

ADAPTATION AUX ENERGIES RENOUVELABLES D'UN DISPOSITIF PILOTE DE MICROFILTRATION POUR LE TRAITEMENT DES EAUX DE SURFACE DANS LES PETITES COMMUNAUTES RURALES AU MALI.

Arona COULIBALY¹, Mamadou S. DIARRA¹, Innocent DIPAMA¹, Adama TOLOFOUDYE²
Souleymane SOW³, Abdoulaye DOUCOURE⁴, Michel FARCY⁴
¹ENI-ABT, ²FAST/UB, ³EDM SA, ⁴PALL
arona_coulibaly@yahoo.fr

RESUME : La présente étude, composante d'un projet de recherche-développement, est une contribution au choix de stratégies alternatives en vue d'accroître le taux d'accès de la population à l'eau potable. L'objectif est l'adaptation aux énergies renouvelables d'un pilote de traitement des eaux de surface par microfiltration destiné aux petites communautés rurales, notamment les villages riverains d'un cours d'eau ou d'un fleuve. Le traitement par microfiltration (MF) a la capacité d'enlever efficacement des pathogènes malfaisant avec consommation d'énergie limitée. A partir d'un dispositif de base de type Pall Aria AX2, une série de modifications ont été développées en vue d'une adaptation à la fois technologique et énergétique au contexte du Mali. Sur le plan énergétique, la source de prévalence a été le solaire photovoltaïque. Quant à la technologie, quatre options ont pu être simulées. Une analyse des coûts (acquisition, installation, exploitation) des différentes options a permis de dégager des critères de choix.

Mots clés : eau potable, membrane, micro filtration, adaptation technologique, énergies renouvelables

I. INTRODUCTION

L'accroissement du taux national de couverture en eau potable est un des axes prioritaires de la politique de l'eau du Mali. Ce taux estimé à 55% en 1990 est passé à 61% en 2004 et devra atteindre 81% en 2015 [1]. Cela nécessite d'une part une disponibilité en ressources en eau et en énergie, et d'autre part des capacités organisationnelles adéquates. Selon des estimations en 2006, les ressources en eau (de surface, et souterraine renouvelable) seraient de 137 milliards de m³ [2]. La mise en valeur, en termes de potabilisation, de ces ressources demeure un enjeu fondamental.

Les techniques et technologies conventionnelles sont présentement les seules utilisées au Mali pour la potabilisation de l'eau particulièrement dans les centres urbains. Il faut toutefois noter que l'effort de traitement est considérablement axé sur les eaux de surface (principaux cours d'eau et leurs affluents) qui sont de plus en plus polluées par diverses organismes émanant des déchets organiques humains et animaux, des engrais organiques et chimiques et des produits phytosanitaires, des rejets ou effluents industriels.

Pour relever le déficit de l'accroissement du taux de couverture à un coût énergétique relativement faible, particulièrement dans les zones rurales, il est opportun d'envisager des solutions alternatives pouvant s'adapter à notre environnement. Les technologies par filtration membranaire peuvent répondre à cette attente à condition de les adapter au contexte. C'est dans ce cadre que se situe la présente étude dont l'objet est d'adapter un dispositif de micro filtration par technique membranaire pour le traitement des eaux de surface en milieu rural au Mali.

II. LE DISPOSITIF PALL ARIA AX2

2.1 Description

Le dispositif qui fait l'objet d'adaptation est, dans sa version de base, du type Pall Aria AX2. C'est une

unité commerciale très compacte, facilement transportable. Pour la phase d'essais, le pilote a été installé sur le site de l'usine de traitement d'eau de la société EDM SA de production et de distribution d'eau potables à Bamako. Il est en expérimentation par les chercheurs de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs ABT de Bamako, en partenariat avec la Faculté des Sciences et Techniques (FAST) de l'Université de Bamako, l'Energie du Mali (EDM SA) et le fournisseur industriel du dispositif (PALL France).

L'unité est essentiellement composée d'un réservoir (R) devant recevoir l'eau brute à traiter, d'une pompe (P1) pour la circulation de l'eau à travers le système, d'un élément de pré filtrage (Pf), de cinq modules de membranes (M) pour le filtrage de l'eau, d'un réservoir pour perméat (Rp) servant au nettoyage automatique du système (retro lavage), d'un compresseur d'air (C), d'accessoires (tableau de commandes (T), système d'alimentation en eau brute (AEB), vannes pneumatiques). Pour les besoins d'utilisation, le dispositif est complété par un réservoir de perméat (Ru).

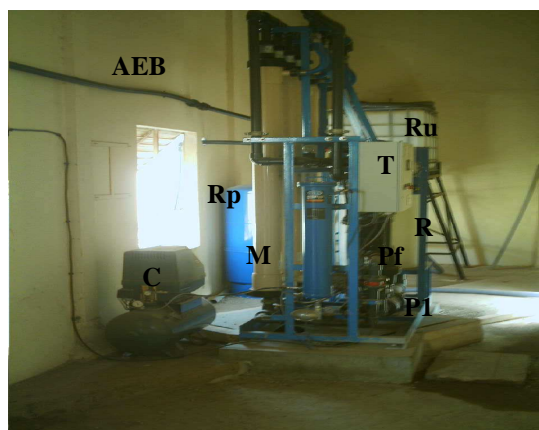


Figure 1 : Dispositif sur son site d'installation

2.2 Fonctionnement

La figure 2 représente le schéma fonctionnel du dispositif de base. L'eau brute en provenance d'une source (piquage sur un réseau) est admise dans le réservoir d'une capacité de 200 litres.

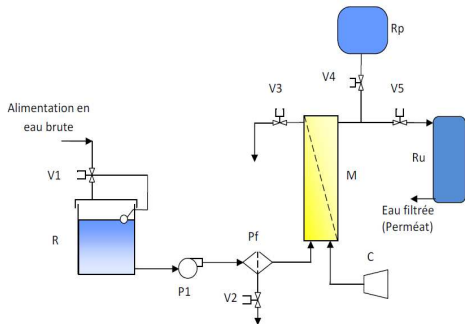


Figure 2 : Schéma fonctionnel de Pall Aria AX2

L'eau est aspirée du réservoir par la pompe P1 de 2,2 kW pour une HMT de 40 m. Cette eau est ensuite refoulée vers les modules M, après un passage par le pré-filtre Pr. A travers les modules l'eau subit le processus de filtrage. A la suite de ce processus l'eau filtrée (perméat), au débit de 10 m³/h, est acheminée vers le réservoir de stockage pour utilisation à travers la vanne V5. Une partie du perméat est directement drainée vers le réservoir Rp pour le nettoyage automatique du système. Deux modes principaux de fonctionnement sont à retenir pour ce dispositif : le fonctionnement en mode filtrage, et le fonctionnement en mode de nettoyage.

III. EXPERIMENTATIONS

La validation de la fonctionnalité du dispositif nécessite quelques expériences de mise en fonctionnement et de prise de données relatives à l'eau brute, à l'eau traitée, aux caractéristiques énergétiques (puissance et courant), au temps de fonctionnement dans les différents modes.

3.1 Tests de fonctionnalité

Le système est alimenté en eau brute, à 10 m³/h, à partir d'un piquage effectué sur le réseau d'eau brute de EDM SA. Une fois l'appareil mis en marche par la procédure recommandée, les relevés sont effectués périodiquement toutes les 60 mn. Les résultats obtenus après des séries discontinues et continues de fonctionnement sont satisfaisants au regard de la qualité de l'eau obtenue en comparaison avec celle de EDM SA. Dans le tableau 1 sont reportés, en exemple, les résultats de trois journées à différentes heures.

Tableau 1 : Relevés de fonctionnement de l'unité

Date	Turbidités (NTU)			Débit (m ³ /h)	
	EB	ET	RT	EB	ET
06/04/10	2,79	0,09	245	13,6	10,6
03/05/10	4,22	0,13	279	14	10,1
05/05/10	3,59	0,14	287	14	10,0

EB : Eau brute ; ET : Eau traitée ; ET : Retenta

Le tableau 2 fait état des résultats d'analyses bactériologiques effectuées sur l'eau brute et l'eau traitée.

Tableau 2 : Résultats d'analyses bactériologiques (UFC/100ml)

Date		CTH	ENT	EC	CT
23/03/10	EB	174	32	12	528
	ET	0	0	0	0
16/04/10	EB	860	40	1500	6000
	ET	0	0	0	235
05/05/10	EB	1555	545	70	3250
	ET	0	0	0	2

CTH : Coliformes thermotolérants

ENT : Entérocoques

EC : Escherichia coli

CT : Coliformes totaux

Ces résultats montrent en partie la performance filtrante de l'unité Pall Aria AX2 à rendre potable de l'eau à partir d'eau brute aux caractéristiques de l'eau du fleuve Niger. La figure 3 montre les trois catégories d'eau issues du traitement : le résidu d'eau (RE), l'eau brute (EB) et l'eau filtrée ou traitée (ET).

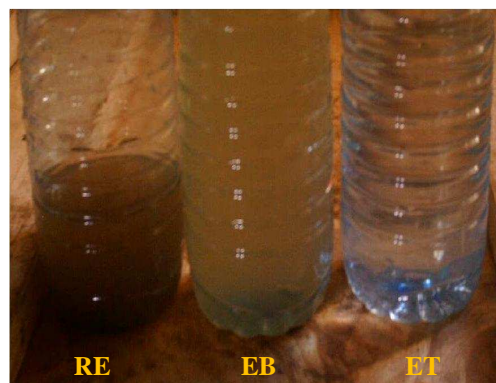


Figure 3 : Eaux issues du processus de traitement

D'autres paramètres de caractérisation tels que les besoins énergétiques et le rendement hydraulique, ont permis de confirmer la performance du dispositif. En effet, à partir d'une série de relevés, la consommation moyenne spécifique et le rendement hydraulique (rapport entre l'eau filtrée et l'eau brute) ont été évalués à respectivement 0,2 kWh/m³ d'eau traitée et 88,5%. Les pertes de 11,5% sont dues au principe de fonctionnement du système qui de façon automatique procède à une auto maintenance (nettoyage) utilisant une partie de l'eau traitée. Avec le système classique la consommation spécifique d'énergie est de 0,39 kWh/m³.

3.2 Constats

L'unité Pall Aria AX2, malgré ses performances notoire en matière de traitement de l'eau, présente quelques défaillances quant à son utilisation en milieu rural pour la potabilisation des eaux de surface :

- l'alimentation en eau brute du dispositif à travers le réservoir (R) est inadaptée au contexte des eaux de surface (cours d'eau) ;
- l'unité dispose d'une pompe intégrée dont le montage ne permet pas une alimentation directe du système à partir d'un cours d'eau ;
- le système fonctionne avec de l'énergie électrique sous une tension alternative de 220V.

IV. OPTIONS D'ADPTATION

Les options seront définies au regard des éléments de constat ci-dessus établis. Il s'agit donc de trouver une solution à l'alimentation en énergie et en eau brute du système sans déranger son principe de fonctionnement habituel (régulation, auto maintenance, débit nominal de 10 m3/h d'eau traitée). En somme la configuration de base devra rester inchangée.

4.1 Alimentation énergétique

Elle sera assurée par un système solaire photovoltaïque dimensionné en tenant compte des caractéristiques de fonctionnement (puissance mise en jeu, temps de fonctionnement réel) dans les différents modes (filtrage, maintenance). La fourniture en tension alternative sera envisagée, ce qui nécessitera l'utilisation d'un onduleur. Le fonctionnement nocturne n'étant pas nécessaire, l'utilisation de batterie ne s'impose pas, mais peut s'avérer utile pour certains accessoires (mémoire).

Quelle que soit l'option, l'alimentation des pompes (P1 et P2) est faite en aval du variateur pour garder la régulation du débit d'eau.

4.2 Alimentation en eau brute

Pour acheminer l'eau d'un cours d'eau jusqu'au dispositif, trois options sont envisagées en écartant la configuration de configuration de base :

- **Option 1 :** Adoption d'une seconde pompe P2 qui va drainer l'eau brute depuis un cours d'eau (rivière, fleuve, etc.) jusqu'à V1.
- **Option 2 :** Adoption d'une seconde pompe qui va drainer l'eau brute vers une cuve chargée d'alimenter le réservoir par gravitation.
- **Option 3 :** Adoption d'une seconde pompe P2 alimentant directement V1 et les modules M.

4.3 Configurations technologiques

4.3.1 Configuration de l'option 1

Dans cette configuration (figure 4), le dispositif est alimenté en eau brute, depuis un cours d'eau, par une pompe P2 dont le refoulement va directement à V1. Les deux pompes peuvent fonctionner simultanément, notamment dans la phase normale du filtrage (P2 alimente le réservoir R et P1 alimente, à partir de R, le reste du circuit).

Les énergies significatives sont celles consommées par P1, P2 et C. Le dimensionnement solaire PV prend en compte de façon simultanée ces trois énergies. Comparativement à l'option de base, il y a une énergie supplémentaire qui est celle de la pompe P2. La

puissance de la pompe P2 est évaluée sur la base d'une HMT partant du point d'aspiration sur le cours d'eau à la vanne V1.

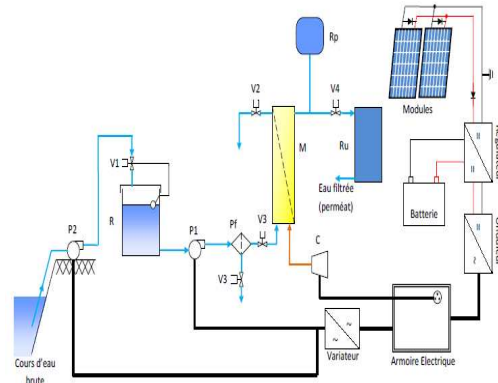


Figure 4 : Option 1

4.3.2 Configuration de l'option 2

Dans ce dispositif (figure 5) la pompe P2 aspire l'eau brute du cours d'eau et la refoule vers une cuve située à une hauteur supérieure à celle du réservoir. Par la suite l'eau descend par gravitation dans le réservoir si la vanne V1 s'ouvre.

Les deux pompes peuvent fonctionner simultanément étant donné que la pompe P1 assure la phase de filtrage et que le niveau de l'eau va baisser suffisamment à certain moment dans la cuve et lancer le démarrage de la pompe P2.

Les énergies significatives sont celles consommées par P1, P2 et C. Le dimensionnement solaire PV prend en compte de façon simultanée ces trois énergies. Comparativement à l'option 1, l'augmentation de la HMT de P2 due à la position de la cuve va engendrer une consommation supplémentaire d'énergie de P2 et par suite de l'ensemble. La puissance de la pompe P2 est évaluée sur la base d'une HMT partant du point d'aspiration sur le cours d'eau à la vanne V6.

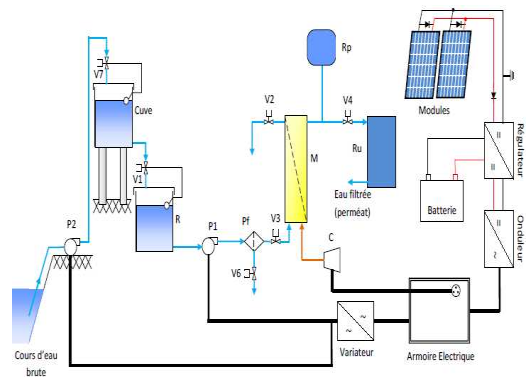


Figure 5 : Option 2

4.3.3 Configuration de l'option 3

Dans cette configuration (figure 6), l'énergie supplémentaire à considérer, par rapport à l'option de base, est celle consommée par la pompe P2 dont la

HMT prend en compte le drainage de l'eau brute de la source jusqu'à l'obtention du perméat.

La pompe P2 draine l'eau brute, d'une part vers le circuit des membranes pour le filtrage, et d'autre part vers le réservoir R pour les besoins de la pompe P1. La pompe P1 fonctionne exclusivement pour le nettoyage du dispositif. La vanne V8 permet de réguler le drainage de l'eau vers le réservoir R en cas de besoin.

Dans ce mode les deux pompes P1 et P2 ne fonctionnent pas simultanément, car lorsque l'une marche l'autre est à l'arrêt. En fait la pompe P1, partie intégrante de la configuration de base, ne sera utilisée que pendant les périodes de maintenance (nettoyages automatique et chimique). La plus grande énergie consommée par l'une des deux pompes sera celle qui sera prise en compte dans le dimensionnement de la source d'énergie.

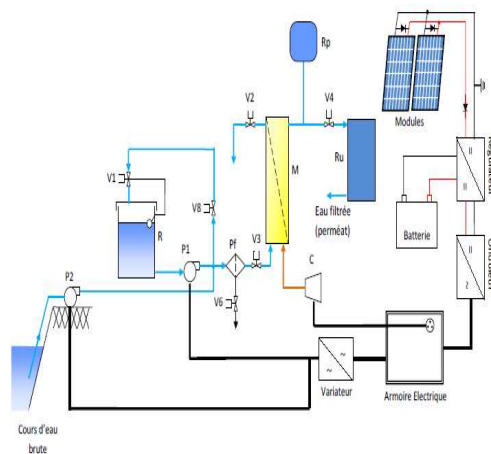


Figure 6 : Option 3

V. DIMENSIONNEMENT DE LA SOURCE D'ENERGIE

5.1 Considérations générales

Comme il a été déjà indiqué la source d'énergie adoptée est le solaire photovoltaïque. L'objet de cette phase de l'étude est de caler les besoins en énergie du dispositif au système de fourniture d'énergie, en tenant compte des différents modes de fonctionnement. Ces modes sont principalement le processus de filtrage et les processus de nettoyage (automatique et manuel). Il faut souligner que les modes (filtrage et nettoyages) ne sont pas simultanés : le filtrage est toujours mis en veille quand les nettoyages débutent.

Pour mieux cerner le fonctionnement énergétique du dispositif, une série de mesures ont été effectuées au même moment que les tests de fonctionnalité. Les paramètres concernés, la tension délivrée et le courant absorbé, l'énergie consommée sur la durée de chaque essai. Ce dernier paramètre a été obtenu par la pose d'un compteur d'énergie dédié uniquement à l'installation. Il faut rappeler que les composants en demande d'énergie électrique de l'option de base sont la pompe intégrée, le compresseur d'air et les accessoires (tableau de commande).

Les résultats des mesures de paramètres sont consignés dans le tableau 3. Dans le tableau 4 sont reportés les résultats d'une campagne de mesures où sont disponibles l'énergie consommée et le débit d'eau traitée.

Tableau 3 : Caractéristiques énergétiques

Composants	Puissance (kW)	
	Constructeur	Déterminée
Compresseur	0,53	0,81
Pompe	2,2	1,41

Tableau 4 : Données de consommation et de filtrage

Date	Energie consommée (kWh)	Volume eau filtrée (m3)	Consommation spécifique (kWh/m3)
03/04/2010	7	63	0,11
06/04/2010	8	73	0,11
07/04/2010	5	40	0,13
08/04/2010	3	22	0,14
13/04/2010	12	103	0,12
15/04/2010	7	50	0,14
16/04/2010	4	21	0,19
17/04/2010	6	40	0,15
19/04/2010	13	83	0,16
20/04/2010	4	21	0,19
21/04/2010	14	83	0,17
22/04/2010	14	84	0,17
23/04/2010	16	94	0,17
26/04/2010	18	103	0,17
27/04/2010	8	44	0,18
28/04/2010	7	42	0,17
29/04/2010	16	85	0,19
30/04/2010	18	96	0,19
Moyenne	10	63,72	0,16

Ce tableau a permis de représenter l'évolution de la consommation d'énergie en fonction du volume d'eau traitée (figure 7).

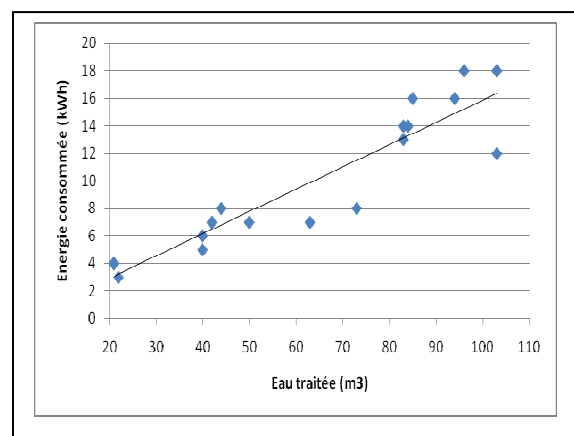


Figure 7 : Evolution de l'énergie en fonction de l'eau

Il ressort de l'analyse de cette courbe une nette fluctuation de l'énergie en fonction du volume d'eau traitée. Ce phénomène s'explique par le temps que le dispositif accorde à la maintenance automatique (nettoyage) chaque fois que cela est nécessaire compte tenu des performances de traitement. Ce temps est pris en compte dans la comptabilisation du temps global, bien que le filtrage est arrêté, car faisant partie intégrante du processus de traitement de l'eau.

Sur la base des tableaux 3 et 4, ainsi que de la figure 7 les caractéristiques de dimensionnement solaire ont pu être dégagées (tableau 5)

Tableau 5 : Caractéristiques de dimensionnement

Equipement	Puissance (kW)	Temps de fonction. (h/j)	Energie consommée (kWh/j)
Compresseur	0,81	1,2	0,99

Tableau 7 : Coût des options

	Options de base	Option 1	Option 2	Option 3
Puissance installée (Wc)	4 720	6 420	7 440	10 500
Coût Equipement de base	17 500 000	17 500 000	17 500 000	17 500 000
Coût Equipement solaire (Fcfa)	12 368 650	16 383 900	18 340 050	24 928 500
Coût Installation (Fcfa)	2 588 000	3 518 000	4 076 000	5 750 000
Coût total (Fcfa)	32 456 650	37 401 900	39 916 050	48 178 500
Coût par Wc (Fcfa)	6 876	5 825	5 365	4 588

Ce tableau permet d'observer que plus la puissance à installée est conséquente, moins est élevé le coût par watt crête installé.

Le choix d'une option va dépendre des conditions d'exploitations (site d'implantation, profil des consommations pour l'adoption d'une cuve, etc.).

VI. ETUDE COMPARATIVE AVEC LE DIESEL

Dans le cadre d'une politique d'accroissement du taux d'accès à l'électricité en milieu rural, le Mali a adopté une stratégie visant l'installation et l'exploitation commerciale de centrales de production d'électricité dans les zones ou périmètres non desservis par la société EDM SA. Dans ce contexte l'utilisation d'un équipement comme le dispositif de micro filtration peut être avantageux car les charges liées à l'exploitation (maintenance et fonctionnement) de la centrale ne sont pas à considérer. Les premières estimations effectuées ont aboutit à coût de production du mètre cube à 155 Fcfa, sur la base de 300 Fcfa/kWh.

L'analyse du fonctionnement du dispositif a permis de dégager une proportion de temps de 98% pour la filtration contre 2% pour la maintenance automatique. Ainsi pour 6 heures de fonctionnement journalier la capacité de traitement de l'unité serait de 58,7 m³ d'eau soit 58 700 litres d'eau potable par jour. Il faut signaler qu'une telle quantité correspond aux besoins en eau d'une communauté de 2935 habitants en raison de 20 litres par personne et par jour.

Pompe P1	2,2	6	13,2
Accessoires	0,06	6	0,36

Dans le cas des options, l'intégration de la pompe P2 doit être prise en compte. Le tableau 6 fait un récapitulatif des puissances évaluées par rapport aux HMT correspondant à chaque cas.

Tableau 6 : Puissance des pompes des options

	Option 1	Option 2	Option 3
Puissance Pompe P2 (kW)	1,1	1,5	5,5

5.2 Coûts des options

Les outils informatiques comme RETScreen [3] ont été utilisés pour évaluer certains paramètres solaires, notamment l'ensoleillement.

Le tableau 8 fait état coût énergétique de traitement d'eau par une unité de type Pall Aria AX2. Le gestionnaire de l'unité est considéré indépendant du gestionnaire de la centrale de production d'électricité.

Tableau 8 : Simulation de coût énergétique

PET m ³	CSp kWh/m ³	EC kWh	CEn Fcfa/kWh	Coût Total Fcfa
58,7	0,16	9 392	300	2 817 600

PET : Production Eau Traitée

CSp : Consommation spécifique

EC : Energie Consommé

CEn : Coût unitaire Energie

Lorsque le gestionnaire du dispositif gère lui-même son unité de production d'électricité, il doit s'occuper faire face aux coûts d'exploitation de la centrale, entre autre la maintenance, l'achat du carburant (gazole). Dans le tableau 9 est reporté un tel scénario en appliquant le facteur de 0,27 litre pour la production de 1 kWh par un groupe électrogène [4] et prix à la pompe de 580 Fcf/ litre de gazole.

PET m ³	CSp kWh/m ³	EC kWh	CC Litre	Coût Total Fcfa
58,7	0,16	9 392	2 536	1 470 880

CC : Consommation carburant (gazole)

L'analyse des deux tableaux montre qu'un gestionnaire d'un dispositif Pall Aria AX2 fonctionnant

au groupe électrogène doit faire face à une dépense journalière de plus de 1 000 000 Fcfa quelle que la variante d'alimentation choisie. En un mois de fonctionnement ce seront plus de 30 000 000 Fcfa dépensés, soit environ le coût d'acquisition d'un système solaire, toute option confondue.

CONCLUSION

Les premières expériences menées ont abouti à des résultats encourageants. L'étude a montré que le traitement de l'eau par système membranaire dans le contexte du Mali, pour ce qui concerne l'eau du fleuve Niger, est assez efficace. L'adaptabilité en milieu rural d'un système membranaire comme l'unité Pall Aria AX2 a également été démontrée. Pour cela il sera nécessaire d'apporter des modifications technologiques. L'option solaire du dispositif devra être plus avantageux que celle du groupe électrogène au gazole.

Ces résultats seront encore affinés dans la suite du projet.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Bruno Valfrey et Moussa Dao (Hydro conseil), « Etat des lieux et perspectives du secteur eau et assainissement », *Livre Bleu*, 2004
- [2] Direction Nationale de l'Hydraulique, UN Water/WWAP « Rapport national sur la mise en valeur des ressources en eau au Mali », 2006
- [3] RETScreen international « Logiciel d'analyse de projet d'énergies propres », 1997-2009
- [4] Mélyas KPLE « Impacts de la substitution d'une portion des hydrocarbures par du biocarburant dans les industries énergétique », *Projet de Fin d'Etude – LTA/ENI ABT*, 2009