



Projet INCO-WADEMED
Actes du Séminaire
Modernisation de l'Agriculture Irriguée
Rabat, du 19 au 23 avril 2004



Performances des stations de pompages en irrigation : application aux forages de petits périmètres irrigués de la plaine de Kairouan (Tunisie) et impact des dysfonctionnements sur le prix de l'eau

J.P. Luc¹, J. Tarhouni², R. Calvez¹, M. Liman³, C. Sablayrolles¹

¹ *Institut de Recherche pour le Développement, 5 impasse Chahrazed, BP 434, 1004 Tunis El Menzah IV
Tunisie*

² *Institut National Agronomique de Tunisie, 43 av Charles Nicolle, 1082 Tunis Marajène Tunisie*

³ *Commissariat régional au développement agricole de Kairouan, 7000 Kairouan, Tunisie*

E-mail : Jean-Paul.Luc@eieretsher.org

Résumé - Lorsqu'une élévation de l'eau de nappes ou une mise en pression est nécessaire au fonctionnement des systèmes modernes d'irrigation dans un périmètre, on utilise presque exclusivement des pompes centrifuges. La facture énergétique représente donc une part importante du coût de l'eau. Or, le rendement de ces machines est très dépendant de leurs conditions de fonctionnement et de leur usure et toute déviation par rapport aux conditions optimales entraîne des surcoûts énergétiques importants. L'objectif est de proposer une méthodologie pour évaluer les performances de ces équipements. Des indicateurs accessibles (énergie unitaire, énergie volumique absorbée réelle, volume spécifique pompé, coefficient de volume spécifique pompé) sont définis et des valeurs de référence fournies à partir des données des constructeurs. Les différentes méthodes d'estimation des volumes pompés sont critiquées. Les tests proposés sur les données volumiques indiquent le type de mesure réalisé pour les volumes pompés ainsi que leur dérive dans le temps (utilisation du débit nominal, compteur volumétrique). Pour les mesures d'énergie, l'absence de synchronisation entre les relevés temporels et énergétiques implique de cumuler les données pour obtenir la puissance consommée - lors de conditions stables de fonctionnement des pompes et si chaque pompe dispose d'un compteur d'énergie. Un ensemble de 18 stations de pompage sur forage alimentant des petits périmètres irrigués de la plaine de Kairouan en Tunisie centrale a été testé. La vétusté des équipements peut engendrer des rendements très faibles dont la conséquence principale est une augmentation des coûts de pompage (consommation énergétique et surcoût de maintenance). Ce diagnostic met donc bien en évidence l'intérêt d'un suivi précis de chaque ouvrage. Les divergences observées dans les ratios entre les volumes pompés et l'énergie consommée par rapport à ceux attendus en conditions optimales de fonctionnement conduisent au raisonnement suivant : si les données obtenues sont justes, le dysfonctionnement provient de l'inadaptation de l'équipement hydroélectrique au fonctionnement hydraulique de l'installation ; ou bien si les données sont fausses, ce dysfonctionnement provient des erreurs de gestion des pompistes et les quantités d'eau pompées sont alors sous-estimées. Dans les deux cas, un surcoût est payé par l'Administration. Dans la moitié des stations, les surcoûts d'énergie dépassent 20 % , voire 50 % pour près du quart d'entre elles.

Mots clés : énergie consommée, évaluation, forage, indicateur, maintenance, matériel, performance, station de pompage, Kairouan, Tunisie.

1 Introduction

Lorsqu'une élévation de l'eau (nappes) ou une mise en pression est nécessaire pour faire fonctionner des systèmes modernes d'irrigation, on utilise presque exclusivement des pompes centrifuges. Dans ce cas, une part importante du coût de l'eau est due à la facture énergétique, et parfois même, c'est la seule charge que les agriculteurs supportent directement. Or, il se trouve que ces machines ont des rendements très dépendants de leurs conditions de fonctionnement ou de leur usure. Toute déviation par rapport aux conditions de fonctionnement au rendement maximum entraîne des surcoûts énergétiques importants qui sont rarement estimés faute de mesures ou d'indicateurs fiables.

Après un bref rappel théorique sur les rendements des pompes centrifuges, on proposera la définition de plusieurs indicateurs facilement accessibles, ainsi que des valeurs de référence validées par des données du constructeur. Ensuite, on fera un inventaire et une critique des méthodes mises en œuvre pour estimer les volumes pompés. On appliquera ce modèle de diagnostic à un ensemble de 18 stations de pompages sur forage alimentant des petits périmètres irrigués de la plaine de Kairouan en Tunisie centrale. Enfin, on analysera l'impact des dysfonctionnements constatés sur le prix de l'eau. Tous ces travaux ont été conduits dans le cadre du projet franco-tunisien de recherche sur la gestion intégrée de l'eau, MERGUSIE.

2 Définitions d'indicateurs de performances

2.1 Rappels sur le fonctionnement des pompes centrifuges

La pompe centrifuge est une machine élévatoire qui, suivant le principe physique de l'action et de la réaction, adapte son débit en fonction de l'énergie totale qui lui est demandée. Le point de fonctionnement (couple : débit – hauteur manométrique) est donc fonction des caractéristiques hydrauliques du réseau qu'elle alimente.

L'énergie totale par unité de poids nécessaire pour faire circuler l'eau dans les conduites s'appelle la hauteur manométrique (HM, anciennement HMT : hauteur manométrique totale) et est égale à :

$$HM(m) = H_e + J_a + J_r + \frac{P_r - P_a}{\rho_w g} + \frac{\alpha (U_r^2 - U_a^2)}{2g} \quad (1)$$

- H_e : Hauteur d'élévation, en m ;
- J_a : pertes de charges dans les conduites d'aspiration, en m ;
- J_r : pertes de charges dans les conduites de refoulement, en m ;
- P_a : pression de l'eau sur la crépine d'aspiration, en Pascal ;
- P_r : pression de l'eau à l'extrémité de la conduite de refoulement, en Pascal ;
- U_a : vitesse de l'eau à l'entrée de la conduite, en m/s ;
- U_r : vitesse de l'eau à la sortie de la conduite, en m/s ;
- ρ_w : masse volumique de l'eau, en kg/m^3
- g : accélération de la pesanteur, en m/s^2
- α : coefficient de Coriolis

Chaque pompe est caractérisée par une relation entre le débit et la hauteur manométrique qu'elle est capable de fournir (exemple : figure 1).

A tout changement dans la demande d'énergie du réseau (par exemple la modification de l'ouverture d'une vanne ou de la longueur de conduite qui change les valeurs de J), la pompe réagit en

modifiant son point de fonctionnement. La connaissance à un instant donné du débit réellement pompé nécessite donc théoriquement une détermination précise de toutes les composantes de HM.

De plus, le rendement de la pompe, c'est-à-dire le rapport entre la puissance hydraulique injectée dans le réseau par la pompe (puissance hydraulique = débit x HM) et la puissance mécanique fournie à la pompe par le moteur est fonction du débit. Il passe par un maximum pour une valeur de débit donnée. Un exemple de courbe de rendement est fourni figure 1.

Il en résulte que la puissance mécanique demandée va être fonction du débit et donc de l'état hydraulique du réseau à un instant donné.

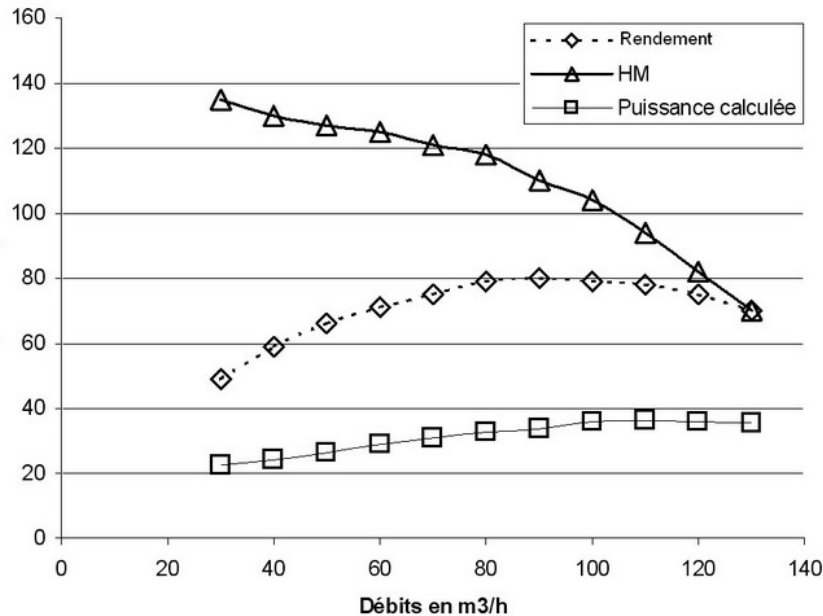


FIG. 1 – Exemple de relation entre le débit et la hauteur manométrique que la pompe est capable de fournir, cas de la pompe Guinard S8-S10-100-5[4]

Les courbes $HM = f(Q)$ et $Rend = f(Q)$ sont des données du constructeur obtenues par essai de la pompe au banc ($Q = \text{débit}$). Elles sont établies pour une vitesse de rotation de la pompe précise soit 1 450 tours/minute soit 2 900 tours/minute (vitesses des moteurs électriques asynchrones 2 ou 4 pôles alimentés en 50 hertz).

Pour les puissances, on utilise les formules suivantes :

$$P_h = Q \times HM \times \rho_w \times g \quad \text{ou} \quad P_h = K \times Q \times HM \quad (2)$$

Pour passer à la puissance nécessaire au groupe motopompe, il est nécessaire de prendre en compte les rendements de la transmission et du moteur suivant le schéma suivant :

$$P_g = P_h \times \frac{100}{R_p} \times \frac{100}{R_t} \times \frac{100}{R_m} \quad (3)$$

Où :

- P_g , puissance consommée par le groupe motopompe ;
- R_p , rendement pompe au point de fonctionnement, en % ;
- R_t , rendement transmission, en % ;

TAB. 1 – Variables et unités utilisées dans l'étude.

Variables	Unités ou valeurs			
Ph : Puissance hydraulique	W (watt)	W (watt)	kW (kilo-watt)	cv (chevaux)
$Q =$ Débit	m^3/s	l/s	m^3/s	m^3/h
$HM =$ hauteur manométrique	m	m	m	m
ρ_w : masse volumique de l'eau	kg/m^3	kg/dm^3	kg/dm^3	
g : accélération de la pesanteur	m/s^2	m/s^2	m/s^2	
K				$\frac{1}{274}$

– R_m , rendement moteur, en %.

2.2 Les indicateurs de performance

Les propositions suivantes visent à définir des indicateurs adaptés au diagnostic des stations de pompage ainsi qu'au suivi de leurs conditions de fonctionnement en routine.

Sur la base des équations (2) et (3) les indicateurs proposés sont : la puissance unitaire, la puissance débitmétrique absorbée réelle, la puissance manométrique absorbée réelle, l'énergie unitaire, l'énergie volumique absorbée réelle, l'énergie manométrique absorbée réelle, le volume spécifique pompé.

2.2.1 Puissance unitaire

Elle se définit comme la puissance nécessaire P_u pour élever $1 m^3$ d'eau par seconde de 1 mètre :

$$P_u = \frac{P_g}{HM \times Q} = \rho_w \times g \times \frac{100}{R_p} \times \frac{100}{R_t} \times \frac{100}{R_m} \quad (4)$$

Avec :

- P_u en $kW/m^3/s/m$;
- $\rho_w = 1 kg/dm^3$;
- R_p , R_t , R_m en % ;
- Q en m^3/s .

Cette formule ne dépend que des rendements. Des équipements ayant les mêmes rendements auront donc la même puissance unitaire.

2.2.2 Puissance débitmétrique absorbée réelle

De même, on peut définir la puissance volumique P_V comme la puissance nécessaire pour élever $1 m^3$ d'eau /s pour une hauteur manométrique donnée. P_V est calculée par l'équation :

$$P_V = \frac{P_g}{Q} = \rho_w \times g \times \frac{100}{R_p} \times \frac{100}{R_t} \times \frac{100}{R_m} \times HM \quad (5)$$

Avec :

- P_v en $kW/m^3/s$;
- HM en m .

On peut écrire aussi : $P_V = P_U \times HM$

2.2.3 Puissance manométrique absorbée réelle

La puissance manométrique absorbée réelle se définit comme la puissance volumique P_m , comme la puissance nécessaire pour élever un débit donné en m^3 d'eau /s de 1 m sur l'installation. Elle se calcule par l'équation :

$$Pm = \frac{P_g}{HM} = \rho_w \times g \times \frac{100}{R_p} \times \frac{100}{R_t} \times \frac{100}{R_m} \times Q \quad (6)$$

Avec :

- P_m en kW/m ;
- Q en m^3/s .

On peut écrire aussi : $Pm = P_U \times Q$

Ces trois indicateurs sont déterminés sur des valeurs instantanées, très difficiles à obtenir dans la réalité. Les appareils de mesure travaillent généralement par intégration d'un phénomène physique sur un pas de temps donné, puis fournissent ensuite une valeur de débit ou de puissance correspondant à une valeur moyenne calculée sur le temps d'intégration. Dans ces conditions, il est préférable de proposer des indicateurs qui seront calculés sur un pas de temps qui sera précisé, par exemple : l'heure, la journée, le mois, ou l'année. Les données de base seront alors les volumes pompés et l'énergie active consommée E_a pour un temps de pompage T .

En écrivant :

$E_a = P_g \times T$, $V = Q \times 3600 \times T$ et d'après (2) et (3), on a :

$$E_a = \frac{V}{3600} \times HM \times \rho_w \times g \times \frac{100}{R_p} \times \frac{100}{R_t} \times \frac{100}{R_m} \quad (7)$$

Où :

- E_a en kWh .

A partir de cette équation, on propose d'utiliser des notions classiques en énergétique (Grand dictionnaire terminologique SEMANTIX, 1996[12]) l'énergie unitaire et l'énergie volumique absorbée réelle.

2.2.4 Energie unitaire

Dans notre cas, l'énergie unitaire est définie comme l'énergie E_u nécessaire pour élever 1 m^3 d'eau de 1 m . Elle se calcule par l'équation :

$$E_u = \frac{1}{3600} \times \rho_w \times g \times \frac{100}{R_p} \times \frac{100}{R_t} \times \frac{100}{R_m} \quad (8)$$

Où :

- E_u en $kWh/m^3/m$;
- $\rho_w = 1 \text{ kg/dm}^3$;

– R_p, R_t, R_m en %.

Toute pompe fonctionnant hors de sa plage de fonctionnement optimum aura une consommation unitaire supérieure à ces valeurs et on définit donc ainsi un élément de diagnostic des conditions de fonctionnement de ces machines.

2.2.5 Energie volumique absorbée réelle

De même, on peut définir l'énergie volumique E_V comme l'énergie nécessaire pour élever $1 m^3$ d'eau sur une installation donnée. Elle se calcule par l'équation :

$$E_V = \frac{1}{3600} \times \rho_w \times g \times \frac{100}{R_p} \times \frac{100}{R_t} \times \frac{100}{R_m} \times HM \quad (9)$$

E_v en kWh/m^3 . On peut écrire aussi : $E_V = E_U \times HM$

Cet indicateur a une utilité réelle pour le suivi de fonctionnement d'un groupe motopompe. En effet, défini lors de la réception de l'installation, il peut être ensuite recalculé quotidiennement ou mensuellement et toute dérive par rapport à la valeur initiale traduit soit une augmentation de HM (abaissement de la nappe, modification des conditions aval), soit une modification des rendements du moteur, de la transmission ou de la pompe.

2.2.6 Energie manométrique absorbée réelle

De même, on peut définir l'énergie volumique E_m comme l'énergie nécessaire pour élever le volume pompé par l'installation de 1 m. Elle se calcule par l'équation :

$$E_m = \frac{1}{3600} \times \rho_w \times g \times \frac{100}{R_p} \times \frac{100}{R_t} \times \frac{100}{R_m} \times V \quad (10)$$

E_m en kWh/m , on peut écrire aussi : $E_m = E_U \times Q$

Cet indicateur peut permettre de comparer deux installations qui pompent le même volume sur une période donnée. Il donne des éléments de diagnostic pour évaluer des choix technologiques par exemple : choix entre un montage de une ou plusieurs pompes, incidence de la forme de la courbe rendement/débit.

2.2.7 Volume spécifique pompé

Toujours à partir de l'équation (7), on peut aussi définir le volume spécifique pompé V_S comme le volume pompé par unité d'énergie consommée :

$$V_S = \left(\frac{3600}{\rho_w \times g} \times \frac{R_p}{100} \times \frac{R_t}{100} \times \frac{R_m}{100} \right) \times \frac{1}{HM} \quad (11)$$

V_S en m^3/kWh

Ceci est une équation d'hyperbole dont le coefficient ne dépend que des rendements. Des équipements ayant les mêmes rendements seront donc caractérisés par un même coefficient de volume spécifique C_{VS} tel que :

$$C_{VS} = \frac{1}{E_U}$$

2.2.8 Conclusion

Les termes : E_u , C_{vs} définis ci-dessus ne dépendent que des rendements de la pompe, des transmissions et du moteur. Des équipements ayant les mêmes rendements auront une même consommation énergétique unitaire et un même coefficient de volume spécifique. Ces indicateurs sont utilisables pour le diagnostic d'une installation et en particulier la quantification de sa dérive par rapport à un état optimal.

E_v permet d'avoir accès directement au coût de l'énergie active nécessaire pour chaque m^3 d'eau pompé.

E_m a beaucoup d'intérêt pour comparer des variantes dans la phase de conception des stations de pompage puisqu'il intègre le choix de la pompe ou des pompes et les contraintes de gestion auxquelles est soumise l'installation.

Le coût énergétique pris comme référence pour ces indicateurs n'est pas le coût énergétique total d'1 m^3 car il ne prend pas en compte les coûts d'abonnement, de souscription de puissance, des différentes tarifications horaires pratiquées, de la facturation de l'énergie réactive et des dépassements de puissance. Le calcul du coût énergétique réel d'1 m^3 d'eau pompé se fait grâce à une fonction complexe :

Prix énergétique de $1m^3 = f(Ev, Tr, Ex)$.

où Tr est la tarification électrique pratiquée par le distributeur d'énergie et Ex les conditions d'exploitation des pompes.

2.3 Valeurs des indicateurs

2.3.1 Rendements des équipements

Rendements des pompes

Les valeurs de R_p maxima sont fonction de la taille des pompes et de leur débit nominal. Les données des documents du constructeur ont été analysées (figure 2).

Les pompes multicellulaires ont des rendements plus stables en fonction du débit, et au-dessus de 80 m^3/h , les rendements s'établissent au niveau de 80 %.

Pour les pompes monocellulaires, la dispersion des valeurs en dessous de 50 m^3/h trouve certainement son origine dans le fait que les constructeurs utilisent des roues de diamètre différent à l'intérieur d'un même carter pompe, ce qui n'est pas le cas des multicellulaires.

Rendement des transmissions

Pour ces organes, on trouve des valeurs standard suivantes selon le mode de transmission :

- directe, rendement = 100 ;
- par réducteur mécanique, rendement = 95
- par courroie, rendement = 90

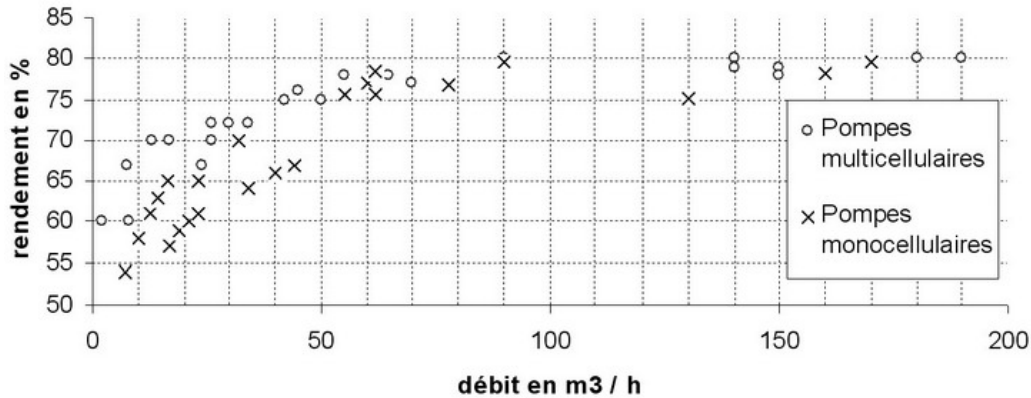


FIG. 2 – Rendement maximal des pompes en fonction de leur débit maximal, d'après les données du constructeur.

Rendement des moteurs électriques

Cette valeur est théoriquement variable avec la charge du moteur qui est le rapport entre la puissance qu'il fournit à un instant donné et sa puissance nominale (figure 3). Cette dernière est une valeur fournie par le constructeur sur laquelle il s'engage pour un régime continu du moteur.

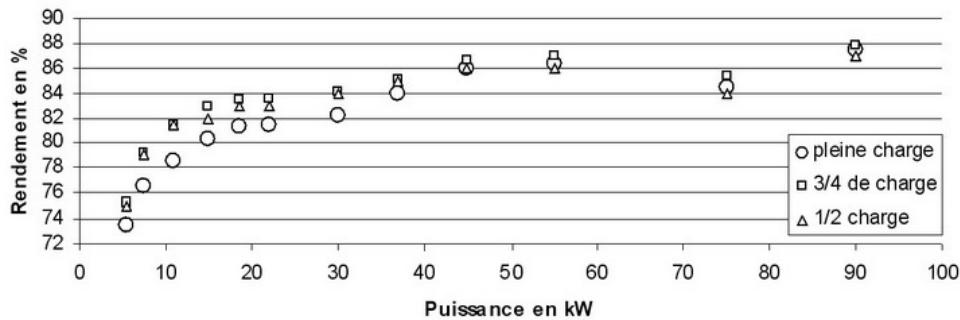


FIG. 3 – Evolution de moteurs électriques en fonction de leur puissance nominale et de la charge (source : catalogue Pompes Guinard-KSB[4]).

Ce graphique montre que le rendement des moteurs électriques est relativement stable, autour de 85 %, dès que les puissances dépassent 40 kW.

2.3.2 Valeurs théoriques de l'énergie unitaire et du coefficient de volume spécifique des groupes motopompes

Sur la base des données précédentes, on dispose donc des données pour les électropompes à entraînement direct fonctionnant à leur point de rendement optimum en fonction de classes de débit (tableau 2).

2.3.3 Validation à partir des données constructeurs

Afin de valider ces données, une analyse des couples " débit-hauteur manométrique et puissance à rendement maximum " d'un ensemble de 115 pompes de débits supérieurs à 80 m³ / h de trois

constructeurs différents a été réalisée afin de tracer la relation : Energie volumique absorbée réelle fonction de la hauteur manométrique.

TAB. 2 – Energie unitaire et coefficient de volume spécifique en fonction du débit nominal des électropompes à entraînement direct.

Débit nominal	Energie unitaire E_u (kWh/m ³ /m)	coefficient de volume spécifique (C_{VS})
de 0 à 10 m ³ / h	0,0063	158,5
de 10 à 40 m ³ /h	0,0049	205,5
de 40 à 80 m ³ /h	0,0044	228,4
de 80 à 200 m ³ /h	0,0040	249,5

Avec : $R_t = 100$ % et des associations moteurs-pompes classiquement réalisées.

Le graphique suivant confirme la relation linéaire définie théoriquement ainsi que la valeur de l'énergie unitaire du tableau précédent.

On a donc pu définir des indicateurs qui ont une valeur standard et donc utilisables pour les diagnostics des stations de pompage.

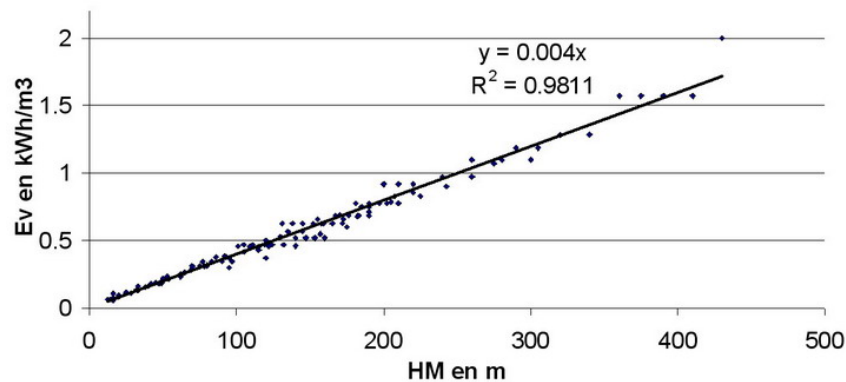


FIG. 4 – Relation entre l'énergie volumique absorbée réelle en fonction de la hauteur manométrique (source : données constructeurs).

3 Les données de volumes pompés sur les périmètres irrigués

L'estimation des volumes pompés sur un périmètre irrigué est une donnée qui est recherchée pour répondre à deux objectifs différents : soit optimiser l'exploitation de la station de pompage, soit servir de base à un système de refacturation des coûts aux agriculteurs. Dans le premier cas, une mesure effectuée avec un appareil adapté et fiable est obligatoire, dans le second cas, l'objectif étant plus celui de l'équité sociale, les exploitants peuvent utiliser des estimateurs différents du volume réel distribué : superficie irrigable ou irriguée, forfaits culturaux. Les chiffres de volumes annoncés sont alors difficilement utilisables pour les calculs de rendements.

3.1 Les méthodes d'estimation et leur impact

Dans les cas d'absence ou de dysfonctionnement du compteur volumétrique, l'exploitant du périmètre irrigué a recours à une estimation des volumes généralement basée sur deux données : le débit nominal des pompes et le temps de marche.

3.1.1 Erreurs potentielles sur les débits nominaux

Le débit nominal est une donnée soit calculée par l'installateur soit mesurée à la mise en service de l'installation dans des conditions de fonctionnement données. Toute déviation par rapport à ces conditions initiales va entraîner une évolution de la valeur initiale.

La première source d'erreur a pour origine la forme de la courbe caractéristique de la pompe.

L'exemple choisi (figure 5) montre bien que, pour deux pompes qui fournissent chacune un débit de $90 \text{ m}^3/\text{h}$ pour une hauteur manométrique de 45 m , une variation de HM de $\pm 5 \%$ entraîne une variation de débit de $\pm 2,5 \%$ pour la pompe W8x100 et de $\pm 10 \%$ pour la pompe 6x20 soit 4 fois plus. Cet aspect est théoriquement pris en compte par le concepteur du réseau mais ne peut être ignoré pour la connaissance des volumes pompés se référant au débit nominal de l'installation.

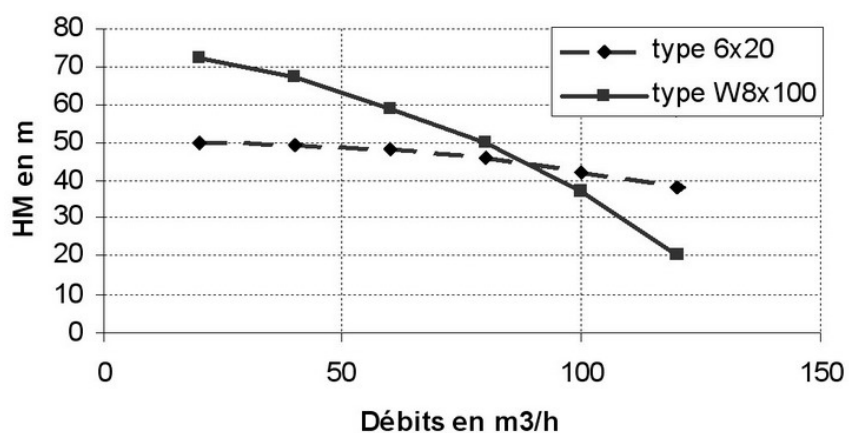


FIG. 5 – Comparaison des courbes caractéristiques de pompes centrifuges (source : catalogue Pompes Guinard-KSB[4]).

La seconde source d'erreur peut venir de l'application de coefficients arbitraires pour prendre en compte l'état des réseaux et ne pas faire supporter aux agriculteurs, par la facturation, les mauvais rendements de réseaux (tableau 3).

Cas des réseaux gravitaires

Dans ce type de réseau, les pompes refoulent généralement dans un bassin à surface libre en tête de canal dont le niveau varie très peu (souvent $< 1\text{m}$). Dans ce cas, les conditions "aval" de la pompe peuvent être considérées comme stables et indépendantes des débits appelés par le réseau. Seules les conditions amont sont variables. Il s'agit alors de variations lentes qui peuvent être prise en compte dans le calcul et dans ce cas, on peut déduire que l'utilisation des débits nominaux est acceptable.

TAB. 3 – Coefficients de minoration appliqués par station à l'ORMVA du Loukkos (Maroc) (Source : Etude d'amélioration de la gestion, de l'exploitation et de la maintenance du système d'irrigation de l'ORMVA du Loukkos, Maroc, 1998[5]).

Station	utilisé
SP A	0,85
SP B1	0,94
SP B2	0,94
SP C	0,97
SP D1	0,98
SP D2	0,98
SP E1	0,93
SP E2	0,79

Cas des réseaux sous pression

Dans ces systèmes, la demande en eau influe directement sur la hauteur manométrique en tête de réseau et donc sur la pompe. Le concepteur a généralement pris en compte ces variations dans le dimensionnement de l'installation ainsi que dans le mode de régulation des pompes retenu. En revanche, un mauvais état des réseaux et de leurs équipements terminaux (bornes d'irrigation) peut conduire le pompiste à dériver des consignes pour satisfaire les usagers, comme cela est illustré par l'exemple issu de l'étude de l'amélioration de la gestion, de l'exploitation et de la maintenance du système d'irrigation de l'ORMVA du Loukkos, réalisée au Maroc en 1998. Lorsque la demande dépasse l'offre nominale des groupes, l'exploitant pratique une sorte de régulation par l'amont en limitant le nombre de groupes en fonctionnement. Les stations marchent en mode manuel à une hauteur manométrique plus faible et donc à un débit unitaire des groupes plus élevé (tableau 4).

TAB. 4 – Exemple de comparaison du débit de groupe donné par le constructeur, du débit de groupe mesuré et du débit de référence.

Débit de groupe " constructeur "		Débit de groupe mesuré		Débit référence
(l/s)		(l/s)		(l/s)
Nominal	Maximum autorisé	Minimum	Maximum	Office
380	475	335	430	310

La comparaison des volumes pompés sur 10 jours d'essais donne :

- le volume calculé par méthode de l'ORMVA = $307\,067\,m^3$
- le volume calculé à partir des valeurs de débit = $376\,394\,m^3$

Le calcul de l'office opère donc une sous-évaluation de 23 %.

3.1.2 Erreurs potentielles sur le temps de marche des pompes

Deux méthodes sont utilisées pour accéder au temps de marche des pompes.

La première consiste à utiliser des compteurs horaires. Lorsqu'ils existent et fonctionnent leur information n'est pas remise en cause.

La seconde méthode est un enregistrement manuel des heures de démarrage et d'arrêt des groupes. Dans ce cas l'imprécision des résultats est permanente et son niveau dépend de la précision sur la donnée de l'heure qui est demandée à la personne chargée d'effectuer les relevés ainsi que du temps de marche journalier. A titre d'exemple, pour une imprécision de ± 10 minutes sur les heures de démarrage et d'arrêt, avec un temps de marche continue de 12 h, l'erreur totale sur le temps est de 5,5 %, elle passe à 11 % si le temps de marche est divisé en deux postes de 6 h.

4 Application aux forages de petits périmètres irrigués de la plaine de Kairouan

Les périmètres retenus font partie de la zone d'étude du projet franco-tunisien, Mergusie, qui porte sur la gestion intégrée de l'eau dans le bassin du Merguellil dont le but est de mettre au point des outils, destinés aux services de l'Etat, qui soient utiles à la conduite du projet de gestion durable des ressources en eau.

La surface des périmètres varie de 30 à 200 ha, ils sont alimentés par des forages prélevant l'eau dans la nappe de Kairouan à des profondeurs de 30 à 75 m.

Pour un ensemble de 18 forages, on dispose des caractéristiques physiques des ouvrages et de 5 années de données mensuelles de la consommation électrique, du volume pompé et du temps de marche des pompes.

4.1 Cohérence des données

4.1.1 Données de volumes

Le premier test, pour vérifier la cohérence des données de volume, consiste à étudier l'évolution mensuelle des débits pompés en divisant les volumes par les temps de marche.

Les quatre exemples choisis illustrent les types de résultats rencontrés sur le terrain.

Pour les stations Jefna A et Mjabra, en l'absence de compteur, les volumes pompés sont calculés en multipliant les heures de pompages par une valeur constante et égale au débit nominal de l'installation. Le changement de pompe en début de campagne 1995 à Mjabra se traduit par un changement de débit nominal. Pour cette station, des mesures périodiques de contrôle permettraient de valider ce type de calcul, en effet, la mesure effectuée à Mjabra en juillet 2001 donne un débit réel de $115 \text{ m}^3/\text{h}$, alors que le débit retenu pour le calcul est de $144 \text{ m}^3/\text{h}$, soit une surestimation du volume pompé de 20 %.

Pour les stations Karma 1 et SABS2, équipées de compteur, on constate une cohérence des données (légères variations autour de la moyenne) dans les premières années de mesure, on pourrait donc conclure au fonctionnement correct des installations. En revanche, pour SABS2, la précision des données se dégrade très fortement pendant une certaine période avec des écarts de débits de ± 30 % par rapport au débit moyen. En fin de période, les chiffres sont plus cohérents et liés à l'installation d'un compteur neuf. A la station de Karma 1, le compteur ne fonctionne plus et le débit actuel mesuré est de $72 \text{ m}^3/\text{h}$ alors que le débit nominal officiel est de $108 \text{ m}^3/\text{h}$. Il y a manifestement erreurs sur les débits et sur les temps.

Le second test consiste à analyser l'évolution des volumes et des heures cumulées et de comparer la pente de la droite obtenue avec le débit nominal de l'installation. Ce test a une signification puisque toutes les stations fonctionnent à des niveaux amont et aval constants.

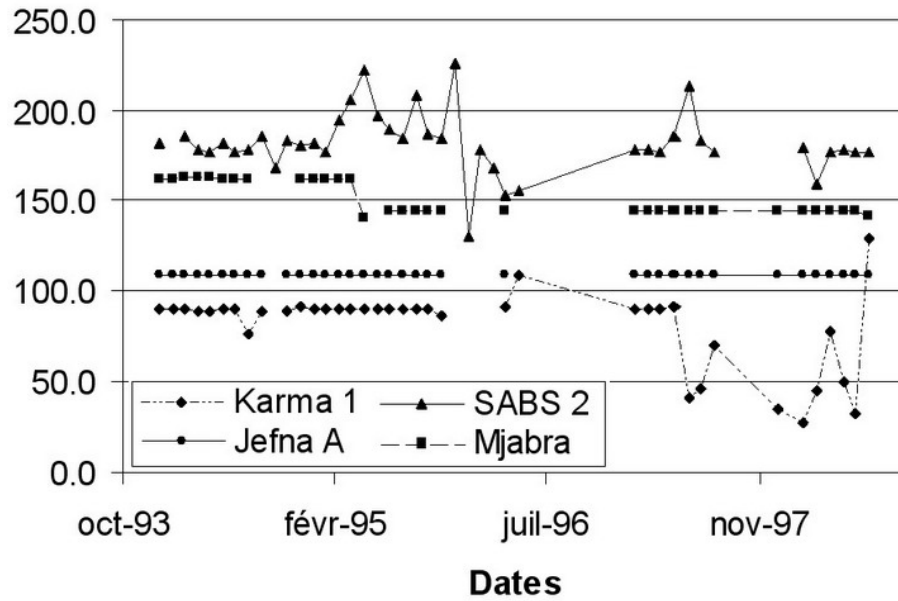


FIG. 6 – Evolution des débits moyens mensuels (d’octobre 1993 à novembre 1997) de 4 stations (Karma1, Jefna A, SABS2, Mjabra).

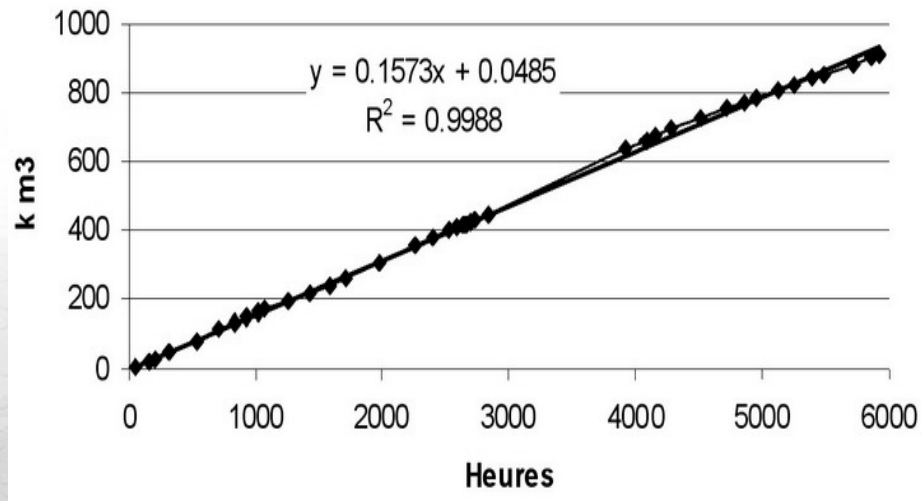


FIG. 7 – Relation entre les volumes et les heures de pompage cumulés, à la station de Chébika-Est.

Les calculs effectués pour l'ensemble des stations montrent que, sauf pour la station de Chébika-Est, le débit nominal est toujours supérieur au débit calculé ou mesuré avec la répartition suivante :

- 8 stations montrent un écart de débit mesuré/débit nominal $< 5 \%$;
- 9 stations montrent un écart de débit mesuré/débit nominal $< 5 \%$ et $< 20 \%$;
- 1 station montre un écart de débit mesuré/débit nominal $> 20 \%$.

4.1.2 Données d'énergie

Dans les stations étudiées, il n'y a qu'une seule pompe qui fonctionne dans des conditions constantes, le même calcul que précédemment appliqué à la consommation d'énergie active devrait conduire à une valeur de puissance constante.

On observe des variations non négligeables qui s'expliquent par le décalage systématique entre les jours et heures de relevés (figure 8). En effet, les relevés de compteur électrique sont effectués régulièrement tous les mois par un agent de la société distributrice d'énergie électrique, mais aussi bien le 2 ou le 5 du début du mois, comme le 30 du mois précédent. En revanche, les relevés des compteurs horaire et volumétrique sont effectués par le pompiste le 1^{er} de chaque mois. S'il n'y a pas de compteur, le pompiste note chaque jour le nombre d'heures de pompage et en fait la somme à la fin du mois. Il n'y a donc pas tout à fait correspondance entre les deux dates.

La solution retenue a été de travailler avec des données cumulées.

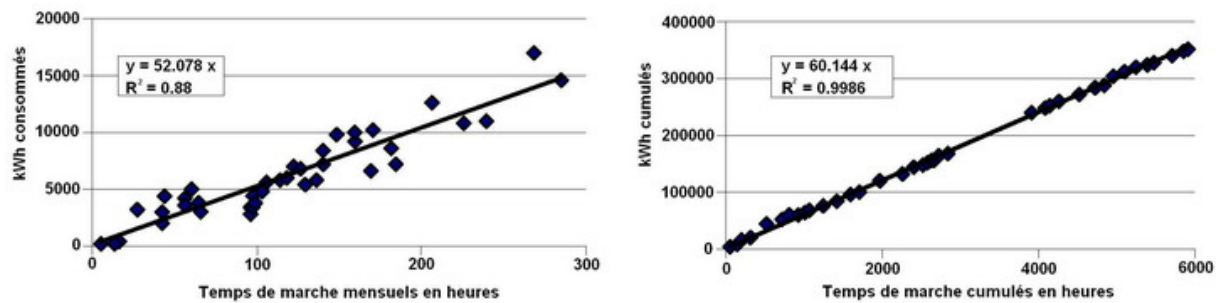


FIG. 8 – Données d'énergie active mensuelles et cumulées de la station de Chébika-Est.

4.2 Détermination de la hauteur manométrique par station

La hauteur manométrique par station a été obtenue par la formule suivante (toutes les pompes étant des pompes immergées) :

$$HM = NS + R + P/\rho_w g + J_r \quad (12)$$

Où :

- NS : niveau statique de la nappe, en m ;
- R : rabattement au débit d'exploitation, en m ;
- P : pression en sortie de station en bar ;
- ρ_w en kg/dm^3 .
- J_r : pertes de charges dans la conduite entre la pompe et la sortie de station, en m .

Faute de mesure permanente de niveau statique, on a utilisé un modèle numérique de terrain couplé à un modèle de nappe fonctionnant à partir des données piézométriques de la zone d'étude (Calvez, 1999[2]).

Pour le rabattement, on a considéré que les caractéristiques de l'aquifère étaient identiques sur toute la profondeur du forage et donc que le rabattement était indépendant du niveau statique. Les valeurs retenues sont celles mesurées lors de la mise en exploitation du forage.

La pression en sortie de station a été évaluée à 0,3 bar dans le cas de réseau d'irrigation gravitaire et 3 bars pour les réseaux sous pression.

Les pertes de charges dans la conduite entre la pompe et la sortie de station ont été calculées en tenant compte de la longueur de la conduite de refoulement, de son diamètre et du débit moyen par la formule de Moody et un coefficient $\lambda = 0,032$ pour tenir compte du vieillissement des conduites.

Les valeurs obtenues évoluant de 44 à 114 m, on a retenu la valeur calculée en 1998 car la baisse de la nappe (50 cm/an pendant la période) introduit une erreur négligeable.

4.3 Détermination des énergies unitaires et des rendements actuels

Les données obtenues précédemment ont permis de calculer les énergies unitaires par forage ainsi que les rendements des pompes sur la base d'un rendement moteur de 85 % et de celui de la transmission de 100 % puisque que l'accouplement est direct.

TAB. 5 – Données pour les différents forages de la zone : énergie unitaire et rendement de la pompe.

Forage	Energie unitaire en kWh/m ³ /m	Rendement de la pompe en %
Chebika-Est	0,0082	39
Chebika-Ouest	0,0049	66
Sidi Ali Ben Salem I	0,0109	29
Sidi Ali Ben Salem II	0,0056	57
Sidi Ali Ben Salem III	0,0059	55
El Oussif II	0,0075	43
Bou Ali	0,0082	39
El Bordj	0,0096	34
Karma I	0,0064	50
Karma II	0,0080	40
Draa Affène	0,0068	48
Jefna A	0,0042	76
Jefna B	0,0036	90
Jefna C	0,0041	79
Jefna E Ter	0,0052	61
Jefna F	0,0051	63
Agifre Bis	0,0045	49
Jabra Bis	0,0048	67

Les données utilisées conduisent à des valeurs de rendement de la pompe très inférieures (sauf pour Jefna A, Jefna B, Jefna C) à celle attendue pour ce type d'installation (80 %).

Certaines valeurs très basses (Chébika-Est, El Oussif et Bou Ali) peuvent être expliquées par la vétusté des équipements, qui ont été remplacés en 2000 et en 2001 et pour lesquels les valeurs récentes ne sont pas disponibles.

Seule une expertise ouvrage par ouvrage peut donner une réponse et la démarche entreprise met bien en évidence l'intérêt que peut avoir un suivi précis de chaque ouvrage.

4.4 Impact des faibles rendements sur les coûts de pompage

La conséquence principale des faibles rendements est une augmentation des coûts de pompage, à travers deux termes, la consommation énergétique et les surcoûts de maintenance liés aux mauvaises conditions de fonctionnement des installations. Les données disponibles renseignent directement sur la surconsommation énergétique, le second terme est, dans un premier temps, difficile à évaluer.

Sur la base d'un prix moyen de 40 millimes le kWh (1 millime = 1DT/1000 ; 1DT = 0,77 euro ; la tarification électrique en Tunisie ne prenant pas en compte la puissance souscrite), le coût énergétique sur la zone varie entre 10 et 26 millimes/ m^3 d'eau pompé.

Si chaque station était à son optimum de rendement, ce coût serait compris entre 7 et 14 millimes/ m^3 . Les diminutions de coûts seraient en moyenne de 33 % et 22 % des stations pourraient voir leur dépense énergétique divisée par deux avec un changement de pompe (figure 9).

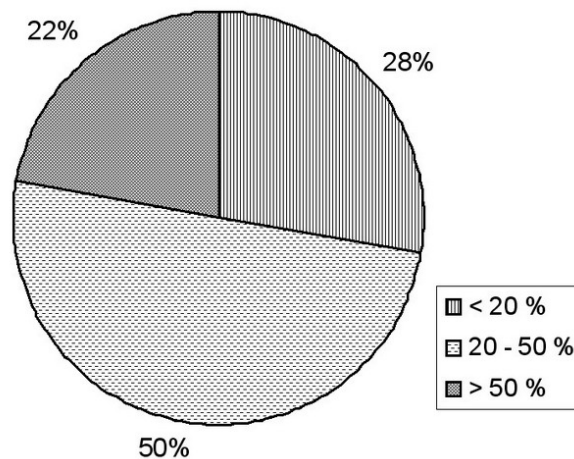


FIG. 9 – Répartition des gains de coûts de pompage potentiels selon les stations.

5 Conclusion

Des indicateurs présentés sont utilisables pour le diagnostic énergétique des stations de pompage : énergie unitaire, énergie volumique absorbée réelle, volume spécifique pompé, coefficient de volume spécifique pompé.

Cette étude a permis de préciser leur signification et de fournir des valeurs de références sur la base des données des constructeurs.

Parallèlement, un bilan des données nécessaires à leur mise en œuvre a été effectué et conduit à des propositions de traitements et d'analyse permettant de valider des données de terrain. Les tests proposés sur les données mettent en évidence le type de mesure réalisé pour les volumes pompés (utilisation du débit nominal, compteur volumétrique) ainsi que leur dérive dans le temps.

Pour les mesures d'énergie, l'absence de synchronisation entre les relevés oblige souvent à exploiter les données cumulées pour connaître la puissance consommée. Cette solution n'est applicable que lorsque les conditions de fonctionnement des pompes sont stables et qu'à chaque pompe est associé un compteur d'énergie.

Appliqué à une série de données collectées sur des périmètres irrigués de la plaine de Kairouan, l'emploi de ces indicateurs permet de constater que les ratios " volumes pompés/énergie consommée " divergent très souvent par rapport à ceux qui seraient obtenus en conditions optimales de fonctionnement.

Ce constat conduit à poser deux questions :

- soit les données en notre possession sont justes, auquel cas, le dysfonctionnement est dû à des équipements hydroélectriques mal adaptés au fonctionnement hydraulique de l'installation ;
- soit les données sont fausses, auquel cas ce dysfonctionnement provient des erreurs de gestion au niveau des pompistes. Les quantités d'eau pompées seraient sous-estimées. La cellule AIC ou le CRDA perçoivent donc moins que ce qu'ils devraient.

Dans les deux cas, ces dysfonctionnements entraînent un surcoût payé par la cellule AIC ou le CRDA. Dans la moitié des stations, les surcoûts d'énergie dépassent 20 % et même 50 % pour 22 % d'entre elles.

Références

- [1] AGTHM , 2000, Les stations de pompage d'eau, Editions Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- [2] Calvez R., 1999. Homogénéisation et analyse des signaux piézométriques de la nappe de Kairouan en aval des barrages El Haouareb et Sidi Saad, note technique MERGUSIE, CRDA de Kairouan, Tunisie.
- [3] Calvez R., Luc J.P., Lebreton L., 2000. Estimation des usages de l'eau à partir de la consommation électrique et de la profondeur de la nappe. In : Séminaire international " Hydrologie des régions méditerranéennes ", à Montpellier, 11 au 13 octobre 2000.
- [4] Pompes Guinard-KSB, 1989. Catalogue pompes irrigations.
- [5] Ministère de l'Agriculture, du développement rural et des pêches maritimes, Office Régional de Mise en Valeur agricole du Loukkos, GAUFF, ADI, GERSAR/BRL, 1998. Deuxième Projet d'amélioration de la grande irrigation au Maroc : Etude d'amélioration de la gestion, exploitation et maintenance du système d'irrigation, Phase I, étude diagnostic. Ksar El Kébir, Maroc, juillet 1998.
- [6] Ministère de l'Agriculture, du développement rural et des pêches maritimes, Office Régional de Mise en Valeur agricole du Loukkos, GAUFF, ADI, GERSAR/BRL, 1999. Deuxième Projet d'amélioration de la grande irrigation au Maroc : Etude de l'amélioration de la gestion, de l'exploitation et de la maintenance du système d'irrigation, Phase II, Propositions de variantes. Ksar El Kébir, Maroc, Janvier 1999.
- [7] Hanson B., Orloff S., Weigand C., 1996. Performance of electric irrigation pumping plants using variable frequency drives, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol 122, n° 3.
- [8] Hitz H.U., Pelli T., 2000. Energy indicators and savings in water supply. Journal of the American Water Works Association, vol 92 , n°6, p 55-62.
- [9] Lebreton L., Calvez R., Le Goulven P., Luc J.P., 2000. MERGUSIG : Un Système d'Information Géographique comme aide à la gestion intégrée de l'eau en Tunisie Centrale. In : Séminaire international " Hydrologie des régions méditerranéennes ", à Montpellier, 11 au 13 octobre 2000.
- [10] Programme National Mobilisateur : MERGUSIE phase 1 : Gestion intégrée de l'eau dans le Merguellil, Evaluation SERST-IRD, rapport de synthèse, Tunisie, novembre 2000.
- [11] Sablayrolles C., 2001, Evaluation des performances des infrastructures d'exhaure. PFE INP, ENSHMG, Grenoble, France.

[12] Semantix, 1996, Grand dictionnaire terminologique.