

## CONCEPTION OPTIMALE DE LA FIABILITE D'UN PARC EOLIEN

Khaled GUERRAICHE<sup>1</sup>, Latifa DEKHICI<sup>2</sup>

*In this paper, the design objective is to maximize the reliability of the wind generation and power transmission series-parallel system under cost and performance constraints using the firefly algorithm. We consider the system where redundant electrical components are selected to achieve a desirable level of reliability. The electrical components of each system are characterized by their reliability, capacity and cost. In order to assess the reliability of the system, the Ushakov method (UMGF) is used. The results show that the proposed method is effective in solving the problem of redundancy optimization and reliability.*

*Dans cet article, l'objectif de la conception est de maximiser la fiabilité du système de production éolienne et le transport d'énergie parallèle-série sous les contraintes de coût et de performance en utilisant l'algorithme des lucioles. Nous considérons le système où les composants électriques redondants sont choisis pour atteindre un niveau de fiabilité souhaitable. Les composants électriques de chaque système sont caractérisés par leur fiabilité, capacité et leur coût. Afin d'évaluer la fiabilité du système, nous utilisons la méthode d'Ushakov (FGUM). Les résultats montrent que la méthode proposée est efficace pour résoudre le problème d'optimisation de redondance de la fiabilité.*

**Mots clés :** Parc éolien, Algorithme de lucioles, Système parallèle-série, Fiabilité, Fonction génératrice universelle de moments (FGUM)

### 1. Introduction

Pendant des années, la biomasse (bois) nous a fourni de l'énergie, tandis que les moteurs à vapeur, l'hydroélectricité et les éoliennes nous ont fourni l'énergie nécessaire à nos industries et à nos besoins quotidiens [1].

L'intérêt pour les sources d'énergie renouvelables s'est considérablement accru au cours des dernières décennies. Le but est de diminuer la pollution de l'air, le réchauffement climatique et d'économiser les ressources naturelles [2, 3, 4]. Bien que le coût d'investissement initial soit plus élevé, il est moins cher à long terme, car il n'y a pratiquement pas de frais d'entretien. Ces technologies comprennent la production d'électricité à partir d'éoliennes (WT) et les panneaux

<sup>1</sup> Dépt. de Génie Electrique, Ecole Supérieure en Génie Électrique et Énergétique, Oran, Algérie,  
E-mail: khguerrache@yahoo.fr

<sup>2</sup> Laboratoire LAMOSI, Dépt d'informatique, Université des Sciences et de Technologie d'Oran  
USTO, Oran, Algérie, E-mail: latifa.dekhici@univ-usto.dz, dekhicilatifa@gmail.com

photovoltaïques (PV) [1, 5]. L'optimisation de la fiabilité représente un rôle important dans la conception, l'exploitation et la gestion des systèmes électriques. La fiabilité d'un système peut être facilement améliorée en améliorant la fiabilité des composants non fiables et/ou en utilisant une configuration redondante avec des sous-systèmes/composants en parallèle [6, 7].

L'objectif principal est de maximiser la fiabilité du système parallèle-série, en tenant compte des contraintes topologiques (performance et coût) en utilisant une récente métaheuristique (Lucioles) qui utilise une technique moderne (technique d'Ushakov) pour évaluer la fiabilité [8, 9]. Le présent document est organisé comme suit : La section 2 présente la formulation du problème d'optimisation. Dans la section 3, nous décrivons l'estimation du système de fiabilité basée sur la technique d'Ushakov. Dans la section 4, nous expliquons comment nous adaptons l'algorithme de luciole pour résoudre le problème d'optimisation de la fiabilité du système. Dans la dernière section, nous expérimen-tions notre approche sur un système industriel de production électroénergétique, et une étude comparative entre l'algorithme proposé et d'autres algorithmes publiés dans la littérature.

## 2. 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  $\Xi_{ij}$ . 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  $i$ .

### 2.1 Conception optimal

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 maximisant la fiabilité équation (1), de telle sorte que la performance soit supérieure ou égale à la performance spécifiée  $\Xi_0$  et le coût total est inférieur au coût donné  $C_0$  équation (2).

$$\text{Maximisé} \quad \prod_{i=1}^n \left[ \prod_j^{ij} P, Q(z) \min_{i=1}^n \sum_{j=1}^j G_{ij} \right] \quad (1)$$

Sous contraintes

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{V_i} k_{ij} C_{ij} \leq C_0$$

$$\Xi^{\min\{a_i, b_i\}} \geq \Xi_0 \quad (2)$$

Avec  $P$  et  $Q$  qui sont des probabilités des niveaux de performance possibles pour les dispositifs  $i$  et  $j$ .  $z$  est la transformée de Laplace. La fiabilité est considérée comme une mesure de la disponibilité du système pour répondre à la demande des consommateurs ( $W$ ), c'est-à-dire pour fournir une prévision d'énergie électrique adéquate ( $\Xi$ ). Cette définition de l'indice de fiabilité est largement utilisée pour les réseaux électriques [10, 11]. L'indice de probabilité de perte de charge (LOLP) est habituellement utilisé pour estimer l'indice de la fiabilité dans [11, 12]. Cet indice est la probabilité globale que la demande de charge ne sera pas satisfaite. Ainsi, nous pouvons écrire  $A = \text{proba}(\Xi \geq W)$  et la  $\text{LOLP} = 1 - A$ . Cet indice de fiabilité dépend de la demande des consommateurs  $W$ .

### 3. 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 [13,14]. Le comportement des systèmes multi états (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 à la charge (consommation)  $W$  est calculée comme suit [15]:

$$R(W) = P\{G > W\} = 1 - P\{G \leq W\} \quad (3)$$

La fonction génératrice universelle (UMGF) a été développée et introduite par Ushakov [16]. Les principes de son application ont été formulés dans [17]. 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 :

$$u(z) = \sum_{j=1}^J P_j z^{G_j} \quad (4)$$

Où la variable  $G$  représente la performance et peut prendre  $J$  états possibles.  $P_j$  est la probabilité de l'état  $G_j$ . Lorsque  $\Phi$  est un opérateur distributif défini par l'équation (5) [16]:

$$\Phi(P_j z^{G-W}) = \begin{cases} P, & \text{si } G \geq W \\ 0, & \text{si } G < W \end{cases} \quad (5)$$

Pour évaluer la disponibilité d'un système multi-état parallèle-série, la méthode d'Ushakov permet d'obtenir l'UMGF totale d'un système à des composants connectés en parallèles ou en séries par de simples opérations algébriques  $\mathfrak{I}$  et  $\delta$  sur l'UMGF individuelle des éléments. Ces opérateurs déterminent le polynôme  $u(z)$  pour un groupe de dispositifs [16].

### 3.1 Dispositif parallèle

La fonction génératrice universelle (UMGF) d'un système SME contenant  $j_n$  éléments en parallèle peut être calculée par l'opérateur  $\mathfrak{I}$  [18]:

$$\mathfrak{I}(G_1, G_2, \dots, G_n) = \sum_{i=1}^n G_i$$

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

$$\mathfrak{I}\left(\sum_{j=1}^J P_j z^{G_j-W}\right) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_i Q_i z^{a_i+b_j} \quad (6)$$

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.

### 3.2 Dispositif série

L'UMGF d'un système multi-états contenant  $m$  éléments en série peut être calculé par l'opérateur  $\delta$  [18]:

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

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

$$\begin{aligned} \delta(u(z), u(z)) &= \sum_{i=1}^n P_i z^{a_i}, \sum_{j=1}^m Q_j z^{b_j} \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_i Q_j z^{\min(a_i, b_j)} \end{aligned} \quad (7)$$

#### 4. Optimisation par l'algorithme des lucioles

L'algorithme des lucioles a été proposé par Yang [19, 20]. Dans cet algorithme, des lucioles se déplacent dans l'espace des solutions. Chaque luciole émet un clignotement dont l'intensité est directement liée à la qualité de la solution qu'elle représente (fonction objectif). A chaque itération, les lucioles perçoivent les autres lucioles et la quantité de lumière qu'elles émettent. Chaque luciole compare son intensité lumineuse à celle des autres. Lorsqu'elle trouve une autre luciole ayant une intensité lumineuse plus forte, elle se déplace dans la direction de celle-ci. Ce déplacement dépend de l'attractivité de la cible qui est calculé en fonction de l'intensité de la position cible et de la distance à celle-ci. Le processus se répète pour l'ensemble des lucioles autant de fois que nécessaire.

L'algorithme prend en considération les trois points suivants [19, 20]:

- Toutes les lucioles sont unisexes, ce qui fait que l'attraction entre celles-ci n'est pas en fonction de leur sexe.
- L'attraction est proportionnelle à leurs luminosités, donc pour deux lucioles, la moins lumineuse se déplacera vers la plus lumineuse. Si aucune luciole n'est lumineuse qu'une luciole particulière, cette dernière se déplacera aléatoirement.
- La luminosité des lucioles est déterminée en fonction d'une fonction objectif (à optimiser).

Souvent, une intensité de la lumière  $I(r)$  varie en fonction de la loi suivante [21, 22, 23] :

$$I(r) = \frac{I_s}{r^2} \quad (8)$$

Où  $I_s$  est l'intensité à la source et  $r$  est la distance.

Pour une valeur constante d'absorption  $\gamma$ , la variation d'intensité décroît l'intensité en fonction de la distance  $r$  de façon incrémentale et proportionnelle ce qui donne une intensité :

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r} \quad (9)$$

Parfois il est nécessaire d'utiliser une autre forme de fonction monotone décroissante. Dans ce cas, nous pouvons utiliser l'approximation inspirée :

$$I(r) = \frac{I_0}{1 + \gamma r^2} \quad (10)$$

Une généralisation, de l'expression (8) consiste à considérer la fonction  $\beta(r)$  défini par :

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^m}, \quad m \geq 1 \quad (11)$$

D'autre part, la distance entre deux lucioles  $i$  et  $j$  à des positions  $x_i$  et  $x_j$  est définie par la distance Cartésienne suivante :

$$r_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (12)$$

Où  $x_{i,k}$  représente le  $k^{\text{ème}}$  composant spatiale de la coordonnée  $x_i$  de la luciole  $i$ . Dans un repaire 2 dimensions, l'équation (12) devient :

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (13)$$

Le mouvement d'une luciole  $i$  attirée par une autre luciole  $j$  (plus lumineuse que  $i$ ) est déterminé par :

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \left( \text{rand} - \frac{1}{2} \right) \quad (14)$$

Le second terme dans l'équation est dû à l'attraction. Tandis que le troisième terme rajoute un déplacement aléatoire à l'équation, où  $\alpha$  est aléatoire, rand une fonction de génération de nombre aléatoire uniforme dans l'intervalle  $[0, 1]$ . Le paramètre  $\gamma$  caractérise la variation de l'attractivité, sa valeur est cruciale dans la détermination de la vitesse de convergence et le comportement de l'algorithme [24]. La fig. 1 montre le pseudo-code de l'algorithme des lucioles ou firefly (FA).

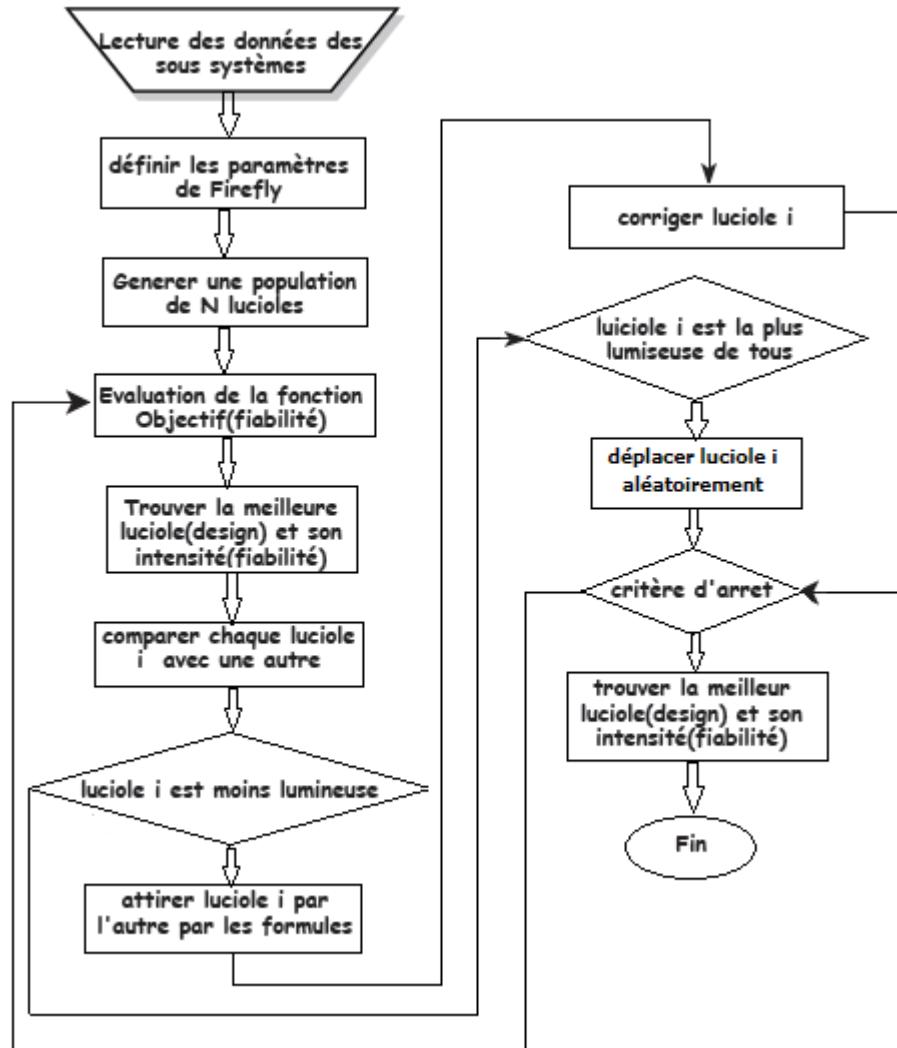


Fig. 1. Organigramme de l'algorithme des lucioles

## 5. Résultats et discussion

Dans cette partie, nous présentons une étude comparative entre l'algorithme de lucioles (FA) et des mét-heuristiques 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 maximiser la fiabilité totale d'une structure parallèle-série sous contrainte de la performance et le cout total.

### 5.1 Description du système à optimiser

Le système de production, transport qui alimente les consommateurs est

conçu avec cinq sous-systèmes de base comme représenté sur la fig. 2. 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 le tableau 1. Ce tableau montre que chaque équipement est caractérisé par la fiabilité  $R$  en (%), la performance (capacité nominale)  $G$  en MW (Méga Watt) et le coût  $C$  en mln (Million de dollar). Le tableau 2 illustre la demande cumulative annuelle de 8760 h. La demande est de 100 % pour un pic annuel de 4208 h qui se réduit à 80% pendant 788 h, ainsi la réduction suit de 50 pendant 1228 h et 20% pendant 2536 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 nombre de lucioles utilisées pour trouver la meilleure solution est de 10. Les résultats de la simulation dépendent largement de certaines valeurs des coefficients, et dans cette expérience les valeurs des paramètres de l'algorithme de luciole sont fixées à :  $\gamma = 0,01$ ,  $\alpha_{max} = 20$ ,  $\alpha_{min} = 0,01$  et  $\beta_0^* = 0,5$ .

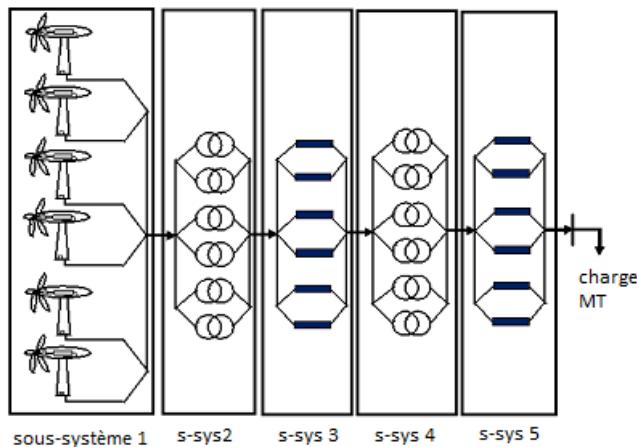


Fig. 2. Système électro-énergétique parallèle-série [25, 26]

Tableau 1

Les données des composants du système disponible sur le marché [25, 26]

Sous-système	Versions	Fiabilité A (%)	Cout C(mln \$)	Capacité $\Xi$ (MW)
Parc Eolien	1	0.992	7.735	6
	2	0.986	6.475	5
	3	0.994	6.698	6
	4	0.988	6.290	6
	5	0.980	6.146	5
	6	0.991	4.484	4
	7	0.992	3.926	3

	Transformateur HT	1 2 3 4 5	0.994 0.990 0.997 0.991 0.998	2.805 2.272 2.594 2.569 1.857	18 18 12 12 8
	Lignes HT	1 2 3 4	0.971 0.997 0.991 0.976	1.985 1.983 1.842 1.318	16 14 14 12
	Transformateur HT/MT	1 2 3 4 5 6 7 8	0.978 0.986 0.978 0.983 0.981 0.971 0.985 0.973	0.842 0.875 0.745 0.654 0.625 0.608 0.492 0.415	16 16 14 12 12 12 10 10
	Lignes MT	1 2 3 4 5	0.984 0.993 0.989 0.981 0.968	0.456 0.432 0.364 0.283 0.242	14 12 10 8 8

Tableau 2

**Données de la demande cumulative annuelle [25, 26]**

W <sub>m</sub> (MW)	28	24	22	18
T <sub>m</sub> (h)	1752	1752	3504	1752

**5.3 Discussion des résultats**

Dans le tableau 3, nous comparons les résultats obtenus par ACO [25] et HS [26], ainsi que l'algorithme proposé FA. On peut observer que les solutions données par FA sont satisfaisantes à certains égards. L'algorithme de lucioles trouve des solutions avec des fiabilités maximales et répond aux contraintes de coût et de performance, qui sont supérieures à ACO et HS. Trois conceptions optimales correspondantes à différentes contraintes sont présentées dans ce tableau. On peut voir par exemple que pour une performance demandée de 32 MW et une contrainte de coût égale à 86 mln \$, la structure optimale fournit une très bonne disponibilité de 0.999. Pour un cout demandé de 80 millions \$ et une performance de 30 MW, la configuration optimale ne peut pas fournir une disponibilité supérieure à 0.994. En maintenant la contrainte de coût à 75 millions \$ et en réduisant la performance désirée à 28 MW, la disponibilité du système monte de façon optimale à 0,997.

Tableau 3

**Comparaison des solutions pour les différentes valeurs de  $E_0$  et  $C_0$** 

	Sous-système	Lucioles (FA)	Colonne de fourmis (AC) [25]	Recherche d'harmonie (HS) [26]
$E_0 = 32$ $C_0 = 86$	1	4(4)-4(6)	1-2(2)-4-2(5)-6	1-2-3-4-2(5)-7
	2	4(3)-4(5)	1-2-2(3)-5	1-2-3-4-5
	3	6(3)	1-2-3-4	1-2(2)-4
	4	2(1)-2-3-3(5)	1-2-3-4-5-2(6)-8	1-2-3-2(4)-6-7-8
	5	2(1)-6(5)	1-2-2(3)-5	1-2-3-4-5
	$C$ (mln \$)	79.50	81.734	82.416
	A (%)	0.999	0.996	0.997
	E (MW)	40	38	35
	$E_0 = 30$ $C_0 = 80$	7(3) 3- 2(4) 6(1)-4 2-3(6)-1(7) 3(1)	2(1)-2(2)-5-6-7 2(1)-2-3 2-2(3)-4 2-3-2(4)-5-2(6)-7 3(1)-2(2)	2(1)-2(2)-2(5)-7 1-2(2)-3 2(2)-3-4 2-2(3)-4-2(5)-6-7 3(1)-2-3
	$C$ (mln \$)	72.40	75.835	76.220
	A (%)	0.994	0.964	0.954
	E (MW)	36	30	30
$E_0 = 28$ $C_0 = 75$	1	2(4)-6(6)	3(2)-3-2(5)-6	4(2)-2(5)-7
	2	7(2)	2(2)-2(3)-2(5)	2(2)-3-4-2(5)-7
	3	4(2)-3-4	2(2)-2(3)-4	2(2)-3(3)
	4	2(1)-5-2(6)-2(8)	1-2-2(3)-2(4)-2(7)	2(2)-2(3)-4-5-2(7)
	5	3(2)-4(3)	1-2-3-2(4)	2(2)-2(3)-4
	$C$ (mln \$)	73.59	73.26	73.45
	A (%)	0.997	0.998	0.997
	E (MW)	36	28	28

**6. Conclusion**

Dans cet article, nous avons utilisé l'algorithme de luciole (FA) pour résoudre le problème d'optimisation de la fiabilité des systèmes en ce qui concerne les structures parallèles-séries hétérogènes à plusieurs états afin d'obtenir une fiabilité maximale du système sous des contraintes de coût et de performance. Malgré la difficulté de résoudre le problème d'optimisation de la redondance avec un mélange de composants, en raison du grand nombre d'alternatives, des solutions quasi optimales peuvent être obtenues en utilisant la méthode des lucioles. La méthode utilisée dans cet article consiste en une combinaison de l'algorithme de luciole et la méthode Ushakov (fonction universelle de génération de moments). L'algorithme proposé permet d'évaluer la dépendance entre le coût et la performance d'une part, et la disponibilité du système d'autre part. L'efficacité de cet algorithme dépend de la sélection des paramètres. Un ensemble des valeurs

des paramètres de l'algorithme ont été testés. Les résultats sont remarquables par rapport aux méthodes publiées dans la littérature (HS, ACO) en termes de solutions. Actuellement, nous travaillons sur l'extension de ce travail à des systèmes multi-états homogènes parallèle-série. Comme d'autres pistes de recherche nous essayeront d'appliquer FA à d'autres problèmes d'optimisation multi-objectif.

### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le professeur Eric Chatelet de l'Université de Technologie de Troyes, Institut Charles Delaunay pour sa contribution à cette recherche.

### R E F E R E N C E S

- [1] *S. Wijewardana*, Research and Development in Hybrid Renewable Energy Systems, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, **vol. 4**, no. 2, Feb. 2014, pp.48-79.
- [2] *N.M. Nasiri and D. Seitenov*, Conceptual Design and Center-point Force Dynamic Simulation of a New Horizontal Axis Semi-exposed Wind Turbine, International Journal of Renewable Energy Research, **vol. 6**, no.1, 2016, pp. 1-9.
- [3] *A. C. Marques, and J. A. Fuinhas*, Is renewable energy effective in promoting growth, Journal of Energy Policy, 2012, pp. 434-442.
- [4] *M. R. Moore, McD. L. Geoffrey, and J. C. Daniel*, Markets for renewable energy and pollution emissions: Environmental claims, emission-reduction accounting, and product decoupling, Journal of Energy Policy, 2010, pp. 5956-5966.
- [5] *M. Rezaei, and M. Ghanbari*, Optimization of hybrid pv/wind/fc system considering reliability indices using cuckoo search algorithm, Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences, **vol. 5**, 2015, pp. 3304-3320.
- [6] *M. Ziaee*, Optimal Redundancy Allocation in Hierarchical Series—Parallel Systems Using Mixed Integer Programming, Applied Mathematics, **vol. 4**, 2015, pp. 3304-3320.
- [7] *C. Ha and W. Kuo*, Reliability Redundancy Allocation An Improved Realization for Non convex Nonlinear Programming Problems, European Journal of Operational Research, **vol. 171**, no. 1, 2006, pp. 24-38.
- [8] *Y.C. Liang and A. E. Smith*, Ant colony optimization for constrained combinatorial problems”, Proceedings of The 5<sup>th</sup> Annual International Conference on Industrial Engineering -Theory, Applications and Practice, Taiwan, Decem. 2000, pp. 13-15.
- [9] *R. Meziane, S. Boufala, A. Hamzi and M. Amara*, Wind farm reliability optimization using cuckoo search algorithm,” Recent researches in electrical engineering, conferences wseas, Lisbon, 2014, pp. 295-303.
- [10] *K. Guerraiche, M. Rahli, A. Zeblah, and L. Dekhici*, Reliability maximization using firefly algorithm under performance and budget constraints, International Electrical Engineering Journal, **vol. 7**, no.3, 2016, pp. 2188-2195.
- [11] *A. Lisnianski, G. Levitin, H. Benhaim*, Power system structure optimization subject to reliability constraints, Electric Power System Research, **vol. 39**, no. 2, 1996, pp. 145-152.
- [12] *A. Lisnianski, G. Levitin, H. Benhaim and D. Elmakhias*, Redundancy optimization for series-parallel MSS, IEEE Trans on Reliability, **vol. 47**, no. 2, 1998, pp.165-172.

- [13] *S. E. Barlow, A. S. Wu*, Coherent systems with multi-state components, Mathematics of Operations Research, **vol. 3**, no.11, 1978, pp. 275-281.
- [14] *E. El-Newehi, F. Proschan, J. Sethuraman*, Multistate coherent systems, Journal of Applied Probability, **vol. 15**, no.12, 1978, pp. 675-688.
- [15] *G. Levitin, A. Lisnianski, H. Ben-Haim, D. Elmakis*, Redundancy Optimization for Series-Parallel MSS, IEEE Transactions on Reliability, **vol. 47**, no. 2, 1998, pp. 165-172.
- [16] *I. Ushakov*, Universal generating function, Soviet Journal of Computing System Science, **vol. 24**, no. 5, 1986, pp. 118-29.
- [17] *I. Ushakov*, Reliability Analysis of Multi-State Systems by Means of a Modified Generating Function, Journal Information Process, Cybernet, **vol. 34**, 1988, pp. 24-29.
- [18] *A. Lisnianski and G. Levitin*, Multi-state system reliability, World Scientific Publishing Co, 2003.
- [19] *X. S. Yang*, Nature-Inspired Meta-heuristic Algorithms, Luniver Press, second edition, 2010.
- [20] *X. S. Yang*, Firefly Algorithm for Multimodal Optimization, Stochastic Algorithms: Foundation and Application, 5<sup>th</sup>, 2009.
- [21] *I. Fister, I. jr. Fister, X. S. Yang*, A Comprehensive Review of Firefly Algorithm, 2013.
- [22] *L. Dekhici et K. Belkadi*, Méta-heuristic Fireflies Discrete for the Flow Shop Hybri, Cari, 2012.
- [23] *A. Layeb*, A Novel Firefly Algorithm Ant Colony Optimization for Solving Combinatorial Optimization Problems, International Journal of Computer Science and Applications, Techno-mathematics Research Foundation, **vol. 11**, no. 2, 2014, pp. 19 – 37.
- [24] *J.L. Deneubourg, S. Goss, N. Franks, A. Sendova-Franks et C. Detrain*, The Dynamics of Collective Sorting: Robot-like Ants and Ant-like Robots, Proceedings of the First International Conf. on Simulation of Adaptive Behaviour: From Animals to Animats 1. Cambridge : MIT Press, 1991.
- [25] *R. Meziane, S. Boufala, A. Hamzi and M. Amara*, Wind farm reliability optimization using ant colony algorithm under performance and cost constraints, 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conf. (IRSEC), Marrakech, 10-13 Dec. 2015, pp. 1-7.
- [26] *R. Meziane, Y. Bouzidi, A. Hamzi, E. Châtelet, S. Boufala and M. Amara*, Wind farm reliability optimization using harmony search under performance and budget constraints, International Renewable and Sustainable Energy Conf. (IRSEC), Ouarzazate, 17-19 Oct. 2014, pp. 808-815.