

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

PRESENTE PAR :

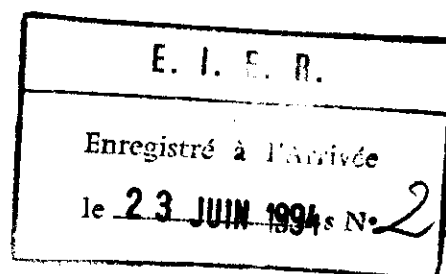
DAO Robert
ANNEE 1993-1994

ELABORATION DE RATIOS
TECHNICO-ECONOMIQUES POUR
L'EVALUATION DES PROJETS DE
POMPAGE PHOTOVOLTAIQUE AU SAHEL

Mention : **BIEN**

Encadrement

T. DJIAKO



DEDICACE

A DIEU le Père, le Fils et le Saint-Esprit,

A mon père,

A ma mère,

A ma famille et amis

je dédie ce mémoire, fruit de la miséricorde de DIEU.

S O M M A I R E

AVANT PROPOS	1
GLOSSAIRE	2
LISTE DES TABLEUX	3
RESUME	4
INTRODUCTION	7
CHAPITRE I: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	9
I.1 Estimation des ressources en eau au Sahel:	9
I.1.1 Ressources en eau de surface:	10
I.1.2 Ressources en eaux souterraines:	12
I.2 Evaluation des besoins en eau:	13
I.3 Gisement solaire et Electricité photovoltaïque:	16
I.4 Pompage photovoltaïque:	20
I.4.1 Présentation:	20
I.4.2 Limites d'utilisation du pompage photovoltaïque:	21
I.4.3 Positionnement du pompage photovoltaïque par rapport aux autres modes de pompage:	22
I.4.3.1 Les matériels traditionnels	22
I.4.3.2 Les pompes à motricité humaine	22
I.4.3.3 Les systèmes mécanisés	22
I.5 Technologies et évolutions du matériel:	25
I.5.1 Pompes de surface:	25
I.5.2 Pompes immergées:	26
I.5.2.1 Pompe à arbre long	26
I.5.2.2 Filière moteur à commutation électronique	27
I.5.2.3 Filière moteur à courant alternatif	27
CHAPITRE II: ANALYSE DU POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE	29
II.1 Analyse technique:	29
II.2 Analyse de la gestion technico-financière:	31
II.2.1 Acquisition:	31
II.2.2 Exploitation et maintenance:	33
II.2.3 Coût du pompage photovoltaïque:	40
II.3 Impacts Sociologiques:	44
II.3.1 Impact sur le développement:	44
II.3.2 Impact sur l'environnement:	45
II.4 Effets du pompage photovoltaïque:	46
CHAPITRE III: ELABORATION DES RATIOS TECHNICO-ECONOMIQUES	47
III.1 Ratios techniques:	47
III.2 Ratios économiques:	51
III.3 Etude de cas:	59
III.4 Recommandations:	63
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	64
BIBLIOGRAPHIE	65
LISTE DES ANNEXES	66
ANNEXES	67

A V A N T P R O P O S

Ce sujet de mémoire de fin d'études proposé par S.E.S. (Sahel Energie Solaire) entre dans le cadre de la formation à l'Ecole Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Equipement Rural (E.I.E.R.).

SAHEL ENERGIE SOLAIRE est un établissement privé burkinabé créé en 1982. Il a pour domaine d'activité le développement des équipements solaires photovoltaïques.

La réalisation de cette étude de fin de cycle d'Ingénieur, dont le but est l'élaboration des ratios technico-économiques facilitant le dimensionnement et l'exploitation des pompes photovoltaïques a été possible grâce à la collaboration de plusieurs personnes envers qui j'exprime ma profonde reconnaissance.

Mes sincères et profonds remerciements s'adressent à:

- M^r DIASSO, Directeur technique de SAHEL ENERGIE SOLAIRE, pour sa disponibilité et les moyens matériels mis à ma disposition.
- M^r DJIAKO Thomas et M^r ROMAIN, professeurs à l'E.I.E.R. pour leur encadrement et leur disponibilité, tout au long de l'élaboration de ce document.
- M^r TRAORE, Coordinateur national du PRS, pour les documents qu'il a mis à ma disposition.

G L O S S A I R E

- S.E.S: Sahel Energie Solaire
- P.R.S: Programme Régional Solaire
- P.D.I: Projet de Développement Intégré
- C.I.L.S.S: Comité Interafricain de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel
- C.I.E.H: Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques
- C.G.E.S: Comité de Gestion des Equipements Solaires
- A.E.P: Adduction en Eau Potable
- R.I.E.S: Réseau International d'Energie Solaire
- BURGEAP: Bureau de Recherche en Géologie Appliquée
- F.N.D.A.E: Fonds National pour le Développement des Adductions d'Eau
- HMT: Hauteur Manométrique Totale
- HGT: Hauteur Géométrique Totale
- E.I.E.R: Ecole Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Equipement Rural
- 1 UGB: 1 Unité de Gros Bétail
- 1 UPB: 1 Unité de Petit Bétail
- 1 ha maraîch: 1 hectare de maraîchage
- F.E.D: Fonds Européen de Développement
- F.A.C: Fonds d'Aide de Coopération
- B.A.D: Banque Africaine de Développement
- C.E.E: Communauté Economique Européenne
- P.P.I: Plan de Parrainage International
- A.D.E.M.E: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
Tableau 1: Débits de quelques grands fleuves sahéliens.	11
Tableau 2: Répartition des différents types d'aquifères dans les pays du CILSS	12
Tableau 3: Besoins en eau: Normes R.I.E.S.	13
Tableau 4: Besoin en eau: Normes O.M.S.	14
Tableau 5: Durée de vie des équipements	40
Tableau 6: Coût du contrat en garantie totale(durée 5 ans) selon les catégorie de pompes	40
Tableau 7: Coût total(avant dévaluation du F.CFA) des équipements de pompage des villages travaillant	43
Tableau 8: Ratio d'implantation du générateur	51
Tableau 9: Ratio coût/performance des pompes de forage	51
Tableau 10: Besoins en eau proposés	59
Tableau 11: Recapitulatif des différents ratios et leur utilisation	62

R E S U M E

La découverte de l'effet photovoltaïque en 1839 a permis la pratique et le développement de plusieurs activités parmi lesquelles le pompage photovoltaïque. Malgré le progrès de la technologie, ce système de pompage est toujours d'un coût d'investissement assez élevé, ce qui rend extrêmement difficile une prise en charge totale par les bénéficiaires (communautés villageoises, ...). Afin d'alléger cette contrainte, les projets de pompage photovoltaïque sont presque entièrement financés par les O.N.G. De nombreuses pompes solaires ont été installées en zone Sahélienne. Il y a eu d'excellentes réussites, mais malheureusement de nombreux échecs.

Le but du présent rapport est l'élaboration des ratios technico-économiques permettant l'évaluation des projets de pompage photovoltaïque au Sahel. Le rapport est basé sur le pompage photovoltaïque au Burkina Faso; 84 % de ces eaux souterraines sont constituées d'aquifères discontinus et situées dans des formations de socle. Le pompage dans ces formations de socle nécessite des moyens financiers plus importants, plaçant ainsi le Burkina Faso dans une situation défavorable. Donc les résultats obtenus au Burkina Faso sont applicables à d'autres pays du Sahel sans une grande modification.

La méthode utilisée est basée sur l'analyse des données collectées auprès des différents partenaires (C.I.L.S.S / P.R.S, sociétés d'installation et de maintenance, groupements villageois). Cette analyse permettra de dégager quelques indicateurs facilitant l'estimation des différents coûts pratiques liés à l'acquisition, l'exploitation et à la maintenance des équipements de pompage photovoltaïque.

L'analyse de la prise en charge de la gestion des équipements par les bénéficiaires montrent qu'il y a effectivement de nombreux problèmes liés au surdimensionnement des équipements ou à la surestimation des revenus des usagers. A titre d'exemple le coût moyen du m³ d'eau pompé calculé par le P.R.S pour certains villages est de 300 F.CFA, mais en réalité l'eau est vendue à 80 F.CFA. D'autres villages appliquent le taux forfaitaire de 25 F.CFA/personne/mois.

D'une manière générale les usagers s'intéressent peu au renouvellement des équipements. Ils affirment ne pas être en mesure d'acheter de l'eau à des prix dépassant leurs capacités financières. L'une des causes du surdimensionnement est l'estimation des besoins en eau à partir des normes internationales. A titre d'exemple la valeur de 20 litres/personne/jour est utilisée pour l'estimation des besoins en eau. Cette valeur est élevée par rapport aux besoins réels des usagers.

A partir des fiches de suivi des équipements réalisés par le P.R.S, nous avons pu déterminer la quantité d'eau requise quotidiennement par les bénéficiaires. Cette quantité d'eau varie de 5 litres/personne/jour à 7 litres/personne/jour. Mais nous retiendrons la valeur de 20 litres/personne/jours, pour tenir compte d'une augmentation future de la population. Les valeurs sont les suivantes:

- 20 litres/personne/jour
- 30 litres/unité de gros bétail/jour
- 5 litres/unité de petit bétail/jour
- 70 m³/hectare/jour.

Ce qui nous a permis par la suite de déterminer des ratios techniques et économiques facilitant le dimensionnement et l'exploitation des pompes solaires. Une détermination graphique de la puissance crête du générateur ainsi que le débit journalier est effectuée sur les figures 17, 18 et 19, dont les limites varient de 200 Wc à 5000 Wc pour des débits allant de 5 m³/jour à 550 m³/jour. La connaissance de deux (2) paramètres à savoir la Hauteur Manométrique Totale (H.M.T) et le nombre d'usagers suffit pour déterminer le débit journalier nécessaire et la puissance crête du générateur à installer.

Dans les ratios d'"implantation du générateur", nous avons déterminé l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontal; au Sahel cet angle varie de 10° à 26° selon les pays.

Dans les ratios économiques, nous avons déterminé les coûts du m³ d'eau pompé en fonction de la H.M.T, de la puissance crête du générateur et le nombre d'usagers, (cf. figures 20 et 21). La puissance crête varie de 900 à 4000 Wc, la H.M.T varie de 2 m à 72 m, et le coût du m³ d'eau pompé varie de 5 F.CFA à 300 F.CFA.

Quant aux ratios "coût total des installations/nombre d'usagers", avec les mêmes puissances et H.M.T citées ci-dessus, ils varient de 17 F.CFA/usager/an à 1067 F.CFA.

Les ratios "eau produite/production potentielle", "eau vendue/eau distribuée", "eau distribuée/eau produite", sont respectivement de 100% , 90% et 95%. Les ratios "productivité opérationnelle" sont représentés sur les figures 24, 25 et 26 et varient de 2 m³/7 heures à 80 m³/7 heures. Le ratio "disponibilité opérationnelle" est compris entre 95 et 100%.

Malgré de nombreux problèmes de terrain, le pompage photovoltaïque rend de très précieux services aux communautés villageoises notamment:

- amélioration de la santé des populations et des bétails
- développement des micro activités (maraîchage, poterie, etc...)
- développement de la notion de gestion.

Les suggestions pouvant contribuer à l'amélioration des résultats réalisés sur terrain sont:

- réduction à 5 membres des comités de gestion
- alphabétisation des membres des comités de gestion
- utilisation d'un seau standard pour la vente de l'eau
- vente de l'eau par un fontainier permanent et disponible au village.

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

L'hydraulique domestique, pastorale et agricole sont des éléments clés du développement du monde rural sahélien. Dans la recherche des voies et moyens pour satisfaire ces priorités, de nombreux systèmes de prise et captage ont vu le jour, entre autres, les pompes à motricité humaines, les éoliennes de pompage, les systèmes motorisés (pompage thermique). Mais la plupart de ces systèmes se sont révélés inefficaces ou inadaptés, soit à cause des coûts onéreux qu'ils engendrent, soit à cause de leurs performances médiocres (inadéquation dans la satisfaction des besoins en eau). Suite à la découverte de l'effet photovoltaïque en 1839, offrant la possibilité de transformer le rayonnement solaire en électricité, un nouveau système de pompage a vu le jour; il s'agit du pompage photovoltaïque.

Le soleil, situé à une distance moyenne de 150 millions de km de la terre, rayonne à la limite de l'atmosphère une puissance de 1400 W/m^2 . Ce rayonnement n'est pas^{pas} uniformément redistribué sur la surface terrestre; cependant les pays sahéliens sont géographiquement situés dans une bande à fort ensoleillement avec un rayonnement global compris entre $4 \text{ kwh/m}^2/\text{j}$ et $7 \text{ kwh/m}^2/\text{j}$. D'une manière générale, ces pays ne disposent pas de réseaux électriques suffisamment développés pour pouvoir alimenter leurs villages où vivent pourtant environ 70% de leurs populations. D'où la nécessité de disposer de générateur photovoltaïque permettant d'alimenter électriquement les pompes, ...

De nombreuses pompes solaires photovoltaïques ont été installées en zone sahélienne. Il y a eu d'excellentes réussites, mais malheureusement de nombreux échecs. Actuellement pour remédier à ces échecs, il s'avère important de mettre sur pied des outils d'optimisation permettant d'alléger le dimensionnement, le choix et l'exploitation de ces équipements, tout en accordant une attention particulière à l'impact de cette technologie sur l'environnement. C'est dans ce contexte que SAHEL ENERGIE SOLAIRE, en collaboration avec l'E.I.E.R., a proposé le sujet intitulé "Elaboration de Ratios technico-économiques pour l'évaluation des projets de pompage photovoltaïque au Sahel". Nous étudierons le cas du pompage photovoltaïque au Burkina Faso.

* Source: Guide de l'énergie solaire: Electricité solaire au service du développement rural, R.I.E.S (Réseau International d'Energie Solaire) 1993

Le présent document est composé de trois parties:

- la première partie est une synthèse bibliographique
- la deuxième partie porte sur de l'analyse du pompage photovoltaïque.
- la troisième partie est consacrée à l'élaboration et à l'utilisation des ratios technico-économiques pour l'évaluation des projets de pompage photovoltaïque.

CHAPITRE I: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Estimation des ressources en eau au Sahel:

Neuf états sont membres du C.I.L.S.S. à savoir: Burkina Faso, Cap Vert, Guinée Bissau, Gambie, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal et Tchad (figure 1).

Figure 1

ETATS MEMBRES DU CILSS Pluviométrie annuelle moyenne

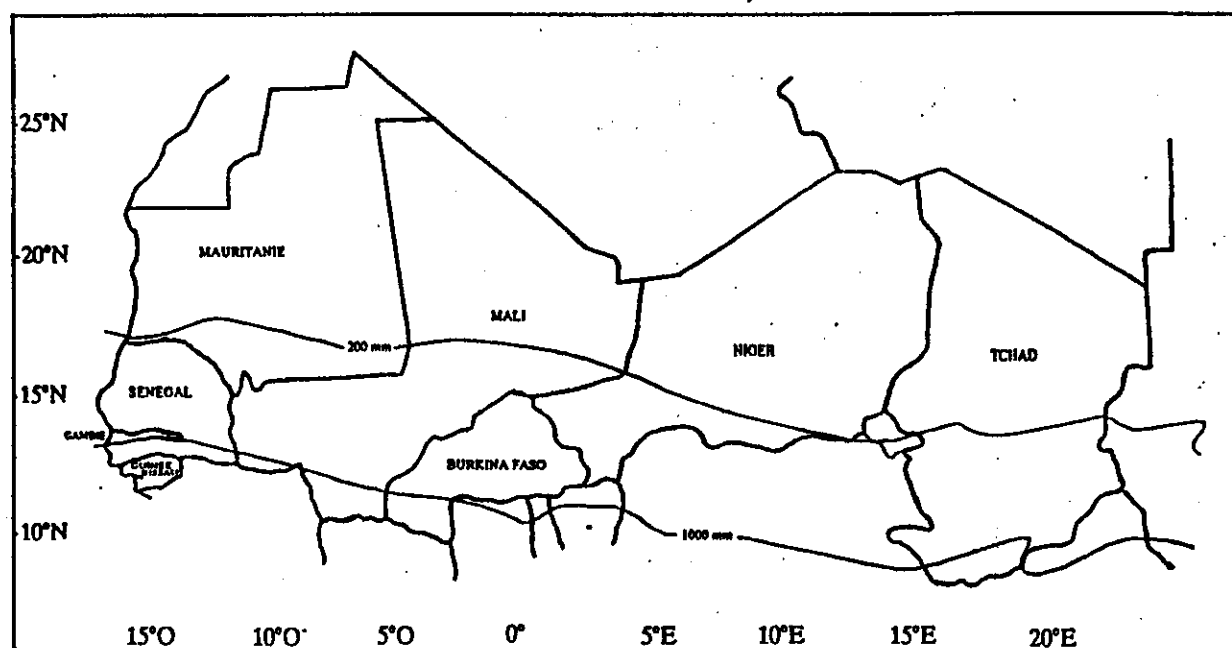
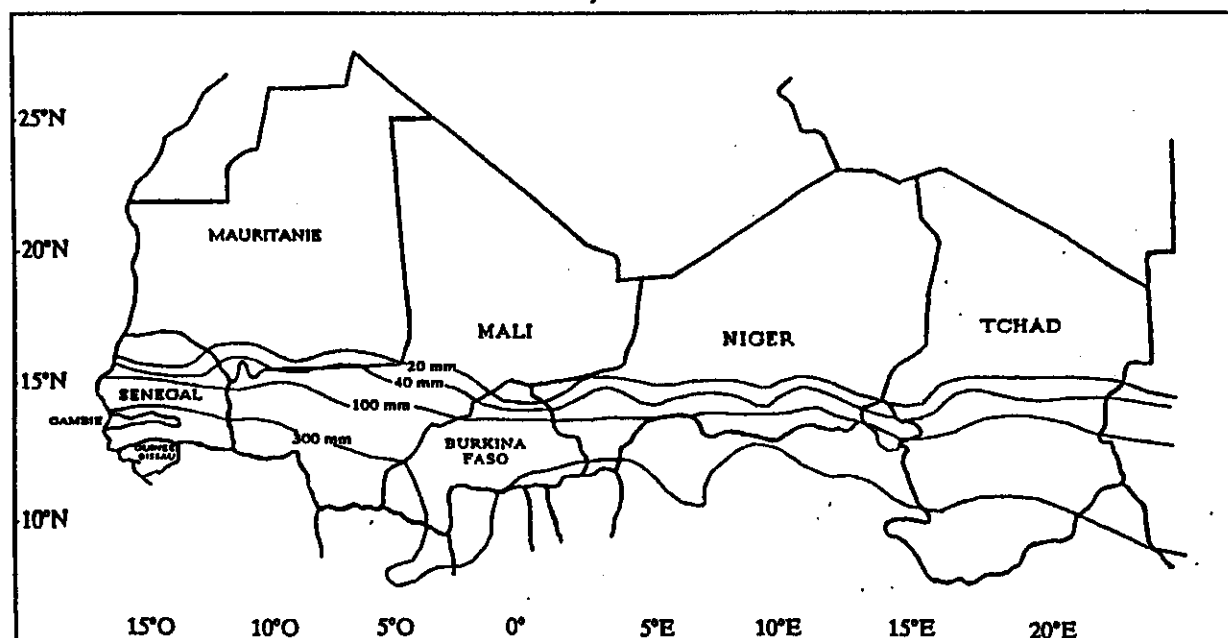


Figure 2.

Précipitations efficaces dans les pays du CILSS Moyenne annuelle



Ces états sont regroupés en deux zones:

- une zone sub-saharienne s'étendant de la 10^{ème} parallèle Nord à la 15^{ème} parallèle Nord.
- une zone saharienne s'étendant au dessus du 15^{ème} parallèle.

La zone sub-saharienne est sous l'influence d'un climat globalement soudano-sahélien caractérisé par:

- une pluviométrie annuelle moyenne permettant de définir les zones secondaires suivantes:

- . saharo-sahélienne, moins de 200 mm;
- . sahélienne, de 200 à 400 mm;
- . soudano-sahélienne de 400 à 600 mm
- . soudanienne de 600 à 800 mm;
- . soudano-guinéenne de 800 à 1200 mm.

- une saison sèche en alternance avec une saison des pluies dont la durée (3 à 7 mois) augmente vers le sud. Ce rythme saisonnier est commandé par une influence alternée des masses d'air anticycloniques du Sahara et du Golfe de Guinée. La forte irrégularité inter-annuelle des précipitations se traduit parfois par des périodes de très rude sécheresse.
- de fortes variations de températures journalières et annuelles au nord s'atténuant vers le sud.

L'évaporation est très importante, particulièrement entre Avril et Juin à cause des températures élevées.

I.1.1 Ressources en eau de surface:

Les eaux de surface, les plus importantes quantitativement, constituent la ressource essentielle disponible pour l'irrigation, l'adduction en eau potable et la production d'électricité.

On peut distinguer trois catégories de ressources en eau de surface:

- **les grands fleuves sahéliens:** ceux qui ont un débit pérenne en dehors des périodes de grande sécheresse sont: le Sénégal, la Gambie, le Niger, le Chari, le Logone, le Mouhoun (voir tableau 1)

Tableau 1: Débits de quelques grands fleuves sahéliens

		(7) Année déficitaire		Année moyenne		Année excédentaire	
		Débit (m ³ /s)		Débit (m ³ /s)		Débit (m ³ /s)	
Fleuve	Station	min	max	min	max	min	max
Sénégal	Bakel			9	4 600		7 150
	Dagana			18	2 500		3 200
Niger	Koulikoro	20	4 700	40	1 920	79	7 800
	Niamey		720		900		
Chari	N'Djamena	88		126	3 690		4 640
Logone	Birni	40		50	900		940

Les aménagements réalisés sur ces cours d'eau sont généralement des barrages réservoirs (digue plus retenue à l'amont) permettant une certaine régulation saisonnière et inter-annuelle. Ces aménagements rencontrent un certain nombre de problèmes qui sont:

- la nécessité de lâcher un débit minimum pour la pêche et les activités des riverains,
- l'existence des mois critiques où le débit est faible
- **Les cours d'eau moyens:** Les débits de ceux-ci sont quasiment nuls en saison sèche
- **Les petits cours d'eau:** leurs bassins versants sont inférieurs à 100 km². Ils permettent l'aménagement des retenues de petites dimensions se remplissant en hivernage et assurant quelques mois seulement de réserve pour les activités agropastorales du fait de leur forte évaporation et de leur faible profondeur. C'est le cas par exemple de plusieurs "barrage-routiers" au Burkina Faso.

I.1.2 Ressources en eaux souterraines:

Les eaux souterraines, les moyens d'exhaure, très variables génèrent des coûts de mobilisation extrêmement variables. Les ressources en eaux souterraines se classent en deux types d'aquifères. Suivant leurs caractéristiques hydrauliques, les conditions de gisement, et surtout leurs aptitudes à fournir des débits unitaires intéressants pour satisfaire les besoins nécessaires à une A.E.P, une irrigation ou des activités pastorales. Ces aquifères sont:

- des boucliers
 - des bassins sédimentaires
- (cf. annexe 13)

Les boucliers, formés de roches cristallophyliennes (formations métamorphiques), ont des aquifères discontinus.

Dans les bassins sédimentaires, on trouve des aquifères continus dans des formations à dominance sableuse; les formations gréseuses et calcaires ont plutôt un comportement mixte (aquifères à porosité d'interstices et fracturation). Les aquifères discontinus et mixtes représentent 18,8 et 26,3 % de la surface des pays du Sahel, soit un total de 45,1 % (cf tableau 2). La grande majorité de ces aquifères est située dans des formations de socle.

Tableau 2: Répartition des différents type d'aquifères dans les pays du C.I.L.S.S

Pays	Aquifères Continus		Aquifères Mixtes		Aquifères Discontinus	
	%	S (km ²)	%	S (km ²)	%	S (km ²)
Burkina Faso	4	10.968	12	32 904	84	230 328
Cap Vert	0	0	0	0	100	4 033
Gambie	83	9 375	17	1 920	0	0
Guinée Bissau	40	14 450	60	21 675	0	0
Mali	52	645 169	37	459 063	11	136 478
Mauritanie	50	515 350	23	237 061	27	278 289
Niger	66	836 220	26	329 420	8	101 360
Sénégal	64	128 896	28	56 391	8	16 112
Tchad	60	770 400	22	228 420	18	231 120
Total		2 930 828		1 420 914		997 720

* Source: C.I.E.H (d'après la notice de la carte de potentialité des ressources en eaux souterraines de l'Afrique de l'Occident et Centrale

Il y a plusieurs possibilités d'exploiter les eaux souterraines pour l'hydraulique domestique, pastorale ou en irrigation; ce dernier cas demande des volumes d'eau plus importants, il est donc à prévoir avec beaucoup de prudence. Il faudrait des études approfondies pour une meilleure connaissance du comportement des aquifères, mais aussi déterminer les volumes exploitables sans épuiser les réserves.

Il peut y avoir des exceptions d'utilisation des eaux souterraines, pour des zones où il n'y a pas d'autres ressources en eau, ou en période où il ne pleut pas. L'annexe 12, nous donne une idée sur les caractéristiques des aquifères susceptibles d'être exploités pour l'irrigation.

1.2 Evaluation des besoins en eau:

L'eau est la source de toute vie. La sécurité de l'alimentation en eau est certainement une priorité absolue pour les régions du Sahel. La technique de mobilisation des ressources en eau est le pompage.

Parmi les données les plus importantes à estimer pour tout système de pompage, il y a la quantité d'eau requise quotidiennement. Les différents volets (domestique, pastoral et maraîchage) peuvent être associés en pompage photovoltaïque pourvu que le débit du forage soit suffisant.

Dans l'estimation des besoins en eaux, certains organismes ont fixé des normes:

- les normes du Réseau International d'Energie Solaire (R.I.E.S)

Tableau 3: besoins en eau: normes R.I.E.S

1 personne	20 litres/jour
1 vache	40 litres/jour
1 cheval	40 litres/jour
1 mouton	5 litres/jour
1 âne	20 litres/jour
1 chameau	20 litres/jour
1 hectare de maraîchage	70 m ³ /jour

- les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S.)

Tableau 4: besoins en eau: norme O.M.S.

1 personne	20 litres/jour
1 unité gros bétail	30 litres/jour
1 unité petit bétail	8 litres/jour

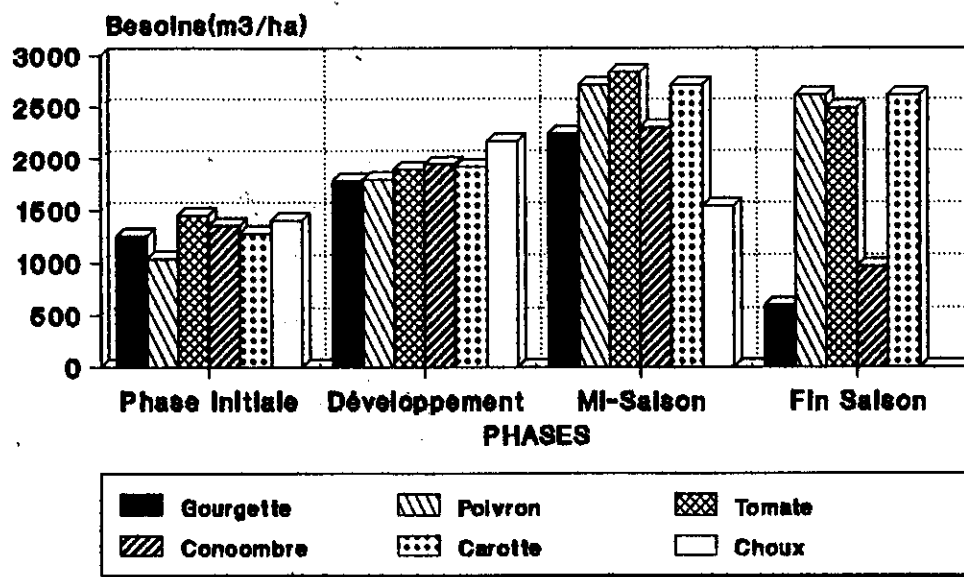
Les projeteurs utilisent l'une des deux normes pour estimer les besoins en eau globaux, ce qui ne correspond pas forcément aux besoins réels des usagers.

Quant à la détermination des besoins en eau d'irrigation elle doit être faite de façon précise; cette détermination dépendant de beaucoup de paramètres qui varient selon les régions. Ces paramètres sont:

- la climatologie locale
- le type de culture
- le type de sol
- le stade végétatif
- la période de l'année.

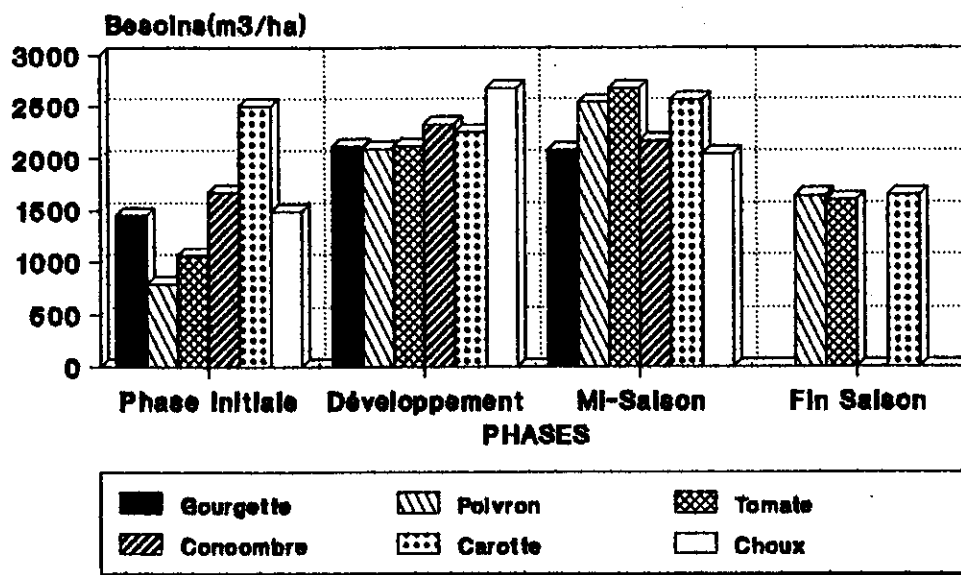
A titre d'exemple, le besoin moyen en eau d'irrigation du périmètre maraîcher de LOUMBILA est de 65 m³/ha/jour, pour l'ensemble des cultures pratiquées. Les figures 3 et 4 montrent l'évolution des besoins en eau en fonction des périodes pour les différentes cultures maraîchères.

Figure 3: BESOINS EN EAU DES CULTURES DU PERIMETRE MARAICHER DE LOUMBILA PERIODE (NOVEMBRE-FEVRIER)



DAO Robert

Figure 4: BESOINS EN EAU DES CULTURES DU PERIMETRE MARAICHER DE LOUMBILA PERIODE (MARS - JUIN)



DAO Robert

Vu l'importance de l'eau, tout déficit dans son approvisionnement a des graves répercussions sur la vie des populations, favorisant ainsi des migrations vers des villes où elles espèrent trouver des conditions de vie meilleurs. Il est donc nécessaire qu'on garantisse nos pays et notamment ceux du Sahel, contre toute pénurie d'eau et lutter contre la pollution de notre environnement. Ce qui peut être obtenu par des forages, des moyens d'exhaure appropriés et la mise en place des systèmes efficaces de collecte, de transport ou de traitement des déchets solides etc.

I.3 Gisement solaire et Electricité photovoltaïque:

Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement, dont une partie est absorbée par l'atmosphère terrestre. Cette énergie nous parvient sur terre après avoir parcouru environ 150 millions de kilomètres.

L'énergie véhiculée par le rayonnement solaire dans l'espace a été évaluée grâce aux mesures effectuées par des satellites. Un mètre carré exposé face au soleil en dehors de l'atmosphère terrestre reçoit tant qu'il voit le soleil $1,353 \text{ kw/m}^2$, ce qui représente en 24 heures 32,5 kw.

La puissance reçue à la surface de la terre est aussi mesurable. Un mètre carré de plan placé perpendiculairement au rayonnement reçoit au plus 1 kw/m^2 au niveau de la mer. Cette valeur varie peu d'un endroit à l'autre pourvu que le ciel soit clair et le soleil assez haut à l'horizon.

Cependant la quantité d'énergie reçue par un plan fixe est très variable; elle dépend:

- de l'orientation du plan par rapport au sud géographique
- de l'inclinaison du plan par rapport à l'horizontale
- de la localisation géographique du plan
- de la période de l'année et de l'heure du jour
- de l'état du ciel (nuages, poussières, pluie, etc.)

Les pays sahéliens sont géographiquement situés dans une bande à fort ensoleillement avec un rayonnement global compris entre 4 kwh/m²/jour et 7 kwh/m²/jour. Ces pays peuvent donc utiliser cette énergie au profit du développement de leurs communautés isolées. Le seul moyen connu pour convertir directement le rayonnement solaire en énergie électrique est la conversion photovoltaïque, découverte en 1839 par le physicien français A. BECQUEREL.

L'utilisation de l'électricité photovoltaïque a un intérêt primordial au Sahel. Elle apporte le confort et le progrès dans les communautés et sites isolés, et contribue à retenir les populations qui sans cela iraient rejoindre les villes déjà surpeuplées.

UNE PRESENTATION TRES SIMPLE DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE:

La cellule photovoltaïque est un composant électronique à semi-conducteurs dans laquelle l'absorption des photons (grains élémentaires de lumière) libère des électrons et crée des "trous".

Le fonctionnement de la cellule ou photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand les atomes étrangers en petits nombre (des "impuretés") sont substitués dans un réseau cristallin (le dopage):

- si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès: il sera dit de type N (exemple: silicium dopé au phosphore).
- si au contraire, l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons: il sera dit de type P (exemple silicium dopé au bore).

Un photon dont l'énergie est suffisante, heurtant un atome peut arracher un électron créant ainsi simultanément une paire d'électron-trou. L'électron ayant acquis suffisamment d'énergie peut se déplacer vers la jonction NP, où la présence du champ électrique a pour conséquence la collecte de l'électron vers la région N.

Une tension électrique apparaît entre les deux côtés N et P. Le dispositif devient générateur électrique sous l'effet de la lumière. La collecte de courant se fait par des contacts métalliques, en forme de grilles sur chaque face. Si ces électrodes sont reliées à un circuit extérieur un courant circule.

Cette transformation directe du rayonnement solaire en électricité s'effectue donc sans pièces mobiles, sans échauffement, sans bruit, pas d'usure, pas de fluides sous pression, ni pollution.

Une cellule de diamètre 10 cm fournit une tension de 0,5 volt avec une intensité de 2 milliampères. Pour obtenir une tension et une puissance suffisante, il est nécessaire de connecter plusieurs cellules entre elles. Ces ensembles de cellules sont "encapsulés" dans des "modules" étanches qui les protègent de l'humidité et des chocs.

Les modules peuvent être assemblés mécaniquement et électriquement en série ou en parallèle. L'ensemble des modules sur le même châssis est appelé "Panneau". Plusieurs panneaux forment le "champs photovoltaïque".

La réalisation des photopiles est une opération techniquement très complexe, ce qui rend leurs coûts prohibitifs.

Figure 5: Principe de production des électrons-trous (11)

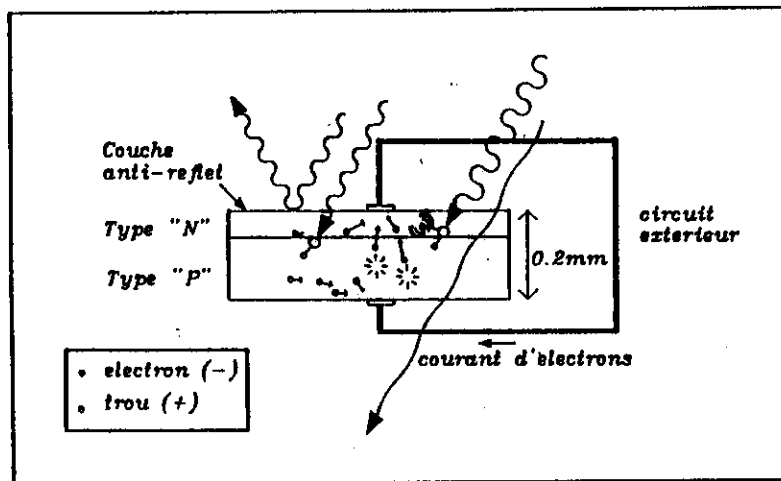
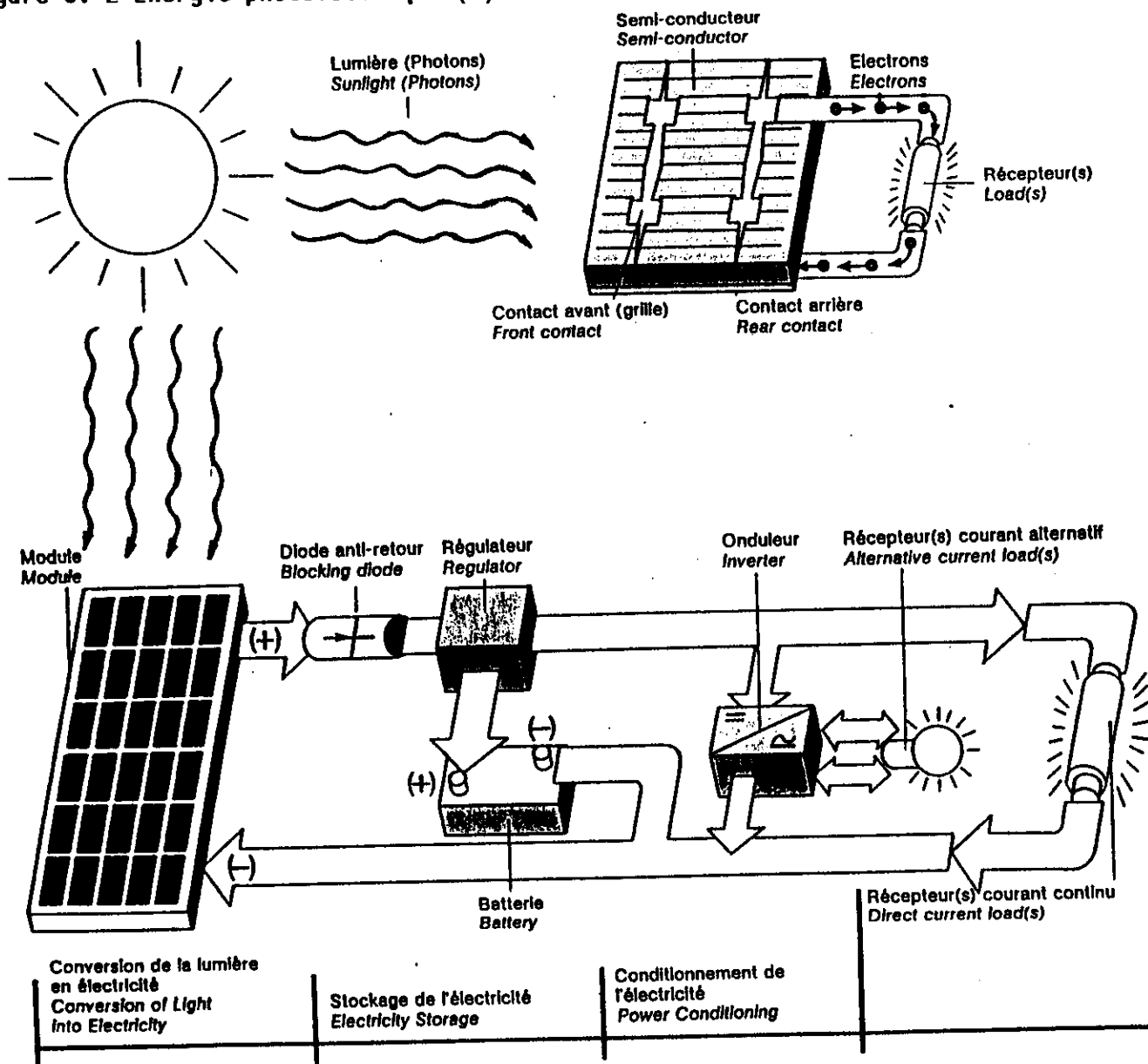


Figure 6: L'Énergie photovoltaïque (3)

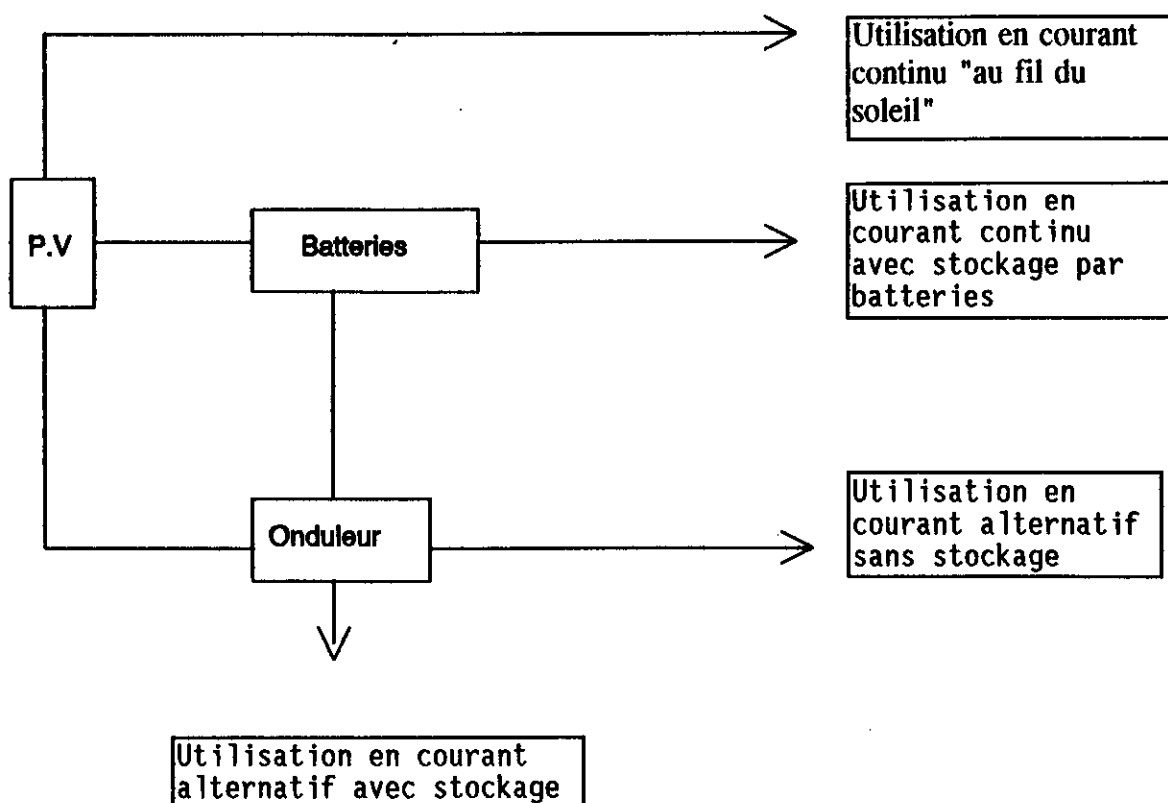


I.4 Pompage photovoltaïque:

I.4.1 Présentation:

C'est l'utilisation d'énergie électrique obtenue par conversion photovoltaïque, par une pompe pour l'exhaure de l'eau.

Figure 7: Application de l'énergie photovoltaïque au pompage



Un groupe de pompage photovoltaïque est composé de:

- un générateur
- un coffret de commande et de contrôle
- un groupe électropompe.

Le coffret de commande et de contrôle comprend selon le cas:

- un interrupteur
- un onduleur
- une carte électronique de commande.

Le générateur photovoltaïque, fournisseur de l'énergie à l'utilisation finale, est composé de modules photovoltaïque supports, boîtes de connexion et de jonction, câbles d'interconnexion, diodes de protection et d'autres composants (régulateurs, onduleur, ...).

Le groupe électropompe est composé d'un moteur immergé ou de surface (hors de l'eau) et d'une pompe.

Suivant les différents types de pompage, on distingue différents modes d'utilisation de l'énergie produite par les photopiles:

- le pompage au fil du soleil en courant continu ou en alternatif. Pas de stockage de l'énergie électrique
- le pompage en courant continu ou en alternatif avec stockage intermédiaire par batterie (voir figure 7).

I.4.2 Limites d'utilisation du pompage photovoltaïque:

Le pompage photovoltaïque est limité dans son application. D'une part il y a une limite inférieure qui est imposée par la capacité des forages. D'autre part il y a une limite supérieure qui correspond à son seuil de rentabilité. Au-delà de cette limite supérieure, le pompage thermique devient plus rentable. Il est évident que le générateur photovoltaïque ne bénéficie pratiquement pas d'économie d'échelle. Le premier kwh coûte aussi cher que le centième. Le pompage photovoltaïque n'est pas tellement applicable aux forages dont le débit est inférieur à 5 m³/jour. Et de même lorsque la puissance crête du générateur dépasse 5 kw, l'utilisation du pompage photovoltaïque n'est plus vérifiée économiquement.

I.4.3 Positionnement du pompage photovoltaïque par rapport aux autres modes de pompage:

Dans le cadre de l'hydraulique domestique, pastorale ou agricole, il y a plusieurs techniques de mobilisation des ressources en eau qui ont vu le jour, et ont été expérimentées en zone sahélienne, tant au niveau des ressources en eaux de surface que souterraines.

I.4.3.1 Les matériels traditionnels

La puisette est le matériel le plus utilisé et continuera longtemps à être le moyen d'exhaure le mieux adapté notamment pour les localités reculées.

Cette technique est quelques fois améliorée par l'utilisation des poulies réalisées en bois ou en métal. Bien que contraignante, elle met ses utilisateurs à l'abri de toute dépendance technique moderne nécessitant la commande de pièces détachées.

I.4.3.2 Les pompes à motricité humaine

Avec l'expérience positive et la vulgarisation des techniques de réalisation des forages de petit diamètre dans les zones de socle, l'installation des pompes à motricité humaine s'est progressivement développée au Sahel.

Ce système est assez contraignant surtout au niveau du débit qui est généralement faible. Les limites supérieures sont de 20 à 25 m³/jour pour des profondeurs de 30 à 60 m au maximum.

I.4.3.3 Les systèmes mécanisés

- Les Eoliennes

Elles sont dans la plupart des cas montées sur des puits de grand diamètre, dans des villages de moins de 500 habitants, et dans des zones où le gisement éolien est en moyenne de 3 m/s.

- Les forages motorisés

Ce type d'équipement est généralement réservé aux gros villages (populations supérieures à 900 habitants) et aux centres semi-urbains. La station de pompage est généralement constituée soit d'un groupe électrogène alimentant un moteur relié à une pompe à axe vertical (exemple: pompes volontas), soit une électropompe immergée, au cas où il existe un réseau électrique proche du site.

- Les pompages solaires

Leur domaine d'application se situe entre celui des pompes à motricité humaine, et celui des pompes thermiques. Comme l'indique la figure 8.

Le pompage photovoltaïque et moyens d'exhaure traditionnels sont souvent complémentaires sur un même site. L'association photovoltaïque et manuel pourra être un bon compromis technico-économique, évitant le surdimensionnement des générateurs photovoltaïques et offrant une garantie de continuité de service.

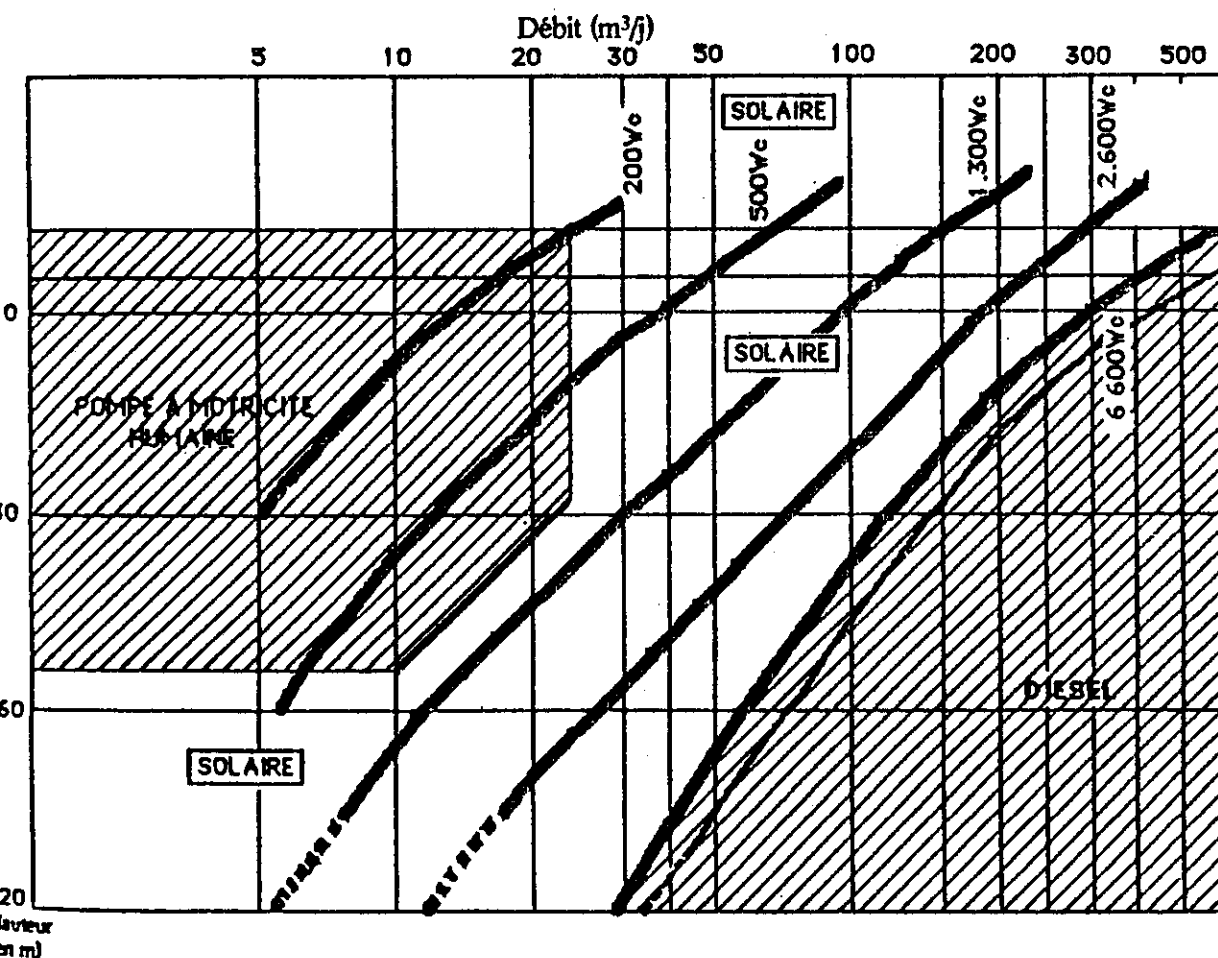
C'est généralement dans les basses hauteurs manométriques que le pompage solaire trouve sa justification économique.

- Avantages du pompage photovoltaïque par rapport aux autres systèmes d'exhaure

- les pompes à motricité humaine ont un débit faible
- l'utilisation des moto-pompes en milieu rural présente beaucoup de contraintes:
 - . approvisionnement régulier en carburant et en pièces de rechange
 - . qualification requise du personnel
 - . frais récurrents très importants dont le recouvrement est difficile au niveau villageois
- les pompes photovoltaïques immergées ou flottantes avec moteur fonctionnant en courant alternatif ont une fiabilité élevée, réduisant considérablement le nombre d'interventions annuelles par rapport au pompage thermique qui exige des entretiens quotidiens.

- l'autonomie; au cas où un panneau tomberait en panne, le système continue à fonctionner, puisque chaque panneau fournit séparément du courant, indépendamment des autres panneaux
- respect de l'environnement par l'absence de bruit, de pollution, grâce à la conversion électronique et d'infrastructure de pylônes
- une facilité d'utilisation, démarrage assez simple à l'aide d'un interrupteur ou automatiquement au levé du soleil. Quant à la motopompe, elle exige un amorçage et un effort physique important, pour vaincre l'inertie de démarrage
- les systèmes thermiques exigent pour une grande autonomie, un réservoir de stockage du carburant (fluide inflammable) nécessitant des mesures de sécurité. Par contre les systèmes photovoltaïques ont leur source d'énergie gratuite pour tout le monde.

Figure 8: Secteurs privilégiés d'utilisation des pompes solaires (9)



I.5 Technologies et évolutions du matériel:

I.5.1 Pompes de surface:

On utilise ce système de pompage lorsqu'il s'agit des eaux de surface (fleuve, lac, réservoir) présentant une hauteur manométrique totale inférieure ou égale à 7 m. Il y a deux cas d'utilisations:

- la pompe et le moteur sont à la surface (hors de l'eau), c'est le cas d'une pompe travaillant en aspiration
- la pompe est immergée (fixe ou flottante), et le moteur associé à la pompe est hors de l'eau.

Dans tous les deux cas le moteur entraînant la pompe peut être à courant continu, ou à courant alternatif.

Les pompes travaillant en aspiration ont un certain nombre d'inconvénients à savoir:

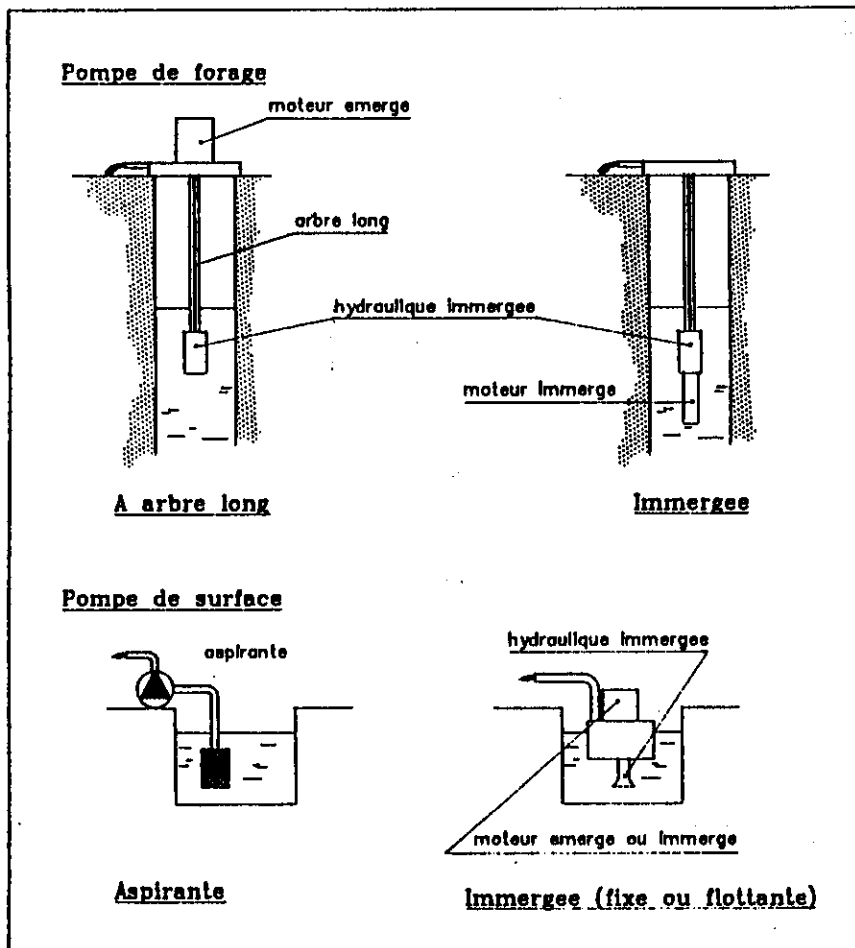
- risque de cavitation qui a pour conséquence la destruction des aubes
- problème de désamorçage, intervenant en cas de fuite sur le clapet anti-retour.

Ce qui fait que cette technologie est progressivement abandonnée. Elle fait place de plus en plus à la technique flottante, qui est largement préférable dès que la configuration des ressources en eau, fleuves, retenues, lacs et mares, ne pose pas de problème d'accès, et cependant ne sont pas chargés en matières en suspension.

Quant aux moteurs à courant continu, ils posent un certain nombre de problèmes au niveau des balais (usure rapide, mauvais contacts) et parfois une oxydation des roulements, compte tenu de l'agressivité des eaux.

Les pompes flottantes avec moteur à courant alternatif, sont préférables dans le contexte sahélien. Elles ont une durée de vie plus élevée et une bonne fiabilité.

Figure 9: Techniques de pompage photovoltaïque (11)



I.5.2 Pompes immergées:

Au Burkina Faso de nombreuses techniques de pompage sur forage ont vu le jour.

I.5.2.1 Pompe à arbre long

Le moteur à courant continu est en surface, la pompe est dans l'eau, la transmission de puissance se fait par un arbre long liant le rotor du moteur aux étages impulseurs de la pompe centrifuge. Celui-ci tourne au milieu du tube de refoulement, il est guidé par des paliers situés tous à intervalle d'un mètre. Les groupes les plus fiables à l'époque étaient ceux de la série ALTA-XF de Guinard. Cette technique de pompage solaire était rapidement devenue une référence et avait constitué l'essentiel des réalisations solaires en zone sahélienne.

Le problème majeur de ces systèmes résidait au niveau de l'arbre long, source de pannes alourdissant le travail au montage et des coûts de maintenance. Les interventions sur le collecteur et les changements des balais étaient très fréquents.

La profondeur d'installation était limitée à peu près à 30 m pour réduire l'importance des interventions de maintenance et l'usure de la colonne.

De nos jours ce système de pompage est complètement abandonné au profit des électropompes immergées.

Il faut dans tous les cas rendre hommage à ce produit qui a permis une bonne diffusion du pompage photovoltaïque.

I.5.2.2 Filière moteur à commutation électronique

Le moteur est à courant continu et immergé avec la pompe. La transmission de la puissance est réalisée à l'aide d'aimants permanents sur le rotor. Cette solution d'après les essais en usine, évite tous les problèmes d'usure et de remplacement des balais.

Malheureusement cette technique n'a pas fait preuve de fiabilité au Sahel. Par ailleurs demandait beaucoup d'améliorations techniques qui rendaient le produit incompétitif.

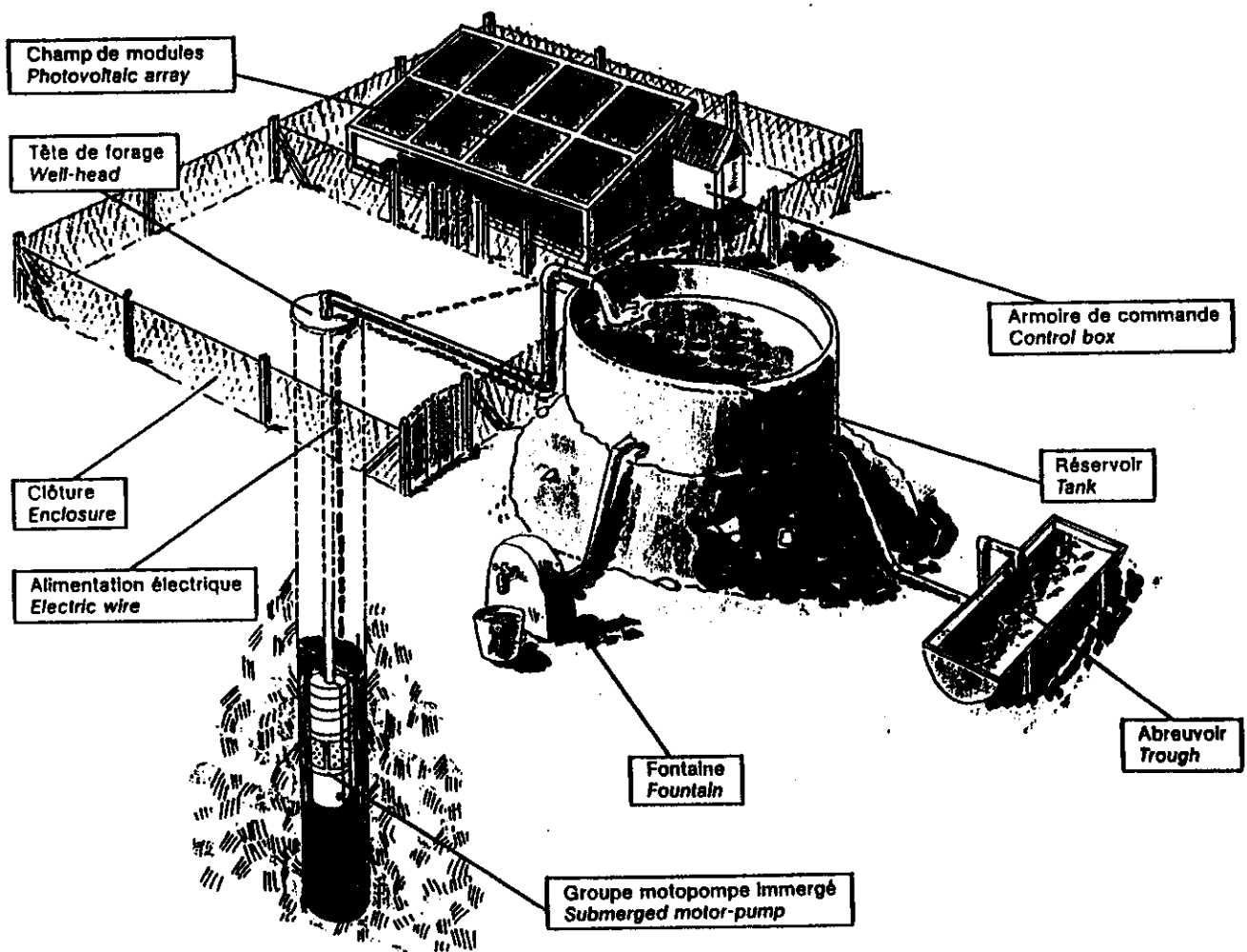
De nos jours ce produit n'est pas utilisé dans les régions sahéliennes.

I.5.2.3 Filière moteur à courant alternatif

Le moteur est sans balais. L'accouplement du moteur à la pompe est direct, l'ensemble étant immergé dans le forage.

La transformation du courant continu fourni par le générateur en courant alternatif se fait par l'intermédiaire d'un onduleur à fréquence variable. Cela permet une variation de la vitesse de la pompe dans le cas du pompage au fil du soleil.

Figure 10: Station de pompage photovoltaïque (pompage de forage) (3)



CHAPITRE II: ANALYSE DU POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

II.1 Analyse technique:

A l'avènement du pompage solaire en Afrique sahélienne, les ALTA XF ont été les plus utilisés. De nos jours les plus utilisés sont les GRUNDFOS et les T.E.D, pour le cas du Burkina Faso.

En faisant une comparaison technique entre ces différents types de pompe, nous voyons que les ALTA XF sont nettement moins fiables que les GRUNDFOS et T.E.D.

ALTA XF:

En se basant sur les fiches de suivi technique de la société Sahel Energie Solaire (S.E.S), nous avons pu déterminer la durée de vie moyenne d'une ALTA XF. La MTBF (Moyenne de Temps de Bon Fonctionnement) calculée pour la pompe est de 3 ans, sur la base de 7 heures/jour. Et sa fiabilité au bout de ces 3 ans est de 46,3%. Par contre, la fiabilité de la pompe calculée pour 5 ans (durée de vie fournie par le constructeur) est de 10,78% (Pour les calculs voir annexe 4).

Par la même méthode la MTBF du charbon calculée est de 11 mois contre 18 mois annoncée par les constructeurs. La fiabilité au bout des 11 mois est de 50%.

En plus de ces éléments, il y avait l'arbre de transmission qui diminuait le rendement des pompes et surtout était rapidement corrodé par les eaux agressives. Tous ces facteurs ont contribué à l'abandon de ces types de pompe. Les ALTA XF ont été progressivement remplacées par des GRUNDFOS et des TED. Au Burkina Faso la dernière ALTA XF est à remplacer courant 1994.

GRUNDFOS et T.E.D:

Les pompes GRUNDFOS et les T.E.D installées sont récentes; quelques unes sont exploitées depuis 6 à 7 ans sans problème. Par ailleurs le problème de corrosion de la conduite de refoulement est maîtrisé par l'emploi du tuyau souple insensible à la corrosion.

Ces quelques éléments de comparaison montrent que l'abandon des ALTA XF au profit des GRUNDFOS et des T.E.D est bien justifié.

Le parc de 70 pompes suivis par S.E.S est presque constitué d'électropompes de marque GRUNDFOS ou T.E.D avec des onduleurs de marque GRUNDFOS SA 1000/5, SA 1500, et les TPS 2500, 4000. Depuis 1987, date de mise en service des premières électropompes solaires immergées, il n'y a eu aucune panne nécessitant le changement prématuré d'un constituant sauf, dans 3 cas:

- changement d'un onduleur au bout d'une année de fonctionnement car il avait été endommagé par les démarrages et les arrêts fréquents dus au fontainier
- changement d'un onduleur et de l'électropompe en moins d'une année de fonctionnement à cause de la foudre. De nos jours ce problème est maîtrisé par l'emploi des "protections foudre" incorporées dans l'onduleurs et reliées à un piquet de terre.
- changement d'une électropompe pour cause de colmatage, au bout de 3 ans de fonctionnement. Le forage en question est également colmaté et abandonné aujourd'hui.

En dehors de ces cas de défaillances, les systèmes de pompage photovoltaïque sont entrain de faire leur preuve sur le terrain. Les électropompes et les onduleurs atteignent largement la durée de vie de 7 ans.

La maintenance préventive est surtout axée sur le contrôle de la quantité du liquide moteur dans l'électropompe et le nettoyage des impulseurs pour enlever les boues qui peuvent gêner son bon fonctionnement. Cette réussite est surtout due à la société d'installation et de maintenance des équipements (S.E.S), qui travaille avec beaucoup de soin sur le terrain. Il est à noter aussi que l'importance que les usagers accordent aux équipements est nécessaire pour leur pérennité.

II.2 Analyse de la gestion technico-financière:

La viabilité de tout système dépend de sa bonne gestion ceci afin d'assurer sa pérennité. Les échecs et les cas de sabotage de certains équipements de pompage photovoltaïque sont dus au fait que ces projets n'étaient précédés d'aucune étude préalable. Les O.N.G et les institutions internationales finançaient des projets qui étaient exécutés sans aucune participation financière des bénéficiaires. Cette façon d'attribuer les équipements avait une conséquence directe sur leur pérennité. Les bénéficiaires ne se voyaient pas responsables des équipements et ils étaient laissés pour compte.

De nos jours avec la nouvelle stratégie qui consiste à faire participer financièrement les bénéficiaires et avec la mise en place des comités de gestion, les équipements sont mieux suivis.

II.2.1 Acquisition:

La plupart des projets de pompage photovoltaïque sont financés par des institutions internationales ou des Organisations Non Gouvernementales (O.N.G). Parmi lesquelles:

- F.E.D. (Fonds Européen de Développement)
- F.A.C. (Fonds d'Aide de Coopération)
- B.A.D. (Banque Africaine de Développement)
- A.D.E.M.E (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
- Banque Mondiale
- P.P.I. (Plan de Parrainage International)
- Eau Vive
- Missions Catholiques
- ...

Ces organismes finançaient des stations de pompage solaire avec clé en main, sans aucune participation financière des bénéficiaires. De nos jours certains organismes continuent à le faire. Dans ce cas de figure c'est aux bénéficiaires de s'organiser afin de prendre en charge les coûts de fonctionnement et d'entretien. Mais au cas il n'y a pas de bonne entente entre les bénéficiaires alors le projet subit les conséquences désastreuses.

II.2.2 Exploitation et maintenance:

- Exploitation:

Pour assurer une bonne exploitation des équipements solaires et surtout responsabiliser les bénéficiaires, les organismes finançant les équipements ont proposé la mise en place des comités de gestion; ces comités essentiellement villageois sont composés comme suit:

- un président
- un vice-président
- un secrétaire
- un secrétaire adjoint
- un trésorier
- un trésorier adjoint
- une responsable à l'hygiène.

Les tâches qui lui sont confiées sont:

- gestion des contrats d'entretien
- vente de l'eau
- gestion des fonds issus de la vente de l'eau
- relation avec les institutions financières.

Le comité de gestion des équipements solaires a la responsabilité de faire comprendre l'intérêt de la gestion des équipements sans laquelle l'ensemble du projet est voué à l'échec. Il est prévu que les exploitants s'occupent du renouvellement des équipements, les frais de maintenance et toutes les autres charges récurrentes liées à l'exploitation de l'installation. Pour remédier à cela, les bénéficiaires ont entrepris la vente de l'eau. Les modalités de vente varient d'un village à un autre, ainsi que la tarification. Ces modalités sont les suivantes:

- paiement de l'eau à la borne fontaine; il se fait de gré à gré
- paiement mensuel au niveau de l'abreuvoir
- paiement mensuel par chaque famille en raison d'une somme fixée par personne

- paiement mensuel par m² de planche pour le périmètre maraîcher.

Les villages qui travaillent avec le P.R.S suivent généralement la stratégie de la vente de l'eau aux bornes fontaines avec paiement au comptant.

Les prix sont fixés par le P.R.S tout en tenant compte du renouvellement des équipements du contrat en garantie totale ainsi que les charges de fonctionnement du C.G.E.S. Les prix de vente de l'eau pratiqués sur le terrain sont faibles par rapport aux prix imposés par le P.R.S. Les valeurs moyennes pratiquées sont:

- 25 F.CFA / personne / mois
- 250 F.CFA / planche de 3 m² / mois
- 30 F.CFA / barrique de 100 l
- 20 F.CFA / bassine de 25 l
- 5 F.CFA / bassine de 15 l

Le dispositif financier des exploitants est constitué par le montant de la participation initiale imposée avant l'acquisition de l'équipement; ce montant est au moins égal au coût du montant du contrat annuel d'entretien et au maximum plafonné à 10 % du montant final de l'installation et les recettes de la vente de l'eau. Le versement se fait dans un compte auprès d'une banque de la place (taux de rémunération moyen 8 %).

Le constat fait sur terrain au niveau de l'exploitation montre qu'il y a des problèmes de gestion et de dimensionnement des équipements. La période hivernale se présente comme période morte de l'exploitation. Du mois de juillet au mois de septembre les volumes d'eau consommés diminuent considérablement, ainsi que les recettes.

Cela s'explique par les faits suivant:

- en hivernage, il y a beaucoup de points d'eau à la disposition des exploitants
- mauvaise gestion des bornes fontaines par les fontainiers
- non versement des recettes en intégralité
- utilisation gratuite de l'eau par certains usagers.

En observant les figures 11, 12, 13 et 14, concernant l'exploitation du réseau de deux villages du P.R.S (KAÏN et POUGNANGO), on s'aperçoit qu'il y a un grand écart entre les productions potentielles et les productions réalisées, ce qui laisse entrevoir un surdimensionnement des équipements. Et cette situation est presque générale avec tous les villages travaillant avec le P.R.S sur le pompage photovoltaïque. Les valeurs moyennes des productions potentielles et productions réalisées sont:

KAÏN: production potentielle

806,4 m³/an production réalisée

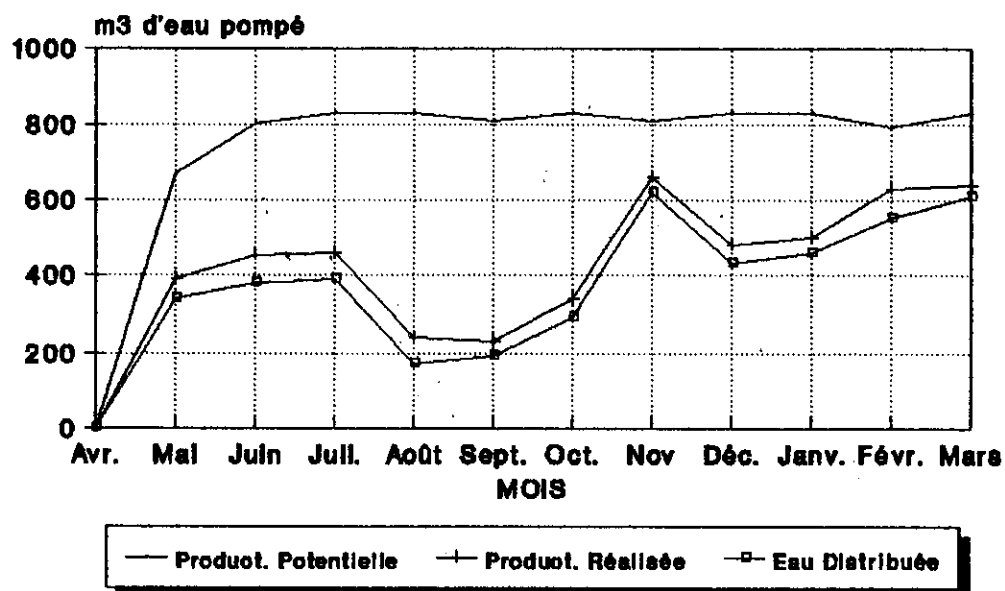
456,4 m³/an soit un volume non
consommé de 350 m³/an

POUGNANGO: production potentielle

583 m³/an production réalisée

230 m³/an soit un volume non
consommé de 353 m³/an

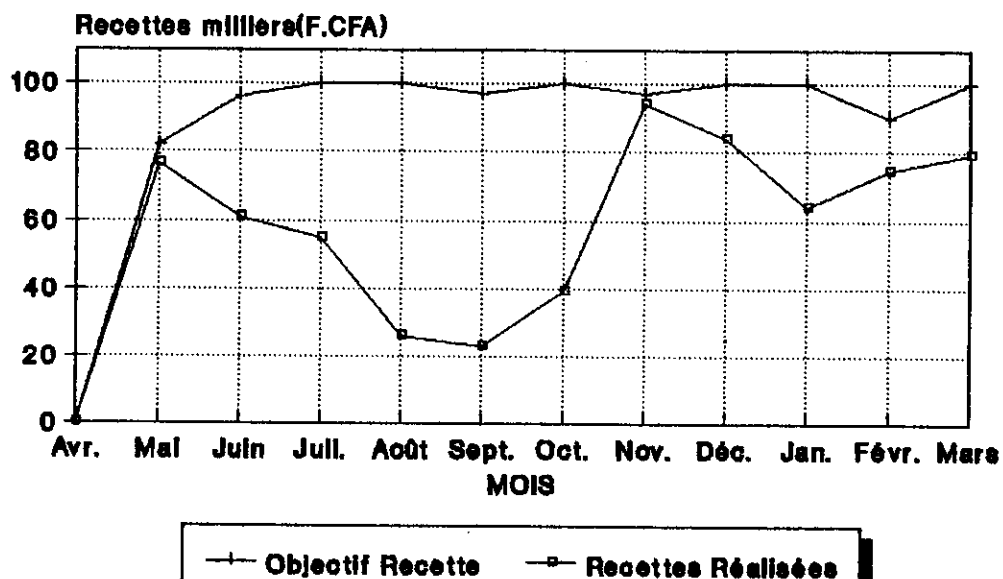
**Figure 11: ETAT DE PRODUCTION ET DE DISTRIBUTION
DE L'EAU DU VILLAGE DE KAIN
(BURKINA FASO) ANNEE 1993-1994**



DAO Robert

Source: C.I.L.S.S./P.R.S.

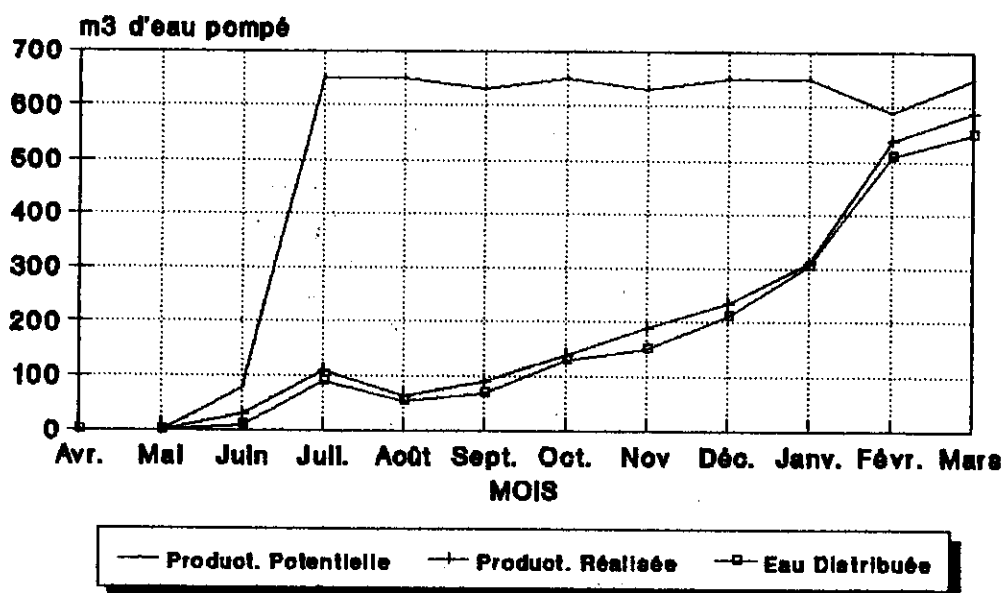
**Figure 12: ETAT DES RECETTES DE L'EAU VENDUE
DU VILLAGE DE KAIN (BURKINA FASO)
ANNEE 1993-1994**



DAO Robert

Source: C.I.L.S.S./P.R.S.

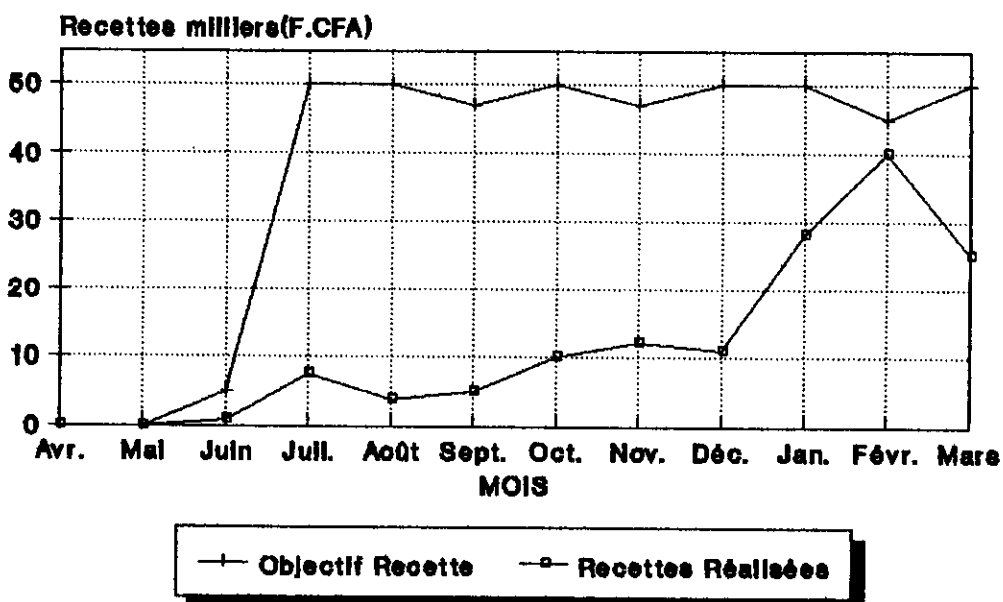
**Figure 13: ETAT DE PRODUCTION ET DE DISTRIBUTION
DE L'EAU DU VILLAGE DE POUGNANGO
(BURKINA FASO) ANNEE 1993-1994**



DAO Robert

Sources: C.I.L.S.S./P.R.S.

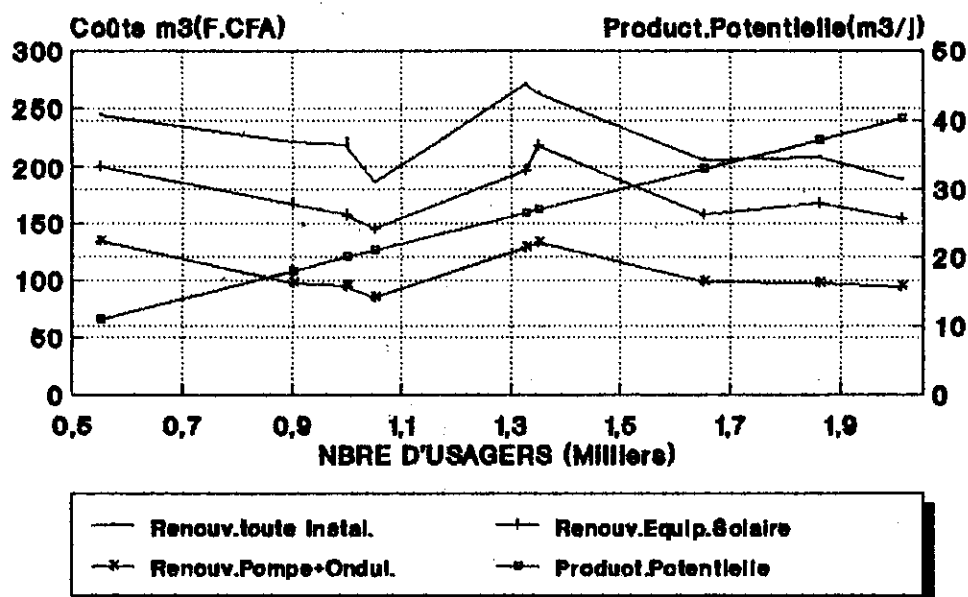
**Figure 14: ETAT DES RECETTES DE L'EAU VENDUE DU
VILLAGE DE POUGNANGO (BURKINA FASO)
ANNEE 1993-1994**



DAO Robert

Sources: C.I.L.S.S./P.R.S.

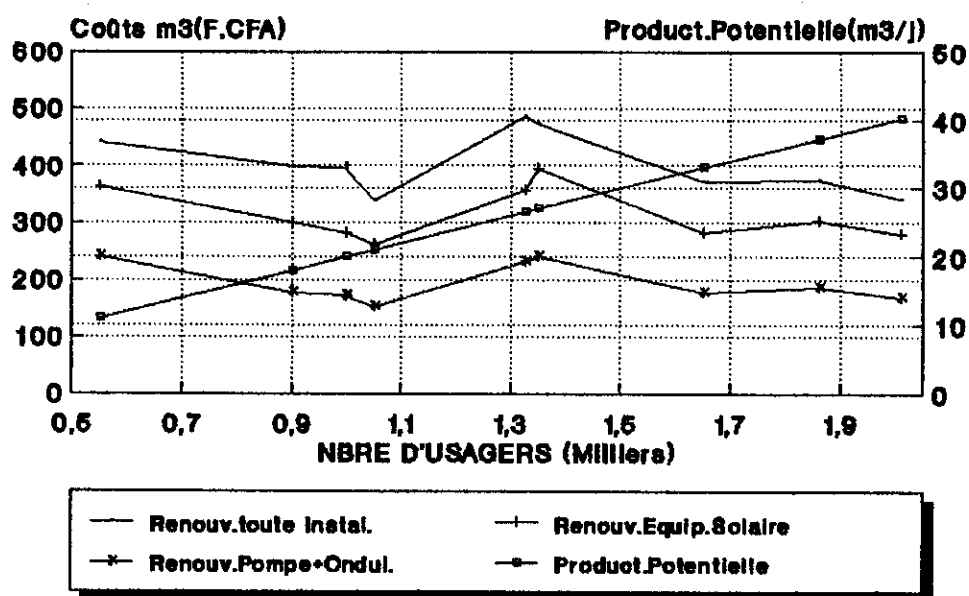
Figure 15: **COUTS DU M3 POMPE DE QUELQUES VILLAGES
P.R.S (BURKINA FASO).EAU CONSOMMEE-90%
DE LA PRODUCTION POTENTIELLE**



DAO Robert

Source: C.I.L.S.S./P.R.S.

Figure 16: **COUTS DU M3 D'EAU DE QUELQUES VILLAGES
P.R.S (BURKINA FASO).EAU CONSOMMEE-50%
DE LA PRODUCTION POTENTIELLE**



DAO Robert

Source: C.I.L.S.S./P.R.S.

Nous pourrions expliquer cette non consommation par un surdimensionnement des stations. La consommation spécifique de 20 litres/personne/jour est une valeur imposée par l'O.M.S. et qui ne correspond pas forcément à la consommation spécifique des bénéficiaires.

Ces communautés familiarisées au manque d'eau, ont pris l'habitude de gérer rationnellement les quantités infimes d'eau disponibles au point d'approvisionnement. Donc pour l'estimation des besoins en eau en vue d'un dimensionnement, il est nécessaire de faire des enquêtes réalistes permettant d'estimer la quantité d'eau utile/personne/jour, au lieu d'utiliser des valeurs préétablies ne correspondant pas toujours aux besoins réels des populations.

Ces cas de surdimensionnements ont des impacts sur la couverture des charges récurrentes, comme nous pouvons le constater sur les figures 15 et 16

- Maintenance:

La maintenance quotidienne est assurée par les gardiens (responsables de la marche et l'arrêt) et les fontainiers. Chaque village est libre de choisir son gardien et ses fontainiers. Ceux-ci, rémunérés avec les revenus de la vente de l'eau, sont volontaires pour assurer ce service. Cette rémunération malgré son taux très faible, permet d'augmenter leur motivation afin de leur permettre d'exécuter leur fonction dans de bonnes conditions.

En plus de l'entretien quotidien qui se limite au dépoussiérage des modules photovoltaïques et à la mise en marche et l'arrêt du système de pompage, les fontainiers et les gardiens ne reçoivent généralement aucune formation leur permettant d'assurer le minimum de dépannage des équipements.

Pour assurer la maintenance des équipements les villages signent des contrats de maintenance avec des sous-traitants ou des représentants des sociétés de fabrication (exemple Sahel Energie Solaire/Photowatt). Les bénéficiaires ont le choix entre trois (3) types de contrat:

- le contrat en garantie totale
- le contrat d'entretien hors pièces
- et l'intervention à la demande.

Le P.R.S a opté pour le contrat en garantie totale. Le fournisseur, contre paiement d'une prime forfaitaire généralement annuelle, garantit pour une durée de 5 ans le fonctionnement permanent de l'équipement.

Après analyse de ces différents schémas d'intervention, nous constatons que l'intervention à la demande est préférable.

II.2.3 Coût du pompage photovoltaïque:

Dans le soucis de renouveler les équipements amortis le P.R.S a fait des calculs de coût du m³ d'eau pompé. La durée de vie des équipements et le schéma de calcul des charges récurrentes se résument comme suit:

- Durée de vie des équipements

Tableau 5: Durée de vie des équipements

Matériel	Durée de vie
Générateur	20 ans
Onduleur	7 ans
Electropompe	7 ans
Divers accessoires	20 ans
Câbles électriques	30 ans
Tuyaux de refoulement	30 ans
Réservoir	25 ans
Réseau de canalisation	30 ans
Abreuvoir	20 ans

- Les coûts du contrat en garantie totale en fonction des catégories de pompe.

Tableau 6: Coût du contrat en garantie totale durée (5 ans) selon les catégories de pompe

Pompe	Puissance	Coût en garantie totale (F.CFA)
P1	300 à 350 Wc	125 050 F/an
P2	600 à 650 Wc	176 550 F/an
P3	600 à 650 Wc	176 550 F/an
P4	1350 à 1450 Wc	235 000 F/an
P5	2300 à 2500 Wc	250 000 F/an
P6	3700 à 3900 Wc	264 800 F/ an

- Provision annuelle d'entretien courant du réseau: le calcul est fait sur la base de 1% du coût total du réseau.

- Les frais annuels de fonctionnement:

- . frais de gestion du comité: déterminés en raison de 1 à 5% de toutes les autres charges sauf la rétribution des fontainiers.
- . rétribution annuelle des fontainiers est calculée sur la base de 5 à 15% des recettes du point d'eau.

Le P.R.S a étudié trois (3) niveaux de renouvellement à savoir:

- Cas 1: le renouvellement de toute les installations
- Cas 2: le renouvellement des installations de pompage solaire
- Cas 3: le renouvellement de la pompe et l'onduleur

Après étude des différents coûts de renouvellement, le P.R.S a adopté le 3^{ème} cas, car il semble être mieux supportable par les bénéficiaire. Mais voyons de plus près le 1^{er} cas de renouvellement qui tient compte de toute les installations. Le prix du m³ d'eau pompé résultant de ce calcul est inaccessible pour les bénéficiaires, comme nous pouvons le remarquer sur les figures 15 et 16. Le m³ d'eau atteint parfois 500 F CFA, ce qui est effectivement élevé pour des communautés à faibles revenus. Le surdimensionnement est sans doute à l'origine de ce problème.

A titre d'exemple SOUMARANI (une localité de 421 habitants) est équipée d'une pompe P4, avec un générateur de 1575 Wc, pour un débit de 19,51 m³/jour, tandis que les besoins en eau estimés, en supposant que toute la population se sert à la borne fontaine, s'élèvent à 8,4 m³/jour, ce qui aboutit à un surdimensionnement de 132 %.

Dans le souci d'améliorer ces coûts de m³ d'eau pompé, nous avons effectué d'autres calculs d'amortissement sur de nouvelles bases. Nous nous sommes intéressés au cas du renouvellement de tous les équipements, car il n'est pas intéressant de fournir des équipements aux communautés, lorsque ceux-ci ne sont pas en mesure de les renouveler. Donc la logique des choses voudrait que le dimensionnement soit fait avec beaucoup de rigueur afin d'éviter les cas de surdimensionnement.

Dans l'estimation des besoins en eau, nous proposons les valeurs suivantes:

- 20 litres/personne/jour (bien que la consommation spécifique d'une personne observée dans l'exploitation des différentes stations de pompage varie de 5 à 7 litres/personne/jour)
- 30 litres/gros bétail/jour
- 5 litres/petit bétail/jour
- 70 m³/ha/jour

Une détermination graphique de la puissance crête du générateur ainsi que le débit journalier est effectuée sur les figures 17, 18 et 19.

La maintenance des équipements ne devra être plus assurée par un contrat en garantie totale, mais par un "entretien à la demande", nécessitant une provision de dépense de 100 000 F.CFA. De toute façon en cas de panne très lourde, ce qui est très rare lors des premières années de fonctionnement, la contribution initiale pourrait être utilisée afin de remettre en bon état l'installation.

Il faut au maximum un fontainier et un pompiste pour l'exploitation de l'installation.

Après ces hypothèses, nous avons déterminé les coûts du m³ d'eau pompé pour différentes puissances crête du générateur. Les graphiques sont représentés dans le chapitre (*élaboration des ratios technico-économiques*) figures 20 et 21. Les calculs détaillés des charges récurrentes annuelles se trouvent en annexe 1.

Tableau 7: Coût total (avant dévaluation du F.CFA) des équipements de pompage des villages travaillant avec le PRS

Villages	Popula- tion estimée en 1993	Popula- tion estimée en 2003	Nbre de personnes satisfaite à 20 l/jour	% de la population desservie	Coût total des installations	Charges annuelles Cas 1	Charges annuelles Cas 3
Bassan	983	1 052	939	96%	20 428 337	1 432 385	623 112
Béma mossi	2 782	2 872	1 582	56%	33 856 851	2 363 745	1 096 628
Bokin	2 670	4 349	1 582	59%	40 767 674	2 834 683	1 331 521
Boulounsi	451	451	581,5	129%	10 576 498	881 451	468 997
Banounou	1 032	1 334	1 615	156%	28 957 107	2 183 597	1 065 117
Bougounam	2 601	3 124	900	35%	18 056 917	1 311 273	578 532
Bouna	505	628	1 080	214%	15 049 029	1 150 934	558 991
Bounou- Taoga	2 930	3 218	1 860	63%	33 884 539	2 542 473	1 253 382
Gomboro	4 233	4 233	1 650	39%	30 835 837	2 238 485	1 074 574
Djimbara	1 351	1 395	1 200	89%	25 274 262	1 640 570	668 964
Kassoum	1 224	1 224	1 600	131%	29 272 174	2 158 627	1 051 014
Kaïn	2 306	3 099	1 360	59%	29 775 259	2 329 041	1 182 958
Koumbara	1 737	1 737	947	55%	18 797 757	1 362 311	603 824
Namassa	1 342	1 511	1000	75%	19 923 196	1 425 743	620 683
Pini	621	621	857,5	138%	15 249 375	1 167 179	542 852
Pilimpikou	6 667	7 460	551	8%	10 826 660	888 583	483 436
Pofana	1 678	1 776	1 000	60%	20 458 986	1 470 965	627 057
Pougniango	1 055	1 055	1 050	100%	16 766 897	1 291 814	588 205
Poro	1 141	1 533	1 165	102%	14 990 477	1 153 828	539 893
Ramatoulaye	2 062	2 097	1 326	64%	32 516 959	2 353 769	1 118 482
Remene	697	697	950	136%	16 894 111	1 266 080	573 350
Soumarani	421	421	975,5	232%	15 223 397	1 167 843	542 555
Tiébléga	1 073	1 162	1 000	93%	20 372 239	1 445 155	626 025
Tomba	1 041	1 399	868,5	83%	14 938 124	1 149 686	539 295
Toubiango	2 123	2 525	540,5	25,5%	11 075 359	907 296	472 850
Yabonsgo	1 055	1 418	928	88%	18 816 651	1 364 404	604 048
Yaba	5 741	7 046	2 010	35%	32 806 343	2 493 021	1 241 163
Youba	5 364	6 662	647,5	12%	11 008 271	903 450	472 063

II.3 Impacts Sociologiques:

La réalisation de tout projet a des impacts sur le milieu accueillant, ces derniers pouvant être positifs ou négatifs.

II.3.1 Impact sur le développement:

A la suite des enquêtes effectuées lors des différentes sorties de terrain, il s'est avéré que la réalisation des points d'eau (pompage photovoltaïque) a un impact sur le développement des communautés bénéficiaires.

Les aspects les plus importants que nous pouvons signaler sont les suivants:

- la renaissance de l'espoir chez les utilisateurs qui sont quotidiennement menacés d'une part par les aléas climatiques (mauvaise répartition pluviométrique), et d'autre part exposés à des maladies hydriques. Ces maladies qui sont particulièrement dangereuses et mortelles, causent un retard sans précédent du tissu économique. Nous donnons ci-dessous quelques exemples de maladies assez fréquentes dans les sites concernés:
 - l'ascaridiose
 - la shistosomiase
 - l'ankylostomiase
 - la dracunculose
 - les maladies diarrhéiques.
- la création et le développement d'activités rémunératrices telles que le maraîchage, le filetage du coton, petit élevage, poterie, ...
- la diminution du flux d'exode rural vers les villes, où ces populations traumatisées par des maladies graves et souvent mortelles, espéraient avoir de meilleures conditions de vie.

Les enfants étaient généralement victimes des maladies diarrhéiques, tandis que la dracunculose invalidait les bras valides des familles; tout cela contribuant à briser l'élan économique. Mais avec la réalisation de certains points d'eau permettant l'alimentation en eau potable de quelques villages, nous constatons que le taux de contamination de ces maladies graves a diminué considérablement.

A titre d'exemple, après chaque hivernage la localité de SANKANANE, située environ à 290 Kms de Oaugadougou, ne disposait d'aucune source d'approvisionnement en eau potable. La population était alors contrainte de faire le déplacement dans des villages voisins, sur des distances atteignant parfois 10 kms, pour s'approvisionner en eau. Aujourd'hui ce village est doté d'une pompe photovoltaïque qui fait la joie de toute la population.

II.3.2 Impact sur l'environnement:

La réalisation de tout projet dans un milieu est susceptible d'engendrer des modifications de l'écosystème. Ces modifications qui peuvent être constatées à court terme, moyen ou à long terme, sont de plusieurs ordres:

- épuisement des nappes souterraines. Ce phénomène est vite ressenti lorsqu'il s'agit d'une nappe non renouvelable. Une fois que la réserve disponible est épuisée, le forage devient négatif. Cela a des graves conséquences sur la flore et la faune de tous les cours d'eau qui drainent la nappe concernée
- le non respect des règles de construction des puits perdus peut engendrer le développement des foyers d'insectes nuisibles à la santé de l'Homme. Le constat sur le terrain montre effectivement que les puits perdus qui sont destinés à recevoir les eaux déjà utilisées (lessive, vaisselle,...) ne sont dimensionnés selon aucune règle technique. Généralement, ils sont à ciel ouvert au lieu d'être couverts par une dalle. Généralement le lit filtrant est inexistant, les profondeurs des puits perdus ne sont jamais respectées.

- le développement accru de l'élevage peut rapidement provoquer un surpâturage, ce qui aboutit à la destruction de la flore et de la texture des champs de culture
- le reboisement peut être activé grâce à la disponibilité de l'eau; cela est un élément très important dans la lutte contre la désertification
- la réalisation des périmètres maraîchers ou des périmètres irrigués (riz, maïs,...) est une bonne initiative de la part des exploitants. Mais cela nécessite un bon dimensionnement des canaux d'irrigation. La non maîtrise des vitesses d'écoulement, si elles sont trop forte par exemple, peut favoriser le développement des simulies (agents vecteurs de la trypanosomiase).

II.4 Effets du pompage photovoltaïque:

En plus des avantages liés à ce système de pompage, il est nécessaire d'énumérer les effets indésirables observés sur terrain:

- fragilité des modules: Les modules de plusieurs générateurs observés sur terrain sont cassés. Ces casses sont généralement dues aux jets de pierres de la part des enfants chassant les oiseaux. Ce qui est très dangereux pour le générateur, car à la longue l'eau peut s'infiltrer par des fissures et l'endommager de manière irréversible
- la puissance délivrée par le générateur est fonction de l'ensoleillement reçu. De ce fait, dans certaines conditions atmosphériques (présence de nuages, poussière,...) le soleil, est couvert et le volume d'eau pompé devient faible ou parfois nul
- Coûts d'investissement assez élevés
- la puissance délivrée par le générateur diminue pour une température ambiante supérieure à 25°C, et au fur et à mesure qu'il s'amortit, même s'il travaille dans les conditions les plus favorables.

CHAPITRE III: ELABORATION DES RATIOS TECHNICO-ECONOMIQUES

Par définition un ratio est un rapport entre deux quantités

III.1 Ratios techniques:

- Ratios de dimensionnement:

$$DIM = \frac{W1}{W2}$$

Le rapport doit être égal à 1

$W1 = 2,725 \cdot Q \cdot H.M.T$: c'est la puissance hydraulique nécessaire dans une journée.

$W2 = Rend.global \cdot Es \cdot Pc$: c'est la puissance hydraulique que doit fournir le système de pompage solaire.

Rend.global: c'est le rendement de l'ensemble (générateur, moteur, pompe). Il est pris égal à 0,35.

Es: c'est l'ensoleillement global journalier moyen, il est égal à 5,5 kwh/m²/j.

Q: c'est le débit journalier nécessaire en m³/j.

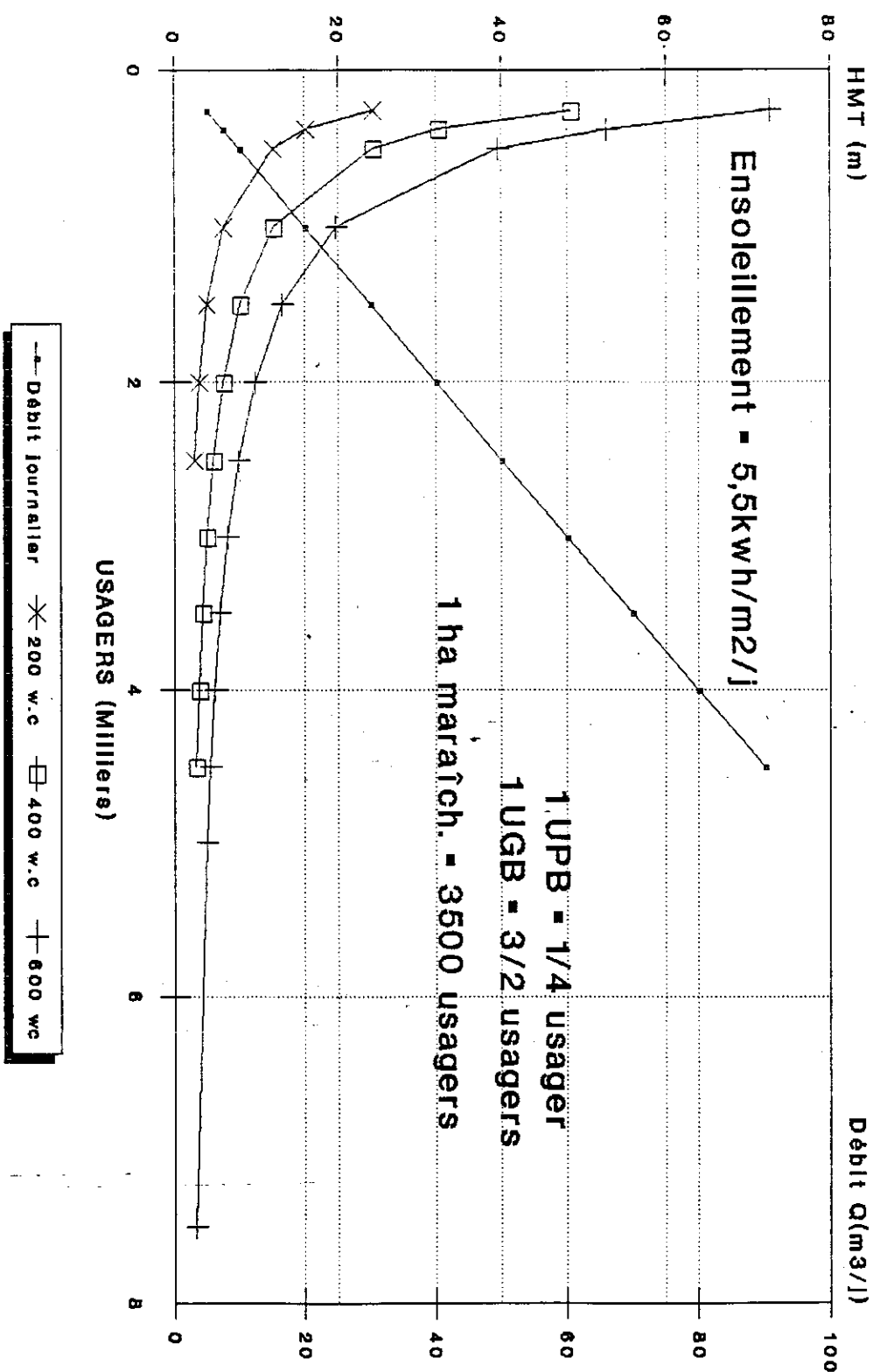
H.M.T: est la hauteur manométrique totale en m.

Pc: est la puissance crête du générateur en Wc.

Les différents ratios calculés, ont permis de constituer des abaques de dimensionnement. Connaissant le nombre d'usagers et la hauteur manométrique totale nécessaire pour l'exhaure, alors on en déduit simplement la puissance crête du générateur qu'il faut installer (cf: figure 17, 18 et 19).

Figure 17:

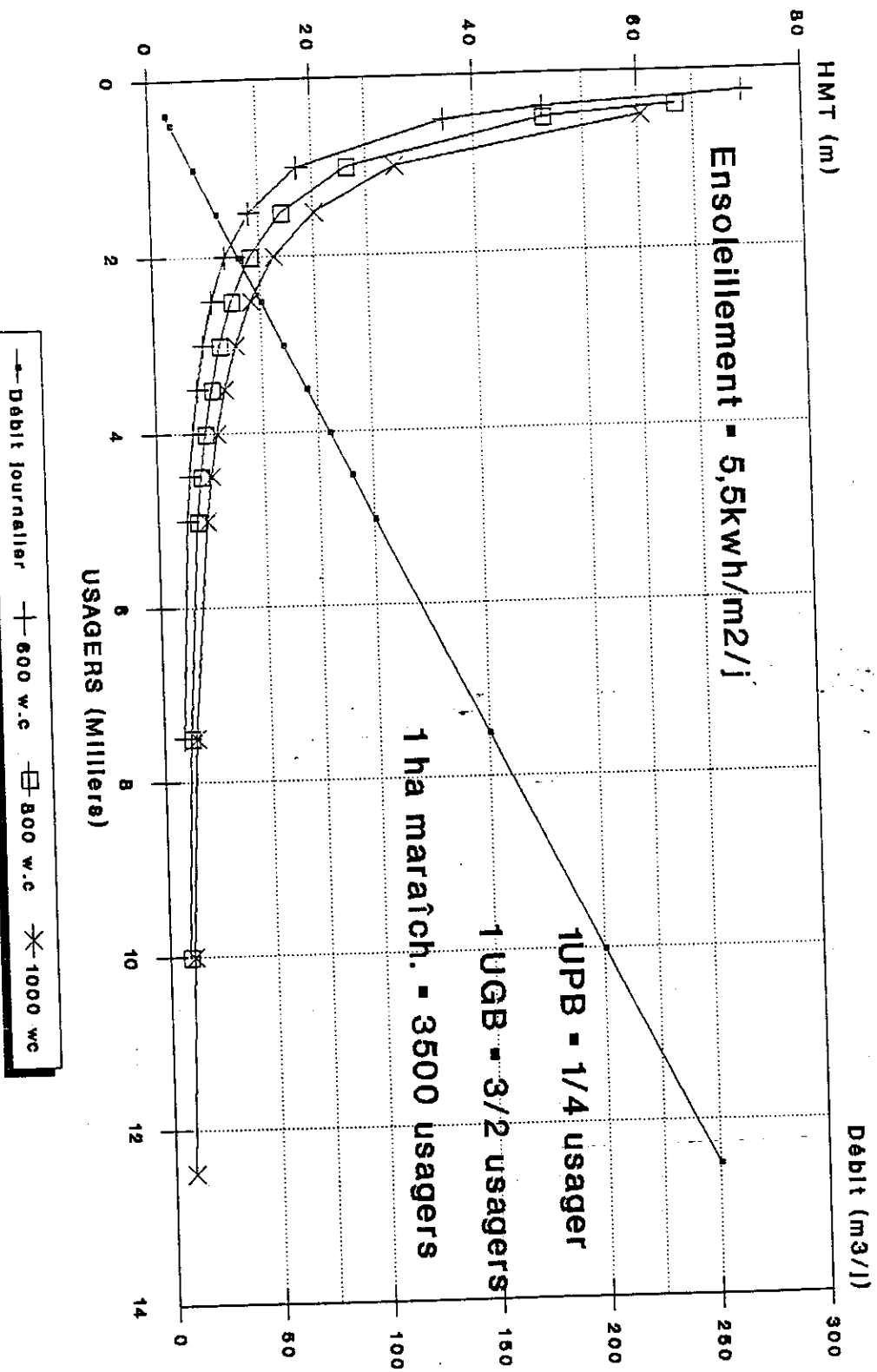
**DETERMINATION DE LA PUISSANCE CRETE
DU GENERATEUR A PARTIR DU NOMBRE
D'USAGERS ET DE LA HMT**



PAO Robert

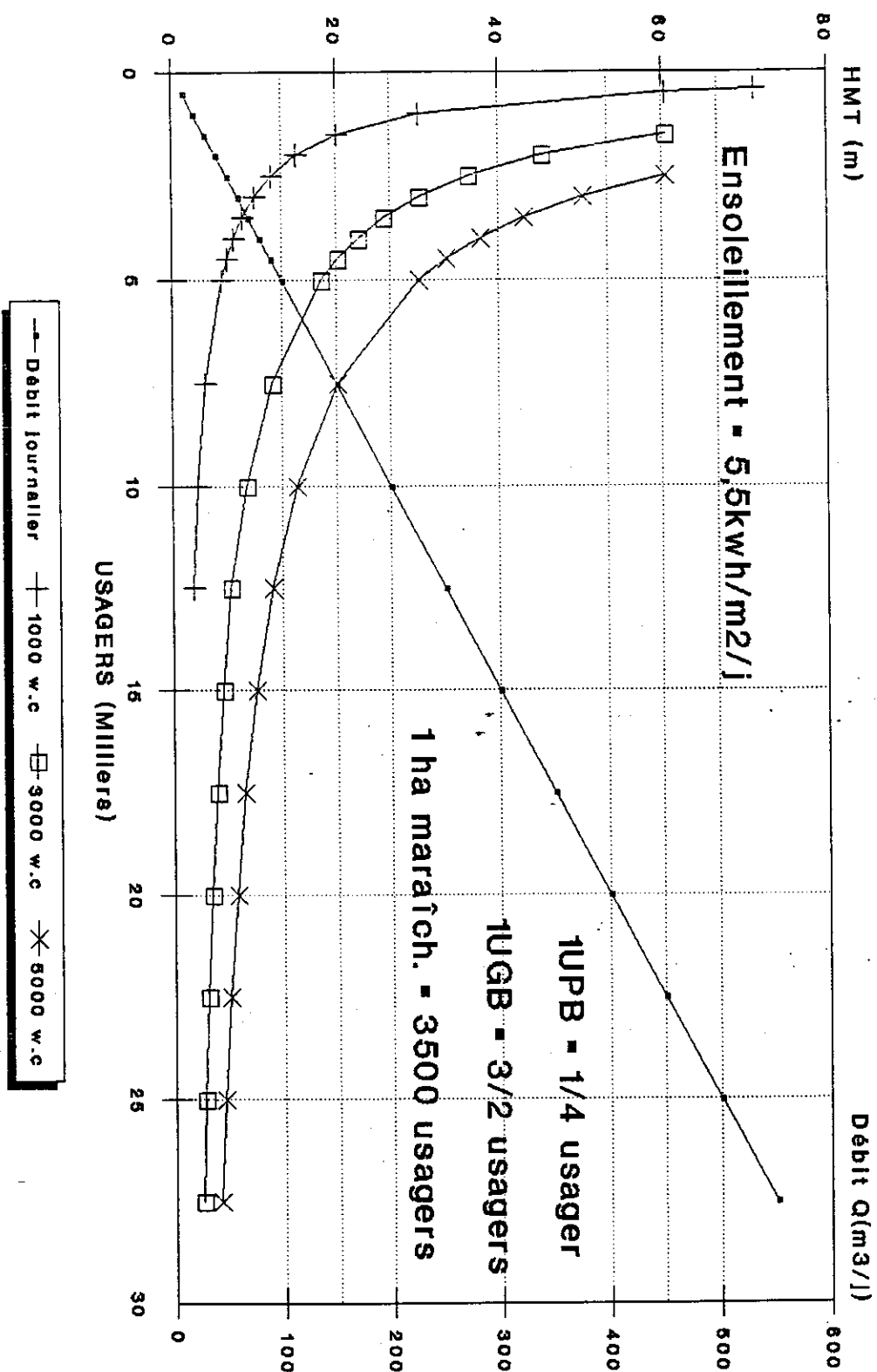
Figure 18:

**DETERMINATION DE LA PUISSANCE CRETE
DU GENERATEUR A PARTIR DU NOMBRE
D'USAGERS ET DE LA HMT**



DAO Robert

Figure 19:
DETERMINATION DE LA PUISSANCE CRETE
DU GENERATEUR A PARTIR DU NOMBRE
D'USAGERS ET DE LA HMT



- Ratios d'"implantation du générateur":

Ces ratios ont pour but de donner à l'agent installateur des équipements, les plages d'angles d'inclinaison et d'orientation à respecter; afin que le générateur reçoive le maximum de rayons solaires. Voyons le cas de 3 pays du C.I.L.S.S.

Tableau 8: Ratio d'implantation du générateur

PAYS	ORIENTATION	INCLINAISON/HORIZONTALE
Burkina Faso	[0 à 7° S]	[10 à 15°]
Niger	[0 à 5° S]	[12 à 23°]
Tchad	[0 à 3,5° S]	[8 à 23°]

- Ratios "coûts/performances":

Ce ratio est calculé à partir des coûts des équipements solaires (générateur, onduleur, électropompe, tuyau souple, câbles électriques, les divers accessoires) et la performance moyenne des pompes.

Tableau 9: Ratio Coût / performance des pompes de forage

CATEGORIES DE POMPE	PERFORMANCE MOYENNE	COÛTS/PERFORMANCES
P3	340 m ³ /jour	19116 F.CFA/m ³ /jour
P4	820 m ³ /jour	12073 F.CFA/m ³ /jour
P5	1340 m ³ /jour	12268 F.CFA/m ³ /jour
P6	2050 m ³ /jour	10198 F.CFA/m ³ /jour

La performance (m³/jour) = Débit (m³/jour)*H.M.T(m)

III.2 Ratios économiques:

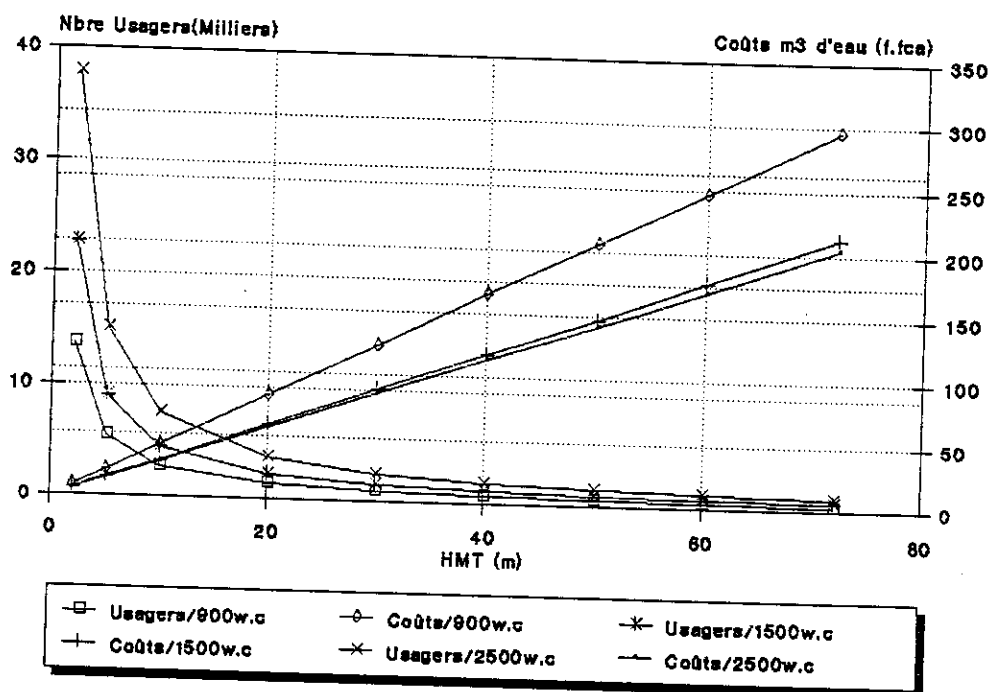
- Ratios "coûts du m³ d'eau pompé":

Ils sont calculés à partir du coût total des installations et de la production potentielle permettant de prévoir le renouvellement des équipements amortis (cf. figure 20 et 21).

- Ratios "coûts total des installations/nombre d'usagers":

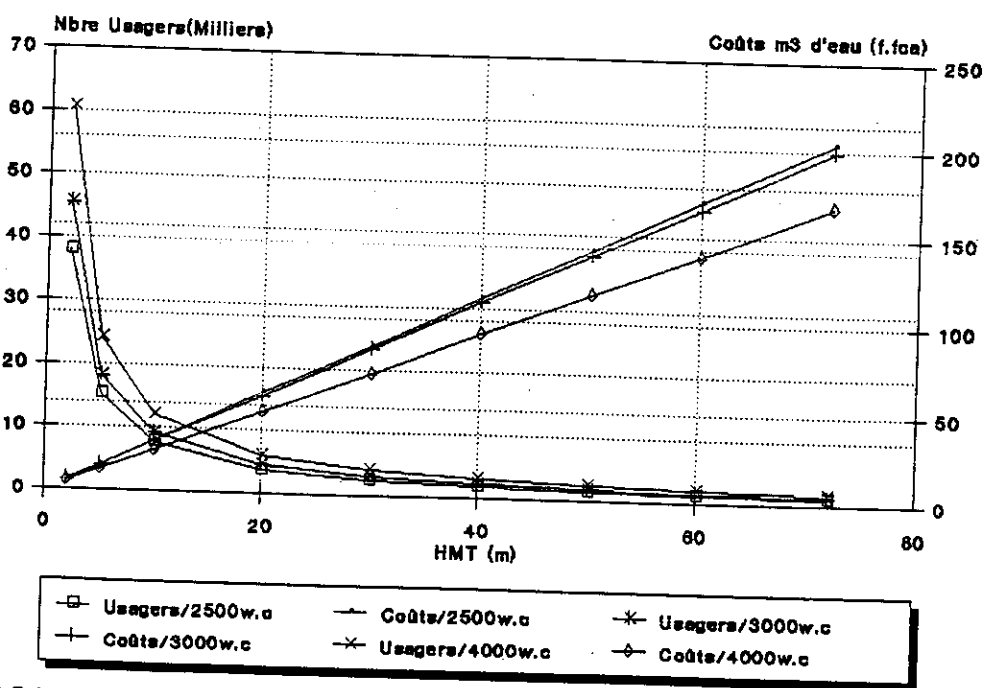
Cette deuxième méthode de calcul des charges récurrentes dues au renouvellement des équipements, leur entretien, les salaires des fontainiers et les frais de fonctionnement du comité de gestion, consiste à répartir ces charges sur le nombre d'usagers. Ces ratios ont l'avantage d'être plus souples à l'exécution. Les différentes familles payent leur montant à la fin de chaque mois (cf. figure 22 et 23).

Figure 20: DETERMINATION DES COÛTS DU M3 D'EAU EN
FONCTION DE LA HMT, DE LA PUISSANCE
CRETE ET DU NOMBRE D'USAGERS



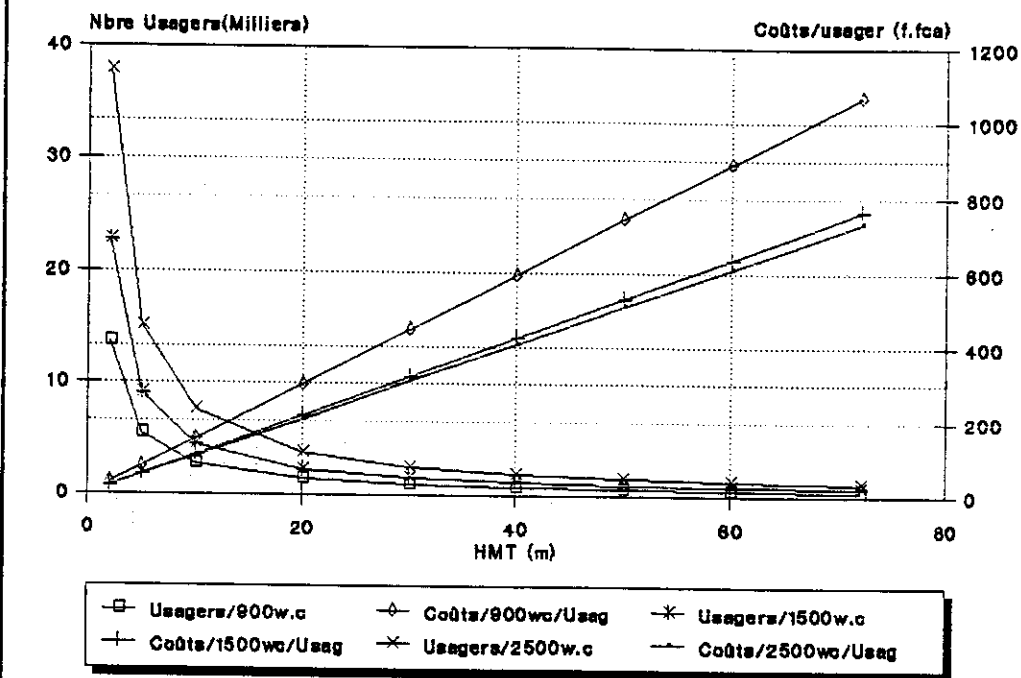
DAO Robert

Figure 21: DETERMINATION DES COÛTS DU M3 D'EAU EN
FONCTION DE LA HMT, DE LA PUISSANCE
CRETE ET DU NOMBRE D'USAGERS



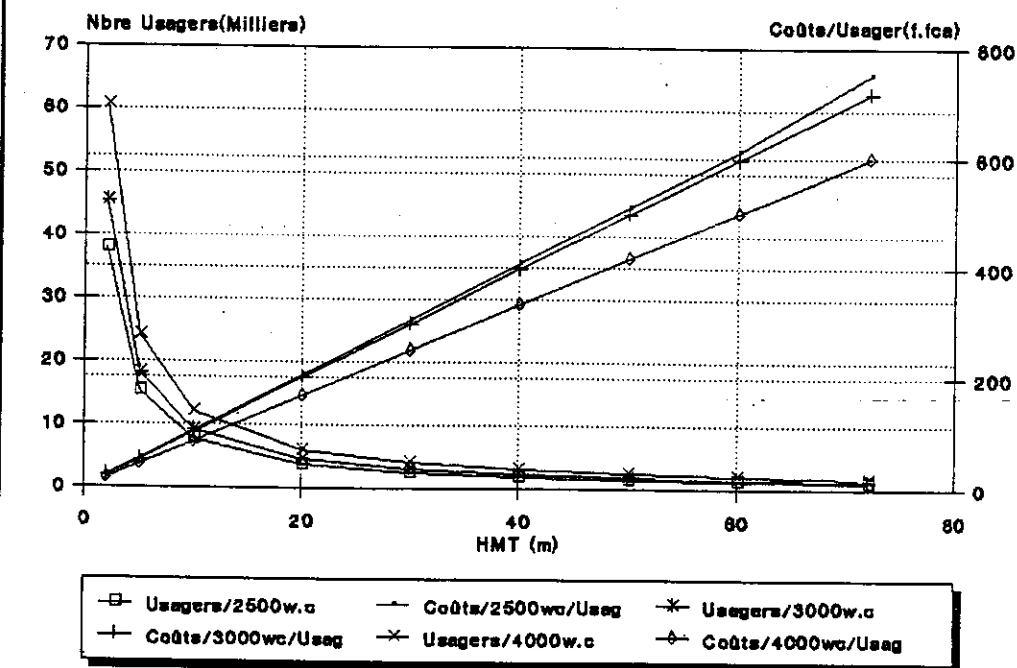
DAO Robert

Figure 22: DETERMINATION DES COUTS DE RENOUVELLEMENT/USAGER EN FONCTION DE LA HMT ET DE LA PUISSANCE CRETE DU GENERATEUR



DAQ Robert

Figure 23: DETERMINATION DES COUTS DE RENOUVELLEMENT/USAGER EN FONCTION DE LA HMT ET DE LA PUISSANCE CRETE DU GENERATEUR



DAQ Robert

- Ratio "eau produite/production potentielle":

Ce ratio doit être égal à 100%, sinon il doit y avoir une anomalie sur l'électropompe (saletés), ou sur le tuyau de refoulement.

- Ratio "eau vendue/eau distribuée":

Il doit être égal au moins à 90%, en considérant 10% de pertes (eau de rinçage des récipients, etc.).

- Ratio "eau distribuée/eau produite":

Il doit être au moins égal à 95%, en considérant 5% de pertes dans le réseau.

- Ratio "coût total de maintenance/valeur des actifs immobilisés maintenus":

Ce ratio ne peut être chiffré immédiatement, car le coût total de maintenance et le coût total des équipements sont variables. Ce ratio a l'avantage de pouvoir faire une comparaison d'une année à l'autre et de prévoir un budget de maintenance.

- Ratio d'indicateurs des moyens de production:

***Productivité Opérationnelle:**

$$PO = \frac{\text{Volume d'eau pompé/jour}}{\text{Temps requis}}$$

Le temps requis est fixé à 7 heures. Le ratio PO est calculé en fonction du nombre d'usagers de la hauteur manométrique totale et de la puissance crête du générateur. La représentation est faite sur les figures 24, 25 et 26.

Figure 24:

**DETERMINATION DE LA PRODUCTIVITE
OPERATIONNELLE A PARTIR DU
NOMBRE D'USAGERS**

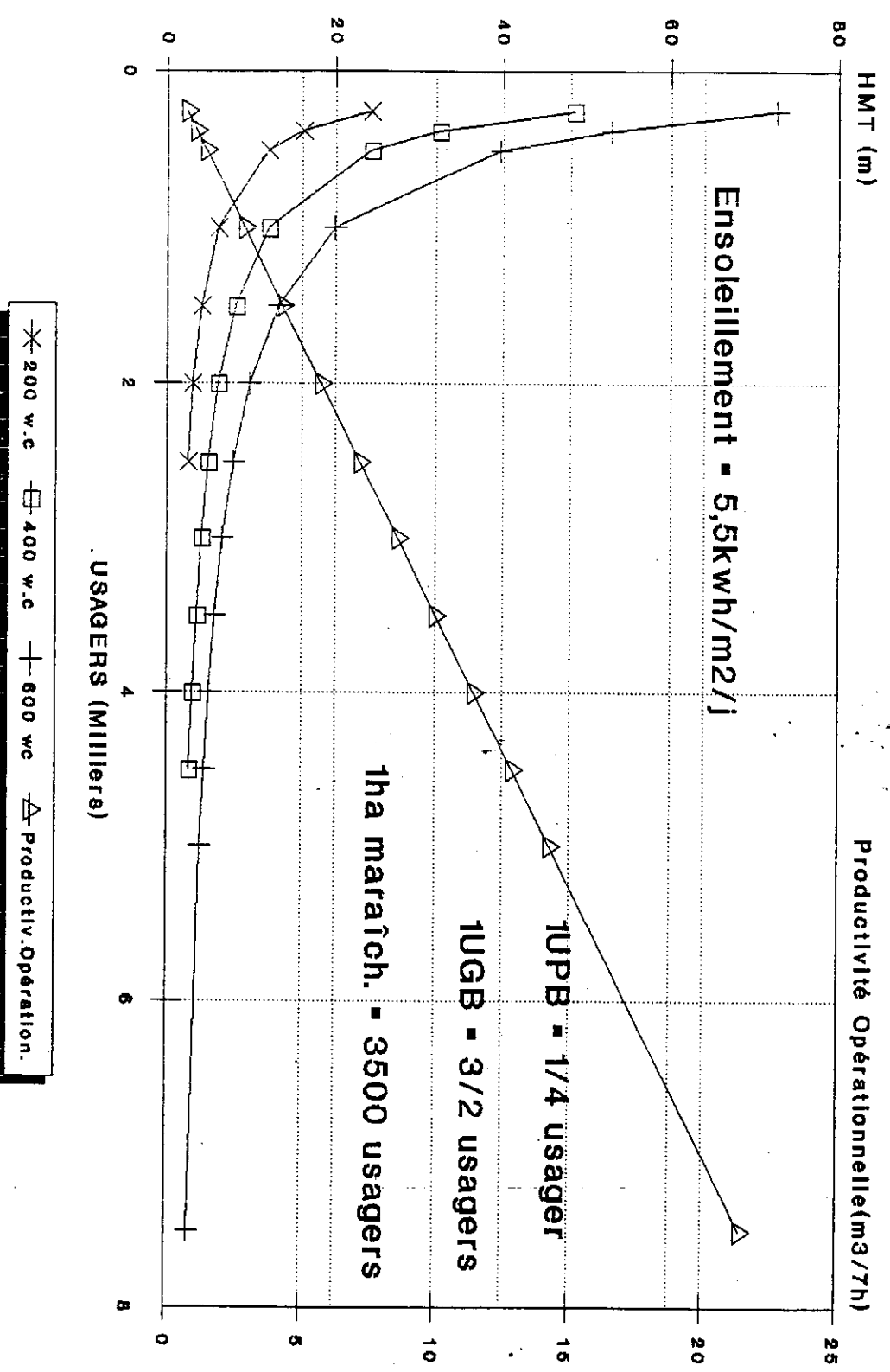


Figure 25:

**DETERMINATION DE LA PRODUCTION
OPERATIONNELLE A PARTIR DU NOMBRE
D'USAGERS**

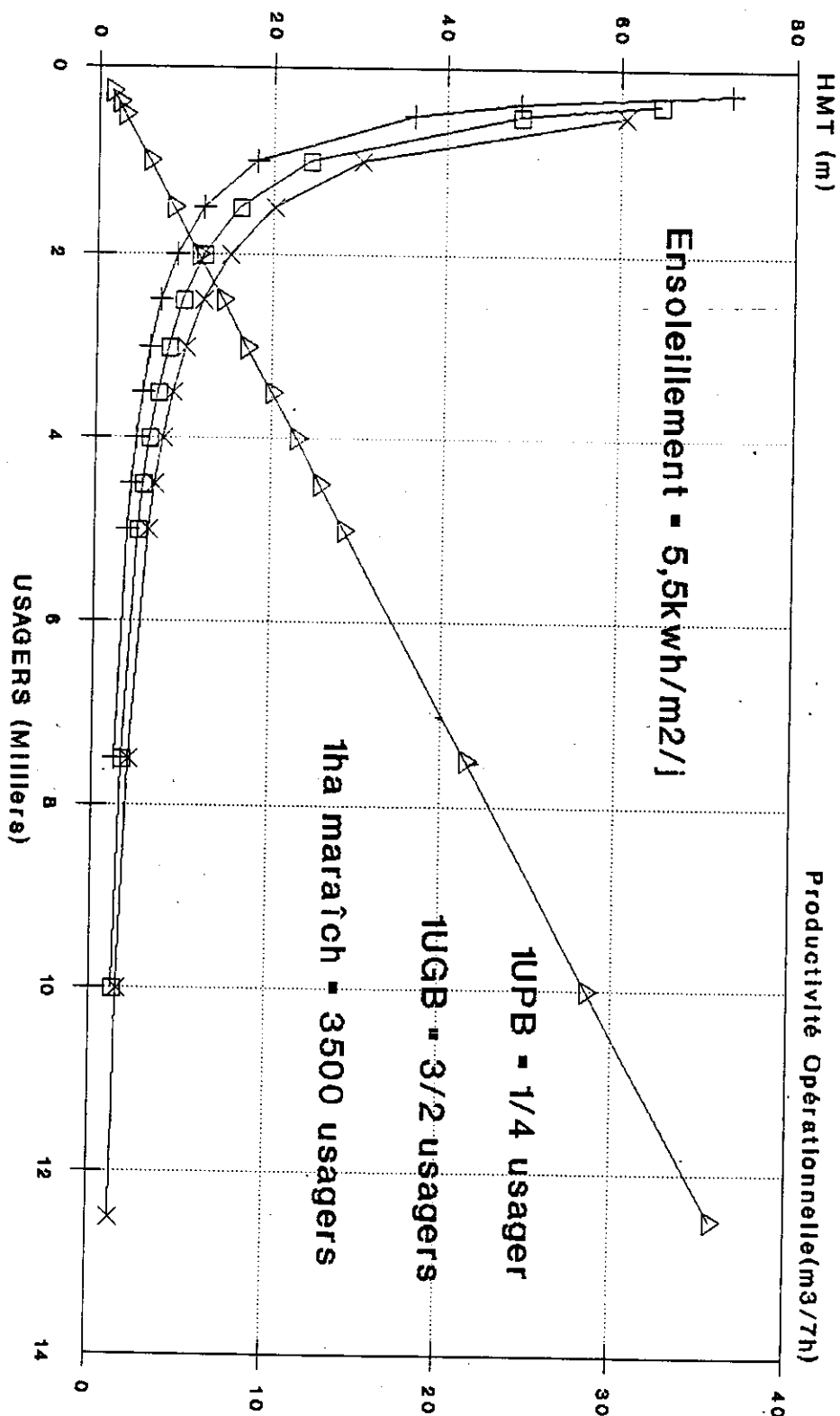
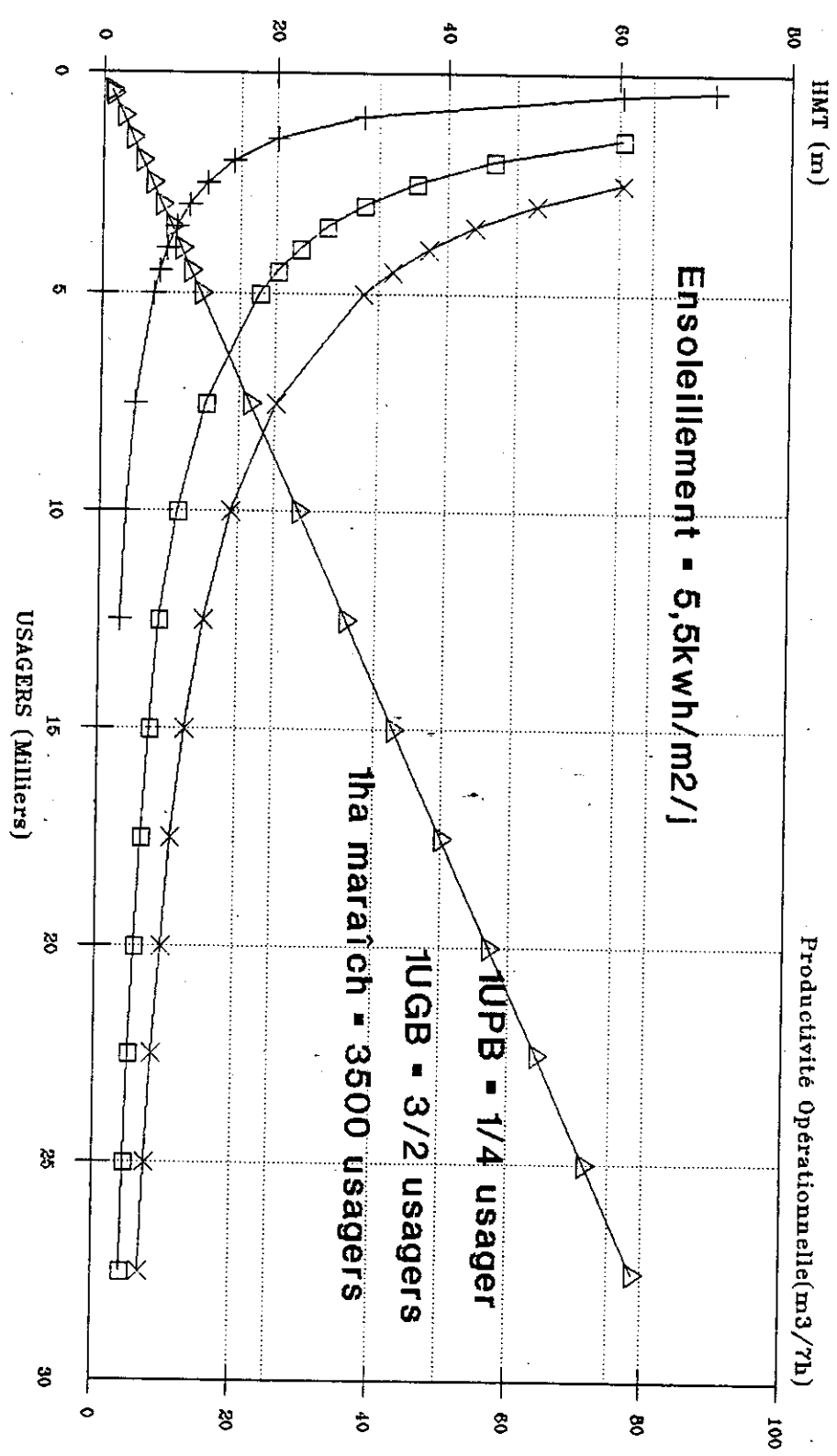


Figure 26:

**DETERMINATION DE LA PRODUCTIVITE
OPERATIONNELLE A PARTIR DU NOMBRE
D'USAGERS**



▲ Productivité Opérationnelle
 + 1000 w.c.
 □ 3000 w.c.
 × 5000 w.c.

*** Disponibilité Opérationnelle:**

$$DO = \frac{\text{Temps de fonctionnement}}{\text{Temps requis}}$$

Avec une bonne gestion DO doit être compris entre 95% et 100%.

Si Do est inférieure à 95 %, cela signifie que les usagers n'utilisent pas assez d'eau. Ce qui peut compromettre les coûts de renouvellement précédemment calculés.

III.3 Etude de cas:

Considérons un village de 2 000 habitants, dans lequel on souhaite réaliser un point d'eau potable. Supposons qu'on ait dans ce village un puits de 3 m³/jour, 100 unités de gros bétail, 200 unités de petit bétail. Par ailleurs, on souhaite réaliser également un jardin de 0,2 ha. La hauteur manométrique totale (H.M.T) est de 40 m.

Déterminons la puissance crête du générateur à installer, et le coût du m³ d'eau pompée, à partir du ratios définis précédemment.

1) Estimation des besoins en eau:

Tableau 10: besoins en eau proposés

1 usager	20 l/j
1 U.G.B	3/2 usagers
1 U.P.B	1/4 usager
1 ha maraîchage	3500 usagers

La méthodologie consiste à ramener tous les autres besoins en besoins usagers. Pour ce faire, on a défini une équivalence entre les besoins pastoraux agricoles et les besoins domestiques (Voir tableau 10).

* détermination du nombre total d'usagers

2000 personnes	→	2000 usagers
100 unités de gros bétail	→	150 usagers
200 unités de petit bétail	→	50 usagers
0,2 ha de maraîchage	→	700 usagers
Total	=	2900 usagers

* le debit journalier correspond est égal à

$$Q_j = 2900 \text{ usagers} \times 20 \text{ litres/usager/jour} = 58 \text{ m}^3/\text{jour}$$

2) Le débit de dimensionnement est égal à:

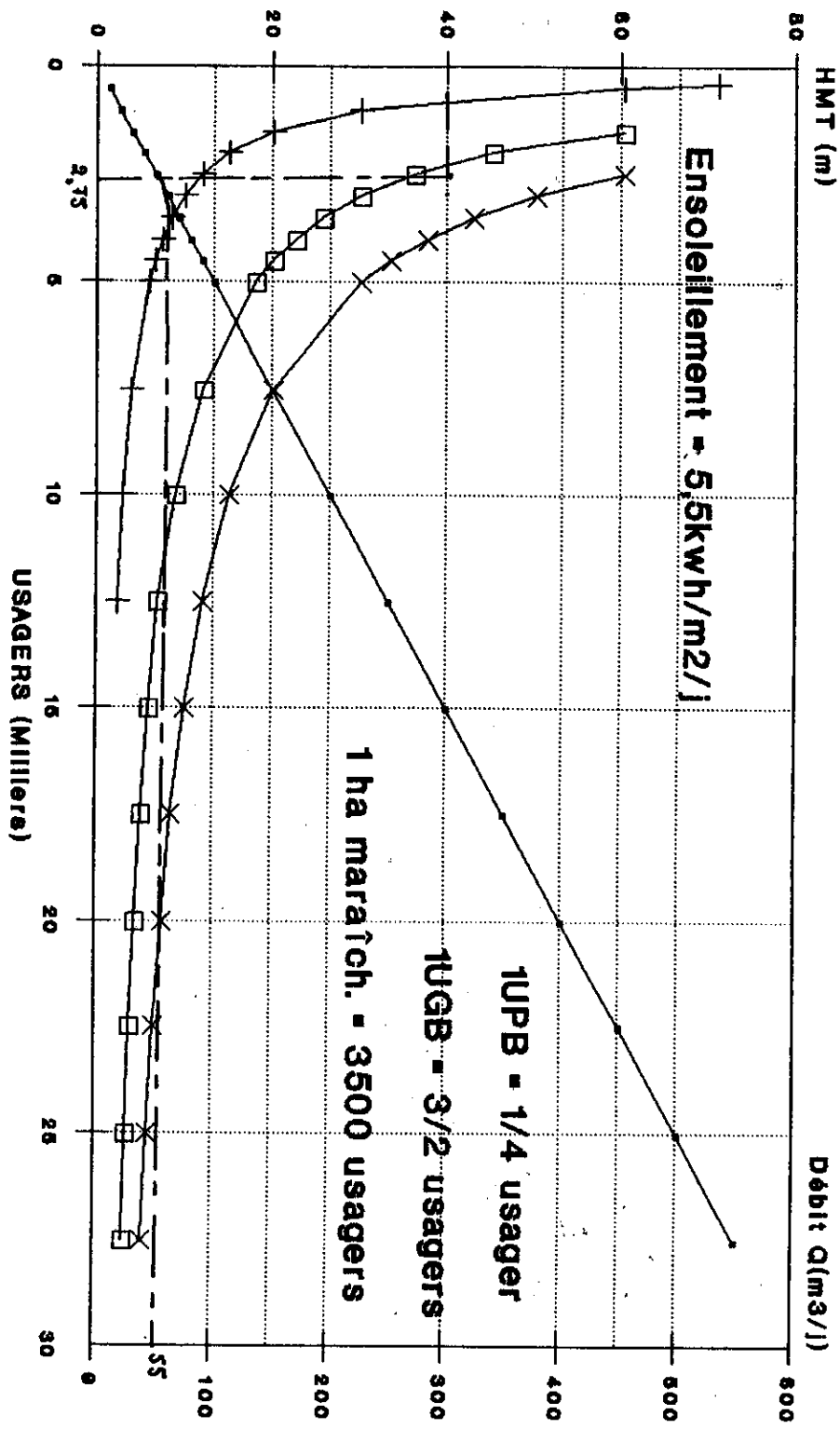
$$58 \text{ m}^3/\text{j} - 3 \text{ m}^3/\text{j} = 55 \text{ m}^3/\text{j}$$

On utilise la figure 19, pour déterminer le nombre d'usager correspondant à un débit de $55 \text{ m}^3/\text{j}$. soit 2 750 usagers et connaissant le H.M.T de 40 m, on détermine aisément la puissance crête du générateur, soit une puissance de 3 100 Wc.

3) Détermination du coût du m³ d'eau pompée:

On utilise la figure 21 et pour une H.M.T de 40 m le coût du m³ d'eau pompée sera égal à 120 F.CFA.

**Figure 19: DETERMINATION DE LA PUISSANCE CRETE
DU GENERATEUR A PARTIR DU NOMBRE
D'USAGERS ET DE LA HMT**



— Débit journalier — 1000 w.c. — 3000 w.c. — 5000 w.c.

Tableau 11: Recapitulatif des différents ratios et leur utilisation

Ratios	Utilisation
1) ratios de dimensionnement	Détermination de la puissance crête du générateur à installer, connaissant la H.M.T et le nombre d'utilisateurs (Figures 17, 18, 19)
2) ratios d'"implantation du générateur"	Indiquent à l'agent installateur des équipements les plages d'angles d'inclinaison et d'orientation à respecter, afin que le générateur reçoive le maximum de rayons solaires
3) ratios "coûts/performances"	Surtout utilisé dans le choix des pompes
4) ratios "coût du m ³ d'eau pompé"	Déterminent les prix de vente du m ³ d'eau pompé afin de pouvoir renouveler les équipements amortis
5) ratios "coût total des installations/nombre d'utilisateurs"	Permet de déterminer la charge récurrente à payer par chaque usager et par an, afin de permettre le renouvellement des équipements
6) ratio "eau produite/production potentielle"	Permet de mesurer le taux d'utilisation de l'eau par les usagers. Donne également une idée sur le bon fonctionnement de l'électropompe ou sur le tuyau de refoulement
7) ratio "eau vendue/eau distribuée"	Permet d'apprécier la rigueur des fontainiers dans la vente de l'eau
8) ratio "eau distribuée /eau produite"	Permet d'apprécier les pertes d'eau dans le réseau de canalisation (fuites)
9) ratio "coût total de maintenance/valeur des actifs immobilisés"	A l'avantage de pouvoir faire une comparaison d'une année à l'autre et de prévoir un budget de maintenance des équipements
10) ratios "productivité opérationnelle"	Permet de comparer le volume d'eau réellement pompé pendant le temps requis en un moment donné à sa valeur initiale de dimensionnement
11) ratio "disponibilité opérationnelle"	Permet de déterminer le taux d'utilisation de la pompe par les usagers

III.4 Recommandations:

- Les ratios "coûts du m³ d'eau pompé", ont été calculés à partir des coûts d'achat des équipements avant la dévaluation du franc CFA (F.CFA). Un coefficient majorateur devra être défini pour tenir compte de la dévaluation du F.CFA. Pour obtenir les coûts actualisés, il suffira de multiplier les ratios "coûts du m³ d'eau pompé" ou les ratios "coût des installations/usager" par ce coefficient:

- Pour que les deux ratios cités ci-dessus restent valables, il faut au plus:

- 1 réservoir d'eau de 10 m³
- 1 bassin maraîcher de 5 m³
- 1 borne fontaine
- 1 pompiste et 1 fontainier

- Pour des villages de moins de 900 habitants le pompage de surface est plus indiqué que celui de forage.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La réalisation des projets de pompage photovoltaïque coûte très cher. Ceci s'explique par le fait qu'il y a des éléments électronique dans le système (photopiles, onduleur), dont leur fabrication nécessite une connaissance technologique assez poussée. Ce qui a pour conséquence d'entraîner des coûts prohibitifs.

A titre d'exemple, considérons le cas d'une station de pompage solaire de 2 520 Wc: le générateur, l'onduleur, les tuyaux de refoulement, l'électropompe, les câbles électriques et les divers accessoires représentent respectivement 64%, 19%, 7%, 5%, 3%, et 2% du coûts total des équipements solaires. Bien que l'investissement initial ne soit pas du tout à la portée des communautés villageoises, il est nécessaire qu'ils soient capables de renouveler les équipements amortis.

Au terme de cette étude les suggestions ou lignes directrices pouvant contribuer à l'amélioration des résultats réalisés sur terrain sont:

- réduction à 5 membres les comités de gestion. Les postes nécessaires sont: la présidence, le secrétariat, la trésorerie, et l'hygiène. Le trésorier sera secondé par une autre personne, et le poste de responsable à l'hygiène reviendra exclusivement aux femmes
- alphabétisation des membres des comités de gestion
- Formation d'au moins une personne, pour les petites interventions (fuites de robinets, boulon desserré etc.)
- le président doit être si possible une personne influente dans le village (personne écoutée et respectée); Il veillera au versement des recettes de la vente d'eau
- utilisation d'un seau standard pour la vente de l'eau; cela à l'avantage de réduire le gaspillage de l'eau pour le rinçage des récipients, et évite l'utilisation des canaris et des calebasses, dont l'estimation du volume est complexe
- la vente de l'eau par un fontainier permanent et disponible au village (saison sèche et pluvieuse) pendant l'hivernage, pour mieux servir.

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

- 1- Systèmes photovoltaïques pour les pays en voie de développement.
Edition: Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie (A.F.M.E)
Sept.1982, T.FOGELMAN
- 2- La maîtrise de l'énergie et développement: Le pompage photovoltaïque
Edition: G.R.E.T/G.E.R.E.S/A.F.M.E Décembre 1986, J. BILLEREY
- 3- L'électricité solaire: La solution photovoltaïque
Edition: A.F.M.E Janvier 1987
- 4- Etude de faisabilité technique et socio-économique de l'insertion
d'unités de pompage photovoltaïque de faible puissance destinées à
la petite irrigation à partir des eaux de surface au Burkina Faso,
Mali, Niger et Sénégal
Edition: Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (C.I.E.H)
Sept.1987, T.ORUM (C.I.E.H.) et F.FRIGGIT (E.N.G.R.E.F.)
- 5- Comparaison technico-économique entre pompage solaire photovoltaïque
et pompage thermique sur maraîchage: site (Loumbila, Burkina Faso)
Mémoire (E.I.E.R.) Juin 1993 SEOUSSOU DJIMET
- 6- Documentation de photowatt International S.A. Edition: PHOTOWATT
- 7- Micro-Irrigation à partir des eaux souterraines. Etudes des
aquifères Edition: C.I.E.H Février 1992 B. DIAGANA et C.MEURVILLE
- 8- Guide de l'énergie solaire: Electricité solaire au service du
développement rural
Edition: Réseau International d'Energie Solaire (R.I.E.S) 1993
- 9- Module de formation d'Ingénieurs Agro-économistes ISTOM-Le HAVRE. Le
pompage photovoltaïque et l'approvisionnement en eau
Edition: A.F.M.E Mai 1991 Michel GOURILLON
- 10- Maintenance: Mathématique et méthodes Patrick LYONNET
- 11- Application de l'énergie photovoltaïque à l'alimentation en eau
potable dans les zones rurales:
F.N.D.A.E Septembre 1992
- 12- Volet Hydraulique Souterraine du P.D.I du Sourou, Yatenga, Passoré
BURGEAP (Septembre-Octobre 1993)
- 13- Guide pratique d'analyse des projets/Evaluation et choix
d'investissement
Manuel BRIDIER et Serge MICHAILOF.
- 14- Atlas Agroclimatique des pays de la zone du CILSS Notice et
Commentaire Programme AGRHYMET 1991; Robert MOREL

LISTE DES ANNEXES

	pages
Annexe 1: Calcul des charges annuelles dues au de renouvellement des équipements: taux d'inflation 0%	68
Annexe 2: Calcul des coûts du m ³ d'eau pompé à partir de la HMT, de la puissance crête du générateur et du nombre d'usagers.	69
Annexe 3: Calcul des charges annuelles de renouvellement des équipements: taux d'inflation 6%	70
Annexe 4: Répartition des coûts d'investissement en fonction des puissances crêtes	71
Annexe 5: Etat d'évolution des pompes solaires au Burkina Faso en fonction du temps	72
Annexe 6: Calcul de la moyenne de temps de bon fonctionnement MTBF et de la fiabilité de certains éléments des pompes ALTA XF	?
Annexe 7: Calcul des besoins en eau des cultures	79
Annexe 8: Calcul de la hauteur manométrique totale	80
Annexe 9: Schéma-type d'une installation de pompage photovoltaïque	81
Annexe 10: Schéma-type d'une installation de pompage photovoltaïque sur forage	82
Annexe 11: Schéma-type d'une installation de pompage photovoltaïque de surface	83
Annexe 12: Caractéristiques des aquifères susceptibles d'être exploités pour l'irrigation	84
Annexe 13: Les principaux aquifères des pays du CILSS	85

ANNEXES

ANNEXE 1: Calcul de charges annuelles dues au renouvellement des équipements, leur entretien et le coût de fonctionnement du C.G.E.S. (taux d'inflation 0 %)

Eléments	Durée de vie	900Wc	1000Wc	1500Wc	2500Wc	3000Wc	4000Wc
Générateur	20 ans	188 861	209 846	314 768	524 614	629 537	839 382
Onduleur	7 ans	120 522	120 522	120 522	430 910	585 656	585 656
Electropompe	7 ans	60 219	62 000	65 980	123 285	130 000	132 388
Accessoires	20 ans	16 475	16 475	16 475	16 475	16 475	16 475
Câbles Electriques.	30 ans	8 886	14 219	14 219	14 219	14 219	14 219
Tuyaux Refoulement	30 ans	22 610	40 942	40 942	40 942	40 942	40 942
Réservoir	25 ans	130 000	130 000	130 000	130 000	130 000	130 000
Abreuvoir	20 ans	47 000	47 000	47 000	47 000	47 000	47 000
Montage	30 ans	17 000	17 000	17 000	17 000	17 000	17 000
Réseau Canalisation	30 ans	24 000	24 000	24 000	24 000	24 000	24 000
Bassin maraîcher	30 ans	33 000	33 000	33 000	33 000	33 000	33 000
Fonctionnement CGES		15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000
Rétribution Fontainier		24 000	24 000	24 000	24 000	24 000	24 000
Entretien à la demande		100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000
Charges annuelles		807 573	854 004	963 000	1 540 445	1 806 750	2 019 062
Production potentielle		2 700	3 060	4 500	7 560	9 000	11 880
coûts m ³ d'eau(F.CFA)		300	279	214	204	201	170

ANNEXE 2: Calcul de charges annuelles dues au renouvellement des équipements, leur entretien et les coûts de fonctionnement et du C.G.E.S. (taux d'inflation 6%)

Eléments	Durée de vie	900Wc	1000Wc	1500Wc	2500Wc	3000Wc	4000Wc
Générateur	20 ans	328 454	384 950	547 422	912 372	1 094 847	1 459 794
Onduleur	7 ans	150 652	150 652	150 652	538 637	732 070	732 070
Electropompe	7 ans	75 274	77 500	82 475	154 106	162 500	165 485
Accessoires	20 ans	28 652	28 652	28 652	28 652	28 652	28 652
Câbles Electriques.	30 ans	19 317	30 911	30 911	30 911	30 911	30 911
Tuyaux Refoulement	30 ans	49 152	89 004	89 004	89 004	89 004	89 004
Réservoir	25 ans	253 906	253 906	253 906	253 906	253 906	253 906
Abreuvoir	20 ans	81 739	81 739	81 739	81 739	81 739	81 739
Montage	30 ans	36 956	36 956	36 956	36 956	36 956	36 956
Réseau Canalisations	30 ans	52 174	52 174	52 174	52 174	52 174	52 174
Bassin maraîcher	30 ans	71 739	71 739	71 739	71 739	71 739	71 739
Fonctionnement CGES		15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000
Rétribution Fontainier		24 000	24 000	24 000	24 000	24 000	24 000
Entretien à la demande		100 000	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000
Charges annuelles		1 287 015	1 377 183	1 564 630	2 389 196	2 773 498	3 141 430
Production potentielle		2 700	3 060	4 500	7 560	9 000	11 880
coûts m ³ d'eau (F.CFA)		477	450	348	316	308	264

ANNEXE 3: Calcul des coûts du m³ d'eau pompé en fonction de la HMT de la Puissance Crête du générateur et du nombre d'utilisateurs:

Puissance crête (wc)		900wc	1000wc	1500wc	2500wc	3000wc	4000wc
HMT = 72 m	Nbre Usagers	557	841	1 262	2 102	2 523	3 364
	Coût m ³ d'eau F.CFA	296	282	212	204	199	168
HMT = 60 m	Nbre Usagers	908	1 009	1 514	2 523	3 028	4 037
	Coût m ³ d'eau F.CFA	247	235	177	170	166	139
HMT = 50 m	Nbre Usagers	1 090	1 211	1 817	3 028	3 633	4 844
	Coût m ³ d'eau F.CFA	206	196	147	141	138	116
HMT = 40 m	Nbre Usagers	1 363	1 514	2 271	3 784	4 511	6 055
	Coût m ³ d'eau F.CFA	163	157	118	113	111	93
HMT = 30 m	Nbre Usagers	1 817	2 018	3 028	5 046	6 055	8 073
	Coût m ³ d'eau F.CFA	123	118	88	85	83	69
HMT = 20 m	Nbre Usagers	2 725	3 028	4 541	7 567	9 083	12 110
	Coût m ³ d'eau F.CFA	82	78	59	57	55	46
HMT = 10 m	Nbre Usagers	5 450	6 055	9 083	15 138	18 165	24 220
	Coût m ³ d'eau F.CFA	41	39	29	28	28	23
HMT = 5 m	Nbre Usagers	10 899	12 110	18 165	30 275	36 330	48 440
	Coût m ³ d'eau F.CFA	21	20	15	14	14	12
HMT = 2 m	Nbre Usagers	27 248	30 275	45 413	75 688	90 826	121 101
	Coût m ³ d'eau F.CFA	8	8	6	6	6	5

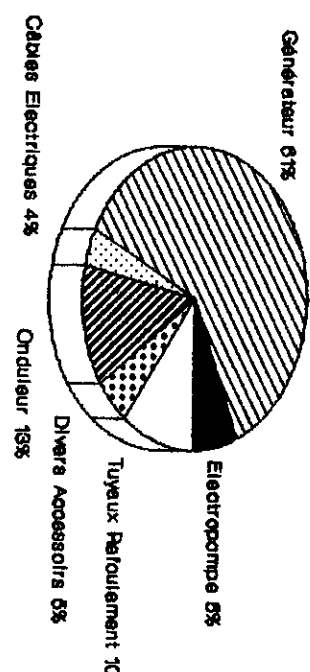
ANNEXE 4: Repartition des coûts d'investissement en fonction des équipements solaires

ANNEXE 4:

GENERATEUR DE 945 Wc

Donc Répart

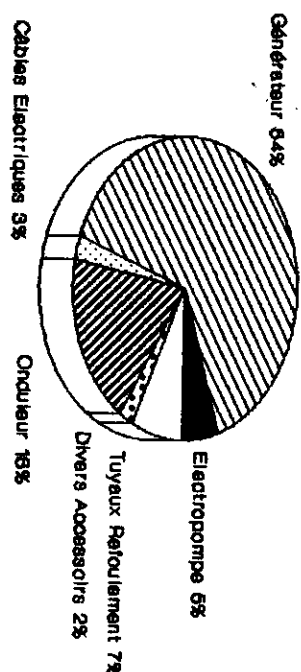
Donc CUL A 222,8



GENERATEUR DE 2520 Wc

Donc Répart

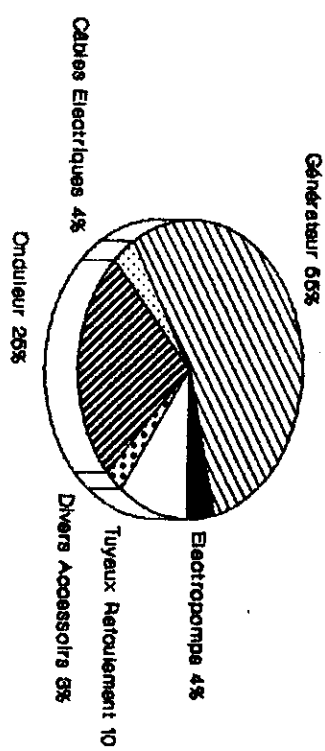
Donc CUL A 222,8



GENERATEUR DE 1575 Wc

Donc Répart

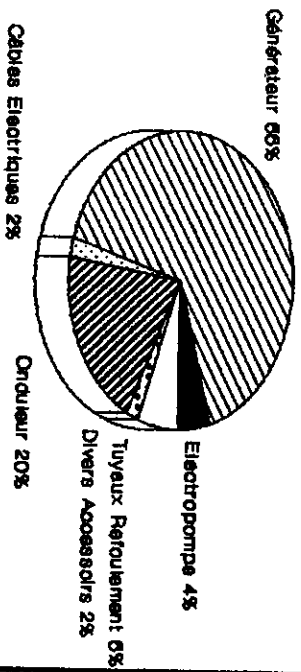
Donc CUL A 222,8



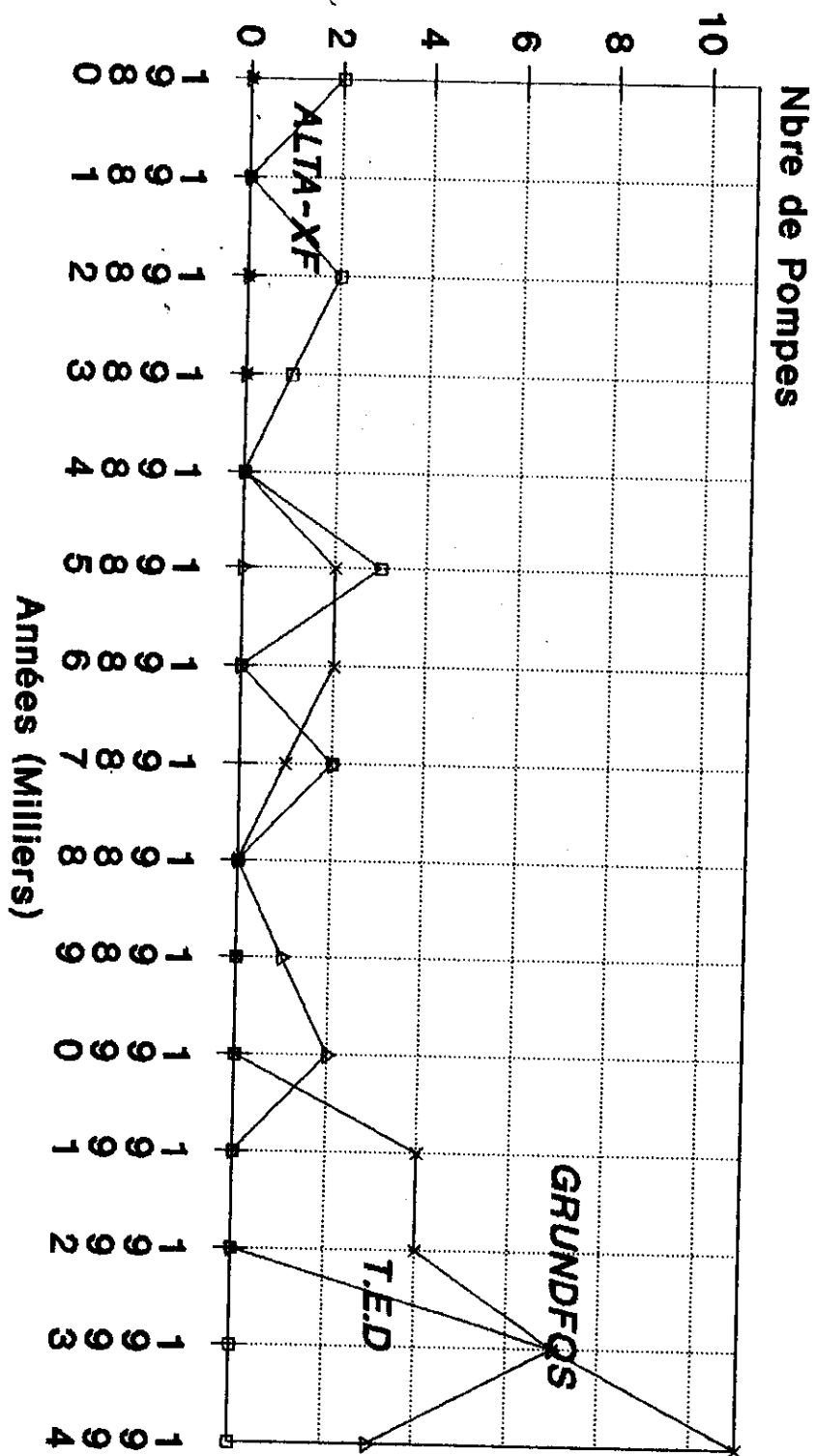
GENERATEUR DE 3240 Wc

Donc Répart

Donc CUL A 222,8



ANNEXE 5: ETAT D'EVOLUTION DES POMPES SOLAIRES
AU BURKINA FASO DE 1980 A 1994



DAO Robert

Source S.E.S.

ANNEXE 6

Calcul de la moyenne de temps de bon fonctionnement (M.T.B.F) et de la fiabilité

Calcul de la moyenne de temps de bon fonctionnement (MTBF) et la fiabilité de certains éléments de la pompe ALTA XF

Nous utiliserons le modèle de WEIBULL

Soit:

- . β : paramètre de forme de la loi de WEIBULL
- . η : paramètre d'échelle de la loi de WEIBULL
- . γ : décalage d'origine de la loi de WEIBULL
- . $R(t)$: fiabilité au temps t
- . $E(t)$: MTBF: moyenne d temps de bon fonctionnement.
- . Γ : fonction gamma

Les paramètres γ et η sont déterminer graphiquement sur le papier d'ALLEN PLAIT.

$$E(t) = \eta \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) - \gamma$$

$$R(t) = e^{-\frac{(-\gamma+t)}{\eta}}$$

Cas $\gamma = 0$

$$E(t) = \eta \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

$$R(t) = e^{-\frac{t}{\eta}}$$

. les fréquences de défaillances sont calculées par la méthode des rangs moyens:

$$F(i) = \frac{i}{n+1}$$

. En abscisse du graphique on porte le temps de bon fonctionnement.

1) Cas du charbon de la pompe:

Les paramètres sont déduits du graphique d'ALLEN.

$$\beta = 1,88$$

$$\eta = 2800 \text{ h}$$

$$* E(t) = MTBF = \eta \times \Gamma\left[1 + \frac{1}{\beta}\right]$$

$$= 2800 \times \Gamma\left[1 + \frac{1}{1,88}\right]$$

$$= 2800 \cdot \Gamma[1+]$$

$$= 2800 \cdot \Gamma(1,53) = 2486 \text{ h}$$

MTBF = 2486 h soit 11,8 mois

* fiabilité au bout de 11 mois de fonctionnement:

$$R(11\text{mois}) = e^{-\frac{t}{\eta}} = e^{-\frac{1940}{2800}} = 0,50 = 50\%$$

2) Cas de l'hydraulique de la pompe:

$$\beta = 2,18$$

$$\eta = 8000 \text{ h}$$

$$* \text{ MTBF} = \eta \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 7094 \text{ h}$$

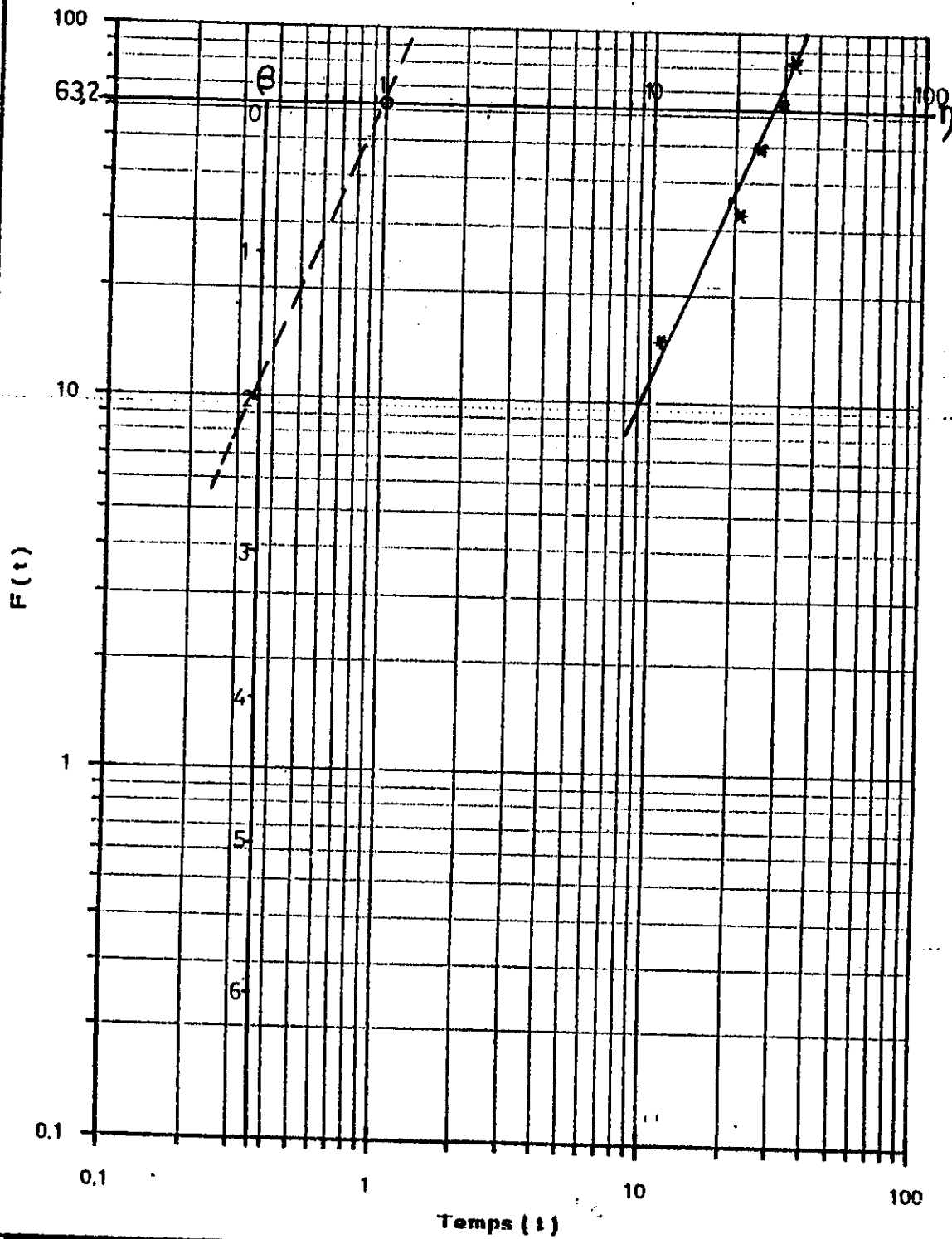
* Fiabilité au bout de 5 ans et 3 ans de fonctionnement:

$$R(5\text{ans}) = e^{-\frac{1782}{8000}} = 10,78\%$$

$$R(3\text{ans}) = e^{-\frac{6160}{8000}} = 46,3\%$$

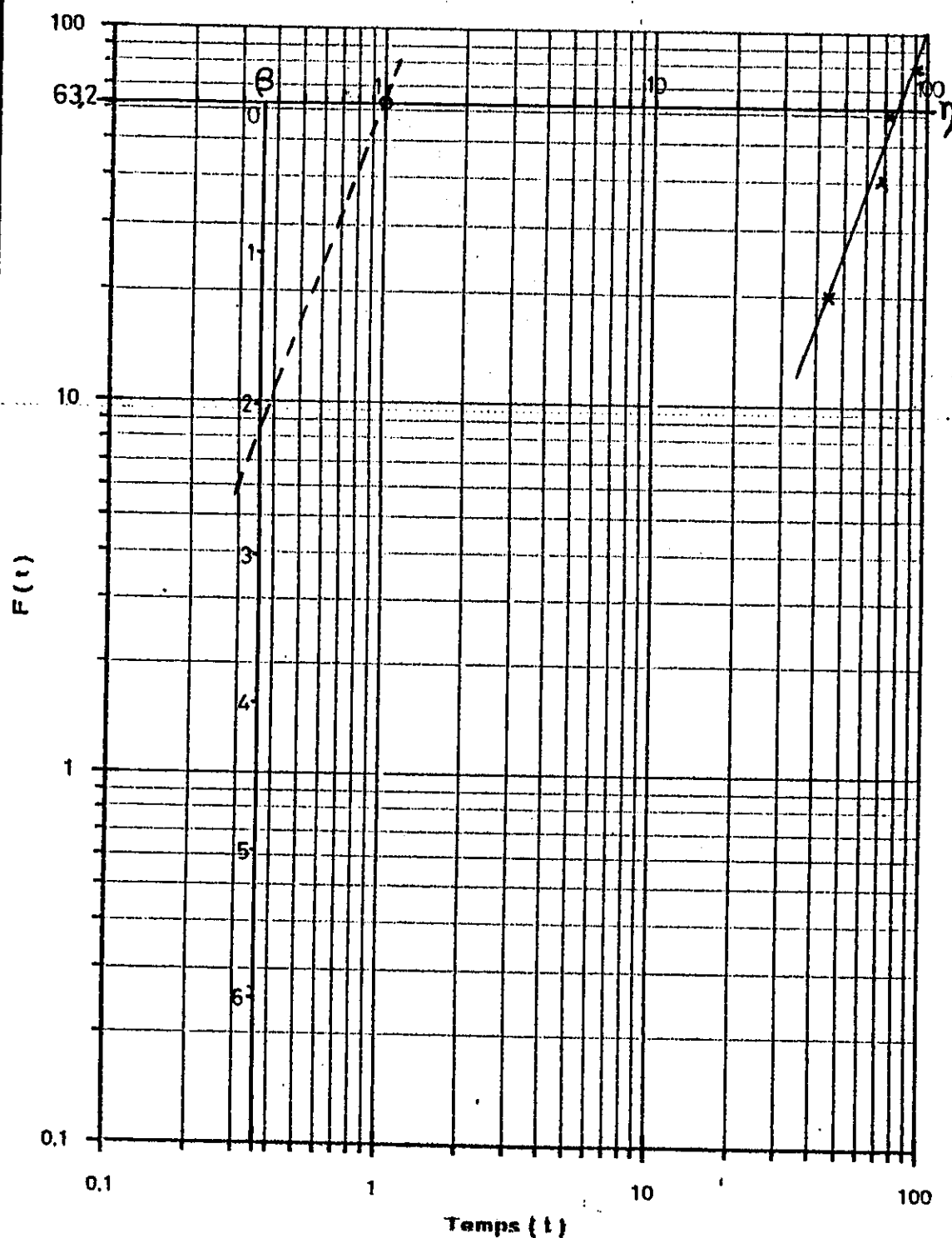
ANNEXE 6.1: Recherche des paramètres de la loi de Weibull, pour le calcul de la MTBF du charbon des pompes ALTA XF

Graphique d'ALLEN Plot (Loi de WEIBULL)

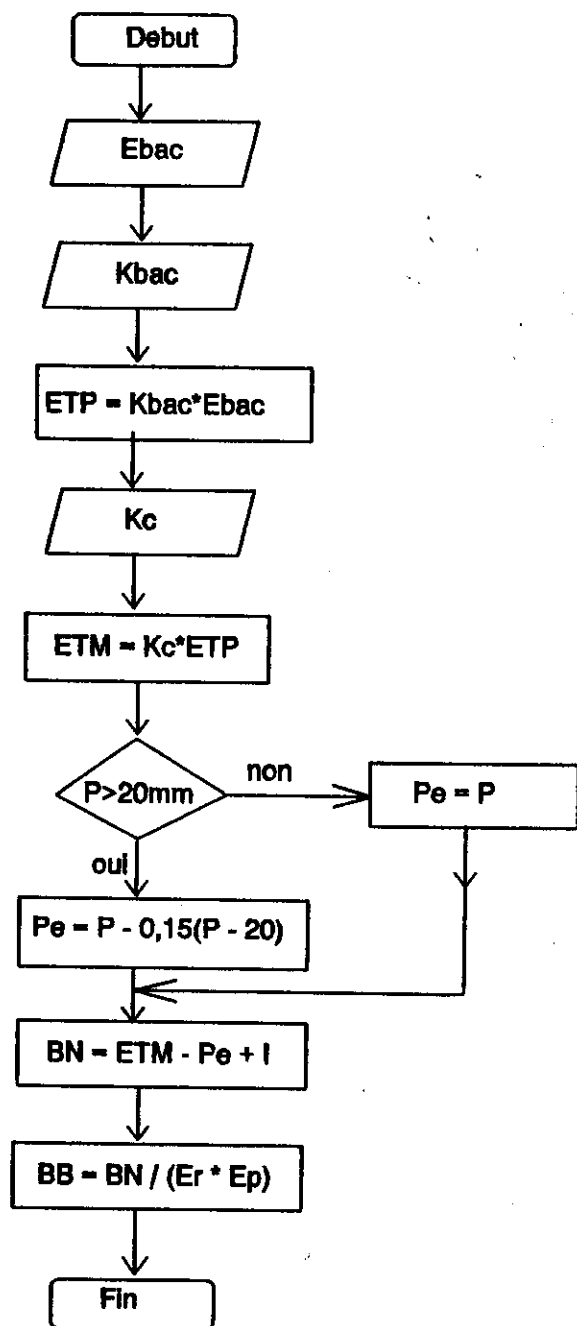


ANNEXE 6.2: Recherche des paramètres de la loi de Weibull, pour le calcul de la MTBF de l'hydraulique des pompes ALTA XF

Graphique d'ALLEN Plait (Loi de WEIBULL)



ANNEXE 7: Schéma de calcul des besoins en eau des cultures maraîchères



Ebac : Evaporation bac
 Kbac : Coefficient bac
 ETP : Evapotranspiration potentielle
 Kc : Coefficient cultural
 ETM : Evapotranspiration maximale
 P : Pluviométrie moyenne
 Pe : Pluviométrie efficace
 BN : Besoin net
 Ep : Efficience parcelle
 Er : Efficience réseaux
 I : Infiltration
 BB : Besoin brut

ANNEXE 8: Principe de calcul de la hauteur manométrique

La HGT est la hauteur géométrique totale (différence entre le niveau maximum dans le réservoir et le niveau dynamique).

Pour obtenir la HMT, il faut rajouter les pertes de charges linéaires dans la conduite et les pertes de charge dites singulières dues aux vannes, coudes, rétrécissements et autres singularités du réseau

$$HMT = HGT + JL + \frac{KV^2}{2 \times g}$$

V : Vitesse de l'eau dans la conduite en m/s

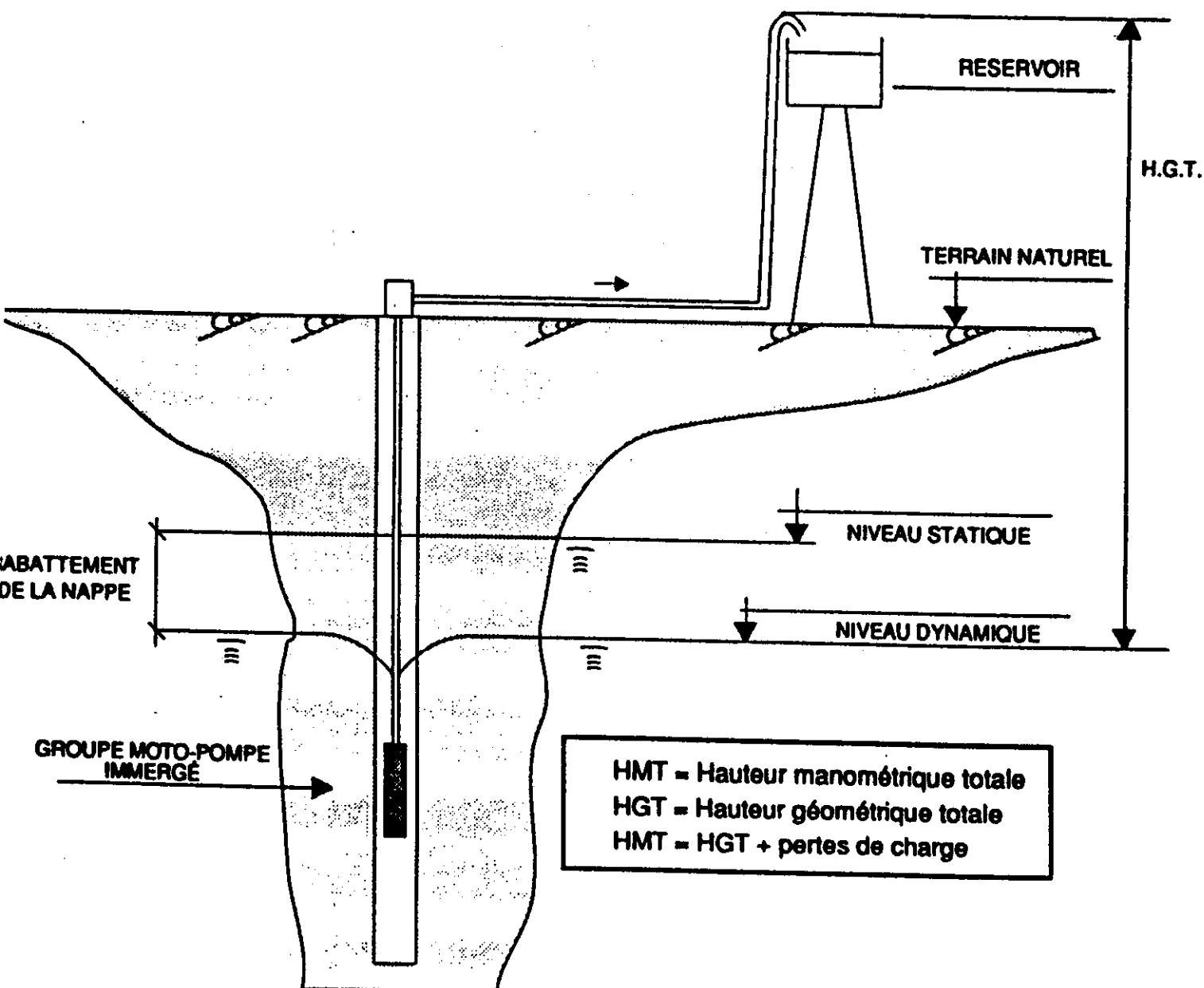
L : Longueur de la conduite en m

g : accélération de la pesanteur : 9,81 m/s²

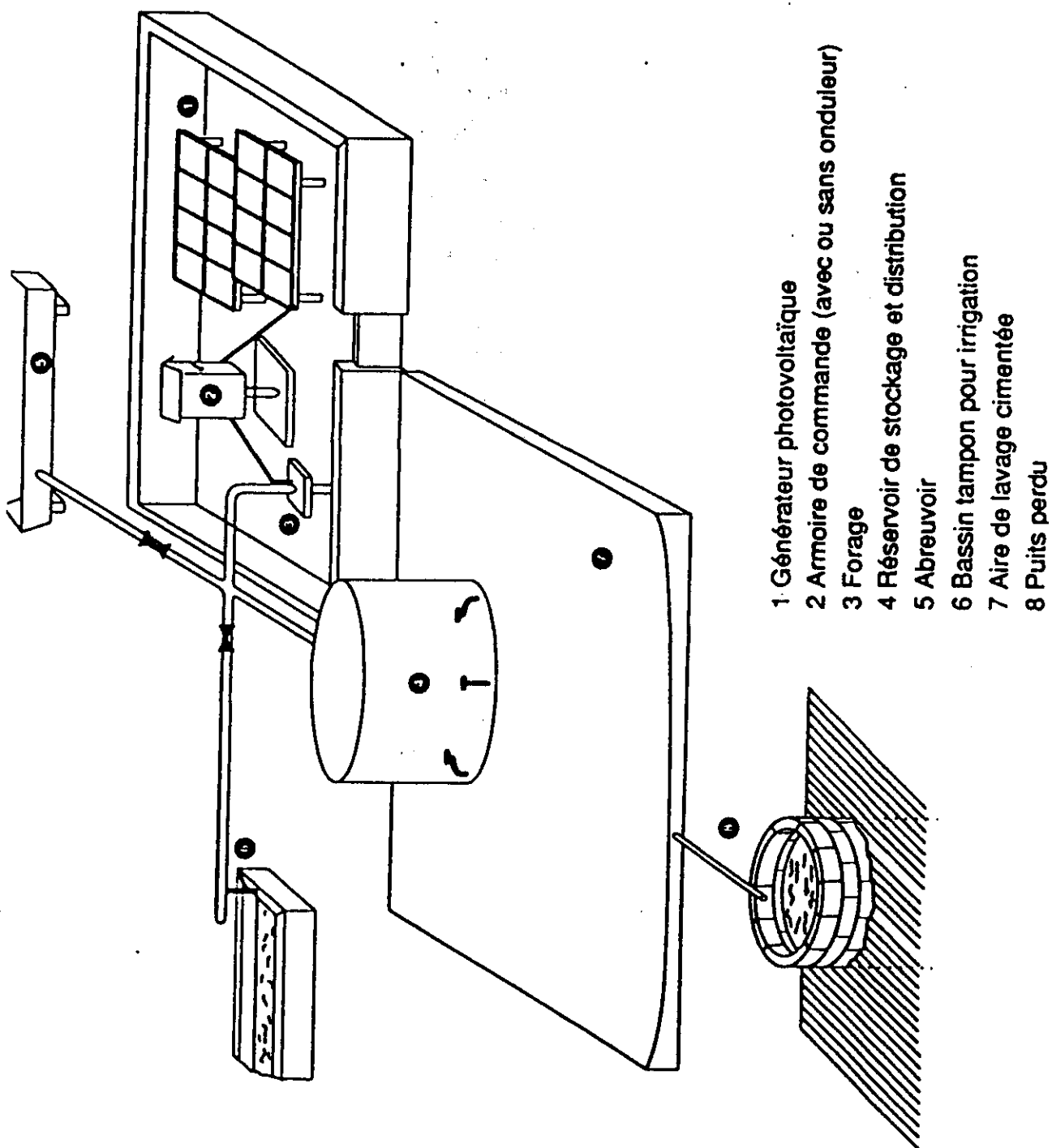
J : Pertes de charge linéaire

K : Coefficient dépendant de la nature de la conduite de refoulement

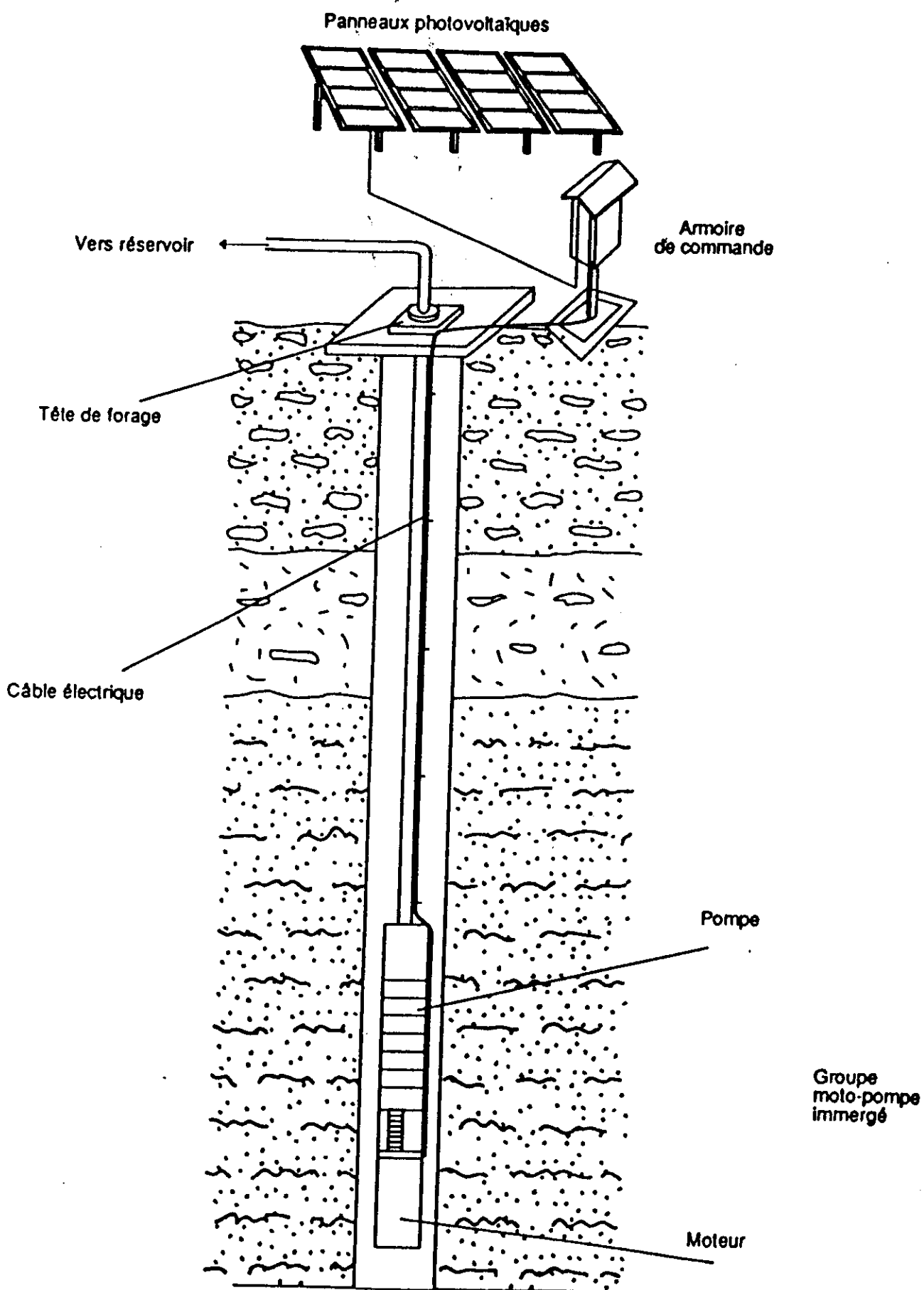
Pour simplifier les calculs on peut considérer $\frac{KV^2}{2g} \approx 0,15 JL$



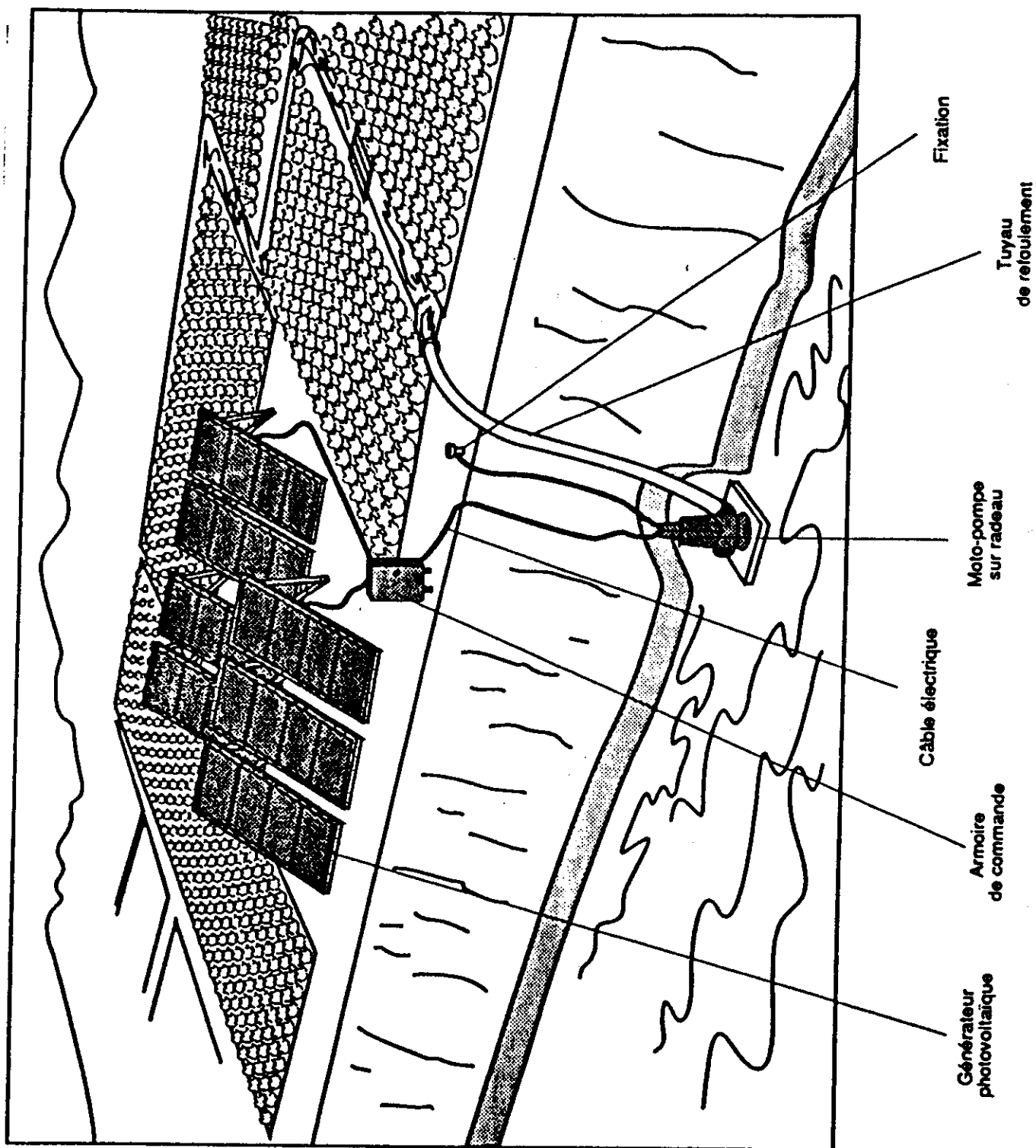
ANNEXE 9: Schéma-type d'une installation de pompage photovoltaïque(9)



ANNEXE 10: Schéma-type d'une installation photovoltaïque sur forage (9)



ANNEXE 11: Schéma-type d'une installation de pompage photovoltaïque de surface
(9)



ANNEXE 12: Caractéristiques des aquifères susceptibles d'être exploités pour l'irrigation (7)

RECAPITULATIF

BASSIN	NIVEAU AQUIFERE	N.S. (m)	PROF MOY. FORAGE (m)	DEBIT EXPLOITABLE (m ³ /h)	VOLUMES (*) EXPLOITABLES (10 ⁶ m ³)	VOLUMES RENOUVELABLES (10 ⁶ m ³)
SENEGALO-AURITANIEN						
.Quaternaire Nappe des sables dunaires	sables	< 10		<150	2,5 à 6	210
Nappe du fleuve Sénégal	alluvions	< 10	10-40	1 à 25	0,2 à 0,4	50
.Continental Terminal	grès-argiles-sables	60 à 80	90-100	10	40 à 90	7 500
.Maestrichien (en charge)	sables	2 à 50	200-250	150-200	40 à 80	
MALI-NIGER						
<u>Mali</u> : Continental Terminal Quaternaire Delta intérieur du Niger	argiles, sables, latérite	17 17, max:86	62	9 7,7	20 à 50	
<u>Niger</u> :						
.Continental Terminal Nappe inf. en charge	sables et grès	faible, < 35	100-300	4 m ³ /h/m	40 à 90	1 200
Nappe moy. en charge	sable et grès oolithiques vers E	<10 :Dallols >80 :plateaux	80-130	4-12 m ³ /h/m		
Nappe phréatique	sableux ou gréseux oolithiques (bords)	<10 :Dallols >80 :plateaux	20-50 sous NS	4-15 m ³ /h/m		
.Continental Intercalaire Continental Namadien (en charge)	grès, sables fins à grossiers et calcaires	60-80 : Nord jaillissant au Sud	150-500	4-20 m ³ /h/m	25 à 50	
TCHAD						
.Plio-Quaternaire Nappe phréatique	séries fluvio-lacus tres et dunaires	10 au Nord 45 au Sud	< 70-100	2 à 190	100 à 200	3 900
.Pliocène Nappe moyenne en charge	sables fluvialites	faible	250-350	1 à 80	35 à 73	

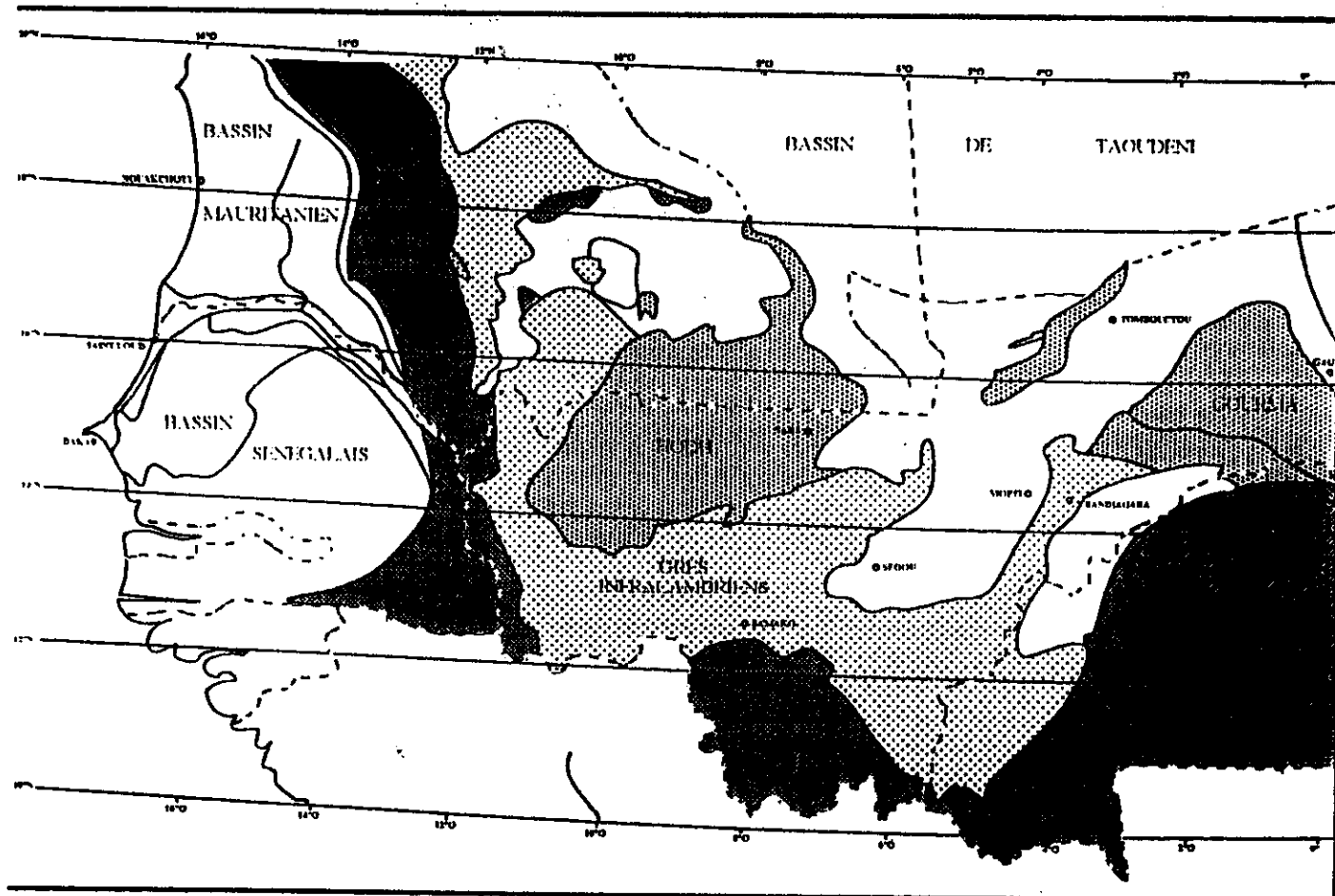
(*) Les valeurs sont extraites de la notice explicative de la carte de planification des ressources en eau souterraine de l'Afrique soudano sahéliennes - CIEM - BRGM.

ANNEXE 13 (7)

ANNEXE 13.1:

Les principaux aquifères des pays du CILSS

PLAN DE SITUATION N°1 : ZONE OUEST



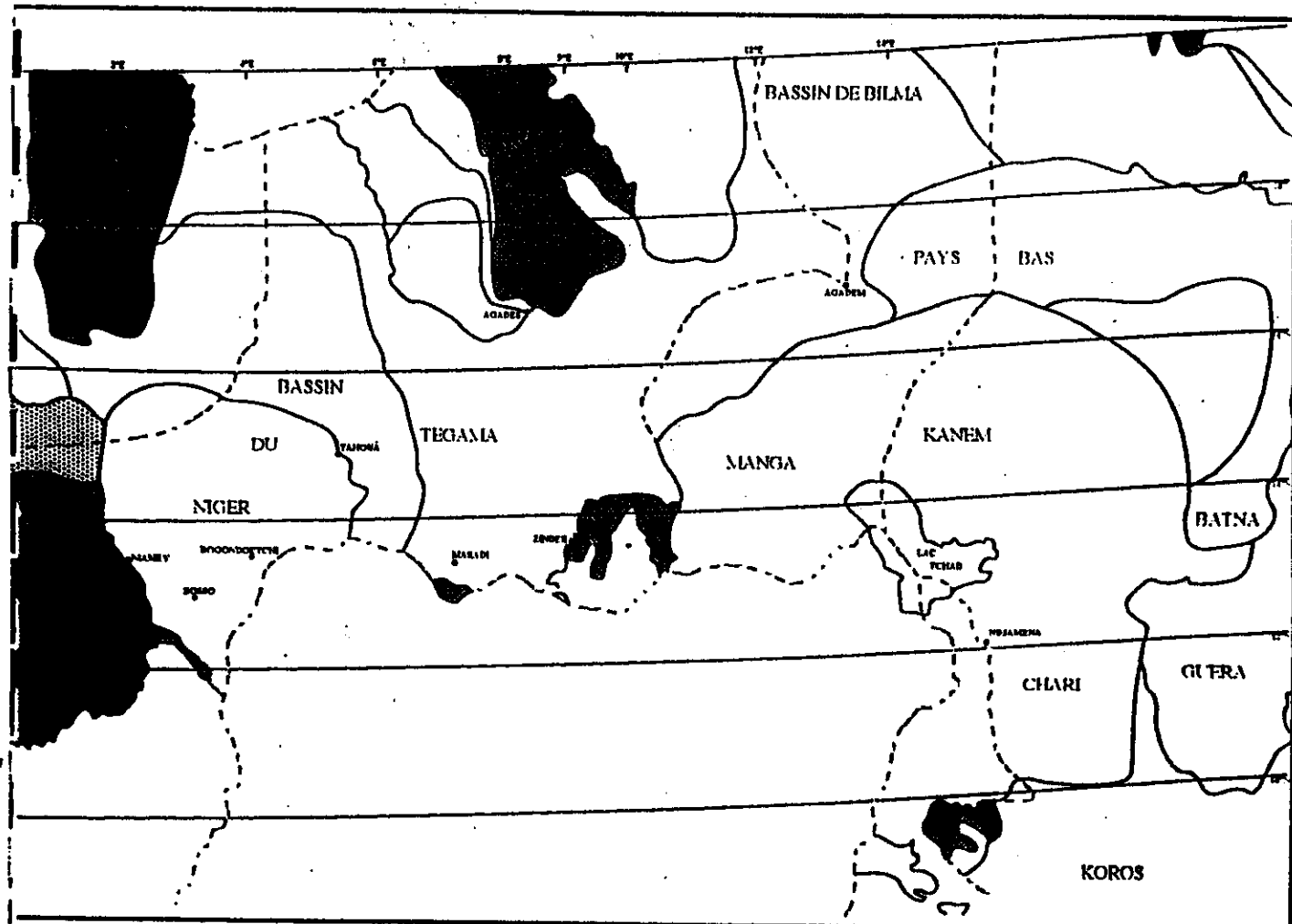
(D'après la Carte de planification des ressources en eau souterraine - L'Afrique Soudano-Sahélienne - Modifiée)

- Aquifères généralisés : bassins sédimentaires
- Aquifères discontinus : sédimentaire gréseux
- Aquifères discontinus : sédimentaire divers
- Aquifères discontinus : socle (granites, schistes, roches vertes, ...)

ANNEXE 13.2:

Les principaux aquifères des pays du CILSS

PLAN DE SITUATION N°2 : ZONE EST

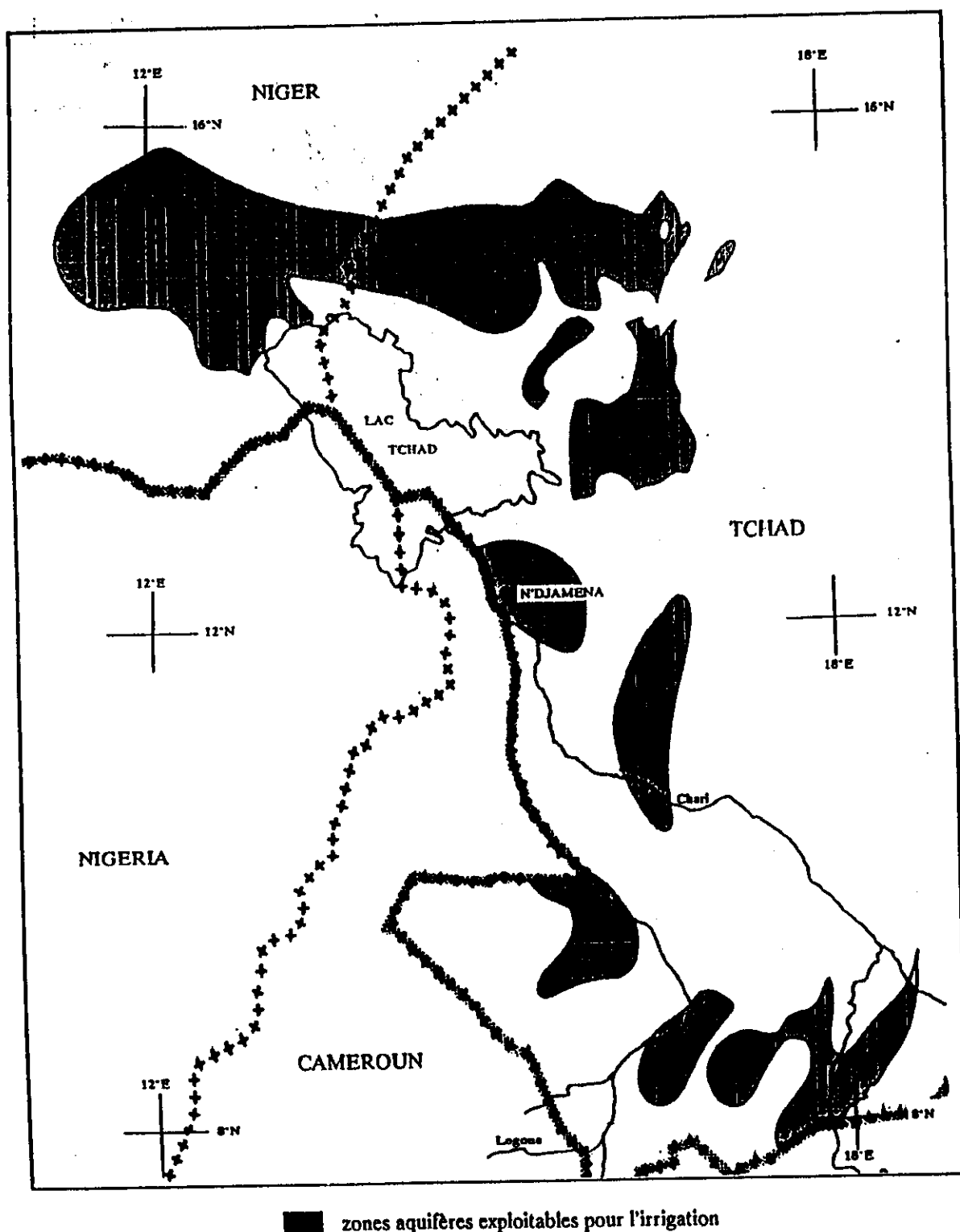


(D'après la Carte de planification des ressources en eau souterraine - L'Afrique Soudano-Sahélienne - Modifiée)

-  Aquifères généralisés : bassins sédimentaires
-  Aquifères discontinus : sédimentaire divers
-  Aquifères discontinus : socle (granites, schistes, roches vertes, ...)

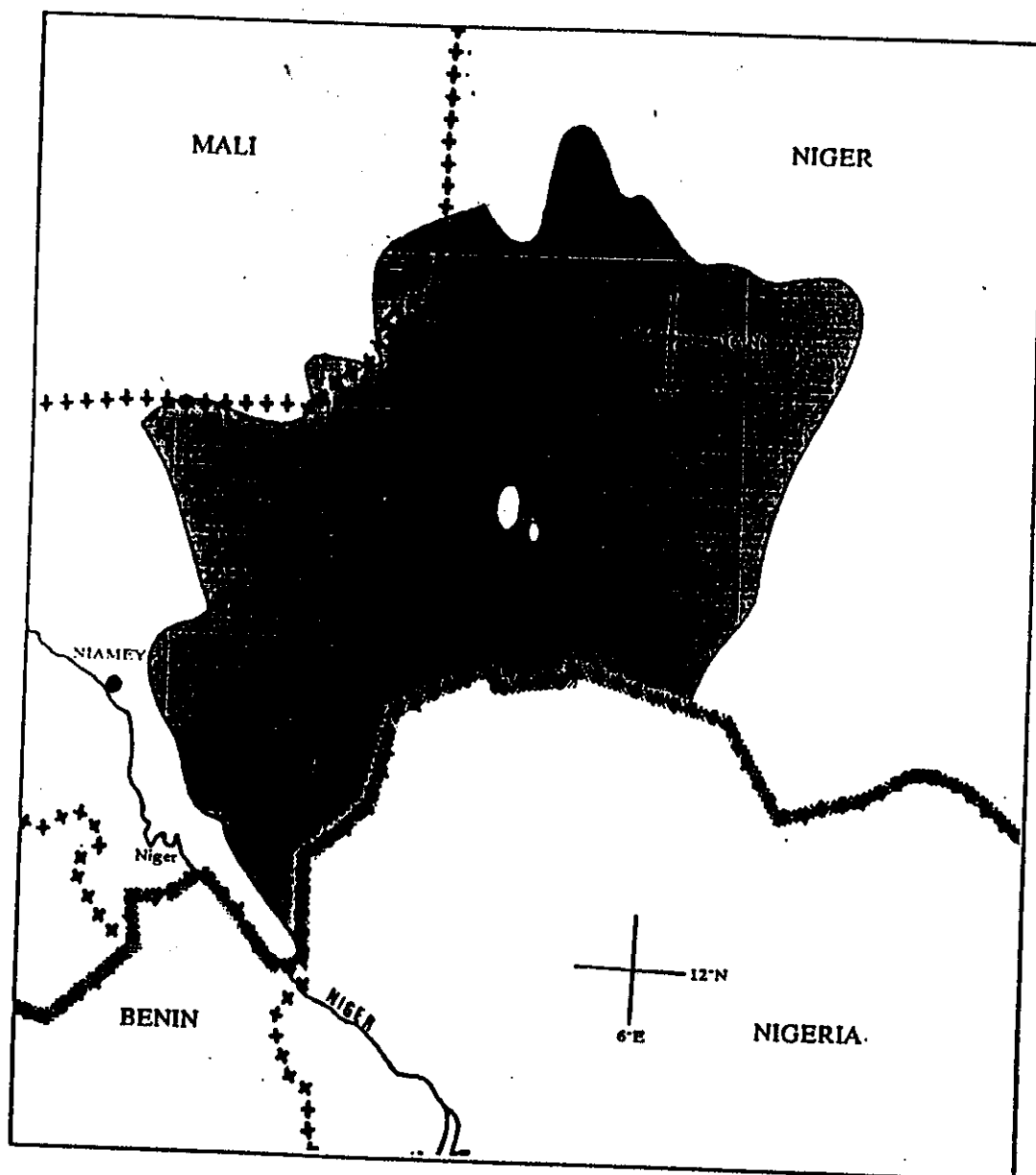
ANNEXE 13.3:

Zones aquifères exploitables pour l'irrigation
BASSIN DU LAC TCHAD



ANNEXE 13.4:

Zones aquifères exploitables pour l'irrigation
BASSIN DU NIGER

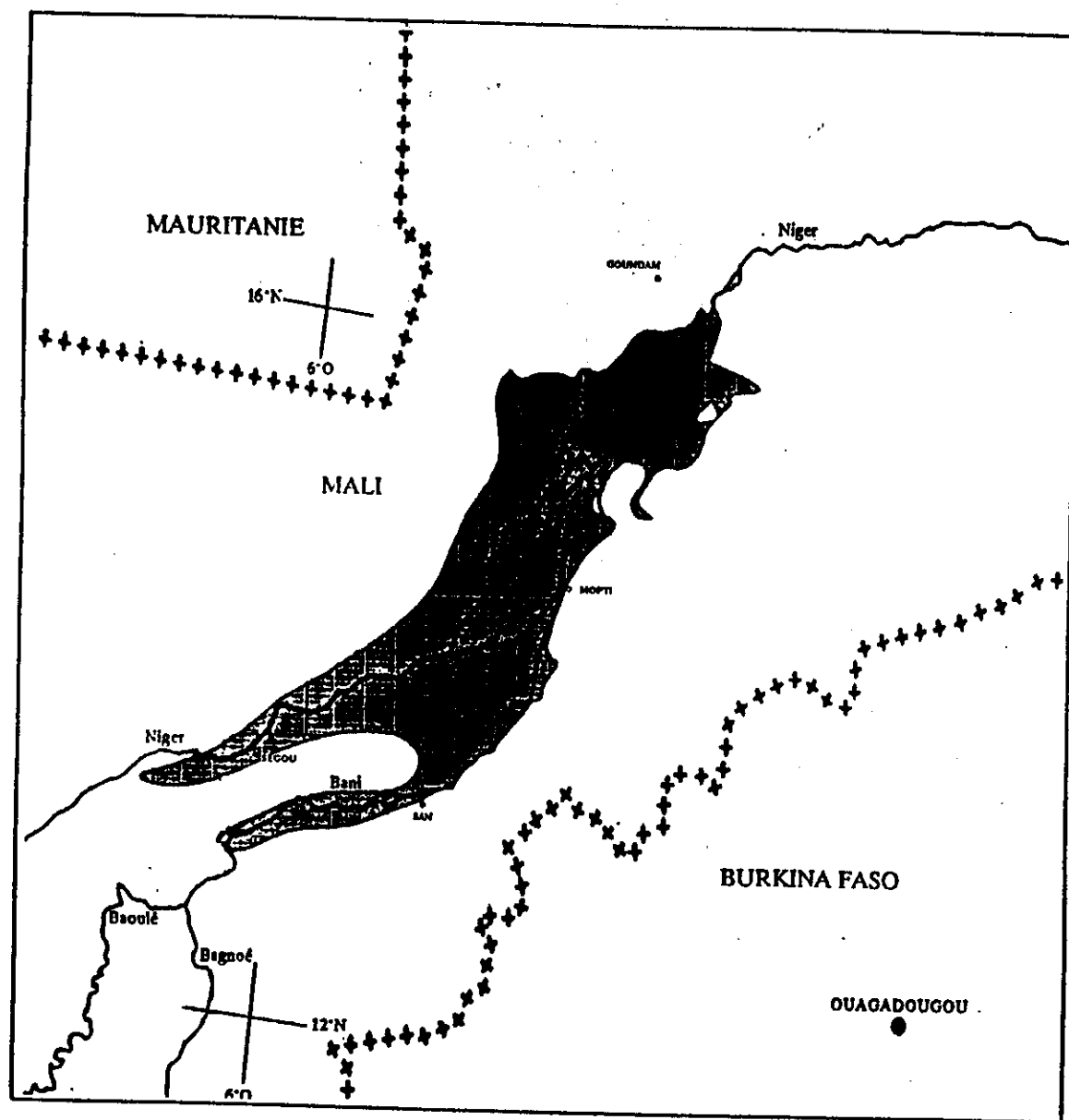


■ zones aquifères exploitables pour l'irrigation

ANNEXE 13.5:

Zones aquifères exploitables pour l'irrigation

DELTA INTERIEUR DU NIGER



■ zones aquifères exploitables pour l'irrigation

ANNEXE 13.6:

Zones aquifères exploitables pour l'irrigation
BASSIN SENEGALO-MAURITANIEN

