

Optimisation de la création de nouvelles lignes de transport d'énergie électrique par les algorithmes génétiques lors de la planification des réseaux électriques avec insertion unique des sources d'énergie électrique renouvelables

Yao BOKOVI*, Ayité. S. A. AJAVON, Akim. A. SALAMI, Mawugno. K. KODJO et Koffi-Sa BEDJA

*Equipe de Recherche en Sciences de l'Ingénieur (ERSI), Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs (ENSI),
Université de Lomé, BP 1515 Lomé, Togo*

* Correspondance, courriel : bokoviyao@gmail.com

Résumé

La planification d'un réseau électrique haute tension à long terme consiste à la mise en place des schémas directeurs de développement dudit réseau à un coût minimal. Cela demande à trouver l'avenir le plus probable du réseau électrique en se fondant sur des hypothèses réalistes afin de s'adapter à l'évolution des contraintes telles que la charge, l'environnement et la production énergétique. Ainsi le problème de la planification est posé comme un problème d'optimisation. Dans ce papier, les algorithmes génétiques ont été utilisés pour optimiser la planification à long terme (20 ans) d'un réseau électrique normalisé IEEE de 08 nœuds. L'objectif de cette planification optimale est de minimiser le coût de création de nouvelles lignes électrique et d'obtenir les coûts de production et de transport de l'énergie électrique ; ensuite de tracer la structure du réseau électrique suivant son évolution dans le temps et dans l'espace et enfin d'évaluer la quantité du dioxyde de carbone (CO₂) évitée grâce à l'insertion unique des sources d'énergie électrique renouvelables dans le réseau électrique HT en lieu et place des sources thermiques à flammes. Les résultats ont montré qu'avec les algorithmes génétiques, on peut planifier un réseau électrique haute tension de façon optimale. Le cas de figure pour ce papier est un réseau électrique normalisé IEEE de 08 nœuds. Pour ce réseau normalisé IEEE de 08 nœuds, on a obtenu un cumul de coût de 929,78.10¹⁰US \$ (US \$ étant l'unité monétaire utilisée dans ce papier) pour le coût optimal de création de nouvelles électriques, 825,66 US \$ / h pour le coût de transit de puissance et 240245,16 US \$ / h pour le coût de production d'énergie électrique. Le cumul de la quantité de tonne du dioxyde de carbone (CO₂) évitée passe à l'an 1 de l'horizon 20 ans de la planification de 348 tonnes / h à 1672 tonnes / h à partir de l'an 14 de l'horizon 20 ans. L'évolution de la structure du réseau électrique dans le temps et dans l'espace a été aussi obtenue.

Mots-clés : *planification, réseau électrique haute tension, optimisation, algorithmes génétiques (AG), réduction des gaz à effet de serre.*

Abstract

Optimization of creation of new electric transmission lines by genetic algorithms in planning of high voltage electric grids with unique insertion of the renewable sources of electric energy

The long-term optimal planning of high voltage electric grids consists to the setting up of the leading diagrams of development of the aforesaid network for a minimal cost. It means to find the likeliest future of the electric network while with realistic hypotheses in order to adapt to the evolution of the constraints as the load, the

environment and the energizing production. So the problem of the planning is posed as a problem of optimization. In this paper, the genetic algorithms have been used to optimize the long-term planning (20 years) of an electric grids normalized IEEE of 08 bus. The objective of this optimal planning is to minimize the cost of creation of new lines electric and to get the costs of production and transmission of the electric energy; then to draw the structure of the electric grids following its evolution in the time and in the space and finally to value the quantity of the carbon dioxide (CO₂) avoided due to the unique insertion of the renewable sources of electric energy in the AC High Voltage Power Network for and on behalf of the thermal sources to flames. The results showed that with the genetic algorithms, we can plan an electric grids in an optimal way. In this paper a normalized electric grids IEEE of 08 bus was tested. For this normalized electric grids, we got a heap of cost of $929,78.10^{10}$ US \$ for the optimal cost of creation of new electric lines, 825,66 US \$ / hrs for the cost of electric power transit and 240245,16 US \$ / hrs for the electric energy production cost. The heap of the quantity of ton of the carbon dioxide (CO₂) avoided pass from 348 tons / hrs at the year 1 of the horizon 20 years of the planning to 1672 tons / hrs from the year 14 of the horizon 20 years. We also obtain the evolution of the electric grids in the time and in the space by drawing its structure.

Keywords : *planning, AC high voltage power network, optimization, genetic algorithms (GA), greenhouse gas emission reduction.*

1. Introduction

L'adéquation entre l'offre et la demande en énergie électrique est toujours recherchée pour la pérennité du Réseau Electrique Haute Tension (HT) qui sert de liaison entre les centres de production et les grandes zones de consommation. Il y a lieu de trouver des sources de production d'énergie électrique capable de satisfaire la demande énergétique. Cependant la recherche de ces sources de production est sujette à la menace de l'épuisement de l'énergie fossile et au problème de l'indépendance énergétique et du développement durable. L'énergie produite à base de combustible fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) est source d'émission du dioxyde de carbone CO₂, gaz très nuisible aux êtres humains et à l'environnement, [1]. Ainsi les regards sont en train d'être tournés vers les sources d'Energie Electrique Renouvelables grâce à leur avantage écologique indéniable, [2, 3]. L'insertion de ces sources d'Energie Electrique Renouvelables dans le réseau électrique HT existant doit se faire à partir d'un plan global qui induit une planification optimale dudit réseau. Ceci va générer de nouveaux paramètres à gérer dans le réseau électrique notamment dans la production, dans le transport de l'énergie électrique et dans la connexion de nouvelles lignes électriques dans le temps et dans l'espace.

L'état de l'art montre que la planification optimale des réseaux électriques HT, s'appuie souvent sur deux approches telles que l'approche déterministe (Simplexe, Quasi-Newton, Newton-Raphson, etc.) et l'approche stochastique (Monte Carlo, Colonie de Fourmis, Algorithmes Génétiques (AG), etc.) [4 - 7]. En effet la programmation linéaire (approche déterministe) a été longtemps utilisée dans la planification optimale de réseau électrique HT pour l'extension dudit réseau et l'écoulement de puissance, [8]. La programmation linéaire par la méthode du simplexe est une technique efficace surtout dans la conduite des réseaux électriques en temps réel, [9]. Cependant de nos jours, la planification optimale se fait aussi grâce à l'intelligence artificielle notamment par les Algorithmes Génétiques (AG). Les AG ont commencé par être utilisés dans l'écoulement optimal de puissance [7, 10] dans les réseaux électriques HT, dans la production optimale d'énergie électrique, [6, 10], etc. Dans cet article, l'Algorithme Génétique (AG) sera utilisé en codage réel pour élaborer une application en Matlab qui aidera dans la planification optimale à long terme des réseaux électriques HT. Au cours de cette planification optimale on obtiendra d'abord les coûts optimaux de création de connexion de nouvelles lignes électriques avec les coûts de production et de transport de l'énergie

électrique. L'évolution de la structure du réseau électrique dans le temps et dans l'espace sera aussi présentée. On évaluera enfin la quantité de CO₂ évitée grâce à l'utilisation des sources d'Energie Electrique Renouvelables en lieu et place des sources thermiques à flammes. Ce papier est alors structuré en quatre parties. Après la présentation de la méthode à utiliser, la formulation du problème sera d'abord posée. Ensuite le traitement informatique des données sera effectué et enfin les résultats seront présentés avec des analyses et des discussions.

2. Méthodologie

2-1. La méthode des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques développés initialement par John Holland (1975), [11], sont promus par Goldberg (1989), [12], et appuyés dans l'optimisation de fonctions non linéaires avec simplicité et efficacité grâce aux travaux de Lerman et Ngouet en 1995, [13]. Les AG sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique, [6]. Quatre points principaux font la différence fondamentale entre les AG et les autres méthodes. Les algorithmes génétiques, [6] :

- utilisent un codage des paramètres et non les paramètres eux-mêmes;
- travaillent sur une population de points au lieu d'un point unique;
- n'utilisent que les valeurs de la fonction étudiée et non sa dérivée ou une autre connaissance auxiliaire;
- utilisent les règles de transition probabilistes et non déterministes.

2-1-1. Les principes généraux des AG

La *Figure 1* résume le principe général du fonctionnement d'un algorithme génétique. Les termes suivants sont le plus souvent employés dans les AG et ont le sens tel que :

- les individus ou les chromosomes sont les réponses à un problème donné qu'elles soient ou non valides;
- une population est un ensemble de chromosomes ou de points de l'espace de recherche;
- un gène est une partie d'une réponse au problème donc d'un individu;
- une génération est une itération de l'algorithme;
- l'environnement est l'espace de recherche;
- la fonction de fitness est la fonction d'évaluation de l'individu, la fonction positive à optimiser.

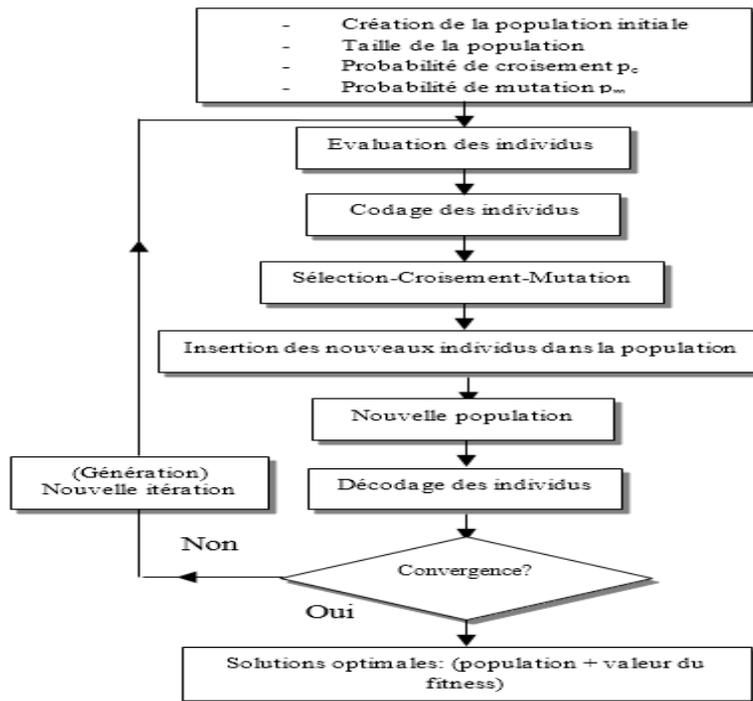


Figure 1 : Le principe général de l'algorithme génétique

2-1-2. Description des AG

- ✓ La création de la population initiale est libre et peut être aléatoire à condition que les individus produits respectent les contraintes du problème, [14] ;
- ✓ L'évaluation des individus consiste à faire sortir les individus les plus prometteurs par la fonction fitness à optimiser et vont participer à l'amélioration de la population ;
- ✓ Le codage des individus est une étape qui assure à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Il existe ainsi le codage binaire et le codage réel. Bien que le codage binaire ait été utilisé à l'origine des AG et soit simple, il peut rapidement devenir mauvais pour les problèmes d'optimisation de grandes dimensions à haute précision numérique, [15, 16]. Si les AG utilisent des vecteurs réels comme variables, il est recommandé de se servir directement des nombres réels, [16 - 19], [12, 15]. Les travaux présentés dans cet article utilisent les AG en code réel (**Figure 2**) ;

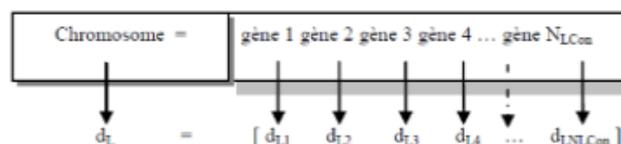


Figure 2 : Codage réel de la variable de décision d_{Li}

- ✓ La sélection permet d'identifier statistiquement les meilleurs individus d'une population et d'éliminer les mauvais. Il y a plusieurs méthodes de sélection parmi lesquelles on peut citer la roulette (roue de loterie), la décimation, la sélection par tournoi, la proportionnelle à reste stochastique et la stochastique universelle. Cependant la plus utilisée est la roulette grâce à la qualité d'individus qu'il représente, [4, 20]. On procède ainsi à des tirages aléatoires consécutifs où chaque individu a une probabilité $p_{\text{sélection}}$ d'être sélectionné égale à l'Equation (1) ;

$$P_{\text{selection}}(d_L) = \frac{FC(d_L)}{\sum_{j=1}^{NL_{\text{con}}} FC(d_{L_j})} \tag{1}$$

où, d_L désigne l'individu.

✓ Le croisement permet de simuler des reproductions d'individus dans le but d'en créer de nouveaux. Classiquement, les croisements sont appliqués avec une probabilité p_c (généralement 0,6) à deux parents (d_{Li} et d_{Lj}) pour générer deux enfants (E_{Li} et E_{Lj}), [16]. Les valeurs admises sont comprises entre 0,5 et 0,9, [21]. Le croisement réel (en codage réel) est effectué sur une paire de chromosomes constitués de N_{LCon} gènes. On distingue deux types de croisement réel à savoir le croisement arithmétique et le croisement uniforme. Cependant le croisement arithmétique est propre à la représentation réelle. Ainsi dans le cadre de ce travail est appliqué le croisement arithmétique. Il s'applique à une paire de chromosomes et se caractérise par une pondération aléatoire des chromosomes des deux parents d_{Li} et d_{Lj} , pour donner deux enfants E_{Li} et E_{Lj} selon l'Equation (2);

$$\begin{cases} E_{Li} = p \cdot d_{Li} + (1 - p) \cdot d_{Lj} \\ E_{Lj} = (1 - p) \cdot d_{Li} + p \cdot d_{Lj} \end{cases} \tag{2}$$

où, p est un poids appartenant à l'intervalle $[0, 1]$ et garantit que les descendants auront bien leurs gènes d_{Li} dans $[d_{Li}^{min}, d_{Li}^{max}]$.

✓ Les mutations sont des modifications aléatoires d'un gène des individus déjà existant (d'autres parents) pour devenir des individus mutés. Ainsi l'opérateur de mutation est appliqué à d'autres parents P avec la probabilité p_m généralement faible (entre 0,1 % et 5 %), très inférieure à p_c et éventuellement avec ajout d'un bruit généralement gaussien, [16] pour générer des individus mutés P' (Figure 3). Dans le processus d'exécution des AG, la mutation dans notre cas de Figure est représentée à la Figure 3 où le chromosome d_{Li} du parent devient d'_{Li} .

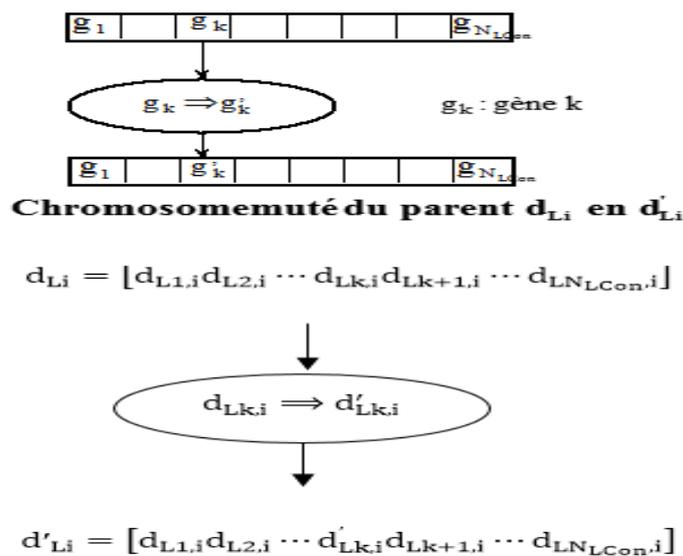


Figure 3 : Le principe de l'opérateur de mutation

La fonction « ga » de Matlab sera paramétrée dans ce papier pour exécuter l'algorithme génétique [22].

2-2. Formulation du problème

Etant donné un réseau électrique HT dont on connaît la configuration initiale, on désire planifier à long terme son évolution en y insérant des sources de production d'Énergie Electrique Renouvelables suivant la croissance annuelle de la demande en énergie électrique $P_{ch}(t)$ dont le modèle est donné à ***l'Equation (3)***.

$$P_{ch}(t) = P_{ch0} \left(1 + \frac{a}{100} \right)^t \quad (3)$$

où, t est la date (an); a est le taux de croissance annuelle de la demande (%) et P_{ch0} la demande à la date $t = 0$.

Cette insertion entraînera éventuellement la construction de nouvelles lignes de transport d'énergie électrique et le renforcement de capacité des lignes existantes. La connexion de ces nouvelles lignes a un coût CL dont la fonction est définie par ***l'Equation (4)***.

$$CL = \sum_{j=1}^{N_L} \frac{3 \cdot \rho_{L_inser\ j} \cdot L_{L_inser\ j} \cdot I_{nL_inser\ j}^2 \cdot H_{e\ j} \cdot p \cdot f}{S_{sec\ L_inser\ j}} \quad (4)$$

où, $\rho_{L_inser\ j}$ est la résistivité ($\Omega \cdot mm$) du matériau conducteur de la ligne j ; $L_{L_inser\ j}$ est la longueur de la ligne (mm); $I_{nL_inser\ j}$ est l'intensité de courant nominal (A) en début de vie de la ligne j ; N_L est le nombre total de lignes de transport d'énergie électrique; $H_{e\ j}$ est le nombre d'heures d'utilisation équivalent à la pleine charge (h/an) de la ligne j ; p est le coût des pertes par kWh (US \$/Wh); f est le facteur d'actualisation défini ***l'Equation(5)*** et $S_{sec\ L_inser\ j}$ est la section (mm^2) de la ligne j .

Le facteur d'actualisation est défini par ***l'Equation (5)***.

$$f = \frac{Q_r}{1 + \frac{i}{100}} \quad (5)$$

avec :

$$Q_r = \frac{1 - r^{DV}}{1 - r} \quad (6)$$

$$r = \frac{\left(1 + \frac{Aug}{100} \right)^2 \cdot \left(1 + \frac{b}{100} \right)}{1 + \frac{i}{100}} \quad (7)$$

où, Aug est l'augmentation annuelle de la puissance (%); b est le pourcentage d'accroissement du prix du kWh (%); i est le taux d'intérêt (%) et DV est la durée de vie (an).

L'insertion d'une source d'Énergie Electrique Renouvelables dans le réseau électrique HT existant entraîne d'éventuel dépassement de capacité de transit dans les lignes électriques dudit réseau. On note ainsi dans les lignes électriques la circulation de courants I_L supérieurs à leur limite I_{Lmax} . Les lignes seront alors surchargées. On évalue alors le courant total de surcharge ΔI_L dans l'ensemble du réseau électrique grâce à ***l'Equation (8)***.

$$\Delta I_L = \sum_{i=1}^N \Delta (I_i - I_{ni}) \tag{8}$$

où, I_i est l'intensité du courant circulant dans la ligne i ; I_{ni} l'intensité du courant nominal de la ligne i et N_L le nombre total de lignes du réseau électrique HT.

Pour éviter ces surcharges, il faut d'abord soit mettre les lignes existantes en parallèle si elles ne l'étaient pas encore, soit établir de nouvelles connexions de lignes. Ces nouvelles connexions vont du nœud d'insertion de la nouvelle source d'Energie Electrique Renouvelable aux autres nœuds existants du réseau électrique en tenant compte du niveau de tension. Ensuite en supposant que le courant de surcharge ΔI_L peut circuler dans chacune des connexions des nouvelles lignes, on affecte la fonction coût CL **Equation (4)** de chaque ligne électrique j d'un coefficient de décision d_{Lj} . **L'Equation (7)** se transforme en **Equation (9)** qui est la fonction de connexion FC des lignes électriques.

$$FC(d_L) = \sum_{j=1}^{N_{LCon}} d_{Lj} \cdot \Delta I_{Lj}^2 \cdot const_{Lj} \tag{9}$$

avec :

$$const_{Lj} = 3 \cdot \rho_{Lj} \cdot L_{Lj} \cdot H_j \cdot p \cdot \frac{f}{S_{secLj}} \tag{10}$$

où, d_{Lj} est le coefficient qui représente la variable de décision pour le maintien ou non de la connexion de la ligne j dans le futur réseau électrique et est compris entre 0 et 1; ΔI_{Lj} est le courant de surcharge qui peut circuler dans la ligne j et N_{LCon} est le nombre de nouvelles connexions de lignes pour éliminer la surcharge de celles-ci.

On admet qu'une connexion de la ligne j est maintenue dans le réseau si sa variable de décision d_{Lj} a une valeur supérieure à m , élément de l'intervalle $[0, 1]$. Le problème consiste à minimiser la fonction de connexion FC de **l'Equation (9)** dont la variable est d_L avec ses contraintes aux **Equations (12)** et **(13)**. La variable d_L est un vecteur tel que présenté par **l'Equation (11)**.

$$d_L = [d_{L1}, \dots, d_{LN_{LCon}}] \tag{11}$$

L'Equation (9) a pour contraintes d'inégalité **les Equations (12)** et **(13)**.

$$0 \leq d_{Li} \leq 1, i = 1, \dots, N_{LCon} \tag{12}$$

$$\sum_{i=1}^{N_{LCon}} I_{Lmaxi} \cdot d_{Li} \geq \Delta I_L \tag{13}$$

où, I_{Lmaxi} est le courant maximal de la $i^{ème}$ ligne et ΔI_L **Equation (8)** est le courant total de surcharge des lignes.

Enfin l'optimisation de la planification du réseau électrique HT va ainsi consister à minimiser la fonction objective FC de configuration de nouvelles connexions de lignes électriques selon **l'Equation (14)**. Ceci permettra d'évaluer le coût de production CP_{EnR} grâce à **l'Equation (15)**, le coût de connexion de nouvelles

lignes CL à partir de ***l'Equation (4)***, le coût de transit CT de puissance dans les lignes par ***l'Equation (17)*** et la quantité de CO₂ évitée Ev_{CO₂} ***Equation (18)***, [1, 6, 12, 23, 24].

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser} \quad \left\{ FC(d_L) = \sum_{j=1}^{N_{LCon}} d_{Lj} \cdot \Delta I_{Lj}^2 \cdot \text{const}_{Lj} \right\} \\ \text{sous les contraintes} \\ d_{Li} \geq m, \text{ avec } m \in [0; 1] \text{ et } i = 1, \dots, N_{LCon} \\ \sum_{i=1}^{N_{LCon}} I_{Lmax_i} \cdot d_{Li} \geq \Delta I_L \end{array} \right. \quad (14)$$

où, d_L est le vecteur de variables de décision ; d_{Lj} est le coefficient qui représente la variable de décision pour le maintien ou non de la connexion de la ligne j dans le futur réseau électrique et est compris entre 0 et 1 ; ΔI_{Lj} est le courant de surcharge qui peut circuler dans la ligne j ; const_{Lj} est une constante relative à la ligne j et vaut $3 \cdot \rho_{Lj} \cdot L_{Lj} \cdot H_j \cdot p \cdot f / S_{secLj}$ et N_{LCon} est le nombre de nouvelles connexions de lignes pour éliminer la surcharge de celles-ci. Le coût de production CP_{EnR} de l'énergie électrique produite la source d'Energie Electrique Renouvelable est défini selon le modèle de ***l'Equation (15)***.

$$CP_{EnR} = \sum_{i=1}^{N_G} CP_{u,i} \cdot P_{gi} \quad (15)$$

avec :

$$P_{gi}^{\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} \quad (16)$$

où, P_{gi} est la puissance produite par la source d'EnR i (MW); P_{gi}^{\min} et P_{gi}^{\max} sont respectivement la valeur minimale et celle maximale de la puissance électrique produite par la i^{me} source d'Energie Electrique Renouvelable (MW) et $CP_{u,i}$ est le coût unitaire de production de la i^{me} source d'Energie Electrique Renouvelable (US \$/MWh).

La fonction coût CT(US \$) de transit de puissance dans les lignes de transport d'énergie est donnée par ***l'Equation (17)***.

$$CT = \sum_{k=1}^{N_L} c_k \cdot P_{trk} \quad (17)$$

où, P_{trk} est la puissance transitée dans la ligne dans la ligne de transport k ; c_k est le coût moyen de transport par unité de capacité de la ligne k et N_L est le nombre total de lignes de transport d'énergie électrique.

Quant à la fonction d'évitement du CO₂, Ev_{CO₂} (exprimée en t/h) par rapport à l'utilisation des sources de production d'origine thermique à flammes au lieu des sources d'Energie Electrique Renouvelable, elle est donnée par ***l'Equation (18)***.

$$Ev_{CO_2} = \sum_{i=1}^{N_G} (Q_{Therm_{CO_2_i}} - Q_{EnR_{CO_2_i}}) \cdot P_{gi} \quad (18)$$

où, N_G est le nombre d'unités de production du système électrique ; $Q_{EnR_{CO_2_i}}$ est la quantité de CO₂ émis par unité d'énergie (t/MWh) de la i^{me} source d'Energie Electrique Renouvelable ; $Q_{Therm_{CO_2_i}}$ est la quantité

de CO₂ émis par unité d'énergie (t/MWh) de la source thermique à flammes en lieu et place de la *i^{ème}* source d'Energie Electrique Renouvelable et *P_{gi}* est la puissance (MW) de la *i^{ème}* source.

2-3. Présentation des données

Les données d'un réseau électrique normalisé IEEE constitué de 08 nœuds ont été utilisées dans ce papier. Ce réseau électrique [24] utilisé est constitué de 08 nœuds dont 04 nœuds sont opérationnels (réseau électrique existant) et les 04 restants sont uniquement des nœuds de sources de production d'Energie Electrique Renouvelables à insérer dans le réseau existant. Les paramètres du réseau électrique normalisé IEEE de 08 nœuds sont présentés dans le **Tableau 1**. La puissance de base *S_b* vaut 100 MVA et les tensions de base *U_b* à chaque nœud égalent à sa tension nominale. La contrainte en per unit (pu) sur la tension à chaque nœud est telle que : $0,9 \leq U_p \leq 1,1$ $p = 1, \dots, 8$. La localisation de chaque nœud est exprimée par ses coordonnées (abscisse et ordonnée). Les charges ne sont pas prévues aux différents nœuds d'insertion. Ce sont rien que des sources d'énergie électrique renouvelables qui seront insérées à ces nœuds (N° 5, 6, 7 et 8) en lieu et place des sources thermiques à flammes.

Tableau 1 : Les caractéristiques des nœuds du réseau électrique normalisé IEEE de 08 nœuds à planifier

N°	Abscisse (10 km)	Ordonnée (10 km)	U _n [kV]	Θ [rad]	Générateur		Charge	
					P _{gmax} [MW]	Q _{gmax} [MVAR]	P _{Charge} [MW]	Q _{Charge} [MVAR]
1	3,5	4	150	0,0476	600	101	800	100
2	2,75	5,5	380	-0,0593	0	0	650	200
3	5	6.5	380	0	800	250	0	0
4	7	1	150	0,0305	0	0	0	0
Sources d'EnR à insérer lors de la planification : Hypothèses des sites caractérisés								
							t _{co2} [t / MWh]	Nature
5	7	4,5	150	0	400	125	0	Hydroélectrique
6	4,5	6	380	0	500	125	0.008	Eolienne
7	5,5	3	150	0	500	125	0.008	Eolienne
8	2,5	6,75	380	0	600	125	0.1	Solaire
Légende								
U _n : Tension [kV] au nœud ; Θ : Phase de la tension au nœud [rad] ; P _{gmax} : Puissance active maximale du générateur [MW] ; Q _{gmax} : Puissance réactive du générateur [MVAR] ; P _{Charge} : Puissance active de la charge [MW] ; Q _{Charge} : Puissance réactive de la charge [MVAR] ; t _{co2} : tonne du dioxyde de carbone par unité d'énergie [t/MWh].								

Les caractéristiques des lignes du réseau existant sont représentées dans le **Tableau 2**

Tableau 2 : Les caractéristiques des lignes existantes du réseau électrique normalisé IEEE de 08 nœuds étudié

N°	Départ	Arrivée	U _{nL} [kV]	L [km]	R _L [Ω/km]	X _L [Ω/km]	S _{ecl} [mm ²]	S _L [MVA]	P _{Lmax} [MW]	ρ _L [Ω.mm]	I _{Lmax} [kA]
1	1	4	150	75	0,2875	0,001	240	1043	938,7	357.10 ⁻⁷	4,0145
2	2	3	380	70	0,21	0,00008	300	9823	8840,7	157.10 ⁻⁷	14,924
Légende											
U _{nL} : Tension de la ligne [kV] ; L : Longueur de la ligne [km] ; R _L : Résistance linéique de la ligne [Ω/km] ; X _L : Réactance linéique de la ligne [Ω/km] ; S _{ecl} : Section de la ligne [mm ²] ; S _L : Puissance apparente de la ligne [MVA] ; P _{Lmax} : Puissance active de la ligne [MW] ; ρ _L : Résistivité de la ligne [Ω.mm] ; I _{Lmax} : Courant maximale de la ligne [kA].											

Les caractéristiques des lignes à utiliser pour l'insertion des sources d'Energie Electrique Renouvelables et la connexion de nouvelles lignes sont présentées dans le **Tableau 3**. Ces caractéristiques constituent également des contraintes liées aux nouvelles lignes électriques à créer lors de la planification [24].

Tableau 3 : Les caractéristiques des lignes à utiliser pour l'insertion des sources d'EnR et les nouvelles connexions de lignes du réseau électrique normalisé IEEE de 08 nœuds à planifier

N°	Désig.	U_{nL_inser} [kV]	R_{L_inser} [Ω /km]	X_{L_inser} [Ω /km]	S_{ecL_inser} [mm ²]	S_{L_inser} [MVA]	P_{Lmax_inser} [MW]	ρ_{L_inser} [Ω .mm]	I_{Lmax} [kA]	Coef. Transsit [US \$/MWh]
1	Arvidal	150	0,400978	0.0021	177,35	1035,796	932,2164	3.10^{-5}	3,9867	63,63
2	ACSR	380	0,3	0,001	431,3	664,6	598,15	$1,5.10^{-5}$	1,0097	63,63

Légende
 Désig. : Désignation ; U_{nL_inser} : Tension de la ligne à insérer [kV] ; R_{L_inser} : Résistance linéique de la ligne à insérer [Ω /km] ; X_{L_inser} : Réactance linéique de la ligne à insérer [Ω /km] ; S_{ecL_inser} : Section de la ligne à insérer [mm²] ; S_{L_inser} : Puissance apparente de la ligne à insérer [MVA] ; P_{Lmax_inser} : Puissance active de la ligne à insérer [MW] ; ρ_{L_inser} : Résistivité de la ligne à insérer [Ω .mm] ; I_{Lmax_inser} : Courant maximale de la ligne à insérer [kA] ; Coef. Transsit : Coefficient du coût du transit de puissance dans la ligne par unité d'énergie [FCFA/MWh].

Le **Tableau 4** renseigne sur les paramètres des transformateurs du réseau existant.

Tableau 4 : Les caractéristiques des transformateurs du réseau électrique normalisé IEEE de 08 nœuds à planifier

N°	Départ	Arrivée	U_{Tn1} [kV]	U_{Tn2} [kV]	R_T [Ω]	X_T [Ω]	S_{Tmax} [MVA]	I_{Tmax} [kA]
1	3	4	150	380	0,013	0,1	295	1,966
2	2	1	150	380	0,013	0,1	295	1,966

Légende
 U_{Tn1} : Tension primaire du transformateur [kV] ; U_{Tn2} : Tension secondaire du transformateur [kV] ; R_T : Résistance du transformateur [Ω] ; X_T : Réactance du transformateur [Ω] ; S_{Tmax} : Puissance apparente du transformateur [MVA] ; I_{Tmax} : Courant maximal du transformateur [kA].

L'évaluation des coûts de connexion de nouvelles lignes, nécessite la maîtrise des paramètres économiques **Tableau 5** de ces lignes.

Tableau 5 : Les paramètres économiques des lignes de connexion à utiliser dans la planification du réseau électrique normalisé IEEE de 08 nœuds.

Désignation	Valeur
Nombre d'heure d'emploi annuel à pleine charge	7920 h / an
Coût des pertes par kWh	0,0000739 US \$ / Wh
Taux d'accroissement du prix de kWh	2 %
Taux d'intérêt	8,5 %
Durée de vie	20 ans

Le **Tableau 6** contient les données de la planification à savoir l'horizon de la planification et le taux de croissance annuelle de la charge.

Tableau 6 : Les données de la planification du réseau électrique normalisé IEEE de 08 nœuds

Désignation	Valeur
Horizon de la planification	20 ans
Taux de croissance annuelle de la charge	5 %

Les hypothèses macro-économiques des centrales de production d'énergie électrique renouvelable utilisées dans ce papier sont présentées dans le **Tableau 7**.

Tableau 7 : Les hypothèses macro-économiques des centrales de production d'énergie renouvelables [25]

	Nature des centrales de production		
	Eolien terrestre avec stockage	Hydroélectricité	Solaire photovoltaïque avec stockage
Taux d'actualisation i (%)	8	8	8
Coût unitaire de production [US \$ / MWh]	88,22	74,27	203,85

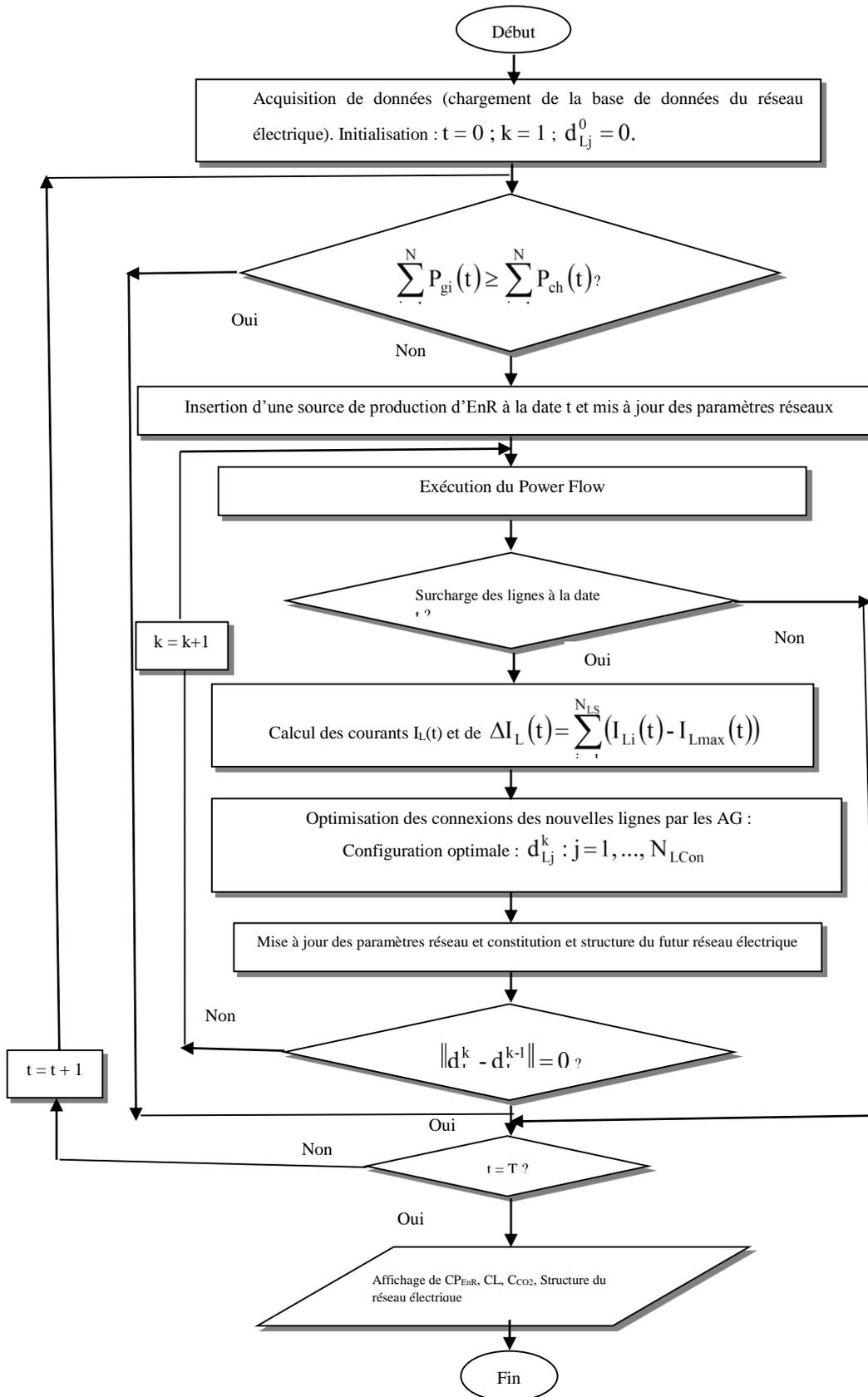
Les paramètres de la fonction « ga » de l'Algorithmes Génétiques (AG) de Matlab programmé conformément au principe illustré à la **Figure 1** sont dans le **Tableau 8**.

Tableau 8 : Les paramètres des algorithmes génétiques

Paramètres des AG	Valeur
Nombre d'individus de la population	100
Nombre de gènes des individus	Variable selon les lignes électriques
Nombre de génération	51
Codage	Réel
Probabilité de croisement	0,8
Probabilité de mutation	0,05
Sélection	Roulette
Croisement	Arithmétique
Mutation	Gaussienne

2-4. Traitement de données

Dans le souci de gagner du temps lors des études de la planification des réseaux électriques HT, une application informatique a été réalisé en Matlab sous un environnement Windows XP et supérieur. Cette application n'est qu'un outil d'aide à la planification optimale de réseaux électriques HT et utilise les AG. Pour favoriser le bon fonctionnement de cet outil d'aide, une base de données a été créée pour contenir les données du réseau électrique à planifier. A cet effet, l'outil d'aide dont l'organigramme est représenté sur la **Figure 4** accède d'abord aux fichiers de la base de données dont il est doté. Ensuite, suite à l'inadéquation entre l'offre et la demande en énergie électrique, il exécute l'écoulement de puissance, identifie les lignes surchargées, met à jour les paramètres des lignes, insère de nouvelles sources d'Energie Electrique Renouvelables si la demande l'exige et présente la nouvelle structure du réseau électrique. Puis grâce au module des AG (§2.1) il détermine les configurations optimales de connexion des lignes électriques qui permettent d'éviter les surcharges de lignes détectées plus tôt dans le réseau électrique. Les coûts de production, de connexion des nouvelles lignes et du transit de puissance sont évalués. Enfin la quantité du dioxyde de carbone (CO₂) évitée par l'insertion des sources d'Energie Electrique Renouvelables dans le réseau existant par rapport aux sources thermiques à flammes est aussi évaluée.



- Légende**
- T : horizon de la planification en année;
 - N : nombre de nœuds actifs du réseau ;
 - N_{LS} : nombre de lignes surchargées ;
 - P_g : puissance générateur ;
 - P_{ch} : puissance consommée ;
 - t : date en année ;
 - I_{ij} : courant dans la ligne j ;
 - I_{Lmax j} : courant maximal de la ligne j ;
 - ΔI_L : courant total de surcharge des Lignes ;
 - d_{Lj}^k : variable de décision à la k-ième itération ;
 - CP_{EnR} : coût de production des sources d'EnR insérées;
 - CL : coût de connexion des nouvelles lignes ;
 - C_{CO2} : coût d'émission du CO₂ des sources d'EnR insérées dans le réseau
 - N_{LCon} : nombre de nouvelles connexions de lignes.

Figure 4 : Organigramme du programme informatique

3. Résultats et discussion

La structure du réseau électrique à l'an 0 de l'horizon 20 ans de la planification est présentée à la **Figure 5** avec une inadéquation entre l'offre (1400 MW) et la demande (1450 MW) en énergie électrique.

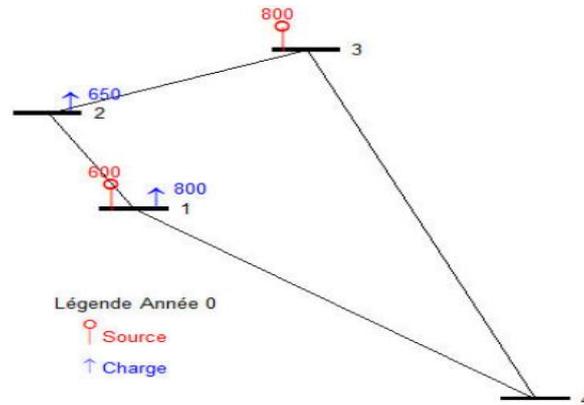


Figure 5 : Le réseau électrique à l'an 0 de l'horizon 20 ans de la planification

La première année de la planification commence avec une croissance de la demande en énergie de 5 % (**Tableau 6**). Ceci entraîne une demande en énergie de 1522,5 MW (selon **l'Equation 3** et P_{Charge} [MW] du **Tableau 1**) supérieure à la production énergétique de 1400 MW (P_{gmax} [MW] du **Tableau 1**). A partir des données du réseau électrique (**Tableaux 1 à 4**) et de celles de la planification (**Tableaux 5 à 7**). L'outil d'aide développé lance d'abord l'insertion d'une source d'Énergie Electrique Renouvelable dans le réseau existant. Ensuite il vérifie l'état du réseau à l'aide de l'écoulement de puissance (Power Flow) et crée éventuellement de nouveaux arcs (lignes électriques) grâce à l'algorithme génétique (AG) pour éviter les surcharges des lignes électriques existantes. L'outil procède de la même façon à chaque étape (année) de la planification jusqu'à l'épuisement des sources d'Énergie Electrique Renouvelables à insérer ou jusqu'à arriver au terme de l'horizon 20 ans de ladite planification. Enfin les résultats sont consignés et présentés dans les **Tableaux 9 et 10** en plus de la structure finale du réseau électrique futur (**Figure 6**).

Tableau 9 : Rapport d'insertion des sources d'EnR et d'évitement de CO₂ lors de la planification

N° Source d'EnR	P_{g_Max} [MW]	Coût_Production [US \$ / h]	tCO ₂ [tonne / h]	tCO ₂ évitée [tonne / h]	Année d'insertion	Année en cours
5	400	29709,09	0	348	1	17
6	500	44110,05	4	431	5	17
7	500	44110,05	4	431	10	17
8	600	122315,97	60	462	14	17

D'après les résultats du **Tableau 9** (P_{g_Max} [MW]), les sources de production d'énergie électrique renouvelables de 400 MW, 500 MW, 500 MW et 600 MW ont été respectivement insérées dans le réseau électrique aux années 1, 5, 10 et 14 (Année d'insertion du **Tableau 9**) de l'horizon 20 ans de la planification. La nature renouvelable de ces sources insérées dans le réseau électrique en lieu et place des sources thermiques à flammes au cours de cette planification à long terme, permet d'éviter l'émission d'une importante quantité de CO₂ dans le cadre de la protection de l'environnement. Avec un fonctionnement annuel de ces sources, on peut éviter (tCO₂ évitée [tonne / h] du **Tableau 9**) 348 tCO₂ / h pour la source N°5, 431 tCO₂ / h pour les sources N°6 et 7 qui sont de même nature et de même puissance de production maximale (P_{gmax} [MW] et Nature du **Tableau 1**) et 462 tCO₂ / h pour la source N°8. Les coûts de production

d'énergie électrique de chacune de ces 4 sources ont été aussi évalués tels que (Coût_Production [US \$/h] du **Tableau 9**) 29 709,09 US \$ / h pour la source N°5; 44 110,05 US \$ / h pour les sources N°6 et 7 qui sont de même nature et de même puissance de production maximale (P_{gmax} [MW] et Nature du **Tableau 1**) et 122 315,97 US \$ / h pour la source N° 8.

Tableau 10 : Résultats des connexions optimales de nouvelles lignes par l'algorithme génétique (AG)

Variable de décision : d_{Li}	N° Ligne	Départ	Arrivée	Coût optimal de connexion [US \$]	Coût de transit [US \$ / h]	Année de connexion	Année en cours
0,7413	1	5	1	$224,18.10^{10}$	184,6	1	17
0,7598	2	5	4	$358,6.10^{10}$	1,06	1	17
0,6635	3	6	3	$3,07.10^{10}$	8,40	5	17
0,6584	4	6	2	$4,74.10^{10}$	85,38	5	17
0,7498	5	7	5	$89,64.10^{10}$	165,64	10	17
0,6580	6	7	4	$201,7.10^{10}$	164,60	10	17
0,5917	7	8	6	$18,97.10^{10}$	71,47	14	17
0,5570	8	8	3	$23,94.10^{10}$	78,62	14	17
0,7917	9	8	2	$4,94.10^{10}$	65,89	14	17
Cumul des coûts				$929,78.10^{10}$	825,66	-	

Le **Tableau 10** montre les résultats de la création de nouveaux arcs (lignes électriques) nécessaires pour éviter les surcharges des lignes existantes dues à l'insertion des sources d'énergie électrique renouvelables. L'exécution de l'algorithme génétique a permis d'obtenir neuf (09) gènes comme variables de décision d_{Li} et affiliés dans l'ordre aux neuf (09) nouvelles connexions de lignes à savoir (Départ - Arrivée du **Tableau 10**) les lignes (5 - 1), (5 - 4), (6 - 3), (6 - 2), (7 - 5), (7 - 4), (8 - 6), (8 - 3) et (8 - 2). Ainsi le coût optimal total de connexion de nouvelles lignes $929,78.10^{10}$ US \$.

La **Figure 6** montre l'évolution dans l'espace et dans le temps du réseau électrique de part ses structures au cours de sa planification.

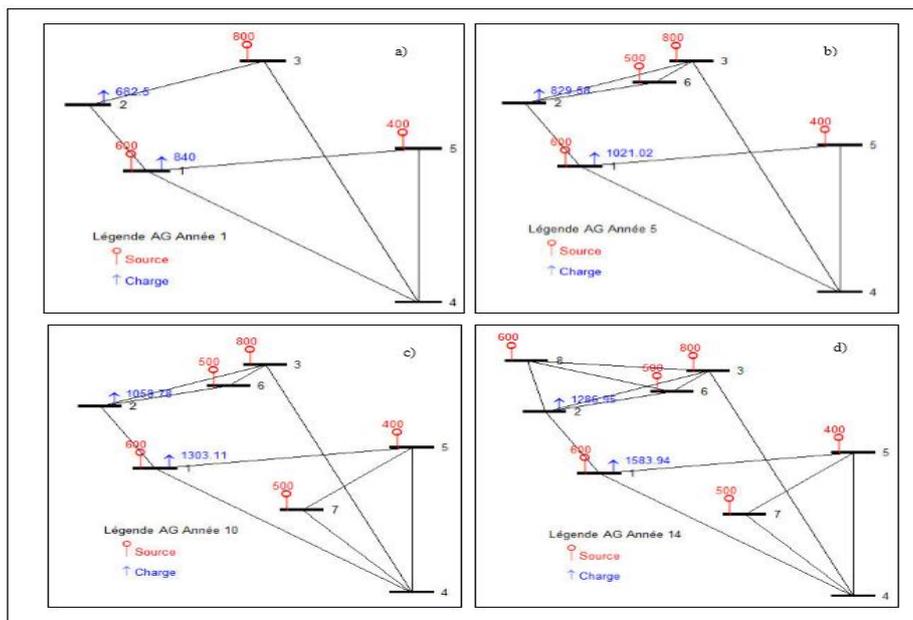


Figure 6 : Structure évolution du réseau électrique dans le temps et dans l'espace par les AG.

Selon les données du réseau existant (**Tableau 1**) et de la planification (**Tableau 6**), l'inadéquation entre la production et la demande en énergie électrique se fera sentir définitivement à l'an 17 de la planification. En effet à partir de l'an 17 de l'horizon 20 ans de la planification du réseau électrique normalisé IEEE de 08 nœuds, la demande totale en énergie électrique sera 3323,4257 MW (**Equation 3** et P_{charge} [MW] du **Tableau 1**) en plus des pertes contre une production totale énergétique de 3400 MW (P_{gmax} [MW] du **Tableau 1**). Il n'existera plus de sources d'Énergie Électrique Renouvelables à insérer dans le réseau électrique. Les dernières connexions des lignes électriques sont effectuées à l'an 14 de la planification selon les résultats du **Tableau 10**. Cependant le réseau électrique peut tenir sans incidents majeurs suivant l'évolution annuelle de la demande en énergie électrique jusqu'à l'an 17 de l'horizon 20 ans de la planification. A cet an 17 de la planification, les paramètres aux nœuds du réseau électrique présentés au **Tableau 11** sont satisfaisants car les tensions respectent les contraintes prédéfinies au paragraphe §2.3 ($0,9 \leq U [pu] \leq 1,1$).

Tableau 11 : Résultats du power flow aux nœuds du réseau à l'an 17 de l'horizon 20 ans de la planification

N° Bus	Tension [pu]	Phase [rad]	Pgén [pu]	Qgén [pu]	Pcharge [pu]	Qcharge [pu]	Année d'insertion	Année en cours
1	1,0100	0,0300	6	1,0100	16,3361	2,2920	0	17
2	1	0,0080	0	0	12,8981	4,5840	0	17
3	0,9890	0,00001	8	2,2800	0	0	0	17
4	1	0,0002	0	0	0	0	0	17
5	1	-0,0070	4	1,2500	0	0	1	17
6	0,9900	0,000023	5	1,2500	0	0	5	17
7	1,0200	0,0090	5	1,2500	0	0	10	17
8	1	0,001	6,0040	1,2500	0	0	14	17

Le **Tableau 12** contient les puissances (P_{lr} [pu]) et courants transités (I [pu]) dans les lignes électriques du réseau.

Tableau 12 : Résultats du transit de puissance dans le réseau à l'an 17 de l'horizon 20 ans de la planification

N° Ligne	Départ	Arrivée	P _{lr} [pu]	Q _{tr} [pu]	I [pu]	I _{max} [pu]	Année de connexion	Année en cours
1	3	1	3,4178	2,0541	2,3022	2,9500	0	17
2	2	4	0,4694	4,0489	2,3274	2,9500	0	17
3	1	4	2,2036	21,0443	12,3385	20,8600	0	17
4	2	3	21,6788	180,6656	105,0556	196,4600	0	17
5	5	1	2,9009	26,6107	15,4547	20,7159	1	17
6	5	4	0,0168	26,3635	15,2210	20,7159	1	17
7	6	3	0,1321	11,6651	6,0679	6,6460	5	17
8	6	2	1,3417	11,7792	6,5762	6,6460	5	17
9	7	5	2,6030	12,8668	7,7307	10,3580	10	17
10	7	4	2,5867	12,8679	7,7295	10,3580	10	17
11	8	6	1,1232	10,6458	6,1805	6,6460	14	17
12	8	3	1,2355	10,6355	6,1817	6,6460	14	17
13	8	2	1,0355	10,5000	6,2100	6,7860	14	17

On ne note pas de surcharge des lignes car l'intensité de chacun des courants transités ($I_{[pu]}$ du **Tableau 12**) est inférieure à celle de chacun des courants admissibles ($I_{max,[pu]}$ du **Tableau 12**). Cependant certaines lignes (N° 1, 2, 7, 8, 11, 12 et 13) sont traversées par des courants (2,3022 ; 2,3274 ; 6,0679 ; 6,5762 ; 6,1805 ; 6,1817 ; 6,2100) proches respectivement de leur valeur admissible (2,9500 ; 2,9500 ; 6,6460 ; 6,6460 ; 6,6460 ; 6,6460 ; 6,7860). Le **Tableau 12** renseigne aussi sur les années de connexion des différentes lignes électriques.

4. Conclusion

Le travail présenté dans ce papier a consisté à l'optimisation de la création des lignes de transport d'énergie électriques dans la planification optimale à long terme des réseaux électriques haute tension. La particularité de cette planification est l'insertion unique des sources d'énergie électrique renouvelables pour la protection de l'environnement notamment l'évitement de quantité du dioxyde de carbone (CO_2). L'évolution du graphe du réseau électrique lors de la planification a été aussi présentée. L'approche utilisée est celle des algorithmes génétiques en codage réel. Nous avons développé dans Matlab un outil d'aide à la décision pour la planification optimale des réseaux électriques HT. Cet outil a été utilisé pour planifier un réseau électrique normalisé IEEE de 08 nœuds. Pour ce réseau normalisé IEEE de 08 nœuds, quatre (04) nouvelles sources d'énergie électrique renouvelables (N°5, 6, 7 et 8) ont été insérées respectivement dans le réseau existant aux années 1, 5, 10 et 14 de l'horizon 20 ans de la planification dudit réseau. Les résultats ont donné :

- Les coûts de production respectifs 29 709,09 US \$/h pour la source N°5 ; 44 110,05 US \$ / h pour les sources N°6 et 7 qui sont identiques en nature et en production maximale et 122 315,97 US \$ / h pour la source N°8;
- Les quantités respectives de CO_2 évitée 348 t_{CO_2} / h par la source N°5, 431 t_{CO_2} / h par chacune des sources N°6 et 7 qui sont identiques et 462 t_{CO_2} / h par la source N°8 en lieu et place des sources thermiques à flammes;
- Les périodes de 09 nouvelles connexions optimales des arcs (lignes) électriques à savoir 2 nouvelles lignes à l'an 1, 2 à l'an 5, 2 à l'an 10 et 3 à l'an 14 de l'horizon 20 ans avec leur coût respectif pour un coût total optimal de 929,78.10¹⁰ US \$;
- Les transits de puissance dans les lignes électriques avec leur coût respectif pour un coût total de 825,66 US \$ / h;
- L'évolution de la structure dudit réseaux du début à la fin de la planification.

Selon les mêmes résultats, à l'an 14 de l'horizon 20 ans de la planification, il n'y aura plus de sources d'énergie électrique renouvelables à insérer dans ledit réseau. Cependant avec les nouvelles connexions de lignes électriques effectuées et malgré la croissance de la demande énergétique, le réseau peut tenir jusqu'à l'an 17 de l'horizon 20 ans de la planification sans incident majeur. Cette étude a permis de mieux appréhender la portée de l'algorithme génétique dans la planification optimale des réseaux électriques. L'outil développé peut servir dans les bureaux d'études par les spécialistes de la planification des réseaux électriques HT. Il peut être également utilisé comme matériel didactique permettant des simulations dans la production et le transport d'énergie électrique.

Références

- [1] - M. L. PERRY, “*Energy-Related Carbon Dioxide Emissions*”, International Energy Outlook 2010, DOE/EIA-0484, (July 2010) 123 - 134.
- [2] - J. BUBA, C. Le MOIGN, D. AUVERLOT, “*Le pari de l'éolien*”, Rapports et documents du Centre d'analyse stratégique, Paris, France, (Novembre 2009).
- [3] - L. STOYANOV, G. NOTTON, V. LAZAROV, “*Optimisation des systèmes multi-sources de production d'électricité à énergies renouvelables*”, Revue des Energies Renouvelables, Vol 10 N°1, (Mars 2007) 85 - 102.
- [4] - H. ALKHATIB, “*Etude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques : Optimisation de la régulation par une méthode méta heuristique*” Thèse de doctorat, Faculté des Sciences et Techniques, Option génie électrique, Université Paul Cézanne d'Aix-Marseille III, France, (décembre 2008).
- [5] - J. A. NELDER, R. MEAD, “*A Simplex Method for function Minimisation*”, Computer Journal, Vol. 7, (1965) 308 - 312.
- [6] - ABDELHAKEM-KORIDAK L., M. ZERIKAT, M. RAHLI, “*Comparative study of the genetic algorithms and Hessians method for minimization of the electric power production cost*” World Academy of Science, Engineering and Technology 34, (2007).
- [7] - L. SLIMANI, “*Contribution à l'application de l'optimisation par les méthodes métaheuristiques à l'écoulement de puissance optimal dans un environnement de l'électricité dérégulé*”, Thèse de Doctorat en sciences, Option Electrotechnique, Université de BATNA, Algérie, (Décembre 2009).
- [8] - L. L. GARVER, “*Transmission Network Estimation Using Linear Programming*. IEEE”, Transaction on power Apparatus and Systems, Vol. Pas-89, N°7, (October 1979) 1688 - 1697.
- [9] - P-A. CHAMOREL, “*Optimisation des puissances actives et réactives par la programmation linéaire dans les réseaux électriques à HT*”, Thèse de doctorat ès Sciences Techniques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, (1983).
- [10] - Y. BOKOVI, A. S. A. AJAVON, M. K. KODJO, A. A. SALAMI, K. BEDJA, “*Planification optimisée des réseaux électriques par la méthode des Algorithmes Génétiques avec prise en compte uniquement de l'insertion des sources d'énergies électriques renouvelables (éolien, solaire photovoltaïque et hydroélectrique)*”, J. Rech. Sci. Univ. Lomé, (Togo), Série E, 14(1) (2012) 35 - 55.
- [11] - J. HOLLAND, “*Adaptation in natural and artificial systems*”, University of Michigan Press, Ann Arbor, (1975).
- [12] - M. YOUNES, M. RAHLI, M. KANDOUCCI, “*Répartition économique des puissances par un algorithme génétique en code réel (application à un réseau 118 nœuds)*”, 6^e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation: MOSIM'06 Rabat-Maroc, (Avril 2006).
- [13] - M. LAOUER, A. ALLALI, A. CHAKER, K. HACHEMI, “*New approach of optimal power flow with genetic algorithms*”, Acta Electrotechnica et Informatica, FEI UKE, Vol8, N°2, (2008) 35 - 42.
- [14] - Z. MICHALEWICZ AND C. Z. JANIKOV, “*Handling constraints in genetic algorithms*” In Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithm. ICGA, (1991).
- [15] - M. YOUNES, S. HADJRI, H. SAYAH, “*Dispatching économique par une méthode artificielle*”, Médiamira Science Publisher, (2009).
- [16] - J-M ALLIOT, N. DURAND, “*Algorithmes génétique*”, Cepadues, (Mars 2005).
- [17] - D.E. GOLBERG, “*Real-coded genetic algorithms, virtual alphabets and blocking*”, Complex Systems, 5 (1991) 139 - 167.
- [18] - A. H. WRIGHT, “*Genetic algorithms for real parameter optimization*” In Proceeding of the Foundation of Genetic Algorithms, FOGA, (1991).
- [19] - E. KOUTROULIS and al, “*Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms*”, Elsevier, Science Direct, Solar Energy 80, (2006) 1072 - 1088.

- [20] - D. E. GOLBERG, "*Genetic Algorithms in search, Optimization and Machine Learning*", Reading MA Addison Wesley, (1989).
- [21] - L. ABDELHAKEM-KORIDAK, M. RAHLI, D. LEFEBRE AND M. YOUNES, "*Optimisation du dispatching électrique et de l'émission des gaz par les algorithmes génétiques*" ACTA Electrotechnica, Mediamira Science Publisher, Volume 49, N+2, (2008) 194 - 199.
- [22] - MATLAB, "*User's Guide*", Release, 13 (2009).
- [23] - Y. BOKOVI, "*Planification optimale des réseaux électriques haute tension par les algorithmes génétiques avec insertion des sources d'énergie électrique renouvelables*", Thèse de doctorat unique en Sciences de l'Ingénieur, Génie Electrique, ENSI, Université de Lomé, Togo, (décembre 2013).
- [24] - J-L. LILIEN, "*Transport et distribution de l'énergie électrique*", Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, (1999).
- [25] - MFEE : Ministère Français de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire, "*Synthèse publique de l'étude des coûts de référence de la production électrique*", France, (2012).