الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

**Département du Génie Électrique**
**et de l'Informatique**



## Mémoire de Fin d'Études

**Présenté pour l'obtention du Diplôme**
**de Master en Génie Électrique**

*Option* : RESEAUX ELECTRIQUE

## THEME

# RECONFIGURATION OPTIMALE DES RESEAUX DE DISTRIBUTION ELECTRIQUE

**Proposé et dirigé par,**

Dr. / SEBAA Karim

Dr. /M. TLEMÇANI Abdelhalim

**Préparé et présenté par,**

Melle. Saliha Merzoug

Année Universitaire 2014-2015

# Dédicace

*Pour l'étoile source d'affection et persévérance*

*Pour l'être le plus chère au monde*

*Pour leur soutien moral*

*Ma mère et Mon père*

*Je dédie ce modeste mémoire de master à :*

*Mes sœurs : imane, ourda, fadhila, chafika, touma, hassina*

*Mes frères: Mohamed, Zouhir, halim, Mohamed, Farid*

*Les petites : Lina, iyad, Rahim, ranime*

*A toutes mes familles : merzoug et Belhadj*

*Sans oublier mes très chers amis : kaoutar, afaf, imane, sara, siham*

*A tous mes camarades de promotion*

*A toute personne qui me porte de l'estime*

*et à toute personne à qui je porte de*

*L'estime.*

*Saliha MERZOUG*



# *Remerciements*

*Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricor dieux,*
*de m'avoir appris ce que j'ignorais,de m'avoir donné la santé*
*et tout dont je nécessitais pour l'accomplissement*
*de cette thèse.*

*je remercie l'encadreur de mémoire* ***Dr. KARIM SBAA, et sa doctorante kaouthar melizi*** *pour leurs encadrement, ses directives et ses disponibilités.*
*Aussi, je les remercie* ***le chef servies de programme d'etat électricité sonel gaz Mr.belkacem laidi*** *pour ses encouragements, ses indulgences,*
*et encadrement ses sympathies tout au long de stage de travail, et de*
*m'avoir offert l'opportunité ce travail sous ses directions et*
*de ses précieux conseils et orientations.*

*Ma gratitude s'exprime pareillement pour les membres du jury d'avoir bien*
*voulu s'intéresser à mon travail et d'avoir accepté de le juger.*
*Je tiens également à remercier vivement tous mes collègues de ma promotion*
*toutes options confondues pour leurs amitiés et collaborations.*
*Je remercie également tous les enseignants de département Gene électrique*
*Et informatique qui ont participé à ma formation pendant tout le*
*cycle universitaire.*
*Je saisie cette occasion pour exprimer ma grande reconnaissance et gratitude*
*à tous ceux qui ont contribué à la réalisation*
*et l'achèvement de ce travail.*



**ملخص:** يتم تشغيل شبكات التوزيع الكهربائية في تكوين شجرة. ومع ذلك، هياكلها الأساسية عموما حلقات، بحيث يمكن تكوينها وفقا لعدة خطط التشغيلية الممكنة من أجل ضمان وصول الأحمال المطلوبة من حيث عدد المشتركين. وكجزء من هذه المواصفات، يقترح التطوير والمقارنة بين طريقتين حتى يمكن تحديد مخطط التشغيل من شبكة التوزيع التي تناسب مجموعة من المعايير والقيود المحددة من قبل المشغلين، الأساليب هي الخوارزميات الجينية والأسلوب الكلاسيكي فرع و ربط

**كلمات مفتاحية** شبكات التوزيع. تدفق الطاقة. الخوارزميات الجينية

**Résumé :** Les réseaux électriques de distribution sont exploités selon une configuration arborescente. En revanche, leurs structures de base comportent généralement des boucles, ainsi, ils peuvent être configurés selon plusieurs schémas d'exploitation possibles dans le but d'assurer la desserte des charges requises par les abonnés. Dans le cadre de ce mémoire, on se propose de concevoir et comparer entre deux méthodes capables de déterminer le schéma d'exploitation d'un réseau de distribution qui répond au mieux à un ensemble de critères et de contraintes spécifiés par les exploitants, ces deux méthodes sont les algorithmes génétiques et la méthode classique séparation et évaluation.

**Mots clés :** réseau électrique de distribution, écoulement de puissance, algorithme génétique, méthode par séparation et évaluation.

**Abstract:** Electrical distribution networks are operated according to a radial configuration. However, their basic structures generally comprise loops. Therefore, they can be configured according to several possible operational schemes in order to insure the supply of the loads required by the consumers. Within the course of this memory, one proposes to conceive and to compare between two methods capable of determining the electrical distribution network operational scheme that best satisfies a set of criteria and constraints specified by the operators, these two methods are the genetic algorithms and the traditional method branch and bound.

**Key-words:** Electrical distribution network, power flow, genetic algorithm, branch and bound method

# TABLE DES MATIERES

**Liste des figures……** I
**Liste des tableaux……** II
**Liste des symboles……** III
**Introduction Générale……** 01

**Chapitre I – Modélisation d'un réseau de distribution**

**I. 1ntroduction……..** 04
**I.2 Modèle graphique du réseau……** 04
I.2.1 Structure du réseau……... 04
I.2.2 Topologie du réseau……. 05
I.2.3 Orientation du schéma d'exploitation…….. 06
**I.3 Modèle électrique des branches……...** 07
I3.1 Modèle d'une ligne ou d'un câble…… 08
I3.2 Modèle d'un autotransformateur…….. 10
I.3.3 Influence de l'orientation des branches sur les modèles……. 11
**I.4 Modèles des charges aux nœuds……..** 13
**I.5 Modèle des réseaux multi-sources……** 17
**I.6 Méthode de calcul d'un réseau de distribution……...** 19
I.6.1Calcul global……. 19
I.6.2Calcul local suite à une modification du schéma d'exploitation…….. 23
**II.7 Conclusion……** 25

**Chapitre II – formulation mathématique des problème d'optimisation**

**II.1 Introduction……..** 26
**II.2 Formulation mathématique générale……** 26
**II.3 Contraintes d'égalités……..** 27
II.3.1 Equations de Kirchhoff……... 27
II.3.2 Arborescence du schéma d'exploitation……. 28
**II.4 Contraintes d'inégalités……..** 28
II.4.1 Sécurité d'exploitation……... 28
II.4.2 Contraintes sur les manœuvres……. 30
**II.5 Critères d'optimisation appliqués à l'exploitation……** 31
II.5.1Pertes ohmiques…… 31
II.5.2 Equilibre de charge des branches (load balancing)……. 31
II.5.3 Facteur de charge maximum…… 32
II.5.4 Equilibre des tensions……. 32
II.5.5 Ecart de tension maximal……. 33
II.5.6 Coûts des manœuvres 33
**II.6 Application à l'exploitation d'un réseau de distribution……...** 35
**II.7Conclusion……..** 37

## Chapitre III- Méthodes d'optimisation de topologie

**III.1 Introduction……** 38
**III.2 Analyse des problèmes et introduction aux méthodes de résolution…….** 38
**III.3 Algorithme génétique……** 41
III.3.1 Historique…….. 41
III.3.2 Définition…….. 42
III.3.3Principe……... 42
III.3.4 Présentation…… 43
III.3.5 Paramètres d'un AG…….. 44
III.3.6 Principe de base d'un AG standard…… 45
III.3.7.Les opération d'un AG…….. 46
III.3.7.1 Sélection……. 46
III.3.7.2 Croisement……. 47
III.3.7.3 Mutation……. 48
III.3.7.4 Codage 48
III.3.8 Processus d'évolution des générations : générationnel, stationnaire et élitiste….. 49
III.3.9 Opérateurs de croisement…… 50
**III.4 Les méthodes par séparation et évaluation……...** 51
III.4.1 Principes de base…… 51
III.4.2 Application au car de l'optimisation de la topologie d'un réseau de distribution…… 55
**III.5 Conclusion ……** 58

## Chapitre IV - Etude comparative entre programme MATLAB® et CARAT

**IV.1 Introduction……** 59
**IV.2 présentation du pôle urbain de BOUGHEZOUL……** 59
**IV.3. méthodologie de l'étude ……** 61
**IV.4.hypothèse de calcul……** 61
**IV.5. support utilisés ……** 62
**IV.6 bilans énergétique……..** 62
**IV.7 présentation du poste source……** 63
IV.7.1 HT CHAHBONIA……... 63
IV.7.2 apport de l'alimentation des RCN sur l'évolution de la charge du poste 60/30kVCHAHBOUNIA **……..** 63
**IV.8. choix de la topologie du réseau……..** 64
**IV.9 Le choix de la structure souterraine……** 64
**IV.10.tracé de l'itinéraire du réseau électrique ……** 64
**IV.11 mode de raccordement……...** 66
**IV.12 comparaisons des résultats de calculs MATLAB et CARAT……** 67
IV.12.1.1er variante : (Proposition manuels des ouvertures)……. 67
IV.12.1.1 Evolution de la charge……. 67
IV.12.1.2 Evolution de la chute de tension par les deux programmes CARAT et MATLAB…… 68
IV.12.2 2eme variante : (Proposition automatique des ouvertures, par le

programme CARAT) (PLV06, PMIX8), (PLV07, PDP27), (PDP25, PMIX9)…… 69
IV.12.2.1 Evolution de la charge……... 69
IV.12.2.2 Evolution de la chute de tension par les deux programmes CARAT et MATLAB…….. 71
**IV.13 Conclusion……** 72
**Conclusion Générale……** 73
ANNEX…… 74
Bibliographies…… 78

# LISTE DE FIGURE

## Chapitre I

**Figure I.1.** *Structure d'un réseau de distribution donné*…… 5

**Figure I.2.***Topologie d'un réseau de distribution donné*…… 7

**Figure 1.3**. *Modèle équivalent d'une ligne ou d'un câble*…… 8

**Figure I.4**. *Diagramme complexe exact du courant et des tensions*…… 9

**Figure 1.5**. *Diagramme complexe simplifié du courant et des tensions*…… 10

**Figure 1.6**. *Modèle d'un autotransformateur*…… 10

**Figure I.7**. *Inversion de l'orientation d'un autotransformateur*…… 12

**Figure I.8**. *Modèle de la charge au nœud* $x_i$…… 14

**Figure I.9**. *Modèle simplifié de la charge au nœud* $x_i$…… 16

**Figure I.10.***Modèle électrique du nœud source*…… 17

**Figure I.11.***Modèle d'un réseau de distribution multi-sources (exemple)*…… 19

**Figure I.12**. *Parcours récursif du graphe T(X,L)*…… 22

**Figure 1.13**. *Modification locale du schéma d'exploitation T(X,L)*…… 23

## Chapitre III

**Figure III.1.** *Principe de résolution des problèmes d'optimisation de topologie*…… 39

**Figure III.2.** *Vue d'ensemble d'un algorithme génétique*…… 43

**Figure III.3.** *l'organigramme des AG standard*…… 46

**Figure III.4.** *Représentation d'une sélection par tournoi d'individus pour un critère de maximisation (chaque individu représente une solution possible)*…… 47

**Figure III.5.** *Représentation d'un croisement en un point de deux chaînes*…… 48

**Figure III.6.** *Représentation d'une mutation de bits dans une chaîne*…… 48

**Figure.III.7.** *Croisement en seul point.* 51

**Figure III.8.** *Représentation d'un croisement en deux points.* 51

**Figure III.9**. *Arbre de décision binaire pour M variables (exemple)* 52

# LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE II

***Tableau II.1**. Critères et contraintes selon le régime d'exploitation d'un réseau*……. 36

## CHAPITRE III

**Tableau III.1**. *Code de Gray et code binaire pour une chaîne à trois bits*…….... 49

## CHAPITRE IV

**Tableaux IV.1.***liste des projets programmés*…….. 59

**Tableau.IV.2.** *répartition des charge pour l'ensemble des projets programme dans le pôle* ……..... 63

**Tableau .IV.3***.état de la charge au niveau de poste*…… 63
**Tableau. IV.4** les départ de réseau électrique……. 65

***Tableau IV.5.** Evolution de la charge pour la 1$^{éme}$variante dans le programme CARAT et MATLAB*…… 67

***Tableau IV.6.** Evolution de la chute de tension pour la1$^{éme}$variente dans le programme CARAT et MATLAB*……. 68

***Tableau IV.7** Evolution de la charge pour la 2$^{éme}$variente dans le programme CARAT et MATLAB*…….. 69

***Tableau IV.9.** Evolution de la chute de tension pour la 2$^{éme}$ variante dans le programme CARAT et MATLAB*…….. 71

# LISTE DES SYMBOLES

$\underline{V}_i$ tension complexe au nœud $x_i$
$\underline{V}_j$ tension complexe au nœud Xj
$R_{ij}$ résistance longitudinale équivalente
$X_{ij}$ réactance longitudinale équivalente
$B_{ij}$ susceptance transversale équivalente
$\underline{I}ij$ courant complexe transitant dans la branche
$\alpha_{ij}$ déphasage entre la tension $\underline{V}_i$ et la tension $\underline{V}_j$
$^{\varphi}ij$ déphasage entre la tension $\underline{V}_i$ et le courant $\underline{I}_{ij}$

P primaire de l'autotransformateur

S secondaire de l'autotransformateur

$\underline{Z}_{ij}$ impédance de court-circuit ramenée au primaire,

$\underline{I}_{ij}$ courant complexe au primaire

$\underline{z}_{ij}$ impédance de court-circuit rapportée au secondaire

$\mu_{ij}$ rapport de transformation

$\underline{I}_{ij}$ courant complexe au secondaire

$\underline{S}_i$ puissance complexe soutirée au nœud $x_i$

$P_i$ puissance active soutirée au nœud $x_i$

$Q_i$ puissance réactive soutirée au nœud $x_i$

$V_i$ module de la tension au nœud $x_i$

$V_{in}$ tension nominale au nœud x

' Dérivée première par rapport à $V_i$

'' Dérivée seconde par rapport à V

$\underline{S}_{ci}$ puissance complexe de la charge
$p_{ci}$ puissance complexe de la charge
$Q_{ci}$ puissance réactive constante
$\underline{I}_{ci}$ courant complexe de la charge

$I_{pci}$ partie réelle constante de $\underline{I}_{ci}$ en phase avec $\underline{V}_i$

$I_{q\,ci}$ partie imaginaire constante de $\underline{I}_{ci}$ en quadrature par rapport à $\underline{V}_i$

$Y_{ci}$ admittance de la charge

$G_{ci}$ conductance

| | |
|---|---|
| $B_{ci}$ | susceptance |
| * | conjugué complexe |
| $\underline{Ir}_{ci}$ | courant complexe résultant |
| $Ir_{p\ ci}$ | partie réelle constante de $Ir_{Ci}$ en phase avec $\underline{V}i$ |
| $Ir_{q\ ci}$ | partie imaginaire constante de $Ir_{Ci}$ en quadrature par rapport à $\underline{V}_i$ |
| $\underline{V}i^{(0)}$ | tension complexe initiale au nœud Xi |
| Vin | tension nominale au nœud Xi |
| N | nombre total de nœuds du réseau |
| Re | partie réelle |
| Im | partie imaginaire |
| \| \| | Valeur absolue |
| Max | maximum entre 2 valeurs |
| Z | ensemble des variables d'état représentant les tensions aux nœuds |
| $U_K$ | état topologique de la branche $b_k$ (0ou 1) |
| $\underline{I}_K$ | courant complexe dans la branche $b_K$ |
| $\underline{I}_K$ | courant complexe soutiré par la charge au nœud $x_i$ |
| $I_K$ | module du courant complexe dans la branche $b_K$ |
| $U_k$ | état topologique de la branche $b_k$ (0 ou 1) |
| Vin | tension nominale au nœud $X_i$ |
| Vi | module de la tension complexe au nœud $X_i$ |
| $\varepsilon_{i\ max}$ | écart de tension maximum admissible |
| \|\| | Valeur absolue |
| Uk | état topologique de la branche $b_k$ (0 ou 1) |
| Uk° | état topologique initial de la branche $b_k$ |
| $^{\eta}_{max}$ | le nombre maximal de manœuvres autorisées. |
| $R_K$ | résistance de la branche $b_k$ |
| Max | valeur maximale parmi un ensemble de valeurs |
| M | nombre total de branches du réseau |
| $I_{k\ max}$ | courant maximum admissible dans la branche $b_k$ |
| $V_{in}$ | tension nominale au nœud $x_{in}$ |
| $V_i$ | module de la tension complexe au nœud $x_i$ |
| $C_k$ | Coût associée à la manœuvre de la branche $b_k$ |
| Ci | critère d'optimisation d'indice i |
| $P_i$ | poids associé au critère d'optimisation d'indice i |
| $\underline{v}_i^{(k+1)}$ | Tension complexe au nœud $x_i$ à l'itération k+1 ($\underline{V}_i^{(0)} = V_{in}$) |
| $\underline{V}_s$ | Tension complexe au nœud source $x_s$ |

| | |
|---|---|
| $\underline{Z}_{busij}$ | Composante d'indices i et j de la matrice $\underline{Z}_{bus}$ |
| $\underline{I}_j^{(k+1)}$ | Courant complexe au nœud $x_j$, à l'itération k+1 |
| $\underline{I}_j^{(k)}$ | Courant complexe au nœud $x_j$ à l'itération k |

Les réseaux de distribution MT (moyenne tension) constituent les derniers maillons de la chaîne du système d'approvisionnement en énergie électrique Leur densité et leur complexité sont en général supérieures à celles des réseaux de transport et de répartition HT (haute tension) qui les alimentent via les postes de transformation HT/MT. Il existe deux types de réseau de distribution: les réseaux urbains et les réseaux ruraux.

De par l'importance de la puissance distribuée par unité de surface, les réseaux urbains sont généralement très denses. Ils sont composés essentiellement de câbles souterrains de longueur assez courte. Leurs niveaux de tension sont faibles (max 11 kV) et correspondent généralement à une optimum économique fonction des longueurs précitées et des puissances transportées.

Les réseaux ruraux sont moins denses mais plus étendus que les réseaux urbains. Ils sont constitués essentiellement de lignes aériennes qui peuvent parfois être assez longues (environ 30 km au max.) afin de pouvoir alimenter des consommateurs situés dans des régions plus ou moins éloignées par rapport aux postes d'alimentation HT/MT. Leurs niveaux de tension sont plus élevés que dans le cas des réseaux urbains (max 20 kV). Cela s'explique par la volonté de limiter les pertes ohmiques dues à la distribution des puissances requises par les abonnés et de maintenir les chutes de tensions dans des limites spécifiées.

Du point de vue morphologie, il y a quelques années en arrière, la littérature relatait des structures particulières, que l'on qualifiera de pures, selon lesquelles les réseaux de distribution pouvaient se présenter. On citera à titre d'exemple les structures de boucles, en fuseaux, de grilles et en double dérivation Toutes ces structures avaient pour but de permettre une exploitation suffisamment sûre en s'appuyant sur l'application de règles systématiques selon le type d'événement auquel les exploitants devaient faire face. Aujourd’hui, de par les aléas liés à révolution de la consommation tant du point vue localisation dans l'espace (contraintes géographiques, techniques, économiques et écologiques) que du point de vue amplitude, l'extension de ces réseaux ne peut plus suivre les règles édictées par l'une ou l'autre de eeezces structures pures. Aussi, l'exploitation des réseaux de distribution devient de nos jours beaucoup plus complexe et ceci d'autant plus qu'il est difficile de les étendre au rythme nécessité par l’évolution de la consommation.

En général, selon la structure d’un réseau de distribution, chaque consommateur ou groupe de consommateurs représenté par un poste de transformation MT/BT (basse tension) peut être

alimenté depuis les postes HT/MT par plusieurs chemins électriques. Cependant, pour ce faire, l'exploitation de ce réseau requiert un chemin électrique unique et par conséquent elle conduit à un schéma d'exploitation radial ou arborescent contrairement à celui d'un réseau de transport ou de répartition qui est généralement maillé. Pour garantir cette arborescence, le réseau doit donc être équipé d'appareils de coupure (disjoncteurs, interrupteurs ou sectionneurs) permettant de mettre en ou hors service certaines lignes ou certains câbles. Selon le nombre de ces appareils, on peut donc établir une multitude de schémas d'exploitation possibles satisfaisant cette contrainte d'arborescence.

Le contenu de ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'exploitation en temps réel ou planifiée des réseaux de distribution. Parallèlement aux progrès technologiques croissants des équipements dédiés à l'exploitation automatique de ces réseaux, les objectifs poursuivis dans ce mémoire sont de concevoir et de développer du logiciel informatique capable de venir en aide aux exploitants afin de faire face aux différents problèmes liés aux différents régimes de fonctionnement des réseaux en question. En effet, la conduite automatisée permet d'étendre les limites d'exploitation en offrant un large éventail de solutions possibles susceptibles de répondre aux problèmes qui pourraient se poser. Aussi, il serait opportun de tirer profit de cet avantage afin d'en déduire celles qui correspondent au mieux aux critères et aux contraintes spécifiés par les exploitants de sorte à observer une politique d'exploitation sûre et, si possible, économiquement optimale.

Le problème que l'on se propose de résoudre, consiste à déterminer, pour un réseau de distribution donné (urbain, rural ou mixte), des schémas d'exploitation arborescents optimaux selon des critères et des contraintes dépendant de son régime de fonctionnement courant et compte tenue de la pluralité des solutions possibles .

Etant donnée la nature de ce problème, les techniques de résolutions préconisées seront empruntées au domaine de l'intelligence artificielle. Dans notre cas, elles consisteront à balayer de façon implicite l'ensemble des solutions possibles afin d'identifier la solution recherchée et ceci moyennant des règles proches du raisonnement humain.

Dans le cadre de ce travail, on privilégiera les techniques algorithmiques de façon à les établir en s'inspirant de méthodes générales d'optimisation déjà connues. Au préalable, au chapitre I, on décrira une méthodologie de calcul des courants et des tensions siégeant dans un réseau de distribution. Les résultats escomptés à l'issue de l'application de cette méthodologie

ont en fait pour but de permettre l'évaluation de la qualité de chaque solution examinée au cours de l'exploration de l'ensemble des solutions possibles.

Au chapitre II, on évoquera un ensemble de critères et de contraintes pouvant composés la formulation mathématique du problème d'optimisation à résoudre afin de détermine des schémas d'exploitations optimaux.

En se basant sur l'étude d'un ensemble de publications, deux méthodes d'optimisation seront mises en évidence au chapitre III. Il s'agira des algorithmes génétiques (méthodes méta-heuristiques) et la méthode par séparation et évaluation.

Au chapitre IV, une application de ces deux méthodes sur un réseau de distribution moyenne tension et une étude comparative entre le programme CARAT du sonelgaz et l'algorithme génétique.

Enfin, nous terminerons ce présent mémoire par une conclusion générale.

## I.1.Introduction

Du fait que notre préoccupation est la reconfiguration du réseau électrique de distribution qui ne peut être menée sans avoir au préalable résolu le problème de l'écoulement de puissance, il est alors primordial de disposer d'une méthode pour le calcul du réseau qui permettre de toujours connaître l'état du réseau et plus particulièrement la tension et le courant circulant dans chaque connexion.

Différentes approches du problème sont possibles : la méthode la moins rapide mais la plus précise consiste à utiliser un algorithme matriciel complet (pour les réseaux de transport et répartition **[1] [2]**). Mais au vu de la configuration arborescente des réseaux de distribution, des méthodes plus simples et plus rapides, basées sur un parcours graphique de la topologie du réseau, peuvent être envisagés. Nous allons examiner ces méthodes dans les paragraphes qui suivent.

## I.2. Modèle graphique du réseau

### I.2.1.*Structure du réseau*

La structure d'un réseau est définie par la disposition constructive et invariante de l'ensemble de ses éléments: postes, lignes, câbles etc... En terme graphique, cette structure est déterminée par la donnée :

- d'un ensemble fini $X = (x_1, x_2, x_3, .....x_N)$ d'éléments appelés sommet sou nœuds, N étant le nombre total de nœuds.
- d'un ensemble fini $B = (b_1, b_2, b_3, .....b_M)$ d'éléments appelés liaison sou branches, M étant le nombre total de branches. Chaque branche permet de relier les deux composantes d'un couple faisant partie d'un sous-ensemble de dimension M et inclus dans le produit cartésien:

$$XxX = \{(x_i, x_j) / x_i \in X et x_j \in X\}$$

Par la suite, une branche sera identifiée soit par son indice soit par le couple de nœuds correspondants ou extrémités.

Les ensembles X et B correspondent à la définition axiomatique d'un graphe, noté G(X,B), dont l'orientation de chacune des branches peut être, à priori, quelconque ou indéfinie (figure I.1). En revanche, pour pouvoir effectuer aisément les opérations de parcours graphique nécessaires pour le calcul des courants et des tensions siégeant dans le réseau, on devra, connaissant sa topologie (§ 1.2.2), définir une orientation adéquate (§ 1.2.3) pour chacune d'elles.

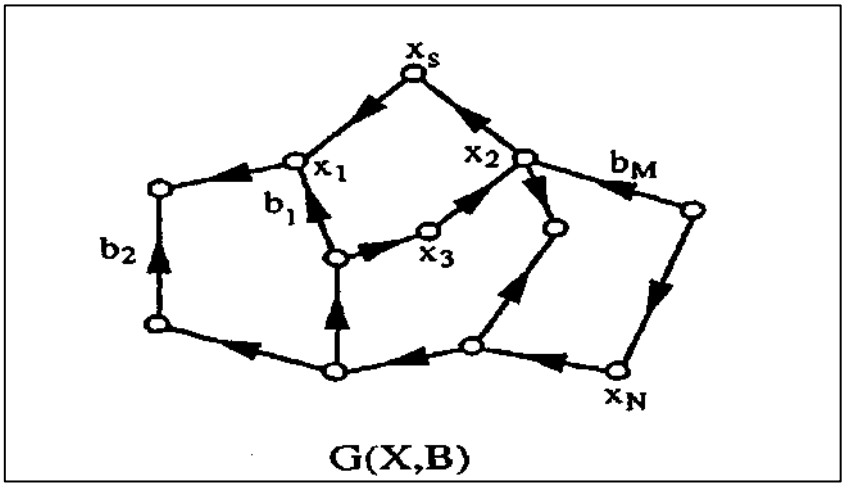



**Figure I.1.** *Structure d'un réseau de distribution donné*

### I.2.2. *Topologie du réseau*

La topologie du réseau, synonyme de sa configuration ou de son schéma d'exploitation, correspond à l'assemblage permanent ou temporaire de ses éléments. On notera donc qu'un réseau peut être exploité selon une configuration différente de celle proposée par sa structure.

En terme graphique, cette topologie est associée à un graphe partiel de G défini par l'ensemble X et un ensemble de branches L telle que $L \subset B$. Les liaisons appartenant à L signifient que chacune d'elles pennet d'échanger un flot (courant) entre les deux nœuds correspondants. On dira, dans ce cas, que la liaison est en service. Pour chaque liaison de l'ensemble complémentaire, cet échange est interrompu volontairement et on dira que la liaison est hors service.

Dans le cas des réseaux de distribution, ce graphe partiel est connexe, c'est à dire qu'il est possible d'atteindre, à partir d'un nœud donné, n'importe quel autre nœud en empruntant un chemin composé par des éléments de L. De plus, le nombre de branches appartenant à L est

égal au nombre total de nœuds du réseau moins 1. Ce graphe partiel particulier de G est un arbre que l'on notera T(X, L) (figure I.2).

### I.2.3.*Orientation du schéma d'exploitation*

Il existe au moins une branche (transformateur HT/MT) permettant de relier un nœud du réseau de distribution à un nœud du réseau HT qui l'alimente. Ce nœud particulier du réseau de distribution, noté $x_s$ (nœud source), sera son nœud de référence pour les grandeurs électriques et constituera par la même occasion la racine de l'arbre associé à son schéma d'exploitation.

En partant du nœud $x_s$ , on oriente chaque branche du schéma d'exploitation selon l'algorithme suivant:

— Initialisation de deux ensembles notés respectivement PRED (prédécesseur) et SUCC (successeur) telle que :

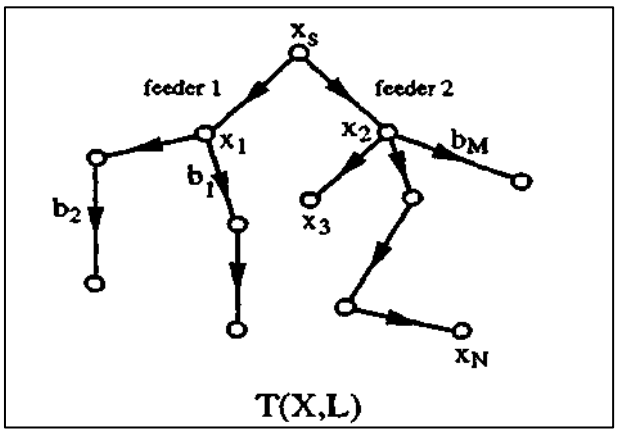
$$SUCC = \{x_s\} \quad \text{et} \quad PRED = \{\ \} = \varnothing$$

— Tant que $SUCC \neq \varnothing$ faire:

- Prendre un nœud dans SUCC que l'on notera $x_i$
- Orienter chaque branche dans L, dont $x_i$ est l'un des nœuds extrémités, depuis $x_i$ vers l'autre extrémité, noté $x_j$ , pour autant que $x_j$ n'appartienne pas déjà à PRED; puis introduire le nœud $x_j$ dans SUCC. Par rapport à la branche en question, $x_i$ désignera son extrémité initiale et $x_j$ désignera son extrémité terminale. Par rapport au schéma d'exploitation, $x_i$ sera défini comme le prédécesseur de $x_j$ et $x_j$ sera défini comme le successeur de $x_i$
- Retirer le nœud $x_i$ dans SUCC puis l'introduire dans PRED

Pour un réseau de distribution défini par sa structure, la figure suivante (figureI.2) représente le graphe, orienté selon l'algorithme précédent, d'un schéma d'exploitation possible. Aussi,

selon la théorie des graphes, T(X,L) correspondra, par définition, à une arborescence de racine $x_s$ .




**FigureI.2.***Topologie d'un réseau de distribution donné*

On appellera, par la suite, "feeder" ou départ toute arborescence incluse dans T(X, L) où ne figure qu'une et une seule branche ayant pour extrémité initiale $x_s$ .

L'exemple du schéma d'exploitation de la figure I.2 montre que chaque nœud du réseau a un et un seul nœud prédécesseur (excepté le nœud source $x_s$ ) et peut avoir plusieurs nœuds successeurs. Cette particularité permet facilement de mettre en œuvre l'opération consistant, par exemple, à déterminer les branches du chemin reliant deux nœuds spécifiés.

### I.3.Modèle électrique des branches

Chaque branche du graphe G(X, B) est représentative:

- Soit d'une ligne électrique ou d'un câble électrique
- Soit d'un autotransformateur dans le cas où le réseau comporte des niveaux de tension différents.

Chacun de ces éléments est, généralement, doté d'un appareil de coupure permettant de définir pour la branche associée les quatre états topologiques suivants:

- en service non verrouillé
- en service verrouillé
- hors service non verrouillé

- hors service verrouillé

Seuls, les deux premiers états signifient que la branche fait partie du graphe T(X,L) représentant le schéma d'exploitation. La notion de verrouillage intervient lorsqu'il n'est pas possible d'effectuer une manœuvre sur une branche donnée (modification en —> hors ou vice versa). Elle représente un intérêt dans le cas où le réseau contient des éléments sans appareils de coupure ou dans le cas où l'on interdirait, en cours d'optimisation, le changement d'état d'une branche donnée (ex: branche avec appareil de coupure non télécommandé).

### I.3.1.*Modèle d'une ligne ou d'un câble*

On adopte pour une ligne ou pour un câble le schéma électrique équivalent (figure I.3) défini par la mise en série d'une résistance et d'une réactance inductive. Pour les réseaux de distribution, les effets capacitifs de ces deux types de branches sont, en général, négligés mais peuvent, si le niveau de tension du réseau le justifie, être pris en considération dans le cas des câbles. Pour ce faire, on place, en chaque extrémité du schéma équivalent précité une capacité contre terre qui sera considérée comme une charge à admittances constantes (§ 1.4).

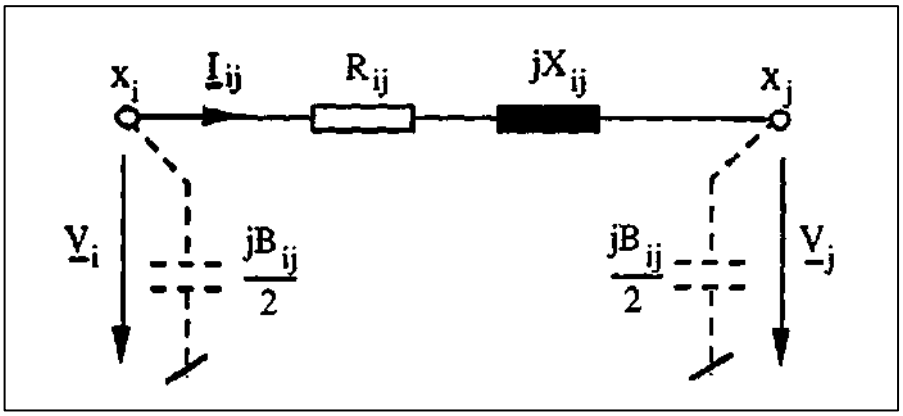



**Figure 1.3**. *Modèle équivalent d'une ligne ou d'un câble*

$\underline{V_i}$ tension complexe au nœud $x_i$

$\underline{V_j}$ tension complexe au nœud $x_j$

$R_{ij}$ résistance linéique équivalente

$X_{ij}$ réactance linéique équivalente

$B_{ij}$ susceptance transversale équivalente

$I_{ij}$ courant complexe transitant dans la branche

Connaissant la tension $\underline{V_i}$ au nœud $x_i$ ainsi que le courant $I_{ij}$, on détermine la tension $\underline{V_j}$ au nœud $x_j$ par la relation exacte:

$$\underline{V}_j = \underline{V}_i - \left(R_{ij} + jX_{ij}\right)\underline{I}_{ij} \tag{I.1}$$

Qui est illustrée par le diagramme complexe de la figure I.4.

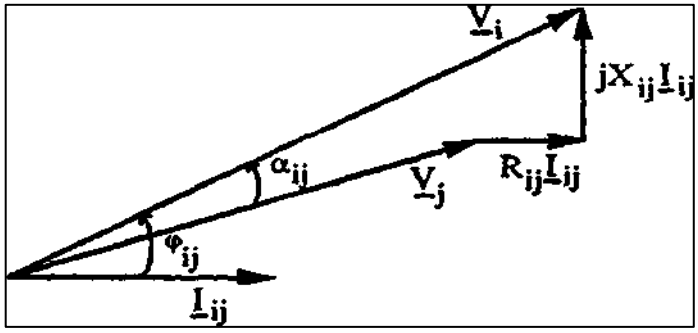



**Figure I.4**. *Diagramme complexe exact du courant et des tensions*

$\alpha_{ij}$ déphasage entre la tension $\underline{V_i}$ et la tension $\underline{V_j}$

$\varphi_{ij}$ déphasage entre la tension $\underline{V_i}$ et le courant $I_{ij}$

Pour les réseaux de distribution, les branches sont généralement assez courtes de sorte que le déphasage entre la tension aux extrémités sont souvent négligeables $\left(\alpha_{ij} \approx 0\right)$ . Dans ce cas-là, l'argument de la tension de $\underline{V_j}$ est pratiquement identique à celui de la tension $\underline{V_i}$, quant à son module, il s'exprime, selon le diagramme complexe de la figure I.5, comme suit:

$$V_j = V_i - \left(R_{ij}\cos\varphi_{ij} + X_{ij}\sin\varphi_{ij}\right)I_{ij} \tag{I.2}$$

Cette relation pourra être utilisée, sans risque d'erreur trop grande, à chaque fois que

$V_j \cos\alpha_{ij} \approx V_j$ ou que $tg\varphi_{ij} \approx \frac{X_{ij}}{R_{ij}}$ (cas particulier)

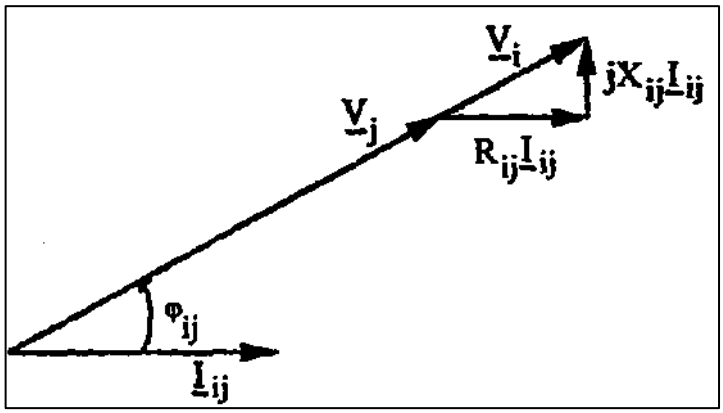



**Figure 1.5**. *Diagramme complexe simplifié du courant et des tensions*

### I.3.2.*Modèle d'un autotransformateur*

On modélise un autotransformateur par un schéma électrique composé par la mise en série de son impédance de court-circuit et d'un transformateur idéal de rapport µ(figure I.6).

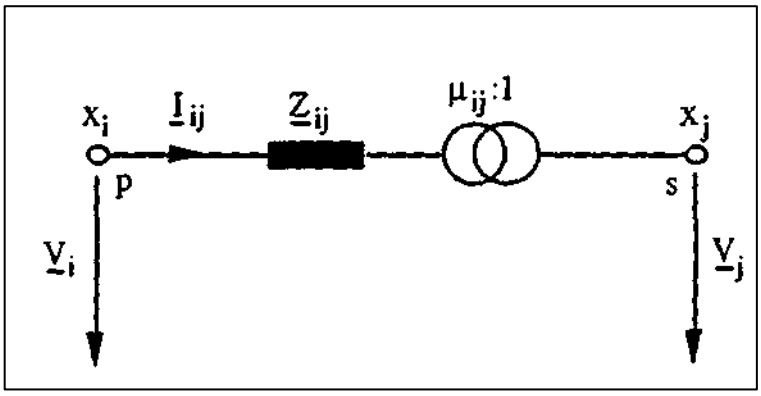



**Figure. 1.6**. *Modèle d'un autotransformateur*

P primaire de l'autotransformateur

S secondaire de l'autotransformateur

$\underline{V_i}$ tension complexe au nœud $x_i$

$\underline{V_j}$ tension complexe au nœud $x_j$

$\underline{Z_{ij}}$ impédance de court-circuit ramenée au primaire, $\underline{Z_{ij}} = R_{ij} + jX_{ij}$

$\underline{I_{ij}}$ courant complexe au primaire

$\mu_{ij}$ rapport de transformation défini par $\mu_{ij} = \frac{V_P}{V_S}$ ,où $V_P$ et $V_S$ désignent les tensions nominales au primaire et respectivement au secondaire

La relation permettant de calculer la tension $\underline{V_j}$ , connaissant la tension $\underline{V_i}$ , et le courant $\underline{I_{ij}}$ , s'exprime par:

$$\underline{V_j} = \frac{1}{\mu_{ij}}\left(\underline{V_i} - \underline{Z_{ij}}\,\underline{I_{ij}}\right) \tag{I.3}$$

Cette relation peut être appliquée pour toute branche du réseau si l'on définit, pour chaque ligne et chaque câble, un rapport de transformation égal à 1. Malheureusement, la relation simplifiée (I.2) ne peut être généralisée de la même manière étant donné que, dans le cas des transformateurs en général, la résistance de court-circuit $R_{ij}$ est pratiquement négligeable par rapport à la réactance de court-circuit $X_{ij}$ .

### I.3.3.*Influence de l'orientation des branches sur les modèles*

Le sens des flèches associées aux courants $\underline{I_{ij}}$ des modèles représentés aux figuresI.3et I.6 est édicté par l'algorithme d'orientation des branches (§ I.2.3) et non pas par ces mêmes courants. Dans le cas de l'autotransformateur, l'orientation proposée, à titre d'exemple, va de $x_i$ vers $x_j$ soit du primaire vers le secondaire (p—>s). L'orientation inverse conduira à déterminer la tension $\underline{V_i}$ , connaissant $\underline{V_j}$ et le courant $\underline{I_{ij}}$ , selon l'expression suivante :

$$\underline{V_i} = \mu_{ij}\underline{V_j} + \underline{Z_{ij}}\,\underline{I_{ij}} \tag{I.4}$$

Cette relation est différente de la relation (1.3) où il aurait suffi de permuter $\underline{V_i}$ et $\underline{V_j}$ et de constater que $\underline{I_{ij}}$ = - $\underline{I_{ij}}$ Aussi, pour le calcul des courants et des tensions que l'on verra plus loin (§ I.6), il faudra, à chaque fois, choisir la relation adéquate. Pour éliminer ce problème de choix, on transforme la relation (I.4) de la manière suivant

$$\underline{V_i} = \mu_{ij}\left(\underline{V_j} + \mu_{ij}^2 \underline{Z_{ij}} \frac{\underline{I_{ij}}}{\mu_{ij}}\right)$$

En posant:

$$\mu_{ji} = \frac{1}{\mu_{ij}} \quad , \quad \underline{Z_{ji}} = \mu_{ij}^2 \underline{Z_{ij}} \quad \text{et} \quad \underline{I_{ji}} = -\frac{\underline{I_{ij}}}{\mu_{ij}}$$

On obtient:

$$\underline{V_i} = \frac{1}{\mu_{ji}}\left(\underline{V_j} - \underline{Z_{ji}}\,\underline{I_{ji}}\right)$$

Cette transformation conduit tout simplement, par rapport à la figure I.6, à rapporter les grandeurs du primaire au secondaire de l'autotransformateur (figure I.7).

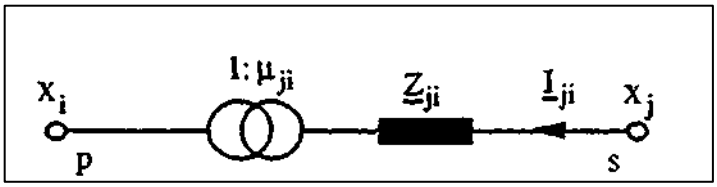



**Figure I.7**. *Inversion de l'orientation d'un autotransformateur*

$\underline{Z_{ji}}$ impédance de court-circuit rapportée au secondaire

$\mu_{ji}$ rapport de transformation égal à $\frac{V_S}{V_P}$

$\underline{I_{ji}}$ courant complexe au secondaire

**Convention**:

Au cours de l'algorithme d'orientation du schéma d'exploitation d'un réseau de distribution (ex: § I.2.3), l'orientation d'un autotransformateur conduira systématiquement à rapporter ses paramètres électriques et son courant au nœud extrémité initiale de la branche qui le représente.

## I.4.Modèles des charges aux nœuds

En règle générale, tout composant du réseau, où le courant à l'entrée se subdivise en plusieurs composantes à la sortie, est représenté par un nœud dans le schéma d'exploitation T(X, L). Il s'agit essentiellement des composants suivants:

- Jeux de barres MT des postes de transformation MT/BT (soutirage de courant)
- jeux de barres MT des postes de transformations HT/MT (injection decourant)
- point de bifurcation ou d'étoilement du réseau (sans soutirage ni injection)

On peut, toutefois, faire des exceptions à cette règle en considérant des points particuliers spécifiés par l'exploitant.

On associe à chaque nœud où l'on rencontre un soutirage de courant par le réseau BT au travers d'un transformateur MT/BT, une charge identifiée généralement par un nombre complexe invariant en partie réelle et en partie imaginaire. A fréquence constante, pour les réseaux de transport HT, les charges représentées par les réseaux MT et BT, sont perçues comme des puissances complexes constantes indépendantes des fluctuations des tensions HT **[3]**. Cette modélisation est tout à fait adéquate si les transformateurs HT/MT sont dotés de régleurs en charge ayant pour consigne de maintenir, à tout moment, constants les modules des tensions aux nœuds MT. Ce type de dispositif n'existe pas pour les transformateurs MT/BT dont les rapports de transformation demeurent fixes ou modifiables manuellement. Dès lors, on peut en conclure que la puissance complexe soutirée en un nœud MT $x_i$ , est fonction du module de la tension complexe $\underline{V_i}$ en celui-ci:

$$\underline{S_i} = P_i(V_i) + jQ_i(V_i) \tag{I.5}$$

$\underline{S_i}$ puissance complexe soutirée au nœud $x_i$

$P_i$ puissance active soutirée au nœud $x_i$

$Q_i$ puissance réactive soutirée au nœud $x_i$

$V_i$ module de la tension au nœud $x_i$

Au voisinage de la tension nominale, on aura par développement en série de:Taylor où l'on négligera les termes d'ordre supérieur à 2 :

$$P_i(V_i) = P_i(V_{in}) + P_i'(V_{in})(V_i - V_{in}) + 1/2P_i''(V_{in})(V_i - V_{in})^2 + .....$$

$$Q_i(V_i) = Q_i(V_{in}) + Q_i'(V_{in})(V_i - V_{in}) + 1/2Q_i''(V_{in})(V_i - V_{in})^2 + .....$$

$V_{in}$ tension nominale au nœud x

' Dérivée première par rapport à $V_i$

'' Dérivée seconde par rapport à $V$

En regroupant les termes en $V_i$ et $V_i^2$ ,on obtient :

$$P_i(V_i) = a_{1i} + b_{1i}V_i + c_{1i}V_i^2 \quad (I.6)$$

$$Q_i(V_i) = a_{2i} + b_{2i}V_i + c_{2i}V_i^2 \quad (I.7)$$

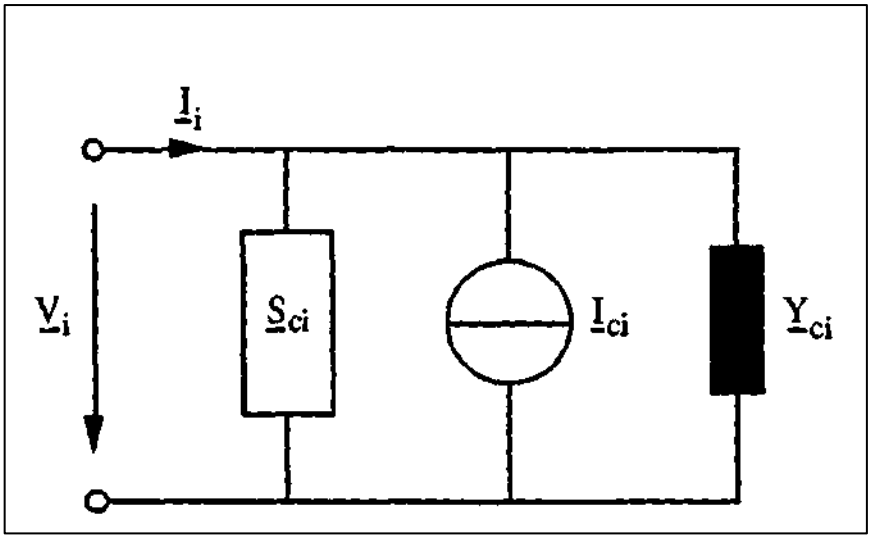
Une analyse dimensionnelle montre que :

$a_{1i}$et $a_{2\,i}$ s'expriment respectivement en Watt et en Var

$b_{1i}$et $b_{2i}$ s'expriment en Ampères

$c_{1i}$et $c_{2i}$ s'expriment en Siemens

On en déduit que la charge en un nœud MT, lorsque la tension est voisine de la tension nominale, peut être représentée par la mise en parallèle de trois types de charge (figure I.8)




**FigureI.8**. *Modèle de la charge au nœud $x_i$*

**Puissances constantes**

$$\underline{S_{ci}} = P_{ci} + jQ_{ci} = a_{1i} + ja_{2i} \qquad (I.8)$$

$\underline{S_{ci}}$ puissance complexe de la charge

$P_{ci}$ puissance active complexe de la charge

$Q_{ci}$ puissance réactive constante

**Courants constants:**

$$\underline{I_{ci}} = I_{Pci} + jI_{qci} = b_{1i} - jb_{2i} \qquad (I.9)$$

$\underline{I_{ci}}$ courant complexe de la charge

$I_{pci}$ partie réelle constante de $\underline{I_{ci}}$ en phase avec $\underline{V_i}$

$I_{qci}$ partie imaginaire constante de $\underline{I_{ci}}$ en quadrature par rapport à $\underline{V_i}$

**Admittances constantes:**

$$\underline{Y_{ci}} = G_{ci} + jB_{ci} = c_{1i} - jc_{2i} \qquad (I.10)$$

$Y_{ci}$ admittance de la charge

$G_{ci}$ conductance

$B_{ci}$ susceptance

Le courant complexe total soutiré par la charge s'exprime comme suit :

$$\underline{I_i} = \frac{\left(P_{ci} + jQ_{ci}\right)^*}{\underline{V_i^*}} + \left(I_{Pci} + jI_{qci}\right) + \left(G_{ci} + jB_{ci}\right)\underline{V_i} \qquad (I.11)$$

* conjugué complexe

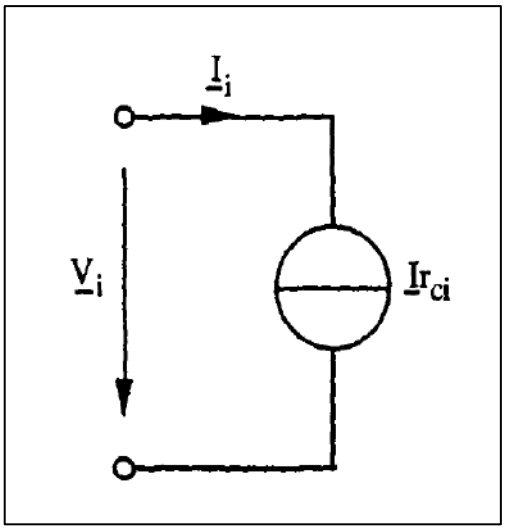



**Figure I.9**. *Modèle simplifié de la charge au nœud* $x_i$

$Ir_{ci}$ courant complexe résultant

$Ir_{pci}$ partie réelle constante de $Ir_{ci}$ en phase avec $\underline{V_i}$

$Ir_{qci}$ partie imaginaire constante de $Ir_{ci}$ en quadrature par rapport à $\underline{V_i}$

Le courant complexe total soutiré par la charge s'exprimera tout simplement comme suit:

$$\underline{I_i} = \left( Ir_{Pci} + jIr_{qci} \right) \tag{I.12}$$

On notera, enfin, que ce modèle simplifié serait, en tout cas, suffisamment réaliste si:

— d'une part, la linéarisation des modules du premier et du troisième terme de (I.11) autour de $V_{in}$ donne respectivement deux droites dont les pentes en valeurs absolues sont pratiquement égales, soit:

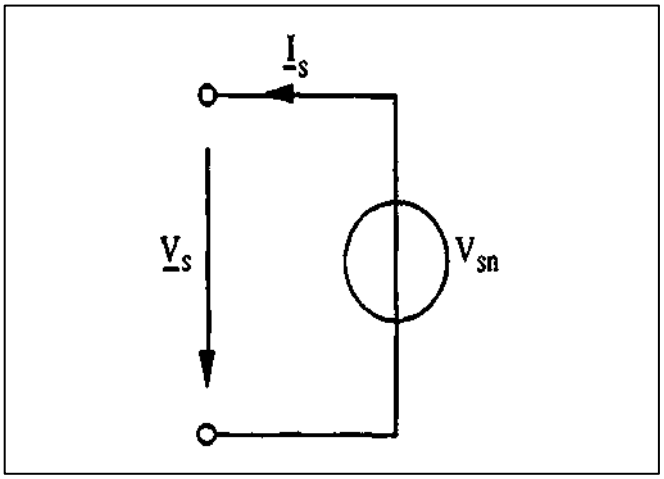
$$\frac{\sqrt{P_{ci}^{\,2} + Q_{ci}^{\,2}}}{V_{in}^{\,2}} \approx \sqrt{G_{ci}^{\,2} + B_{ci}^{\,2}}$$

— et d'autre part, on a pratiquement l'égalité entre les déphasages de chacun de ces deux termes par rapport à $\underline{V_i}$, soit:

$$\text{arc}tg\left(\frac{Q_{ci}}{P_{ci}}\right) \approx -\text{arc}tg\left(\frac{B_{ci}}{G_{ci}}\right)$$

## I.5.Modèle des réseaux multi-sources

Le modèle électrique associé au nœud source $x_s$ est une source idéale de tension (figure I.10) dont le module est maintenu constant grâce au transformateur HT/MT et est, en général, égal à la valeur nominale de la tension en $x_s$ Le courant débité par cette source est obtenu, suite à un calcul des courants et des tensions du réseau, par bilan des courants incidents en $x_s$ .




**FigureI.10.***Modèle électrique du nœud source*

Par ailleurs, un réseau de distribution est, souvent, alimenté par plusieurs transformateurs HT/MT situés soit dans un même poste soit dans des postes différents. Cela implique qu'il y a autant de nœuds sources que de transformateurs. L'exploitation d'un tel réseau exige que chaque poste MT/BT soit alimenté par une et une seule source à la fois. Cela se traduit, pour le schéma d'exploitation, par un non connexité du graphe T (X,L) associé. Ce graphe constitue dans ce cas une forêt c'est à dire l'union de plusieurs graphes arborescents dont le nombre est égal au nombre de nœuds sources.

Cette particularité n'est en somme pas gênante pour le calcul global (§ I.6.1) d'un tel réseau où il suffirait tout simplement de considérer successivement et indépendamment chaque arborescence. Par contre, pour les problèmes d'optimisation que l'on verra aux chapitres suivants ainsi que pour le calcul local (§ I.6.2) suite à une modification de topologie, il serait

plus commode de traiter un graphe connexe. Aussi, on rétablit la connexité du graphe T(X, L) (figure I.11) en y ajoutant un nœud supplémentaire que l'on relie à chacun des nœuds sources par une branche fictive de caractéristiques idéales (impédances nulles). Ce nœud supplémentaire, que l'on notera $x_r$ , sera considéré, par la suite, comme le nœud source du schéma d'exploitation résultant et sa tension nominale sera définie comme identique à celle de l'un des nœuds auxquels il est rattaché. Toutefois, si parmi les autres nœuds, il en existe certains ayant des tensions nominales différentes de celle que l'on aura choisie pour $x_r$ , les branches fictives correspondantes seront des autotransformateurs dont les rapports seront égaux aux rapports des tensions nominales aux nœuds extrémités.

Ainsi, selon cette transformation, les sources idéales de tension initialement connectées à chaque arborescence peuvent être simplement retirées étant donné que les tensions aux nœuds respectifs resteront toujours constantes et égales aux tensions nominales et que les courants qu'elles débitaient seront fournis par la source au nœud $x_r$ et transiteront à travers les branches fictives.

Enfin, à propos de ces branches fictives, ces dernières seront, par la suite, toujours considérées en service et, par conséquent, elles ne seront pas prises en compte dans le cadre des problèmes d'optimisation.

– – – – : Branche hors service ($\notin$ L)

——— : Branche active

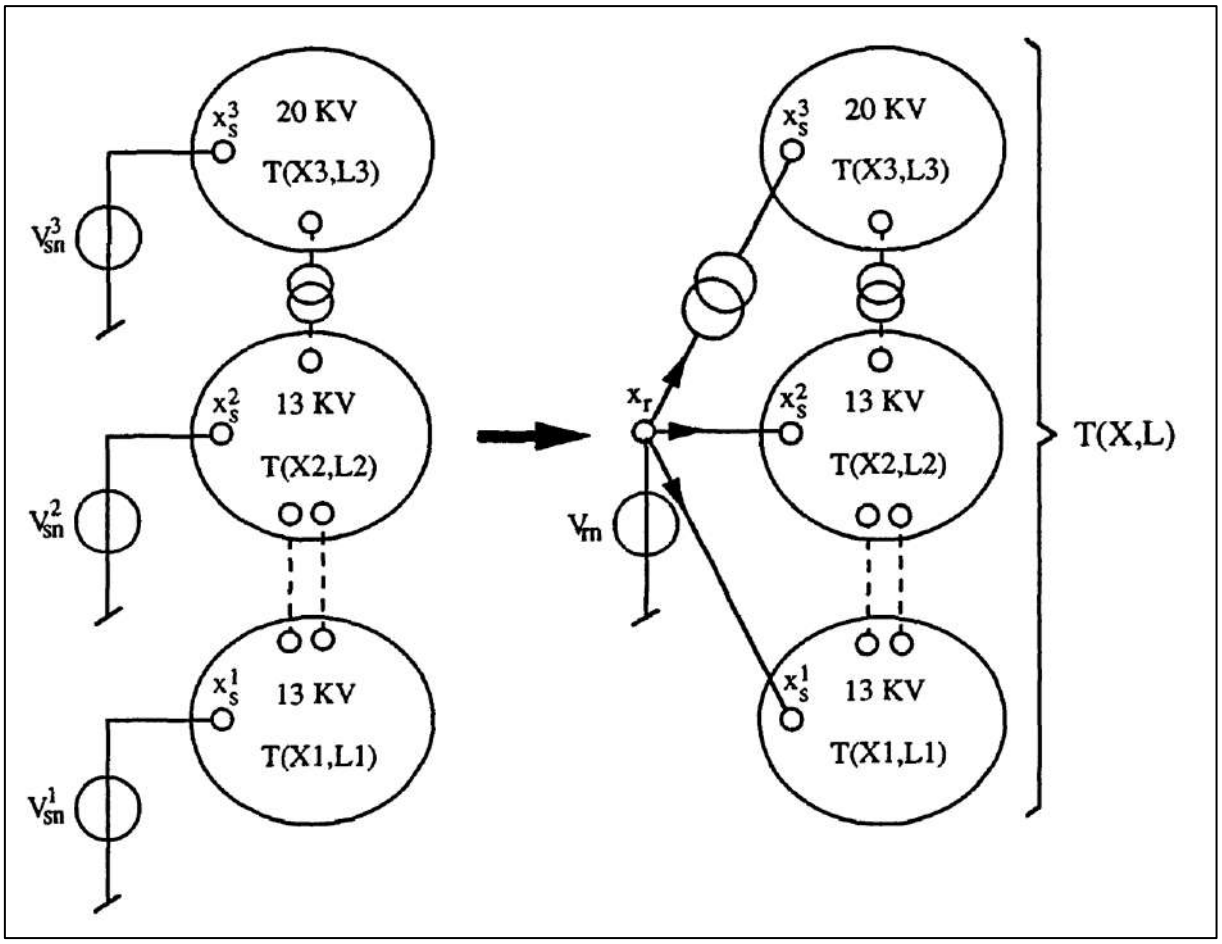



**Figure I.11.***Modèle d'un réseau de distribution multi-sources (exemple)*

## I.6. Méthode de calcul d'un réseau de distribution

### I.6.1. *Calcul global*

Du fait de l'arborescence du schéma d'exploitation des réseaux de distribution, le calcul des courants circulant dans les branches et le calcul des tensions aux nœuds peuvent s'effectuer de façon découplée. L'algorithme suggéré, dans ce but, utilise successivement les deux opérations suivantes:

— Partant des nœuds dont les degrés de profondeurs sont les plus élevés vers le nœud source, on calcule le courant soutiré en chaque nœud selon le modèle de charge associé (§ I.4) et le courant dans la branche orientée vers ce nœud par simple bilan (lemme de Kirchhoff pour les courants).

— En effectuant le parcours dans le sens inverse à partir du nœud source, dont la tension est fixée, on calcul la tension, en chaque nœud, par la relation d'Ohm (§ I.3).

Dans le cas où les charges comportent des composantes à puissances et ou à admittances constantes, il est nécessaire de connaître les tensions aux nœuds afin de calculer les courants soutirés. Pour cela, on intègre ces deux opérations dans un processus itératif pour lequel on initialise toutes les tensions à leurs valeurs nominales. Par la suite, à chaque itération, on détermine les courants soutirés précités moyennant les tensions calculées à l'itération précédente. Le processus s'achève lorsque, d'une itération à une autre, ces tensions ne varient plus que d'une tolérance spécifiée. En générale, deux ou trois itérations suffisent pour assurer cette convergence.

**Algorithme:**

1. Classement des nœuds par ordre décroissant de leur degré de profondeur.

2. Initialisation des tensions aux nœuds:

$$\underline{V}_i^{(0)} = V_{in} \qquad \text{i=1.....N}$$

$\underline{V}_i^{(0)}$ tension complexe initiale au nœud $x_i$

$V_{in}$ tension nominale au nœud $x_i$

N nombre total de nœuds du réseau

3. A l'itération k (k=l initialement), parcours des nœuds selon l'ordre défini sous 1. tout en effectuant pour chacun d'eux, que l'on notera $x_i$ et son prédécesseur $x_j$ (§ I.2.3), les opérations suivantes:

   a) calcul du courant soutiré selon, par exemple, (I.11):

$$\underline{I}_i^{(k)} = \frac{(\mathrm{p_{ci}} + \mathrm{j\ Q_{ci}})^*}{\underline{V}_{\mathrm{i}}^{*(\mathrm{k-1})}} + \left(Ipci + j\ Iqci\right) + \left(Gci + j\ Bci\right)\underline{V}_i^{(k-1)}$$

   Où les éventuelles demi-susceptances des câbles (§ I.3.1) connectés au nœud $x_i$ sont supposées soit négligées soit comprises dans $B_{ci}$ .

b) calcul du courant circulant dans la branche orientée depuis le nœud vers $x_j$ le nœud $x_j$ (sauf si $x_i = x_s$):

$$\underline{I_{ji}}^{(k)} = \frac{1}{\mu_{ji}}\left( I_i^{(k)} + \sum_1 \underline{I_{i1}}^{(k)} \right) \qquad \text{Avec } 1 \neq i$$

La somme porte sur l'ensemble des indices des nœuds successeurs de $x_i$ $x_i$ et $\mu_{ji}$ vaut 1 dans le cas d'une ligne ou d'un câble.

4. Parcours des nœuds selon l'ordre inverse de celui que l'on a défini sous 1. tout en effectuant pour chacun d'eux, que l'on notera x؛ et son prédécesseur $x_j$ (§ 1.2.3), les opérations suivantes:

a) calcul de la tension selon, par exemple, (I.3) :

$$\underline{V_i}^{(k)} = \frac{1}{\mu_{ji}}\left( \underline{V_j}^{(k)} - \underline{Z_{ji}}\,\underline{I_{ji}}^{(k)} \right)$$

b) calcul de l'écart relatif de tension au nœud $x_i$ :

$$\underline{\Delta V_i} = \frac{\left| \mathrm{Re}\left( \underline{V_i}^{(k)} - \underline{V_i}^{(k-1)} \right) \right|}{V_{in}} + j\frac{\left| \mathrm{Im}\left( \underline{V_i}^{(k)} - \underline{V_i}^{(k-1)} \right) \right|}{V_{in}}$$

c) calcul de l'écart maximum de tension, noté $\Delta Vm$ , défini comme:

$$\Delta Vm = Max\left( \Delta Vm, \Delta V_i \right)$$

Re partie réelle

Im partie imaginaire

| | Valeur absolue

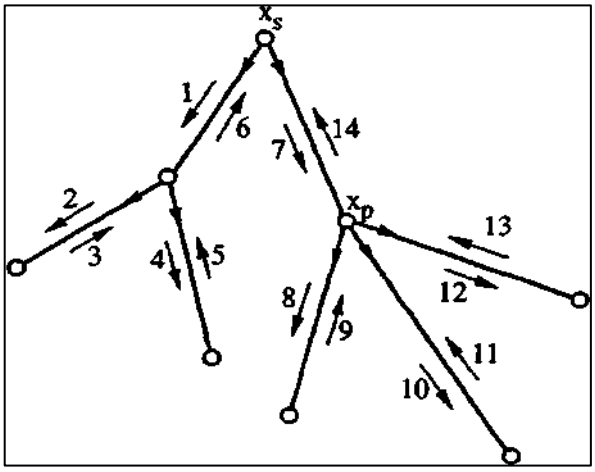
Max maximum entre 2 valeurs

5. Si l'écart maximum de tension calculé en 4.c) est plus petit qu'une tolérance ε donnée alors arrêt de l'algorithme, sinon retour au point 3. En incrémentant k (k= k+1).

Dans le cas où toutes les charges sont uniquement à courants constants, ce même algorithme peut être appliqué en supprimant tout simplement le point 5. Ou en forçant l'annulation de tous les écarts de tensions au point 4.c).

La figure I.12 illustre le parcours effectués à l'aide de la procédure suggérée. Les flèches et les numéros associés indiquent respectivement le sens et l'ordonnancement des étapes de ce parcours. Par rapport au calcul des courants et des tensions, une itération s'achève lorsque l'on aura atteint le nœud $x_s$ sachant que tous ses successeurs ont été examinés (ex : étape 14). A ce stade, l'examen de l'écart maximum de tension relevé durant le parcours, permettra d'entreprendre ou non une nouvelle itération, soit un parcours supplémentaire.

Le seul inconvénient constaté avec ce type de parcours est le fait de devoir calculer les tensions avant les courants notamment au cours de la première itération. Pour y remédier, il suffit, au cours de celle-ci, de substituer le calcul relatif aux tensions par une initialisation de ces dernières. Aussi, quelque soit le type de charge aux nœuds, le calcul du réseau nécessitera au minimum deux itérations. Toutefois, dans le cas où l'on a uniquement des charges à courants constants, le calcul relatif aux courants, au cours de la deuxième et dernière itération, est inutile et est tout naturellement inhibé.



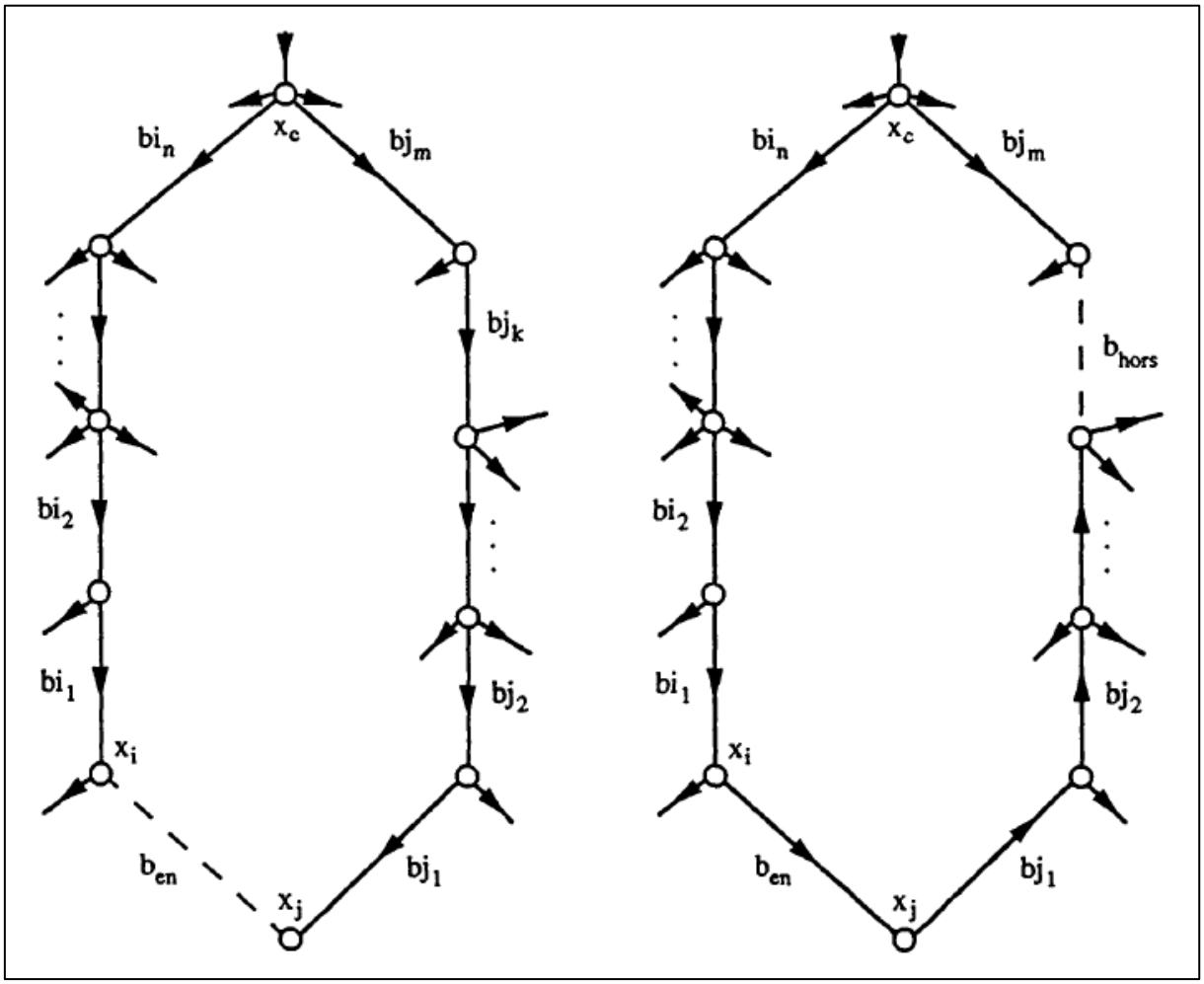

**FigureI.12**. *Parcours récursif du graphe T(X,L)*

En plus de l'élimination de l'ordonnancement des nœuds, la procédure récursive précitée présente l'avantage d'être facilement applicable dans le cadre d'un calcul partiel du schéma d'exploitation. A titre d'exemple, si l'on retire la branche $(x_s, x_p)$ du graphe de la figure I.12,

le calcul de la partie demeurant alimentée par $x_s$ peut être effectuée sans devoir recourir à des dispositions particulières**.**

### I.6.2. *Calcul local suite à une modification du schéma d'exploitation*

La modification topologique la plus courante, du schéma d'exploitation d'un réseau de distribution donné, est le ripage de charge qui consiste à transférer un nœud ou un groupe de nœuds- depuis un chemin partant de la source vers un autre. Graphiquement, cette manœuvre correspond à l'introduction d'une branche appartenant à B-L, notée $b_{en,}$ dans le graphe T(X,L) et le retrait d'une des branches, que l'on notera $b_{hors}$ , du cycle engendré (figure I.13).




a)Etat initial b)Etat final

**Figure 1.13**. *Modification locale du schéma d'exploitation T(X,L)*

Suite à cette modification, et dans le cas où les charges du réseau sont uniquement à courants constants (effets capacitifs des câbles négligés), seuls les courants transitant dans les branches du cycle seront modifiés. Selon la figure I.13, l'algorithme permettant d'établir la modification topologique et partant, de déterminer ces nouveaux courants.

Détermine le chemin $L_i \cup Lj$ dans T(X,L) joignant les extrémités notées $x_i et x_j$ de la branche $b_{en} = (x_i, x_j)$ à introduire :

$l_i = \{b_{i1}, b_{i2}, .....b_{in}\}$ et $l_j = \{b_{j1}, b_{j2}, ...b_{jk}, ..., b_{jm}\}$

- Choisir ,à titre d'exemple ,$b_{hors}=b_{jk}$ et poser $\lambda = k(>0)$ et $\underline{I_{hors}} = \underline{I_{jk}}$
- Calcul le courant $\underline{I_{hors}}$ ramené à l'extrémité terminale de la branche $b_{j1}$ :

TANT QUE $\lambda > 0$ FAIRE :

$$\underline{I_{hors}} = \mu_{j\lambda} . \underline{I_{hors}}$$

$$\lambda = \lambda - 1$$

{ $\mu_{ik}$ rapport de transformation de la branche $b_{j\lambda}$ , $\mu_{ik}$ =1 si $b_{j\lambda}$ est une ligne ou un câble }

- Modifier les courants dans les branche appartenant à $l_j$ :

Poser $\lambda = 1$ et $\mu = 1$

TANT QUE $\lambda \le m$ FAIRE :

$$\mu = \mu . \mu_{j\lambda}$$

$$\underline{I_{j\lambda}} = \underline{I_{j\lambda}} - \frac{1}{\mu} \underline{I_{hors}}$$

$$\lambda = \lambda + 1$$

- Modifier les courants dans les branches appartenant à $l_i$ :

Poser $\lambda = 1 et \mu = 1$

TANT QUE $\lambda \le n$ FAIRE :

$$\mu = \mu . \mu_{i\lambda}$$

$$\underline{I_{j\lambda}} = \underline{I_{j\lambda}} + \frac{1}{\mu} \underline{I_{hors}}$$

$$\lambda = \lambda + 1$$

{ $\mu_{ik}$ rapport de transformation de la branche $b_{i\lambda}$ , $\mu_{ik}$ =1 si $b_{i\lambda}$ est une ligne ou un câble }

- Introduire la branche $b_{en}$ dans T(X,L) en l'orientant depuis le nœud $x_i$ vers le nœud $x_j$ et détermine son courant :

$$\underline{I_{en}} = \frac{1}{\mu_{en}} \underline{I_{hors}}$$

— Supprimer la branche $b_{hors}$ dans T(X,L) puis si k>1 inverser l'orientation des branches allant de $b_{jk1}$ à $b_{jk-1}$

Si l'on choisit de déterminer le chemin $L_i \cup Lj$ par la méthode utilisant les degrés de profondeur des nœuds, il faudra, à l'issue de la dernière étape, ajouter une étape supplémentaire dans laquelle, connaissant le degré de profondeur de $x_i$, on réajustera celui de $x_j$ ainsi que ceux des nœuds appartenant aux arborescences connectées à $x_j$. Cette opération peut être réalisée moyennant un parcours récursif de ces arborescences (figure I.12). Ainsi, la prochaine modification topologique pourra être entreprise dans les mêmes conditions que la précédente.

Suite à l'application de cet algorithme, si l'on s'intéresse également à déterminer les nouvelles tensions aux nœuds du réseau, seules celles des nœuds appartenant aux deux arborescences reliées au nœud $x_c$(figure I.13), respectivement par la branche $b_{in}$ et la branche $bj_m$, devront être modifiées. Toutefois, dans le cas où l'on aurait choisi initialement de supprimer une de ces deux branches (branche $b_{hors}$), on n'aurait, évidement, plus qu'une seule arborescence à prendre en considération. Ainsi dans le cas général, sachant que le nœud $x_c$ a conservé sa tension initiale, le calcul des nouvelles tensions pourra être effectué selon un parcours récursif (figure I.12) de chacune des deux arborescences précitées, pour cela, il suffira d'utiliser la procédure récursive du paragraphe précédent (§I.6.1) tout en substituant le nœud $x_s$ par le nœud $x_c$(source virtuelle), en supprimant provisoirement toutes les branches de T(X,L) connectées au nœud $x_c$ à l'exception de $b_{in}$ et $b_{jm}$, et en inhibant le calcul relatif au courant.

Enfin, si on considère une même modification de topologie dans le cas d'un réseau dont les charges ont des composantes à puissances et ou à admittances constantes, le processus de calcul exposé dans ce paragraphe ne pourrait être sollicité que dans le cadre d'un calcul approximatif, pour le calcul exact, il faudra recalculer, en utilisant itérativement la procédure récursive du paragraphe précédent (§ I.6.1), entièrement le ou les "feeders" (§ I.2.3) impliqués dans la modification de topologie.

## II.7.Conclusion :

Les performances des différents algorithmes décrits dans ce chapitre dépendent naturellement de la manière selon laquelle le réseau est représenté numériquement. Une représentation intéressante est proposée par Gondran[4].Sa particularité est d'être aussi fidèle que possible à la représentation graphique du réseau. En effet, par un système d'adressage adéquat, elle permet d'identifier, pour chaque nœud, les branches qui lui sont connectées et, par conséquent, tous les nœuds qui lui sont immédiatement voisins.

Dans cette chapitre nous avons représenté le réseau du point de vue structure et topologie et nous avons faire la modélisation de chacun de ses composants, cela est nécessaire pour appliquer les techniques d'optimisation que nous allons savoir ses formulations mathématiques dans le deuxième chapitre.

## II.1. Introduction

L'optimisation, au sens mathématique du terme, consiste à trouver l'état d'un système jugé le plus favorable au regard des circonstances données **[5]**. Cette définition, très générale, permet de regrouper sous une même définition un grand nombre de problèmes de natures différentes, mais dont la finalité est identique.

Pour un réseau de distribution donné, les problèmes que l'on se propose de résoudre consistent à déterminer des schémas d'exploitation optimaux selon des critères et des contraintes spécifiés. Dans ce chapitre, nous allons exprimer mathématiquement ces problèmes et présenter les différents critères et contraintes possibles.

## II.2. Formulation mathématique générale

Pour un réseau de distribution défini par sa structure (§ I.2.1), soit par son graphe G(X,B), on associe d'une part, à l'ensemble B un ensemble Y et un ensemble U telles que:

Y: ensemble des variables d'état représentant les courants dans les branches

U: ensemble des variables de décision représentant les états topologiques des branches (en ou hors service) telle que

$\forall\ u_k \in U$ alors

- $u_k$ = 1 si la branche $b_k$ est en service

Ou

- $u_k$ =0 si la branche $b_k$ est hors service

Et d'autre part, à l'ensemble X un ensemble Z tel que:

Z: ensemble des variables d'état représentant les tensions aux nœuds

Selon cette notation, un problème d'optimisation donné consistera à déterminer les composantes de Y, Z et U de manière à:

Minimiser f (Y, Z, U) fonction objectif

Sous les contraintes:

- g (Y, Z, U) = 0 équations de Kirchhoff

- h (Y, Z, U) < 0 contraintes de sécurité
- s (U) = 1 contraintes d'arborescence du schéma d'exploitation
- t (U) $\leq 0$ contraintes sur les manœuvres

## II.3. Contraintes d'égalités

### II.3.1. *Equations de Kirchhoff*

Il s'agit essentiellement de la contrainte édictée par le lemme de Kirchhoff à propos des courants. En effet, la solution du problème doit satisfaire en chaque nœud du réseau l'équation:

$$\sum_k u_k . a_{ik} . \underline{I}_k = \underline{I}_i \qquad \text{(II.1)}$$

Où

- La somme porte sur l'ensemble des indices de branches du réseau
- $a_{ik}$ = 1 si $b_k$ est orienté en direction du nœud $x_i$
  -1 si $b_k$ est orienté en sens contraire
  0 si $x_i$ ne correspond à aucune extrémité de $b_k$
- $u_k$ état topologique de la branche $b_k$ (0 ou 1)
- $\underline{I}_k$ courant complexe dans la branche $b_k$
- $\underline{I}_k$ courant complexe soutiré par la charge au nœud $x_i$ (§I.4)

La contrainte (II.1) implique également la continuité du service, c'est à dire la volonté de satisfaire intégralement la charge en tout nœud du réseau. Si, toutefois, des délestages de charges sont autorisés, le second membre de l'équation devra être pondéré par un facteur noté $\beta_i$qui peut être soit bivalent (0 ou 1) soit continu ou discret, compris entre 0 et 1. Ce facteur constituera, donc, une nouvelle variable de décision que les techniques d'optimisation devront maximiser dans le but d'un délestage minimal.

Enfin, étant donné que la solution du problème d'optimisation doit respecter l'arborescence (§ II.3.2), le second lemme de Kirchhoff à propos des tensions le long d'une maille (ou cycle) sera implicitement respecté.

### II.3.2. *Arborescence du schéma d'exploitation*

Cette contrainte est relative aux variables de décision du problème d'optimisation. Elle indique la conservation de l'arborescence du schéma d'exploitation recherché et, pour des raisons de protection contre les surintensités de courant dans les branches, n'admet aucune tolérance, c'est à dire aucune maille dans ce schéma. Cette arborescence peut s'exprimer sous forme d'une équation nécessaire mais non suffisante qui impose que le nombre de branches du schéma d'exploitation doit être égal au nombre total de nœuds du réseau moins un, soit:

$$\sum_{K} u_K = N - 1 \qquad (II.2)$$

Où N désigne le nombre total de nœuds du réseau et où la somme porte sur l'ensemble des indices de branches du réseau.

Pour compléter la contrainte (II.2), il faut encore imposer la connexité du schéma d'exploitation recherché. Celle-ci peut être exprimée de la manière suivante:

$$\forall x_i x_j \in X \qquad \exists L_i \cup L_j \quad , \quad \text{soit} \qquad \prod_k ui_k . \prod_k uj_k = 1 \qquad (II.3)$$

Où $L_i \cup L_j$ est un chemin reliant les nœuds $x_i$ et $x_j$ et où les $u_i$ et $u_j$ désignent respectivement les états topologiques (0 ou 1) des branches de $L_i$ et de $L_j$ constituant ce chemin.

## II.4. Contraintes d'inégalités

### II.4.1. *Sécurité d'exploitation*

Les contraintes de sécurité indiquent que les variables d'état, à savoir les courants dans les branches et les tensions aux nœuds, ne doivent pas excéder des limites admissibles.
Pour les courants, on exprime, pour chaque branche, la contrainte de sécurité par l'inéquation suivante:

$$I_k \le u_k . I_{k\max} \quad I_k \qquad (II.4)$$

Où

- $I_k$ max courant maximal admissible dans la branche $b_k$ .
- $I_k$ module du courant complexe dans la branche $b_k$

- $u_k$ état topologique de la branche $b_k$ (0 ou 1)

La valeur de $I_k$ max traduit la limite thermique des conducteurs constituant la branche $b_k$ . Etant donné que les constantes de temps thermiques sont nettement plus grandes que les constantes de temps électriques, la limite précitée peut, par exemple dans le cas d'un régime de secours, être dépassée pendant une certaine durée. L'amplitude de ce dépassement ainsi que sa durée dépendent de la température initiale des conducteurs avant perturbation ainsi que de la température ambiante [6].

Pour un autotransformateur, on spécifie plus volontiers sa puissance apparente nominale en tant que limite à respecter, par souci de conformité, on transforme cette grandeur en un courant que l'on rapporte, par exemple, au nœud origine de la branche qui le représente (§ I.3.3).

Dans le cas d'un réseau multi-sources, on peut tenir compte du courant maximal disponible en chaque source en l'associant à la branche fictive correspondante du modèle équivalent proposé au chapitre I (§ I.5). Ceci représente un intérêt, notamment, dans le cas où l'on souhaite réaliser un équilibre de charge entre les différentes sources d'un réseau donné.

Par ailleurs, les exploitants doivent, pour des raisons qualitatives de l'énergie délivrée, garantir une tension aussi proche que possible de la tension nominale en chaque point de consommation soit en chaque nœud du réseau. L'écart maximal toléré peut varier d'une entreprise à une autre selon les moyens de compensations disponibles (condensateurs, autotransformateur survolteur- dévolteur, ...). En général, la valeur absolue de cet écart varie entre 5 et 10% selon le régime de fonctionnement normal ou défaillant du réseau. L'expression de cette contrainte est la suivante:

$$\frac{|V_{in} - V_i|}{V_{in}} \leq \varepsilon_{i\max} \qquad \text{(II.5)}$$

Soit :

$$V_i \leq V_{in}.(1+\varepsilon_{i\max}) \quad \text{et} \qquad V_i \geq V_{in}.(1-\varepsilon_{i\max})$$

- $V_{in}$ tension nominale au nœud $x_i$
- $V_i$ module de la tension complexe au nœud $x_i$
- $\varepsilon_{i\max}$ Écart de tension maximum admissible
- $|\ |$ Valeur absolue

En général, pour les réseaux de distribution, les charges aux nœuds sont essentiellement de nature inductive de sorte que l'on observe des chutes de tension plutôt que des élévations de tension par rapport à leurs valeurs nominales.

Pour les réseaux ruraux, les problèmes liés aux chutes de tension sont plus importants que dans le cas des réseaux urbains. En effet, ces réseaux nécessitent souvent des lignes plus ou moins longues pour alimenter des consommateurs en antenne. Par contre, pour les réseaux urbains, les contraintes thermiques liées essentiellement aux câbles nécessitent une observation assez rigoureuse étant donnée la forte densité de charge de ces réseaux.

### II.4.2. *Contraintes sur les manœuvres*

Suite à une défaillance d'une branche dans un réseau donné, les exploitants souhaitent, en général, rétablir la continuité du service en utilisant un schéma d'exploitation de secours qui soit aussi proche que possible du schéma original. Ce souhait se traduit par le respect d'une limite concernant le nombre de manœuvres autorisées. On détermine le nombre de manœuvres par la différence entre les états topologiques des branches du réseau avant et après optimisation et on exprime la contrainte à propos de ces manœuvres selon l'inéquation suivante:

$$\sum_{k} \left| U_K - U_K^0 \right| \leq \eta_{max} \qquad (II.6)$$

Où

- la somme porte sur l'ensemble des indices de branches du réseau.
- $U_K$ état topologique de la branche $b_k$ (0 ou 1)
- $U_K^{\circ}$ état topologique initial de la branche $b_k$
- $\eta_{\max}$ le nombre maximal de manœuvres autorisées.
- $\left| \ \right|$ valeur absolue

Pour compléter la contrainte précédente, on pourrait ajouter une contrainte imposant une durée maximale d'interruption de service à ne pas dépasser. Malheureusement, la durée d'interruption de service est une grandeur difficile à évaluer d'autant plus que les réseaux de distribution sont, en général, encore dépourvus de système de télécommande permettant de réaliser à distance les manœuvres nécessaires pour le rétablissement du service. En effet, cette durée devrait dépendre de la localisation du personnel disponible au moment de la panne, du

temps nécessaire pour localiser le lieu du défaut, des temps de déplacement pour effectuer les manœuvres et, éventuellement, l'ordonnancement optimal de ces dernières. Toutes ces caractéristiques sont quasiment inquantifiables que ce soit en milieu urbain où la signalisation routière et les conditions de trafics sont difficilement modélisables ou en milieu rural où les distances sont relativement important et où les accès en certains points du réseau sont parfois difficiles.

Enfin, on indiquera toutefois que les contraintes à propos des manœuvres ne représentent un intérêt que dans le cas où la conduite du réseau est en majeure partie manuelle. Le maintien de ces contraintes dans le cas d'un réseau complètement automatisé rendrait la présence des équipements de télécommande à distance quelque peu injustifiée.

## II.5. Critères d'optimisation appliqués à l'exploitation

### II.5.1. *Pertes ohmiques*

Elles sont inévitables et posent des problèmes à la fois d'ordre technique et économique. Elles entraînent un échauffement des branches du réseau limitant leur capacité de transfert. Elles s'expriment selon l'expression suivante:

$$\sum_{k} = R_K . I_K^2 \qquad (II.7)$$

Où

- la somme porte sur l'ensemble des indices de branches du réseau.
- $R_K$ résistance de la branche $b_k$
- $I_k$ module du courant complexe dans la branche $b_k$

La réduction des pertes à la fois induit et résulte d'une maximisation de la marge d'exploitation.

### II.5.2. *Equilibre de charge des branches ("Load balancing ")*

L'équilibrage de la charge des branches résulte de la volonté d'exploiter le réseau de manière optimale en répartissant les réserves de courant dans celles-ci de manière uniforme. Ce critère peut s'exprimer comme la minimisation de différentes expressions. L'expression la plus répandue est la suivante [7].

$$\sum_k \left(\frac{I_K}{I_{K\ max}}\right)^2 \qquad (II.8)$$

Où

- la somme porte l'ensemble des indices de branches du réseau
- $I_{K\max}$ courant maximal admissible dans la branche $b_k$
- $I_K$ module du courant complexe dans la branche $b_k$

### II.5.3. *Facteur de charge maximum*

Ce critère consiste à maximiser la réserve de courant transitant dans la branche la plus chargée dans le but d'assurer, en cas de défaillance, une reprise totale ou partielle du courant assigné normalement à la branche défaillante. Pour ce faire, l'optimisation aura pour objectif de minimiser l'expression suivante:

$$MAX\left\{\frac{I_k}{I_{k\max}}, k = 1.....M\right\} \qquad (II.9)$$

Où

- Max valeur maximale parmi un ensemble de valeurs
- M nombre total de branches du réseau
- $I_{k\max}$ courant maximum admissible dans la branche $b_k$
- $I_k$ module du courant complexe dans la branche $b_k$

Lorsque ce critère est sollicité, la prise en considération des contraintes thermiques (II.4) pour les branches n'est pas impérativement nécessaire.

### II.5.4. *Equilibre des tensions*

Au même titre que l'équilibre de charge dans les branches, ce critère permet d'exploiter le réseau avec un plan de tension équilibré de manière à prédisposer celui-ci à surmonter les éventuelles défaillances. En terme d'optimisation, on:réalise cet équilibre des tensions en minimisant la fonction suivant :

$$\sum_i \left(\frac{V_{in} - V_i}{V_{in}}\right)^2 \qquad (II.10)$$

Où

- la somme porte sur l'ensemble des indices des nœuds du réseau.
- $V_{in}$ tension nominale au nœud $x_{in}$
- $V_i$ module de la tension complexe au nœud $x_i$

### II.5.5. *Ecart de tension maximal*

L'objectif visé par ce critère est de minimiser l'écart de tension au nœud dont la tension est la plus basse ou éventuellement la plus élevée par rapport à sa valeur nominale:

$$MAX\left\{\frac{V_{in} - V_i}{V_{in}}, i = 1...N\right\} \qquad (II.11)$$

- Max valeur maximale parmi un ensemble de valeurs
- N nombre total de nœuds du réseau
- $V_{in}$ tension nominale au nœud $x_i$
- $V_i$ module de la tension complexe au nœud $x_i$
- $|\ |$ Valeur absolue.

A l'instar du critère à propos du facteur de charge maximal, les contraintes sur les tensions (II.5) peuvent être relaxées lors de l'utilisation de ce critère.

### II.5.6. *Coûts des manœuvres*

Ce critère intervient, tout particulièrement, dans le cas où, suite à une perturbation de la topologie initiale du réseau (défaillance d'une branche, surcharge de branches, etc...), on souhaite déterminer une topologie de secours dont la réalisation nécessiterait, si possible, en priorité des manœuvres qui soient non seulement suffisamment proches (au sens topologique du terme) du lieu du défaut mais aussi qui modifient le moins possible les courants aux départs des "feeders" (§ I.2.3). Pour ce faire, on attribue, selon la topologie initiale, à chaque branche du réseau un coût, notée ci، permettant de pénaliser le changement de son état topologique (manœuvre) et l'optimisation consiste à minimiser l'expression suivante:

$$\sum_{k=1}^{N} C_K . \left| U_k - U_k^0 \right| \qquad (II.12)$$

Où

- la somme porte sur l'ensemble des indices de branches du réseau.
- $U_k$ état topologique de la branche $b_k$ (0 ou 1)
- $U_k^{\circ}$ état topologique initial de la branche $b_k$
- $C_k$ coût associée à la manœuvre de la branche $b_k$
- $\left| \right|$ Valeur absolue

Bien entendu, si les valeurs des coûts $C_k$ sont toutes les mêmes, cela correspondra tout simplement à une minimisation du nombre de manœuvres et par conséquent, la contrainte (II.6) deviendra inutile.

A titre d'exemple, on peut définir les coûts $C_k$ selon le processus suivant. En parcourant successivement les "feeders" du schéma d'exploitation initial en commençant par le "feeder" faisant l'objet de la défaillance, on attribue un coût identique à toutes les branches faisant partie d'un même "feeder". La valeur de ce coût est proportionnelle au degré de voisinage du "feeder" en cours de traitement par rapport au "feeder" défaillant. Ce degré de voisinage est égal au nombre minimal de manœuvres qu'il faut effectuer pour transférer un nœud ou un groupe de nœuds depuis le "feeder" défaillant vers le "feeder" en cours de traitement. En particulier, les "feeders" adjacents au "feeder" défaillant auront, chacun, un degré de voisinage égal à 2. On peut le vérifier à l'aide de la figure I.2 du chapitre précédent où l'on considérera, par exemple, le "feeder l " comme défaillant.

L'ordre de succession des traitements des "feeders" s'effectue selon l'ordre croissant des degrés de voisinage en ce sens qu'à l'issue du parcours d'un" feeder" donné, on choisit comme "feeder" suivant celui qui nécessite la mise en service d'une et une seule branche pour le relier à l'un des "feeders" déjà traités; et c'est selon cette pratique, que l'on calcule, par la même occasion, le degré de voisinage pour chaque "feeder". A la fin de ce processus, on définit les coûts associés aux branches hors service en appliquant pour chacune d'elles la règle suivante. Si ses deux nœuds extrémités appartiennent au même "feeder'', on lui affecte un coût identique à celui des branches constituant celui-ci, sinon on lui affecte un coût égal à celui des branches du "feeder" ayant le plus grand degré de voisinage.

Dans le but de réduire les dimensions du problème d'optimisation et partant de réduire de façon très probable les temps de calcul, on pourrait tout simplement verrouiller les branches des "feeders" dont les degrés de voisinage sont supérieurs à 2 ou à 4. Toutefois, dans ce cas, il est évident que la garantie d'obtenir une solution, respectant principalement les contraintes de sécurité, peut être compromise.

## II.6. Application à l'exploitation d'un réseau de distribution

Selon le régime de fonctionnement du réseau, les critères et les contraintes décrites dans ce chapitre doivent être judicieusement choisis dans le but de composer la formulation mathématique du problème d'optimisation. Dans le cas où l'on choisit plusieurs critères à la fois, la fonction objective peut être exprimée comme une combinaison linéaire de ces critères où chacun d'eux devra être pondéré par un coefficient appelé poids permettant de mettre en valeur l'importance qui lui est accordée par rapport aux autres:

$$\mathbf{f}(\ ) = \sum_i P_i.C_i \qquad (II.13)$$

Où

- la somme porte sur l'ensemble des indices des critères.
- $C_i$ critère d'optimisation d'indice i
- $P_i$ poids associé au critère d'optimisation d'indice i

Pour un régime de fonctionnement quelconque, les contraintes d'égalité doivent, évidemment, toujours être présentes; en revanche, selon le cas, l'une ou l'autre des contraintes de sécurité peut être omise (§ II.5).

Etant donnée la nature bivalente (0 ou 1) des variables de décision, un poids trop élevé associé aux coûts des manœuvres ou une contrainte trop sévère à propos de leur nombre pourrait compromettre la minimisation des critères, voire même le respect des contraintes, dépendant des courants et des tensions. Aussi, il semblerait judicieux de ne les utiliser qu'en situation de défaillance du réseau (ex: surcharge ou perte d'une branche). En effet, dans ce cas, l'optimalité de la solution par rapport aux critères dépendant des courants et des tensions peut ne pas être requise et on se contenterait alors, uniquement, d'une solution respectant les contraintes de sécurité.

Dans le tableau suivant (tab II .1), on propose quelques exemples de combinaisons de critères et de contraintes que l'on pourrait appliquer pour l'un ou l'autre des différents régimes de fonctionnement d'un réseau [8].

**Tableau II.1**. *Critères et contraintes selon le régime d'exploitation d'un réseau*

| Régime d'exploitation | normal | critique | défaillant |
|---|---|---|---|
| **Critères :** | | | |
| Pertes ohmiques | X | | |
| équilibre de charge | | X | |
| Facteur charge max | | | X |
| Equilibre des tensions | | X | |
| Ecart de tension max | | | X |
| Coût des manœuvres | | X | X |
| **Contraintes :** | | | |
| Kirchhoff | X | X | X |
| Arborescence | X | X | X |
| Thermiques | X | X | X |
| Ecarts de tension | X | X | X |
| Nbre de manœuvres | | X | X |

A propos des critères dépendant des courants et des tensions, il semblerait que la minimisation selon l'un d'eux entraîne forcément la minimisation des autres. Cette équivalence entre critères ne peut être effective que dans le cas de réseaux, de nature plutôt didactiques, présentant des structures symétriques particulières et dont les charges aux nœuds et les caractéristiques électriques des branches sont partout identiques.

A titre d'exemple et dans le cas des critères quadratiques, on pourrait penser que la minimisation selon le critère des pertes ohmiques, qui signifie que les courants empruntent globalement des branches de faibles résistances, conduirait automatiquement à une minimisation du critère d'équilibre de charge. Ceci n'est vrai que dans le cas où la valeur de

la résistance de chaque branche du réseau est identique à sa valeur linéique, étant donnée la corrélation qui existe entre la résistance linéique et le courant maximal admissible relatifs à la branche en question. Un même raisonnement peut être effectué pour le cas du critère d'équilibre des tensions vis à vis de celui des pertes ohmiques où cette fois ci, les effets non négligeables des réactances des branches, principalement dans le cas des réseaux ruraux, empêchent l'équivalence entre ces deux critères.

## II.7. Conclusion

Il ne serait pas redondant d'utiliser une combinaison de critères du type précité pour la formulation d'un problème d'optimisation donné.

Dans ce chapitre nous avons exprimé mathématiquement les problèmes d'optimisation, aussi nous avons discuté les différentes critères et contraintes possibles ainsi que leur adéquation vis-à-vis des divers régimes de fonctionnement du réseau, maintenant nous pouvons appliquer les méthodes d'optimisation et voir ses algorithmes dans le troisième chapitre.

## III.1. Introduction

Durant ces dernières décennies, un nombre non négligeable de méthodes de solution du problème de l'écoulement de puissance dans les réseaux de distribution ont été mise au point. Dans ce chapitre on se contentera de décrire deux méthodes d'optimisation, il s'agit des algorithmes génétiques et la méthode de résolution par séparation et évolution (Branch and Bound).

## III.2. Analyse des problèmes et introduction aux méthodes de résolution

La formulation mathématique énoncée au chapitre précédent (§ II.2) montre que les problèmes d'optimisation de topologie d'un réseau de distribution sont difficiles à résoudre. Ceci s'explique principalement par la nature bivalente des variables de décision $u_K$ (0 ou 1) qui constitue déjà une contrainte suffisamment sévère et qui donne lieu à des fonctions objectifs non différentiables. De plus, ces variables de décision sont liées entre elles par une contrainte que l'on ne peut exprimer sous forme d'une simple relation mathématique. Il s'agit de la contrainte imposant la connexité du schéma d'exploitation recherché (§ II.3.2).

A ce jour, on ne connaît pas de méthodes d'optimisation analytiques capables de résoudre ce type de problème en déterminant directement, à partir de sa formulation mathématique, une solution réalisable et globalement optimale au sens des contraintes et des critères spécifiés (figure III.1) [9].

La seule manière permettant d'appréhender ce type de problème résulte du découplage qui existe entre les variables de décision et les variables d'état. Ce découplage indique qu'une solution candidate à être la solution optimale est entièrement définie dès que l'on connait la valeur assignée à chacune des variables de décision du problème. On définit alors une configuration du réseau dont on peut calculer, de façon supposée unique [10] et selon un algorithme adéquat, les courants et les tensions c'est à dire les variables d'état du problème. Toutes les variables ayant été ainsi déterminées, il suffit alors d'évaluer les contraintes et la fonction objectif du problème afin de conserver ou de rejeter la solution précitée (figure III.1).

Etant donnée la nature bivalente des variables de décision, toutes les configurations ou solutions possibles sont donc confinées dans un espace fini et discret. On en déduit que les méthodes de résolution peuvent être basées sur des stratégies d'exploration de cet espace dans

le but d'identifier la solution recherchée et que, par conséquent, les problèmes d'optimisation de topologie de réseau font partie de la classe des problèmes combinatoires.

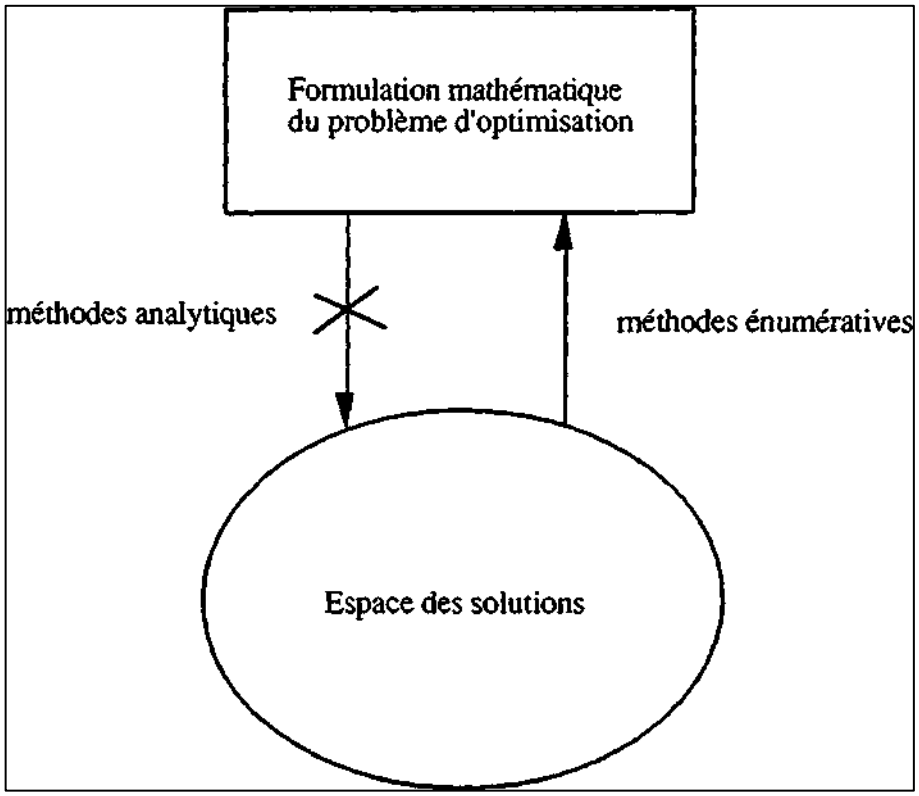



**Figure III.1.** *Principe de résolution des problèmes d'optimisation de topologie*

Dès lors, on peut envisager une première méthode d'optimisation consistant à énumérer de façon explicite toutes les configurations possibles. Cette méthode, facile à mettre en œuvre, est sûre en ce sens qu'elle garantit l'obtention d'une solution réalisable et globalement optimale pour autant que cette dernière existe. Malheureusement, elle ne peut convenir que dans le cas où la cardinalité de l'espace des solutions n'excède pas les $10^{9}$**.**Le nombre total de branches M dans un réseau de distribution est en général de l'ordre de quelques centaines et la cardinalité de cet espace vaut donc $2^{M}$. Il en résulte que cette méthode est impraticable du point de vue temps de calcul, même si l'on utilise les ordinateurs les plus puissants.

Finalement, pour résoudre ce type de problème, il ne reste, de toute évidence, plus qu'à envisager des méthodes d'énumération implicite qui, par définition, s'articulent autour d'une exploration incomplète de l'espace des solutions pour tenter, malgré tout, d'en extraire la

meilleure. Deux catégories de méthodes d'énumération implicite seront évoquées dans le cadre de cette thèse. Il s'agit d'une part une méthode dite ''algorithme génétique AG'' "méta-heuristiques" et d'autre part des méthodes dites "par séparation et évaluation".

Les méthodes méta-heuristiques (dans notre cas l'algorithme génétique) [11], L'idée de base des algorithmes génétiques consiste à considérer une population, représentant un ensemble de solutions potentielles du problème à optimiser, et de. la faire évoluer vers une population meilleure par rapport au critère d'optimisation. Le 'mécanisme d'évolution est implanté par l'application de trois opérateurs dits génétiques: Reproduction, Croisement et Mutation. L'originalité des algorithmes génétiques vient du fait qu'ils considèrent un ensemble de solutions potentielles (au lieu d'une seule), réparties aléatoirement dans l'espace des solutions, d'en sélectionner les meilleures et de les combiner entre elles, tout en introduisant une part d'aléa. Cela permet une plus large exploration de l'espace des solutions et réduit fortement le risque de tomber sur des minimums locaux dans le cas de fonctions multimodales. Etant donné un espace de solutions potentielles E (espace de recherche) défini par les limites physiques des variables du système, chaque point de cet espace est représenté par un vecteur (individu) de dimension n. Le but est de minimiser ou maximiser une fonction coût f définie de E vers $\Re$, qui associe à chaque point de E une valeur réelle. Suivant la métaphore de l'évolution des espèces, la valeur de f(x) pour un individu x de E, exprime son adaptation à son environnement. Dans le cas d'une fonction à minimiser, un individu x est plus adapté qu'un individu y si la valeur de f(x) est plus petite que f(y). L'algorithme génétique est constitué de quatre phases qui sont l'initialisation, la reproduction, le croisement et la mutation.

Les méthodes par séparation et évaluation [4] supposent que l'espace des solutions possibles est organisé sous la forme d'une arborescence dont chaque nœud terminal correspond à une solution unique candidate à être globalement optimale et réalisable et dont chaque nœud intermédiaire correspond à un sous- espace de solutions possibles. Elles consistent à parcourir cette arborescence en tentant d'éviter, selon une règle résultant d'une évaluation par défaut de la fonction objectif du problème, le parcours d'un certain nombre de sous- arborescences soit de sous-espaces de solutions. Cette évaluation par défaut permet en fait de définir, pour chaque nœud visité, une borne inférieure et une borne supérieure de la fonction objectif sur le sous-espace considéré. Aussi, pour un nœud donné, si la borne inférieure est supérieure à la plus petite des bornes supérieures rencontrées jusqu'alors, on déclare comme inutile l'examen des solutions associées aux nœuds terminaux de la sous-arborescence dont la racine est le

nœud en question. Cette opération, consistant à interrompre sélectivement le parcours de l'arborescence, peut être effectuée de la même manière si, pour un nœud donné, on montre que le sous-espace correspondant ne contient aucune solution respectant toutes les contraintes du problème.

Enfin, pour conclure les propos de ce paragraphe, on peut dire d'emblée que, pour un problème donné, les algorithmes énumératifs, qui seront examinés dans les paragraphes suivants, pourront facilement identifier des solutions satisfaisant les contraintes d'égalité, à savoir la continuité du service (§ II.3.1) et l'arborescence (§ II.3.2). En revanche, il n'en sera pas de même quant aux solutions qui devront respecter, en plus, les contraintes d'inégalité (§ II.4), étant donné qu'elles peuvent être très peu nombreuses ou tout simplement inexistantes. Aussi, il faudra, par la suite, constamment se préoccuper de trois questions fondamentales, à savoir:

— pour un problème donné, existe-t-il des solutions arborescentes réalisables C'est à dire qui respecteraient principalement les contraintes de sécurité (courant et tension), les contraintes à propos des manœuvres étant supposées avoir une priorité beaucoup moins importantes?
— si oui, peut-on les identifier et en déduire la meilleure, soit une "bonne" solution ou voire même la solution optimale du problème?
— quels seraient alors les temps de calcul nécessaires pour ce faire?

En effet, l'aspect énumératif des techniques introduites dans ce paragraphe montre déjà que, selon le problème à résoudre, il faudra probablement envisager des compromis entre la qualité des solutions proposées et les temps de calcul nécessaires pour les obtenir.

## III.3. Algorithme génétique

### III.3.1. *Historique*

Les algorithmes génétiques, initiés dans les années 1970 par John Holland, sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes d'évolution de la nature : croisement, mutation, sélection. [12]. Les premiers travaux sur les algorithmes génétiques ont été initialement développés par John Holland (1975) [13]. Qui a développé les principes fondamentaux des algorithmes génétiques dans le cadre de l'optimisation mathématique.

A cette époque, l'informatique n'avait pas encore connu de développement et ses travaux n'ont pas pu être appliqués sur des problèmes réels de grande taille. La parution en 1989 de l'ouvrage de référence écrit par D.E Goldberg [14]. qui décrit l'utilisation de ces Algorithmes dans le cadre de résolution de problèmes concrets, a permis de mieux faire connaître ces derniers dans la communauté scientifique et a marqué le début d'un nouvel intérêt pour cette technique d'optimisation, notamment après la parution de puissants calculateurs dans les années 90.

### III.3.2. *Définition*

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes d'évolution de la nature : sélections, croisements, mutations, etc. Ils appartiennent á la classe des algorithmes évolutionnaires [15]. On peut dire que l'algorithme génétique est une méthode de programmation qui repose sur le principe de l'évolution pour effectuer la recherche d'une solution adéquate à un problème.

### III.3.3. *Principe*

Les algorithmes génétiques (AG) sont des méthodes utilisées dans les problèmes d'optimisation. Les AG tirent leur nom de l'évolution biologique des êtres vivants dans le monde réel. Ces algorithmes cherchent à simuler le processus de la sélection naturelle dans un environnement défavorable en s'inspirant de la théorie de l'évolution proposée par C.Darwin. Dans un environnement, « les individus » les mieux adaptés tendent à vivre assez longtemps pour se reproduire alors que les plus faibles ont tendance à disparaître (the survival of the fittest) [16] [17]. Dans un problème d'optimisation à 'n' variables, nous faisons correspondre un gène à Chaque variable cherchée. Chaque gène est représenté par une chaîne de caractères choisis Dans un alphabet fini (souvent binaire). Les gènes s'enchaînent ensemble "bout à bout" pour construire un chromosome, chaque chromosome représentant une solution potentielle sous une forme codée. Ces chromosomes constituent les briques de base contenant les caractéristiques héréditaires des individus. Un chromosome (ou plusieurs) forme un individu qui représente à son tour une solution potentielle dans l'espace de recherche correspondant du problème. Etant donné que les algorithmes génétiques travaillent sur un ensemble de points de l'espace de recherche, nous appelons l'ensemble des points choisis (à

savoir les individus) une population. Au fur et à mesure des générations (itérations), une population des individus mieux adaptés va être créée.

### III.3.4. *présentation*

— Les techniques de recherche et d'optimisation sont en général classées en trois catégories [18]. Énumératives, déterministes et stochastiques. Les AG font partie de la troisième catégorie et quatre caractéristiques les distinguent des autres techniques d'optimisation [19]. Ils utilisent un codage des paramètres et non les paramètres eux-mêmes.

— Ils travaillent sur une population d'individus (ou de solutions).

— Ils n'utilisent que les valeurs de la fonction à optimiser, pas sa dérivée, ou une autre connaissance auxiliaire.

— Ils utilisent des règles de transition probabilistes et non déterministes.

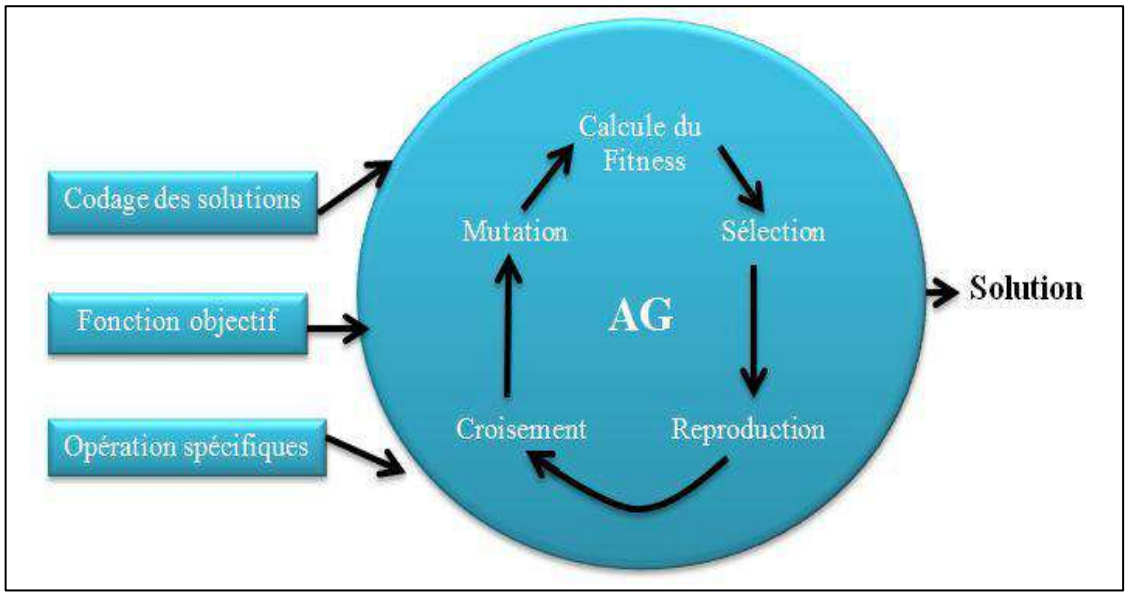



**Figure III.2.** *Vue d'ensemble d'un algorithme génétique*

### III.3.5. *Paramètres d'un AG*

Pour appliquer un AG à un problème réel, on doit posséder les éléments suivants :

- Un codage des éléments appartenant à la population, le codage des solutions du problème à résoudre doit être choisi avec soin;
- une fonction d'évaluation ou d'adéquation ou d'adaptation de l'individu qui mesure la qualité de l'individu;
- un processus d'évolution des générations;
- des opérateurs pour modifier les individus d'une population de la génération (t) à la génération (t+1) comme le croisement et la mutation;
- des paramètres de l'AG : les opérateurs précédents dépendent de plusieurs paramètres qui sont fixés à l'avance et dont dépend fortement la convergence de l'algorithme :
    - taille de la population : c'est-à-dire le nombre d'individus dans la population. Si la taille est trop petite, l'AG peut ne pas converger, par contre si elle est trop grande, l'évaluation des individus peut être très longue;
    - probabilité de croisement et de mutation. Les valeurs de ces probabilités peuvent varier d'une application à l'autre. Par exemple, dans l'étude des AG pour l'optimisation de cinq fonctions mathématiques, De Jong (1975) a suggéré de choisir une probabilité de croisement élevée, une probabilité de mutation faible (inversement proportionnelle à la taille de la population), et une population de taille modérée [19]. La probabilité de mutation est en général très faible, inférieure à 0,1, une probabilité trop grande, peut modifier les meilleurs individus;
    - critère d'arrêt : c'est-à-dire le nombre maximal de générations à effectuer.

### III.3.6. *Principe de base d'un AG standard*

Un AG standard nécessite en premier le codage de l'ensemble des paramètres du problème d'optimisation en une chaîne de longueur finie. Le principe d'un AG est simple, il s'agit de simuler l'évolution d'une population d'individus jusqu'à un critère d'arrêt. On commence par générer une population initiale d'individus (solutions) de façon aléatoire. Puis, à chaque génération, des individus sont sélectionnés, cette sélection est effectuée à partir d'une fonction objectif appelée fonction d'adaptation. Puis, les opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués et une nouvelle population est créée. Ce processus est itéré jusqu'à un critère d'arrêt. Le critère le plus couramment utilisé est le nombre maximal de générations que l'on désire effectuer. La (figure III.3) présente le principe de l'AG standard.

L'AG débute par la génération d'une population initiale et l'évaluation de la fonction d'adaptation de tous les individus qui composent cette première population. Puis, des individus sont sélectionnés aléatoirement pour la reproduction selon le principe de la survie du plus adapté. Ensuite, des individus « enfants » (ou les descendants) sont générés en appliquant les deux opérateurs génétiques suivants : le croisement et la mutation. Ces enfants sont placés dans une nouvelle population P(t) et vont se substituer, en tout ou en partie, à la population de la génération précédente. De nouvelles populations d'individus vont ensuite se succéder, d'une génération (t) à la génération(t+1), chaque génération représentant une itération jusqu'à l'atteinte du critère d'arrêt. L'AG présenté ci-dessus est dit générationnel car tous les individus enfants générés sont placés dans une population et vont remplacer entièrement la population des individus parents.

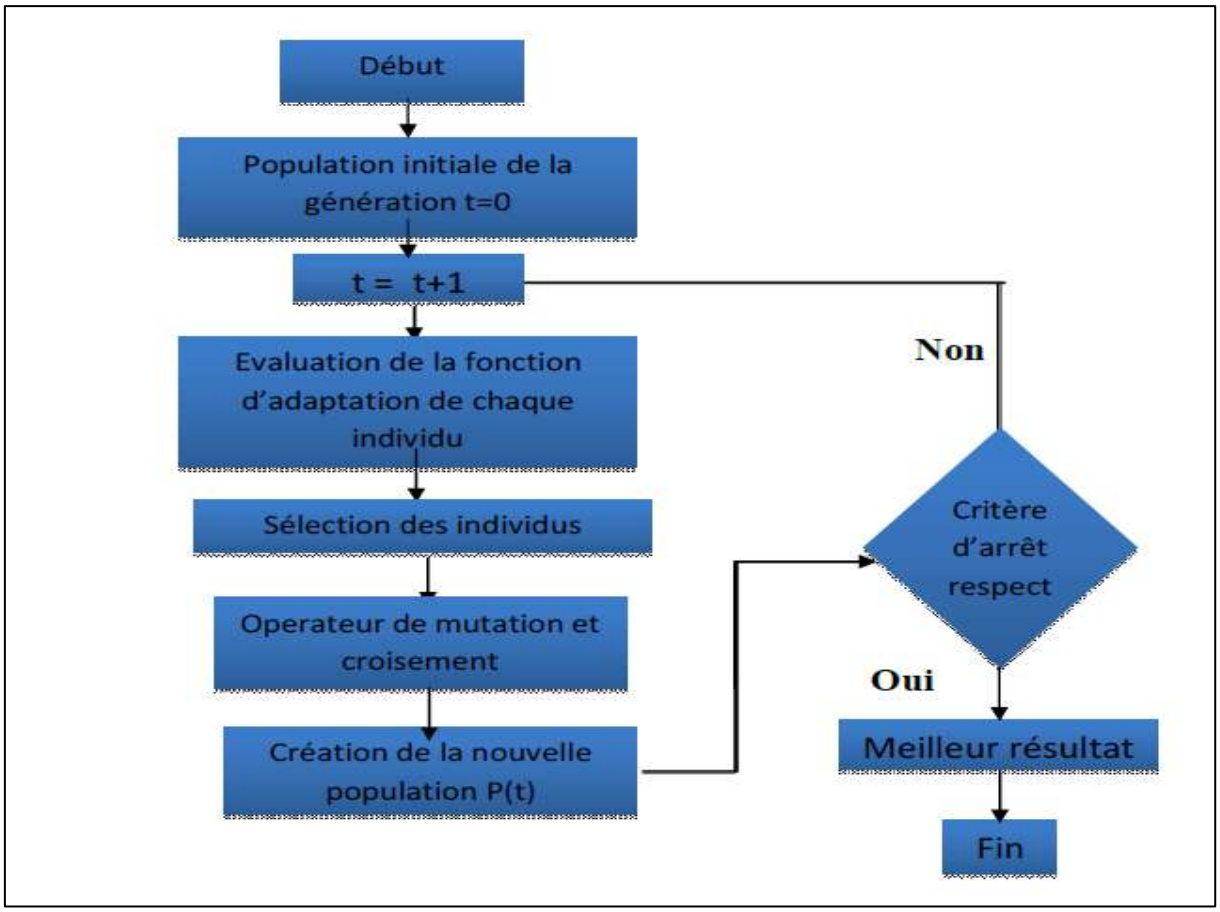



**Figure III.3.** *l'organigramme des AG standard.*

### III.3.7. *Les opérations d'un AG*

III.3.7.1. *Sélection*

La sélection a pour objectif d'identifier les individus qui doivent se reproduire. Cet opérateur ne crée pas de nouveaux individus mais identifie les individus sur la base de leur fonction d'adaptation, les individus les mieux adaptés sont sélectionnés alors que les moins bien adaptés sont écartés [20]. La sélection doit favoriser les meilleurs éléments selon le critère à optimiser (minimiser ou maximiser). Ceci permet de donner aux individus dont la valeur est plus grande une probabilité plus élevée de contribuer à la génération suivante (figure III.4). Il existe plusieurs méthodes de sélection, les plus connues étant la « roue de la fortune » et la « sélection par tournoi » :

La « roue de la fortune » est la plus ancienne, où chaque individu, de la population de taille maximale Jmax, occupe une section de la roue proportionnellement à sa fonction d'adaptation Fitness(j), la probabilité de sélection d'un individu (j) s'écrit :

$$Prob(j) = \frac{Fitness(j)}{\sum_{J=1}^{J\max} Fitness(j)} \qquad \text{(III.1)}$$

À chaque fois qu'un individu doit être sélectionné, un tirage à la loterie s'effectue et propose un candidat, les individus possédant une plus grande fonction d'adaptation ayant plus de chance d'être sélectionnés. À chaque fois qu'il faut sélectionner un individu, la « sélection par tournoi » consiste à tirer aléatoirement (k) individus de la population, sans tenir compte de la valeur de leur fonction d'adaptation, et de choisir le meilleur individu parmi les k individus. Le nombre d'individus sélectionnés a une influence sur la pression de sélection, lorsque k = 2, la sélection est dite par «tournoi binaire».

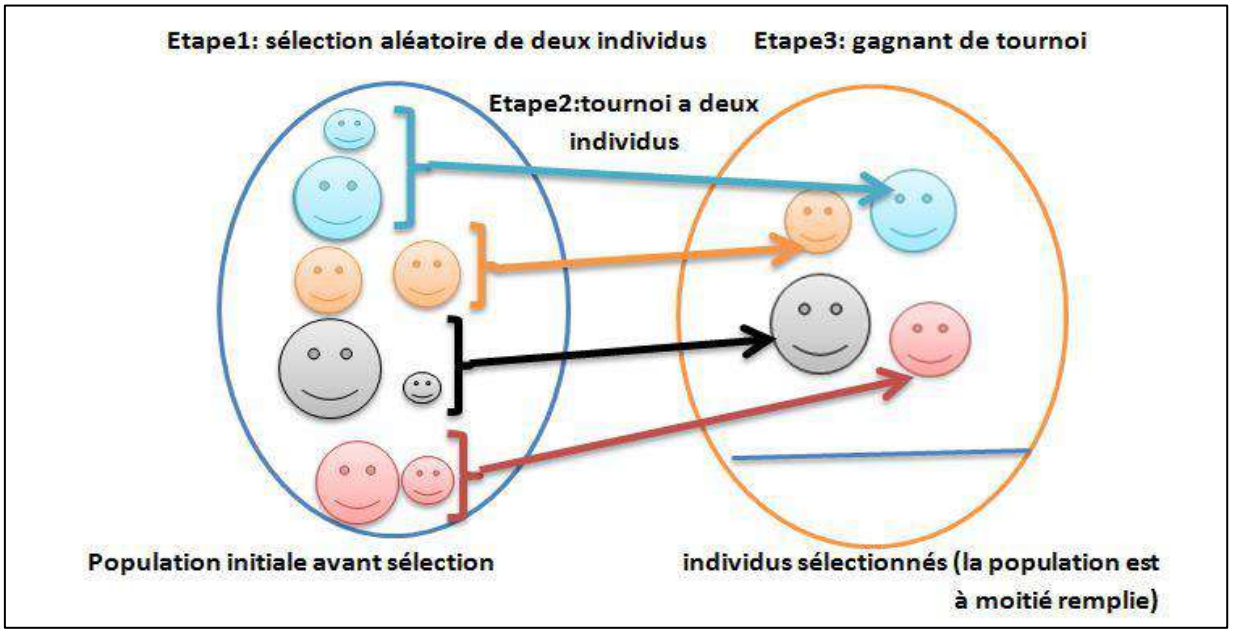



**Figure III.4.** *Représentation d'une sélection par tournoi d'individus pour un critère de maximisation (chaque individu représente une solution possible)*

III.3.7.2. *Croisement*

Le croisement permet de créer de nouvelles chaînes en échangeant de l'information entre deux chaînes (figure .III.5). Le croisement s'effectue en deux étapes. D'abord les nouveaux éléments produits par la reproduction sont appariés, ensuite chaque paire de chaînes subit un croisement comme suit : un entier k représentant une position sur la chaîne est choisi aléatoirement entre 1 et la longueur de chaîne (l) moins un (l -1). Deux nouvelles chaînes sont créées en échangeant tous les caractères compris entre les positions k +1 et l inclusivement.

L'exemple suivant (figure III.5) montre deux chaînes (A1 et A2) de longueur l = 5 appartenant à la population initiale. Les deux nouvelles chaînes (A3 et A4) appartenant à la nouvelle population sont obtenues par croisement à la position k = 5 :

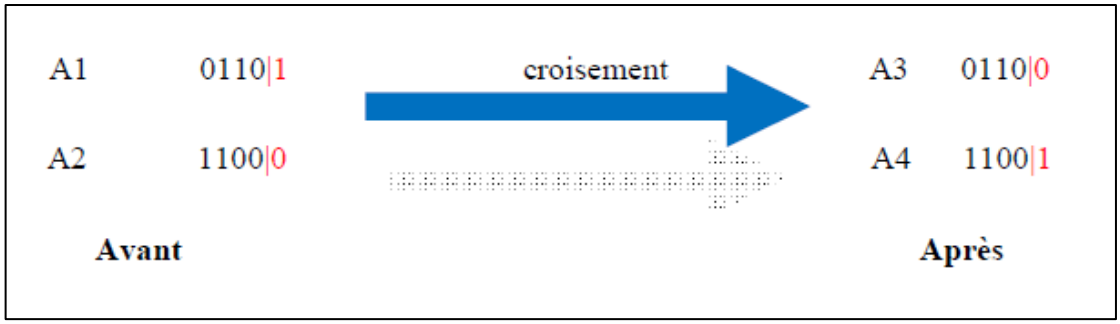



**Figure III.5.** *Représentation d'un croisement en un point de deux chaînes.*

III.3.7.3. *Mutation*

La mutation est exécutée seulement sur une seule chaîne. Elle représente la modification aléatoire et occasionnelle de faible probabilité de la valeur d'un caractère de la chaîne, pour un codage binaire cela revient à changer un 1 en 0 et vice versa (figure III.6). Cet opérateur introduit de la diversité dans le processus de recherche des solutions et peut aider l'AG à ne pas stagner dans un optimum local.

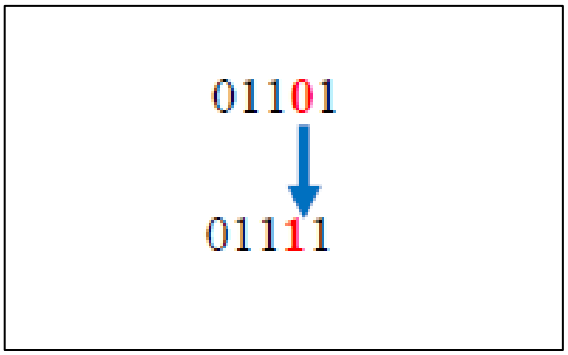



**Figure III.6.** *Représentation d'une mutation de bits dans une chaîne*

III.3.7.4. *Codage*

Le codage utilisé par un AG est représenté sous forme d'une chaîne de bits qui contient toute l'information nécessaire pour représenter un point de l'espace de recherche. Le codage binaire est le code le plus utilisé [21], l'inconvénient majeur du code binaire étant que deux points proches dans l'espace des variables (voir la colonne 1 du Tableau III.1) ne sont pas

nécessairement codés par deux chaînes de bits voisines (colonne 2 du Tableau III.1). On remédie en général à ce problème en utilisant le codage de Gray qui conserve une distance de Hamming de « 1 » entre deux chaînes (colonne 3 du Tableau III.1). La distance de Hamming entre deux chaînes de bits est le nombre de bits qui diffère de l'une à l'autre. Pour les deux chaînes suivantes: 111 et 100, la distance est de 2.

Le Tableau III.1 montre un exemple du code binaire et le code Gray pour des variables entières allant de 0 et 7. On voit que la distance de Hamming est de 1 pour chaque entier dans le code Gray, alors que pour les nombres binaires, pour passer de 3 à 4, la distance de Hamming est de 3.

**Tableau III.1**. *Code de Gray et code binaire pour une chaîne à trois bits*

| Variables entières | Code binaire | Code Gray |
|---|---|---|
| 0 | 000 | 000 |
| 1 | 001 | 001 |
| 2 | 010 | 011 |
| 3 | 011 | 010 |
| 4 | 100 | 110 |
| 5 | 101 | 111 |
| 6 | 110 | 101 |
| 7 | 111 | 100 |

### III.3.8. *Processus d'évolution des générations : générationnel, stationnaire et élitiste*

Traditionnellement, les AG sont générationnels. Les individus de chaque génération sont testés et une nouvelle population en entier est générée, le nombre de descendants produits est donc égal au nombre d'individus parents.

Les deux populations ne se chevauchent pas [22]. La nouvelle population d'individus enfants est formée à chaque génération. Cependant, certains individus enfants peuvent être une copie conforme des parents qui n'ont pas été perturbés ni par un croisement ni par une mutation. La stratégie de remplacement stationnaire (steady-state) diffère de l'AG générationnel. Dans cette approche, il y a seulement un ou deux individus qui sont générés à la fois [23]. Il peut y avoir différentes façons de sélectionner « l'individu victime » à supprimer de la population. Par exemple, on 11 peut sélectionner un individu aléatoirement ou sélectionner celui qui a la

plus petite fonction d'adaptation. Dans ce type d'AG, les nouveaux individus générés sont ajoutés à la population et peuvent immédiatement être sélectionnés comme parents de nouveaux individus [22].

**Approche élitiste (élitiste model)**

Les opérateurs de croisement et de mutation peuvent affecter le meilleur individu d'une génération. Le modèle élitiste a pour avantage d'écarter la possibilité de perdre cet individu. Ce modèle copie le meilleur individu de chaque génération dans la population de la génération suivante. Ce modèle peut accélérer la vitesse de domination exercée par ce super individu sur la population [23].

### III.3.9. *Opérateurs de croisement*

Il existe d'autres opérateurs de croisement :

1. **Croisement en un seul point** : Dans ce type de croisement, un point de croisement est choisi aléatoirement pour le couple la position de ce point M est définie par:

$$M \in \{1,\ 2,\ 3,\ \dots,\ \mathrm{lS}-1\}$$

$\mathrm{lS}$ : La longueur de chromosome (nombre de bits dans le chromosome).

Le croisement en un seul point a l'avantage d'être simple et facile à appliquer. De plus, ce type de croisement donne de bons résultats dans des applications où certaines informations importantes sur le problème sont déjà connues. Enfin, pour des problèmes d'optimisation en temps réel ou des problèmes ayant un grand nombre de variables, cette méthode peut donner une convergence rapide vers une solution optimale.

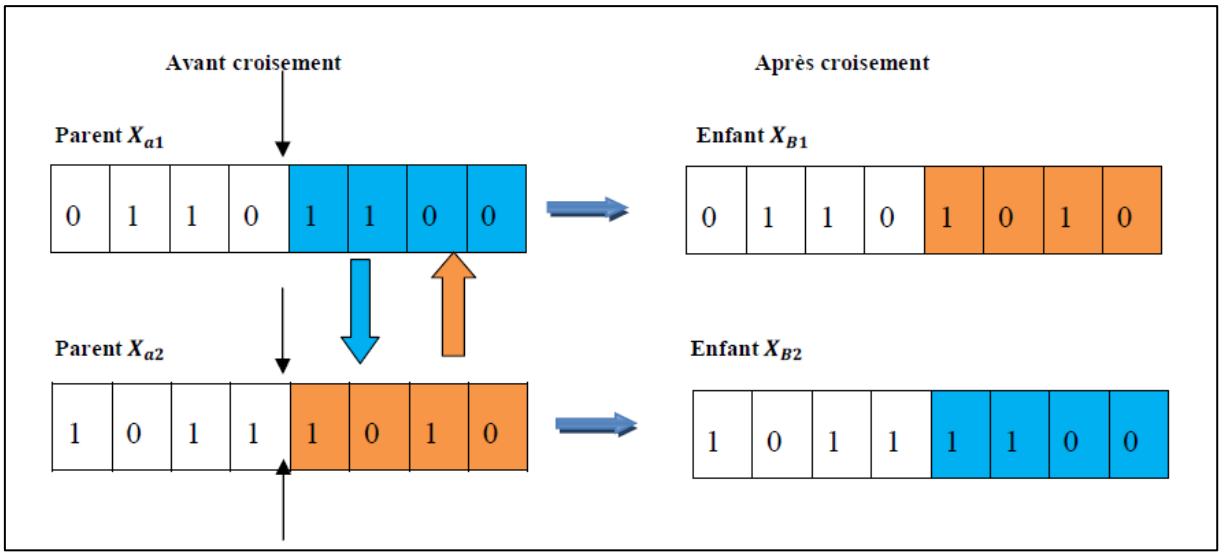



**Figure.III.7.** *Croisement en seul point.*

2. **Croisement en deux points :** on choisit au hasard deux points de croisement et on échange les parties de chaîne situées entre ces deux points figure (III.7).

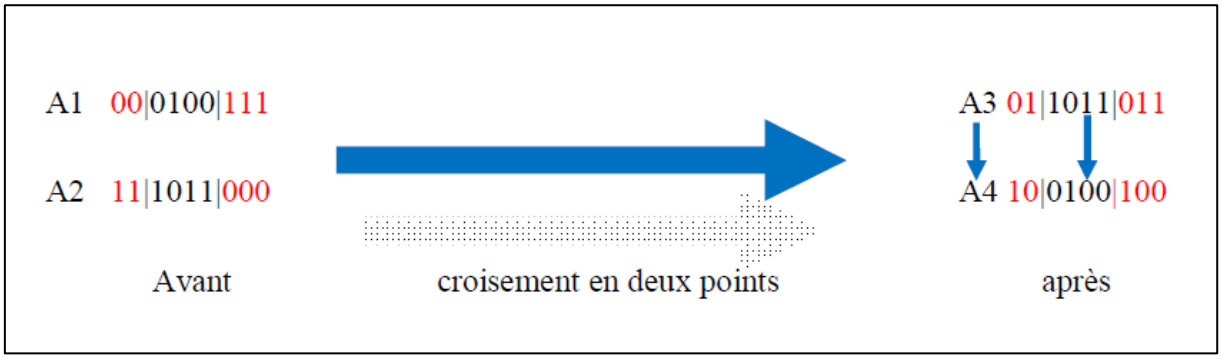



**Figure III.8.** *Représentation d'un croisement en deux points.*

## III.4. Les méthodes par séparation et évaluation

### III.4.1. *Principes de base*

Le premier principe d'une méthode d'exploration par séparation et évaluation (plus connue sous le terme anglais: "**Branch and Bound**" [24]) est d'explorer l'ensemble des solutions possibles noté E en des sous-ensembles de plus en plus petits de façon à isoler une solution réalisable et optimale du problème posé dans l'un de ces sous-ensembles. Cette exploration est

représentée par une arborescence dont le sommet racine correspond à l'ensemble E et dont les autres sommets correspondent à des sous-ensembles de E.

Au sommet racine de l'arborescence, l'ensemble E est identifié par le fait que toutes les variables de décision y sont indéfinies. En définissant une de ces variables qui, dans le cas particulier de nos problèmes d'optimisation, est bivalente, on détermine deux sous-ensembles disjoints de E (séparation de E), l'un contenant toutes les solutions possibles pour lesquelles la variable de décision en question est à **1** et l'autre contenant toutes les solutions possibles pour lesquelles cette même variable est à 0. A partir de ces deux sous-ensembles, on répète pour chacun d'eux la même opération en définissant à chaque fois une nouvelle variable de décision encore indéfinie pour le sous-ensemble considéré. En poursuivant ce processus tant que chaque sous-ensemble nouvellement déterminé dispose de variables de décision encore indéfinies, on obtient finalement une arborescence, appelée généralement "arbre de décision", et on associe aux liaisons de celle-ci les valeurs des variables de décision qui ont permis de définir ses sommets (figure III.8). Selon cette représentation, chaque sommet terminal de cette arborescence sera associé à un sous-ensemble de E contenant une solution unique puisque toutes les variables de décision y seront définies.

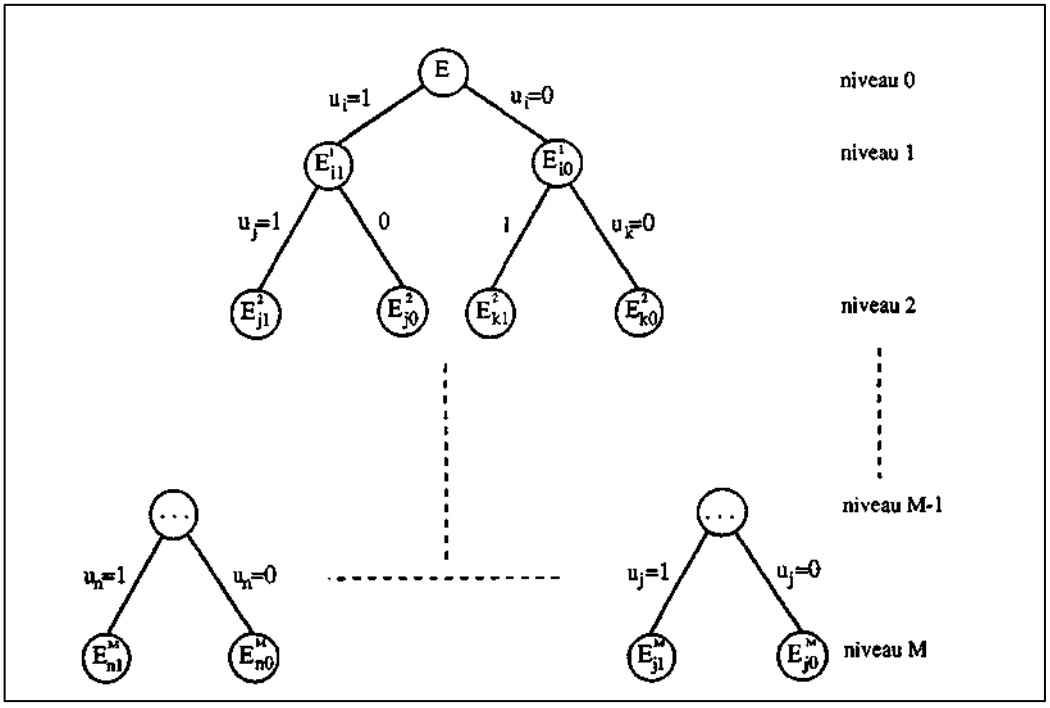



**Figure III.9**. *Arbre de décision binaire pour M variables (exemple)*

Pour atteindre la solution recherchée du problème, on ne va évidemment ni créer et par conséquent ni balayer toute l'arborescence de manière à visiter tous ses sommets terminaux et on énoncera pour cela le second principe d'une méthode par séparation et évaluation. Ce principe suggère de déterminer pour chaque sous-ensemble que l'on aura défini une borne inférieure aussi grande que possible et une borne supérieure aussi petite que possible de la fonction objectif sur ce sous-ensemble. Aussi, au cours de la création et du balayage de l'arborescence en partant de sa racine, si pour un sommet donné la borne inférieure est plus grande que la plus petite des bornes supérieures déjà rencontrées, alors il est inutile de définir les sommets successeurs au sommet en question (interruption sélective). En fait, cela veut simplement dire que le sous- ensemble considéré ne contiendra pas de solutions meilleures que la meilleure solution contenue dans le sous-ensemble déjà défini et ayant la plus petite des bornes supérieures établies jusqu'alors. En général, la borne supérieure ne peut être déterminée que dans le cas d'un sommet terminal auquel cas les bornes inférieures et supérieures pour celui-ci sont identiques et consistent en l'évaluation de la fonction objectif pour l'unique solution qui lui est associée. Dans ce cas le caractère implicite de la méthode devient beaucoup plus pertinent vis à vis de l'obtention de la solution désirée. Cette opération d'interruption sélective peut être également effectuée de la même façon lorsque, pour un sommet donné, on peut montrer que le sous-ensemble associé ne contient pas de solutions réalisables au sens de toutes les contraintes en vigueur, et il est bien entendu que dans ce cas, le calcul des bornes est inutile.

Pour définir plus précisément la procédure d'exploration, on doit établir:

- l'ordre selon lequel les définitions et les examens des sommets devront être effectués, Autrement dit la manière avec laquelle on devra se déplacer dans l'arborescence à partir de sa racine.
- des règles dites de séparation qui permettront, pour chaque sommet examiné, de choisir la variable de décision sur laquelle va porter la séparation conduisant à ses deux sommets successeurs immédiats et
- le procédé permettant d'évaluer, pour chaque sommet examiné, les bornes inférieures et supérieures de la fonction objectif sur le sous-ensemble correspondant.

Les règles de séparation et les évaluations des bornes dépendent évidemment du type de problème à résoudre et on se référera pour cela au propos du paragraphe suivant. Pour l'instant, on se contentera de dire qu'elles seront déterminées à partir des variables de décisions déjà définies pour chaque sous-ensemble en cours de traitement. Quant au balayage

de l'arborescence, on citera, pour le cas des problèmes d'optimisation à variables bivalentes, deux stratégies permettant de l'effectuer: la stratégie en "profondeur" ("Depth first") et la stratégie en "largeur" ("Breadth-first"). Selon la littérature [25], différentes variantes de ces deux stratégies peuvent être également considérées.

Selon l'arbre de décision de la figure III.8, la stratégie en "profondeur" suggère de parcourir l'arborescence en ne considérant (si possible) à chaque étape qu'un seul sommet par niveau. Après avoir examiné ce sommet, on définit ses deux sommets successeurs du niveau suivant. L'un de ces deux sommets est inséré dans une liste d'attente quant à l'autre, il est sollicité pour poursuivre le parcours. Lorsque l'on aboutit à un sommet terminal ou à un sommet sujet à l'interruption sélective, on commence à parcourir les sommets en attente ("Backtraking") selon, par exemple, l'ordre inverse de leur insertion dans la liste ("LiFo = last in - first out"), et à partir de chacun d'eux, on poursuit le parcours selon le principe précité tout en l'éliminant de la liste d'attente.

La stratégie en "largeur" propose, quant à elle, de définir et d'examiner tous les sommets d'un même niveau avant de passer à ceux du niveau suivant. Pour ce faire, les sommets d'un même niveau sont tout d'abord définis et insérés dans une liste d'attente. Par la suite, on parcourt et on examine ces sommets en attente selon, par exemple, l'ordre de leur insertion dans la liste ("FiFo = first in - first out") et on introduit progressivement à la fin de cette même liste, les deux sommets successeurs éventuels du niveau suivant engendrés par chaque sommet examiné. Chaque sommet traité est éliminé de la liste. Ainsi, lorsque l'on aura épuisé les sommets d'un même niveau, on aura automatiquement dans la même liste d'attente les sommets du niveau suivant à partir desquelles on pourra répéter les mêmes opérations.

En général, la stratégie en "profondeur" présente l'avantage d'atteindre rapidement les sommets terminaux de l'arborescence et permet ainsi, de déterminer rapidement des bornes supérieures lorsqu'on ne peut les évaluer pour les sommets intermédiaires. De plus, la taille de la liste d'attente, qu'elle nécessite, est bornée en ce sens qu'elle ne dépasse pas le nombre total de variables de décision du problème à résoudre.

La stratégie "en largeur" n'est généralement intéressante que si l'on peut déterminer une borne supérieure de la fonction objective pour n'importe quel sommet examiné ou si l'on dispose, dès le départ, d'une bonne solution réalisable pour laquelle on pourrait considérer la valeur de la fonction objectif comme étant une première borne supérieure minimale. A titre d'exemple, cette solution particulière pourrait être déterminée au moyen d'un algorithme heuristique. Dans le cas contraire, la nature implicite du parcours de l'arborescence ne pourrait

éventuellement être garantie que si l'on peut montrer l'inexistence de solutions réalisables en certains sommets. Il en résulte finalement que, malgré tout, le nombre de sommets à mémoriser et à examiner pourrait devenir de plus en plus élevé au fur et à mesure que l'on se déplacera dans l'arborescence.

### III.4.2. Application au cas de l'optimisation de la topologie d'un réseau de Distribution

Selon les principes énoncés au paragraphe précédent, on décrit dans celui-ci une méthode d'exploration par séparation et évaluation appliquée au cas de la recherche d'une configuration arborescente réalisable et optimale d'un réseau de distribution.

Pour l'arbre de décision associé à la méthode suggérée, on identifie chacun de ses sommets ou sous-ensembles de configurations possibles par l'ensemble U des variables de décisions et on attribue à chaque variable indéfinie de cet ensemble une valeur différente de 0 et de 1. Si l'on s'intéresse, pour un sommet donné, uniquement aux variables déjà définies ($u_k$ = 1 ou 0), les branches correspondantes et leurs nœuds extrémités déterminent alors une sous- configuration du réseau candidate à faire partie d'un ensemble de configurations dont chacune d'elles sera associée à un sommet terminal de l'arbre. Finalement on pourra dire, qu'à chaque sommet intermédiaire de l'arbre de décision, on associe une sous-configuration plutôt qu'un sous-ensemble de configurations possibles.

Si, pour une sous-configuration donnée, les branches en service ($u_K$=1) et leurs nœuds extrémités respectifs constituent un graphe arborescent (connexe et sans cycle) (§ I.2.2 et I.2.3) dont la racine est le nœud source du réseau, on pourra alors calculer les courants circulant dans ces branches et les tensions en ces nœuds à l'aide de l'algorithme récursif proposé au chapitre I (§ I.6). Par conséquent, on pourra également évaluer la fonction objective et les contraintes du problème posé en considérant uniquement tous les nœuds et toutes les branches de la sous-configuration en question. Au cours de cette évaluation, on notera que, dans le cas d'une branche hors service, le courant est nul et on supposera que, dans le cas d'un nœud exclu du graphe arborescent précité, la tension est égale à sa valeur nominale.

A partir des propos précédents, on définit maintenant les ingrédients de la procédure d'exploration par séparation et évaluation suggérée.

**Règle de séparation des sommets:**

Après avoir examiné un sommet de l'arbre de décision, on détermine, sauf en cas d'interruption sélective, ses deux successeurs en choisissant une variable de décision indéfinie pour ce sommet et respectant impérativement la condition suivante:

— la branche correspondante à cette variable doit avoir au moins un de ses deux nœuds extrémités relié au nœud source du réseau par un chemin unique (arborescence) formé exclusivement par des branches en service de la sous-configuration associée au sommet en question.

Cette condition traduit la volonté de ne définir que des sous-configurations dont les branches en service et leurs nœuds respectifs forment un graphe connexe incluant le nœud source du réseau. Elle constitue en fait la règle principale de séparation des sommets.

**Evaluation des bornes inférieures et supérieures:**

On ne détermine les bornes inférieures et supérieures pour un sommet, que s'il n'est pas sujet à une interruption sélective édictée par l'une ou l'autre des quatre premières conditions qui seront présentées au point suivant.

On définit la borne inférieure comme étant la valeur de la fonction objectif relative à la sous-configuration correspondante au sommet examiné. Cependant, la validité de cette définition doit être cautionnée par l'hypothèse Consistant à dire que toute nouvelle branche choisie selon la règle principale de séparation des sommets entrainera, pour le sommet en question, de nouvelles sous configurations aux sommets successeurs dont les valeurs respectives de la fonction objectif seront supérieures ou égales à celle de la sous-configuration originale.

Pour le cas des critères d'optimisation dépendant des manœuvres, cette hypothèse sera toujours vérifiée tandis que dans le cas des critères d'optimisation dépendant des courants et des tensions. En effet, il suffit, pour ce dernier cas, de constater que la méthode par séparation et évaluation faisant l'objet de ce paragraphe n'est autre qu'une méthode "constructive" exhaustive.

Par ailleurs, on a évoqué au paragraphe précédent que la borne inférieure doit être aussi grande que possible, ce qui devrait permettre d'appliquer l'interruption sélective assez souvent. On propose alors de compléter la borne inférieure que l'on vient de définir par un coût supplémentaire de manière à obtenir une borne inférieure majorée. La détermination de ce coût supplémentaire découle des propos suivants. Si l'on s'intéresse à tous les nœuds du

réseau étudié honnis ceux qui sont extrémités des branches en service **(**$u_k$ = 1) dans la sous-configuration en cours d'examen, on constate que chacun de ces nœuds ilotes est l'extrémité d'une ou plusieurs branches dont les états topologiques sont indéfinis **(**$u_k \neq$ 1 et 0) et que forcément une de ces branches sera par la suite mise en service afin de transporter un courant alimentant au moins la totalité de la charge au nœud dont il est question.

L'idée est alors de choisir judicieusement pour chaque nœud ilote une branche incidente d'état topologique indéfinie, de substituer l'autre extrémité de celle-ci par un nœud source fictif, de calculer le courant qui circulerait dans cette branche pour alimenter uniquement le nœud en question puis de calculer la tension en celui-ci. Ensuite, on évalue la fonction objectif du problème en ne considérant que le nœud ilote et la branche choisie correspondante**.** le choix de celle-ci se portera sur celle qui engendrera la plus petite valeur de la fonction objectif sans violation de contraintes d'inégalité. Enfin, la somme des valeurs de la fonction objectif obtenues pour l'ensemble des nœuds ilotes et leurs branches respectivement retenues constituera le coût supplémentaire permettant d'obtenir la borne inférieure majorée. Quant au calcul de la borne supérieure, on ne calcule celle-ci que pour un sommet terminal lorsque la configuration associée permet de respecter toutes les contraintes spécifiées par le problème posé. Cette borne est identique à la borne inférieure et toutes deux sont égales à la valeur de la fonction objective calculée à partir de tous les nœuds et toutes les branches du réseau étudié.

**Stratégie de parcours de l'arbre de décision :**

De par les avantages qu'elle présente, la stratégie choisie, pour créer et parcourir l'arbre de décision, est la stratégie en "profondeur" (§ III.4.1). Au cours de celle- ci, après avoir examiné puis séparé un sommet situé à un niveau donné de l'arbre de décision, on choisit, pour passer au niveau suivant, le successeur ayant été obtenu en fixant à **1** la variable de décision qui a conduit à la séparation du sommet en question. Quant à l'autre successeur, soit celui pour lequel la même variable est à **0**, il est automatiquement inséré à la fin de la liste d'attente. Lorsque l'on arrive à un sommet terminal ou à un sommet faisant l'objet d'une interruption sélective, on poursuit le parcours à partir du dernier sommet dans la liste d'attente ("LiFo").

## III.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié deux techniques de résolution pouvant être appliquées aux problèmes d'optimisation formulés au chapitre II, nous avons présenté une vue générale sur les algorithmes génétiques et sur les méthodes par séparation et évaluation pour les appliquer sur un réseau moyenne tension dans le chapitre IV.

## IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier le réseau d'alimentation du pôle urbain de la commune de BOUGHEZOULE, ainsi l'élaboration d'une comparaison entre les deux programmes de calcule MATLAB et CARAT.

Ce pôle est situé à côté ouest de la commune de BOUGHEZOULE, il est constitué de plusieurs type d'équipements (logements, établissements scolaires, établissement de santé, établissement étatique …..Etc.).

L'alimentation de ce pôle sera effectuée à base de la création de deux départs aériens moyens tension 30 kV, a partir du poste HT/MT de CHAHBOUNIA.

Le raccordement des différents équipements du pôle sera réaliser par la création de quatre départs 30 kV souterraine.

## IV.2 présentation du pôle urbain de BOUGHEZOUL

Le pôle urbain est en construction avec toutes les commodités d'une ville (habitat, commerces, équipements publiques…)

**Tableaux IV.1.***liste des projets programmés*

| **REPARTITIONS DE CHARGE POLE BOUGHAZOUL** | | |
|---|---|---|
| **Secteur** | **Equipement** | **Charge demande en kva** |
| **éducation** | 02Ecole primaire type C ( a ,b)E19 | 80 |
| | CEM base 05 | 160 |
| | CEM base 07 | 160 |
| | 04 école primaire type B E4(b ,c ,d) | 160 |
| | lycée 800/200 | 160 |
| | 04 crèche (a ,b ,c ,d) E06 | 160 |
| **Culturelle et loisirs** | bibliothèque | 40 |
| | Hôtel | 100 |
| | Centre culturale | 40 |
| | médiathèque | 40 |

| | | |
|---|---|---|
| | Centre d'artisanat traditionnel | 40 |
| **Logts** | 200+200+100 logts collectif | 1500 |
| | 600 logs coll +659logts individuels | 3777 |
| **Sports** | Stade communal | 40 |
| | Complexe sportif de proximité | 250 |
| | Maison de jeunes | 40 |
| **Administratif** | Agence postale | 40 |
| | Centre téléphonique | 40 |
| | Siege APC | 100 |
| | Centre administratif | 100 |
| | Banque | 40 |
| | Brigade de la gendarmerie | 160 |
| | Unité de protection civile | 100 |
| | Centre pédagogique des handicapes | 40 |
| | centre de formation professionnelle | 250 |
| | Maison forestière | 40 |
| | Sub technique2 such | 40 |
| | Sub technique1 slep | 40 |
| | Centre financier | 40 |
| | Affaires sociales | 40 |
| | Gare routière | 100 |
| | Centre commercial | 160 |
| | Station météo | 100 |
| | 02 sub techniques stp | 80 |
| | 02 sub technique s hyd | 80 |
| **Sante** | Centre de sente | 40 |

| | | |
|---|---|---|
| | Polyclinique | 40 |
| | Maternité rurale | 40 |
| | 02 salles de soins E20(a,b) | 80 |
| **Equipement divers** | Stations urbain | 100 |
| | Mosquée +école coranique+ zaouïa | 100 |
| | Station de service | 40 |
| | 40+30+30 locaux | 200 |
| | Marché de gros | 40 |
| | Marché a bestiaux | 40 |
| | Abattoir communal | 40 |
| | Parc communal | 40 |
| | Recette communale | 40 |
| | Auberge | 40 |
| | Relais routière | 40 |
| | Garde communale | 40 |

### IV.3 méthodologie de l'étude

Le dimensionnement électrique du projet d'alimentation en énergie électrique consiste essentiellement au calcul électrique du réseau moyen tension en vue de déterminer :

- Les besoins en énergie électrique des futures habitations et équipements publics.
- Nombre et puissances et des postes MT/BT.
- Tracé de l'itinéraire du réseau électrique moyen tension.

L'application informatique utilisée pour le calcul électrique est le programme CARAT.

### IV.4 hypothèse de calcul

Les hypothèses de calcul prises en considération dans cette étude par le modèle CARAT, sont les suivantes :

- Chute de tension maximale admissible a l'état sain : 10% pour le réseau MT aérien, 6% pour le réseau MT souterrain.

— Chute de tension maximale admise à l'état d'incident : 12% pour le réseau MT aérien, 10% pour le réseau MT souterrain.
— Taux d'évolution : 5%.
— Facteur de puissance cos $\rho$=0.9 qui est supposé uniforme dans tout le réseau.
— Tension aux jeux de barres MT : 30kV.

- La répartition de la charge a été effectuée proportionnellement a la puissance installée des postes MT/BT, ce qui donne un coefficient de foisonnement $\theta = I_0/\sum I$.
- $\sum I$ : représente la somme des charges de chacun des postes MT/BT de départ
- $I_0$ : la mesure de pointe en tête de départ.
- L'évolution de la charge est considéré suivre une loi exponentielle ayant la forme suivante :$P_n=P_0(1+X)n$ avec X taux d'évolution (5%).
  - Limite thermique des lignes et câbles électrique
    -93.3mm$^2$ (ALM) =270A
    -120mm$^2$ (ALU) =198A
  - Le facteur de puissance (cos$\rho$), est de 0.9.
  - Le taux d'accroissement moyen de 5%

**IV.5 support utilisés**

— un plan d'aménagement et un bilan de puissance fournis par la direction de l'urbanisme et de la construction (DUC), nous donne les besoins en énergie électrique du pôle urbain.
— Carte schématique.
— Base de données GDO (Gestion Des Ouvrages).

**IV.6 bilans énergétique**

Vu que le pôle urbain est constitué de près de 1759 logements et 54 équipements les besoins en énergie électrique seraient de 9.8MVA

Tandis que la réalisation des ouvrage constituent le pôle urbain est étalé sur une période 03 ans, alors nous optons de choisir ce même rythme de montée en puissance.

Le tableau ci-dessous montre la répartition des charge pour l'ensemble des projets programme dans le pôle.

**Tableau.IV.2.** *répartition des charge pour l'ensemble des projets programme dans le pôle*

| **Equipement** | **Puissance (MVA)** |
|---|---|
| Logement | 5.27 |
| Equipement | 4 .58 |

## IV.7 présentation du poste source

### *IV.7.1 HT CHAHBOUNIA*

**Tableau .IV.3***état de la charge au niveau de poste*

| Poste Source | Puissance Installe (MVA) | Puissance Appelée (MVA) | Taux D'utilisa | Nombre De départ MT | Nombre de Cellules de Réserve |
|---|---|---|---|---|---|
| HT CHAHBOUNIA | 2*40 | 17.67 | 22.08 | 09 | 03 |

### *IV.7.2 apport de l'alimentation des RCN sur l'évolution de la charge du poste 60/30kVCHAHBOUNIA*

Tenant compte de la contribution potentille de la charge des projets RCN, les prévisions de charge seront comme suit:

| année | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| charge (MVA) | 17.67 | 19.81 | 21.29 | 21.97 | 22.69 | 23.44 | 24.23 | 25.06 | 25.93 | 26.85 | 27.81 |

## IV.8.choix de la topologie du réseau

la pratique habituelle de desserte HTA en milieu urbain est le réseau souterrain, alors le pôle sera alimenté en souterrain par la création de 04 départs d'une longueur total de 118,3km

L'alimentation de pôle sera réalise a partir de l'un de 01poste source (HT CHAHBONIA ou THT BOUGHEZOUL)

La création d'un poste de répartition s'impose pour satisfaire cette structure , ça seras un poste à 6 cellules comme suit :

- 02 cellules arrivées (ligne aérienne)
- 04 cellules départs (réseau souterrain)

## IV.9. Le choix de la structure souterraine

Parmi les structures souterraines recommandées par le guide technique de la distribution pour l'alimentation de poste HTA/BT est celle en BOUCLE, nous favorisons cette structure pour l'alimentation de pôle, cette structure nous assure une continuité et qualité de service et cela quelle que soit la source d'alimentation.

Aussi elle nous évite le croisement des câbles et le vas et vient de ces derniers.

## IV.10.tracé de l'itinéraire du réseau électrique

Le tracé de l'itinéraire du réseau électrique respecte les considérations suivantes :

- Suivre le tracé des routes principales existantes et les constructions.
- Eviter la traversée des aires protégées, espaces verts…etc.
- Choisir dans la mesure du possible un emplacement des postes HTA/BT en adéquation avec le plan architecteur et esthétique du pôle urbain.
- La réalisation, l'exploitation et la maintenance du réseau électrique se trouvent facilitées selon ce chemin.

**Départ I :** départ 30kV aérien de 18km de la longueur, créer a partir du poste HT/MT 60/30kV, se départ sert a alimenté 02 départ souterraine (départ 1, départ2).

**Départ II :** départ 30kV aérien de 18km de la longueur, créer a partir du poste HT/MT 60/30kV, se départ sert à alimenté 02 départ souterraine (départ 3, départ 4).

**Tableau. IV.4** les départ de réseau électrique

| **DEPART I** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Départ 1(souterraine) | | | | Départ 2 (souterraine) | | | |
| Poste | long (m) | PI (kVA) | Courant Appelé (A) | Poste | Long (m) | PI (kVA) | Courant Appelé (A) |
| Poste 60/30kv et Pmixte1 | 1000 | 340 | 4.77 | Poste 60/30kv Et LV2 | 680 | 160 | 2.47 |
| LV1 | 50 | 100 | 1.54 | DP1 | 110 | 250 | 3.37 |
| DP10 | 310 | 274 | 3.69 | DP2 | 160 | 250 | 3.37 |
| DP9 | 170 | 250 | 3.37 | DP3 | 160 | 250 | 3.37 |
| DP8 | 110 | 250 | 3.37 | LV4 | 150 | 100 | 1.54 |
| DP7 | 120 | 290 | 3.91 | Pmixte4 | 140 | 340 | 4.77 |
| DP19 | 260 | 250 | 3.37 | DP20 | 250 | 250 | 3.37 |
| DP21 | 350 | 63 | 0.85 | Pmixte6 | 500 | 340 | 4.77 |
| DP22 | 220 | 250 | 3.37 | Pmixte5 | 250 | 360 | 5.15 |
| LV6 | 290 | 100 | 1.54 | LV7 | 350 | 160 | 2.46 |
| Pmixte8 | 340 | 410 | 6 | DP27 | 310 | 250 | 3.37 |
| | | | | DP26 | 210 | 250 | 3.37 |
| TOTAL | 2220 | 2577 | 34.76 | TOTAL | 3270 | 2960 | 41.42 |

| DEPART II | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Départ3( souterraine) | | | | Départ4 (souterraine) | | | |
| Poste | long (m) | PI (kVA) | Courant Appelé (A) | Poste | Long (m) | PI (kVA) | Courant Appelé (A) |
| Poste 60/30kv et DP5 | 450 | 250 | 3.37 | Poste 60/30kv et Pmixte2 | 660 | 300 | 4.03 |
| DP6 | 150 | 250 | 3.37 | LV3 | 120 | 160 | 2.15 |
| DP4 | 250 | 250 | 3.37 | Pmixte3 | 70 | 320 | 4.3 |
| DP11 | 260 | 200 | 2.69 | DP15 | 200 | 250 | 3.37 |
| DP12 | 150 | 250 | 3.37 | DP14 | 170 | 220 | 2.96 |
| DP13 | 100 | 250 | 3.37 | DP16 | 250 | 250 | 3.37 |
| LV5 | 430 | 100 | 1.54 | DP17 | 140 | 250 | 3.37 |
| DP23 | 160 | 250 | 3.37 | DP18 | 150 | 146 | 1.96 |
| Pmixte7 | 370 | 320 | 4.61 | DP24 | 200 | 250 | 3.37 |
| | | | | DP25 | 150 | 250 | 3.37 |
| | | | | Pmixte9 | 360 | 450 | 6.06 |
| TOTAL | 2320 | 2120 | 29.09 | TOTAL | 2470 | 2746 | 37.03 |

## IV.11 mode de raccordement

Le mode de raccordement choisi consiste à alimenté le pôle urbain comme suit :

- Création de deux de parts aérien MT 30kV issus du poste HT/MT 60kVde CHAHBOUNIA de 18 km chacun.
- Création du poste de répartition MT/MT de quatre départs souterraine 30kV au niveau du pôle.
- Création de quatre départs souterraine à 30kV issus du poste de répartition MT/MT de la longueur de 10.280 km.

## IV.12 comparaisons des résultats de calculs MATLAB et CARAT

### IV.12.1.*1ère variante : (Proposition manuels des ouvertures)*

#### IV.12.1.1 *Evolution de la charge*

Pour connaître l'évolution de la charge ainsi que celle de la chute de tension; nous nous Sommes servi deux programmes CARAT et MATLAB, ont proposons les ouvertures suivantes (PLV07, PDP27), (PLV07, P MIX8), (PDP24, PDP28).

L'exécution de ce dernier donne les valeurs deux tableaux ci-dessous

***Tableau IV.5.*** *Evolution de la charge pour la 1éme variante dans le programme CARAT et MATLAB*

| départ | Courant de charge (A) | | départ | Courant de charge (A) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | CARAT | MATLAB | | CARAT | MATLAB |
| INJECT PH2C1 | | 71,42 | PLV04 PMIX4 | 21, | 21,48 |
| INJECT PH2C1 | | 74,22 | PMIX4 PDP20 | 17, | 16,70 |
| PH2C1 PR3C1 | 71, | 71,42 | PDP20 PMIX6 | 13, | 13,33 |
| PR3C1 PR3B1 | 71, | 71,42 | PMIX6 PMIX5 | 8, | 7,63 |
| PR3B1 PR3C3 | 36, | 35,81 | PMIX5 PLV07 | 2, | 2,46 |
| PR3B1 PR3C4 | 36, | 35,60 | PR3C5 PDP05 | 45, | 45,27 |
| PH2C2 PR3C2 | 74, | 74,22 | PDP05 PDP06 | 42, | 41,90 |
| PR3C2 PR3B2 | 74, | 74,22 | PDP06 PDP04 | 39, | 38,53 |
| PR3B2 PR3C5 | 45, | 45,27 | PDP04 PDP11 | 35, | 35,16 |
| PH2C2 PR3C6 | 29, | 28,94 | PDP11 PDP12 | 32, | 32,46 |
| PR3C3 PMIX1 | 36, | 35,81 | PDP12 PDP13 | 29, | 29,09 |
| PMIX1 PLV01 | 31, | 31,03 | PDP13 PLV05 | 26, | 25,72 |
| PLV01 PDP10 | 29, | 29,49 | LV05 PDP23 | 24, | 24,18 |
| PDP10 PDP09 | 26, | 25,80 | PDP23 PMIX7 | 11, | 11,36 |
| PDP09 PDP08 | 22, | 22,42 | PMIX7 PDP26 | 7, | 6,74 |
| PDP08 PDP07 | 19, | 19,05 | PDP27 PDP26 | 3, | 3,37 |
| PDP07 PDP19 | 15, | 15,14 | PDP23 PMIX9 | 9, | 9,44 |
| PDP19 PDP21 | 12, | 11,77 | PDP25 PMIX9 | 3, | 3,37 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| PDP21 PDP22 | 11, | 10,92 | PR3C6 PMIX2 | 29, | 28,94 |
| PDP22 PLV06 | 8, | 7,55 | PMIX2 PLV03 | 25, | 24,89 |
| PLV06 PMIX8 | 6, | 6,01 | PLV03 PMIX3 | 23, | 22,73 |
| PR3C4 PLV02 | 36, | 35,60 | PMIX3 PDP15 | 18, | 18,42 |
| PLV02 PDP01 | 33, | 33,14 | PDP15 PDP14 | 15, | 15,05 |
| PDP01 PDP02 | 30, | 29,76 | PDP14 PDP16 | 12, | 12,08 |
| PDP02 PDP03 | 26, | 26,02 | PDP16 PDP17 | 9, | 8,71 |
| PDP03 PLV04 | 23, | 23,02 | PDP17 PDP18 | 5, | 5,34 |
| | | | PDP18 PDP24 | 3, | 3,37 |

### I**V.12.1.2** ***Evolution de la chute de tension par les deux programmes CARAT et MATLAB***

***Tableau IV.6.*** *Evolution de la chute de tension pour la1$^{éme}$variente dans le programme CARAT et MATLAB*

| | *CARAT* | | *MATLAB* | | | *CARAT* | | *MATLAB* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| POSTE | V(v) | $\Delta V$ % | V(v) | $\Delta V$ % | POSTE | V(v) | $\Delta V$ % | V(v) | $\Delta V$ % |
| PH2C1 | | | 30000 | 0 | PDP20 | 28920 | 3,60 | 28920 | 3,60 |
| PH2C2 | | | 30000 | 0 | PMIX6 | 28917 | 3,61 | 28917 | 3,61 |
| PR3C1 | 28945 | 3,52 | 28945 | 3,5 | PMIX5 | 28916 | 3,61 | 28916 | 3,61 |
| PR3C2 | 28903 | 3,66 | 28903 | 3,65 | PLV07 | 28915 | 3,62 | 28915 | 3,62 |
| PR3B1 | 28945 | 3,52 | 28945 | 3,52 | PDP27 | 28864 | 3,79 | 28864 | 3,79 |
| PR3B2 | 28903 | 3,66 | 28903 | 3,66 | PDP26 | 28864 | 3,79 | 28864 | 3,79 |
| PR3C3 | 28945 | 3,52 | 28945 | 3,52 | PDP05 | 28893 | 3,69 | 28893 | 3,69 |
| PR3C4 | 28945 | 3,52 | 28945 | 3,52 | PDP06 | 28889 | 3,70 | 28889 | 3,70 |
| PR3C5 | 28903 | 3,66 | 28903 | 3,66 | PDP04 | 28884 | 3,72 | 28884 | 3,72 |
| PR3C6 | 28903 | 3,66 | 28903 | 3,66 | PDP11 | 28880 | 3,73 | 28880 | 3,73 |
| PMIX1 | 28926 | 3,58 | 28926 | 3,58 | PDP12 | 28877 | 3,74 | 28877 | 3,74 |
| PLV01 | 28925 | 3,58 | 28925 | 3,58 | PDP12 | 28876 | 3,75 | 28876 | 3,75 |
| PDP10 | 28921 | 3,60 | 28921 | 3,60 | PLV05 | 28870 | 3,77 | 28870 | 3,77 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PDP09 | 28918 | 3,61 | 28918 | 3,61 | PDP23 | 28868 | 3,77 | 28868 | 3,77 |
| PDP08 | 28917 | 3,61 | 28917 | 3,61 | PMIX7 | 28866 | 3,78 | 28866 | 3,78 |
| PDP07 | 28916 | 3,61 | 28916 | 3,61 | PMIX2 | 28893 | 3,69 | 28893 | 3,69 |
| PDP19 | 28914 | 3,62 | 28914 | 3,62 | PLV03 | 28892 | 3,69 | 28892 | 3,69 |
| PDP21 | 28912 | 3,63 | 28912 | 3,63 | PMIX3 | 28891 | 3,70 | 28891 | 3,70 |
| PDP22 | 28910 | 3,63 | 28910 | 3,63 | PDP15 | 28889 | 3,70 | 28889 | 3,70 |
| PLV06 | 28909 | 3,64 | 28909 | 3,64 | PDP14 | 28888 | 3,71 | 28888 | 3,71 |
| PMIX8 | 28908 | 3,64 | 28908 | 3,64 | PDP16 | 28886 | 3,71 | 28886 | 3,71 |
| PLV02 | 28932 | 3,56 | 28932 | 3,56 | PDP17 | 28886 | 3,71 | 28886 | 3,71 |
| PDP01 | 28930 | 3,57 | 28930 | 3,57 | PDP18 | 28885 | 3,72 | 28885 | 3,72 |
| PDP02 | 28928 | 3,57 | 28928 | 3,57 | PDP24 | 28885 | 3,72 | 28885 | 3,72 |
| PDP03 | 28926 | 3,58 | 28926 | 3,58 | PDP25 | 28866 | 3,78 | 28866 | 3,78 |
| PLV04 | 28924 | 3,59 | 28924 | 3,59 | PMIX9 | 28866 | 3,78 | 28866 | 3,78 |
| PMIX4 | 28922 | 3,59 | 28922 | 3,59 | | | | | |

Les pertes :

Avec MATLAB : ploss=210,5111

Avec CARAT : total losses= 211,

### *IV.12.2 2ème variante : (Proposition automatique des ouvertures, par le programme CARAT) (PLV06, PMIX8), (PLV07, PDP27), (PDP25, PMIX9)*

#### *IV.12.2.1 Evolution de la charge*

***Tableau IV.7*** *Evolution de la charge pour la 2éme variente dans le programme CARAT et MATLAB*

| départ | Courant de charge (A) | | départ | Courant de charge (A) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | CARAT | MATLAB | | CARAT | MATLAB |
| INJEC PH2C1 | | 71,42 | PDP26 PDP27 | 3, | 3,37 |
| INJEC PH2C2 | | 74,22 | PH2C2 PR3C1 | 71, | 71,42 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| PH2C2 PR3C2 | 74, | 74,22 | PR3C1 PR3B1 | 71, | 71,42 |
| PR3C2 PR3B2 | 74, | 74,22 | PR3B1 PR3C3 | 30, | 29,80 |
| PR3B2 PR3C5 | 42, | 41,90 | PR3B1 PR3C4 | 42, | 41,61 |
| PR3B2 PR3C6 | 32, | 32,31 | PR3C4 PLV02 | 42, | 41,61 |
| PR3C6 PMIX2 | 32, | 32,31 | PLV02 PDP01 | 39, | 39,15 |
| PMIX2 PLV03 | 28, | 28,26 | PDP01 PDP02 | 36, | 35,78 |
| PLV03 PMIX3 | 26, | 26,11 | PDP02 PDP03 | 32, | 32,40 |
| PMIX3 PDP15 | 22, | 21,79 | PDP03 PLV04 | 29, | 29,03 |
| PDP15 PDP14 | 18, | 18,42 | PLV04 PMIX4 | 27, | 27,49 |
| PDP14 PDP16 | 15, | 15,45 | PMIX4 PDP20 | 23, | 22,71 |
| PDP16 PDP17 | 12, | 12,08 | PDP20 PMIX6 | 19, | 19 ,34 |
| PDP17 PDP18 | 9, | 8,71 | PMIX6 PMIX5 | 14, | 13,64 |
| PDP18 PDP24 | 7, | 6,74 | PMIX5 PLV07 | 8, | 8,47 |
| PDP24 PDP25 | 3, | 3,37 | PLV07 PMIX8 | 6, | 6,01 |
| PR3C5 PDP05 | 42, | 41,90 | PR3C3 PMIX1 | 30, | 29,80 |
| PDP05 PDP06 | 39, | 38,53 | PMIX1 PLV01 | 25, | 25,02 |
| PDP06 PDP04 | 35, | 35,16 | PLV01 PDP10 | 23, | 23,48 |
| PDP04 PDP11 | 32, | 31,79 | PDP10 PDP09 | 20, | 19,79 |
| PDP11 PDP12 | 29, | 29,09 | PDP09 PDP08 | 16, | 16,41 |
| PDP12 PDP13 | 26, | 25,72 | PDP08 PDP07 | 13, | 13,04 |
| PDP13 PLV05 | 22, | 22,35 | PDP07 PDP19 | 9, | 9,13 |
| PLV05 PDP23 | 21, | 20,80 | PDP19 PDP21 | 6, | 5,76 |
| PDP23 PMIX7 | 11, | 11,36 | PDP21 PDP22 | 5, | 4,91 |
| PDP23 PMIX9 | 6, | 6,06 | PDP22 PLV06 | 2, | 1,54 |
| PMIX7 PDP26 | 7, | 6,74 | | | |

### *IV.12.2.2 Evolution de la chute de tension par les deux programmes CARAT et MATLAB*

***Tableau IV.9.*** *Evolution de la chute de tension pour la 2$^{éme}$ variante dans le programme CARAT et MATLAB*

| | *CARAT* | | *MATLAB* | | | *CARAT* | | *MATLAB* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| POSTE | V(v) | $\Delta V$ % | V(v) | $\Delta V$ % | POSTE | V(v) | $\Delta V$ % | V(v) | $\Delta V$ % |
| PH2C1 | | | 30000 | 0 | PDP20 | 28915 | 3,62 | 28915 | 3,61 |
| PH2C2 | | | 30000 | 0 | PMIX6 | 28910 | 3,63 | 28910 | 3,63 |
| PR3C1 | 28945 | 3,52 | 30000 | 3,51 | PMIX5 | 28908 | 3,64 | 28908 | 3,63 |
| PR3C2 | 28903 | 3,66 | 28945 | 3,65 | PLV07 | 28907 | 3,64 | 28907 | 3,64 |
| PR3B1 | 28945 | 3,52 | 28903 | 3,51 | PDP27 | 28868 | 3,77 | 28868 | 3,77 |
| PR3B2 | 28903 | 3,66 | 28945 | 3,65 | PDP26 | 28868 | 3,77 | 28868 | 3,77 |
| PR3C3 | 28945 | 3,52 | 28945 | 3,51 | PDP05 | 28893 | 3,69 | 28893 | 3,68 |
| PR3C4 | 28945 | 3,52 | 28903 | 3,51 | PDP06 | 28891 | 3,70 | 28887 | 3,69 |
| PR3C5 | 28903 | 3,66 | 28903 | 3,65 | PDP04 | 28886 | 3,71 | 28886 | 3,71 |
| PR3C6 | 28903 | 3,66 | 28945 | 3,65 | PDP11 | 28882 | 3,73 | 28882 | 3,72 |
| PMIX1 | 28929 | 3,57 | 28929 | 3,56 | PDP12 | 28879 | 3,74 | 28879 | 3,73 |
| PLV01 | 28929 | 3,57 | 28929 | 3,57 | PDP13 | 28878 | 3,74 | 28878 | 3,73 |
| PDP10 | 28925 | 3,58 | 28925 | 3,58 | PLV05 | 28873 | 3,76 | 28873 | 3,75 |
| PDP09 | 28923 | 3,59 | 28923 | 3,58 | PDP23 | 28871 | 3,76 | 28871 | 3,76 |
| PDP08 | 28922 | 3,59 | 28922 | 3,59 | PMIX7 | 28869 | 3,77 | 28869 | 3,76 |
| PDP07 | 28921 | 3,60 | 28921 | 3,59 | PMIX2 | 28892 | 3,69 | 28892 | 3,69 |
| PDP19 | 28920 | 3,60 | 28920 | 3,59 | PLV03 | 28890 | 3,70 | 28890 | 3,69 |
| PDP21 | 28919 | 3,60 | 28910 | 3,60 | PMIX3 | 28890 | 3,70 | 28890 | 3,70 |
| PDP22 | 28918 | 3,61 | 28918 | 3,60 | PDP15 | 28887 | 3,71 | 28887 | 3,70 |
| PLV06 | 28918 | 3,61 | 28918 | 3,60 | PDP14 | 28886 | 3,71 | 28886 | 3,71 |
| PMIX8 | 28906 | 3,65 | 28906 | 3,64 | PDP16 | 28884 | 3,72 | 28884 | 3,72 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PLV02 | 28930 | 3,57 | 28930 | 3,56 | PDP17 | 28883 | 3,72 | 28883 | 3,72 |
| PDP01 | 28928 | 3,57 | 28928 | 3,57 | PDP18 | 28882 | 3,73 | 28882 | 3,72 |
| PDP02 | 28925 | 3,58 | 28925 | 3,58 | PDP24 | 28881 | 3,73 | 28881 | 3,72 |
| PDP03 | 28926 | 3,59 | 28922 | 3,59 | PDP25 | 28861 | 3,73 | 28861 | 3,72 |
| PLV04 | 28924 | 3,60 | 28920 | 3,60 | PMIX9 | 28870 | 3,77 | 28870 | 3,76 |
| PMIX4 | 28922 | 3,61 | 28918 | 3,60 | | | | | |

Les pertes :

Avec MATLAB : ploss=210,3922

Avec CARAT : total losses= 210,

## IV.13 Conclusions

Après l'analyse des résultats de calculs des deux différents programmes, nous avons constaté que les mêmes résultats sont affichés dont des différentes ouvertures.

La méthode de calcul adopté (Algorithme Génétique), nous a permis de faire des calculs pour obtenir plusieurs propositions des ouvertures ont respectant les mêmes valeurs normalisés.

Dans le cadre de ce mémoire faisant l'objet de la reconfiguration optimale d'un réseau de distribution moyenne tension, deux méthodes d'optimisation ont été examinées dans le but de résoudre ce problème, de par la nature combinatoire de ce dernier et la taille généralement explosive de l'ensemble des solutions (ou configurations) possibles qui lui est associé, les deux méthodes sont basées sur des explorations implicites de cet ensemble afin d'identifier la solution recherchée.

Dans cette étude d'un réseau de distribution moyenne tension, nous avons utilisé deux programmes CARRAT du sonelgaz et MATLAB, la méthode d'algorithme génétique est appliquée à un système réaliste de distribution situé dans la ville de Medea (Algérie) pour la réduction de perte de puissance qui détermine les commutateurs optimaux. Ainsi pour le but de comparaison, notre méthode est comparée à la méthode classique de séparation et évaluation (branch and bound B&B). Les résultats sont encourageants et montrent l'efficacité de cet algorithme génétique.

Les algorithmes génétiques ont permis la création d'un outil d'optimisation stochastique efficace, rapide et robuste, les résultats obtenus sont très satisfaisantes.

Le GA est une méthode relativement puissante d'évolution d'intelligence pour résoudre des problèmes d'optimisation. C'est une approche basée par population qui a été inspirée du comportement normal de l'espèce.

POSTE CHAHBOUNIA (60/30kv) HT

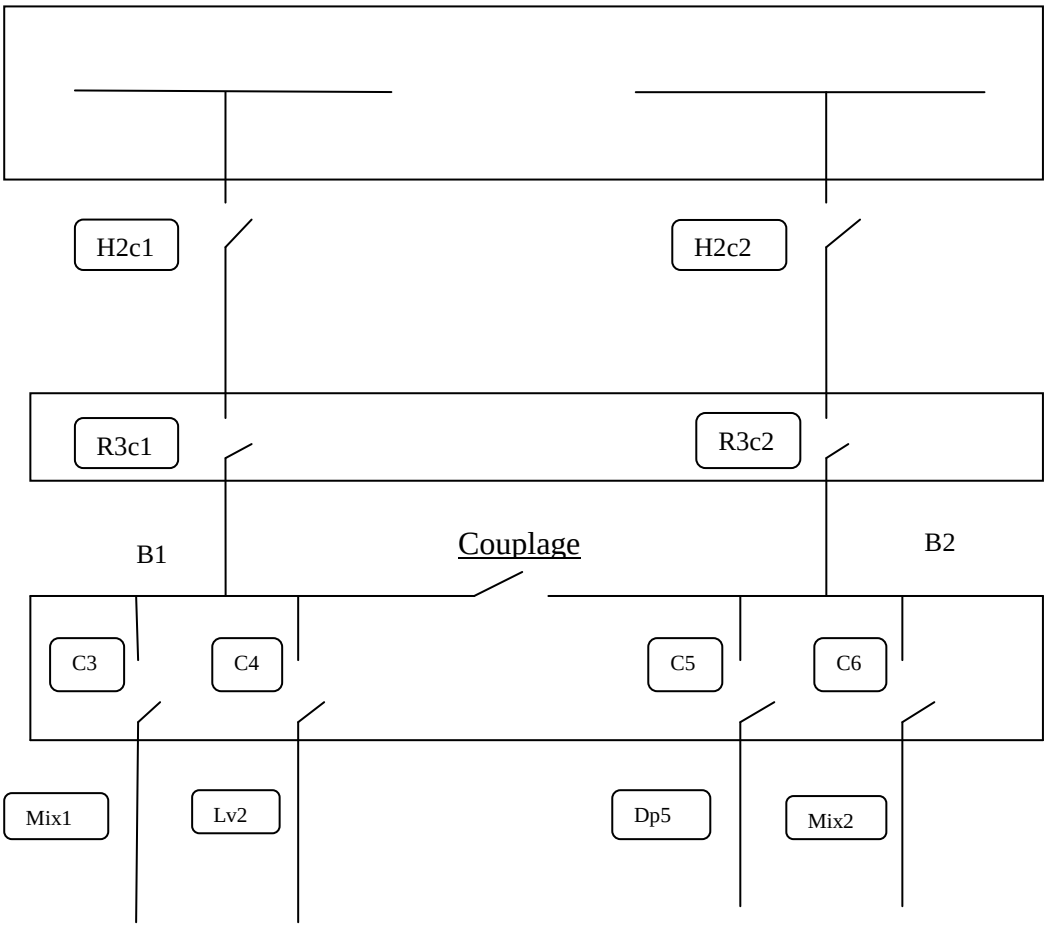



**Schéma 4-1: Schéma unifilaire de réseau d'alimentation du pôle de BOUGAZOULE**

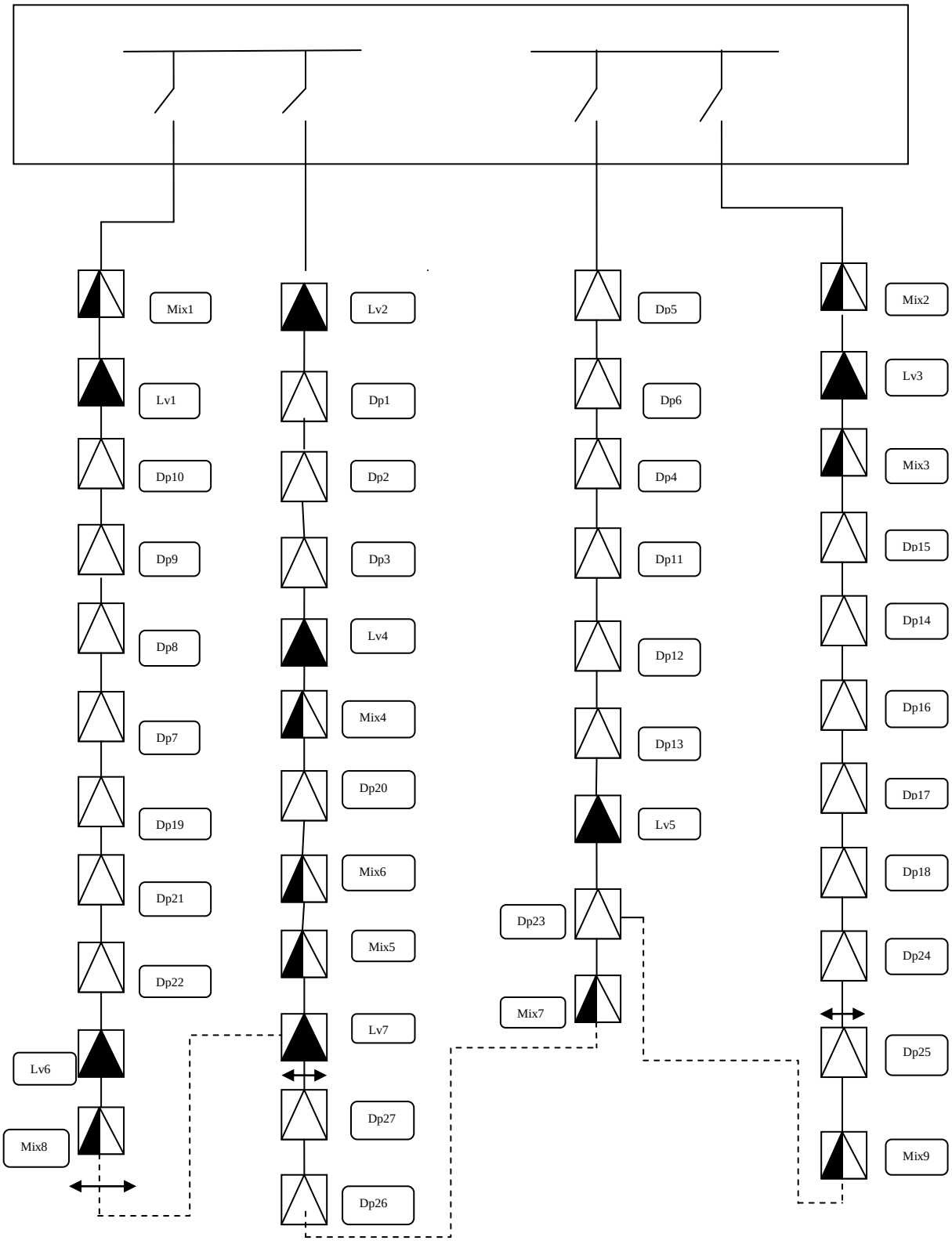



**Schéma 4-2 : Schéma synoptique de réseau d'alimentation du pôle de BOUGZOULE pour la 1er variante**

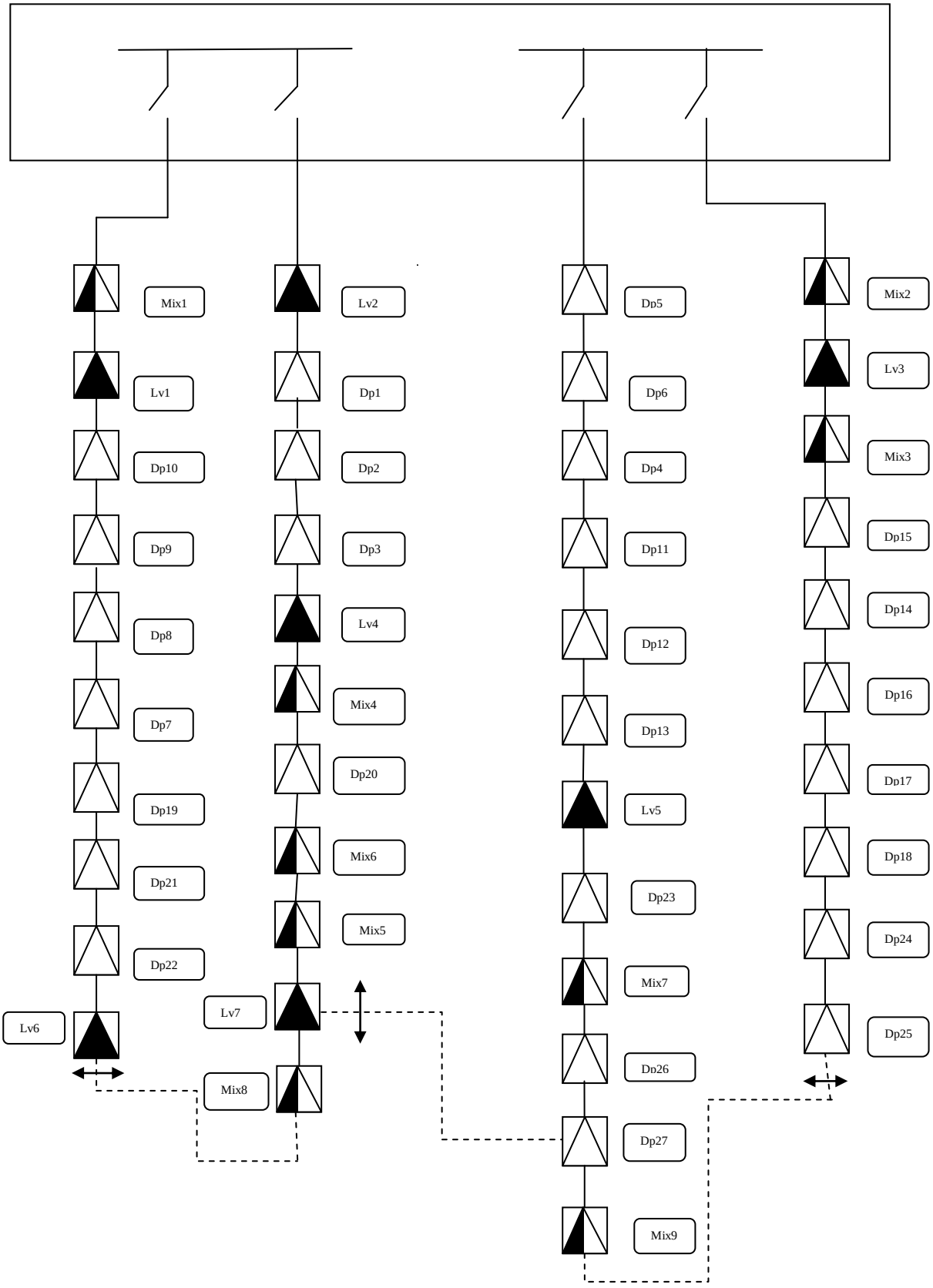



**Schéma 4-3 : Schéma synoptique de réseau d'alimentation du pôle de BOUGZOULE pour la 2éme variante**



Poste mixte



Poste distribution public



Poste livraison

## Bibliographie

[1] Edelman, H., "Théorie et calcul des réseaux de transport d'énergie électrique", Dunod, Paris, 1966.

[2] Stagg, G.W. & El-Abiad, A.H., "Computer methods in power system analysis", International Student Edition, McGraw-Hill, New-York, 1968.

[3] Aguet, M. & Morf, J.-J., "Energie électrique". Volume XII du traité d'électricité, Georgi, St-Saphorin, 1981.

[4] Gondran, M. &Minoux, M., "Graphes et algorithmes", Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Eyrolles, Paris, 1985.

[5] M. Bierlaire, Introduction à l'optimisation différentiable. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2006.

[6] Lakervi, E. & Holmes, E.J., "Electricity distribution network design", IEEE Power Engineering Series 9, London, 1989.

[7] Baran, M.E. & Wu, F.F,, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing", IEEE, Trans, on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, Apr, 1989, pp. 1401-1407.

[8] Cherkaoui, S.R. & Rossier, C. & Stalder, M., "Renforcement et reconfiguration optimaux d'un réseau électrique de distribution", Projet NEFF 405, rapport 405/1, EPFL, Lausanne, Déc, 1989.

[9] Luenberger, D.G., "Introduction to linear and nonlinear programming", Addison-Wesley, 1973.

[10] Chiang, H.D. & Baran, M.E., "On the Existence and Uniqueness of Load Flow Solution for Radial Distribution Power Networks", IEEE, Trans, on Circuits and Systems, Vol. CAS-37, 1990.

[11] Jean-François CANARD. Thèse de doctorat « Impact de la Génération d'Energie Dispersée dans les Réseaux de Distribution » le 12 décembre 2000.

[12] Souquet Amédée and Radet Francois-Gérard ALGORITHMES GENETIQUESTE de fin d'année doctorat de Mr Philippe Audebaud Soutenu le 21/06/2004 devant la commission composée de : S. Julia P. Audebaud G. Dufay.

[13] Holland J., Adaptation in natural and artificial systems, University of Michigan Press, 1975.

[14] GoldbergD.E, Genetic Algorithmsin Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.

[15] C. Eyquem et A. Montaut, Les Algorithmes Génétiques, 21 juin 2001.

[16] Michalewicz Z., Deb K., Schmidt M. et Stidsen TH. (1999). Evolutionary algorithms for engineering applications". pp. 73-94. Dans "Evolutionary algorithms in engineering and computer science: recent advances in genetic algorithms, evolution strategies, evolutionary programming, genetic programming and industrial applications". Edité par: Makela M., Miettinen K., Neittaanmaki P. et Periaux J., Chichester; New York: Wiley, 500 p.

[17] Tomassini M. (1999). "Parallel and distributed evolutionaryalgorithms: Review". pp.113-133. Dans : "Evolutionary algorithms in engineering And computer science: recent advances in genetic algorithms, evolution strategies, evolutionary programming, geneticprogramming and industrial applications". Édité par : Makela M., Miettinen K., Neittaanmaki P. et Periaux J., Chichester; New York: Wiley, 500 p.

[18] Coello Coello, Carlos A.,Van Veldhuizen D.A. et Lamont G.B. 2002. Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems. Kluwer Academic Publishers, New York 576 p.

[19] Goldberg D.E., (1994) (1989).. Algorithmes génétiques : exploration, optimisation et apprentissage automatique. Traduction de l'anglai américain) par Vincent Corruble. Éditions Addison-Wesley France, 417 p. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison Wesley Longman, 412 p.

[20] Deb K. (2000), (1999).. Introduction to selection.:"Evolutionary computation1 :advanced algorithms and operators". Édité par: Bäck T., Fogel D.B., et Michalewicz Z.; Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 331 p."Evolutionary Algorithms for Multi-Criterion Optimization in Engineering design", pp. 135-161. Dans : "Evolutionary algorithms in engineering and computer science: recent advances in genetic algorithms, evolution strategies, evolutionary programming, genetic programming and industrial applications". Édité par: Makela M., Miettinen K., Neittaanmaki P.et Periaux J., Chichester; New York: Wiley, 500 p.

[21] Goldberg D.E., (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison Wesley Longman, 412 p.

[22] Langdon W.B. (1998). " Genetic programming and data structures:genetic programming + data structures = automatic programming !". Boston: Kluwer Academic Publishers, 278 p.

[23] Ryan C. (2000), (1995). Automatic Re-Engineering of Software using Genetic Programming. Kluwer Academic Publishers, 140 p. "Niche and species formation in genetic algorithms". Dans: Practical handbook of genetic algorithms: applications, volume 1. Édité par: Lance Chambers, pp. 57-74.

[24] Hillier, F.S. & Lieberman, G.J., "Operations Research", Holden-Day, New-York, 1974.

# INTRODUCTION GENERALE

# CHAPITRE I :

## MODELE ET CALCULE D'UN RESEAU DE DISTRUBUTION

# CHAPTRE II :

# FORMULATION MATHEMATIQUE DES PROBLEMES D'OPTIMISATION

# CHPITRE III :

## METHODES D'OPTIMISATION DE TOPOLOGIE

# CHAPITRE IV :

## ETUDE COMPARATIVE ENTRE PROGRAMME MATLAB ET CARAT

# CONCLUTION GENERALE