : monocellulaire.

Figure 28

### 3. LES DIFFÉRENTES ÉNERGIES D'UTILISATION

#### 3.1. ENERGIE HUMAINE ET ANIMALE d'après [1]

##### 3.1.1. ENERGIE HUMAINE

"C'est par définition l'homme (la femme ou l'enfant) qui actionne la pompe à main".

La plupart des pompes à main utilisées pour l'approvisionnement en eau domestique sont actionnées par de nombreux utilisateurs, chacun d'entre eux pompant pendant quelques minutes seulement. Les utilisateurs se recrutent plus facilement parmi les femmes et les enfants que parmi les hommes.

Pour plus de détail sur les pompes à énergie humaine, il faudra consulter l'étude détaillée effectuée par G. BRETTE [13].

##### 3.1.2. ENERGIE ANIMALE

"Bien qu'ils constituent une source d'énergie courante et vitale dans les pays en voie de développement, les animaux de trait ne sont pas utilisés très fréquemment pour le pompage des eaux à usage domestique (pollution trop importante). Ils sont par contre très largement utilisés en Afrique et en Asie pour le pompage des eaux d'irrigation en provenance de puits ouverts peu profonds et à très large diamètre. L'énergie animale s'adapte fort mal à l'entraînement direct des pompes verticales à mouvements alternatifs. Le rendement de l'animal se révèle optimal lorsqu'il est utilisé à emplacement fixe et harnaché pour tirer des balanciers rotatifs circulaires. Cette méthode requiert la présence d'engrenages et de pompes lentes à grand déplacement."

Un cheval de 700 à 850 kg peut travailler jusqu'à 10 heures/jour à une puissance de 0,746 kW. Pour des efforts brefs de 5 à 10 minutes, un cheval peut fournir 3 kW environ.

L'énergie animale fournie par des spécimens adultes en pleine santé peut être évaluée pour d'autres animaux conformément à la relation :

$$\text{Puissance animale} = 0,746 \left( \frac{\text{masse de l'animal}}{\text{masse du cheval}} \right)^{0,73}$$



### 3.1.3. AVANTAGE ET INCONVENIENT DE L'EXHAURE TRADITIONNELLE

(d'après A. BENAMOUR)

"Le puisage est pratiqué à l'aide d'une corde et d'un récipient manoeuvrés à bout de bras ou tirés par un ou plusieurs animaux (ânes, boeufs, chameaux).

Il est évident que ce mode d'exhaure ne peut se pratiquer que sur un puits de diamètre suffisant (1 à 2 m) en l'absence de moyens mécaniques installés à demeure sur l'ouvrage.

Dans les pays en voie de développement, les cordes et les poulies sont fabriquées localement, les récipients de diverses contenances (5 à 40 l) sont des Calebasses, des emballages métalliques récupérés, des chutes de chambres à air ou des poches de cuir (delous). Tous ces instruments appartiennent aux usagers.

Le puisage traditionnel est le plus souvent individuel, chaque utilisateur travaillant pour son propre compte avec son propre matériel, mais il peut être collectif, surtout lorsque le niveau de l'eau se trouve entre 30 et 80 m. Deux ou trois personnes sont alors nécessaires pour conduire l'animal de trait, guider la corde sur la poulie et vider le delou.

Les inconvénients de l'exhaure traditionnelle sont bien connus :

- pollution de l'eau,
- travail extrêmement pénible pour les grandes profondeurs,
- limite de la consommation au strict minimum,
- détérioration rapide de l'ouvrage.

Mais il y a aussi des avantages évidents :

- prix de revient au puisage nul,
- puits rabattu au maximum (ceci est très important dans les zones où les débits sont faibles),
- pannes inexistantes. Le matériel est entretenu ou remplacé par l'utilisateur puisqu'il est sa propriété,
- puisage adapté à toutes les profondeurs,
- puits ne nécessitant aucune surveillance et fonctionnant 24 h/24,
- débits instantanés relativement importants.

A titre d'exemple, il a pu être observé :

- 4 m<sup>3</sup>/h à 20 m, 15 personnes puisant en même temps sur un puits de 2 m de diamètre (Sénégal),
- 4 m<sup>3</sup>/h à 60 m avec 6 gourdes installées et traction animale sur un puits de 1,80 m de diamètre".

### 3.1.4. IMPORTANCE DE LA POMPE A MAIN DANS L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE (C.I.R. = Centre International de Référence - Faits nouveaux - Avril 1982)

"Un objectif ambitieux a été établi par les Nations Unies pour procurer de l'eau potable à environ 1 000 millions d'habitants ruraux qui n'ont pas actuellement accès à de l'eau saine adéquate. Les pompes à main installées sur des puits de l'eau souterraine est localement disponible, apportent une solution par une méthode des plus simples et des moins coûteuses pour fournir de l'eau à la population rurale".

"Les estimations faites pour les besoins mondiaux en pompes à main sont nécessairement imparfaites. Une estimation raisonnable indique qu'à présent, environ 250 à 400 millions de personnes sont fournies en eau par des pompes à main. Les programmes en approvisionnement en eau rurale envisagés dans les pays en voie de développement pour couvrir les objectifs de la Décennie de l'eau fourniraient à quelque 400-700 millions de personnes supplémentaires des approvisionnements en eau par pompes à main. Pendant la même période, des pompes à main desservant 100 à 200 millions de personnes auront besoin d'être remplacées".

"En se basant sur ces chiffres, le besoin mondial en pompes à main peut être estimé de l'ordre de 8 à 10 millions d'unité pour une moyenne de 100 personnes par pompes".

### 3.1.5. CHOIX D'UNE POMPE A MOTRICITE HUMAINE

#### 3.1.5.1. En fonction des conditions d'utilisation

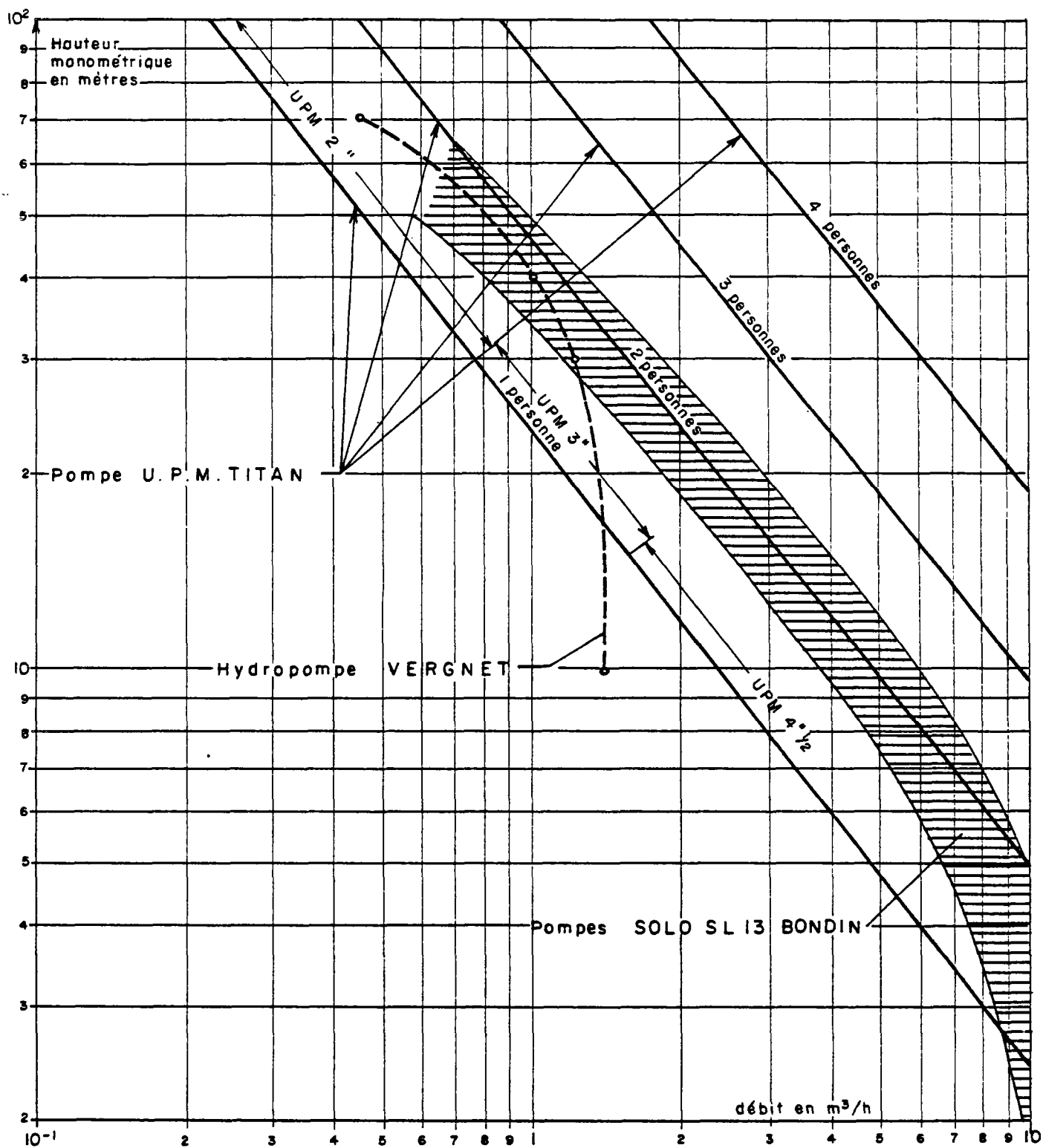
Tout comme les pompes à moteur, les pompes à motricité humaine doivent être choisies en fonction de leur domaine d'utilisation défini par la relation : débit/profondeur d'exhaure (fig. 29).

#### . Débit de refoulement

Le débit de refoulement théorique d'une pompe à main alternative à effet simple en fonction du volume du cylindre parcouru par le piston durant sa course ascendante et pompante et du nombre de course par unité de temps :

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot N \cdot S$$

fig. 29 - Caractéristiques de 3 pompes françaises de conception différentes



Q = débit en m<sup>3</sup>/h

D<sup>2</sup> = diamètre du cylindre en mètre

N = nombre de course/heure

S = longueur de la course du piston.

### . Force hydraulique

La force hydraulique sur le piston est égale au produit de la pression hydrostatique et de la surface du cylindre :

$$F = H \cdot \sigma \cdot \frac{\pi D^2}{4}$$

F = force en kg

H = hauteur élévation en mètre

$\sigma$  = poids spécifique kg/m<sup>3</sup>.

Le poids immergé de la tige de pompe doit être ajouté à la force hydraulique, le poids des autres éléments se révèlent généralement négligeable.

Il est nécessaire que la force requise soit compatible avec celle admissible pour un effort moyen (Em) ; pour adapter la pompe à ces contraintes, il faudra jouer sur le diamètre du cylindre. Et plus la hauteur de refoulement sera importante, plus le diamètre du cylindre devra diminuer.

A titre d'exemple, on représentera les débits exhaurés en fonction des caractéristiques d'une pompe alternative (type SOLO SL3 de marque A. BODIN) : profondeur, diamètre du piston et effort exercé (8/10 kg ou 11/12 kg) selon le placement de l'axe en position 2 ou 1.

Ø boîte à piston (mm)	Profondeur (m)	Position 1 ou 2 de l'axe : Effort en kg			
		8/10 kg	Q m <sup>3</sup> /h	11/12 kg	Q m <sup>3</sup> /h
100	10	2	4,3	1	5,0
80	15	2	2,7	1	3,3
70	20	2	2,1	1	2,5
50	30	1	1,3	-	-
45	40	2	0,87	1	1,0
40	50	2	0,68	-	-
40	60	-		2	0,68

### . Profondeur d'exhaure

Un rapport du Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (C.I.E.H.) en 1977 sur les moyens d'exhaure en milieu rural à recenser les pompes à main d'un pays africain ainsi que leur conditions d'utilisation.

La majorité des pompes utilisées était descendue à une profondeur de 30 m avec un débit d'exhaure de 1 m<sup>3</sup>/h en moyenne. Au-delà de 30 m et jusqu'à 60-65 m seules quelques pompes donnent satisfaction, mais les débits sont faibles de 0,4 à 0,6 m<sup>3</sup>/h.

Ce débit peut être augmenté pour certaines catégories de pompes actionnées par plusieurs personnes.

### 3.1.5.2. En fonction des sujétions de maintenance

Pour le choix d'un modèle de pompe, en l'absence d'éléments techniques déterminants, en présence de plusieurs modèles en concurrence, dans les pays en voie de développement la décision devra s'appuyer sur les critères suivants :

- Possibilité de construction (ou montage) de la pompe dans le pays de façon à assurer l'existence d'un approvisionnement en pièces de rechange.
- Mécanisme simple mettant en jeu le moins de pièces possibles.
- Accessibilité du mécanisme pour entretien (changement de joints du piston notamment) par les moyens villageois.
- Légèreté et faible encombrement pour une manutention facile, sans l'aide de lourds moyens de levage (ce qui n'est pas le cas pour les pompes à tringleries).
- Résistance des mécanismes à la présence de sable fin (soit de l'aquifère, soit éoliens) par une grande étanchéité, dont les composants sont également accessibles.
- Opérations d'entretien courant, de technologie simple, facilement assimilable par le milieu rural.

### 3.2. LES EOLIENNES

#### 3.2.1. GENERALITES

L'énergie éolienne a été de tout temps utilisée par l'homme. Le pompage d'eau par l'énergie éolienne n'a pas eu tous les résultats escomptés dans les pays africains. Il faut bien préciser qu'avant toute installation d'éolienne, il faut établir une étude précise de la répartition dans le temps de la vitesse du vent : donnée qui permettra de calculer alors l'énergie disponible. Il faudra, tout autant préciser les vitesses limites maximales atteintes (tornades, cyclones) qui ont causé des dommages et des destructions entraînant l'abandon de ce type de matériel (fig. 30).

Si l'on prend en exemple l'Afrique, l'emploi de l'éolienne pour l'exhaure de l'eau est déconseillée au Sud du 15<sup>e</sup> parallèle (seules les bandes côtières et les sites montagneux particuliers présentent des vents utilisables). Au Nord du 17<sup>e</sup> parallèle, l'éolienne peut fonctionner correctement : la majeure partie de la Mauritanie, le Nord Mali, le Nord Niger, le Nord Tchad. Entre le 15<sup>e</sup> et le 17<sup>e</sup> parallèle, le succès de l'implantation dépendra des conditions locales et du choix judicieux de l'emplacement précis de l'éolienne (CIEH n° 17).

#### 3.2.2. NOTIONS THEORIQUES

La puissance du vent varie avec le cube de la vitesse du vent. La puissance disponible est fonction du diamètre du rotor (fig. 31).

La puissance réelle de pompage peut se calculer par la formule :

$$P = 2.10^{-6} D^2 V^3 e$$

P = en kW

D = diamètre du rotor en m

V = vitesse du vent km/h

e = rendement mécanique

Le rendement moyen de l'énergie du vent par rapport à l'énergie utilisable pour exhaure l'eau, c'est-à-dire le rendement mécanique du système vent/eau varie de 20 à 40 % selon le type d'éolienne.

Pour les éoliennes à pales multiples avec vitesse faible du vent, le rendement est de 20 %. Pour un aérogénérateur bipale moderne avec une vitesse de vent moyenne, le rendement est de 45 %.

Le fonctionnement d'une éolienne est lié à quatre valeurs de la vitesse du vent (fig. 32) :

-  $V_0$  = Vitesse de démarrage

Vitesse par laquelle la machine commence à tourner, mais sans fournir d'énergie, sauf pour les pompes à piston où  $V_0 = V_a$ .

-  $V_a$  = Vitesse d'amorçage

C'est la vitesse pour laquelle la machine commence à fournir de l'énergie. Pour le cas d'une installation de pompage  $V_a$  est la vitesse pour laquelle la pompe commence à débiter.

-  $V_n$  = Vitesse nominale

C'est la vitesse pour laquelle la pleine puissance de l'équipement est atteinte.

-  $V_{max}$  = Vitesse de mise hors service

C'est la vitesse maximale que peut supporter l'éolienne pour éviter toute destruction.

#### Critère de classification des éoliennes :

Elles peuvent être classées suivant :

- la position de leur axe d'entraînement : axe vertical ou axe horizontal,
- leur vitesse d'utilisation : vitesse lente ou vitesse rapide,
- le nombre de pales d'entraînement : multiples ou bipales.

### 3.2.3. ÉOLIENNES A AXE VERTICAL

C'est une éolienne à vitesse lente adaptable aux pompes à piston ou à diaphragme.

Ce type d'éolienne est plus connue sous le nom de SAVONIUS. Un modèle de construction artisanale adapté à l'Afrique a été mis au point à Dakar.

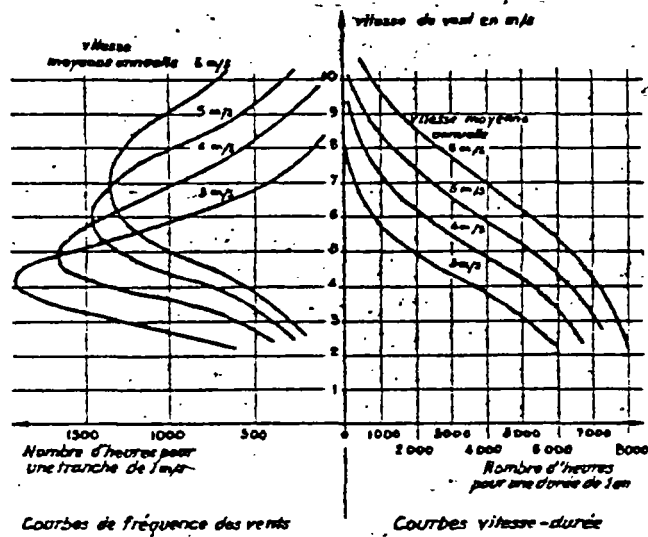


Figure 30

### COURBE DE FREQUENCE DES VENTS ET DE VITESSE-DUREE

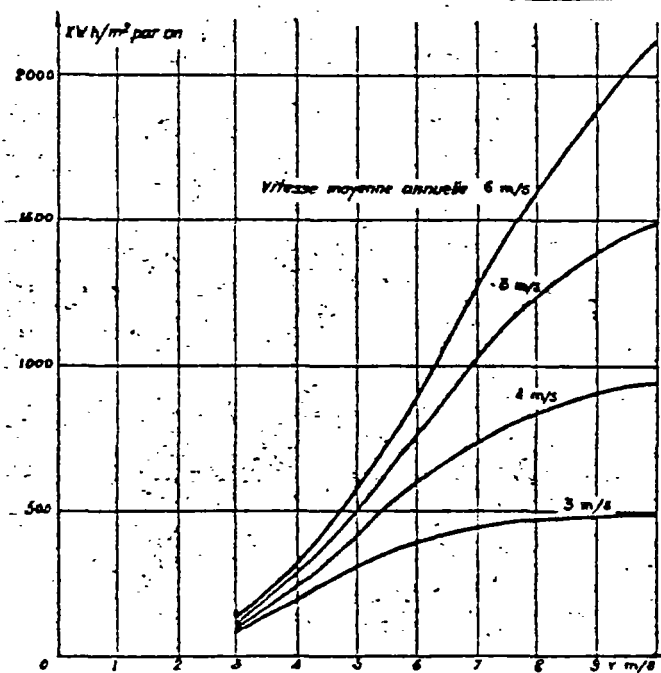


Figure 31

### ENERGIE TOTALE DISPONIBLE ANNUELLE PAR M<sup>2</sup> DE SURFACE EN FONCTION DE LA VITESSE NOMINALE

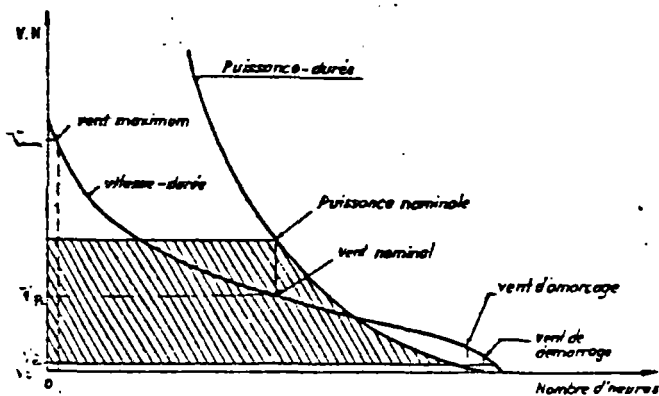


Figure 32

### CONDITION D'EMPLOI D'UNE EOLIENNE



Le rotor à axe vertical est formé par des demi-fûts d'une capacité de 200 l coupés en deux dans le sens longitudinal et assemblés tête-bêche.

Ce type d'éolienne a été adapté aux pompes VERGNET utilisant soit une ou deux pompes.

Les débits d'exhaure par ce couplé éolienne-pompe : SAVONIUS-VERGNET sont de 1 m<sup>3</sup>/h pour une hauteur manométrique totale de 30 m, soit 50 % de plus qu'une pompe VERGNET à énergie humaine.

### 3.2.4. EOLIENNES A AXE HORIZONTAL

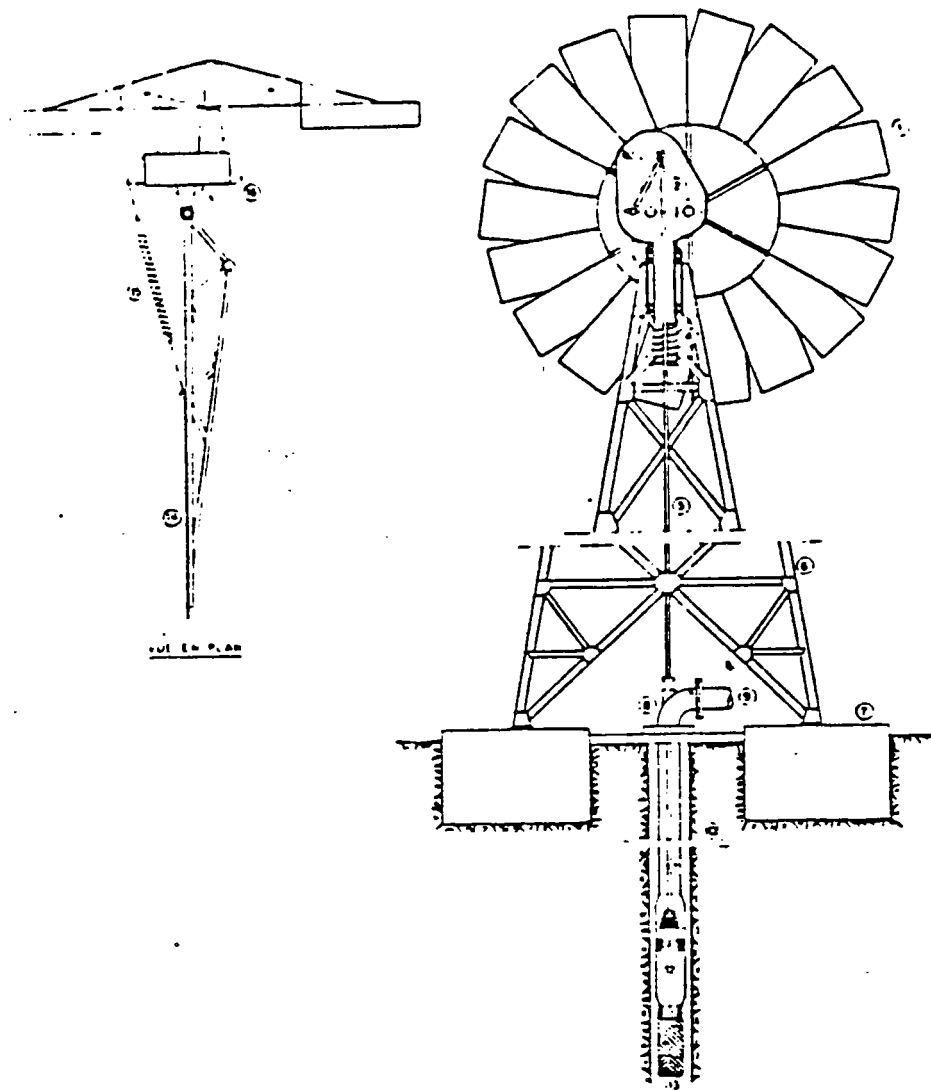
#### 3.2.4.1. Eolienne multipale à vitesse lente (fig. 33) .

L'éolienne multipale, destinée au pompage par pompes à piston immergées pour toutes profondeurs, est constituée par une roue de 2 à 9 m de diamètre environ, sur laquelle est rattaché un grand nombre de pales obliques. Le mouvement rotatif issu de l'éolienne est transformé en mouvements rectilignes transmis au piston par tringles coulissantes.

- Certaines pompes à main peuvent être adaptées pour être mues par l'énergie éolienne. Des programmes d'expérimentation ont été établis par le C.I.E.H. pour la pompe VERGNET.
- Le mécanisme est complété par un dispositif d'orientation et un système de mise en drapeau automatique en cas de vent violent.

Le tableau ci-après donne des caractéristiques de certaines machines, le débit étant calculé pour un vent moyen de 6,5 m /s :

Diamètre de la roue (m)	2,42	3,05	3,85	4,85	6,10
Course du piston (mm)	190	240	310	384	490
Vitesse de rotation pour un vent de 6,5 m/s (tr/mn)	75	62	49	37,5	30
Nombre de coups de piston par minute	30	25	22	19	16
Hauteur du pylone	12	12	15	15	15
Débit en m <sup>3</sup> /h pour Hm 100 m	0,315	0,520	0,960	1,67	2,65
Débit en m <sup>3</sup> /h pour Hm 50 m	0,62	1,02	1,86	3,35	5,3
Débit en m <sup>3</sup> /h pour Hm 20 m	1,55	2,56	4,8	8,45	13,2



### Eolienne multipale à vitesse lente

- |  |  |
|--|--|
| 1. Pales   | 10. Forage                                 |
| 2. Système bielle-manivelle                          | 11. Tige creuse                            |
| 3.4. Système adaptateur entre l'éolienne et la pompe | 12. Corps de pompe                         |
| 5. Tringle de liaison                                | 13. Crépine                                |
| 6. Support treillis                                  | 14. Gouvernail                             |
| 7. Massif d'ancrage                                  | 15. Ressort de rappel pour mise en drapeau |
| 8. Tête de pompe                                     | 16. Articulation                           |
| 9. Refoulement                                       |  |

Figure 33

Chaque type de machine est prévu pour fonctionner avec deux ou trois valeurs différentes de courses de piston, et donc on peut ainsi adapter les débits aux besoins, Hm étant la hauteur manométrique totale définie.

### 3.2.4.2. Eoliennes rapides ou aéromoteur (fig. 34)

Ce type d'éolienne transforme l'énergie mécanique produite par le vent sur les pales (au nombre de 2 à 3) de l'hélice en énergie électrique par l'intermédiaire d'une dynamo ou d'un alternateur. Cette électricité sera transmise à une pompe à alimentation électrique soit à axe vertical, à corps de pompe en surface, soit à un groupe électropompe immergé.

Ce type d'éolienne est plus adapté aux pompes centrifuges car il est possible de faire coïncider les zones de fonctionnement à rendement maximum de l'éolienne et de la pompe. Mais ces appareils sont à déconseiller dans des pays subissant de fortes et rapides variations de vent (tornado). De plus, leur entretien très important nécessite un personnel permanent à proximité.

Pour ce type d'éolienne, il n'est pas nécessaire de l'implanter au-dessus de la pompe. Ce qui est un avantage certain, car les conditions maximales d'exploitation de la nappe d'eau peuvent être différentes du site à rendement maximum pour l'éolienne. De plus, il existe la possibilité de stocker l'énergie produite par l'aérogénérateur.

On pourra ainsi restituer cette énergie accumulée dans des batteries lors des jours sans vent.

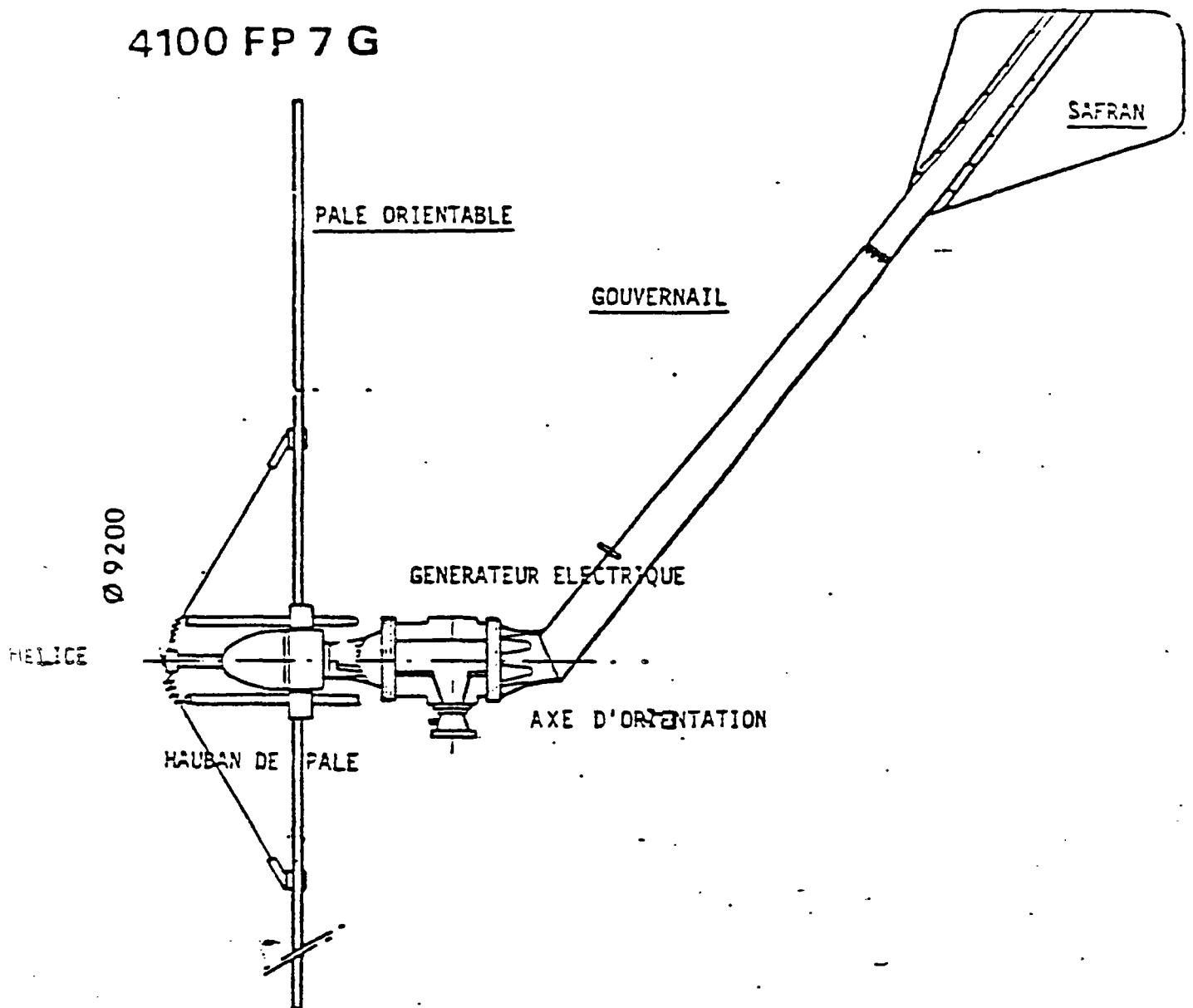
#### - Caractéristiques techniques usuelles

- . Vitesse de rotation de l'hélice : de 100 à 1000 tr/mn suivant la taille.
- . Puissance unitaire : de 24 à 1500 W.

Le tableau ci-après donne un exemple de débit d'exhaure en m<sup>3</sup>/h pour une puissance électrique nominale fournie (Pn) par l'aérogénérateur et pour une hauteur manométrique totale (Hm) :

Hm	Pn	500 W	1200 W	4500 W
	débit Q en m <sup>3</sup> /h			
15		5,2	17,6	66,8
25		3	8,8	45
35		1,72	6,14	30,4
45			3,9	22
55			3,1	16,6
65			2,6	14,2
75			2,1	12
85			1,69	10,4

# AEROGENERATEUR 4100 FP 7 G



## CARACTERISTIQUES AERODYNAMIQUES

Vitesse de vent nominale :	7 m/s
Vitesse de démarrage :	2 m/s
Vitesse de vent destructrice :	60 m/s
Poussée maximale à 60 m/s :	860 daN
Vitesse nominale de rotation en charge :	152 t/m
Vitesse de rotation maximale à vide :	160 t/m

## CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES

Puissance disponible aux bornes de la machine  
4500 VA au régime nominal (220 - 380 V, 50 Hz)  
Puissance disponible en courant continu aux bornes  
du tableau de contrôle : 4000 Watts au régime  
nominal sous 48, 120, 240 Volts, sur demande.

Vit. moyenne du vent	4m/s	5m/s	6m/s	7m/s
Puissance moyenne estimée en Watts	1300	1800	2300	2600
Energie mensuelle estimée en KWh	936	1300	1656	1872

Figure 34 (doc. AEROWATT)

- Choix de type de l'éolienne

Ce choix devra se faire suivant les caractéristiques et les différentes contraintes liées à chaque type et résumées dans les tableaux ci-après :

TABLEAU RECAPITULATIF DES CARACTERISTIQUES DES EOLIENNES POUR L'EXHAURE DE L'EAU

PRINCIPE	EOLIEENNE MULTIPALE	EOLIEENNE SAVONIUS	AEROGENERATEUR
	Eolienne multipale + excentrique + tringles + pompe à piston	Rotor SAVONIUS + réducteur + hydropompe VERGNET	Aérogénérateur couplé à une pompe électrique immergée ou en surface
Débit	0,4 à 0,6 m <sup>3</sup> /h à 50 m pour éoliennes AERMOTOR diamètre de roue : 6 m	1 m <sup>3</sup> /h à 30 m pour le modèle 1/6- ultérieurement 20 à 30 m <sup>3</sup> /jour	3,5 m <sup>3</sup> /h à 30 m pour le modèle AEROWATT 1125 VA ; 12 m <sup>3</sup> /h à 30 m pour le modèle 4100 VA à 7 m <sup>3</sup> /s
Fonctionnement par vent faible	oui > 3 m /s	oui > 2 m /s	oui, mais à puissance réduite
Fonctionnement par vent fort	non mise en drapeau	oui (stabilisation au-delà de 6 m/s)	oui
Technicité	moyenne	moyenne	élevée
Simplicité + Entretien	moyenne	moyenne	Entretien de routine simple, entretien approfondi complexe
Possibilité construction locale	oui	oui pour l'essentiel	oui dans pays ayant un potentiel industriel suffisant
Coût	modéré	modéré	élevé
Nécessité installation au-dessus du puits	impératif (compte tenu des tringles)	oui, à quelques mètres (transmission hydraulique)	non
Possibilité d'implantation en un lieu distinct	non	non	oui
Possibilité de contrôle de niveaux	non	non	oui
Fiabilité	bonne avec entretien	bonne avec entretien	bonne
Possibilité pompage à plus de 50 m	non	non	oui, pas de limite avec pompe électrique immergée

	EOLIEENNE MULTIPALE	EOLIEENNE SAVONIUS	AEROGENERATEUR - POMPE ELECTRIQUE
AVANTAGES	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Démarrage excellent par faible vent (2,5 à 3 m /s).</li> <li>- Faible vitesse de rotation bien adaptée au fonctionnement d'une pompe à piston commandée par tringlerie.</li> <li>- Grande simplicité de construction facilitant la fabrication éventuelle sur place.</li> <li>- Maintenance faible ne demandant pas de qualification élevée.</li> <li>- Coût d'investissement modéré.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Technologie simple réalisable en partie localement.</li> <li>- Fiabilité assez bonne.</li> <li>- Entretien peu complexe.</li> <li>- Coût réduit.</li> <li>- Très bien adapté aux faibles vents (2-5 m/s) et à leur instabilité directionnelle éventuelle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bonne utilisation des vents moyens, forts et très forts.</li> <li>- Très bonne régulation (hélices à pas variable).</li> <li>- Multiplicité des utilisations courant alternatif ou continu, facilement utilisable : électropompe, éclairage-moteur.</li> <li>- Souplesse de l'installation, on peut mettre l'aérogénérateur à un endroit optimum bien venté et utiliser l'énergie à un autre endroit (transmission électrique).</li> <li>- Bonne fiabilité pour certains modèles.</li> </ul>
INCONVENIENTS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relativité, fragilité du dispositif mécanique au niveau de la tringlerie.</li> <li>- Inadaptation aux puits profonds &gt; 40 m (ruptures fréquentes des tringleries trop longues).</li> <li>- Impossibilité de fonctionner par vent fort.</li> <li>- Mauvaise adaptation aux changements de vitesse du vent.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rendement faible pour les vents &gt; 5 m/s, nécessité d'une maintenance régulière.</li> <li>- Résistance médiocre aux tornades.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de démarrage par vent faible.</li> <li>- L'obtention de la vitesse nominale suppose une vitesse du vent déjà importante (5 à 12 m/s).</li> <li>- Prix élevé, notamment pour les modèles performants.</li> <li>- Technicité élevée ne favorisant pas la construction et l'entretien par des moyens locaux.</li> </ul>

### 3.3. LES POMPES A ENERGIE SOLAIRE

#### 3.3.1. GENERALITES

La puissance moyenne disponible au sol par temps clair provenant du rayonnement solaire est de  $1 \text{ kW/m}^2$ .

Actuellement, en 1982, la contrainte d'ensoleillement minimum pour utiliser l'énergie solaire est de 2400 h/an (fig. 35).

Si l'énergie solaire possède des atouts certains (gratuité, production illimitée, répartition indépendante des obstacles et des distances) son coût est resté élevé pendant de nombreuses années par rapport à une pompe diesel - dans une étude comparative faite par la SEMA en 1978. Le coût du  $\text{m}^3$  pompé par le solaire (systèmes photovoltaïque ou thermodynamique) était le double par rapport au pompage diesel.

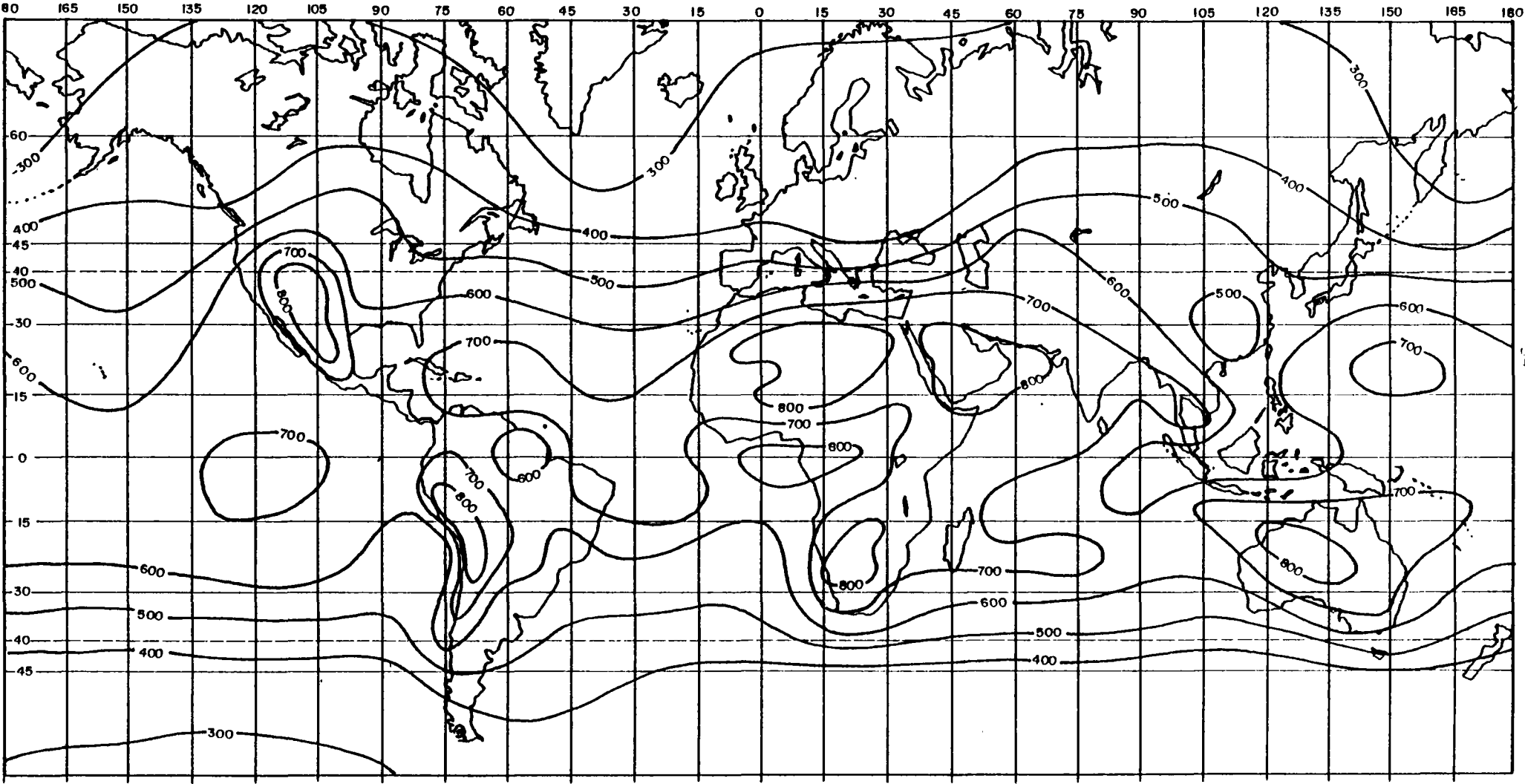
Une projection sur 1985 établit un coût du solaire au 1/3 du diesel. Il y a donc tout à parier pour que ce type de pompe se développe dans l'avenir. Il existe actuellement deux types de procédés :

- La conversion thermodynamique qui est décomposée en deux parties :
  - . à basse température et à capteurs plans, pour des puissances allant de quelques kW à une centaine de kW
  - . à moyenne température à capteurs à concentrations pour des puissances supérieures à une centaine de kW. (Ces puissances n'intéressent pas l'hydraulique rurale).
- La conversion photovoltaïque pour des puissances allant de quelques centaines de Watts à quelques kW.

#### 3.3.2. LA FILIERE THERMODYNAMIQUE (basse température) (fig. 36)

Le principe consiste à utiliser la chaleur émise par le soleil comme source chaude et l'eau pompée comme source froide. Un fluide spécial : butane ou fréon, réchauffé par l'eau chaude transforme cette énergie calorifique entre énergie mécanique ou électrique à basse température : évaporation, détente, condensation, réinjection.

fig. 35 - Carte d'ensoleillement du monde - Energie solaire en kJ /cm2



Le pompage peut être assuré :

- par une hydropompe, directement actionnée par l'arbre moteur du moteur à piston. Exemple : hydropompe VERGNET-MENGIN,
- par une pompe immergée électrique.

Les puissances actuellement disponibles sont de 1 à 60 kW.

#### - Intérêt de la filière thermodynamique en milieu rural

Des capteurs actuellement conçus ont un rendement de 3 % entre l'énergie solaire totale incidente et l'énergie au niveau de la pompe, pour des valeurs (nominales de  $6,5 \text{ kW/m}^2/\text{j}$ ) qui sont les puissances correspondant à l'ensoleillement des pays tropicaux à faible pluviométrie.

Les installations fonctionnent actuellement en Afrique sur programme d'Hydraulique Villageoise et pastorale. La durée de vie des installations est estimée à 10 ou 15 ans. Elles ne demandent pratiquement aucun entretien : une visite par an est seulement nécessaire. Mais la lourdeur des installations, la fragilité et l'entretien minutieux des systèmes mécaniques mis en jeu ne la prédispose pas en milieu rural très isolé.

### 3.3.3. LA FILIERE PHOTOVOLTAÏQUE (fig. 37)

#### 3.3.3.1. Principe

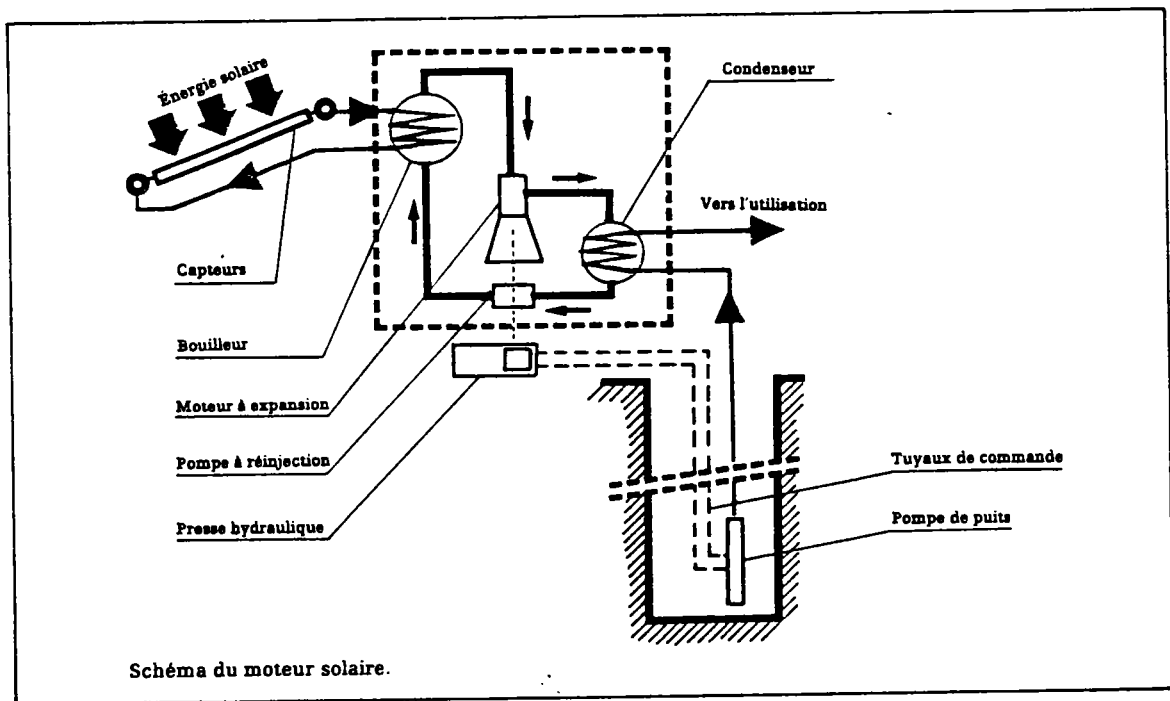
Les photopiles sont des composants qui transforment directement la lumière en électricité.

Les photons, particules élémentaires de la lumière, pénétrant à l'intérieur, libèrent des charges électriques qui seront collectées par le circuit électrique extérieur et qui pourra alimenter aussi bien une pompe électrique immergée qu'un accumulateur de batterie pour stocker l'énergie.

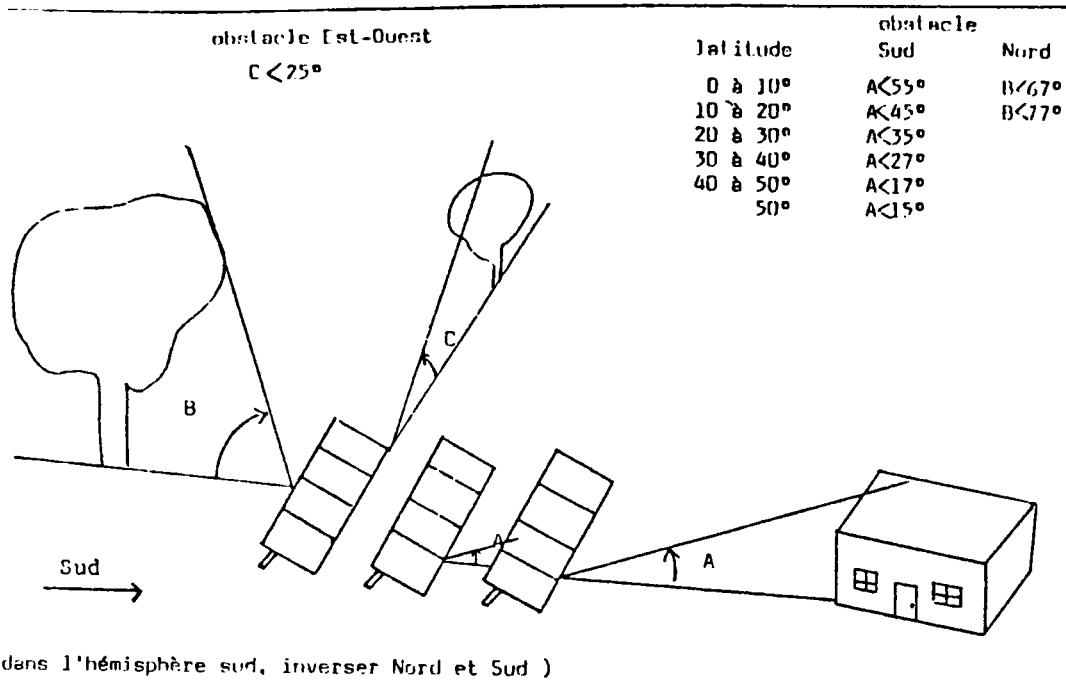
Le rendement pratique d'une photopile au silicium est de l'ordre de 12 % (rapport entre l'énergie électrique produite et l'énergie solaire incidente). Le rendement maximum de la filière photovoltaïque est estimé à 22 %.

L'unité de mesure est : la puissance de crête : c'est la puissance fournie par le module sous un rayonnement solaire théorique de  $1 \text{ kW/m}^2$ . Dans





**Figure 37** : Filière thermodynamique  
(Doc. SOFRETES)



**Figure 36** Angles approximatifs à respecter pour éviter des ombres néfastes sur les panneaux solaires.

la pratique, ce rayonnement est celui que l'on rencontre dans les pays tropicaux à l'ensoleillement maximum (midi). Cette puissance de crête est donc une valeur maximale.

En zone sahélienne, il est prudent de se baser sur  $600 \text{ W/m}^2$  (temps lumineux couvert).

Le démarrage du système se fait automatiquement, sans intervention manuelle, lorsque le soleil est à  $15$  ou  $20^\circ$  au-dessus de l'horizon et l'arrêt se fait lorsqu'il est en-dessous de  $10^\circ$  par rapport à l'horizontal (fig. 38).

L'ensemble de l'installation est en général conçu pour fonctionner sans aucune surveillance, ni entretien pendant des mois, seul un nettoyage de la surface des photopiles à l'eau pour les dépoussiérer tous les trois ou quatre mois est recommandé.

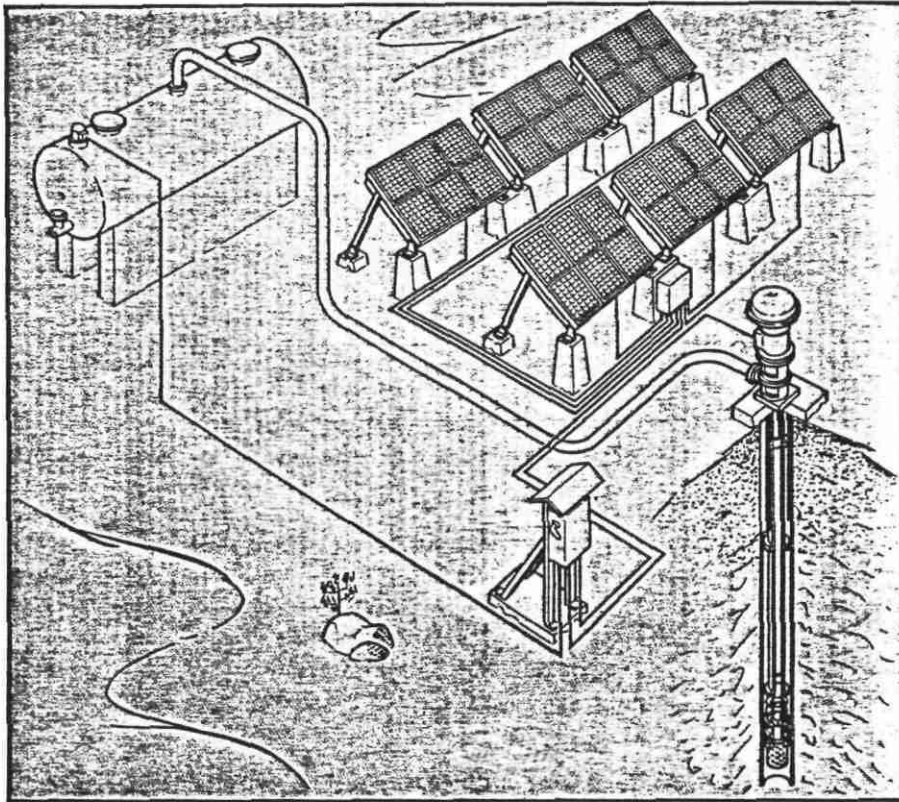
A titre d'exemple, la figure 39 indique les performances d'une pompe photovoltaïque pour forages.

### **3.3.3.2. Avantages présentés**

Ils sont pour les populations des régions arides :

- fonctionnement autonome sans surveillance,
- haute fiabilité, organes simples, entretien très limité, interventions espacés de deux ans,
- pas d'acheminement de carburant,
- transport de matériel et installation rapide (poids limité),
- peut-être localement déplacé (même à dos de bête) si le puits vient à s'assécher,
- non polluant, silencieux, pas de risques de créer des incendies de brousse,
- possibilité de faire l'installation et l'entretien par des agents locaux.

## Pompes solaires de Forage ALTA XF

**Description**

Un ensemble de pompage photovoltaïque comprend essentiellement:

- Un générateur solaire constitué de modules de photopiles orientés vers le sud dans l'hémisphère nord (vers le nord dans l'hémisphère sud).

La puissance est fonction de l'ensoleillement reçu.

- Un moteur électrique à courant continu couplé sans intermédiaire au générateur solaire.

Sa conception spéciale à vitesse variable permet l'adaptation instantanée de l'ensemble de pompage aux divers ensoleillements.

- Une pompe centrifuge horizontale de surface ou verticale de forage selon la profondeur d'aspiration. Le débit de cette pompe varie en fonction de sa vitesse donc de l'ensoleillement.

Le générateur solaire, le moteur et la pompe ont été spécialement conçus pour cette application; ils constituent un tout homogène où chaque élément est adapté aux autres pour obtenir un rendement maximum.

- Une armoire de commande comprenant un interrupteur manuel ainsi que le dispositif d'arrêt automatique lorsque le réservoir est plein.

Ces installations sont généralement complétées par un réservoir de stockage d'eau équipée d'un interrupteur à flotteur.

**Ces ensembles ne comportent pas de batterie couteuse ayant un mauvais rendement et nécessitant un entretien régulier.**

**Fonctionnement**

La pompe commence à tourner dans l'heure suivant le lever du soleil, le débit augmente progressivement jusqu'au milieu de la journée, puis décroît au cours de l'après-midi; la pompe s'arrête peu avant le coucher du soleil (durée moyenne de fonctionnement 8 à 10 heures par jour).

**Tout ceci se passe automatiquement sans aucune intervention humaine, ni pour la mise en route, ni pour l'arrêt du système.**

Le débit journalier de la pompe sera d'autant plus important que la nappe d'eau sera moins profonde et la puissance du générateur élevée.

**Pompes photovoltaïques pour forages** - Performances sous une exposition solaire de 6.500 Wh/m<sup>2</sup>/j.

hauteur manométrique totale (m)

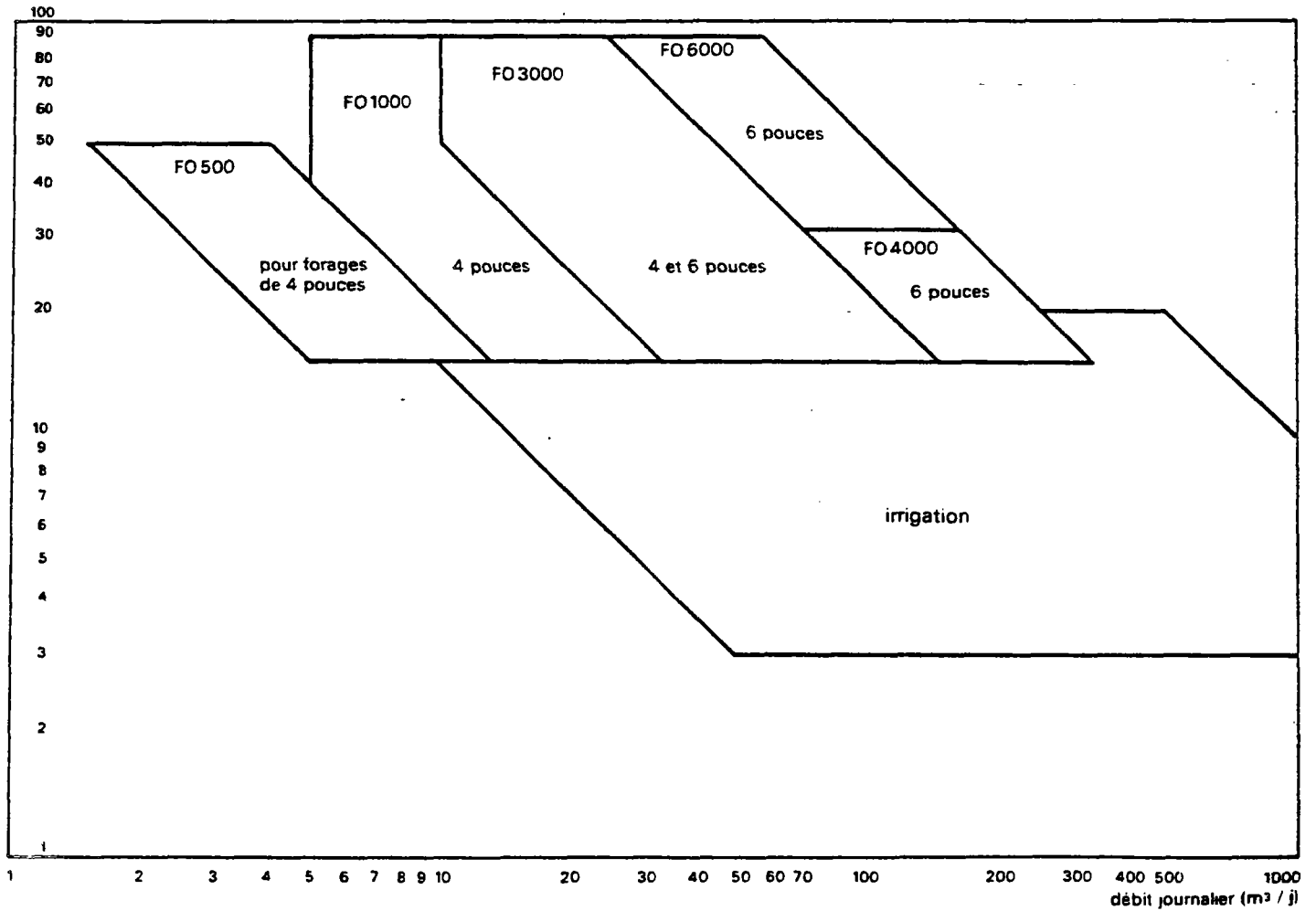


Figure 39 (doc. SOFRETES)

### 3.4. POMPES A MOTEURS ELECTRIQUES (d'après SOGREAH)

#### 3.4.1. CHOIX DU TYPE DE COURANT EN FONCTION DE LA PUISSANCE DES MOTEURS

Le tableau ci-après résume, en fonction de la nature du courant et des différentes tensions possibles, les limites des puissances admissibles.

Nature du courant Basse Tension	Tension en U	Puissance minimum Kw	Puissance maximum Kw
Continu	110	néant	41
	220	néant	680
	440	1,4	pratiquement illimité
Alternatif monophasé	110	néant	1,4
	220	néant	20
Alternatif biphasé	115	néant	20
	200	néant	272
	380	1,4	1359

Il convient cependant de faire remarquer que :

- le courant continu devra être le plus souvent produit par une génératrice entraînée elle-même par un moteur,
- l'usage du courant monophasé est limité aux petites puissances.

#### 3.4.2. LES DIFFERENTS TYPES DE MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS

Les types de moteurs qui se prêtent le mieux à l'entraînement des pompes sont les moteurs asynchrones et synchrones.

##### - Les moteurs synchrones

Les moteurs synchrones ont une vitesse qui est rigoureusement constante et proportionnelle à la fréquence du réseau. Ils fournissent un couple moteur pour cette vitesse. En dehors de cette vitesse, ils "décrochent" et le couple s'annule. Ces moteurs sont rarement utilisés pour les installations de pompage importantes : ils démarrent à faible charge.

## - Les moteurs asynchrones

Les moteurs asynchrones sont, par contre, d'un emploi général. Leur vitesse en charge est différente de leur vitesse de synchronisme. Parmi les moteurs asynchrones, les moteurs à cage et les moteurs à rotor bobiné sont pratiquement les seuls à être utilisés dans les stations de pompes.

### . Moteurs triphasés à cage

- \* **Simple cage.** C'est un moteur électrique simple. Son rendement est excellent. Les pointes d'intensité au démarrage sont relativement élevés (4 à 8 fois le courant normal), et le couple de démarrage est relativement faible. Le moteur convient pour les pompes centrifuges de faible puissance.
- \* **Double cage.** Il possède un couple de démarrage élevé qui peut atteindre deux fois le couple normal. L'intensité de courant de démarrage reste forte, et varie entre 5 et 6,5 fois le courant nominal.
- \* **Moteur à rotor bobiné.** Ce moteur convient particulièrement pour les pompes à fort couple de démarrage (pompe à piston).

## - Choix d'un moteur pour l'entraînement de pompe

Le tableau suivant résume les principales propriétés des différents types de moteurs.

Nature du courant	Type de moteur	Couple de démarrage	Courant de démarrage	Gamme de puissance	Type de pompe pour lequel ce moteur est recommandé
Continu	Shunt	Normal	Normal	Toutes puissances	Turbo-pompes
	Compound	Elevé	Normal	Toutes puissances	Pompes alternatives ou à couple de démarrage élevé
Alternatif monophasé	Répulsion	Elevé	Normal	Petites et moyennes puissances	Pompes volumétriques
	Induction Double alimentation	Moyen	Normal	Petites puissances	Turbo-pompes
Alternatif triphasé	Cage d'écureuil	Normal ou élevé suivant type	Normal	Toutes puissances	Turbo-pompes éventuellement pompes volumétriques
	Rotor bobiné	Elevé	Faible	Toutes puissances	Pompes alternatives ou à couple de démarrage élevé
	Synchrone à grande vitesse	Normal	Normal	Moyennes et grandes puissances	Turbo-pompes

### 3.5. LES MOTEURS THERMIQUES (d'après SOGREAH)

Dans le cas où la station de pompage ne pourra pas être reliée au réseau électrique, ce qui sera souvent le cas dans les pays en voie de développement, il faudra envisager un entraînement des pompes par moteur thermique. Leurs encombrements et poids sont toujours plus élevés que ceux des moteurs électriques.

#### 3.5.1. LES MOTEURS A ESSENCE

En raison de leur faible rendement (20 à 25 %) et de leur consommation en carburant élevée, ces moteurs ne seront utilisés que pour de petites installations ne fonctionnant qu'un temps limité (quelques centaines d'heures par an).

#### 3.5.2. LES MOTEURS DIESEL

Leur rendement est compris entre 30 et 40 %. Ils peuvent être utilisés pour des installations de moyenne et grande importance.

Les moteurs sont généralement horizontaux, cependant il existe des moteurs à axe vertical. L'accouplement aux pompes s'effectue soit directement, soit à l'aide de renvoi d'angle (rendement voisin de 95 %), ou de courroies dont le rendement varie selon les dispositions et les types (80 à 97 %).

Le démarrage s'effectue avec un moteur auxiliaire.

Les moteurs diesel peuvent être classés comme suit :

- moteurs lents (150 à 450 T/mn) généralement à 2 temps de plusieurs milliers de CV de puissance,
- moteurs semi-rapides (375 à 750 T/mn) généralement à 4 temps, 75 à 1500 CV (100 à 2000 Kw),
- moteurs rapides (1000 à 1500 T/mn) généralement à 4 temps, de quelques dizaines à plusieurs centaines de CV.

La consommation spécifique des moteurs diesel varie de 0,15 l/CV/h (0,11 l/Kw/h) à 0,25 l/CV/h (0,18 l/Kw/h).

Les puissances disponibles des moteurs diesel doivent être calculées compte-tenu des conditions d'altitude et de température ; les réductions de puissance annoncées par le constructeur sont :

- de 1 % par accroissement de 100 m d'altitude,
- de 1 % par élévation de 5°6 C au dessus de la température de 20° de l'air à son admission dans le moteur.



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

- [1] OMS-PNUD .- "Pompes à main" .- Centre International de référence pour l'alimentation en eau collective - Série Documentation Technique n° 10 - Octobre 1979, 266 p.
- [2] SOGREAH - MINISTERE DE LA COOPERATION .- "Les pompes et les petites stations de pompages " .- Collection Techniques Rurales en Afrique, deuxième édition - Novembre 1978, 216 p.
- [3] AFNOR .- Pompes Hydrauliques - Classification - Terminologie - N° E-44001
- [4] A. MABILLLOT .- Le Forage d'eau .- Guide Pratique, Crépines Johnson, France, 80 NAINTE - 1979, 237 p.
- [5] SEMA - MINISTERE DE LA COOPERATION .- Energies nouvelles et développement .- Collection "Technologie et Developpement" n° 2 - 1978
- [6] A. BENAMOUR .- Les moyens d'exhaure en milieu rural .- Centre Interafricain d'Etude Hydraulique C.I.E.H., mars 1977
- [7] A. BENAMOUR .- Hydraulique villageoise et moyen d'exhaure .- C.I.E.H., Ouagadougou - juillet 1981
- [8] C.I.E.H. .- Utilisation de l'énergie éolienne pour le pompage .- Bulletin n° 17 - 1974
- [9] O.M.S. - C.I.R. (Centre International de Référence) .- Faits nouveaux .- Avril 1982
- [10] J. FORKACIEWICZ .- Calcul des ouvrages de captages .- BRGM 76 SGN 380 AME
- [11] F. VITRAC .- Répertoire des pompes et moyens de puissage dans les forages .- BRGM rapport n° DS 64 A 23, janvier 1964, 33 p.
- [12] J. VOVARD .- Circulation des fluides et les pompes centrifuges .- JEUMONT SCHNEIDER - Documentation technique - Département Pompes Hydrauliques ARNAGE
- [13] G. BRETTE .- Les pompes à énergie humaine .- Rapport BRGM 83 SGN 436 EAU/AGE - 1983