

03/0046

SCHEMA - DIRECTEUR
DES RESSOURCES EN EAU
(2e Mission pluridisciplinaire)
- Mai 1989 -

IRRIGATION A PARTIR DES EAUX
SOUTERRAINES

(Document provisoire et partiel)

F. MORTIER
Consultant hydrogéologue

03/0046

IRRIGATION A PARTIR DES
EAUX SOUTERRAINES

(Annexe partielle et provisoire - à compléter en Juillet 89)

Sommaire

- 1 - GENERALITES SUR L'IRRIGATION
 - 1.1. Place de l'irrigation dans la production agricole
 - 1.2. Une alternative: la CES
 - 1.3. Emergence de l'irrigation à partir des eaux souterraines
- 2 - SITUATION ACTUELLE DE L'IRRIGATION A PARTIR DES EAUX SOUTERRAINES
 - 2.1. A partir de pompes manuelles
 - 2.2. A partir de pompes solaires
 - 2.3. Les études de projets
 - 2.31. Le projet PNUD/OPS
 - 2.32. Le projet CIRAD
 - 2.33. Le projet Mali Nord-Est
- 3 - LES BESOINS
 - 3.1. Le marché des fruits et légumes
 - 3.2. Essai de quantification et de répartition des besoins en irrigation
- 4 - AVANTAGES ET CONTRAINTES DE L'IRRIGATION PAR EAUX SOUTERRAINES
 - 4.1. Avantages
 - 4.2. Contraintes liées au coût de l'eau souterraine
 - 4.3. Autres contraintes
- 5 - PROPOSITIONS PROVISOIRES
 - 5.1. Stratégie
 - 5.2. Propositions pour la mission OPS.

TABLEAUX ET GRAPHIQUES

1. Comparaison de 2 types de projet d'irrigation
2. Coûts unitaires du m³ d'eau pompé dans 7 forages du cercle de Kolokani
3. Systèmes d'AEP - Comparaison du coût de l'eau (Halcrow)
4. Costs of irrigation water (CIRAD)
5. Effet de la profondeur de l'eau sur le coût de l'eau (Halcrow).

* *

*

L'IRRIGATION A PARTIR DES EAUX SOUTERRAINES

(Annexe partielle et provisoire à compléter en Juillet 89)

Dans quelle mesure, où et comment, les importantes ressources en eau souterraine (révélées par les études du Projet MLI/84/005 et qui ne seront exploitées ni pour l'hydraulique rurale ni pour l'hydraulique pastorale) peuvent-elles contribuer à la sécurisation et au développement de la production agricole du Mali - pays sahélien, où la récente sécheresse prolongée a montré la fragilité de l'agriculture pluviale pour assurer la sécurité alimentaire ?

1 - GENERALITES SUR L'IRRIGATION

1.1. Place de l'irrigation dans la production agricole

Grâce à l'importance des ressources en eau superficielle (de l'ordre de 50 milliards de m³/an) et à un effort technique, financier et institutionnel de plus de 50 ans, le Mali a équipé pour l'irrigation environ 180.000 ha, mais 140.000 ha étaient à réhabiliter en 1985 (voir étude SCET).

Sur un total de 2,5 millions d'hectares cultivés, seuls 100.000 ha (4 %) sont actuellement irrigués et produisent 125.000 t de céréales soit 8 % du total des céréales produites en année moyenne (1,5 millions de tonnes); pour le riz, principale céréale irriguée, la production sur périmètre irrigué est à peine supérieure à la production de riz pluvial (voir statistiques de la ENSI: enquête de conjoncture 86-87).

Un portefeuille de 70 projets identifiés permettrait de porter la superficie irrigable à 500.000 ha considérée par la SCET comme un maximum mais, comme la consommation de riz augmente plus vite que celle des autres céréales (surtout dans les villes), même si 500.000 ha étaient effectivement irrigués en l'an 2010, (avec une forte proportion de paddy), il faudrait encore importer 186.000 t de riz pour satisfaire les besoins de la population (étude SCET para 8.4).

⋮

./...

Donc l'irrigation à partir des eaux de surface est nécessaire pour contribuer à la sécurité alimentaire future, mais elle n'est et ne sera pas suffisante pour l'assurer.

1.2. Une alternative: la CES

Une stratégie bien pensée de la sécurité alimentaire devrait envisager en premier lieu d'augmenter l'infiltration dans les sols cultivés grâce à la généralisation des pratiques de conservation des eaux et des sols (C.E.S.) et ainsi d'augmenter la production des cultures pluviales, principale source de céréales et principale préoccupation des populations rurales. "En premier lieu", car cette technique intervient en tête du cycle de l'eau et elle est performante du point de vue économique: réalisée, en grande partie, grâce à la participation villageoise, elle permet des gains de production de céréales pluviales de 10 % environ.

Il faut donc poursuivre (et développer dans d'autres régions) les expérimentation - démonstrations, amorcées au Sud du pays depuis 1984 par la DRSPR (Division des Recherches sur les Systèmes de Productions Rurales) et le PLAE (Projet de lutte anti-érosive) de la CMTD: approche, aménagement du terroir, mise en défens, diguettes en pierre, introduction de techniques culturales conservatrices des eaux et des sols, bandes enherbées et haies vives,...(1).

Mais (sans parler de la contrainte foncière: il faudrait garantir la propriété de la terre à ceux qui la mettent en valeur), la prise de conscience par les paysans du problème de l'érosion de leurs sols et du ruissellement des eaux de pluie (prise de conscience nécessaire au succès de programmes intensifs qui requièrent une participation paysanne) sera longue au Mali car la densité d'occupation des sols (qui détermine la longueur des périodes de jachère) est moindre au Mali que dans d'autres régions de l'Afrique sahélienne (au Burkina Faso par exemple - voir 2).

./...

-
- (1) Le sahel en lutte contre la désertification - fiches d'expériences au Mali - par R.M. ROCHETTE et autres - CILSS Juin 1988.
- (2) Vingt ans de lutte anti-érosive au Burkina Faso par J.Y. MARCHAL Cahiers de l'ORSTOM - ser. Pédologie - vol XXII - n° 2 - 1986.

Dans le cadre du Schéma-Directeur (horizon 2001), on devrait se proposer une action limitée aux bassins versants des aménagements hydrauliques et peut-être aux arrondissements les plus intensément peuplés et cultivés. Ce point sera repris et développé plus tard après discussion au sein du Groupe de Travail.

1.3. Emergence de l'irrigation à partir des eaux souterraines

L'irrigation à partir des eaux souterraines a sans doute commencé au Mali, dans les nappes alluviales, comme une extension de l'irrigation à partir des rivières, par exemple:

- en irrigation péri-urbaine (ex. Bamako), l'agriculteur creuse un puisard en haut de terrasse pour remplacer un canal trop long et trop profond qui amènerait l'eau de la rivière en tête de parcelle;
- sur le lit majeur de marigots non permanents (ex. Kati) la nappe alluviale peu profonde, rechargée en hivernage par les crues, est exploitée en saison sèche par des "puisards" qu'on creuse chaque année.

L'irrigation à partir des nappes généralisées a commencé par les jardins de case arrosés par les femmes après puisage dans les puits de concession (un bon puits peut donner $3/4 \text{ m}^3/\text{j}$ - 5 à 7 ares potentiels) pour la culture du gombo et du maïs vert, le plus souvent en hivernage et très peu après. L'introduction massive dans les villages, à partir des années 80, de forages équipés de pompes manuelles a permis la création de jardins villageois, à l'initiative de groupes de jeunes ou de femmes qui avaient des besoins monétaires, et donc l'émergence d'une irrigation commerciale avec des cultures maraîchères diversifiées sur deux saisons (hivernage et Décembre-Février): il s'agit donc d'une irrigation nécessitant très peu d'investissement mais beaucoup de travail (y compris pour l'exhaure et la distribution de l'eau, avec donc une efficacité élevée de l'irrigation, sans doute de l'ordre de 90 - 95 %).

:

./...

2 - SITUATION ACTUELLE DE L'IRRIGATION A PARTIR DES EAUX SOUTERRAINES

On a très peu de données quantitatives sur les superficies "arrosées" à partir de puits villageois, de forages équipés de pompes manuelles, ou irrigués à partir de pompes solaires ou même à partir de motopompes diésel sur forages - de même que sur les plans de culture, les rendements, les revenus: une enquête exhaustive serait nécessaire; une enquête sur l'irrigation péri-urbaine devait être entreprise à l'initiative du Génie Rural (?).

- 2.1. L'irrigation à partir de pompes manuelles (installées au nombre de 5500 environ pour l'alimentation en eau des villages mais peut être seulement 4000 utilisées) s'est développée rapidement depuis 10 ans. Une enquête en 1983 et 1984 (période de sécheresse) sur 116 villages du cercle de Kolokani a révélé que, si la superficie moyenne irriguée à partir d'un puits était d'environ 2 ares, elle était de 8 à 16 ares par forage équipé de petite pompe manuelle; ceci approche du maximum irrigable par pompe manuelle d'un débit de $0,8 \text{ m}^3/\text{h}$ ($\times 10 \text{ h} = 8 \text{ m}^3/\text{j}$): les besoins d'irrigation en contresaison sont en effet de $1400 \text{ m}^2 \times 0,006 \text{ m/j} = 8,4 \text{ m}^3/\text{j}$.

De plus, et peut-être surtout, la pérennité de l'eau des forages a permis une deuxième culture et peut-être une troisième. Ce sont surtout des groupes de femmes (et parfois de jeunes) à la recherche de revenus monétaires qui pratiquent cette irrigation intensive et diversifiée; la gestion de l'eau est rigoureuse, il n'y a pas de gaspillage; les cultures sont traditionnelles (haie d'oseille de Guinée, rangées de sésame, arachide, gombos, pois de terre et niébé) ou nouvelles, comme choux, carottes, salades, qui font leur entrée dans les habitudes alimentaires(1). Kirpich(2), à partir d'une enquête sur 12 villages, a déterminé les rendements et les prix en 1984 et estimé que le bénéfice pour une petite pompe manuelle (485.000 F.CFA pour 20 ares) passerait à 1.385.000 pour une "grosse" pompe manuelle (débit $20 \text{ m}^3/\text{j}$; 50 ares). D'où un rapport bénéfice/coût (forage et pompe) de 1/1 à 3/1.

./...

(1) Marie MONIMART - Femmes en lutte contre la désertification au Sahel-Club du Sahel Juin 1988.

(2) P. KIRPICH - Groundwater development strategy for small-scale irrigation - PNUD/DTCD - April 1984 (draft report).

Une enquête - en cours - sur les moyens d'exhaure dans les villages (et en particulier la partie de l'enquête sur l'utilisation de l'eau des pompes manuelles) permettra sans doute une meilleure appréciation de l'utilisation des pompes manuelles pour l'irrigation - mais dès maintenant, on tente - ci-dessous - une extrapolation provisoire au niveau national:

- superficie irriguée: 5 à 10 ares X 4.000 pompes = 200 à 400 ha
- volume total d'eau: 200 à 400ha X 0,006m/j X 100j
+ 1/4 pour cult. hivernage = 1,5 à 3 Mm³/an
- investissement: $\frac{1}{2}$ X 5,5 M FCFA X 400 = 11 milliards FCFA
- frais maint. et rempl.pompe: $\frac{1}{2}$ X 70.000F X 4000 = 140 millions F/an
- revenu brut: 200 à 400 ha X 3 M F.CFA = 0,6 à 1,2 milliards FCFA

En conclusion, il s'agit d'une technique bien maîtrisée par les paysans, tant que les importants besoins en main d'oeuvre (y compris pour l'exhaure de l'arrosage) n'ont pas d'autre utilisation plus rentable. De plus, son développement est limité par le débit des pompes manuelles.

2.2. L'irrigation à partir des pompes solaires

Une centaine de pompes solaires ont été installées au Mali depuis 1977, faisant de ce pays le "leader" de cette technique au Sahel. La majorité de ces pompes est installée sur forages (11 seulement le sont pour le pompage à partir des rivières) et elles sont réparties dans le pays comme suit(1):

- San/Bla (zone M.A.V.) : 56 (3 à 5 à remplacer)
- Nara, Kolokani, Bamako : 24
- Tombouctou-Gao : 10
- Bougouni (zone Helvetas) : 5
- Divers: Kayes, Ségou, Mopti : 8

Ces pompes ont une puissance moyenne de 1490 WC (950 m4/j), la majorité entre 500 et 1500 WC, et 16 % seulement d'une puissance supérieure à 1500 WC(2).

./...

(1) Billeret J. (CEES) Le pompage solaire au Mali. Situation au 15-2-88

(2) BURGEAP - Programme régional d'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque dans les pays du CILSS Sept. 87.

A part l'exemple de Nossombougou. (décrit sommairement dans la communication du Mali au séminaire d'Abidjan en 1986), on n'a aucun renseignement sur les superficies irriguées à partir de ces pompes qui ont été installées d'abord pour les besoins domestiques: à Nossombougou (centre rural de 3500 habitants disposant de 4 pompes manuelles), une pompe solaire a été installée en 1984; d'une puissance de 3456 WC et d'une capacité de $110 \text{ m}^3/\text{j}$ elle permet à 17 maraîchers d'irriguer environ 2 ha en 1986. L'irrigation de 1,2679 ha en 1985 a rapporté environ 3 M F.CFA. Le prix de l'eau pour ces maraîchers a été porté, par le comité de gestion de l'eau, de 25.000 F.CFA/ha en 1985 à 75.000 F.CFA/ha.

Au total l'irrigation à partir des 100 pompes solaires au Mali doit être de l'ordre de 150 ha, et l'irrigation à partir des eaux souterraines ("arrosage" à partir des puisards, puits, forages équipés de pompes manuelles et irrigation à partir des pompes solaires et peut être de quelques moto-pompes diesel) - ne dépasse sans doute pas à l'heure actuelle 1000 ha, répartis sur toutes les régions du Mali.

2.3. Les études de projets (voir tableau 1)

Dès que les essais de débit des forages exécutés pour l'AEP eurent démontré que 30 à 40 % des forages des formations fissurées peuvent débiter plus de $5 \text{ m}^3/\text{h}$ (10 à 20 % plus de $10 \text{ m}^3/\text{h}$) et que près de la moitié des débits provenant des aquifères généralisés excédaient $10 \text{ m}^3/\text{h}$, des projets-pilotes furent proposés et étudiés en vue d'expérimenter la meilleure manière de valoriser ces ressources importantes et réparties sur l'ensemble du territoire. Malheureusement, aucun de ces projets n'a encore commencé.

./...

;

2.31. Le projet PNUD/OPS a été étudié par Agrer en 1985(1) révisé par DUHEM(2) en 1986 et critiqué par VERDIER(3 et 4) en 1989. Il consiste à irriguer, dans la région au Nord de Bamako, 15 ha répartis en 4 P.I.V. de 3 à 4 ha, à partir de 7 forages déjà réalisés pouvant débiter de 7 à 14 m³/h (Hmt de 30 à 40 m). Pour utiliser au maximum l'eau disponible autour des 4 villages, on a conçu un type de petit périmètre très intensif; celui-ci ne paraît pas viable pour les raisons suivantes: un niveau d'intensification irréaliste (2,4 cultures par an en moyenne sur chaque parcelle) impliquant un temps d'occupation des sols trop élevé (330 jours/an), un nombre de cultures trop important (13), un système de rotation quinquennal trop contraignant (et de plus entaché d'erreurs agronomiques), des rendements sans doute trop optimistes; de plus on a fait l'hypothèse, absolument utopique, d'admettre que toutes les familles de 3 sur 4 villages accepteraient de participer à plein temps à un périmètre d'irrigation qui comporte des risques: dépenses élevées en intrants sans assurance d'un revenu monétaire suffisamment incitatif étant donné les conditions de prix et de marché.

En conclusion, conçu pour assurer une valorisation maximum de l'eau souterraine disponible et une rentabilité acceptable ("sur le papier"), le projet se révèle tout à fait irréalisable.

2.32. Le projet CIRAD(5) propose un modèle de petite ferme familiale irriguée de 3 ha, à partir d'un forage de 5 m³/h à exhaure animale, qui intègre:

- des cultures vivrières en hivernage (2,4 ha de sorgho à haut rendement) avec irrigation de complément pour assurer la sécurité alimentaire de la famille et même un surplus important;
- des cultures maraîchères (4 seulement) sur 0,1 ha en hivernage et 0,2 ha en contre-saison, principalement pour la vente;

./...

-
- (1) Etude de faisabilité de la création de petits périmètres irrigués. AGRER Mai 85.
 - (2) Etude d'une alternative de mise en valeur de petits périmètres irrigués DUHEM - Nov. 85.
 - (3 et 4) Etude des perspectives d'exploitation agricole des eaux souterraines pour la création de petits périmètres irrigués - VERDIER - Janv. et Fév.89.
 - (5) Groundwater and rural development in subsharian Africa - BRGM/CIRAD/GERSAR Sept. 85.
 - (6) Projet Mali Nord-Est - FAO/II - rapport de préparation N° 83/86 AF/MLI 11 - Juin 86.

- et l'embouche (sur 0,5 ha de cultures fourragères) à la fois pour assurer le maintien des animaux de trait et d'exhaure et le croît de poids d'un petit élevage (12 agneaux), ainsi que pour fournir du fumier.

Ce modèle, plus simple et attractif que celui d'AGRER, est également rentabilisé par des rendements optimistes (par rapport à ceux retenus par VERDIER), mais surtout il suppose l'émergence de paysans-entrepreneurs, acceptant de faire un saut important vers un système agricole individuel et plus moderne que les pratiques actuelles (et acceptant en particulier l'embouche, thème fort débattu ces dernières années et considéré par beaucoup comme irréaliste dans les conditions socio-économiques actuelles d'exploitation du troupeau). Mais on pourrait sans doute s'inspirer de ce modèle, pour bâtir un modèle de petit périmètre collectif.

- 2.33. Le Projet Mali-Nord-Est (financé par le FAD) a été conçu par le CI de la FAO (6) pour donner à 900 (ou 1200) familles d'éleveurs en voie de sédentarisation, des cercles de Gourma Rharous et de Ménaka, la possibilité d'assurer eux-même une part de leur consommation de céréales et de légumes - 900 puits cimentés à faible profondeur, équipés du système "dérou" d'exhaure à traction animale permettraient chacun l'irrigation de 0,3 ha.

3 - LES BESOINS

3.1. Le marché des fruits et légumes

Dès que l'eau souterraine est mise à disposition des villageois en quantité plus importante et plus sûre, elle est utilisée - plutôt bien - pour des cultures maraîchères, mais, même sans chiffres, on sent bien qu'un développement trop rapide de l'irrigation à partir des eaux souterraines buterait sur le problème du marché des fruits et légumes. Ce marché est certainement en expansion dans les villes, mais aussi dans les zones rurales. Mais on n'a aucun chiffre.

Pour palier quelque peu à cette insuffisance dans la planification, et avant même que le PADEN inclue ces produits dans son enquête annuelle de consommation des ménages, le projet MLI/84/005 lance une enquête par échantillons sur la consommation des fruits et légumes à Bamako.

Anticipant sur les résultats de cette enquête, on propose, ci-dessous, une estimation provisoire de ces besoins (y compris pertes) vers l'an 2000:

- Bamako: 100 kg/hab X 1 million	= 100.000 t
- Centres urbains et ruraux: 70 kg/hab X 2.6 millions	= 190.000 t
- Zones rurales : 50 kg/hab X 5,4 millions	= 270.000 t
<u>total: env. 60 kg/hab X 9 millions</u>	<u>= 550.000 t</u>

Cette "consommation" représenterait la production d'une superficie irriguée pour fruits et légumes d'environ 20.000 ha, à raison de 27,5 t/ha.

Ces estimations, très provisoires, ne sont pas en contradiction avec la "Consommation" actuelle de Bamako, disons 63.000 t (90 kg/hab/an X 700.000); on sait en effet que la production de la zone irriguée péri-urbaine de 2000 ha (selon l'étude FAO du secteur agricole) - en voie de réduction par suite du développement des constructions - est de l'ordre de 50.000 t et qu'elle doit être complétée par les achats des commerçants à Kati (importante zone maraîchère à partir de puisards) et jusqu'à Nossombougou (70 km) et Kolokani (100 km).

./...

3.2. Essai de quantification et de répartition des besoins en irrigation

Les projets mentionnés ci-dessus envisagent l'utilisation des eaux souterraines non seulement pour l'irrigation de fruits et légumes, mais aussi pour l'irrigation de fourrages pour l'embouche et pour l'irrigation de complément de céréales à haut rendement pendant l'hivernage. Mais comment quantifier ces besoins pour l'avenir, alors qu'ils ne sont pas encore ressentis comme tels par les paysans ?

Le projet BKF 86/001 propose un indice de 200 m² irrigués par habitant, soit un besoin de 180 m³/an/habitant (à raison de 9000 m³/ha). En reprenant le modèle CIRAD (mais rappelons que les rendements sont optimistes), cette superficie unitaire permettrait, par exemple, la production de:

- (sur 160 m²) 48 kg hab de sorgho (soit 21 à 26 % des besoins unitaires de céréales estimés à 185 ou 224 kg/hab/an)
- (sur 20 m²) 57 kg hab de légumes (proches des besoins unitaires moyens du para 3.1.).
- (sur 33 m²) 34 kg de viande ovine et bovine (+ volaille).

La cohérence de ces productions unitaires avec les prévisions de consommation justifie l'ordre de grandeur de l'indice national de 200 m²/hab soit environ, en l'an 2000, une superficie irriguée de 180.000 ha pour 9 millions d'habitants.

Pour tenir compte des potentialités régionales, et en particulier des potentiels d'irrigation à partir des eaux de surface permanentes, cet indice a été modulé comme suit, selon les zones à potentiel homogène du Ministère du Plan, grâce à des coefficients (révisables après discussion):

	Coef	Indice zonal
- nomadisme et transhumance (zones 1, 2, 3, 4):	10 %	20m ² (oasis)
- transhumance et culture dispersée (5,6,7,8) :	25 %	50 m ²
- él. transh.et semi-séd.et " (11) :	50 %	100 m ²
- élevage séd.et " et " (16 - 17) :	60 %	120 m ²
- " " " et cult. disp.(12,13,15,18,19)	100 %	200 m ²
- " " " et " continue (14) :	75 %	150 m ²
- zones alluviales (20) :	50 %	100 m ² :
- forêts et bourgoutières (9) :	0	0

Tous calculs faits par arrondissement, sur la base de la population de 1987, les besoins régionaux d'irrigation sont estimés comme suit:

Région	Superficie irriguée (besoins) (ha)	Volume d'eau nécessaire (Mm ³ /an)		Production correspondante (X 1000 t)		
		9000m ³ /ha	5000m ³ /ha	Sorgho	Fruits et légumes	Viande
Kayes	9.940	89,5	50	24	28	17
Koulikoro	15.280	137,5	75	37	44	26
Sikasso	16.220	146	80	39	47	27
Ségou	18.120	163	90	43	52	31
Mopti	12.630	110	65	30	36	22
Tombouctou/Gao	7.810(?)	70	40	19	21	13
Total	80.000 ha	716	400	192	228	136

Ces besoins en irrigation, représenteraient un investissement de l'ordre de 400 à 500 milliards de F.CFA (dont 300 pour les forages), et les productions correspondantes représenteraient une bonne part des 350.000 t de céréales supplémentaires pour nourrir les 1,75 million de bouches supplémentaires d'ici l'an 2000, et 40 % des fruits et légumes nécessaires en l'an 2000.

Au cours d'itérations successives, on affinera ces premières estimations en fonction des projets d'irrigation à partir des eaux de surface (limitation déjà partiellement prise en compte par le coefficient de modulation de 50 % affecté aux zones alluviales); de même, en comparant les contraintes et avantages régionaux, on tachera de répartir ces estimations de besoins entre irrigations à partir des eaux souterraines et à partir des eaux superficielles non permanentes (aménagement de bas-fonds et petits barrages).

./...

:

4 - AVANTAGES ET CONTRAINTES DE L'IRRIGATION A PARTIR DES EAUX SOUTERRAINES

4.1. Avantages

Le principal avantage de l'utilisation de l'eau souterraine pour l'irrigation tient à son mode de gisement: le réservoir est situé partout sous les pieds de l'utilisateur; donc une possibilité de développement est offerte à tous les agriculteurs du pays (droit au développement: droit à l'irrigation) et pas simplement à ceux qui vivent près des grands axes fluviaux. Donc l'irrigation devrait réduire l'immigration vers les villes et l'étranger (voir si, grâce aux programmes d'AEP, il y a une correspondance entre l'augmentation plus ou moins grande ou même la réduction de la population rurale entre 1976 et 1987 et le taux de couverture en pompes manuelles selon les arrondissements).

Cette possibilité de développement peut être exercée à l'initiative des paysans de façon flexible dans le temps et dans l'espace; ceci constitue un avantage par rapport aux périmètres irrigués par eaux de surface qui sont souvent construits d'un bloc et ne sont mis en valeur que très progressivement.

De plus, la proximité entre le réservoir (souterrain) et le terrain à irriguer (pas de long canal d'amenée et peu de pertes entre forage et parcelle) ainsi que le fait que l'eau étant coûteuse doit être bien utilisée devraient améliorer l'efficacité de l'irrigation (rapport entre l'eau utilisée par les plantes et l'eau pompée): celle-ci devrait se situer entre 90 % et 66 % (pour les périmètres les plus importants à canaux en terre).

Enfin, l'eau souterraine stagne peu, donc les risques pour la santé (maladies liées à l'eau) sont réduits au maximum.

4.2. Contraintes liées au coût de l'eau souterraine

Les contraintes spécifiques qui peuvent limiter le développement de l'irrigation à partir des eaux souterraines, proviennent également de leur mode de gisement et sont donc fonction:

- des conditions hydrogéologiques: profondeur du niveau statique, rabattement et débit (liés dans la notion de débit spécifique) qui sont variables selon les zones;

- des caractéristiques des systèmes d'exhaure: coûts d'investissement des forages et des pompes (éventuellement des réservoirs), coûts d'opération et de maintenance (ces coûts dépendent des caractéristiques hydrogéologiques et des conditions économiques du moment ainsi que du rendement du système adopté) et enfin de la durée de fonctionnement annuel pour obtenir le volume d'eau d'irrigation nécessaire au plan de culture adopté sur une superficie donnée. Tous ces facteurs interviennent dans le coût de l'eau. Or GUILLAUMAUD et VERDIER ont classé les différentes cultures en fonction du coût de l'eau qu'elles pourraient supporter (voir graphique 2): dans le cercle de Kolokani, période cultures pourraient supporter le coût total de l'eau souterraine.

Le projet MLI 84/005 doit calculer le coût de l'eau souterraine par arrondissement en fonction des caractéristiques hydrogéologiques entrées dans la banque de données SIGMA. Il y a lieu dès maintenant d'analyser quels sont les facteurs qui influent le plus sur le coût de l'eau.

4.21. Les systèmes d'exhaure

Les tableaux 3 et 4, dûs respectivement à Halcrow (83) et CIRAD (85) comparent le coût du m^3 d'eau, dans les mêmes conditions, selon les systèmes d'exhaure. Le classement du coût du m^3 d'eau (amortissement compris) du moins cher au plus cher est le suivant (en US cents):

<u>Source d'énergie</u>	<u>Halcrow</u>	<u>CIRAD</u>	
	10.800m ³ /an à 20m	14.500m ³ /an à 30m tout compris	O/M
Solaire	4	7	4
éolienne	2		
col/man	-	5	7
manuelle	3	3	5
animale	-	(1)	(1)
biogas	-	5	2
essence	-	4	6
diésel bas	(1)	5	7
" haut	5		

Les conditions de calcul sont différentes.

O/M : Opération et Maintenance.

./...

Quoiqu'il en soit, le graphique 5 (d'après Halcrow) montre que les pompes manuelles semblent intéressantes pour de faibles débits (jusqu'à $3 \text{ m}^3/\text{h}$) et surtout de faibles hauteurs de pompage (jusqu'à 10 - 15 m).

La traction animale est souvent diversement appréciée; intéressante sur les puits avec système "delou", elle a été choisie dans le projet Mali Nord-Est; elle apparaît la moins coûteuse au CIRAD (pompage de $5 \text{ m}^3/\text{h}$ à 30 m pendant 2900 h/an); mais selon AGRER (pompage de 7 à $14 \text{ m}^3/\text{h}$ pendant 2000 à 2600 h pour une Hmt de 30 à 40 m) elle n'est intéressante (économie en devises, matériel simple qui ne nécessite que peu d'entretien) que pour des profondeurs de pompage et des débits plus limités que pour les moto-pompes diésel. Le manque d'expérience fait que l'on semble souvent s'écarter sensiblement des besoins théoriques en nombre d'animaux. Pour une puissance à la pompe de 0,8 CV (70 kgm/s) CIRAD prévoit seulement 3 ânes (capacité théorique 3 X 25 kgm/s) alors que pour des puissances à l'arbre de pompe variant de 1,7 à 2,1 CV (150 à 190 kgm/s), AGRER prévoit généreusement 12 boeufs (12 X 35 à 40 kgm/s) et DUHEM remarquait (pour écarter ce système) que le fonctionnement de manèges à boeufs en milieu villageois est encore mal connu. On peut conclure qu'il y a donc lieu d'expérimenter et, là où ce système d'exhaure se révèle économique, de le vulgariser.

L'énergie éolienne nécessite des investissements assez élevés, mais cette énergie renouvelable étant aléatoire, il y a donc lieu de le coupler avec d'importants réservoirs ou, comme proposé par CIRAD, avec l'énergie humaine.

L'énergie solaire nécessite des investissements très élevés (environ 4 à 5 fois plus que pour les autres systèmes); elle ne fonctionne que 9 à 10 heures par jour et moins encore par vents de sable fréquents au Mali; elle nécessite aussi des réservoirs importants. Enfin l'ensoleillement est minimal en Décembre au moment où les besoins en eau des cultures maraîchères sont maxima. Mais le coût de l'entretien et du fonctionnement est très réduit par rapport aux autres systèmes.

./...

D'après J. BILLERET, le coût du m³ d'eau pompé par système solaire est compétitif avec celui des motopompes diésel jusqu'à 7 à 8 m³/h pompés à 20 m (27.000 m³/an), soit jusqu'à des puissances de 2500 WC.

Le pompage diésel enfin est intéressant par rapport aux systèmes précédents pour des débits plus élevés: il n'y a pas en effet sur le marché de moteurs de 1 à 1,5 CV de bon rendement.

Le coût du m³ d'eau se calcule suivant la formule:

$$C = \frac{1}{QT} \left[I_a(f + p + r_1 + r_2) + X\%I + \left(\frac{QH}{r} \times T(Ce + Y\%Ce)\right) \right]$$

ou C est le coût du m³ d'eau en F.CFA

Q le débit en m³/h

T le temps de pompage annuel en heures

Ia l'amortissement annuel des investissements pour le forage (f), la pompe (p), le réservoir(r₁), le réseau d'irrigation (r₂) en fonction des durées de vie des différents éléments et du taux d'intérêt i%

X%I coût de la maintenance y compris pièces de rechange (X = 3 à 10%)

H hauteur manométrique totale: prof. N.S. + Q/Qspe + pertes de charge)

r rendement du moteur et de la pompe

Ce coût de l'énergie

Y%Ce coût des lubrifiants (en général X = 10 %)

Certains facteurs sont interdépendants, par exemple If est fonction de la profondeur du forage; Ip A - B Q H; Ir₂ est fonction de QT, etc...

Le cas étudié par CIRAD (dernière colonne du tableau 4) où les coûts O/M sont égaux à 62 % du coût total de l'eau, montre les tendances de variation du coût de l'eau quand certains facteurs hydrogéologiques, techniques ou financiers varient (voir tableau ci-dessous); quand un seul facteur est divisé ou multiplié par 2, le coût de l'eau ne baisse que d'un quart environ; il faut que 2 ou 3 facteurs varient dans le "bon" sens pour que le coût de l'eau soit sensiblement affecté.

Variations (toutes choses égales par ailleurs)	Résultats (par rapport à C dans cond. CIRAD)	Remarques
<u>- financières</u>		
i = 0 %	C1 = 9,9250	taux d'intérêt bonifié (7 à 0 %)
Ce : 2	C2 = 0,75 C	subvention de 50% sur carburants et lubrifiants
I : 2	C3 = 0,75 C	subvention de 50% sur investissements
I = 0	C4 = 0,62 C	" 100% "
<u>- Hydrogéologiques et techniques</u>		
Q x 2	C5 = 0,77 C	prix du groupe augmente d'env. 20 % surface irriguée double
T x 2	C6 = 0,75 C	" " "
H : 2	C7 = 0,7 C	prix groupe baisse d'environ 20 %
Qx2, H:2	C8 = 0,5 C	prix groupe égal - surf.irrig. double
Tx2, Qx2, H:2	C9 = 0,38 C	superficie irrigable quadruple
idem - I=0	C10 = 0,25 C	" " "

Le graphique 2 où la courbe du coût du m^3 d'eau est fonction du volume pompé annuellement aux 7 forages du projet PNUD, illustre certaines des tendances ci-dessus (notons qu'on est déjà dans un cas intermédiaire entre C3 et C4; DUHEM ne prend en compte que l'amortissement du groupe moto-pompe). Le coût de l'eau au forage de Kossaba serait économique, d'après VERDIER, pour des cultures d'oignons, choux, haricots verts; si l'on subventionnait totalement les investissements (C4), il le serait aussi pour l'embouche ovine...

D'autre part, le même raisonnement montre que le coût moyen de l'eau des alluvions ($Q_m = 9,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $NS_{\text{moy}} = 9,3 \text{ m}$) serait environ la moitié de celui des grès fissurés de Kolokani ($Q_{\text{moy}} = 4,9 \text{ m}^3/\text{h}$, $NS_{\text{moy}} = 16,5\text{m}$). L'arrondissement de Sayé dans le cercle de Macina serait encore plus favorable avec $Q_{\text{moy}} = 20,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

Le calcul sur ordinateur du coût moyen de l'eau exhaurée mettra en évidence (et cartographiera) les arrondissements où la contrainte économique (coût de l'eau) est la plus faible.

./...

Mais le tableau ci-dessus suggère que certaines variables qui font baisser le coût de l'eau, entraînent d'autres contraintes qu'on va maintenant analyser.

4.3. Autres contraintes

4.31. Sociologiques (et démographiques)

Le tableau ci-dessus a montré qu'en augmentant T et/ou Q, on faisait certes baisser le coût de l'eau, mais on augmentait d'autant la superficie irrigable. Or VERDIER affirme, d'après l'expérience sahélienne, que dans chaque village, seuls 20 % de la population se mobiliseront en général pour l'irrigation et que la superficie irrigable par famille ne peut dépasser 0,10 ha en raison de l'intérêt prioritaire porté par les ruraux aux cultures vivrières en hivernage.

Cette double contrainte voudrait dire qu'on ne pourrait prévoir qu'un hectare irrigué par tranche de 500 ruraux, soit, dans les conditions sociologiques actuelles, une superficie irriguée totale de 10 à 11.000 ha, répartis comme suit:

	<u>besoins pointe</u>	<u>type exhaure</u>
- 5500 micro-périmètres de 0 à 0,8 ha	0 à 50 m ³ /j	p.m. et t.a.
- 3200 micro-périmètres de 0,8 à 1,6 ha	→ 100 m ³ /j	t.a. et p.s.
- 1100 petits périmètres 1,6 à 2,4 ha	→ 150 m ³ /j	t.a? et p.s?
- 450 petits périmètres 2,4 à 3,2 ha	→ 200 m ³ /j	t.a? et p.d?
- 200 petits périmètres 3,2 à 4 ha	→ 250 m ³ /j	p.d.
- 350 petits périmètres 4 à 10 ha max.	→ 600 m ³ /j	p.d.

mais alors on peut se demander si partout les conditions hydrogéologiques (surtout dans les formations fissurées) permettront l'adéquation entre les besoins de pointe de chaque village et le débit d'un (ou de plusieurs) forage proche de ce village.

Par contre, l'introduction d'un système type CIRAD (où la superficie des cultures céréalières d'hivernage représentent environ 4 fois la superficie des cultures maraîchères et fourragères de contresaison) permettrait sans doute d'augmenter sensiblement la superficie totale aménagée, sans augmenter les besoins de pointe, et peut-être de lever partiellement la réticence de la majorité des familles à se livrer à des activités d'irrigation.

4.22. Contraintes organisationnelles

Pour être un succès, le développement de l'irrigation à partir des eaux souterraines doit se faire à partir des initiatives des villages. Mais celles-ci doivent être éclairées et assistées par:

- des démonstrations (projets-pilotes),
- des conseils sur les meilleurs moyens techniques pour répondre à leurs besoins déclarés,
- une aide (technique et éventuellement financière) aux associations villageoises d'irrigation pour l'aménagement des périmètres, l'approvisionnement en semences sélectionnées, engrais, pesticides, fuel, pièces de rechange, crédit, commercialisation,...

Comment réaliser tout cela pour que l'irrigation à partir des eaux souterraines démarre et se développe sur des bases saines ? Quelle aide financière et technique l'Etat (et ses agents), les projets (et leur assistance financière et technique), les ONG... sont-ils en mesure d'accorder aux communautés rurales pour traduire au mieux dans les faits ce droit au développement = droit à l'irrigation) évoqué plus haut ? Il faut y réfléchir dès maintenant. Ce sera un des thèmes de discussion du Groupe de Travail.

5 - PROPOSITIONS PROVISOIRES (à compléter en Juillet 1989)

5.1. Stratégie

- appuyer les initiatives de base et les tentatives d'aménagement des terroirs villageois dans lesquelles l'irrigation, soit à partir d'eaux souterraines soit à partir d'eaux de surface pérennes ou non pérennes doit avoir sa place adaptée aux besoins de développement et aux capacités de maîtriser des techniques plus performantes;

- fixer les "règles du jeu": aides financières, assistance technique des administrations, des projets, des ONG pour dégager les ressources financières et humaines nécessaires (formation);

- adapter les systèmes théoriques existants ou imaginés aux conditions des communautés rurales par des projets-pilotes (voir ci-dessous);

./...

- aller progressivement vers la généralisation de systèmes d'irrigation plus performants et adaptés; si dans les dix dernières années on a assisté à la généralisation de l'utilisation de la petite pompe manuelle pour l'arrosage de micro-périmètres, on peut penser qu'un effort résolu pourrait généraliser, dans les 10 dernières années du siècle - et selon la taille des villages, les "grosses" pompes manuelles, la traction animale, les moto-pompes diesel, et les stations de pompage mixtes AEP/irrigation.

5.2. Propositions provisoires pour la mission PNUD/OPS de Juin 1989 chargée de préparer un projet pilote pour la valorisation des ressources en eau souterraine.

3 phases: 1) une phase de préparation d'un an consacrée à des enquêtes sur l'irrigation actuelle, sur le maraîchage, sur l'irrigation péri-urbaine, aux choix des villages répartis sur l'ensemble du territoire (les régions 6 et 7 bénéficiant du projet FAD Mali Nord-Est pourraient être moins concernées), au choix des systèmes d'irrigation et aux avant-projets sommaires, enfin à la commande du matériel dans le cadre du budget.

2) une phase de 3 ans de construction et de mise en valeur des petits périmètres.

3) une phase d'un an: continuation du suivi et synthèse des résultats sous forme d'une mise à jour du schéma-directeur.

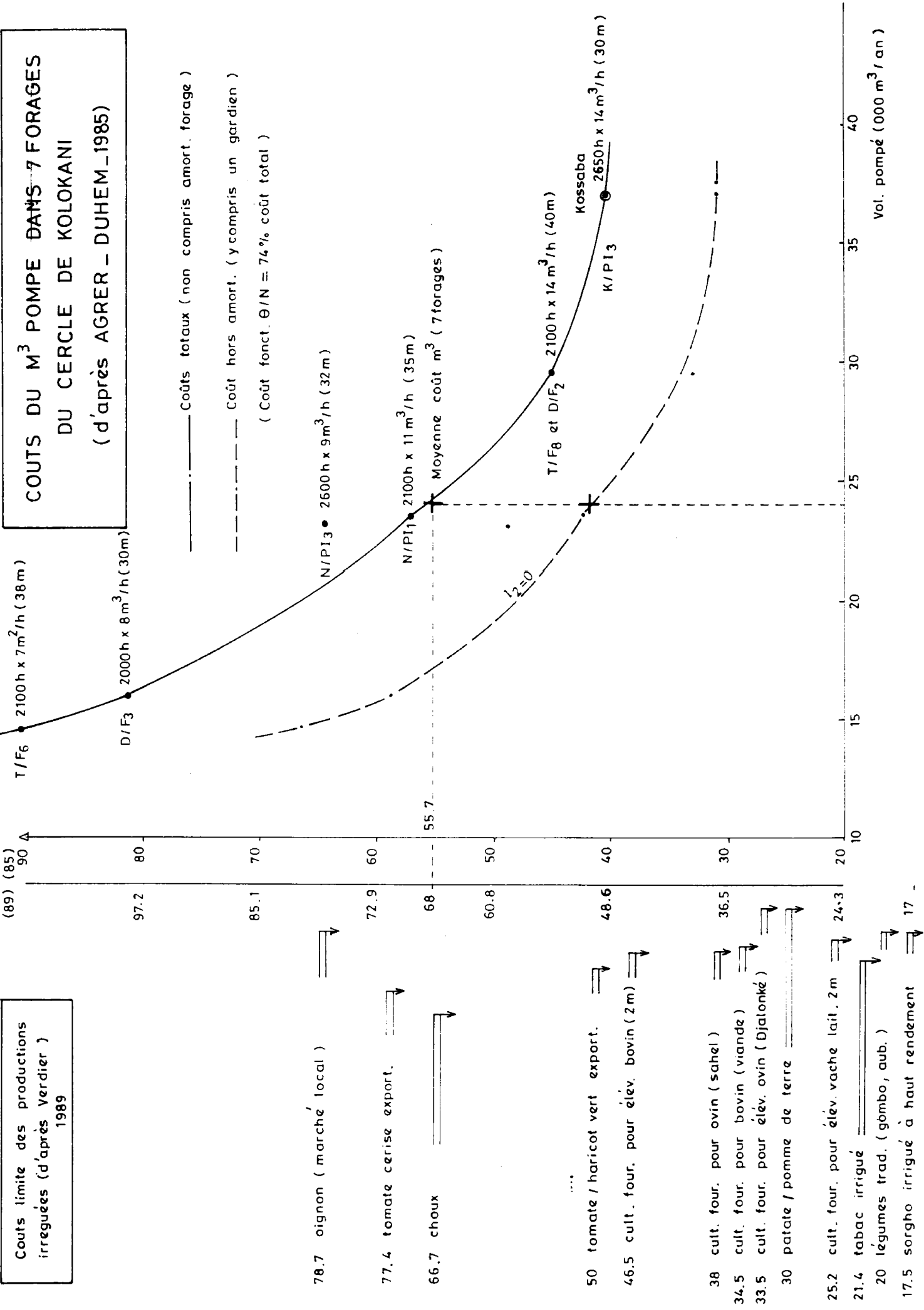
Dans le cadre du budget actuel, on pourrait sans doute prévoir (à condition de s'inspirer plus du modèle CIRAD - et du rapport KIRPICH - que du modèle AGRER, et de faire jouer dès le début leur rôle aux banques de crédit):

	<u>sup. irr.</u>	<u>Inv. (000S)</u>
- 25 pompes manuelles à gros débit	12ha	100
- 5 pompes solaires (matériel fourni par FED)	8ha	150 (Génie Civil)
- 5 pompes à traction animale	15ha	75
- 5 pompes diesel (dont 2 pour station mixte)	25ha	250 (y compris 2 AEP)
total 40 villages	60ha	575

COMPARAISON
DE DEUX TYPES DE PROJETS D'IRRIGATION
A PARTIR DES EAUX SOUTERRAINES

	KOSSABA (Agrer - 1985)	CIRAD (1985)
Type	P.P.I. intensif: <u>3ha</u> et 40 parcelles	Ferme familiale: <u>3ha</u> et 9 parcelles
Superficies cultivées	H = 3ha et SS = 4,2ha - Total = 7,2 (240%) dont: cér. = 1,2 tabac = 0,6 niébé = 0,6 pdt. pat = 1,5 cult. maréch. = 3,3	H = 3ha et SS = 0,7 ha - Total = 3,7ha (123%) dont: cér. = 2,4 cult. mar. = 0,3 cult. fourr. = 1(0,5 + 0,5)
Besoins en eau	37.000 m ³ /an - Min. = 36 m ³ /j Max. = 273 m ³ /j en Janvier	14.500 m ³ /an - Min. = 29 m ³ /j Max. = 46 m ³ /j en octobre
Débit pompé	14 m ³ /h x 2650 h (23 h/j en Mai, 16 h/j en Janvier)	5 m ³ /h x 2900 h (6 à 9 h/j)
HMT et Puiss. nécessaires	30m - 2,7 CV (pompe) et 3,8 CV (moteur)	30 m - 1 CV
Pompe et moteur	P. à axe vert. et mot. diesel 6 CV	Pompe et 3 ânes.
Investissements (en M. F.CFA)	Forage: 0, Pompe et moteur: 2,275, Réseau: -,725 - Total: 7	Forage: 3, Pompe: 2, Réseau: 0,725 - Total: 5,725
- Remb. investis.	950.760 F.CFA	537.500 F.CFA
- Frais fonction.	1.346.920 F.CFA	260.000 F.CFA
- Coût m ³ /eau	62 F.CFA (40,8 sans remb. réseau)	54 F.CFA (44 F.CFA sans remb. forage)
Coûts intrants	560.000 F.CFA	290.000 F.CFA
Val. brute prod.	7.000.000 F.CFA	1.565.000 F.CFA
Val. nette hors remb. invest.	5.093.000 F.CFA	1.115.000 F.CFA
Nbre de j. de travail	3.520	693 (393j.de cult, 80j. d'élevage, 220j.d'irrigation)
Val. journée travail (hors remb. invest.)	1.440 F.CFA	1.600 F.CFA

Couts limite des productions
irreguées (d'après Verdier)
1989



RESULTAT DES ANALYSES SUR LES SYSTEMES D'APPROVISIONNEMENT EN EAU DES VILLAGES
10.800 m3/an

POMPES	Nombre Pompes	Nb. de points de distribution	Population par points	Dimensions du système	DUREE DE VIE		Coût/ capital du système (U.S. \$)	COUTS RECURRENTS			Coût cycle de vie (\$)	Coût/unité de l'eau (cents/m3)	
					Source d'énergie (années)	Pompe (années)		Coûts pour remplac. tout act. (\$)	Coûts annuels d'opér. (\$)	Coûts annuels mainten. (\$)			
Avec conduits de distribution													
Soleil	1	4	187	974 Wp(1)	15	5 (5)	21169	3113	0	98	25301	22.3	
Vent	1	4	187	40.7 M3(2)	30	10	16038	823	0	59	17469	15.4	
Diésel "bas"	1	4	187	2.5 kW(3)	9.9	10	6649	1549	414	206	14629	12.9	
Diésel "haut"	1	4	187	2.5 kW(3)	7.3	10	6649	2064	1242	406	25806	22.7	
Sans distribution													
Soleil	1	1	750	944 Wp(1)	15	5 (5)	19849	1017	0	98	23273	20.5	
Vent	1	1	750	39.4 m2(2)	30	10	14500	522	0	59	15629	13.8	
Diésel "bas"	1	1	750	2.5 kW(3)	10	10	5641	1164	402	206	12932	11.4	
Diésel "haut"	1	1	750	2.5 kW(3)	7.5	10	5641	1641	1206	406	23832	21.0	
Pompes manuelles	7	7	107	60 W (4)	-	10	12796	1077	0	350	17497	15.4	

- (1) Débit de l'ensemble
- (2) Surface du rotor
- (3) Débit de l'arbre
- (4) Basé sur une utilisation de plus de 5 heures
- (5) Incluant moteur électrique
- (*) Population 750 habitants, consommation per capita de 40 l/j, hauteur d'aspiration statique de 20 m, densité de la population 75 hab/hectare, mois solaire critique = 19.3 MJ/m3, vitesse critique du vent = 2.5 m/s, i = 10 %, n = 30 ans.

COUTS DE L'EAU D'IRRIGATION

Comparaison entre différents types d'énergie pour un débit

de $5 \text{ m}^3/\text{H}$ à une profondeur de pompage de 30 m.

(Volume annuel pompé = $\underline{\underline{13.500 \text{ m}^3}}$ - $5 \text{ m}^3/\text{H}$, 9 H/j et 300 j/an)

COUTS	TYPES DE POMPAGE	POMPAGE	EOLIENNE	ENERGIE	BIOGAS	TRACTION	MOTEUR	MOTEUR
		MANUEL (4 H/j)	- POMPE MANUELLE	SOLAIRE (2KW)		ANIMALE	ESSENCE (3HP)	DIESEL (5HP 1500 RPM)
1. INVESTISSEMENTS								
- Forage		6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
- Pompe		1.000	1.000	40.000	2.000	4.000	2.900	3.800
- Eolienne		-	1.000	-	-	-	-	-
- Cuve à gaz		-	-	-	9.000	-	-	-
- Irrigation		1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450	1.450
TOTAL 1		8.450	10.150	47.450	18.450	11.450	10.350	11.250
2. FONCTIONNEMENT ANNUEL								
- Pièces détachées 6%								
. Pompe		60	60	800	40	240	430	230
. Irrigation		90	90	90	90	90	90	90
- Carburants/Lub.		-	-	-	135	140	980	1.350
- Energie humaine		1.200	600	-	-	50	-	-
TOTAL 2		1.350	750	890	645	520	1.500	1.670
COUT M3/	en US \$	0.100	0.115	0.066	0.048	0.039	0.110	0.120
FONCTIONNE.	en F.CFA(*)	30.0	34.5	19.8	14.4	11.7	33.0	36.0
COUTS FINANCIERS								
- Amortissement								
. Forage (20 ans)		300	300	300	300	300	300	300
. Autres (*)		345	665	2.810	1.245	545	560	690
TOTAL 3		645	965	3.110	1.545	845	860	990
COUT M3/	en US \$	0.048	0.071	0.230	0.114	0.063	0.064	0.073
INVESTISS.	en F.CFA	14.4	21.3	69.0	34.2	18.9	19.2	21.9
COUT FINAL DU	en US \$	0.148	0.127	0.296	0.162	0.102	0.174	0.193
M3 D'EAU	en F.CFA	44.4	38.1	88.8	48.6	30.6	52.2	57.9

(*) Durées d'amortissement

- Pompe manuelle : 5 ans
- Pompe éolienne : 5 ans
- Pompe solaire : 15 ans
- Pompe traction animale : 10 ans
- Pompe mécanique : 7 ans
- Système Biogaz : 10 ans
- Irrigation : 10 ans

1 USS = 300 F.CFA

EFFET DE LA HAUTEUR D'ASPIRATION STATIQUE
SUR LE CÔÛT DE L'EAU POUR L'APPROVISIONNEMENT DES VILLAGES
(Scénario population 750 habitants - pas de distribution)

