

OPTIMISATION DU RÉGIME DE REFOULEMENT DANS LES SYSTÈMES D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE (AEP) ÉQUIPÉS DE CAPACITÉ DE RÉGULATION

Taofic BACHAROU* et Moudachirou ADJIBOICHA

*Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi,
Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquée (LEMA)
01 BP 2009 Cotonou, Bénin*

* Correspondance, e-mail : btaofic@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Cette étude présente le développement d'une nouvelle approche de calcul des réseaux pour l'optimisation des débits de refoulement sur les systèmes d'alimentation en eau potable. L'objectif est de réduire les dépenses d'énergie, et par conséquent les coûts d'exploitation. En effet, les méthodes classiques de calcul des réseaux de distribution recommandent que le régime de pompage soit fixé, et sur cette base, on détermine en fonction de la consommation horaire, les volumes des capacités de régulation. Cependant, le coût de l'énergie électrique dépendant essentiellement de la variation du pompage, il convient de changer cette approche de résolution du problème et ne plus fixer le régime de pompage, mais tendre vers une détermination de régime permettant de minimiser les coûts d'investissement et d'exploitation des ouvrages du système d'alimentation en eau potable. Un modèle est développé pour établir la corrélation entre le pompage, la consommation et les facteurs économiques en vue de trouver le coefficient de variation optimale de pompage.

Mots-clés : *réseau de distribution, optimisation, coût, énergie, consommation, régulation, coefficient de variation de pompage.*

ABSTRACT

Optimization of the discharge regime in the water supply systems (AEP) equipped with regulatory capacity

This survey presents the development of a new approach of calculation of the systems for the optimization of the repression debits on the systems of food in drinking water.

Taofic BACHAROU et Moudachirou ADJIBOICHA

The objective is to reduce the expenses of energy, and therefore the costs of investment and exploitation. Indeed, the classic methods of calculation of the distribution systems recommend that the régime of pumping is fixed, and on this basis, one determines according to the hourly consumption, the volumes of the regulation capacities. However, the cost of the electric energy essentially depending on the variation of the pumping, it agrees to change this approach of resolution of the problem and more to fix the regime of pumping, but to stretch toward a determination of regimes (and consistently of regulation capacities) permitting to minimize the costs of investment and exploitation of the works of the food system in drinking water. A model is developed to establish the interrelationship between the pumping, the consumption and the economic factors in order to find the coefficient of optimal variation of pumping.

Keywords : *network of distribution, optimization, cost, energy, consumption, regulation, coefficient of pumping variation.*

I - INTRODUCTION

La demande en eau dans un système d'alimentation en eau potable varie selon l'année, la saison, la journée et même d'une heure à l'autre au cours de la même journée. Cette demande dépend étroitement du niveau de vie qui évolue sans cesse, des conditions météorologiques variables avec la saison et même avec la journée, et de l'heure de la journée à laquelle elle se manifeste [1- 4]. Ainsi la consommation en eau potable des populations varie de façon importante ; elle est très influencée par le type du dispositif d'alimentation en eau, la disponibilité de la pression, les habitudes culturelles, les normes et les modes de vie, l'utilisation qui est faite de l'eau, ainsi que son coût et sa qualité [5, 6]. En Afrique et dans la plupart des pays du monde, les besoins en eau des populations sont très variés et augmentent constamment dans le temps à l'échelle des villes en développement [2, 7].

Se fondant sur cette tendance, les études prospectives des années sur les besoins en eau ont le plus souvent émis l'hypothèse d'une expansion continue de la demande. L'apparition d'une demande au niveau d'un réservoir est le résultat de foisonnement de la demande, ainsi que de la structure et de l'état du réseau [8-10]. En fonction des demandes horaires exprimées par les utilisateurs, les réservoirs remplissent une fonction de tampon entre le réseau d'adduction et celui de distribution, par la variation du stockage. La fonction de régulation des réservoirs d'eau potable a pour objectif de stabiliser les régimes de fonctionnement du système (pompage et consommation) et de réduire les débits maximums dus au foisonnement de la demande [11-13].

L'optimisation de la régulation vise la réduction des capacités des équipements (stations de pompage, conduites de transfert), donc les investissements et les frais de gestion du système hydraulique. Vu les intérêts hydrauliques et économiques de la régulation sur les réseaux hydrauliques, le présent travail a pour objectif d'établir un outil d'optimisation du pompage en fonction des paramètres hydrauliques et économiques en vue de réduire les investissements de gestion.

II - MÉTHODOLOGIE

Considérons la possibilité de déterminer le régime de refoulement optimale des stations de pompage en utilisant la description analytique [7] du régime de consommation sur l'exemple d'un système d'alimentation en eau équipé de réservoir à la fin du réseau. Le coût total de construction et d'exploitation du système d'Alimentation en Eau Potable (AEP) est exprimé par la **Relation** suivante :

$$C_T = C_P + C_{EXP} + C_{REP} + C_{CH} + C_{RES} \quad (1)$$

Où, C_P - dépenses annuelles d'investissement de la station de pompage pendant l'année en cours ; C_{EXP} - Coût annuel de l'énergie électrique, utilisée pour fournir de l'eau aux consommateurs ; C_{REP} - Coût de construction des réservoirs d'eau propre à la station de traitement ou au champ de forage ; C_{CH} - Coût de construction du château d'eau ; C_{RES} : Coût de construction du réseau d'AEP.

Sachant que la somme $C_{P,EXP}$ des coûts de construction de la station de pompage et des frais d'énergie électrique [10] s'exprime comme suit :

$$C_{P,EXP} = C_P + C_{EXP} \quad (2)$$

Où C_P le coût d'installation de la station de pompage est défini par la **Relation**

$$C_P = K_P \cdot P \cdot A_m \quad (3)$$

Avec K_P : coût d'un KW installé à la puissance réelle, CFA/Kw ; P : puissance réelle de fonctionnement, KW; A_m : l'annuité d'amortissement ($A_m = 0,0879501$ pour $n = 30$ ans).

C_{EXP} , le coût d'énergie électrique de la station de pompage s'exprime par la **Relation**

$$C_{EXP} = K_{EXP} \cdot P \cdot t \quad (4)$$

K_{EXP} : coût d'un KWh d'énergie électrique, CFA/Kw; t : temps de fonctionnement annuel, $t = T_1 \cdot 365 \cdot j$; T_1 : le nombre d'heures de fonctionnement par jour, h/j.

La puissance réelle P est définie par la **Relation** :

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot QH_{MT}}{1000 \eta} \quad (5)$$

Où η : le rendement de pompage ; ρ : la masse volumique de l'eau, kg/m³ ; g : accélération de la pesanteur, m/s² ; H_{MT} : la hauteur manométrique totale, m ; Q : le débit horaire, m³/h.

En se référant aux **Equations (2), (3), (4) et (5)** on a :

$$C_{P.EXP} = \frac{\rho \cdot g \cdot QH_{MT}}{1000 \eta} (K_p A_m + K_{EXP} \cdot t) \quad (6)$$

Or

$$Q \cdot H_{MT} = \frac{\sum_1^n Q_i \cdot H_{MTi}}{n} \quad (7)$$

Où Q_i : le débit d'eau horaire, m³/h ; H_{MTi} : la hauteur manométrique totale de la station de pompage à chaque $i^{\text{ème}}$ heure de son fonctionnement, m ; n : le nombre d'heures de fonctionnement de la station de pompage par an.

En insérant (7) dans (6) on a :

$$C_{P.EXP} = \frac{\rho \cdot g \cdot (K_p \cdot A_m + K_{EXP} \cdot t)}{1000 \eta} \cdot \frac{\sum_1^n Q_i \cdot H_{MTi}}{n} = R \left(\frac{\sum_1^n Q_i \cdot H_{MTi}}{n} \right) \quad (8)$$

Avec

$$R = \frac{\rho \cdot g \cdot (K_p \cdot A_m + K_{EXP} \cdot t)}{1000 \eta} \quad (9)$$

Le coût de construction des réservoirs d'eau propre C_{REP} , on a :

$$C_{REP} = \theta \cdot A_{REP} \cdot V_{REP} \quad (10)$$

Où, θ : le coût spécifique de construction d'un m³ de réservoir d'eau propre, CFA/ m³ ; A_{REP} : l'annuité d'amortissement ; V_{REP} : le volume de régulation des réservoirs d'eau propre; en m³.

Dans le processus d'optimisation on peut considérer seulement les volumes de régulation puisque les volumes de réserves de dépannage et de lutte contre les incendies sont définis conformément aux prescriptions des normes en vigueur. Les valeurs de ces volumes ne dépendant pas des régimes de pompage, sont constantes et n'influencent pas l'obtention de la solution optimale. Le coût des investissements liés à la construction du château d'eau C_{CH} on a :

$$C_{CH} = \delta . A_{CH} . H_{CH} . V_{CH} \quad (11)$$

Où δ : le coût spécifique de construction de château d'eau, CFA/m³ sur un mètre de hauteur de sa colonne ; A_{CH} : l'annuité d'amortissement de château ; H_{CH} : la hauteur du château d'eau, m ; V_{CH} : le volume de régulation de la cuve du château d'eau, m³.

Compte tenu du fait que le volume total de régulation V_T du système d'AEP (réservoir d'eau propre et autres réservoirs du réseau) dépend essentiellement du régime de consommation et du régime de travail des ouvrages de tête, la valeur V_T paraît être invariable dans le processus d'optimisation. Quel que soit le régime de pompage, refoulant l'eau dans le réseau, la répartition du volume de régulation s'effectuera seulement entre les réservoirs d'eau propre et les autres réservoirs du réseau.

$$V_T = V_{REP} + V_{CH} = const \quad (12)$$

Ce volume V_T se définit dans les conditions de régime permanent des ouvrages de tête du système puisque ce régime paraît être le plus confortable pour leur fonctionnement. En tenant compte des **Formules (10) et (12)**, on obtient :

$$C_{REP} = \theta . A_{REP} . (V_T - V_{CH}) \quad (13)$$

A cet effet, les dépenses liées aux ouvrages de régulation C_{REG} dans le système d'AEP sont :

$$C_{REG} = C_{REP} + C_{CH} = \theta . A_{REP} . (V_T - V_{CH}) + \delta . A_{CH} . H_{CH} . V_{CH}$$

$$C_{REG} = \theta . A_{REP} . V_T + V_{CH} . (\delta . A_{CH} . H_{CH} - \theta A_{REP}) \quad (14)$$

En sommant les expressions des composantes de l'**Equation (1)** sans tenir compte du coût d'investissement des conduites $C_{RES} = const$, on a :

$$C_T = C_{P.EXP} + C_{REG} \quad (15)$$

$$C_T = R \cdot \frac{\sum_{i=1}^n Q_i H_{MTi}}{n} + \theta \cdot A_{REP} \cdot V_T + V_{CH} (\delta \cdot A_{CH} \cdot H_{CH} - \theta \cdot A_{REP}) \quad (16)$$

Dans l'**Equation (16)**, le premier et le troisième terme sont fonction du régime de pompage de la station c'est-à-dire fonction du coefficient de variation du pompage K_P et le deuxième terme est constant. Pour déterminer la valeur de K_P correspondant au coût minimal total, égalisons à zéro la dérivée de C_T à la variable indépendante K_P .

$$\frac{dC_T}{dK_P} = 0 \quad (17)$$

Dans ce cas

$$R \left[\frac{d \left(\frac{\sum_{i=1}^n Q_i H_{MTi}}{n} \right)}{dK_P} \right] = - \frac{dV_{CH}}{dK_P} (\delta \cdot A_{CH} \cdot H_{CH} - \theta \cdot A_{REP}) \quad (18)$$

D'où

$$\frac{R}{(\delta \cdot A_{CH} \cdot H_{CH} - \theta \cdot A_{REP})} = - \frac{\frac{dV_{CH}}{dK_P}}{\frac{d \left(\frac{\sum_{i=1}^n Q_i H_{MTi}}{n} \right)}{dK_P}} \quad (19)$$

Pour trouver les expressions des dérivées entrant dans la **Relation (19)**, il faut définir le volume de régulation des réservoirs installés sur le réseau. Puisque le régime optimal de pompage recherché n'est pas connu, en utilisant l'équation de modélisation des régimes [5], la somme des débits de pompage

pendant n heures ($T_p = n/24$) serait : $\sum_0^{T_p} Q_i = \overline{Q}_h \int_0^{T_p} K_P \cdot T^{K_P-1} \cdot dT = \overline{Q}_h \cdot T^{K_P}$

Ainsi le débit moyen de pompage pendant la journée considérée :

$$Q_p = \frac{\overline{Q}_h \cdot T^{K_P}}{n}$$

Ce qui permet d'admettre que le régime de pompage peut s'écrire par l'**Equation** :

$$Q_p = aT^{K_P} \quad (20)$$

Q_p : le débit horaire moyen de pompage, m^3/h ; K_P : paramètre de régime de pompage.

Alors le volume de régulation sur le réseau est égal à :

$$V_{cr} = aT^{K_P} - cT^{K_C} \tag{21}$$

Où aT^{K_P} : le débit de pompage d'eau au moment T de la durée de vie de l'ouvrage ; T^{K_C} : le débit de consommation au même moment T ; a et c : respectivement les débits moyens de pompage et de consommation ; K_C : paramètre du régime de consommation.

La valeur maximale $V_{cr,max}$ est déterminée à partir de la condition :

$$\frac{dV_{cr}}{dT} = 0 ; \quad \frac{dV_{cr}}{dK_P} = 0 ; \quad \frac{dV_{cr}}{dK_C} = 0 \tag{22}$$

C'est-à-dire

$$aK_P T_p^{K_P-1} - cK_C T_c^{K_C-1} = 0 \tag{23}$$

En supposant que a et c sont du même ordre de grandeur, on a :

$$K_P T_p^{K_P-1} - K_C T_c^{K_C-1} = 0 \tag{24}$$

D'où

$$T_c = \left(\frac{k_p T_p^{K_P-1}}{k_c} \right)^{\frac{1}{K_C-1}} \tag{25}$$

En intégrant la relation (25) dans (21) et en supposant que le pompage et la consommation se produisent pendant les 24 heures de la journée c'est à dire

$V_{CH} = V_{cr} \cdot 24 \cdot \bar{Q}_h$ on a :

$$V_{CH} = \left(\frac{K_P}{K_C} \right)^{\left(\frac{K_P}{K_C - K_P} \right)} \left(\frac{K_C - K_P}{K_C} \right) \cdot 24 \cdot \bar{Q}_h \tag{26}$$

Alors
$$\frac{dV_{CH}}{dK_P} = \frac{d}{dK_P} \left[\left(\frac{K_P}{K_C} \right)^{\left(\frac{K_P}{K_C - K_P} \right)} \left(\frac{K_C - K_P}{K_C} \right) \right] \cdot 24 \cdot \bar{Q}_h$$

On obtient :

$$\frac{dV_{CH}}{dK_P} = \left[\left(\frac{K_P}{K_C} \right)^{\left(\frac{K_P}{K_C - K_P} \right)} \cdot \frac{\ln \left(\frac{K_P}{K_C} \right)}{K_C - K_P} \right] \cdot \bar{Q}_j \tag{27}$$

Où \bar{Q}_j - désigne le débit journalier moyen ;

Pour la définition de $\frac{d\left(\frac{\sum_1^n Q_i H_{MTi}}{n}\right)}{dK_P}$, utilisons l'expression pour le calcul des dépenses d'énergie en régime de pompage variable. Dans ce cas

$$\frac{\sum_1^n Q_i H_{MTi}}{n} = \bar{Q}_h \left[(H_{CH} - H_{g\acute{e}om}) + S \bar{Q}_h^2 \frac{K_P^3}{3K_P - 2} \right] \quad (28)$$

Où \bar{Q}_h : est le débit horaire moyen annuel ; H_{CH} : est la hauteur du château d'eau ; $H_{g\acute{e}om}$: est la différence géométrique de côtes du terrain naturel au niveau du château et de la station de pompage ; S : est la résistance hydraulique de la conduite reliant le château à la station de pompage ; K_P : est le coefficient de variation horaire de pompage.

La dérivée de l'Equation (28) donne

$$\frac{d\left(\frac{\sum_1^n Q_i H_{MTi}}{n}\right)}{dK_P} = 0 + S \bar{Q}_h^3 \frac{36K_P^2(K_P - 1)}{(3K_P - 2)^2} \quad (29)$$

En remplaçant les dérivées entrant dans l'équation (19) par les Equations (27) et (29), on obtient :

$$\frac{R}{(\delta \cdot A_{CH} \cdot H_{CH} - \theta \cdot A_{REP})} = \frac{\left[\left(\frac{K_P}{K_C} \right) \left(\frac{K_P}{K_C - K_P} \right) \cdot \frac{\ln\left(\frac{K_P}{K_C}\right)}{K_C - K_P} \right] \cdot \bar{Q}_j}{S \bar{Q}_h^3 \frac{36K_P^2(K_P - 1)}{(3K_P - 2)^2}} \quad (30)$$

En introduisant l'expression de R (9) dans l'Equation (30) on a :

$$\frac{\frac{\rho g}{1000\eta} (K_P A_m + K_{EXP} \cdot t)}{(\delta \cdot A_{CH} \cdot H_{CH} - \theta \cdot A_{REP})} = \frac{\left[\left(\frac{K_P}{K_C} \right) \left(\frac{K_P}{K_C - K_P} \right) \cdot \frac{\ln\left(\frac{K_P}{K_C}\right)}{K_C - K_P} \right] \cdot \bar{Q}_j}{S \bar{Q}_h^3 \frac{36K_P^2(K_P - 1)}{(3K_P - 2)^2}} \quad (31)$$

En développant la Relation (31) on obtient :

$$\frac{\frac{\rho g (K_P A_m + K_{EXP} t) S \bar{Q}_h^2}{1000\eta (\delta A_{CH} H_{CH} - \theta A_{REP}) \cdot 24}}{(3K_P - 2)^2} = \frac{\left[\left(\frac{K_P}{K_C} \right) \left(\frac{K_P}{K_C - K_P} \right) \ln\left(\frac{K_P}{K_C}\right) \right]}{6K_P^2 (K_P - 1) (K_C - K_P)} \quad (32)$$

Dans le membre gauche de l'Equation (32) sont réunis tous les paramètres techniques et économiques de construction et d'exploitation du système d'AEP ; ce qui permet d'écrire

$$\Xi = \frac{\rho g (K_P A_m + K_{EXP} t) S \bar{Q}_h^2}{1000 \eta (\delta A_{CH} H_{CH} - \theta A_{REP}) \cdot 24} \quad (33)$$

Où : Ξ est le facteur économique pour la détermination des volumes des capacités de régulation du réseau et du régime optimal de pompage de la station de reprise.

La Solution (32) par rapport à K_P étant visiblement très compliquée, il est nécessaire de résoudre cette équation par une méthode numérique en traçant la courbe de K_P en fonction de Ξ et de K_C (Figure 1). Une analyse de la relation (31) et de la Figure 1 permet de tirer les conclusions ci-après :

- Lorsque le coefficient de variation de pompage (K_P) tend vers 1 ($K_P \rightarrow 1$), le dénominateur de l'équation (32) tend vers zéro ; ce qui implique que le facteur économique Ξ tend vers l'infini ($\Xi \rightarrow \infty$). Ce cas est pratiquement exclu si le relief du terrain est plat car le coût unitaire du château d'eau, CFA/m³, est toujours plus élevé que le coût du réservoir d'eau propre. Dans le cas de positionnement de la capacité de régulation à la côte la plus élevée (côtes qui assurent les charges nécessaires du réseau) les coûts unitaires de toutes les capacités sont égaux ($H_{CH} = 0$, $\delta = \theta$, $A_{mCH} = A_{mC}$)
- 2. Avec l'augmentation du coût de l'énergie électrique (K_{EXP}) ou de la distance entre la station de pompage et le château d'eau (c'est-à-dire $S \bar{Q}_h^2$ élevé), dans des conditions égales, le facteur économique Ξ croît, ce qui entraîne la baisse de la valeur optimale de K_P et l'augmentation du volume de la cuve du château d'eau.
- Il existe des conditions techniques et économiques pour lesquelles le régime de pompage optimal résulte de $K_P = K_C$. Dans ce cas, la construction de capacité de régulation n'est pas nécessaire (possibilité de l'implantation d'un dispositif de pompage, qui fonctionnera suivant un régime discontinu).

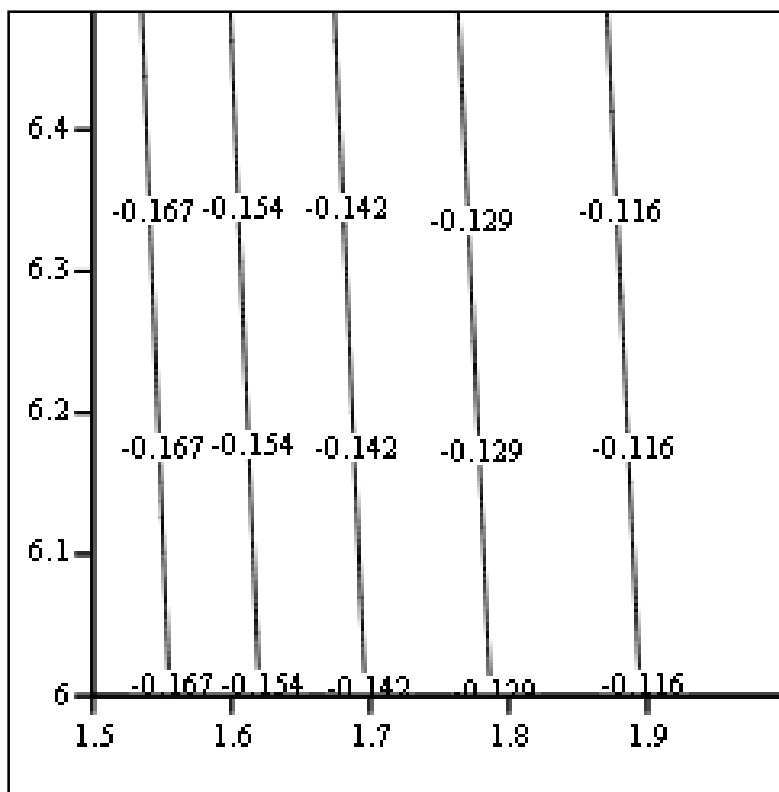


Figure 1 : *Nomogramme pour la détermination de la valeur du coefficient de variation K_P en fonction de Ξ et de K_C*

III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

Une simulation du modèle d'optimisation est réalisée pour la vérification des équations précédemment obtenues sur des réseaux concrets d'AEP de la Société nationale des eaux du Bénin. Les résultats ont montré que les dépenses totales ont un seuil minimal correspondant au régime de pompage défini par la **Relation (32)**. Ainsi la réduction des dépenses annuelles sur le système station de pompage – capacités de régulation est substantielle et atteint 20-25% (les dépenses du système sont réduites de 5 à 6%). La résolution du problème d'optimisation du régime de pompage est effectuée sur un système équipé de château à la fin du réseau où les résistances hydrauliques des conduites sont connues et le réseau est simulé à une tranchée de tronçons qui relie le début du réseau au château et selon l'hypothèse que les pertes de charge et les débits sont réparties uniformément sur ces tronçons.

La hauteur utile du château d'eau est définie dans les conditions de l'heure de consommation de pointe quand la surface de la zone alimentée par le château atteint sa valeur maximale.

$$H_{CH} = H_0 + H^*_{max} \quad (34)$$

$$H_0 = (Z_{PC} - Z_{CH}) + H_{PS} \quad (35)$$

Où Z_{PC} : la cote du terrain naturel au point de calcul situé sur la ligne de rencontre des zones d'alimentation ; Z_{CH} : la cote du terrain naturel au pied du château ; H_{PS} : la pression au sol du réseau ; H^*_{max} : la perte de charge dans la zone alimentée par le château à l'heure de pointe

$$H^*_{max} = S_p \cdot Q^2_P \quad (36)$$

Où S_p : La résistance hydraulique du tronçon reliant le château au point de la ligne de rencontre des zones d'alimentation; Q_P : le débit passant par les tronçons.

A l'heure de pointe, le débit de consommation dans la zone d'alimentation de la station de pompage est égale à :

$$Q_C = \bar{Q}_h \cdot K_C \cdot \alpha_{min} \quad (37)$$

Où $\alpha_{min} = l_1/l$ - la longueur (surface) relative de la partie du réseau qui s'alimente seulement à partir de la station de pompage et de la longueur (surface) totale du réseau ; K_C : paramètre du régime de consommation.

Aussi, le pompage d'eau par la station à la même heure constitue :

$$Q_P = \bar{Q}_h \cdot K_P \quad (38)$$

En égalisant les *Equations (37) et (38)*, on obtient :

$$\alpha_{min} = \frac{K_P}{K_C} \quad (39)$$

A n'importe quelle autre heure, la valeur α est égale à :

$$\alpha_i = \frac{Q_P}{Q_C} = \frac{K_P T^{K_P-1}}{K_C T^{K_C-1}} \quad (40)$$

Où : T : période de consommation considérée par rapport à la durée de vie (dans ce cas $T=1$).

La variation de α_i dans l'intervalle $\alpha_{min} < \alpha_i < \infty$, caractérise le régime d'alimentation du réseau

- $1 < \alpha_i < \infty$ se produit le transit d'eau dans le château,
- $\alpha_{min} < \alpha_i < 1$, se produit la double alimentation du réseau par la pompe et le château,
- $\alpha_i = 1$, le moment limite entre les régimes c'est-à-dire le moment où les pompes alimentent entièrement le réseau et remplissent au maximum le château.

A partir de cette condition

$$(\alpha_i = 1) \quad (41)$$

Trouvons le moment lorsque commence le changement de régime (le régime de transit dans le réservoir de régulation passe au régime d'alimentation des deux côtés) c'est à dire lorsque la valeur du volume utile de régulation est maximale : Ecrivons l'expression du débit de calcul et de coefficient de résistance hydraulique

$$Q_{cal} = 0.5(Q_C - Q_P) \quad (42)$$

$$S_C = S_{ct}(1 - \alpha_{min}) \quad (43)$$

Où S_{ct} : la résistance hydraulique totale du réseau.

En utilisant l'expression analytique du régime de consommation et en supposant que l'heure de consommation de pointe $T_i=T=1$, on obtient

$$Q_{cal} = 0.5\bar{Q}_h(K_C - K_P) \quad (44)$$

alors la **Relation (36)** prend la forme de :

$$H^*_{max} = 0.25S_{ct} \cdot \bar{Q}_h^2 \frac{(K_C - K_P)^3}{K_C} \quad (45)$$

Et la hauteur du château d'eau installée à la fin du réseau sera égale à :

$$H_{CH} = H_0 + 0.25S_{ct} \cdot \bar{Q}_h^2 \frac{(K_C - K_P)^3}{K_C} \quad (46)$$

Les dépenses d'énergie relatives au pompage d'eau de la station de pompage jusqu'au château à la $i^{\text{ème}}$ heure du transit se calculent par

$$P_i^I = \frac{Q_i H_i^I}{102\eta} = \frac{Q_i (H_g + H^*_{max} + h_i^I)}{102\eta} \quad (47)$$

Où Q_i : le débit de refoulement horaire ; H_i^I : la hauteur du refoulement ; H_g : la hauteur géométrique de montée d'eau ; h_i^I : la perte de charge sur le réseau et dans les conduites.

Les dépenses d'énergie pour le refoulement d'eau à la $j^{\text{ème}}$ heure avec le régime d'alimentation (II) des deux côtes se calculent par la **Formule**

$$P_i^{II} = \frac{Q_j H_j^{II}}{102\eta} = \frac{Q_j [H_g + (H^*_{max} - h_j^*) + h_i^{II}]}{102\eta} \quad (48)$$

Où : h_j^{II} : la perte de charge dans les conduites et dans la partie du réseau alimentée par la station de pompage ; h_j^* : la perte de charge dans la partie de réseau alimenté par le château ; $H_g + (H^*_{max} - h_j^*)$: la côte de point de rencontre des deux lignes piézométriques dans les deux zones d'alimentation.

Sur la base de la description analytique du régime de consommation et du régime de pompage d'eau [7] sont obtenues les expressions pour le calcul des dépenses d'énergie P_i^I et P_i^{II} ($P_T = P_i^I + P_i^{II}$) en fonction des coefficients de variation de la consommation et du pompage (K_C et K_P) et les données connues du réseau par lesquelles l'erreur de calcul est très négligeable ($\pm 6\%$). La relation (22) pour la détermination des capacités de régulation et la dérivée de cette fonction, qui donne l'équation (23) ne changent pas dans le cas du système dont le château est à la fin du réseau ; ce qui permet d'établir l'équation permettant de déterminer le minimum des dépenses annuelles analogiquement à l'expression (19). Après avoir trouvé la dérivée des fonctions (47) et (48) et suite à des développements mathématiques nous avons :

$$\Xi = \frac{\left(\frac{K_P}{K_C}\right) \left(\frac{K_P}{K_C - K_P}\right) \frac{\ln\left(\frac{K_P}{K_C}\right)}{K_P - K_C}}{E \frac{6K_P^2(K_P - 1)}{(3K_P - 2)^2} - F \frac{(K_C - K_P)^2}{K_C} - R \left(\frac{K_P}{K_C}\right) \left(\frac{K_P}{K_C - K_P}\right) \frac{\ln\left(\frac{K_P}{K_C}\right) (K_C - K_P)^3}{K_P - K_C} \frac{1}{4K_C}} \cdot \left[\frac{1}{1 - \frac{3(K_C - K_P)}{\ln\left(\frac{K_P}{K_C}\right)}} \right] \quad (49)$$

Avec

$$E = S_C \bar{Q}_h^2 + 0.25 S_{ct} \cdot \bar{Q}_h^2 \quad (50)$$

$$F = 0.75 S_{ct} \cdot \bar{Q}_h^2 \quad (51)$$

Des *Equations (49) et (32)*, il est à noter que dans leur premier membre sont réunies les valeurs, caractérisant les conditions technico-économiques de construction et d'exploitation ; ce qui justifie qu'au préalable, on peut calculer ce membre par le facteur économique pour la définition des volumes de régulation optimums des capacités dans les systèmes munis de château d'eau à la fin du réseau. Le second membre de *l'Equation (49)* est une expression dépendante des valeurs des coefficients de variation de pompage et de la consommation. Une étude sur plusieurs réseaux de la Société nationale des eaux du Bénin a permis d'estimer la valeur optimale du coefficient K_p obtenue en fonction des dépenses totales annuelles et leurs composantes (*Figure 2*). Les dépenses totales annuelles sur le système (station de pompage, volume de régulation) diminuent de 17% par comparaison avec les variantes pour lesquelles le régime de pompage est fixé.

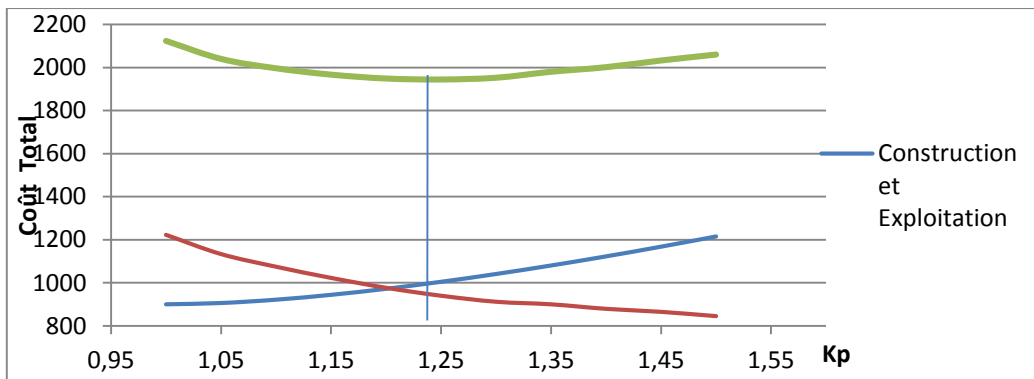


Figure 2 : Variation du coût total en fonction du coefficient pompage

La *Figure 2* montre que le coefficient de pompage optimal du système étudié est de 1,24

IV - CONCLUSION

Le présent travail a montré que l'approche élaborée pour la gestion optimale du pompage d'eau présente un intérêt hydraulique et économique. Il propose des solutions optimales pour stabiliser les régimes de fonctionnement du système et pour réduire les dépenses électro énergétiques nécessaires pour un fonctionnement harmonieux des composantes du réseau. L'application des résultats, portant sur les systèmes d'AEP au Bénin a montré que le coefficient optimal de variation du pompage est de l'ordre de 1,24, ce qui a entraîné une économie de 10 à 15% par comparaison à la variante de régime permanent des stations de pompage.

RÉFÉRENCES

- [1] - R. BLANIC, “Les besoins en eau des agglomérations urbaines et des industries”, *Revue de l'industrie Minérale-Mines*, Novembre (1971) 732-752.
- [2] - R. DEVEAUX et R. GIRY, “Contribution à la connaissance des consommations moyennes et de pointe d'eau potable en milieu rural”, *TSM*, Avril (1977) 147-15.
- [3] - A. DIVENOT, “Température de l'air et demande en eau”, *TSM*, Juillet (1978) 391-396.
- [4] - D. JUNG, G. CHUNG and H. KIM, “Optimal design of water distribution systems considering uncertainties in demands and roughness coefficients”, Paper presented at the Proceedings of the 12th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference WDSA2010, Tucson, AZ, USA, September (2010).
- [5] - A. SAVINA et A. MATHYS, “L'alimentation en eau en milieu urbain dans les quartiers défavorisés : une question de partage?”, Programme d'alimentation en eau et d'assainissement PNUD-Banque Mondiale, groupe régional de l'eau et de l'assainissement, Afrique de l'ouest, Abidjan, (1994).
- [6] - N. BASILE, “Optimization of the design, location and management of water tank in water distribution systems”, Ecole Polytechnique de Montréal, (2008).
- [7] - T. BACHAROU, G. HOUINOU, C.E. ADJOVI et M. ADJIBOÏCHA, “Régime de consommation en eau et son utilisation dans le calcul des réseaux d'alimentation en eau potable”, *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 19 (2012) 159-174.
- [8] - F. GUHL, “Gestion optimale des réseaux d'eau potable”, Thèse en Mécanique, Université Louis Pasteur (1999).
- [9] - H. FANG, J. ZHANG and J. GAO, J, “Optimal operation of multi-storage tank multi-source system based on storage policy”, *Journal of Zhejiang University-Science A*, 11(8), (2010) 571-579.
- [10] - E. BATCHABANI and M. FUAMBA, “Optimal Tank Design in Water Distribution Networks: Review of Literature and Perspectives”, *Journal of water resources planning and management*, 140(2), (2014) 136-145.
- [11] - I. NOUIRI, F. LEBDI, N. LAMADDALENA, “Algorithme évolutionnaire (ae) pour l'optimisation des débits sur les réseaux hydrauliques a la demande”, *Irrigation Systems Performance, Options méditerranéennes, series B*, n°52, (2008) 50 – 59.
- [12] - A. MARCHI, A. G. DANDY, A. WILKINS and H. ROHRLACH, “A Methodology for Comparing Evolutionary Algorithms for the Optimization of Water Distribution Systems”, *Journal of water resources planning and management*, 140(1), (2014) 22-31.
- [13] - T. D. PRASAD, “Design of Pumped Water Distribution Networks with Storage”, *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce*, 136(1), (2010) 129-132