

## Revue des sciences de l'eau

# Algorithme Génétique (AG) pour le choix optimal des stations d'appoint de chlore sur les réseaux d'eau potable

Issam Nouri et Féthi Lebdi

---

Volume 19, numéro 1, 2006

URI : [id.erudit.org/iderudit/012596ar](https://id.erudit.org/iderudit/012596ar)  
<https://doi.org/10.7202/012596ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

---

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement  
(INRS-ETE)

ISSN 0992-7158 (imprimé)  
1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

---

Citer cet article

Nouri, I. & Lebdi, F. (2006). Algorithme Génétique (AG) pour le choix optimal des stations d'appoint de chlore sur les réseaux d'eau potable. *Revue des sciences de l'eau*, 19(1), 47–55. <https://doi.org/10.7202/012596ar>

---

### Résumé de l'article

La chloration sur les réseaux de distribution d'eau potable constitue une tâche délicate. Elle assure la protection contre la reviviscence microbienne et contre la contamination du réseau. Les réactions du chlore avec la matière organique du système entraînent la formation des sous-produits chlorés, indésirables pour la santé humaine. Ainsi, le maintien du taux de chlore libre à des valeurs admissibles, sur tout le réseau et à tout moment, constitue un objectif principal des gestionnaires des réseaux. Lors de la chloration à partir des sources d'eau, les processus de réaction-transport créent sur les réseaux, caractérisés par des temps de séjours importants, de mauvaises distributions des taux de chlore libre. Les stations d'appoints sur les réseaux constituent une alternative efficace. La détermination de leur nombre et le choix des emplacements optimaux constituent les deux difficultés auxquelles sont confrontés les gestionnaires. Le présent travail utilise un algorithme génétique (AG) pour la détermination du nombre et des emplacements optimaux des stations d'appoint de chlore sur les réseaux. Deux objectifs ont été fixés : (1) l'amélioration de l'homogénéité spatio-temporelle de la chloration et (2) la minimisation du nombre de stations d'appoint. L'application du modèle développé sur un réseau test a permis d'identifier les emplacements des deux stations d'appoint de chlore. La solution optimale a considérablement amélioré l'homogénéité et a assuré, pour 98 % des noeuds, des taux de chlore libre dans l'intervalle admissible (0,1-0,5) mg/L.

---

Tous droits réservés © Revue des sciences de l'eau, 2006 Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter en ligne. [<https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>]

---

**Érudit**

Cet article est diffusé et préservé par Érudit.

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. [www.erudit.org](http://www.erudit.org)

---

# ALGORITHME GÉNÉTIQUE (AG) POUR LE CHOIX OPTIMAL DES STATIONS D'APPOINT DE CHLORE SUR LES RÉSEAUX D'EAU POTABLE

*Genetic Algorithm (GA) for optimal choice of chlorine  
booster stations in drinking water networks*

---

*Issam Nouri<sup>1</sup>\* et Féthi Lebd<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Institut National Agronomique de Tunisie (INAT), Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau, 13, rue de Jendouba  
2033 Mégrine, Tunis, Tunisie

<sup>2</sup>Institut National Agronomique de Tunisie (INAT), 43, avenue Charles Nicolle, 1002 Tunis le Belvédère, Tunisie

Reçu le 25 août 2004, accepté le 23 mai 2005

---

## SUMMARY

The chlorination of drinking water networks represents a delicate task. It ensures protection against microbial regrowth and network contamination. However, chlorine also reacts with organic matter in the system and leads to the formation of chlorinated by-products, which are undesirable for the human health. Thus, one of the main objectives of the water network manager is to maintain acceptable levels of free residual chlorine, at all network nodes and at all times. When water sources are chlorinated, reaction-transport processes create an unbalanced distribution of free chlorine concentrations, especially in networks characterized by long water residence times. Booster stations in networks constitute an efficient alternative to improve the spatial and temporal chlorine distribution. Their number and their optimum locations are two challenges facing network managers. In this respect, this paper suggests the use of a genetic algorithm (GA) to determine the number and the optimum locations of chlorine booster stations in networks. The two main objectives of this study were: (1) the improvement of the spatio-temporal homogeneity of chlorination and (2) the reduction of the number of booster stations.

A solution to this optimisation problem is an arrangement of  $n_s$  booster stations in  $n$  consumption nodes of the water network. To resolve this problem, we linked the toolkit of the hydrodynamic computer program EPANET, which uses a one-dimensional reaction-transport model, to the proposed genetic algorithm (GA). In this application, we assume that free chlorine reactions through distribution networks are first-order. First, the EPANET computer program simulates temporal and spatial chlorine spreading in the network for each solution. Next, the GA calculates the sum square deviation  $E(NN, T)$ , for the average chlorine concentration required for adequate sanitation (0.1-0.5) mg/L, which corresponds to an optimal free chlorine concentration of 0.3 mg/L in the network. The number of booster stations is also defined for each solution studied. The optimal solution must minimize the sum square deviation and the number of booster stations used. Therefore, solution  $j$  can be evaluated by its fitness representing the weighted sum of the homogeneity function  $F_h(j)$  and the function of booster stations number  $F_{smin}(j)$ . According to the fitness of the solution, genetic operators (tournament selection, two points crossover and mutation) associated with an elitist evolution strategy (ES), combine individuals and create new populations. This iterative process explores the

---

\*Auteur pour correspondance :  
Tél. : 216-98-422-104  
Courriel : nouiri.issam@iresa.agrinet.tn

solution space and improves the maximum population fitness until stagnation, to achieve the optimal individual.

The test network configuration maintained for modelling is formed by a tank and 20 km of pipes. The stretched-out shape of the network imposed long water residence times and usually created an unbalanced distribution of free chlorine concentrations at consumption nodes. In order to evaluate chlorination, three control nodes were chosen: N145 (first consumption node), N168 (middle of the network) and N206 (extremity of the network). For this network example, the best initial chlorination homogeneity was reached with a constant free chlorine concentration equal to 0.5 mg/L, usually imposed by the manager at the exit of the water tank. This initial management approach created in the network a sum square deviation of  $65.9 \text{ mg}^2/\text{L}^2$ , as well as an unbalanced spatial chlorination distribution with 27% of the consumption nodes having free chlorine concentrations less than the minimum required value for adequate sanitation (0.1 mg/L). The simulation of higher free chlorine concentrations at the exit of the water tank (0.8 mg/L) led to concentrations above the maximum value required for adequate human health protection (0.5 mg/L) at 26% of the consumption nodes. Also, 10% of the nodes had concentrations lower than the minimum concentration required for human health. For all constant chlorination scheduling studied (0.4; 0.5; 0.6; 0.7 and 0.8 mg/L), an important fraction of consumption nodes remained with free chlorine concentrations outside the desired concentration range. Therefore, this management approach is not suitable for networks with long residence times.

Before its application, the GA required the definition of the crossover and the mutation probability (respectively 0.9 and 0.05), the size of the population (100) and the maximum number of generations (300). In addition, in the present application, chlorination homogeneity and the reduction of the booster stations number ( $p_1 = p_2 = 0.5$ ) were given the same importance. According to boundary conditions, we imposed a free chlorine concentration of 0.5 mg/L at both the exit of the water tank and at the booster stations. The application of the GA, developed in this study, ensures the evolution of the initial population until stagnation of its maximum fitness. The resulting optimal solution involved the creation of two booster stations at nodes N179 and N196. The simulation of this chlorination management improves the spatio-temporal homogeneity of free chlorine concentrations in consumption nodes. It reduced the sum square deviation from  $65.9$  to  $38.8 \text{ mg}^2/\text{L}^2$ . Finally, 98% of the consumption nodes had free chlorine concentrations (0.1-0.5 mg/L) that were required in the context of human health.

This model represents a first step in the optimization of chlorination homogeneity in networks characterized by long water residence times. The use of this tool requires network

hydraulic modelling, the simulation of the free chlorine behaviour, the definition of the chlorine reaction coefficients and the GA parameters. The optimization of the chlorine concentration scheduling (in water sources and in booster stations) represents an additional step in the present work.

**Keywords:** *optimization, genetic algorithms, homogeneity, chlorination, drinking water network.*

## RÉSUMÉ

La chloration sur les réseaux de distribution d'eau potable constitue une tâche délicate. Elle assure la protection contre la reviviscence microbienne et contre la contamination du réseau. Les réactions du chlore avec la matière organique du système entraînent la formation des sous-produits chlorés, indésirables pour la santé humaine. Ainsi, le maintien du taux de chlore libre à des valeurs admissibles, sur tout le réseau et à tout moment, constitue un objectif principal des gestionnaires des réseaux.

Lors de la chloration à partir des sources d'eau, les processus de réaction-transport créent sur les réseaux, caractérisés par des temps de séjours importants, de mauvaises distributions des taux de chlore libre. Les stations d'appoints sur les réseaux constituent une alternative efficace. La détermination de leur nombre et le choix des emplacements optimaux constituent les deux difficultés auxquelles sont confrontés les gestionnaires. Le présent travail utilise un algorithme génétique (AG) pour la détermination du nombre et des emplacements optimaux des stations d'appoint de chlore sur les réseaux. Deux objectifs ont été fixés : (1) l'amélioration de l'homogénéité spatio-temporelle de la chloration et (2) la minimisation du nombre de stations d'appoint. L'application du modèle développé sur un réseau test a permis d'identifier les emplacements des deux stations d'appoint de chlore. La solution optimale a considérablement amélioré l'homogénéité et a assuré, pour 98 % des nœuds, des taux de chlore libre dans l'intervalle admissible (0,1-0,5) mg/L.

**Mots clés :** *optimisation, algorithmes génétiques, homogénéité, chloration, réseau d'eau potable.*

## 1. INTRODUCTION

La chloration optimale de l'eau potable vise la protection des consommateurs contre les maladies d'origines hydriques tout en réduisant la formation des composés organiques chlorés. Ces derniers, regroupés sous l'appellation « sous-produits de la désinfection par le chlore », sont soupçonnés être responsables d'autres maladies chez l'Homme (SADIC et RODRIGUEZ,

2004; WIGLE, 2001). À l'intérieur des réseaux d'alimentation en eau potable (AEP), la réduction du chlore libre obéit à des lois de réaction et de transport, imposées par la nature des conduites, la qualité de l'eau et les régimes hydrauliques (VASCONCELOS *et al.*, 1997). Pour des réseaux caractérisés par des chemins hydrauliques longs, des baisses considérables des taux de chlore libre sont généralement observées entre les points d'application et les extrémités (BREMOND *et al.*, 1998). Afin de pallier cette contrainte, les stations d'appoint sur les réseaux d'eau potable peuvent constituer une solution et permettre d'améliorer l'homogénéité du taux de chlore libre. D'autres problèmes se présentent alors : où positionner les stations d'appoint? quelles consignes imposer au niveau des sources et au niveau des stations d'appoint sur le réseau? Le nombre et les emplacements des stations d'appoint dépendent essentiellement de la structure du réseau (longueurs et interconnexions des conduites). Ils relèvent de la gestion à moyen et à longs termes des réseaux. Cependant, les consignes de la chloration sont généralement déterminées pour des points d'application connus et une modulation horaire de la demande caractéristique de chaque journée. C'est la gestion à court terme de la chloration.

L'optimisation de la gestion des réseaux d'eau potable a été largement analysée par les méthodes conventionnelles. BRION et MAYS (1991) et LANSEY (1994) ont utilisé la programmation dynamique pour optimiser le fonctionnement d'une station de pompage. D'autres auteurs ont choisi de simplifier les problèmes étudiés pour utiliser la programmation linéaire (BOCCCELLI *et al.*, 1998; GUHL, 1999; TRYBY *et al.*, 2002). BISCOS *et al.* (2003) et YU *et al.* (1994) ont utilisé la programmation non linéaire pour optimiser les mêmes types de problème. Toutes ces méthodes étaient peu efficaces et fortement pénalisées par la taille des problèmes étudiés. Dans ce cadre, BOULOS *et al.* (2002) ont souligné que la réussite de ces techniques est très limitée car celles-ci mettent en jeu des modèles mathématiques complexes, elles dépendent du nombre de variables et des contraintes, elles exigent de fortes simplifications et elles sont facilement piégées dans des optimums locaux. Contrairement à ces méthodes, les Algorithmes Génétiques (AG) conviennent parfaitement pour résoudre les problèmes d'optimisation combinatoires (HRSTKA et KUCEROVA, 2004). De nombreuses applications pour la gestion des réseaux d'eau potable ont été proposées dans la littérature. REIS *et al.* (1997) ont développé un AG pour l'optimisation du choix des vannes de contrôle pour la réduction des fuites. SAVIC et WALTER (1997), VAN VUUREN (2002) et LIONG et ATIQUZZAMAN (2004) ont développé des AG efficaces pour l'optimisation du choix des diamètres des conduites. MEIER et BARKDOLL (1999) ont réalisé le calage des réseaux hydrauliques sous pression par AG. SCHAETZEN *et al.* (2000) ont utilisé un AG pour le choix optimal des points de calage des réseaux. MORLEY *et al.* (2001) ont présenté un outil d'optimisation des extensions.

BOULOS *et al.* (2002) se sont intéressés à l'optimisation du fonctionnement des stations de pompes par AG. MUNAVALLI et KUMAR (2003) et ROUHIAINEN et TADE (2003) ont présenté des AG pour l'optimisation des consignes de chlore pour des stations d'appoint connues sur les réseaux. OSTFELD et SALOMONS (2004) ont également utilisé les AG pour la minimisation du coût de fonctionnement des stations de pompage et des stations d'appoint. Tous les auteurs ont souligné la réussite des AG dans la recherche de solutions optimales.

Le présent travail vise le développement d'un AG pour le choix optimal des emplacements des stations d'appoint du chlore sur les réseaux de distribution. Après un bref aperçu sur cette technique, la méthodologie d'optimisation choisie ainsi que les principales étapes de calcul seront exposées. Un réseau de distribution caractérisé initialement par une chloration déséquilibrée a été utilisé pour tester le modèle.

## 2. RAPPELS SUR LES ALGORITHMES GÉNÉTIQUES

### 2.1 Principe

Par similitude à la théorie de l'évolution de Darwin, les AG font évoluer les individus d'une population, choisie initialement au hasard, par le biais des opérateurs génétiques : sélection, croisement et mutation (BACK *et al.*, 2000; GOLDBERG, 1991). Une stratégie d'évolution est généralement associée à ces opérateurs pour permettre le passage d'une génération à une autre. Ce processus itératif est arrêté en cas de stagnation de l'évolution ou lorsque le nombre maximum de générations est atteint (DREO *et al.*, 2003).

### 2.2 Les opérateurs génétiques

#### 2.2.1 La sélection

À chaque génération, des individus se reproduisent, survivent ou disparaissent de la population sous l'action de deux opérateurs de sélection : (1) la sélection pour la reproduction, et (2) la sélection pour le remplacement (BACK *et al.*, 2000; DREO *et al.*, 2003). De nombreuses techniques de sélection peuvent être citées : (1) la sélection proportionnelle, essentiellement celle par roulette de casino conçue à l'origine par J. Holland pour les algorithmes génétiques, (2) la sélection selon le rang de l'individu et (3) la sélection par tournoi. Ces techniques engendrent des pressions de sélection très différentes. Une pression de sélection élevée conduit l'algorithme à converger prématurément vers un optimum

local. Une faible pression empêche l'algorithme de converger (DREO *et al.*, 2003).

### 2.2.2. Le croisement

Les techniques de croisement citées dans la littérature diffèrent par le nombre de points de croisement entre les parents et le mode d'échange du matériel génétique. Le nombre de parents et le nombre d'individus produits constituent des variantes de chaque technique. Le mécanisme de croisement est généralement appliqué selon une probabilité qui varie entre 0,5 et 0,8 (BACK *et al.*, 2000; DREO *et al.*, 2003; PELIKAN *et al.*, 2003).

### 2.2.3. La mutation

Ce mécanisme introduit dans la population une variabilité aléatoire, selon une probabilité entre 0,01 et 0,1. La mutation aléatoire déterministe, la mutation « bit-flip » et la mutation gaussienne auto-adaptative sont les plus citées dans la littérature (BACK *et al.*, 2000; DREO *et al.*, 2003; PELIKAN *et al.*, 2003).

### 2.2.4. Les stratégies d'évolution

Une stratégie d'évolution définit les mécanismes qui permettent de passer d'une génération d'individus à une autre. Le nombre maximal de générations est un paramètre de la stratégie d'évolution qui arrête le processus itératif en cas de non-convergence de l'algorithme (BACK *et al.*, 2000; DREO *et al.*, 2003; PELIKAN *et al.*, 2003).

## 3. FORMULATION DU PROBLÈME

La performance de la chloration sur un réseau d'AEP peut être évaluée par l'homogénéité du taux de désinfectant dans l'espace et dans le temps (PROPATO, 2003). L'importance des frais d'investissement et de gestion, engagés pour appliquer la chloration, entrent également dans l'évaluation de la performance. Ainsi, nous fixons comme objectifs (1) assurer aux consommateurs une chloration tolérable et homogène et (2) minimiser le nombre de stations d'appoint utilisées.

### 3.1 Fonctions objectifs

L'objectif (1) peut être exprimé par la minimisation de la somme des carrés des écarts entre les taux du chlore libre calculés, au niveau des nœuds de consommation, et la moyenne de l'intervalle des valeurs admissibles. La fonction objectif de l'homogénéité s'écrit alors :

$$\text{Minimiser } E(\text{NN}, T) = \sum_n \sum_t \left[ c(n, t) - \frac{\varepsilon_{\min} + \varepsilon_{\max}}{2} \right]^2 \quad (1)$$

où  $E(\text{NN}, T)$  est la somme des carrés des écarts à tous les nœuds  $n$  et à tous les pas de temps  $t$ ,  $c(n, t)$ , la concentration en chlore libre du nœud  $n$  au pas de temps  $t$ ,  $\varepsilon_{\min}$  et  $\varepsilon_{\max}$ , les limites respectivement minimale et maximale de l'intervalle admissible du taux de chlore libre,  $\text{NN}$ , le nombre total des nœuds sur le réseau et  $T$ , la période de simulation.

L'objectif (2) est assuré par la minimisation du nombre de stations d'appoint de chlore sur le réseau. La fonction objectif s'écrit :

$$\text{Minimiser } N_{\text{station}}(R) \quad (2)$$

où  $N_{\text{station}}(R)$  est le nombre de stations d'appoint de chlore sur le réseau  $R$ .

### 3.2 Conditions aux limites

Les conditions aux limites pour ce problème d'optimisation fixent les valeurs du taux de chlore libre au niveau des sources d'eau  $C(\text{sources})$ , au niveau des stations d'appoints  $C(\text{appoint})$  et au niveau des nœuds de consommation  $c(n, t)$  :

Au niveau des sources d'eau (Réservoirs et stations de pompage), on impose :

$$C(\text{sources}) = \varepsilon_{\max} \quad \forall t \quad (3)$$

Au niveau des stations d'appoint de chlore sur le réseau de distribution, on impose :

$$C(\text{appoint}) = \varepsilon_{\max} \quad \forall t \quad (4)$$

Au niveau des nœuds de consommation sur le réseau de distribution, on impose :

$$\varepsilon_{\min} \leq c(n, t) \leq \varepsilon_{\max} \quad \forall n \text{ et } \forall t \quad (5)$$

## 4. MÉTHODOLOGIE

Une solution au problème étudié est une disposition adéquate de stations d'appoints sur le réseau de distribution. La modélisation hydraulique et la propagation du chlore libre dans le réseau sont réalisées par le logiciel EPANET2 (ROSSMAN, 2000), utilisant une loi de réaction-transport

unidimensionnelle. De plus, nous considérons que la réaction du chlore libre à travers les réseaux de distribution est de premier ordre (VASCONCELOS *et al.*, 1997). Après la simulation de chaque solution au problème, l'AG utilise les taux de chlore libre calculés en chaque nœud, et à tout pas de temps, pour évaluer la performance de la solution. Partant d'un ensemble de solutions choisies au hasard, l'algorithme fait évoluer les individus et améliore la performance maximale de la population. Ce processus est arrêté par la stagnation de l'évolution de la population (DREO *et al.*, 2003).

## 5. ALGORITHME D'OPTIMISATION

L'AG proposé crée au hasard un ensemble de solutions réalisables : population initiale. Une stratégie d'élitisme associée aux opérateurs génétiques : sélection par tournoi, croisement en deux points et mutation aléatoire se chargent ensuite de prospecter l'espace des solutions à la recherche de l'individu optimal.

### 5.1 Algorithmes

#### 5.1.1. Création de la population initiale

Un individu de la population aura la configuration présentée au tableau 1.

**Tableau 1** Structure d'une solution au problème étudié.  
**Table 1** Solution structure of the studied problem.

Nœud $n_i$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	.....	$n_{(NN-3)}$	$n_{(NN-2)}$	$n_{(NN-1)}$	$n_{NN}$
Station $n_s$	0	0	0	1	.....	1	0	0	1

Dans ce tableau, NN désigne le nombre total de nœuds du réseau,  $n_s = 1$  indique qu'une station d'appoint se trouve au nœud  $n_s$  alors que  $n_s = 0$  indique qu'il n'y a pas de station d'appoint au nœud  $n_s$ . Le nombre de solutions créées détermine la taille de la population, constante pour toutes les générations.

#### 5.1.2. Évaluation des individus de la population initiale

La solution optimale au problème doit minimiser la somme des carrés des écarts ainsi que le nombre de stations utilisées. La transformation de ce problème de minimisation en un problème de maximisation de la performance d'une solution  $j$  permet de définir les fonctions suivantes :

La fonction homogénéité  $F_h(j)$  :

$$F_h(j) = \frac{1}{1 + E(NN, T)} \quad (6)$$

La fonction de réduction du nombre de stations sur le réseau  $F_{smin}(j)$  :

$$F_{smin}(j) = \frac{1}{NN + \text{NombreStation}(j)} \quad (7)$$

où  $\text{NombreStation}(j)$  est le nombre de stations d'appoint pour la solution  $j$ .

La fonction d'évaluation globale d'une solution  $j$  sera :

$$\text{Fitness}(j) = \frac{p_1 F_h(j) + p_2 F_{smin}(j)}{p_1 + p_2} \quad (8)$$

où  $p_1$  et  $p_2$  sont les poids de pondération des fonctions d'évaluation. Le choix de ces paramètres fixe le compromis entre l'homogénéité et le nombre de stations utilisées.

#### 5.1.3. Évolution

Afin de garantir une pression de sélection acceptable, la technique de sélection par tournoi a été adoptée. DREO *et al.* (2003) recommandent d'ajuster sa pression par le choix de deux participants dans chaque tournoi. Le présent AG utilise le croisement entre deux parents en deux points pour produire deux enfants. Les points de croisement sont choisis par des tirages au hasard. La mutation adoptée est le changement de la valeur d'un bit, choisi au hasard, de 0 à 1 ou de 1 à 0. Pour disposer d'une garantie contre la convergence prématurée, DREO *et al.* (2003) recommandent d'associer une stratégie d'élitisme à la technique de sélection par tournoi.

## 6. EXEMPLE ÉTUDIÉ

La structure du réseau retenue pour la modélisation est formée d'un réservoir et de 20 km de conduites. La forme allongée du réseau a imposé des temps de séjour importants et a toujours provoqué des déséquilibres du taux de chlore libre. Afin d'évaluer la chloration, trois nœuds de contrôle ont été choisis : N145 (premier nœud de consommation), N168 (milieu du réseau) et N206 (extrémité du réseau) (Figure 1).

Le taux de chlore libre optimum sur les réseaux est fixé à 0,3 mg/L (KOOIJ, 2003). À cette valeur le réseau est protégé contre les risques de maladies d'origine hydrique et ceux liés à la formation des sous-produits de la chloration. De plus, les goûts et les odeurs, en présence du chlore libre, sont généralement détectés pour des taux supérieurs à 0,24 mg/L (TURGEON *et al.*, 2004). Cependant, divers choix

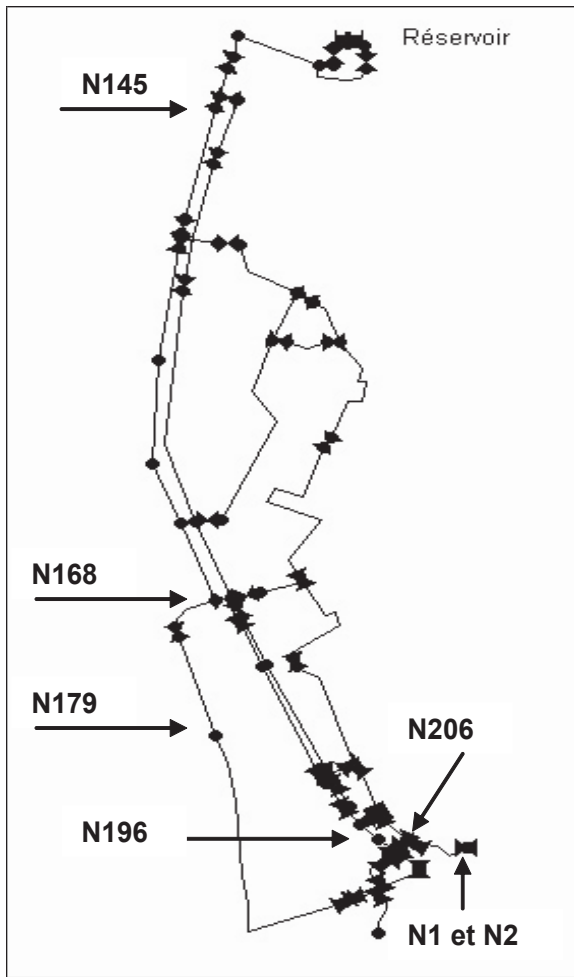


Figure 1 Schéma du réseau test.  
Test network map.

de l'intervalle admissible ont été présentés dans la littérature. CONSTANS (1999) a proposé l'intervalle [0,1-0,5] mg/L, ROUHIAINEN et TADE (2003) ont adopté l'intervalle [0,1-0,6] mg/L alors que PROPATO (2003) a considéré l'intervalle [0,2-0,4] mg/L. Pour la présente application, nous adoptons l'intervalle [0,1-0,5] mg/L, dont la moyenne correspond au taux optimum estimé à 0,3 mg/L. D'autre part, le coefficient de réaction du chlore libre avec l'eau  $K_b$  a été considéré égal à  $-0,2 \text{ h}^{-1}$  (NOUIRI *et al.*, 2003). Le coefficient de réaction avec les parois des conduites,  $K_w$ , est défini en fonction de la nature et de l'âge de la conduite.

### 6.1 Condition actuelle de chloration

Actuellement, le gestionnaire du réseau étudié impose une consigne constante du taux de chlore libre à la sortie du réservoir. Le logiciel EPANET 2 a permis de calculer les sommes des carrés des écarts  $E(NN,T)$  pour les consignes 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 et 0,8 mg/L. L'examen de la figure 2 permet de constater que la consigne 0,5 mg/L assure les sommes des carrés des écarts les plus faibles durant la majorité des pas de temps. Au cours de la troisième journée de simulation (48 à 71 heures), cette consigne assure la meilleure homogénéité

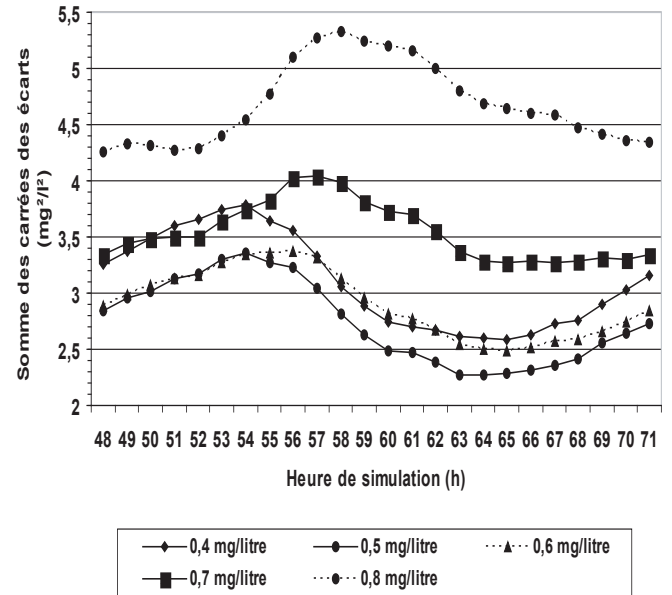


Figure 2 Somme des carrés des écarts pour différentes consignes de chloration.  
Sum square deviation for different chlorination scheduling.

spatio-temporelle de la chloration, avec la somme des carrés des écarts la plus faible égale à 65,9  $\text{mg}^2/\text{L}^2$ .

L'examen de la figure 3 révèle qu'à l'extrémité aval du réseau (N206) le taux de chlore libre simulé est toujours inférieur à la limite minimale de l'intervalle admissible.

D'autre part, la distribution spatiale du taux de chlore libre après 60 heures de simulation montre que 27 % des nœuds présentent des taux inférieurs à 0,1 mg/L. Avec ce mode de gestion (chloration constante à la sortie du réservoir), la seule

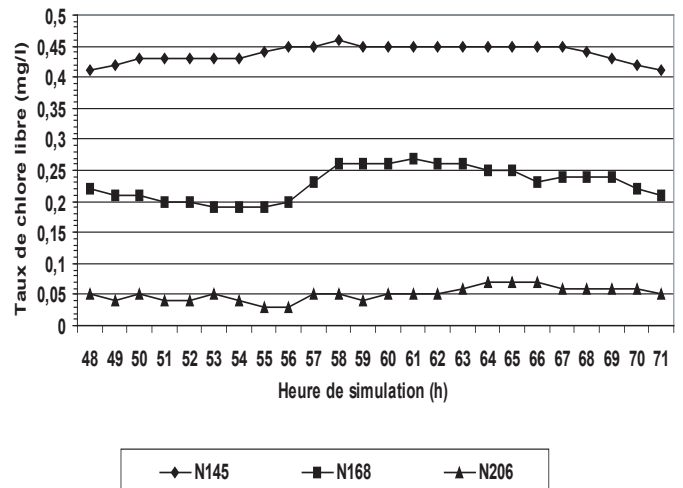


Figure 3 Taux de chlore libre au niveau des nœuds de contrôle.  
Free chlorine rates in control nodes.

possibilité de corriger le déficit de chloration est d'augmenter la consigne à la sortie du réservoir. La simulation d'une consigne égale à 0,8 mg/L a conduit à une augmentation à des taux inacceptables aux premiers nœuds de consommation (0,73 mg/L). En plus, ce scénario soumet 26 % des nœuds à des taux supérieurs à 0,5 mg/L et 10 % d'entre eux à des taux inférieurs à 0,1 mg/L. Ainsi, pour toutes les consignes de chloration simulées une partie importante des nœuds de consommation reste soumise à des taux en dehors de l'intervalle admissible. La gestion actuelle de la chloration sur le réseau test peut être jugée non satisfaisante.

6.2 Application du modèle d'optimisation

Avant son utilisation, l'AG a nécessité la définition de la probabilité des croisements (0,9), celle des mutations (0,05), la taille de la population (100) et le nombre maximal de générations (300). De plus, lors de la présente application, il est donné la même importance à l'homogénéité de la chloration et à la réduction du nombre de stations d'appoint ( $p_1 = p_2 = 0,5$ ). D'autre part, les consignes de tous les points d'application du chlore sont considérées constantes égales à 0,5 mg/L.

L'application du modèle d'optimisation sur le réseau test a révélé trois phases d'évolution de la performance maximale de la population. Une première phase d'évolution rapide se situe entre les générations 1 et 40. Un ralentissement de l'évolution est enregistré entre les générations 41 et 100. Au cours de la troisième phase, on assiste à une stagnation de la performance maximale de la population pendant 50 générations. L'AG arrête alors la recherche au bout de 150 générations. (Figure 4).

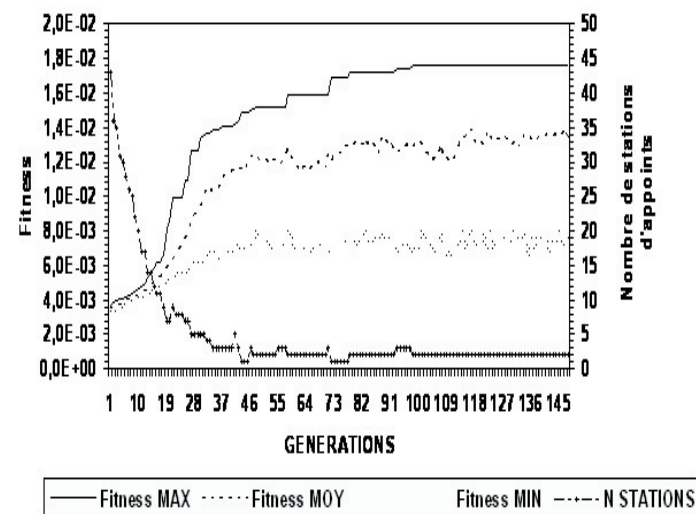


Figure 4 Évolution des performances des populations. Evolution of the population fitness functions.

La solution optimale déterminée par le modèle d'optimisation consiste en la création de deux points d'application de chlore au niveau des nœuds N179 et N196 (Figure 1). La simulation de cette configuration optimale a permis d'améliorer considérablement l'état de la chloration sur le réseau de distribution par :

1. La réduction de la somme des carrés des écarts pour la même journée de simulation qui est passée de 65,9 mg<sup>2</sup>/L<sup>2</sup>, avec la chloration unique à partir du réservoir, à 38,8 mg<sup>2</sup>/L<sup>2</sup> en présence des deux stations d'appoint. Les répartitions horaires des sommes des carrés des écarts pour la chloration initiale et pour le scénario optimal sont présentées à la figure 5.
2. Au niveau des nœuds de contrôle, les taux de chlore libre sont toujours compris dans l'intervalle admissible (Figure 6).

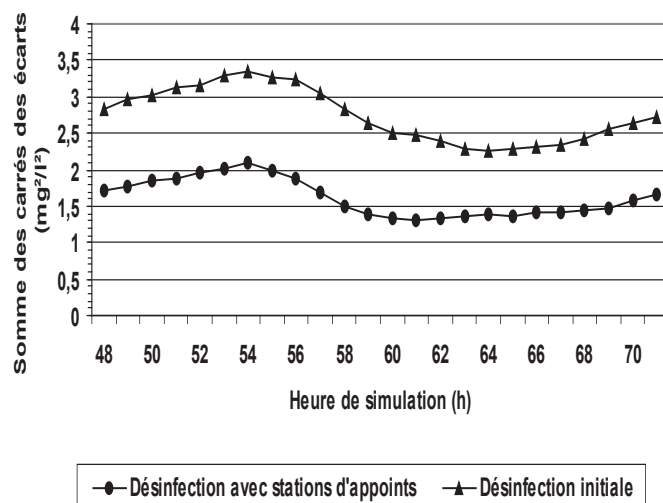


Figure 5 Somme des carrés des écarts pour les deux scénarios de chloration. Sum square deviation of the two chlorination approaches.

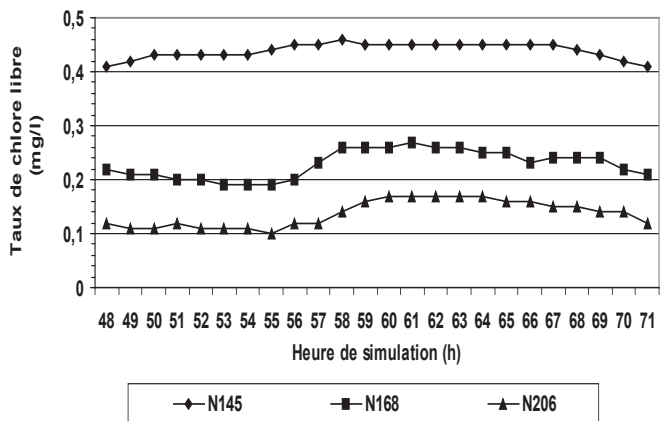


Figure 6 Taux de chlore libre au niveau des points de contrôle avec les stations d'appoints. Free chlorine concentrations at control nodes with booster stations.



3. Le pourcentage des nœuds soumis à des taux de chlore libre en dehors de l'intervalle  $[0,1 - 0,5]$  mg/L est de moins de 2 %. Seuls les nœuds N1 et N2, caractérisés par des temps de séjour qui ont atteint 19,2 h, présentent des taux de chlore libre inférieurs à 0,1 mg/L (Figure 1).

## 7. CONCLUSION

Cet article a présenté un AG pour la détermination des emplacements optimaux des stations d'appoint de chlore sur les réseaux d'eau potable. Deux objectifs ont été considérés : (1) l'amélioration de l'homogénéité de la chloration et (2) la réduction du nombre de stations d'appoint de chlore sur le réseau. Le modèle a été testé sur un réseau de distribution où l'injection de chlore est initialement assurée au niveau d'un réservoir. Le gestionnaire y maintient un taux de chloration constant de 0,5 mg/L. Ce mode de gestion a été caractérisé par une somme des carrés des écarts égale à  $65,9 \text{ mg}^2/\text{L}^2$ , avec 27 % des nœuds soumis à des taux inférieurs à 0,1 mg/L. De plus, il a été démontré que l'adoption d'une consigne plus élevée (0,8 mg/L) ne permet pas d'améliorer la situation. L'application du modèle d'optimisation a permis de déterminer les emplacements de deux stations d'appoint de chlore, avec des consignes constantes (0,5 mg/L). La simulation de la solution optimale a révélé la réduction de la somme des carrés des écarts à  $38,8 \text{ mg}^2/\text{L}^2$  et a assuré au niveau de plus de 98 % des nœuds des taux de chlore libre compris dans l'intervalle  $[0,1 - 0,5]$  mg/L.

L'AG proposé a montré son efficacité pour l'identification des emplacements optimaux des stations d'appoint de chlore sur les réseaux de distribution. Ce modèle constitue une première étape de l'optimisation de l'homogénéité de la chloration, essentiellement sur les réseaux caractérisés par des inhomogénéités importantes des taux de chlore libre. L'utilisation de cet outil nécessite la modélisation hydraulique du réseau, la simulation du comportement du chlore libre et la définition des coefficients de réaction du chlore et les paramètres de l'AG. L'optimisation des consignes des points d'application du chlore est une étape ultérieure au présent travail. Cette opération est réalisée en fonction de la modulation de la demande ou suite à des modifications importantes des régimes hydrauliques. Lorsqu'il s'agit d'une gestion en temps réel de la chloration, l'optimisation des consignes peut être actualisée même à des pas de temps horaires.

## 8. BIBLIOGRAPHIE

BACK T., FOGEL D. B. et MICHALEWICZ T., 2000. Evolutionary Computation 1: Basic algorithms and

operators. Institute of Physics Publishing, United Kingdom, 339 p.

BISCOS C., MULHOLLAND M., LE LANN M.-V., BUCKLEY C.A. et BROUCKAERT C. J., 2003. Optimal operation of water distribution networks by predictive control using MINLP. *Water SA*, 29, 393-404.

BRION L. M. et MAYS L. W., 1991. Methodology for optimal operation of pumping stations in water distribution systems. *J. Hydraul. Eng.-ASCE*, 117, 1551-1569.

BREMOND B., PILLIER O. et KOUBSKA P., 1998. Modelization of the behaviour of chlorine dioxide in a drinking water supply. First IWSA international conference on master plans for water utilities. Praha, Czech Republic, 17-18 June 1998, Compte rendu.

BOCCELLI D. M., TRYBY M., UBER J., ROSSMAN L., ZIEROLF M. et POLYCARPOU M., 1998. Optimal scheduling of booster disinfection in water distribution systems. *J. Water Resour. Plan. Manage.-ASCE*, 124, 111-1998.

BOULOS P. F., WU Z., ORR C. H., MOORE M., HSIUNG P. et THOMAS D., 2002. Optimal pump operation of water distribution systems using Genetic Algorithms. H2ONET - Users Guide, MW Software Inc.

CONSTANS S., 1999. Concentration en chlore en réseaux d'eau potable. Simulation et optimisation. Thèse de Doctorat, Univ. Bordeaux I, France, 153 p.

DREO J., PETROWSKI A., SIARRY P. et TAILLARD E., 2003. Métaheuristiques pour l'optimisation difficile : Recuit simulé, recherche avec tabous, algorithmes évolutionnaires et algorithmes génétiques, colonies de fourmis. Eyrolles, Paris, 356 p.

GOLDBERG D. E., 1991. Genetic Algorithms. Addison-Wesley, USA, 417 p.

GUHL F., 1999. Gestion optimale des réseaux d'eau potable. Thèse de Doctorat, Univ. Louis Pasteur, France, 166 p.

HRSTKA O. et KUCEROVA A., 2004. Improvements of real coded genetic algorithms based on differential operators preventing premature convergence. *Adv. Eng. Softw.*, 35, 237-246.

KOOIJ V. D., 2003. Heterotrophic Plate Counts and Drinking-water Safety. World Health Organization (WHO). J. Bartram, J. Cotrivo, M. Exner, C. Fricker, A.

- Glasmacher (Éditeurs), IWA Publishing, London, UK. ISBN : 1 84339 025 6.
- LANSEY K. E. et AWUMAH K., 1994. Optimal pump operations considering pump switches. *J. Water Resour. Plan. Manage.-ASCE*, 120, 17-35.
- LIONG S., Y. et ATIQUZZAMAN M., 2004. Optimal design of water distribution network using shuffled complex evolution. *J. Inst. Eng. Singapore*, 44, 93-107.
- MEIER R. W. et BARKDOLL B. D., 1999. System Calibration Sampling Design by Genetic Algorithm. *J. Water Resour. Plan. Manage.-ASCE*, 30, 42.
- MORLEY M. S., ATKINSON R. M. et WALTER G. A., 2001. GAnet: genetic platform for pipe optimisation. *Adv. Eng. Softw.*, 32, 467-475.
- MUNAVALLI G. R. et KUMAR M. S. M., 2003. Optimal Scheduling of Multiple Chlorine Sources in Water Distribution Systems. *J. Water Resour. Plan. Manage.-ASCE*, 129, 493.
- NOUIRI I., LEBDI F. et HADDAD R., 2003. La modulation de la chloration aux départs des conduites de distribution : Une approche pour la désinfection optimale. Actes du colloque international Gouvernance de l'eau et développement durable. 9-10 octobre, Sousse, Tunisie.
- OSTFELD A. et SALOMONS E., 2004. Optimal Scheduling of Pumping and Chlorine Injections under Unsteady Hydraulics. World Water and Environmental Resources Congress 2004. June 27-July 1, Salt Lake City, Utah, USA.
- PELIKAN M., GOLDBERG D. E. et TSUTSUI S. (2003) Getting the best of both worlds : Discrete and continuous genetic and evolutionary in concert. *Inform. Sciences*, 156, 147-171.
- PROPATO M., 2003. Operation of Booster Disinfection Systems: From Offline Design to Online Control. Thèse de Doctorat, Univ. Cincinnati, États-Unis, 165 p.
- REIS L. F. R., PORTO R. M. et CHAUDHRY F. H., 1997. Optimal Location of Control Valves in Pipe Networks by Genetic Algorithm. *J. Water Resour. Plan. Manage.-ASCE*, 123, 317.
- ROSSMAN L. A., 2000. EPANET User's manual. Cincinnati, EPA-600/R-00/057. National Risk Management Research laboratory, United States Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio.
- ROUHIAINEN C. et TADE M. O., 2003. Genetic Algorithms for optimal scheduling of chlorine dosing in water distribution systems. 20th Convention of the Australian Water Association, 6-10 avril, Perth, Australia.
- SADIC R. et RODRIGUEZ M. J., 2004. Fuzzy synthetic evaluation of disinfection by-products – a risk-based indexing system. *J. Environ. Manage.*, 73, 1-13.
- SAVIC D. A. et WALTERS G. A., 1997. Genetic Algorithms for Least-cost Design of Water Distribution Networks. *J. Water Resour. Plan. Manage.-ASCE*, 123, 67-77.
- SCHAETZEN W. B. F., WALTERS G. A. et SAVIC D. A., 2000. Optimal sampling design for model calibration using shortest path, genetic algorithm and entropy algorithms. *UrbanWater*, 2, 141-152.
- TRYBY M., BOCCELLI D. M., UBER J. et ROSSMAN L., 2002. A facility location model for booster disinfection of water supply networks. *J. Water Resour. Plan. Manage.-ASCE*, 128, 322- 333.
- TURGEON S., RODRIGUES M. J., THERIAULT M. et LEVALLOIS P., 2004. Perception of drinking water in the Quebec City region (Canada): the influence of water quality and consumer location in the distribution system. *J. Environ. Manage.*, 70, 363-373.
- VASCONCELOS J. J., ROSSMAN L. A., GRAYMAN W. M., BOULOS P. F. et CLARK R., 1997. Kinetics of chlorine decay. *J. Am. Water Works Ass.*, 89, 5-65.
- VAN VUUREN S. J., 2002. Application of genetic algorithms – Determination of the optimal pipe diameters. *Water SA*, 28, 217-226.
- WIGLE D. T., 2001. Une eau potable saine : un défi pour la santé publique. *Maladies chroniques au Canada*, 19, 3.
- YU G., POWELL R. S. et STERLING M. J. H., 1994. Optimal pump scheduling in water distribution systems. *J. Optimiz. Theory App.*, 83, 463-488.