



CONCEPTION OPTIMALE DE REDONDANCE DANS DES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES PARALLÈLES-SÉRIES À L'AIDE DES MÉTAHEURISTIQUES

KHALED GUERRAICHE¹, MOSTEFA RAHLI¹, LATIFA DEKHICI², ABDELKADER ZEBLAH¹

Mots clés: Optimisation combinatoire, Métaheuristique, Algorithme du pas ou vol évolutionnaire généralisé, Algorithme de chauves souris, Fiabilité, Système multi- états, Méthode d'Ushakov.

Nous présentons dans cet article une hybridation de deux métaheuristiques relativement récentes qui sont l'algorithme de chauve-souris (BAT algorithm) et l'algorithme du pas ou vol évolutionnaire généralisé (generalized evolutionary walk algorithm, GEWA) pour la conception optimale de redondance des systèmes électriques parallèles-séries. Afin d'évaluer la fiabilité du système multi-état parallèle-série hétérogène, nous utilisons la méthode d'Ushakov. L'objectif de la conception est de minimiser le coût d'investissement du système de production-transport d'énergie électrique à partir des turbines à gaz en tenant compte des indices de la fiabilité. Les composants de chaque sous système électrique sont caractérisés par leur fiabilité, coût et performance (capacité). La fiabilité est définie comme la capacité à satisfaire la demande du consommateur qui est donnée par une courbe de charge cumulative. En comparant avec d'autres algorithmes cités dans la littérature, les résultats montrent que la méthode proposée est efficace pour résoudre le problème d'optimisation de redondance de la fiabilité.

1. INTRODUCTION

Au cours de la dernière décennie, beaucoup de travail a été consacré à l'optimisation et l'analyse de la fiabilité des systèmes multi-états (SME) parallèles-séries. On considère qu'un système et ses composants peuvent occuper plusieurs états avec différents niveaux de performances, allant du fonctionnement parfait à la défaillance complète. Par contre, dans la représentation traditionnelle de la fiabilité des systèmes dits binaires, seulement deux états sont admis: fonctionnement nominal et défaillance complète. Une modélisation du système de production comme un système multi-états parallèle-série permet de tenir compte de ses différents fonctionnements dégradés. Bien que la modélisation d'un système de production comme un SME soit plus complexe et conduise à des calculs plus coûteux par rapport au cas binaire, elle est plus proche de la réalité industrielle [1]. Les méthodes métaheuristiques sont des méthodes appliquées pour résoudre des problèmes d'optimisation des systèmes multi-états très complexes et pour éviter les inconvénients des méthodes numériques classiques. Ces méthodes en général n'exigent pas la convexité de la fonction objectif possédant une grande probabilité pour converger vers le minimum global. Ainsi elles n'utilisent pas des méthodes numériques déterministes mais utilisent des règles probabilistes pour la recherche de l'optimum. Ces méthodes sont convenables pour résoudre les problèmes dans les réseaux électriques [1, 2].

De nombreuses métaheuristiques ont été utilisées dans l'optimisation des systèmes multi-états parallèles-séries telles que: algorithme génétique [3], optimisation par essaim de particules et la recherche locale [4], la recherche d'harmonie [5], optimisation par colonies de fourmis [6], la recherche tabou [7], algorithme immunitaire [8], optimisation par l'algorithme de firefly et l'algorithme de chauves-souris [9, 10]. L'approche que nous proposons hybride deux nouvelles métaheuristiques (BAT et GEWA) pour résoudre le problème d'optimisation de redondance. L'algorithme doit trouver la conception optimale de la structure multi-état parallèles-séries qui peut être un système de production

et transport d'énergie qui se compose de cinq sous-systèmes. La solution optimale correspond au coût minimum du système parallèle-série, tout en satisfaisant la fiabilité du système. Pour évaluer la fiabilité des systèmes multi-états parallèles-séries, une procédure rapide d'estimation de la fiabilité est développée. Cette procédure est basée sur une technique mathématique de la transformée de Laplace (méthode d'Ushakov), la fonction génératrice universelle (UMGF), elle s'est avérée très efficace pour les problèmes combinatoires de grande dimension [11, 12].

Pour présenter notre contribution au problème de la conception des systèmes énergétiques, nous décrivons dans la section suivante l'hybridation de l'algorithme de chauve-souris et l'algorithme du pas ou vol évolutionnaire généralisé. La deuxième section du document consiste en une description générale du modèle utilisé et dans la formulation du problème d'optimisation de redondance. Dans la troisième section, nous décrivons la méthode d'estimation de la fiabilité à l'aide de la technique Ushakov. Dans la dernière section, nous expérimentons notre approche sur un système industriel de production électro-énergétique, et une étude comparative entre l'algorithme proposé et d'autres algorithmes publiés dans la littérature.

2. L'HYBRIDATION DE L'ALGORITHME DE CHAUVES-SOURIS ET L'ALGORITHME DU PAS OU VOL ÉVOLUTIONNAIRE GÉNÉRALISÉ (BAG)

2.1. L'ALGORITHME DE CHAUVES-SOURIS

L'algorithme de chauve-souris ou bat algorithm (BAT) est une métaheuristique à population qui a été présentée la première fois par [13] et a été testée sur des fonctions de référence. L'algorithme de chauve-souris standard a été appliqué dans beaucoup de domaine de l'optimisation tels que les problèmes de distribution économique des charges [14], l'optimisation de la floraison du filtre [15]. Marichelvam et Prabaharan [16] ont utilisé cet algorithme pour minimiser la durée et le temps moyen dans

¹ Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Laboratoire LORE, B.P 1505 El Mnaouar, Oran, Algérie. E-mail: khaled.guerraiche@univ-usto.dz

² Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Laboratoire LAMOSI, B.P 1505 El Mnaouar, Oran, Algérie

l'ordonnement des flow shop. Nous pouvons trouver son application aussi dans l'emplacement de condensateurs pour l'optimisation et la réduction des pertes dans les systèmes de distribution [17] et dans la modélisation énergétiques [18]. L'algorithme BAT a été utilisé dans la conception des systèmes énergétiques [1, 13, 10, 19].

2.1.1. ÉCHOLOCATION DES CHAUVES-SOURIS

Une chauve-souris virtuelle vole de façon aléatoire à la position (solution) x_i avec une vitesse V_i , une fréquence variable ou une longueur d'onde F_i et une intensité A_i . En cherchant sa proie, la chauve-souris change de fréquence, de taux d'émission d'impulsions r et d'intensité. La recherche est amplifiée par un vol aléatoire local [20]. Bien que le volume puisse varier à bien des égards, il est supposé que l'intensité sonore varie d'une grande borne d'intensité A_0 (positive) à une borne minimale constante A_{min} . Une autre hypothèse est que la fréquence de la chauve-souris artificielle F_i dans l'intervalle $[F_{min}, F_{max}]$ correspond à la longueur d'onde (en kHz) des chauves-souris réelles [13].

2.1.2. PARAMÈTRES DE L'ALGORITHME DE BAT

La fréquence f est un nombre entier ou un nombre réel en fonction des fréquences sélectionnées minimale et maximale.

$$F_i = F_{min} + (F_{max} - F_{min}) \text{rand}(\cdot), \text{rand} \in [0,1] \quad (1)$$

$\text{rand}(\cdot)$ étant un générateur de nombre aléatoire entre 0 et 1.

La vitesse V_i de chaque chauve-souris est représentée par un nombre entier positif. La vitesse permet de définir le pas de déplacement de chauve-souris. Les chauves-souris communiquent entre eux grâce à la meilleure position (solution) g_{best} globale.

$$V_i = V_i + (X_i - g_{best})F_i \quad (2)$$

La position est mise à jour selon l'équation

$$X_i = \text{best}_i + V_i \quad (3)$$

Il peut être autour de la meilleure solution globale en utilisant l'intensité. $\text{Random}(\text{min}, \text{max})$ étant un générateur entre deux borne min et max, le déplacement est :

$$X_i = g_{best} + \text{random}(-1, 1) \cdot A_{moy}, \quad (4)$$

ou de manière aléatoire:

$$X_i = \text{best}_i + \text{random}(-1, 1) \cdot A_{moy}. \quad (5)$$

A_i est le volume sonore moyen de toutes les chauves-souris. Il dispose d'une gamme, entre le maximum et le volume minimum.

$$A_i = \alpha A_i, \quad \alpha \in [0,1] \quad (6)$$

r_i et la valeur du taux de pulsation joue un rôle dans le choix de recherche locale entre équation (4) ou équation (5) [13, 20]. La valeur de r est mise à jour à chaque itération

$$r_i = r_i^0 \left(1 - e^{(-\gamma \cdot itr)}\right), \quad (7)$$

avec r_i^0 taux initial de la pulsation, $\gamma > 0$.

2.2. L'ALGORITHME DU PAS ÉVOLUTIONNAIRE GÉNÉRALISÉ

L'algorithme du pas évolutionnaire généralisé (generalized evolutionary walk algorithm, GEWA) est une métaheuristique générique d'optimisation développée par [21]. Il a été utilisé dans [22–24]. Il est basé sur une recherche globale aléatoire qui remplace les mauvaises solutions d'une population de marcheurs (walkers). C'est une généralisation de la recherche locale autour de la meilleure position. Le pas aléatoire est généré par l'équation suivante :

$$w^t = \varepsilon^t d \quad (8)$$

La nouvelle position des mauvais marcheurs est générée selon l'équation suivante :

$$x_{worst}^t = g_{best}^{t-1} + w^t, \quad (9)$$

où ε^t est de la distribution normale $N(0, \delta^2)$ ou Gaussienne. La longueur du pas est appelé d qui est un vecteur lié à la dimension du domaine de définition. On peut prendre $\delta = 1$, tout simplement. Un autre pas du mauvais marcheur peut suivre l'équation suivante :

$$x_{worst}^t = w_{min} + (w_{max} - w_{min}) \varepsilon^t \quad (10)$$

où w_{max} et w_{min} sont les bornes du domaine de définition.

L'algorithme GEWA dépend de seulement deux paramètres : la taille de la population des marcheurs et α pour le contrôle typique, on utilise $\alpha = 0,5$.

2.3. HYBRIDATION DE BAT ET GEWA ALGORITHME (BAG)

Dekhici et Belkadi [22, 23] ont ajouté à l'algorithme classique des chauves-souris un vol aléatoire de la mauvaise chauve-souris comme indiqué dans l'algorithme GEWA représenté dans Fig. 1. Les mauvaises chauves-souris volent avec une probabilité α_g autour de la meilleure chauve-souris sinon aléatoirement dans le domaine. Alors que les autres suivront les principes de l'algorithme de chauves-souris.

Algorithme de BAG

BAG (*Nbr_iter*: nombre d'itérations, *nb*: nombre de chauves-souris)

$w_{min}, w_{max}, \delta, d, \alpha$: coefficients GEWA à initialiser

Définir la fonction objectif $f(x)$, $X = (X_1, \dots, X_{nb})$

Générer la population de chauves-souris x_i et leurs vitesses v_i

$0 < \alpha < 1$; $\gamma > 0$ //par exemple $\alpha = \gamma = 0.9$

Initialiser $F_{min} = 0$; $F_{max} = 100$; //peut être ajustée

Définir la fréquence d'impulsion $F_i = F_{min} + (F_{max} - F_{min}) \text{rand}(\cdot)$

Initialise l'impulsion: $r_{i0} \in [0,1]$ et intensités: $A_i \in [1,2]$

Evaluer la fonction objectif $\text{Fitness}(i) \leftarrow f(x_i)$, $\text{best}_i \leftarrow x_i$

Déterminer la meilleure fitness globale $fg_{best} \leftarrow \min(f_i)$ et sa position g_{best}

Et la mauvaise fitness $fg_{worst} \leftarrow \max(f_i)$

Tant que ($\text{iter} < \text{Nbr_iter}$) **faire**

$\varepsilon_{\text{iter}} \leftarrow \text{uniform}(0, \delta^2)$

```

Pour  $i \leftarrow 1$  à  $nb$  faire
si ( $f(x_i) == fgworst$ )
si ( $rand < \alpha$ )  $w \leftarrow \varepsilon_{iter} d$  //marche dépend du pas  $d$ 
 $x_i \leftarrow gbest + w$  //pas autour du meilleur
sinon
 $x \leftarrow w_{min} + (w_{max} - w_{min}) \varepsilon_{iter}$  //marche aléatoire
dans le domaine
Fin Condition
sinon
 $f_i \leftarrow F_{min} + (F_{max} - F_{min}) rand()$  //  $rand \in [0,1]$ , fréquences ajustée
 $v_i \leftarrow v_i + (x_i - g_{best}) f_i$  //Mise a jour de la vitesse
 $x_i \leftarrow best_i + v_i$  //Générer nouvelle chauves-souris
si  $rand > r_i$ 
 $x_i \leftarrow g_{best} + random(-1,1).A_{moy}$ 
sinon
 $x_i \leftarrow best_i + random(-1,1).A_{moy}$ 
Fin Condition
si  $rand < A_i$  et  $f(x_i) < fitness(i)$ 
 $best_i \leftarrow x_i$  //Accepter nouvelles solutions
 $r_i \leftarrow r_i^0 (1 - \exp(-\gamma.iter))$  // Incrémenter  $r_i$ 
 $A_i \leftarrow \alpha A_i$  //  $\alpha \in [0, 1]$ , réduire  $A_i$ 
Fin Condition
Fin Condition
Fin Boucle
Classer les chauves-souris et trouver la meilleure solution courante
 $g_{best}$ 
 $iter++$ 
Fin Boucle
Fin

```

Fig. 1 – Hybridation de l'algorithme GEWA et BAT (BAG).

3. PROBLÈME DE CONCEPTION DES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES

Considérons un système d'énergie contenant N composants électriques connectés en parallèle-série. Chaque composant i est un sous-système qui contient un certain nombre de différents éléments connectés en parallèle. Tous les éléments d'un sous-système donné appartiennent à différentes versions des éléments (générateurs, transformateurs et lignes). Un élément j du sous-système i est caractérisé par sa fiabilité ou sa disponibilité (A_{ij}) ou (R_{iv}), son coût (C_{ij}) et sa performance (G_{ij}) ou (Ξ_{ij}). La structure du sous-système i peut être définie par le nombre de composants identiques parallèles k_{ij} pour $1 \leq j \leq V_i$, où V_i est le nombre de versions disponibles de composants de type i .

3.1. CONCEPTION OPTIMALE

Le problème d'optimisation du système d'énergie électrique multi-état parallèle-série peut être formulé comme suit : trouver la configuration k_1, k_2, \dots, k_N du système qui correspond à l'occurrence des éléments tout en minimisant le coût total (équation 11), et de telle sorte que la disponibilité correspondante dépasse ou est égale une disponibilité spécifiée A_0 .

Minimiser

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{V_i} k_{ij} C_{ij}, \quad (11)$$

sous contrainte

$$\prod_{i=1}^n \left[\prod_j^{j_i} P_j Q_j \min_{i=1}^n \sum_{i=1}^j G_{ij} \right] \geq A_0. \quad (12)$$

P_i et Q_j sont des probabilités des niveaux de performance possibles pour les dispositifs i et j ; z est la transformée de Laplace.

4. TECHNIQUE D'ESTIMATION DE LA FIABILITÉ

L'étude de la fiabilité des systèmes parallèles-séries, multi-états a été abordée dans les années 70 et s'est avérée complexe [25, 26]. Le comportement des SME et de leurs composants sont modélisés par plus de deux états avec des niveaux de performances différents associés à chacun de ces états. Dans la littérature, les configurations structurelles des SME sont variées. Plusieurs travaux étudient les configurations parallèles-séries, multi-états et en pont. A est l'indice de disponibilité pour le système énergétique parallèle-série. La probabilité que la capacité totale du système d'énergie électrique ne soit pas inférieure au niveau de la demande de charge W est calculée comme suit [27]:

$$R(W) = P\{G > W\} = 1 - P\{G \leq W\}. \quad (13)$$

La fonction génératrice universelle (UMGF) a été développée et introduite par Ushakov [28]. Les principes de son application ont été formulés dans [29]. La fonction génératrice universelle (UMGF) est présentée comme une méthode très pratique dans les cas d'applications numériques.

Par définition l'UMGF d'une variable aléatoire G est défini par le polynôme :

$$u(z) = \sum_{j=1}^J P_j z^{G_j}, \quad (14)$$

où la variable G représente la performance et peut prendre J états possibles. P_j est la probabilité de l'état G_j .

Lorsque Φ est un opérateur distributif défini par les expressions (16) et (17) [28]:

$$\Phi(P_j z^{G-W}) = \begin{cases} P, & \text{si } G \geq W \\ 0, & \text{si } G < W \end{cases}. \quad (15)$$

Pour évaluer la disponibilité d'un système multi-état parallèle-série, deux opérateurs de base sont introduits. Ces opérateurs déterminent le polynôme $u(z)$ pour un groupe de dispositifs [28].

4.1. DISPOSITIF PARALLÈLE

La fonction génératrice universelle (UMGF) d'un système SME contenant j_n éléments en parallèle peut être calculée par l'opérateur \mathfrak{Z} [11]:

$$u_p(z) = \mathfrak{Z}(u_1(z), u_2 \dots u_n(z)), \quad \mathfrak{Z}(G_1, G_2, \dots, G_n) = \sum_{i=1}^n G_i.$$

Pour un système de deux éléments en parallèle L'UMGF est donnée par :

$$\Phi \left(\sum_{j=1}^j P_j z^{G_j} - W \right) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_i Q_j z^{a_i + b_j}. \quad (16)$$

Les paramètres a_i et b_j sont physiquement interprétés comme les performances des deux dispositifs. n et m sont le nombre de niveaux de performance possibles pour ces périphériques. P_i et Q_j sont des probabilités des niveaux de performance possibles pour les dispositifs.

4.2. DISPOSITIF SÉRIE

L'UMGF d'un système multi-états contenant m éléments en série peut être calculé par l'opérateur δ [11]:

$$u_S(z) = \delta(u_1(z), u_2(z), \dots, u_m(z)),$$

où $\delta(G_1, G_2, \dots, G_m) = \min(G_1, G_2, \dots, G_m)$.

Pour un système de deux éléments L'UMGF est donnée par :

$$\begin{aligned} \delta(u_1(z), u_2(z)) &= \sum_{i=1}^n P_i z^{a_i} \sum_{j=1}^m Q_j z^{b_j} = \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_i Q_j z^{\min(a_i, b_j)}. \end{aligned} \quad (17)$$

On obtient L'UMGF d'un système parallèle-série en appliquant consécutivement les opérateurs \mathfrak{S} et δ .

5. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans cette partie, nous présentons une étude comparative entre l'algorithme hybride (BAT et GEWA) et des métaheuristiques publiées dans la littérature, afin de résoudre le problème de la redondance des systèmes multi états parallèles-séries. L'objectif est de sélectionner la combinaison optimale afin de minimiser le coût total et satisfaire une fiabilité désirée d'une structure parallèle-série.

5.1. EXEMPLE INDUSTRIEL DE PRODUCTION ÉLECTRO-ÉNERGÉTIQUE

Le système de production, transport qui alimente les consommateurs est conçu avec cinq sous-systèmes de base comme représenté sur Fig. 2.

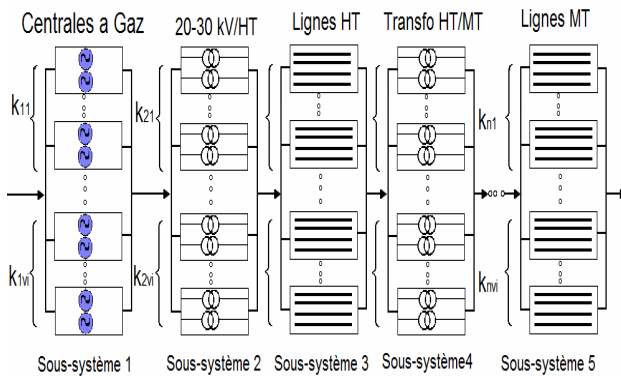


Fig. 2 – Système électro-énergétique parallèle-série [1].

5.2. DESCRIPTION DU SYSTÈME À OPTIMISER

Chaque dispositif du système est considéré comme une unité avec une défaillance totale. Les données des différentes versions de chaque sous-système sont présentées dans Tableau 1, qui montre que chaque équipement est caractérisé par la fiabilité R [%], la performance (capacité nominale) G [MW] et le coût C [million de dollar]. Tableau 2 illustre la demande cumulative annuelle de 8 760 h. La demande est de 100 % pour un pic annuel de 4 208 h qui se réduit à 80 % pendant 788 h, ainsi la réduction suit de 50 pendant 1 228 h et 20 % pendant 2 536 h. La fiabilité est mesurée par la probabilité que sa performance soit supérieure ou égale à la

demande W_m pour une période T_m . Le système d'énergie électrique peut être décrit comme suit:

À partir de la matière brute (fuel, gaz et eau pour une centrale thermique), l'électricité est produite par la 1ère colonne (sous-système 1), ensuite la transformation MT/HT par les transformateurs HT, (sous-système 2) et le transport par les lignes HT (sous-système 3), une deuxième transformation se produit par des transformateurs HT/MT (sous-système 4), la charge est alimentée à travers des lignes MT (sous-système 5).

Tableau 1

Les données des composants du système disponibles sur le marché [1]

Sous-système	Version	Fiabilité R [%]	Coût C [mln \$]	Performance G [MW]
Unités de production	1	0,980	0,590	120
	2	0,977	0,535	100
	3	0,982	0,470	85
	4	0,978	0,420	85
	5	0,983	0,400	48
	6	0,920	0,180	31
	7	0,984	0,220	26
Transformateurs HT	1	0,995	0,205	100
	2	0,996	0,189	92
	3	0,997	0,091	53
	4	0,997	0,056	28
	5	0,998	0,042	21
Lignes HT	1	0,971	7,525	100
	2	0,973	4,720	60
	3	0,971	3,590	40
	4	0,976	2,420	20
Transformateurs HT/MT	1	0,977	0,180	115
	2	0,978	0,160	100
	3	0,978	0,150	91
	4	0,983	0,121	72
	5	0,981	0,102	72
	6	0,971	0,096	72
	7	0,983	0,071	55
	8	0,982	0,049	25
	9	0,977	0,044	25
Lignes MT	1	0,984	0,986	128
	2	0,983	0,825	100
	3	0,987	0,490	60
	4	0,981	0,475	51

Tableau 2

Données de la demande cumulative annuelle [1]

W_m [%]	100	80	50	20
T_m [h]	4203	788	1228	2536

5.3. DISCUSSION DES RÉSULTATS

Notre fonction objective est de définir le coût minimal de conception du système de production et transport d'énergie électrique qui fournit le niveau de disponibilité requis. L'ensemble des résultats obtenus par l'algorithme hybride BAG proposé pour les différentes valeurs données de R_0 sont illustrés dans le Tableau 3. Ce dernier montre également l'indice de la fiabilité calculé R , le coût C total du système et leurs structures correspondantes. L'indice de fiabilité R_0 a été fixé à trois valeurs différentes, à savoir 0,975, 0,98 et 0,99. Les résultats de la simulation dépendent en grande partie des valeurs des paramètres de l'algorithme hybride BAT et GEWA (BAG). Nous définissons $\alpha = 0,9$, $\gamma = 0,9$ et $F_{max} = 100$ Hz. Bien que la combinaison des

valeurs des paramètres finement réglées conduise à une meilleure convergence des algorithmes métaheuristique, choisir la meilleure combinaison est très difficile et devient un inconvénient de ces algorithmes.

La comparaison entre la solution de l'algorithme BAG et les meilleures solutions obtenues par des chercheurs dans les références [3–7, 9] est fournie dans Tableau 3. On peut voir que l'algorithme proposé peut obtenir une meilleure solution que toutes les autres méthodes présentées dans la littérature à savoir (AG) l'algorithme génétique, (ACO) l'algorithme colonie de fourmis, (SP/TG) l'hybridation de la recherche tabou et l'algorithme génétique, (HS) l'algorithme recherche d'harmonies, (PSO/LS) l'hybridation de l'algorithme essais particuliers et la recherche locale et (FF) l'algorithme de lucioles. On notera que dans ces références proposées, chaque algorithme est de nature stochastique. L'algorithme de BAG pour le problème d'optimisation de redondance des éléments connectés en parallèle du système hétérogène parallèle-série multi-états (MSS) donne généralement de meilleures solutions avec un coût inférieur et une fiabilité raisonnable que les autres algorithmes.

Ainsi, du point de vue de la qualité de la solution, les algorithmes sont comparés avec le nombre d'itérations (500), et le nombre de populations (150). Il convient de souligner que même de très petites améliorations de la fiabilité est essentielles et bénéfiques dans le domaine de l'optimisation de la fiabilité. On peut voir que la méthode proposée peut obtenir une meilleure solution que toutes les autres méthodes présentées dans littérature. Amélioration maximale possible du coût (maximum possible cost improvement – MPC) est utilisée pour mesurer la quantité d'amélioration des solutions obtenues par la méthode présentée par rapport aux meilleures solutions trouvées par d'autres méthodes citées ci-dessus, et elle est décrite comme suit: $[(C_{\text{minimal}} - C_{\text{minimal}}) / (C_{\text{minimal}})]$, où C représente la meilleure valeur obtenue par l'algorithme proposé et C

représente la meilleure valeur obtenue par l'un des autres algorithmes. Pour une fiabilité de 0,975, le meilleur résultat trouvé par Levitin *et al.* [3], Ouzineb *et al.* [7], Wang *et al.* [4] et Guerraiche *et al.*, [9] étaient respectivement 12,855, 12,855, 12,855 et 12,7649. Le résultat obtenu par BAG est de 12,505, supérieur à la meilleure solution ci-dessus, et les améliorations correspondantes apportées par la méthode présentée sont de 2,72 %, 2,72 %, 2,72 % et 2,03 % respectivement.

6. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé un algorithme hybride BAT-GEWA, pour résoudre le problème d'optimisation de la conception de fiabilité des systèmes multi-états hétérogènes parallèles-séries.

L'originalité de notre approche est d'ajouter à l'algorithme classique des chauves-souris un vol aléatoire de la mauvaise chauve-souris. La comparaison de notre méthode avec six méthodes différentes (AG), (ACO), (SP/TG) (HS), (PSO/LS) et (FF) publiées dans la littérature, montre que l'hybridation des algorithmes est très efficace pour résoudre le problème d'optimisation de la fiabilité des systèmes parallèles séries. Actuellement, nous travaillons sur l'extension de ce travail à des systèmes multi-états homogènes parallèle-série. Comme autres pistes de recherche nous essayeront d'appliquer l'algorithme hybride BAG à d'autres problèmes d'optimisation multi-objectif.

Reçu le 16 décembre 2016

RÉFÉRENCES

1. K. Guerraiche, *Conception optimale des systèmes de production d'énergie électrique à l'aide de métaheuristiques*, Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Algérie, 2016.

Tableau 3

Comparaison de l'algorithme BAG avec les algorithmes cités dans la littérature

R_0	Structure	AG [3]	ACO [6]	SP/TG [7]	HS [5]	PSO/LS [4]	FF [9]	BAT	BAT/GEWA (BAG)
0,975	1	4(2),6(1)	4(2),6(1)	4(2),6(1)	4(2),6(1)	4(2),6(1)	2(1),7(1)	2(1)	2(1)
	2	5(6)	5(6)	5(6)	5(6)	5(6)	1(1),3(2)	1(2)	4(5)
	3	1(1),4(1)	1(1),4(1)	1(1),4(1)	1(1),4(1)	1(1),4(1)	1(1),4(1)	1(1),4(1)	1(1),4(1)
	4	7(3)	7(3)	7(3)	7(3)	7(3)	6(1),7(2)	1(1),2(1)	2(2)
	5	4(3)	4(3)	4(3)	4(3)	4(3)	3(1),4(2)	1(1),2(1)	4(3)
C (mln \$)		12,855	12,855	12,855	12,855	12,855	12,7649	13,686	12,505
R		0,9761	0,9761	0,976	0,976	0,976	0,9753	0,975	0,97515
MPCI (%)		2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,03	8,63	-
0,980	1	4(2),6(1)	4(2),6(1)	4(2),6(1)	4(2),6(1)	1(1),2(1)	2(1)	2(1),7(1)	2(1)
	2	3(2)	3(2)	3(2)	2(1),5(1)	2(1)	2(2),4(1)	2(1),5(2)	2(1),3(1),5(1)
	3	2(1),3(2)	2(1),3(2)	2(1),3(2)	3(1),2(2)	1(1),2(1)	2(1),3(2)	2(1),3(2)	2(1),3(2)
	4	7(3)	7(3)	7(3)	7(3)	3(1)	4(1),7(2)	3(2),9(1)	5(1),7(2)
	5	3(2),4(1)	3(2),4(1)	3(2),4(1)	2(1),4(1)	1(1),2(1)	3(1),4(2)	1(1),4(2)	3(1),4(2)
C (mln \$)		14,770	14,770	14,770	15,794	14,770	14,572	15,208	14,441
R		0,9820	0,9820	0,9820	0,9826	0,980	0,9817	0,980	0,980
MPCI (%)		2,23	2,23	2,23	8,56	2,23	0,9	5,04	-
0,990	1	4(2),6(1)	4(2),6(1)	4(2),6(1)	4(2),7(1)	1(1),2(1)	2(1)	1(1),7(4)	2(1)
	2	3(2)	3(2)	3(2)	2(1),5(1)	2(1)	2(5),4(3)	2(1),3(1),5(2)	3(2)
	3	2(2),3(1)	2(2),3(1)	2(2),3(1)	2(2),3(1)	1(1),2(1)	1(3),2(2)	2(2),3(1)	2(2),3(1)
	4	7(3)	7(3)	7(3)	7(3)	3(1)	2(6),9(3)	8(1),9(4)	6(1),7(2)
	5	4(3)	4(3)	4(3)	4(3)	3(1)	4(3)	2(1),3(2)	3(1),4(2)
C (mln \$)		15,870	15,870	15,870	15,959	15,870	15,560	16,894	15,425
R		0,990	0,990	0,9920	0,9931	0,992	0,992	0,990	0,991
MPCI (%)		2,88	2,88	2,88	3,34	2,88	0,86	8,69	-

2. A. Messaoudi, *Application de la programmation orientée objet et des méthodes heuristiques à l'optimisation de l'écoulement de puissance*, Thèse de doctorat, Université de Batna, 2013.
3. G. Levitin, A. Lisnianski, H. Ben Haim, D. Elmakis, *Structure optimization of power system with different redundant elements*, *Electric Power Systems Research*, **43**, 1, pp. 19–27, 1997.
4. Y. Wang, L. Li, *Heterogeneous redundancy allocation for series-parallel multi-state systems using hybrid particle swarm optimization and local search*, *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part*, **42**, 2, 2012.
5. A. Rami, *Design and metaheuristics methods optimization for electro-energetics system*, Thèse de doctorat, Université de Sidi Bel Abbes, Algérie, 2010.
6. M. Agarwal, V.K. Sharma, *Ant colony optimization algorithm for heterogeneous redundancy allocation in multi-state series-parallel systems*, *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, **16**, 2, pp.86–163, 2009.
7. M. Ouzineb, M. Nourelfath, M. Gendreau, *A Heuristic method for non-homogeneous redundancy optimization of series-parallel multi-state system*, *Journal of Heuristics*, **17**, 1, pp. 1–22, 2011.
8. A. Rami, A. Zebblah, H. Hamdaoui, Y. Massim, F. Harrou, *An efficient artificial immune algorithm for power system reliability Optimisation*, *International Journal of Power and Energy Conversion*, **1**, 2, pp. 178–197, 2009.
9. K. Guerraiche, M. Rahli, A. Zebblah, L. Dekhici, *Series-parallel power system optimization using firefly algorithm*, *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, **7**, 1, pp. 89–101, 2015.
10. K. Guerraiche, M. Rahli, A. Zebblah, L. Dekhici, *Budgetary and redundancy optimization of heterogeneous series-parallel power systems under availability constraints*, *International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability*, **74**, 1, pp. 547–554, 2015
11. A. Lisnianski, G. Levitin, *Multi-state system reliability*, World Scientific Publishing Co., 2003.
12. S.A. Reza, *Ant Colony for Optimization of Imperfect Preventive Maintenance for Multi-State Systems*, Thèse de doctorat, Université de Laval Québec, 2006.
13. X. S. Yang, *A new bat-inspired algorithm Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization*, *Studies Computational Intelligence* (Springer), **284**, pp. 65–74, 2010.
14. B. Ramesh, V.C.J. Mohan, V.C.V. Reddy, *Application of bat algorithm for combined economic load and emission dispatch*, *Int. J. of Electrical Engineering and Telecommunications*, **2**, 1, pp.1–9, 2013.
15. A. Natarajan, S. Subramanian, K. Premalatha, *A comparative study of cuckoo search and bat algorithm for Bloom filter optimisation in spam filtering*, *Int. J. Bio-Inspired Computation*, **4**, pp. 89–99, 2012.
16. M. K. Marichelvam, T. Prabaharam, *A bat algorithm for realistic hybrid flowshop scheduling problems to minimize makespan and mean flow time*, *ICTACT Journal on Soft Computing*, **3**, 1, pp. 428–433, 2012.
17. V.U. Reddy, A. Manoj, *Optimal capacitor placement for loss Reduction in distribution systems using bat algorithm*, *IOSR Journal of Engineering*, **2**, 10, pp. 23–27, 2012.
18. T.A. Lemma, Bin F. Mohd Hashim, *Use of fuzzy systems and Bat algorithm for exergy modelling in a gas turbine generator*, *IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering*, pp. 305–310, 2011.
19. K. Guerraiche, M. Rahli, A. Zebblah, L. Dekhici, *Bat algorithm to series- parallel power system design*, 6th Multi-Conference on Computational Engineering in Systems Applications, Marrakech, Morocco, March 2015, pp. 67–71.
20. L. Dekhici, *Reconfiguration et Ordonnancement Des Blocs Opérateurs*, Éditions Universitaires Européennes, 2016.
21. X.S. Yang, *Review of metaheuristics and generalised evolutionary walk algorithm.*, *Int. J. Bio-Inspired Comput.*, **3**, 2, pp. 77–84, 2011.
22. L. Dekhici, K. Belkadi, *Generalized evolutionary walk algorithm for economic power dispatching*, META'12, International Conference on Metaheuristics and Nature Inspired Computing, Port El Kantaoui, Tunisia, 2012.
23. L. Dekhici, K. Belkadi, *A bat algorithm with generalized walk for the two-stage hybrid flow shop problem*, *International Journal of Decision Support System Technology*, **7**, 3, pp. 1–16, 2015.
24. L. Dekhici, K. Belkadi, K. Guerraiche, *Economic power dispatching with generalized evolutionary walk algorithm*, 6th Multi-Conference on Computational Engineering in Systems Applications, Marrakech, Morocco, March 2015, pp. 62–66.
25. S.E. Barlow, A.S. Wu, *coherent systems with multi-state components*, *Mathematics of Operations Research*, **3**, 11, pp. 275–281, 1978.
26. E. El-Newehi, F. Proschan, J. Sethuraman, *Multistate coherent systems*, *Journal of Applied Probability*, **15**, 12, pp. 675–688, 1978.
27. G. Levitin, A. Lisnianski, H. Ben-Haim, D. Elmakis, *Redundancy Optimization for Series-Parallel Multi-State Systems*, *IEEE Transactions on Reliability*, **47**, 2, pp. 165–172, 1998.
28. I. Ushakov, *Universal generating function*, *Soviet Journal of Computing System Science*, **24**, 5, pp. 118–29, 1986.
29. I. Ushakov, *Reliability Analysis of Multi-State Systems by Means of a Modified Generating Function*, *Journal Information Process, Cybernet*, **34**, pp. 24–29, 1988.

OPTIMAL DESIGN OF REDUNDANCY SERIES-PARALLEL ELECTRICAL SYSTEMS USING METAHEURISTICS

Key words: Combinatorial optimization, Metaheuristics, Generalized evolutionary walk algorithm, Bat algorithm, Reliability, Multi- states system, Method of Ushakov.

We present in this article a hybridization of two relatively recent metaheuristics are the bat algorithm (BAT) and generalized evolutionary walk algorithm (GEWA) for optimal design redundancy series-parallel electrical systems. To assess the reliability of the multi-state heterogeneous series-parallel system, we use the method of Ushakov (UMGF). The design goal is to minimize the investment cost of the bulk power system of electrical energy from gas turbines taking into account the indices of reliability. The components of each sub power system are characterized by their reliability, cost and performance (capacity). Reliability is defined as the ability to satisfy consumer demand that is given by a cumulative load curve. Comparing with other algorithms reported in the literature, the results show that the proposed method is effective to solve the optimization problem of redundancy reliability.