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



Projet de Fin d'Etudes

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en Génie Électrique

Spécialité : Réseaux électriques

THEME

METHODES ANALYSE POUR LA RECHERCHE DE CONFIGURATIONS OPTIMALES D'UN RESEAU ELECTRIQUE DE DISTRIBUTION

Proposé et dirigé par,

Dr./M. SEBAA Karim

Préparé et présenté par,

Mr. BENAISSA YAHIYA Omar

Mr. CHABBI Abdelkrim

Année Universitaire 2013-2014

Remerciements

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Tout d'abord je tiens à remercier promoteur Monsieur K .SEBAA pour l'encadrement qu'il m'a assuré et ses précieux et judicieux conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de ce projet, sa confiance témoignée, sans oublier sa qualité humaine. Il trouve ici ma gratitude et ma reconnaissance profonde.

Mes remerciements vont également à tous mes enseignants de l'université.

J'exprime toute ma gratitude à mes grands parents, mon père, ma mère, mes frères et ma sœur qui m'ont apporté soutien et encouragements tout au long de mes études. Je leurs réserve une pensée toute particulière.

Enfin, merci à mes amis qui ont partagé au quotidien mes espoirs et mes inquiétudes, qui m'ont réconforté dans les moments difficiles et avec qui j'ai partagé d'inoubliables instants de détente.

Dédicaces

Je dédié ce modeste travail à :

Mes très chers parent qu'Allah les garde.

Mes frères, ma soeur et ma nièce Doha.

Toute ma famille.

Tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de prés durant mes études.

Tous mes amis et tous mes collègues de la promotion 2014

Tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à ma formation depuis mon premier cycle d'étude jusqu'à maintenant.....

Surtout mon encadreur Mr. SEBAA Karim

CHABBI .Abdelkrim

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très mon père, mère, pour leurs soutient moral et financier et d'être la lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé pour terminer mes études, en leur espérant une longue vie et que dieu les gardes.

Mes soeurs. Mes Frères

Toute la famille "BEN AISSA YAHIA".

Tous mes amis.

Mes très chers amis : Omran, Halim, Ayoubb, Ibrahim, Walid, Hafid, Sadek.....

Surtout mon encadreur Mr. SEBAA Karim

BEN AISSA YAHIA Omar

TABLE DES MATIERES

Liste des figures…….....I

Liste des tableaux…….....II

Liste des symboles…….III

Introduction Générale ……. 01

Chapitre I - Modèle et calcul d'un réseau de distribution

I. 1ntroduction……..……04

I.2 Modèle graphique du réseau…….……..04

I2.1 Structure du réseau…….....04

I2.2 Topologie du réseau…….…….....05

I2.3 Orientation du schéma d'exploitation……..….....05

I.3 Modèle électrique des branches…….07

I3.1 Modèle d'une ligne ou d'un câble…….07

I3.2 Modèle d'un autotransformateur…….. ...09

I.3.3 Influence de l'orientation des branches sur les modèles…….10

I.4 Modèles des charges aux nœuds……..12

I.5 Modèle des réseaux multi-sources……15

I.6 Méthode de calcul d'un réseau de distribution……17

I.6.1Calcul global……17

I.6.2Calcul local suite à une modification du schéma d'exploitation…….20

II.7 Conclusion …….....22

Chapitre II - Formulation mathématique des problèmes d'optimisation

II.1 Introduction…….....23

II.2 Formulation mathématique générale……...23

II.3 Contraintes d'égalités……24

II.3.1 Equations de Kirchhoff…….....24

II.3.2 Arborescence du schéma d'exploitation…….24

II.4 Contraintes d'inégalités…….....25

II.4.1 Sécurité d'exploitation…….. 25

II.4.2 Contraintes sur les manœuvres……....27

II.5 Critères d'optimisation appliqués à l'exploitation……..28

II.6 Application à l'exploitation d'un réseau de distribution…….....31

II.7CONCLUSION……...33

Chapitre III- Méthodes d'optimisation de topologie

III.1 Introduction…….34

III.2 Analyse des problèmes et introduction aux méthodes de résolution…….....34

III.3 Les méthodes heuristiques……..……..37

III.3.1 Principe des méthodes heuristiques…….…….37

III.3.2 Stratégie "constructive"……..…… 40

III.3.2.1 Principe de base……..……...40

III.3.2.2 Description de la stratégie…….…… 41

III.3.2.3 Critiques des hypothèses implicitement admises……43

III.3.2.4 Améliorations de la stratégie "constructive"…….44

III.3.2.5 Commentaires……47

III.3.3 Stratégie "destructive"……...49

III.3.3.1 Principe de base……..49

III.3.3.2 Description de la stratégie……..50

III.3.3.3 Application de la stratégie "destructive" au cas particulier

de la minimisation des pertes ohmiques…… 52

III.3.3.4 Réduction des voisinages……. 55

III.3.3.5 Commentaires……...55

III.3.4 Introduction à la stratégie de type "permutation de branches"…….55

III.4 Les méthodes par séparation et évaluation…….. ……..57

III.4.1 Principes de base…….57

III.4.2 Application au cas de l'optimisation de la topologie d'un réseau de Distribution…..……..……..61

III.5 Conclusion …….……64

Chapitre IV - Etude comparative entre programme MATLAB® et CARAT

IV.1 Introduction……..65

IV.2. Schéma squelettique du réseau BT issu du poste 297 65

IV.3. Etude de l'état actuel …….....….65

IV.3.1 Evolution de la charge et la chute de tension……...65

IV.3.1.1 Evolution de la charge……..65

IV.3.1.2.1 Evolution de la chute de tension par programme MATLAB®……....66

IV.3.1.2.2 Evolution de la chute de tension par programme CARAT…… ….67

IV.4. Analyse ……..67

IV.5. Etude et analyse des différentes variantes ……..67

IV.5.1. Schéma squelettique du réseau BT issu du poste 297 ……..…67

IV.5. 2. Créations de poste maçonné 250 KVA…….....67

IV.5.2.1.Créations d'injecteur …….....68

IV.5.2.2.Travaux de renforcement ……..…...68

IV.5.2.3. Création d'ouvertures…… ……..……..68

IV.5.3. Evolution de la charge……..…68

IV.5.3.1 Evolution de la chute de tension par programme MATLAB® …….69

IV.5.3.2 Evolution de la chute de tension par programme CARAT…….....69

IV.6. Synthèse d'investissement …….70

IV.7. Schéma squelettique du réseau BT issu du poste 297 …….....70

IV.7.1 Evolution de la charge …….70

IV.7.2.1Evolution de la chute de tension par programme MATLAB ® ……..71
IV.7.2.2. Evolution de la chute de tension par programme CARAT ……...71
IV.8Analyse …….....72
IV.9 Synthèse d'investissement……...…….72
IV.8 Conclusion……..73
Conclusion Générale ……...…….74

LISTE DES TABLEUAX

Chapitre II :

Tab II.1 - Critères et contraintes selon le régime d'exploitation d'un réseau……32

Chapitre IV :

Tab IV.1- Evolution de la charge par deux programmes MATLAB® et CARAT…..66

Tab IV.2- Evolution de la chute de tension par programme MATLAB®……66

Tab IV.3- Evolution de la chute de tension par programme CARAT……..67

Tab IV.4- Evolution de la charge par deux programmes MATLAB® et CARAT…..68

Tab IV.5- Evolution de la chute de tension par programme MATLAB®……..69

Tab IV.6 -Evolution de la chute de tension par programme CARAT……..69

Tab IV.7- représenté Synthèse d'investissement……..70

Tab IV.8- Evolution de la charge par deux programmes MATLAB® et CARAT…..70

Tab IV.9- Evolution de la chute de tension par programme MATLAB®……..71

Tab IV.10- Evolution de la chute de tension par programme CARAT……71

Tab IV.11- représenté Synthèse d'investissement……..72

LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

Fig. I.1 - Structure d'un réseau de distribution donné……05

Fig. I.2 - Topologie d'un réseau de distribution donné……..06

Fig. 1.3 - Modèle équivalent d'une ligne ou d'un câble……..08

Fig. 1.4 - Diagramme complexe exact du courant et des tensions…….08

Fig. 1.5 - Diagramme complexe simplifié du courant et des tensions……...09

Fig. 1.6 - Modèle d'un autotransformateur……09

Fig. I.7 -Inversion de l'orientation d'un autotransformateur…….11

Fig. I.8- Modèle de la charge au nœud x_i…….13

Fig. I.10 - Modèle électrique du nœud source…….15

Fïg. I.11 - Modèle d'un réseau de distribution multi-sources (exemple) ……17

Fig. I.12 -Parcours récursif du graphe T(X, L)……20

Fig. 1.13 - Modification locale du schéma d'exploitation T(X, L)……21

Chapitre III :

Fig. III.1- Principe de résolution des problèmes d'optimisation de topologie…….35

Fig. III.2 -Stratégie "constructive"……40

Fig. III.3 - Arborescence de courants maximaux associée à s…….45

Fig. III.4 - Configuration maillée associée à s……..47

Fig.III.5 - Stratégie "destructive"…….50.

Fig. III.6 - Stratégie de type " permutation de branches"…….57

Fig. III.7 - Arbre de décision binaire pour M variables (exemple)…….. 58

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
Iij	courant complexe transitant dans la branche
α_{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
μ_{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

η_{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

الملخص

الهدف من هذه الدراسة هو إعادة التشكيل الأمثل للشبكة التوزيع .ولأجل ذلك قمنا بفحص العديد من طرق التحسين .

وكذا التعرف على أساليب استعمالها . ثم اهتممنا بحساب انخفاض الجهد و الحمولة و تحسينهما باستعمال هذه البرامج(MATLAB, CARAT) .

Résumé

Le but de ce projet est de la restriction optimale des réseaux des distributions. Pour ce la nous avons analysé plusieurs méthode d'amélioration et leur manier de utilisation par la suite.

Nous avons calculé la chute de tension et la charge et leur amélioration on utilisant des programmes MATLAB et CARAT.

Abstract

The subject of this study is optimal restriction of the networks of the distributions.For this we analyzed several method of improvement and to handle use thereafter to them.

We calculated the voltage drop and the load and their improvement have using programs MATLAB and CARAT.

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 (env. 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 [1]. 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'événements auquels 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 ces structures pures et on observe plutôt des réseaux se présentant selon des structures hybrides. 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.

L'arborescence du schéma d'exploitation d'un réseau de distribution se justifie principalement de par les appareils de protection contre les surintensités de courant dans les lignes et les câbles qui, contrairement à ceux qui équipent les réseaux de transport et de répartition (relais de distances) en raison de leur action sélective, sont basés sur des principes de fonctionnement simples (relais à maximum de courant) et sont moins coûteux. Par ailleurs, cette arborescence permet de mieux maîtriser les flux d'énergie appelés par les consommateurs et, compte tenue des appareils de protection précités, de restreindre malgré tout les conséquences dues aux éventuelles discontinuités de la desserte de charge à des zones locales.

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 cette thèse 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 .

Dans le cadre de ce travail, on privilégiera les techniques algorithmiques de façon à les établir en s'inspirant de méthodes générales d'optimisation combinatoire 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. En se basant sur l'étude d'un ensemble de publications, trois approches de résolution différentes susceptibles d'appréhender ce problème seront mises en évidence au chapitre III. Il s'agira des approches heuristiques ''constructive" [2, 3, 4], "destructive" [5, 6] et de type "permutation de branches'' [7, 8, 9] qui permettront l'exploration implicite de l'ensemble des solutions possibles de trois manières différentes.

Au chapitre IV, une étude comparative entre un programme que nous avons développé dans le cadre de ce projet de fin d'étude et le programme CARAT du sonelgaz se ra pressentie, où l'exemple du poste MT/BT 297 alimentant le quartier RMALI se ra étudié.

I.1 Introduction

Le but de ce chapitre est d'énoncer une méthode de calcul des courants et des tensions dans un réseau électrique de distribution en régime triphasé symétrique. Alors que pour les réseaux de transport et de répartition on utilise des techniques de calcul matricielles [10, 11], la méthode proposée, pour les réseaux de distribution, se base sur une approche graphique qui exploite la nature arborescente de leurs schémas d'exploitation. Avant de discuter de cette méthode, il est nécessaire d'indiquer comment on représente le réseau du point de vue structure et topologie, et comment on modélise chacun de ses composants. La représentation topologique du réseau sera un élément essentiel pour l'application des techniques d'optimisation qui seront examinées plus tard.

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 sommets

Ou nœuds, N étant le nombre total de nœuds.

- d'un ensemble fini B= (b_1, b_2, b_3,……, b_M) d'éléments appelés liaisons

Ou 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:

$X \times X = \{(x_i, xj) / x_i \in X \text{ et } xj \in X\}$

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.

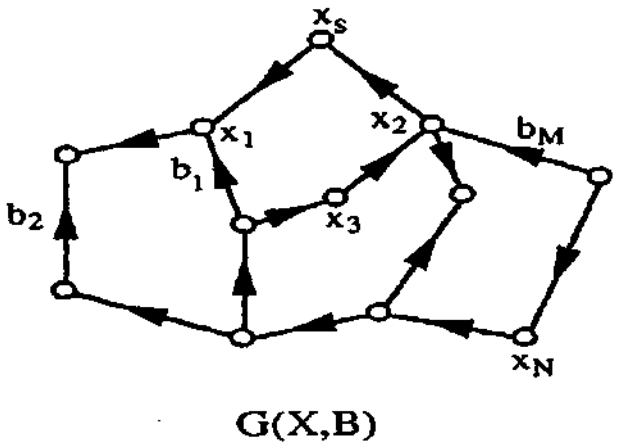


Fig. I.1 - *Structure d'un réseau de distribution donné*

I.2.2Topologie 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 1.2).

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 = $\{x_s\}$ et PRED = $\{\}=\Phi$

- Tant que SUCC$\neq \Phi$ 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 Xj désignera son extrémité terminale. Par rapport au schéma d'exploitation, Xi 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 (figure 1.2) 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.

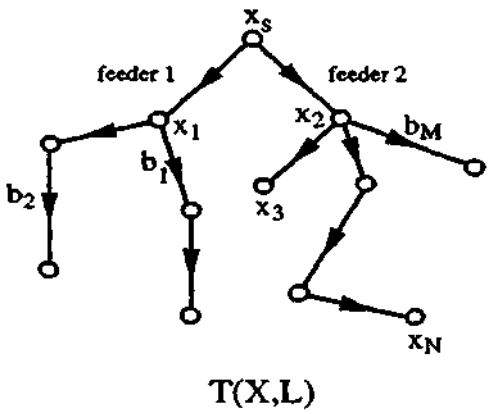


Fig. I.2 - *Topologie d'un réseau de distribution donné*

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 ou 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).

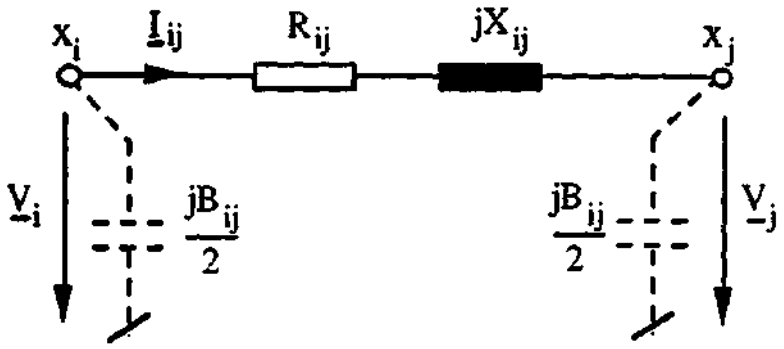


Fig. 1.3 - *Modèle équivalent d'une ligne ou d'un câble*

$\underline{V}_i$ tension complexe au nœud x_i

$\underline{V}_j$ tension complexe au nœud 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

Connaissant la tension $\underline{V}_i$ au nœud x_i ainsi que le courant $\underline{I}_{ij}$, on détermine la tension $\underline{V}_j$ au nœud x_j par la relation exacte:

$$\underline{V}_j=\underline{V}_i-(Rij +j\ Xij\ )Iij \qquad (I.1)$$

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

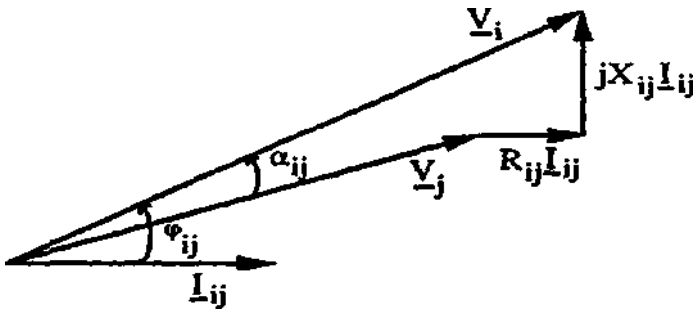


Fig. 1.4 - *Diagramme complexe exact du courant et des tensions*

α_{ij} déphasage entre la tension $\underline{V}_i$ et la tension $\underline{V}_j$

φij déphasage entre la tension $\underline{V}_i$ et le courant $\underline{I}_{ij}$

Pour les réseaux de distribution, les branches sont généralement assez courtes de sorte que le déphasage entre la tension aux extrémités sont souvent négligeables ($\alpha_{ij} \approx 0$). Dans ce cas là, l'argument de la tension de Vj est pratiquement identique à celui de la tension V_i

quant à son module, il s'exprime, selon le diagramme complexe de la figure I.5, comme suit:

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

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

Fois que Vj Cos $\alpha_{ij} \approx$ Vj ou que tg $\alpha_{ij} \approx \frac{x_{ij}}{R_{ij}}$ (cas particulier)

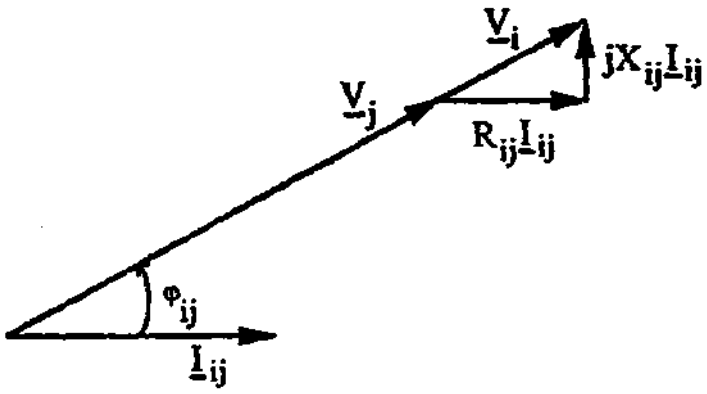


Fig. 1.5 - *Diagramme complexe simplifié du courant et des tensions*

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 1.6).

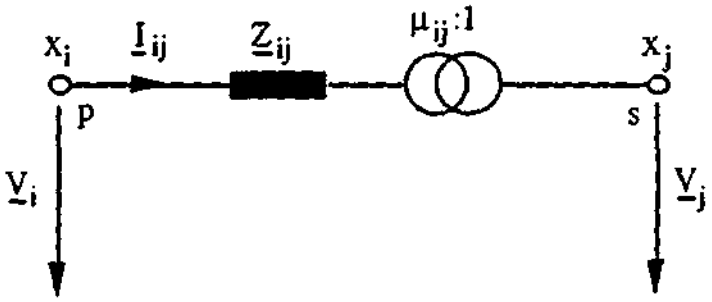


Fig. 1.6 - *Modèle d'un autotransformateur*

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 Xj

$\underline{Z}_{ij}$ impédance de court-circuit ramenée au primaire, $\underline{Z}ij= R_{ij} +j\ x_{ij}$

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

μ_{ij} rapport de transformation défini par $\mu=\frac{V_P}{V_S}$, où vp et Vs désignent les tensions nominal es 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 Ijj, s'exprime par:

$$\underline{V}_j =\frac{1}{\mu_{ij}}(\underline{v}_i -\underline{z}_{ij}\ \underline{I}_{ij}) \qquad (I.3)$$

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 Rjj est pratiquement négligeable par rapport à la réactance de court-circuit Xjj.

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

Le sens des flèches associées aux courants lij des modèles représentés aux figures I.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 Xj 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 :

$$\underline{V}_i =\mu_{ij}\ \underline{v}_j +\underline{Z}_{ij}\ \underline{I}_{ij} \qquad (I.4)$$

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 suivante :

$$\underline{V}_i = \mu_{ij} \left(\underline{v}_j + \mu_{ij}^2 \underline{z}_{ij} \frac{I_{ij}}{\mu_{ij}}\right)$$

en posant:

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

on obtient:

$$\underline{v}_i = \frac{1}{\mu_{ij}} \left(\underline{v}_j - \underline{z}_{ij} \underline{I}_{ij}\right)$$

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).

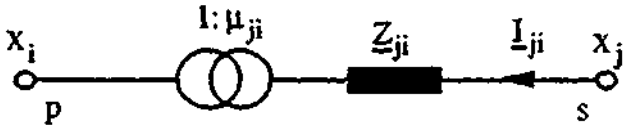


Fig. I.7 -*Inversion de l'orientation d'un autotransformateur*

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

μ_{ij} rapport de transformation égal à $\frac{V_S}{V_P}$

$\underline{I}_{ij}$ 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 de Courant)
- 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 [12]. 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 v_i en celui-ci:

$$\underline{S}_i = P_i(V_i) + jQ_i(V_i) \qquad (I.5)$$

$\underline{S}_i$ 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 :

$P_i(v_i)=p_i(v_{in})+p_i'(v_{in})(v_i-v_{in})+1/2\ p_i''(v_{in})(v_i-v_{in})^2+\ldots$

$Q_i(v_i)=Q_i(v_{in})+Q_i'(v_{in})(v_i-v_{in})+1/2\ Q_i''(v_{in})(v_i-v_{in})^2+\ldots$

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 :

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

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

Une analyse dimensionnelle montre que :

a_{1i} et a_{2i} 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)

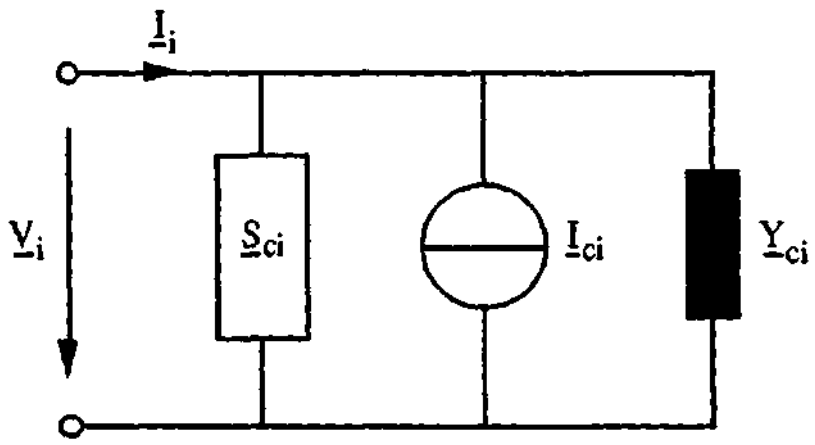


Fig. I.8- *Modèle de la charge au nœud* x_i

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 complexe de la charge

Q_{ci} puissance réactive constante

***Courants constants*:**

$$\underline{I}_{ci}=I_{pci}+jI_{q\,ci}=b_{1i}-jb_{2i} \qquad (I.9)$$

$\underline{\mathbf{I}}_{\mathbf{ci}}$ courant complexe de la charge

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

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

- admittances constantes:

$$\underline{Y}_{ci} = Gci + j\ B_{ci} = C_{1i} - j\ C_{2i} \qquad (I.10)$$

Y_{ci} admittance de la charge

G_{ci} conductance

B_{ci} susceptance

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

$$\underline{I}_i=\frac{(p_{ci}+iQ_{ci})^*}{V_i^*} + (I_{p\,ci} +j\ I_{q\,ci}) + (G_{ci} +j\ B_{ci})\ \underline{v}_i$$

(I.11)

* 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 $\underline{V}_i$

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

$$I_i = (Ir_{P\,ci} + jIr_{qci}) \qquad (I.12)$$

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 V_i, soit:

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

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 Xs.

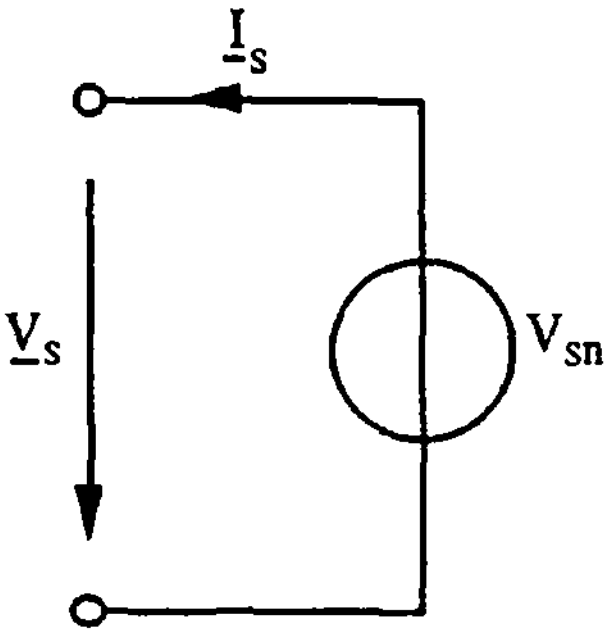


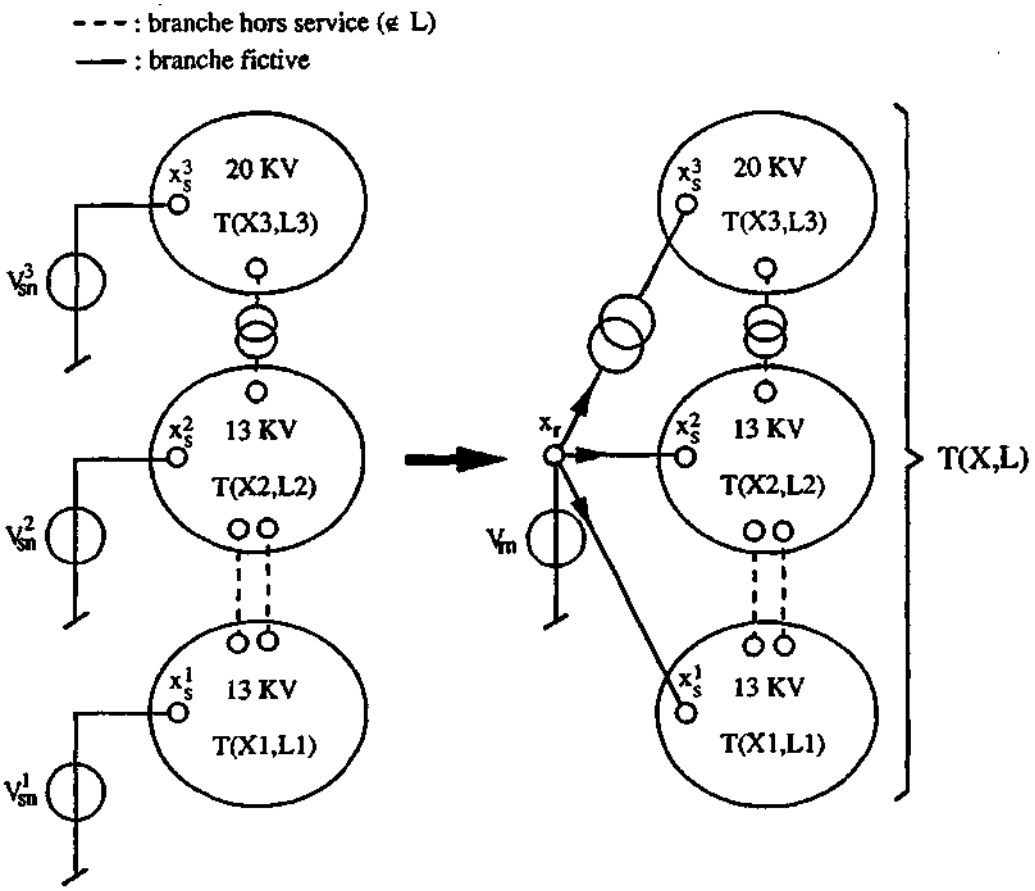
Fig. I.10 - *Modèle électrique du nœud source*

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.



Fïg. 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 (§ I.2.4).
2. Initialisation des tensions aux nœuds:

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

   $\underline{V}i^{(0)}$ tension complexe initiale au nœud Xi

   Vin tension nominale au nœud Xi

   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):

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

où les éventuelles demi-susceptances des câbles (§ I.3.1) connectés au nœud X_i sont supposées soit négligées soit comprises dans Bci.

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

$$\underline{I}_{ji}^{(k)} = \frac{1}{\mu_{ji}} (Ii^{(k)} + \sum_1 I_{i1}^{(k)}) \qquad \text{avec } 1 \neq i$$

La somme porte sur l'ensemble des indices des nœuds successeurs de x_i et μ_{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 Xj (§ 1.2.3), les opérations suivantes:

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

$$\underline{V}_i^{(k)} = \frac{1}{\mu_{ji}}\left(\underline{V}_j^{(k)} - Z_{ij}\ \underline{I}_{ji}^{(k)}\right)$$

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

$$\Delta V_i = \frac{\left|R_e \quad (V_i^{(k)} - V_j^{(k-1)}\right|}{V_{in}} + j\frac{\left|I_m\,(V_j^{(k)} - V_j^{(k-1)}\right|}{V_{in}}$$

c) calcul de l'écart maximum de tension, noté ΔV_m , défini comme:

$\Delta V_m = \text{Max}(\ \Delta V_m\ ,\ \Delta V_i\ )$

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.11 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 ou 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.

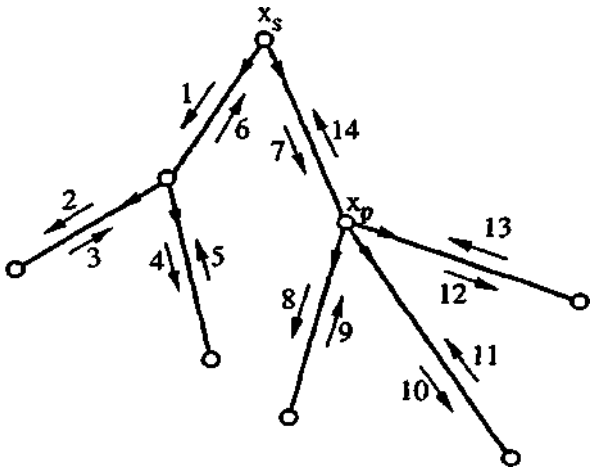
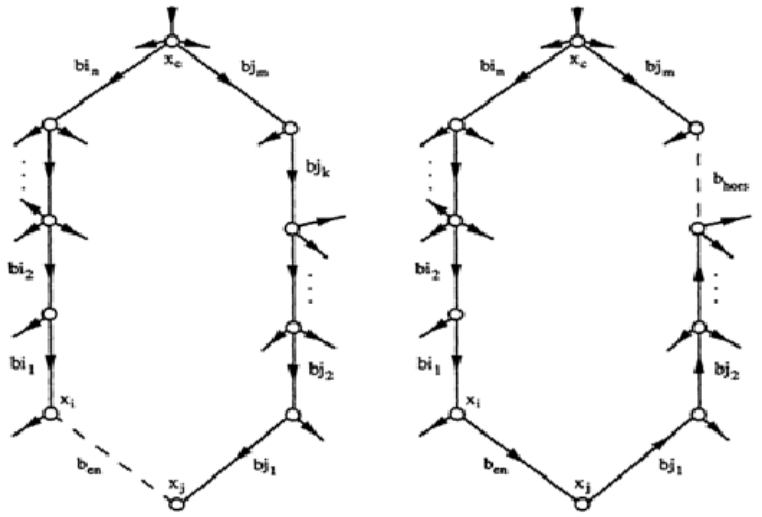


Fig. I.12 -*Parcours récursif du graphe T(X, L)*

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 ($x_{s,\ xp}$) 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

Fig 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.

Si l'on choisit de déterminer le chemin $L_i \cup Lj$ par la méthode utilisant les degrés de profondeur des nœuds (§ I.2.4), 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 Xj ainsi que ceux des nœuds appartenant aux arborescences connectées à Xj. 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 [13]. 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.

II.1 Introduction

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. Aussi, dans ce chapitre, on se propose d'une part, d'exprimer mathématiquement ces problèmes et d'autre part, de discuter des différents critères et contraintes possibles ainsi que leur adéquation vis-à-vis des divers régimes de fonctionnement du réseau.

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) ≤ 0	contraintes sur les manœuvres

II.3 contraintes d'égalités

II.3.1Equations 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:

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

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 (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.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:

$\forall X_i \; Xj \in X \qquad \ni L_i \cup Lj \;, \qquad$ soit $\prod_k ui_k \;.\; \prod_k uj_k \;=\; 1 \qquad$ (II.3)

Où $Li \cup Lj$ est un chemin reliant les nœuds X_i et Xj (§ I.2.4) et où les ui et uj désignent respectivement les états topologiques (0 ou 1) des branches de L_i et de Lj 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:

$$I_K \leq U_{K-} \; I_{k\,max} \qquad (II\text{-}4)$$

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 [14].

Pour 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 :

$V_i \leq V_{in.}(1 + \varepsilon_{i\,max})$ et $V_{in} \geq (1 - \varepsilon_i max)$

. 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

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.

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

. Uk° état topologique initial de la branche b_k

- η_{max} le nombre maximal de manœuvres autorisées.

- || 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 à l'exploitation

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:

$$\sum_K = R_K . I_K^2 \qquad \text{(II.7)}$$

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.

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 [8]:

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

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

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:

Où

$$\text{Max } \{ \frac{I_K}{I_{K\,max}} \text{ , k=l...M} \} \qquad \text{(II.9)}$$

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.

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 :

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

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

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:

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

. Max valeur maximale parmi un ensemble de valeurs

. N nombre total de nœuds du réseau

. V_{in} tension nominale au nœud x_i

. V 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.

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:

$$\sum_K C_K . \left| U_k - U_k^0 \right| \qquad (II.12)$$

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^0 État topologique initial de la branche b_k

. C_k Coût associée à la manœuvre de la branche b_k

. ‖ 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 égale 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 objectif 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.
- Ci 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 [15].

Tab 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.

En conclusion, on dira qu'il ne serait pas redondant d'utiliser une combinaison de critères du type précité pour la formulation d'un problème d'optimisation donné.

III.1 Introduction

On se propose dans ce chapitre de discuter de différentes techniques de résolution pouvant être appliquées aux problèmes d'optimisation formulés au chapitre II. Dans un premier temps, au paragraphe III.2, on effectuera une analyse globale de ces problèmes puis on énoncera une approche générale pour les résoudre. Par la suite, les paragraphes III.3 et III.4 feront l'objet d'un examen approfondi de deux catégories de méthodes de résolution sur la base de la littérature traitant de notre sujet ainsi que de quelques suggestions.

IV.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) [16].

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 [17] 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.

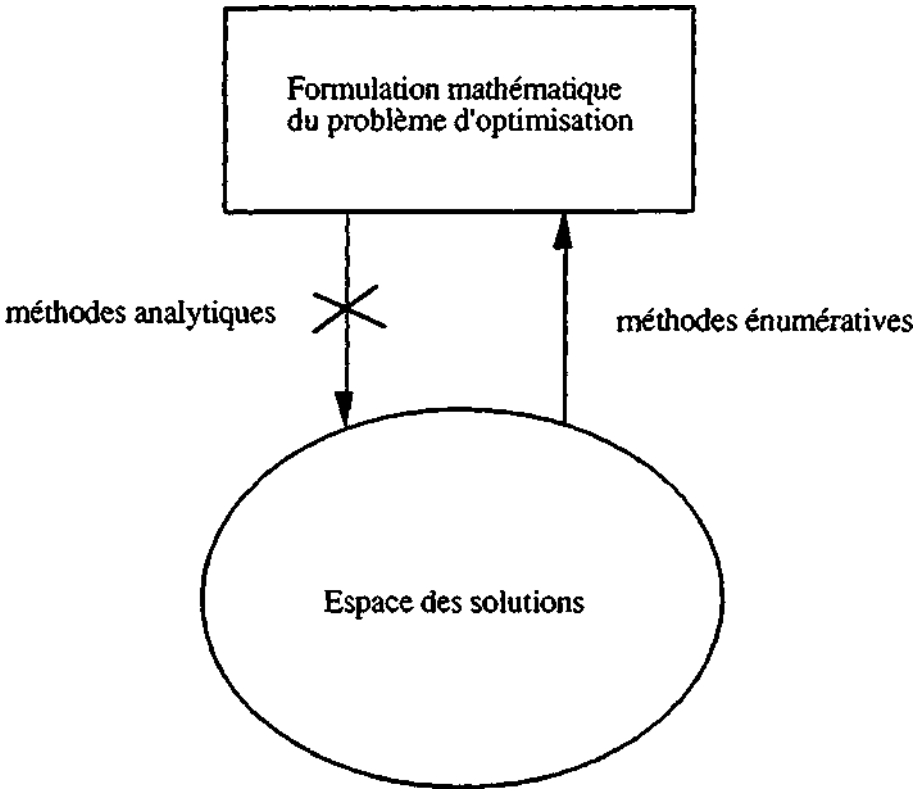


Fig. III.1. *Principe de résolution des problèmes d'optimisation de topologie*

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

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

Les méthodes heuristiques [18] consistent à balayer l'espace des solutions de façon "intelligente" de sorte à éviter, selon des règles proches du raisonnement humain, le passage par des solutions inutiles. Ces méthodes ont l'avantage d'être performantes mais ne peuvent, en général, assurer que l'obtention de ce que l'on appelle de "bonnes" solutions. Cela résulte, tout simplement, du fait que l'on ne peut démontrer l'optimalité au sens global des solutions qu'elles proposent et on admettra, alors, que ces solutions représentent des optima locaux par rapport à un ensemble de solutions dites voisines.

Les méthodes par séparation et évaluation [13] 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.

Dans le cadre de ce chapitre, on discutera plus amplement de ces deux catégories de méthodes, qui d'ailleurs pourraient se compléter, tout en proposant quelques algorithmes et, si possible.

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 sécurit (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 Les méthodes heuristiques

III.3.1 Principe des méthodes heuristiques

Une méthode heuristique est un procédé permettant de résoudre un problème particulier tout en réduisant l'effort de résolution. Elle ne garantit pas une solution dans tous les cas possibles et la solution obtenue ne sera pas nécessairement optimale. Au premier abord, ces méthodes peuvent dérouter l'ingénieur et surtout le mathématicien qui, généralement, est avide de rigueur. Pourtant, le raisonnement humain repose beaucoup plus sur des méthodes heuristiques que sur des méthodes que l'on qualifiera de systématiques. En effet, pour résoudre un problème, l'être humain dispose d'un certain nombre de "recettes" acquises à partir de son expérience dans le domaine relatif à ce problème et de la connaissance de celui-ci (formulation, données, etc...). Il en retient certaines et effectue des tentatives à partir de ces dernières. A titre d'exemple, un ingénieur électricien désireux de calculer les courants dans un circuit triphasé dont la charge est supposée symétrique et couplée en étoile, va successivement faire les tentatives suivantes :

- S'il constate que la source est symétrique, il effectuera uniquement le calcul du courant pour une seule phase puis en déduira automatiquement ceux des deux autres.

- S'il constate que la source est dissymétrique et que le point médian de la charge est relié à la terre, il effectuera successivement et indépendamment le calcul pour chacune des trois phases.

- Enfin, s'il constaté même situation que la précédente mais sans que le point médian de la charge ne soit relié à la terre, il décomposera les tensions de la source en trois systèmes respectivement direct, inverse et homopolaire [19] puis résoudra son problème selon sa première tentative tout en sachant que les composantes homopolaires des courants à déterminer sont toutes nulles.

En tout cas, pour un tel circuit, il ne procédera sûrement pas (du moins on l'espère) à une démarche systématique consistant, dès le départ, à mettre en équation ce circuit en vue d'une résolution matricielle.

Dans le cas des problèmes que l'on se propose de résoudre, on peut alors envisager des stratégies de recherche heuristique s'appuyant sur un principe très simple qui s'énonce comme suit:

Partant d'une configuration initiale, parcourir l'espace des configurations possibles en

Tentant d'améliorer la configuration en cours d'examen en la substituant par une

Configuration voisine.

Selon ce principe, la résolution d'un problème donné revient, tout simplement, à décomposer celui-ci en une succession de sous-problèmes de complexité suffisamment simple de sorte que la solution de chacun de ces derniers puisse être déterminée à partir de celle du sous-problème précédent.

Dès lors, les questions que l'on se pose sont les suivantes:

- comment choisir le point de départ du parcours c'est à dire la configuration initiale?
- comment définir une configuration voisine?
- comment choisir celle qui conviendrait pour la substitution?
- à quel moment faudra-t-il interrompre le parcours et déclarer la configuration courante comme étant la meilleure?

Les éléments de réponses à ces quatre questions vont être, au cours des paragraphes suivants, illustrés à travers trois exemples de stratégies de parcours, a savoir:

- la stratégie "constructive",
- la stratégie "destructive" et
- la stratégie de type "permutation de branches".

Pour l'instant, on se contentera simplement de mettre en évidence quelques caractéristiques générales concernant ces trois stratégies. A priori, la configuration initiale peut être

arbitrairement choisie, mais on verra qu'elle sera définie de façon unique pour chacune des deux premières stratégies alors que pour la troisième, elle pourra être quelconque pour autant qu'elle jouisse de la propriété d'arborescence.

L'ensemble des configurations voisines d'une configuration donnée sera déterminé de sorte que, selon la stratégie adoptée, chaque configuration voisine soit du même type (ex: configuration uniquement connexe ou uniquement sans cycle ou arborescente). Concrètement, cela consistera à modifier la configuration en question en y apportant, tour à tour et indépendamment, une et une seule modification dite élémentaire et faisant partie d'un ensemble fini de modifications élémentaires possibles.

Chaque modification élémentaire correspondra, en fait, au changement des valeurs d'une (stratégie "constructive" et stratégie "destructive") ou deux (stratégie "permutation de branches") variables de décision du problème, soit la mise en ou hors service de tout au plus deux branches du réseau étudié, et ne pourra être retenue que si elle conduit à une configuration du même type que l'originale.

Selon la notation suivante:

E	espace des configurations possibles
s	configuration donnée telle que $s \in E$
M(s)	ensemble des modifications élémentaires possibles de s
m	modification élémentaire donnée telle que $m \in M(s)$
V(s)	ensemble des configurations voisines de s
s'	configuration voisine de s et du même type
$\oplus$	Opération de modification

On écrira alors:

$$V(s) = \{s' \in E/\exists\ m \in M(s)/s' = s \oplus m\}$$

Pour choisir dans V(s) la configuration de substitution, on pourra utiliser des critères tout à fait heuristiques qui seront, généralement, basés sur une évaluation exacte ou par défaut de la fonction objectif ou des contraintes d'inégalité (sécurité, manœuvres) du problème, les contraintes d'égalité étant implicitement satisfaites soit de manière progressive dans le cas des deux premières stratégies soit de manière simultanée pour la troisième. On précisera,

toutefois, que le choix de la configuration initiale et la détermination du voisinage, évoqués précédemment, seront établis de manière à ce que ces évaluations puissent être effectuées à chaque étape de la stratégie adoptée. Compte tenu de la difficulté d'identifier des configurations arborescentes réalisables au sens des contraintes d'inégalité (§ III.2), il serait prématuré d'énoncer une condition d'arrêt pour chacune des trois stratégies. Cette condition devra, dans les cas les plus défavorables, dépendre de la manière avec laquelle les contraintes d'inégalités seront prises en considération ainsi que des temps de calcul maximum consentis. Par conséquent, il conviendrait mieux d'en discuter au moment opportun. Cependant, si ces contraintes sont relaxées, la condition d'arrêt, dans le cas de la variante originale de chacune des trois stratégies, sera satisfaite dès que l'on visitera une configuration pour laquelle il n'en existera pas de meilleures (ex: croissance de la fonction objectif, V(s)= ∅ ...) dans l'ensemble des configurations voisines correspondant. On dira, alors que cette configuration est localement optimale.

III.3.2 Stratégie "constructive"

III.3.2.1 Principe de base

L'idée, à la base de cette stratégie, est de construire la configuration recherchée de manière progressive en y insérant, à chaque étape, une et une seule branche judicieusement choisie (figure III.2).

: branche en service - - - : branche hors service

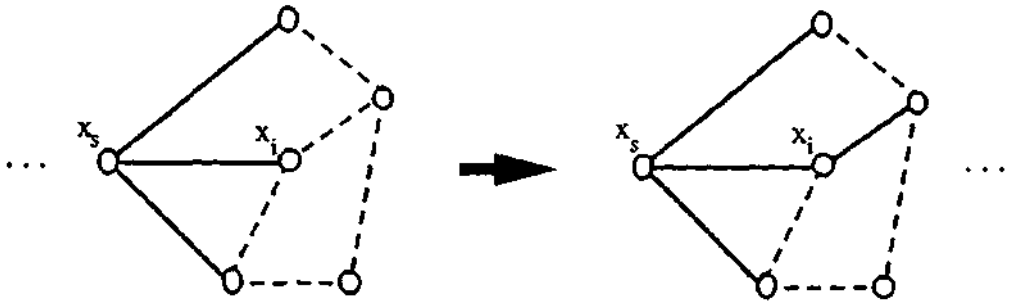


Fig. III.2 -*Stratégie "constructive*"

Cette idée est similaire à celles de Moore (1957) et Dijsktra (1959) [18, 13], qui mirent au point un algorithme permettant de déterminer, dans un graphe à valuation positive, les chemins de distance minimale reliant, chacun d'eux, un nœud particulier à un nœud quelconque.

Par rapport à un réseau électrique de distribution défini par sa structure, soit par son graphe G(X, B) (§I.2.1), le nœud particulier peut être le nœud source x_s et la notion de valuation et de distance peuvent être interprétées respectivement en termes de résistance de branche et de somme des résistances des branches reliant les nœuds Xs à un nœud donné $x_i \in X$. On dira alors, suite **à** l'application de cet algorithme, qu'un tel chemin sera formé d'un certain nombre de branches de sorte que la somme de leur résistance soit minimale. On montre, finalement, que l'association de tous les chemins de distance minimale, dont il est question, constitue une arborescence extraite de G(X,B) et dont la racine est le nœud x_s.

Cet algorithme, appelé algorithme de Moore-Dijsktra, détermine, au cours de son exécution, progressivement tous ces chemins (figure III.2) mettant ainsi en évidence l'intérêt qu'on lui porte dans le cas des problèmes que l'on se propose de résoudre. Dans le cadre du paragraphe suivant, on va s'intéresser à expliciter une version de cet algorithme adaptée à nos besoins et dont on pourra, par la suite, aisément déduire la version originale,

III.3.2.2 Description de la stratégie

Selon le principe énoncé au paragraphe précédent, on débute le parcours de l'ensemble des solutions possibles E à partir de la configuration correspondant à la mise à 0 de toutes les variables de décisions U_k du problème. Cette configuration a donc la particularité d'avoir toutes les branches hors service conduisant ainsi à l'ilotage de chaque nœud du réseau.

Au cours du parcours et après avoir examiné une configuration donnée s, on définit l'ensemble des configurations voisines de s, soit V(s) en identifiant tout d'abord l'ensemble M(s) des modifications élémentaires possibles que l'on pourrait lui apporter. Cette ensemble est composé de toutes les branches demeurant encore hors service ($U_k = 0$). Par la suite, on modifie, tour à tour et indépendamment, la configuration s en y mettant en service ($U_k = 1$) une branche issue de M (s) pour autant que la configuration résultante respecte la règle suivante :

- La branche mise en service doit impérativement avoir un et un seul nœud extrémité initialement ilote.

Dans le cas où s est la configuration initiale, on supposera tout simplement que le nœud $\mathbf{x_s}$ est non ilote, ce qui ne posera pas de difficultés particulières comme on le montrera plus tard à l'aide de l'algorithme qui sera suggéré.

On détermine, ainsi, toutes les configurations voisines de s et on constate que chacune d'elles est du même type que s en ce sens qu'elle ne contient pas de cycle et que, si l'on fait

abstraction de tous les nœuds encore ilotes et les branches hors service, elle est également connexe. Elle correspond donc à une sous- arborescence de racine $\mathbf{x_s}$ candidate à faire partie de la configuration finale recherchée.

Selon l'algorithme récursif de calcul des courants et des tensions proposé au chapitre I (§ I.6.1) et les propriétés dont il bénéficie, une telle sous- arborescence peut être calculée. On effectuera alors une évaluation par défaut des variables d'états du problème au cours de laquelle on remarquera que les courants dans les branches hors service sont évidemment tous nuls et on supposera que les tensions aux nœuds ilotes sont identiques à leur valeur nominale (annulation des écarts de tension respectifs).

Cette opportunité de calcul permet, pour chacune des configurations voisines de s, d'évaluer la fonction objective et les contraintes d'inégalité du problème, et celle qui sera retenue, pour la substitution, pourra être choisie sur la base de cette évaluation.

On substitue la configuration s par l'une de ses voisines pour autant que les deux conditions suivantes soient satisfaites:

- les contraintes d'inégalité du problème doivent être respectées, et
- la configuration voisine choisie doit être la solution du problème local:

déterminer $s' \in V^*(s)$ telle que $f(s')$ soit minimale

Où $V^*(s)$ c $V(s)$ est l'ensemble des configurations voisines de s respectant la première condition et où $f(\ )$ est la fonction objectif du problème global.

Selon les propos précédents, la dernière étape de la stratégie correspondra à la visite d'une configuration qui, dans le meilleur des cas, possédera un voisinage vide, $V(s) = \varnothing$. On aura, alors, une configuration arborescente pour laquelle toutes les contraintes d'égalité et d'inégalité du problème seront respectées et on dira que cette dernière est un optimum local.

Dans le cas contraire, la dernière configuration visitée possédera un voisinage $V^*(s)$ vide alors que $V(s)$ est non vide. Par conséquent, cette configuration aura un certain nombre de nœuds qui resteront définitivement ilotes et on dira que la stratégie a échoué et que finalement le problème proposé n'admet pas de solutions réalisables au sens de toutes les contraintes en vigueur.

III.3.2.3 Critiques des hypothèses implicitement admises

Au cours de l'élaboration de l'algorithme précédent, on a implicitement supposé que les contraintes d'inégalité ne pouvaient que se dégrader lors du passage d'une étape à une autre. Autrement dit, si l'on tolérait, par exemple, de légères violations de contraintes d'inégalité à une étape donnée, ces violations deviendraient plus importantes ultérieurement si les évaluations des contraintes en question varient.

Cette supposition, ayant permis d'établir l'une des règles de réduction des voisinages escomptées, serait acceptable, sans réserves, dans le cas des problèmes où les contraintes associées aux manœuvres sont relaxées et où les composantes capacitives du réseau étudié (ex: câbles, charges capacitives, compensations capacitives...) sont peu importantes face aux composantes inductives qui y sont généralement prépondérantes.

Actuellement, dans le cas des manœuvres, l'algorithme suggéré ne pourrait même pas franchir la première étape étant donné que leur nombre prend, initialement, une valeur maximale égale à N-l, N étant le nombre total de nœuds du réseau. Une façon permettant de remédier à ce problème serait de relaxer la contrainte d'inégalité correspondante en la transformant, éventuellement, sous forme d'un critère secondaire. Ce critère permettrait, au cours de l'examen des voisinages, d'effectuer le choix entre deux configurations correspondant à la même valeur de la fonction objectif du problème. Une autre façon serait d'évaluer la contrainte en question (et d'ailleurs aussi le coût associés au manœuvres) en considérant uniquement les branches qui ont été définitivement mises en service depuis le début de la stratégie ainsi que celle qui a conduit à la configuration voisine en cours de traitement. Dans ce cas là, l'algorithme suggéré au paragraphe précédent demeurera inchangé. Dans le cas des contraintes de sécurité, on peut citer l'exemple d'un réseau très étendu où l'on pratique de la compensation capacitive [20] afin de maintenir un plan de tension globalement correct. Si l'on applique à ce réseau, telle quelle, la stratégie "constructive" suggérée, elle pourrait probablement conduire à condamner définitivement certaines branches (introduction dans L_v) ayant contribué à des élévations de tension et, voire même, de courant dépassant les limites admissibles. Ce phénomène serait tout à fait typique si, à une étape donnée, on tente d'alimenter, au cours de l'examen du voisinage correspondant, une charge capacitive suffisamment importante.

Or, si l'on relaxait les contraintes de sécurité et que l'on choisissait de surcroît une configuration de substitution sujette au phénomène précité, ce dernier pourrait très bien

s'atténuer et même disparaître au cours des étapes ultérieures si l'on alimentait, par la suite, des charges inductives. Selon ce raisonnement, on pourrait, finalement, aboutir à une configuration finale respectant toutes les contraintes du problème posé. Par conséquent, on constate d'une part que la réduction anticipée des voisinages escomptés devient caduque et d'autre part, que le traitement des contraintes de sécurité, au cours d'une étape donnée, devra être soumis à des règles supplémentaires qui seraient difficiles de gérer pour un réseau dont les charges aux nœuds sont de nature quelconque.

Ce problème au sujet des contraintes de sécurité peut, tout aussi bien, être étendu au cas des critères dépendant des variables d'états du problème. En effet, en constatant que ces critères peuvent, dans le cas du réseau évoqué, croître et décroître tout au long de la stratégie, le choix de la configuration de substitution selon la minimisation locale de la fonction objectif pourrait s'avérer inadéquate [4]; ce qui met en relief la nature heuristique de la stratégie "constructive" proposée.

III.3.2.4 Améliorations de la stratégie "constructive"

La raison majeure pouvant conduire à l'échec de la stratégie "constructive" suggérée, provient du fait que celle-ci évolue selon un avenir incertain. Autrement dit, à chaque étape de la stratégie, on ne peut justifier le choix effectué, pour passer à l'étape suivante, en tenant compte de la distribution spatiale des charges aux nœuds encore ilotes mise à part ceux qui seront présentement sollicités par le voisinage courant. La seule indication, dont on pourrait disposer à chaque étape pour tenter de mieux justifier le choix de la configuration de substitution, résulterait d'une estimation de la somme des charges qui restent encore à alimenter.

Le problème étant ainsi posé, on suggère dans ce paragraphe, d'expliciter sous forme de propositions, différentes améliorations de la stratégie "constructive" suggérée dans le but d'éviter, si possible, définitivement les situations d'échec ou, à la limite, différer ces dernières le plus longtemps possible. Dans ce dernier cas, on pourra dire que les charges aux nœuds définitivement ilotes définissent le délestage, supposé minimum, nécessaire pour maintenir une exploitation sûre du réseau étudié. Enfin ces améliorations étant essentiellement basées, de façon explicite ou implicite, sur des prédictions des charges encore insatisfaites et, éventuellement, de leur distribution spatiale, on constatera qu'elles auront plutôt tendance à réduire la taille du voisinage examiné à chaque étape.

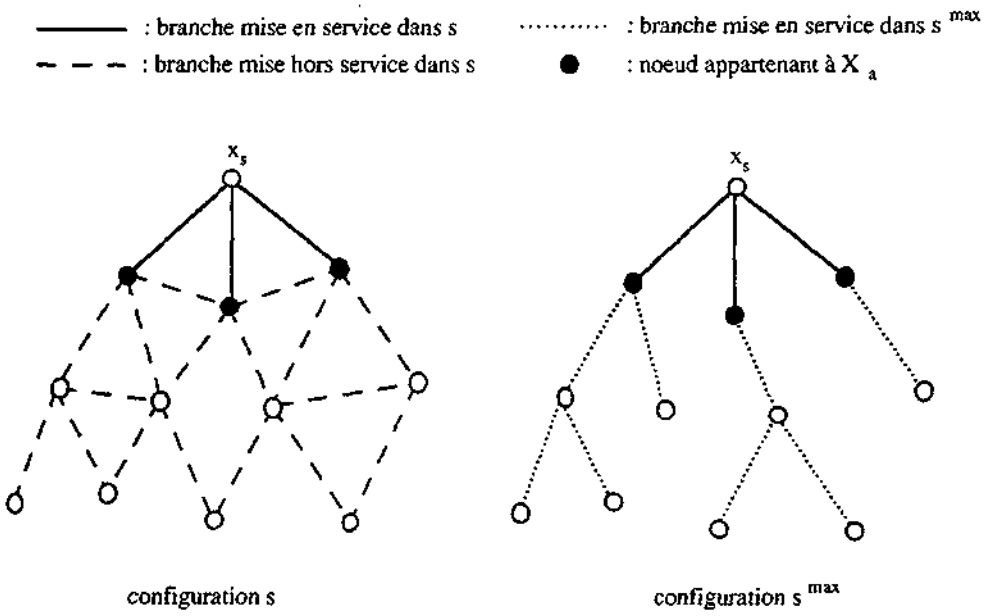


Fig. III.3 - *Arborescence de courants maximaux associée à s*

On obtient, ainsi, pour chaque nœud de X_a une sous-arborescence dont il est la racine et dont les nœuds forment un sous-ensemble de l'ensemble des nœuds encore ilotes par rapport à s. Par la suite, on associe à ce nœud un courant complexe résultant d'une estimation de la somme des charges aux nœuds de la sous-arborescence correspondante. On appellera ce courant estimé $\underline{I}_{esti}$. Dès lors, on peut oublier la configuration s^{max} puis ne s'intéresser plus qu'à la configuration courante s afin de définir les configurations voisines à examiner.

Pour ce faire, plusieurs possibilités peuvent être envisagées en s'inspirant, par exemple, des suggestions faisant l'objet des propositions précédentes. A titre d'exemple, on en citera une sous la forme suivante:

- pour chaque nœud $x_i \in X_a$ faire:
  - Compléter la charge au nœud x_i en y ajoutant le courant $\underline{\mathbf{I}}_{esti}$ correspondant.
  - Calculer les nouveaux courants et les nouvelles tensions de s
  - Si l'on détecte des violations de contraintes de sécurité, retirer x_i de X_a uniquement dans le cadre de l'étape courante; sinon, déterminer la marge maximale de courant et L'écart de tension au nœud x_i résultant du calcul au point précédent
  - Annuler le courant $\underline{\mathbf{I}}_{est\ i}$

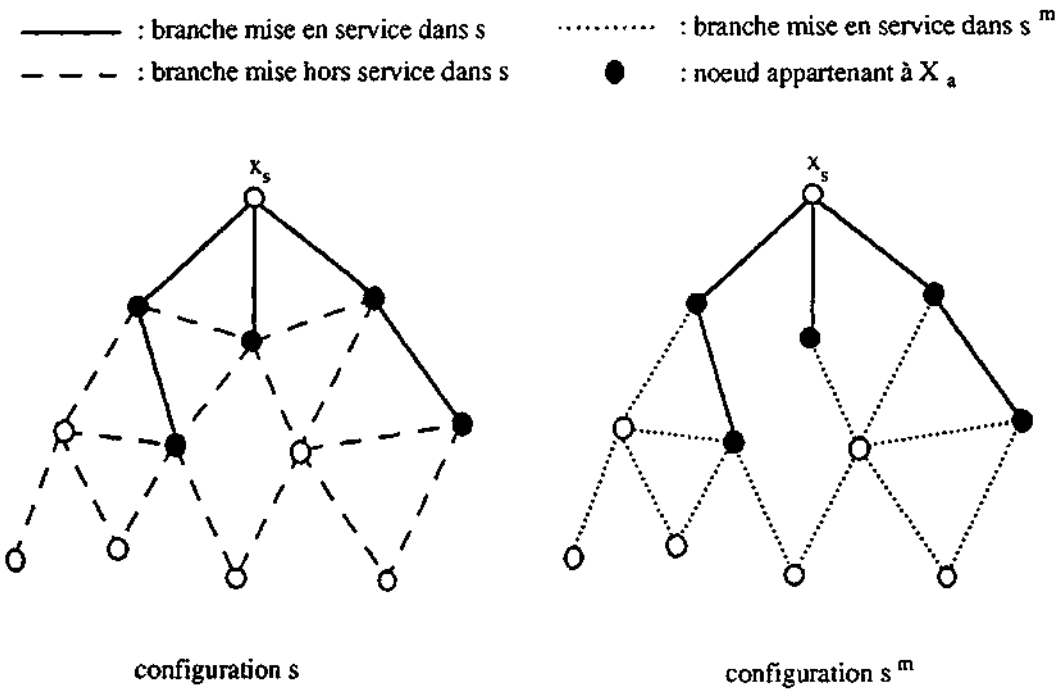
- à partir de l'ensemble X_a, procéder à l'établissement de l'ensemble X_a' d'une manière similaire à celle de la proposition **2** et tout en tenant compte des marges établies plus haut

- selon ce qui précède, procéder à l'examen du voisinage de s en utilisant uniquement les modifications élémentaires associés aux branches ayant chacune un des nœuds extrémités dans X_a'

Pour simplifier ce processus et, par conséquent, avoir à chaque étape un voisinage assez large, on peut éviter le calcul des marges maximales de courant et des écarts de tension. Dans ce cas, on imposera, bien évidemment, l'identité entre X_a et X_a' pour entreprendre l'examen du voisinage.

Enfin, pour conclure cette proposition, il serait intéressant de noter que l'on peut tirer avantage de la détermination des configurations s^{max} pour calculer les courants et les tensions dont chacune d'elles serait le siège. Aussi, si certaines d'entre elles conduisent au respect de toutes les contraintes, on pourra, alors, les conserver afin de les comparer à celle qui sera proposée par la stratégie puis en déduire la meilleure.

pour but de présenter une autre variante permettant de tenir compte, à chaque étape, de la distribution des charges aux nœuds encore ilotes. L'idée suggérée consiste, de nouveau, à compléter la configuration courante s pour obtenir cette fois-ci une configuration que l'on notera s^m. On détermine s^m à partir de s en mettant en service toutes les branches encore hors service dans s à l'exception de celles qui formeraient un cycle avec, uniquement, des branches déjà mise en service dans s (figure III.4). On obtient alors une configuration maillée dont on peut calculer les courants et les tensions à l'aide, par exemple, de techniques de résolution matricielle si l'on exige à la fois de bonnes performances et des résultats de bonne qualité [11] (§ III.3.3.2).



.

Fig. III.4 - *Configuration maillée associée à s*

Suite à ce calcul, on peut déterminer la liste des modifications élémentaires susceptibles de conduire à des configurations voisines de s respectant les contraintes de sécurité. Chacune d'elles doit correspondre à une branche mise en service pour obtenir s^m et satisfaisant les conditions suivantes:

- un et un seul des ses nœuds extrémités doit être dans X_a
- son courant (en module) doit être en dessous de sa limite maximale admissible
- son courant doit circuler en direction du nœud initialement ilote (alimentation partielle ou totale de ce nœud par la branche en question); si Ton note X_j ce nœud et x_i celui dans X_a alors on doit vérifier que:

Re {$\underline{I}_{ij}$} ≥0 et **Im {Iij} ≤0** [1)] (si possible)

où Re {$\underline{I}_{ij}$} désigne la partie réelle et Im {$\underline{I}_{ij}$} désigne la partie imaginaire du Courant complexe défini, par convention, comme allant de x_i à x_j

1) : si toutes les charges aux nœuds du réseau sont de nature inductive

III.3.2.5 Commentaires

Dans le cadre du paragraphe précédent, on aurait pu également envisager une proposition d'amélioration de la stratégie "constructive" se basant sur une remise en question des modifications élémentaires définitives ayant permis de franchir un certain nombre d'étapes. Ce procédé, portant le nom anglais "Backtraking" (retour en arrière) et allant à l'encontre du principe de base de la stratégie proposée, serait la seule manière d'étendre l'exhaustivité du parcours de l'ensemble des solutions possibles afin d'augmenter les chances d'obtenir ne serait ce qu'une seule configuration arborescente réalisable et, s'il en détecte plusieurs, de pouvoir proposer la meilleure selon la minimisation de la fonction objectif. Malheureusement, le "Backtraking" serait difficile à gérer selon que l'on décide d'interdire définitivement ou pas la remise en service des branches relatives aux modifications élémentaires précitées.

A titre d'exemple, si l'on aboutit à une étape où l'on se trouverait en situation d'échec, il faudra, tout d'abord, commencer par mettre hors service, tout en les marquant et successivement selon l'ordre inverse de leur mise en service initiale, les branches qui ont conduit à cette étape. Ce processus devra se terminer dès que l'on atteindra une configuration pour laquelle le voisinage associé contiendra des configurations voisines respectant les contraintes d'inégalités et ne sollicitant pas mise en service de branches marquées. Ainsi, on pourra, par la suite, entamer un nouveau parcours, dans l'ensemble des configurations possibles, différent du premier. Mais la question, que l'on se posera à ce moment là, est: comment traiter les branches marquées? Si, on les laisse telles quelles, il est fort probable qu'il n'en restera plus suffisamment des hors service non marquées pour pouvoir poursuivre ce nouveau parcours. Dans le cas contraire, on sera confronté au problème du "Backtraking" multiple en ce sens que si l'on aboutit de nouveau à une situation d'échec, on devra de nouveau répéter le processus précédent. Dans ce cas, se posera le problème du cyclage, c'est à dire que l'on risquera de commencer à osciller entre différentes situations d'échec incluant, probablement, celles déjà rencontrées. De plus, même si la stratégie n'échouait pas, il faudra, malgré tout, lui définir une condition d'arrêt afin de garantir sa convergence. Une idée serait alors d'interdire, de façon définitive, la remise en service des branches ayant été marquées plus de nb fois, nb étant un nombre à définir**.**

Selon cet exemple, il est sous entendu que les contenus des ensembles X_i et L_v définis au paragraphe III.3.2.3, doivent être mis à jour à chaque fois que l'on décide de remettre en question une branche mise en service initialement.

Finalement, pour pouvoir utiliser le "Backtraking", il serait plus prudent d'envisager une technique systématique de type séparation et évaluation (§ III.4) qui serait, en fait, une extension de la stratégie "constructive" suggérée.

Pour conclure les propos au sujet des améliorations, on constatera que, même si ces dernières contribuent, à chaque étape de la stratégie, à réduire la taille du voisinage examiné, elles nécessitent souvent des opérations supplémentaires qui ne feront que compromettre les performances souhaitées.

Par ailleurs, on peut également se poser la question: que doit on faire s'il n'existe vraiment pas de solutions au problème posé? Ceci peut être constaté, par exemple, à l'aide de la détermination de l'arborescence de courants maximaux (§III.2.3.5, proposition 3) associée à la configuration initiale. En effet, si certains nœuds du réseau font l'objet de courants maximaux théoriques négatifs, il y aura de fortes chances que la stratégie échoue. Dans ce cas, on souhaiterait malgré tout déterminer une configuration arborescente qui violerait le moins possible les contraintes. Ce type de résultat pourrait alors servir de base pour entreprendre des études de renforcements de réseau. Pour ce faire, une solution serait de transformer les contraintes d'inégalités sous forme de critères puis de les ajouter à la fonction objectif tout en les pondérant de manières à ce qu'ils aient plus de poids que les autres critères. Cette façon de faire sera discutée et utilisée plus tard dans le cadre de l'étude de la stratégie "permutation de branches".

Enfin, on voit, finalement, que la stratégie "constructive" ne peut conduire, éventuellement, qu'à l'obtention d'une seule configuration arborescente réalisable et que, par conséquent, la qualité de cette solution ne peut être suffisamment appréciée par rapport aux critères d'optimisation en vigueur.

III.3.3. Stratégie "destructive"

III.3.3.1 Principe de base

Si, dans le cas de la stratégie "constructive", on débute le parcours de l'ensemble des solutions possibles E par une configuration pour laquelle toutes les branches sont hors service c'est à dire que toutes les variables de décision du problème sont à 0 (u_k=0), on pourrait alors envisager une stratégie duale où, cette fois-ci, on partirait d'une configuration où toutes les branches sont en service, soit toutes les variables de décision du problème sont à 1 (u_k=l).

La stratégie "destructive" consistera par la suite à déterminer progressivement, selon un processus par étape, les branches qu'il faudrait retirer de cette configuration de départ (u_k=0) pour obtenir la configuration arborescente solution du problème posé (figure III.5).

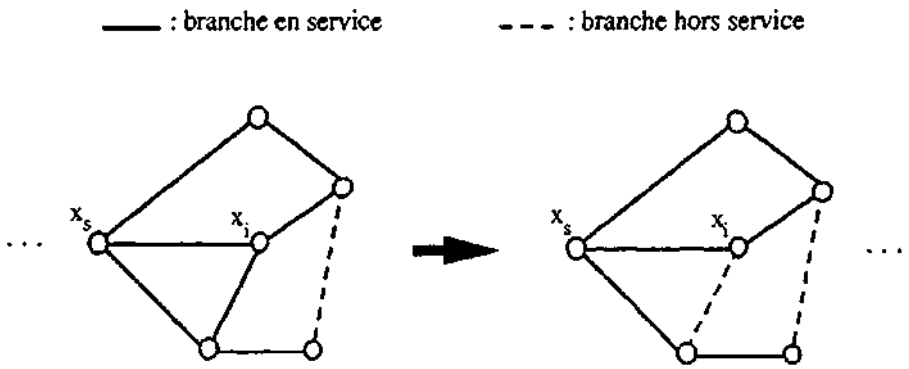


Fig.III.5 - *Stratégie "destructive"*

L'intérêt porté à cette nouvelle stratégie se justifie principalement par les faits suivants:

- le nombre de branches à mettre hors service est généralement faible par rapport à celui des branches qui doivent demeurer en service.
- par rapport à la stratégie "constructive", à chaque étape, toutes les charges aux nœuds Tant du point de vue de leur amplitude que du point de vue de leur distribution Spatiale, seront, cette fois-ci, simultanément prises en considération au cours de L'évaluation des variables d'état ainsi que de la fonction objectif et des contraintes du Problème posé.

- les courants transitant dans les branches de la configuration initiale qui est entièrement Maillée, sont supposés déterminer pratiquement une borne inférieure pour les pertes Ohmiques relatives à toutes les configurations qui seront visitées au moyen de cette Stratégie. Aussi, au paragraphe III.3.3.4, on tirera avantage de cette hypothèse pour Montrer comment on pourrait déterminer une configuration arborescente réalisable à Pertes minimales.

III.3.3.2 Description de la stratégie

Partant de la configuration initiale définie au paragraphe précédent, on détermine, à chaque étape, l'ensemble des configurations voisines V(s) à la configuration courante s moyennant l'ensemble des modifications élémentaires possibles M(s) correspondant. Ce dernier est

composé de toutes les branches en service (u_K=l) dans s. Ainsi, chaque configuration voisine sera obtenue, à partir de s, par la mise hors service (u_K=0) d'une et une seule branche issue de M(s) pour autant que la configuration voisine en question reste connexe.

Un algorithme simple, permettant de vérifier la connexité d'un graphe partiel (§I.3) quelconque extrait du graphe G(X, B) (§ I.2) représentant la structure d'un réseau donné, serait le suivant:

- Initialiser un ensemble, noté X_c, tel que: $X_c = \{x_s\}$
- Tant que Xc $\neq \varnothing$ faire:

. Prendre un nœud dans X_c que l'on notera x_i

. Pour tous nœuds xj immédiatement voisin à xi faire:

si x_j n'est pas marqué et si la branche reliant x_i à x_j est en service alors introduire x_j

dans X_c pour autant que x_j n'appartienne pas déjà à Xc

. retirer x_i de X_c tout en le marquant

.Si tous les nœuds dans X son‹ marqués alors la connexité est respectée

Suite à ce test de connexité, on peut alors procéder, pour la configuration voisine en cours de traitement, à l'évaluation de la fonction objectif ainsi que des contraintes d'inégalité du problème posé. Cette évaluation nécessite un calcul des courants et des tensions (variables d'états) siégeant dans cette configuration que l'on ne peut effectuer à l'aide de l'algorithme récursif proposé au chapitre IV (§IV.6). Pour ce faire, on proposera alors, comme dans le cadre de la proposition 4 du paragraphe III.3.2.5, une technique de résolution matricielle.

L'ouvrage de Stagg & El Abiad [11] contient un certain nombre de techniques matricielles parmi lesquelles on recommande la méthode itérative de Gauss-Seidel utilisant la matrice d'impédance $\underline{Z}_{\mathbf{bus}}$ (matrice symétrique de dimension N-l x N-l, N étant le nombre total de nœuds du réseau) associée à la configuration en question. Par rapport aux autres méthodes proposées dans cet ouvrage, celle-ci convient suffisamment bien, notamment du point de vue convergence, dans le cas des réseaux où il existe à la fois des branches de grandes et de très faibles impédances (ex: réseau urbain/rural). L'établissement de la matrice $\underline{Z}_{bus}$ s'effectue généralement par inversion de la matrice d'admittance $\underline{Y}_{bus}$ que l'on peut établir très facilement [21]. Le système d'équations à résoudre itérativement par la méthode suggérée est le suivant:

$$\underline{V}_i^{(k+1)} = \underline{v}_s + \sum_{j=1\, j\neq s}^{i-1} \underline{Z}_{busij}\underline{I}_j^{(k+1)} + \sum_{j=1\, j\neq s}^{N} \underline{Z}_{busij}\underline{I}_j^{(k)} \qquad i=1 \ldots N,\ i\neq s \qquad (v.1)$$

Où

$\underline{v}_i^{(k+1)}$ 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 (§ II.4),
Calculé en fonction de la tension $\underline{V}j$ ($^{k+1}$) déjà calculée au cours de la présente itération

$\underline{I}_j^{(k)}$ Courant complexe au nœud x_j à l'itération k

Les tensions aux nœuds étant ainsi calculées, on détermine les courants transitant dans les branches au moyen de l'une ou l'autre des expressions (**I.1**), (**I.2**) et (I.3) établies au chapitre I (§ I.3).

A l'instar de la stratégie "constructive", le choix de la configuration voisine candidate à la substitution de la configuration courante s'effectue selon le respect des contraintes d'inégalité ainsi que la minimisation locale de la fonction objectif du problème traité (§ III.3.2.2). Quant à la convergence de la présente stratégie, Celle-ci est garantie en M-N+l étapes (M étant le nombre de branches et N étant le nombre de nœuds du réseau étudié) dans le cas où l'on trouve à l'issue de la dernière étape une configuration arborescente réalisable. Dans le cas contrainte, il est bien entendu que ce nombre d'étapes sera inférieur et que la configuration résultante contiendra des cycles que l'on ne peut, en général, tolérer dans l'exploitation des réseaux de distribution (§ II.3.2).

III.3.3.3Application de la stratégie "destructive" au cas particulier de la minimisation des pertes ohmiques

Pour tenter de déterminer une configuration arborescente réalisable à pertes ohmiques supposées minimales, on pourrait se baser sur les deux propriétés suivantes**:**

Pour un réseau exploité selon sa structure (§ I.2.1) (ex: configuration initiale de la stratégie) et dont les réactances des branches sont négligeables (ex: réseau urbain) et les charges aux

nœuds sont à courants constants (§I.4), l'application des 2 lemmes de Kirchhoff y établit des courants de branches engendrant des pertes ohmiques minimales.

- Pour une démonstration mathématique détaillée de cette propriété, on pourra se référer à la publication de Shirmohammadi [6**]** dans laquelle il se propose de résoudre, dans ce but, un problème d'optimisation dont les variables à déterminer sont les courants dans les branches, dont l'objectif est évidemment la minimisation de la somme des pertes ohmiques portant sur toutes ces branches et dont les contraintes se résument uniquement au respect du lemme de Kirchhoff relatif aux courants incidents aux nœuds. Le problème posé étant uniquement à contraintes d'égalité, la technique de résolution, qu'il utilise, est celle des multiplicateurs de Lagrange [16]. En interprétant les multiplicateurs précités en termes de tensions aux nœuds, il montre aisément que la condition d'optimalité des pertes ohmiques requiert la nullité de la somme des tensions le long des branches de n'importe quelle maille du réseau soit le respect du lemme de Kirchhoff **à** propos des tensions. il en déduit alors l'équivalence entre ce lemme de Kirchhoff et la minimisation des pertes ohmiques.

- Tout déclenchement de branche apporté à la configuration faisant l'objet de la propriété ci-dessus contribuera à l'élévation des pertes ohmiques engendrées par les courants circulant dans la configuration résultante.

Pour démontrer de façon inductive cette propriété, on peut dire que le courant qui traversait la Branche déclenchée va, selon les lemmes de Kirchhoff, se subdiviser en plusieur composantes se reportant aux courants préexistants dans d'autres branches du réseau et perturbant, par conséquent, les courants déterminés par le problème d'optimisation que s'était posé Shirmohammadi. Aussi, étant donné la convexité de la fonction objectif du problème, C'est à dire les pertes ohmiques, on en conclut alors que ces dernières ne peuvent qu'augmenter.

pour des réseaux dont les caractéristiques sont conformes à celui que l'on vient d'évoquer, Merlin, dans sa publication [5], décrit, selon les propriétés ci- dessus, une stratégie "destructive" ayant pour but de déterminer des configurations arborescentes à pertes ohmiques minimales. Au cours de cette stratégie, on transite d'une étape à une autre tout simplement en mettant hors service la branche ayant, par rapport à la configuration courante, le plus faible

courant (en module) et permettant de conserver la connexité de la configuration de substitution résultante. Ainsi, on suppose, de par cette modification élémentaire particulière, que les pertes ohmiques vont croître le plus faiblement possible.

Les résultats fournis par cette stratégie ont été comparés à ceux obtenus par une méthode de recherche exhaustive de type séparation et évaluation (§ III.4). Cette comparaison a permis de conclure qu'une telle stratégie était suffisamment pertinente en ce sens que les pertes ohmiques des configurations arborescentes qu'elles proposent, sont pratiquement minimales. Cependant, on notera que cette qualité des résultats peut parfois être compromise étant donné que la stratégie en question ne prend pas en considération les contraintes de sécurité.

Maintenant, comment peut on traiter le cas des réseaux dont les réactances ne peuvent être négligées (ex: réseaux ruraux) et dont les charges aux nœuds ne sont pas forcément à courants constants (§I.4) ? Pour répondre à cette question, la publication de Shirmohammadi, fait également l'objet d'une règle permettant de choisir, de façon assez similaire à celle de la stratégie exposée par Merlin, la branche qu'il faut déclencher pour transiter d'une étape à une autre. Cette règle consiste à modifier tout d'abord la configuration courante s en court-circuitant toutes les réactances des branches. Par la suite, on calcule les courants et les tensions de cette configuration modifiée, notée s^r, en considérant les courants aux nœuds déterminés suite au calcul de s. Enfin, pour déterminer la configuration de substitution, on choisit de mettre hors service dans s la branche dont le courant (en module) associé à s^r est le plus faible.

On voit finalement que, selon ces procédés, l'évaluation de la fonction objectif du problème n'est plus d'aucune utilité vis-à-vis du choix de la configuration de substitution du fait que celle-ci constitue le seul élément (sauf si l'on tient compte des contraintes d'inégalité) du voisinage examiné à chaque étape. il convient alors d'indiquer des règles permettant d'empêcher des tailles de voisinages aussi restreints. Au cours du prochain paragraphe on s'intéressera à mettre en évidence des améliorations de la stratégie que l'on a proposée tout en tenant compte de ce type de règle.

III.3.3.4 Réduction des voisinages

L'objectif de ce paragraphe est de définir des règles heuristiques permettant de conduire à la réduction de l'ensemble des configurations voisines examinées à chaque étape de la

stratégie "destructive" suggérée. Les règles que l'on propose découlent du calcul des courants et des tensions de la configuration courante et font l'objet des deux propositions suivantes.

III.3.3.5 Commentaires

De par la dualité qui existe entre la stratégie "constructive" et la stratégie "destructive", cette dernière présente également les mêmes problèmes que ceux discutés, au paragraphe III.3.2.4, à propos de la prise en compte des contraintes sur le nombre de manœuvres et, au paragraphe III.3.2.6, à propos de la mise en œuvre du "Backtraking" que l'on pourrait utiliser en cas de situation d'échec. Au sujet des situations d'échec, on peut ajouter que l'on peut, dès la configuration initiale, avoir des contraintes de sécurité qui soient déjà violées. Cette situation résulterait du fait que la structure des réseaux de distribution n'est en général pas conçue en vue d'une exploitation non arborescente. A titre d'exemple, le bouclage du schéma d'exploitation peut, en vertu des lemmes de Kirchhoff, engendrer des courants excessifs le long de certains chemins dont les valeurs des impédances seraient favorables alors que leurs capacités maximales admissibles ne le sont pas. Aussi, il faudrait envisager dans ce cas la relaxation des contraintes de sécurité soit de façon momentanée soit de façon définitive en espérant que la solution du problème posé sera réalisable.

Par ailleurs, dans le cas des réseaux multi-sources, la modélisation proposée au chapitre III (§ III.5) ne peut être valable ne serait ce qu'en raison de la nullité des impédances des branches fictives qui le constituent. En effet, ces dernières entraîneraient une divergence des algorithmes de calcul des courants et des tensions. En fait, il faudrait remplacer cette modélisation par une modélisation plus complexe qui devrait tenir compte des transformateurs HT/MT ainsi que des chemins, dans la topologie du réseau HT, reliant les nœuds HT de ces transformateurs entre eux (modèle équivalent du réseau extérieur [22]).

III.3.4 Introduction à la stratégie de type "permutation de branches"

Etant donné que les stratégies heuristiques discutées jusqu'à présent sont à décisions irrévocables (algorithmes "gloutons"), chacune de ces dernières ne peut, dans le meilleur des cas, proposer qu'une seule configuration arborescente réalisable et, par conséquent, on ne pourrait suffisamment apprécier la valeur finale de la fonction objectif du problème posé. Pour faire face à cet inconvénient, on propose dans ce paragraphe d'introduire une nouvelle stratégie qui fera l'objet du prochain chapitre de par les nombreuses variantes qu'elle pourrait suggérée.

Cette stratégie consiste à examiner, dans l'ensemble des solutions possibles, uniquement des configurations satisfaisant la contrainte d'arborescence. Pour transiter d'une configuration de ce type notée s vers une autre, on applique à s une modification élémentaire sollicitant deux variables de décision du problème:

- une variable associée à une branche hors service, notée b_K
- une variable associée à une branche en service, notée bj

La modification élémentaire consiste simplement à permuter les valeurs de ces deux variables de décision soit à mettre b_K en service et bj hors service. Afin de garantir l'arborescence de la configuration résultante, on définit le couple (b_K, bj) en choisissant tout d'abord la branche b_K. Par la suite, on choisit la branche bj parmi celles qui constituent le chemin unique dans s permettant de relier les deux nœuds extrémités de la branche b_K (§ I.2.4 et I.6.2).

Ainsi, à chaque étape de la stratégie on peut établir un ensemble de couples de branches selon le principe précité et déterminer à partir de chacun d'eux une configuration voisine à la configuration courante. Selon les variantes originales de cette stratégie (§ IV.3), la configuration voisine candidate à la substitution pour passer à l'étape suivante doit avoir un coût (valeur de la fonction objectif) inférieur à celui de la configuration courante. Lorsqu'à une étape donnée, cette condition ne peut être remplie, la stratégie est interrompue et la configuration courante est déclarée comme étant un optimum local par rapport à ses configurations voisines.

Contrairement aux stratégies "constructives" et "destructives", au cours de la stratégie de type "permutation de branches", chaque variable de décision que l'on modifie pour passer à une étape donnée peut, si nécessaire, l'être à nouveau pour passer à une étape ultérieure. A titre d'exemple, la figure suivante (figure III.6) permet d'illustrer cette caractéristique qui justifie, entre autre,

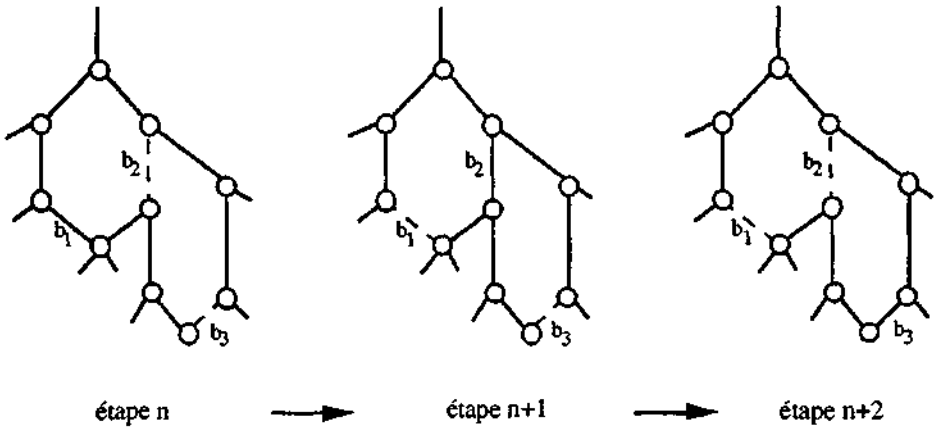


Fig. III.6 - *Stratégie de type " permutation de branches"*

Par ailleurs, on constate que la permutation de branches n'est finalement ni plus ni moins qu'un ripage (ou transfert) de charge conformément aux propos du paragraphe I.6.2 du chapitre II. Or, cette pratique correspond à celle des exploitants face à différentes situations nécessitant des manœuvres dans le réseau. On pourrait donc s'inspirer de leurs expériences afin d'établir l'ensemble des configurations voisines à examiner à chaque étape et de retenir celle qui pourrait conduire à une bonne solution du problème à résoudre.

Enfin on peut signaler, à titre complémentaire, que la stratégie de type "permutation de branches" conduit à des configurations arborescentes globalement optimales lorsque la fonction objectif du problème est linéaire et que les contraintes d'inégalités sont relaxées. Elle porte dans ce cas, le nom de "méthode du simplexe pour réseau" (recherche opérationnelle) et on pourra se référer à l'ouvrage de de Werra [23] afin de montrer l'optimalité des solutions qu'elle propose.

III.4 Les méthodes par séparation et évaluation

III.4.1Principes 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.7). 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.

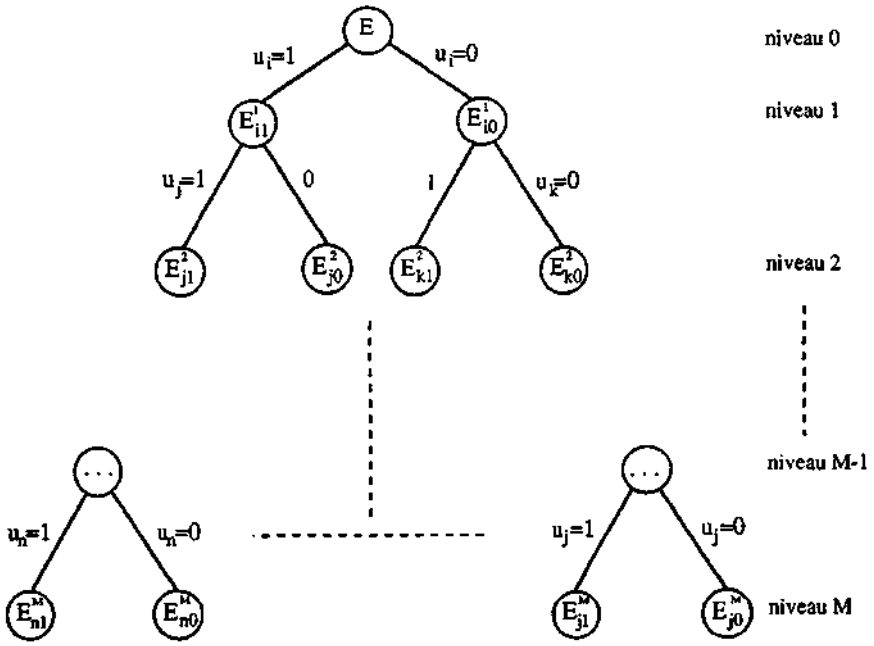


Fig. III.7 - *Arbre de décision binaire pour M variables (exemple)*

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.7, 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 où 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 (§III.3). 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. Comme on le verra au paragraphe III.4.4, des règles supplémentaires mais non impératives peuvent être également considérées.

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, on a déjà évoqué, pour la méthode heuristique "constructive" (§ III.3.2.1 et § III.3.2.4), qu'il peut exister des situations où cette hypothèse ne peut être justifiée. En effet, il suffit, pour ce dernier cas, de constater que la méthode par séparation et valuatation 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. Quand 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.4.3 Conclusion :

Selon les publications décrivant des méthodes d'exploration par séparation et évaluation appliquées à des problèmes tels que les nôtres [26, 5], les conclusions de leurs auteurs indiquent que ces dernières peuvent, malgré leur nature implicite, requérir souvent des temps de calcul prohibitifs. En effet, les temps de calcul dépendent bien évidemment de la taille du problème posé (nombre de variables de décisions) et on ajoutera qu'ils dépendent plus précisément du nombre de variables de décision qui doivent être à **0** afin de garantir l'arborescence de la configuration recherchée. Lorsque ce nombre est faible, le nombre de configurations arborescentes possibles l'est aussi et l'algorithme suggéré pourrait plus facilement converger en des temps acceptables. Lorsque ce nombre est élevée, pour conserver de telles durées, c'est le nombre de configurations réalisables qui entre en ligne de compte en ce sens que si le problème posé est très contraint on pourrait dès les premiers niveaux de l'arbre de décision opérer des interruptions sélectives en raison de violations de contraintes d'inégalités. Malheureusement, le nombre de configurations réalisables ne peut être évalué à l'avance et, au même titre que la configuration recherchée, il constitue également une inconnue du problème.

Finalement, dans une situation quelconque, seule une bonne évaluation des bornes inférieures et de la borne supérieure minimale courante pourrait empêcher l'examen d'un nombre explosif de sommets. Dans notre cas, il serait difficile de définir des bornes inférieures plus grandes que celles proposées (bornes inférieures majorées) et il n'est pas exclu que selon le problème à résoudre et les caractéristiques du réseau correspondant (surtout amplitudes et distribution des charges), les bornes inférieures majorées ne soient pas suffisantes afin de procéder à de fréquentes interruptions sélectives dès les premiers niveaux de l'arbre de décision. Pour la borne supérieure minimale qui ne peut être déterminée qu'à partir des sommets terminaux, on aura tout avantage dès le début de l'algorithme proposé à orienter la recherche le plus possible vers de bonnes solutions réalisables en complétant la régie principale de séparation des sommets par des régies supplémentaires. Ces régies non impératives et quelque peu heuristiques consisteraient à choisir parmi les branches obéissant à la régie principale celles qui présenteraient les plus grands courants admissibles, les plus faibles impédances ou encore les plus grandes charges à leurs extrémités ilotes. Enfin si l'expérience montre que, malgré tout, au delà d'une certaine durée, l'algorithme suggéré ne converge toujours pas alors il faudra se résigner à son interruption tout en exhibant, si possible, la meilleure configuration réalisable rencontrée.

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre on a étudié une comparaison entre la programme CARAT et la programme MATLAB®, dans les mêmes, conditions de fonctionnement (la charge et de la chute de tension,…).

Le poste 297 est un poste ACC 160 kVA situé dans le quartier RMALI commune de MEDEA.

Le but Dans cette étude nous allons nous intéressé sur les grappes bout de réseau présentant un problème de charge et de chute de tension confirmée par des mesures faites sur les lieux, cette dernière atteint une valeur maximale de 17.85 % en support 72 pour l'année en cours et 22 % pour les années prochaines.

Pour cela, nous avons élaboré :

- Une étude de l'état actuel en 1er lieu,
- Une solution pour le problème en second lieu,
- Et enfin une préconisation.

IV.2. Schéma squelettique du réseau BT issu du poste 297

Nous avons accompli notre travail par une figure (IV.1), qui est le schéma squelettique du réseau BT issu du poste 297 réalisé à l'aide de L'AUTOCADE, (voir l'annexe).

IV.3. Etude de l'état actuel :

IV.3.1 Evolution de la charge et la chute de tension

IV.3.1.1. Evolution de la charge:

Pour connaître l'évolution de la charge ainsi que celle de la chute de tension; nous nous sommes servi du programme CARAT et du programme MATLAB®.

L'exécution de ce dernier donne les valeurs des tableaux ci dessous:

Tableau (IV.1) *Evolution de la charge par deux programmes MATLAB® et CARAT*

Portées	Courant limite thermique (A)	Courant de charge (A)
Poste 297-sup02	200	190
Sup02-sup03	200	185
Sup03-sup04	200	185
Sup04-sup05	118	54
Sup05-sup06	153	130

Voire (IV.2) le tableau suivant contient 3 colonnes :

- Colonne 1 : Nom de support
- Colonne 2 : la tension(Volt).
- Colonne 2 : la chute de tension(%).

IV.3.1.2.1. Evolution de la chute de tension par programme MATLAB® :

Tableau (IV.2): *Evolution de la chute de tension par programme MATLAB ®.*

N°= sup	V(v)	ΔV %
Sup 03	390	2.4738
Sup 04	384	4.0378
Sup05	380	5.0555
Sup 06	375	6.1765
Sup 07	374	6.5267
Sup 32	357	10.1472
Sup 49	359	10.8552
Sup 80	329	17.7675
Sup 72	329	17.7841
Sup104	355	11.1498

I**V.3.1.2.2. Evolution de la chute de tension par programme CARAT :**

Tableau (IV.3) *Evolution de la chute de tension par programme CARAT*

N°= sup	V(v)	ΔV %
Sup 03	390	2.48
Sup 04	384	4.05
Sup05	380	5.06
Sup 06	375	6.19
Sup 07	374	6.53
Sup 32	357	10.86
Sup 49	359	10.17
Sup 80	329	17.87
Sup 72	329	17.85
Sup 104	355	11.17

La zone en Gris indique les chutes de tension au delà de 10 %

Pour toute l'étude, nous nous sommes intéressés aux points bouts du réseau du poste 297. Qui sont donnés dans le tableau ci dessus.

IV.4.Analyse:

La lecture du tableau (I**V.1**) montre que la limite thermique de la liaison transfo-sup **N°2** (CU 38 **mm^2**) sera dépassée en l'année prochaine. Alors il y a problème de charge.

La lecture des tableaux **(IV. 2)** et (I**V.3**) montrent qu'il y'a un problème de chute de tension de l'ordre de **plus de 22** % pour les années prochaines au niveau des supports **N**°80 et 72 aussi au niveau de tous les points bout de réseau.

IV.5. Etude et analyse des différentes variantes *:*

IV.5.1. Schéma squelettique du réseau BT issu du poste 297 1er variante

Ensuite de la même manière on à réaliser par L'AUTOCADE, la figure (IV.2) qui est, se Schéma squelettique du réseau BT issu du poste 297 1er variante ,(voir l'annexe).

IV.5. 2. Créations de poste maçonné 250 kVA

Cette opération consiste à la création d'un poste Maçonné 250 KVA

IV.5.2.1.Créations d'injecteur :

Cette opération consiste à la création deux départs CT150 vers les supports 67 et 50 d'une longueur totale de 1200 Ml.

IV.5.2.2.Travaux de renforcement :

Le renforcement du classique Cu 17 mm^2 par le torsadé 70mm^2 entre les supports 66-67, supports 67—68 et supports 68—69 d'une longueur totale de **100** ml.

IV.5.2.3. Création d'ouvertures

On procédé à la création de points d'ouvertures entre :

- Sup 34 et le Sup 35
- Sup 60 et le Sup 61.

Après l'exécution des programmes CARAT et MATLAB®, la charge et la chute de tension, sont données ci dessous.

IV.5.3. 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®.

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

Tableau (IV.4) *Evolution de la charge par deux programmes MATLAB® et CARAT*

Portées	Courant Limite thermique (A)	Courant de charge (A)
Post 297-sup02	200	45
Post 297bis-sup67	225	44
Post 297bis-sup58	225	66
Sup02-sup03	200	44
Sup03-sup04	200	43
Sup04-sup05	118	40
Sup05-sup06	153	40
Sup06-sup07	153	10
Sup08-sup09	153	9
Sup09-sup10	118	3

IV.5.3.1Evolution de la chute de tension par programme MATLAB®

Tableau (IV.5) *Evolution de la chute de tension par programme MATLAB®.*

N ° support	La tension	ΔV(%)
Sup02	399	0.2025
Sup03	398	0.5875
Sup04	396	0.9530
Sup05	393	1.7069
Sup06	390	2.5372
Sup32	374	6.5100
Sup49	378	5.6000
Sup80	397	0.6989
Sup72	397	0.6713
Sup104	374	6.5730

IV.5.3.2 Evolution de la chute de tension par programme CARAT

Tableau (IV.6) *Evolution de la chute de tension par programme CARAT*

N ° support	La tension	ΔV(%)
Sup02	399	0.20
Sup03	398	0.59
Sup04	396	0.95
Sup05	393	1.71
Sup06	390	2.54
Sup32	374	6.51
Sup49	397	5.60
Sup80	397	0.66
Sup72	374	0.67
Sup104	374	6.57

IV.6. Synthèse d’investissement :

Tableau (IV.7) *: représenté* Synthèse d’investissement

Désignation des ouvrages	*Nature*	*Physique*	*Financier (KDA)*
• 900 MTS	MTS	900ml	4050
• Création poste maçonné 250 KVA		01	3400
• Création de 01 départ BTA(150mm^2)	BTA	60 ml	90
• Création de 01 départ BTA(150mm^2)	BTA	300ml	450
• Travaux de renforcement : Torsadé 70 mm^2		100 ml	75
Total			8065

IV.7. Schéma squelettique du réseau BT issu du poste 297 2^{mr} variante

La réalisation sous L'AUTOCADE sous à fournis la figure (IV.1). Schéma squelettique du réseau BT issu du poste 297 2^{em} variante ,(voir l'annexe).

IV.7.1 Evolution de la charge

Tableau (IV.8) *Evolution de la charge par deux programmes MATLAB® et CARAT*

Portées	**Courant Limite thermique (A)**	**Courant de charge (A)**
Post 297-sup02	200	45
Post 297bis-sup67	225	45
Post 297bis-sup58	225	66
Sup02-sup03	200	44
Sup03-sup04	200	43
Sup04-sup05	200	40
Sup05-sup06	118	40
Sup06-sup07	153	10
Sup07-sup08	153	10
Sup08-sup09	153	9

IV.7.2.1Evolution de la chute de tension par programme MATLAB®

Tableau (IV.9) *Evolution de la chute de tension par programme MATLAB®*

N ° support	La tension	ΔV(%)
Sup 02	399	0.1345
Sup03	398	0.5875
Sup04	396	0.9530
Sup05	393	1.7069
Sup06	390	2.5378
Sup32	374	6.5115
Sup49	382	4.4978
Sup80	397	0.6689
Sup72	397	0.6713
Sup104	381	4.7288

IV.7.2.2. Evolution de la chute de tension par programme CARAT

Tableau (IV.10) Evolution de la chute de tension par programme CARAT

N ° support	La tension	ΔV(%)
Sup02	399	0.20
Sup03	398	0.59
Sup04	396	0.95
Sup05	393	1.71
Sup06	390	2.54
Sup32	374	6.51
Sup49	382	4.50
Sup80	397	0.66
Sup72	397	0.67
Sup104	381	4.73

IV.8. Analyse

La lecture des résultats du tableau (IV.8), montre que la charge Maximale n'atteint pas la limite de 225A admissible pour le torsadé 150 mm^2.

Donc le problème des surcharges des départs ne se pose pas.

IV.9 Synthèse d'investissement :

Tableau (IV.11) : *représenté* Synthèse d'investissement

Désignation des ouvrages	*Nature*	*Physique*	*Financier (KDA)*
• 800 MTS	MTS	800ml	4000
• Création poste maçonné 250 KVA		01	3400
• Création de 02 départ BTA(150mm^2)	BTA	1200ml	1800
• Travaux de renforcement en CT70	BTA	100 ml	75
Total			9275

IV.10 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, une étude comparative à des résultats obtenus par les deux programmes suivante (MATLAB® et CARAT).

Dans le cadre de l'objectif d'étude d'un réseau de distribution en tenant compte les chutes de tension.

Après avoir mis en évidence quelques notions générales sur les réseaux de distribution, on a procédé à mettre en relief tous les principes liés au calcul nécessaire pour étudier un réseau électrique BT en tenant compte la chute de tension

L'étude de cas qui ont été effectuée sur le poste BT 297 alimentant les régions du quartier RMALI commune de MEDEA.

A travers les résultats obtenus dans les programmes MATLAB® et CARAT,

On remarque : les résultats sont similaires dans courant de charge et la chute de tension.

Mais il ya quelques améliorations par programme MATLAB®

Dans cette étude de réseau basse tension, nous nous sommes penches sur le calcul de la chut de tension dans plusieurs points d'un réseau BT issue du post 297 RMALI à Médéa a l'aide de deux programmes MATLAB ® et CARAT puisque la baisse de tension chez les abonnes provoque des distributions pour le matériel électrodomestique ainsi que les machines électrique avec risque de détérioration, nous avons trouve une chute de tension excessive en bout de réseau avec 22%.

Pour résoudre ce problème, nous avons propose la création d'un deuxième poste de transformation de 250kVA et le renforcement d'une partie de réseau ainsi la chute de tension chez les abonnes est réduite a moine de 10% d'âpres les normes.

Aussi, nous avons élaboré un programme sous MATLAB® qui possède les mêmes fonctions de programme commercial CARAT bien sur, nous avons validé notre programme avec le modèle CARAT.

En perspective, nous essayons d'inclure dans notre programme les options suivantes :

- Analyse de la défaillance.
- Evolution de la charge.
- Contingence N-1.
- Introduction d'énergie renouvelable.

De plus, ce programme sera utilisé par les étudiants de la spécialité réseaux électrique intéresses par les réseaux de distribution.

Annexe

I. Caractéristiques techniques du poste 297 :

*Type : Poste ACC.

* Marque : ENEL.

*Puissance : 160 kVA.

Nature : ACC
Puissance installée : 250 kVA
Type d'agglomération : semi urbain
Qualité de clientèle : Domestique / Agronomique
Longueur de réseau : 4.33 km
Nombre de support : 104
Nombre d'abonnés en monophasés : 142
Nombre d'abonnés en triphasé : 64

II. Explication du tableau des abonnées :

Voire (II.1) le tableau suivant contient 10 colonnes :

- Colonne 1 : Numéro par agence.
- Colonne 2 : longueur en (mètres).
- Colonne 3 : nature de la ligne (A) pour aérienne, (s)pour souterrain (T)

  Pour torsade.
- Colonne 4 : (R) pour réseau, (M) pour colonne montante.
- Colonne 5 : section de phase.
- Colonne 6 : section de nature.
- Colonne 7 et 8 : (CU) pour cuivre, (AL) pour Aluminium,(A) pour Autre.
- Colonne 9 : nombre d'abonnes monophasés.
- Colonne 10 : nombre d'abonnes triphasés.

Commune : MEDEA nom du poste : MEDEA CENTRE R'MALI3

Code poste MT/BT : 431 P297

Fonction : DP TYPE POSTE : AC

N° Transformateur/poste 1 N°disjoncteur / Transfo : 1

Nom du départ BT : DEPART 1

Tableau (II.2) *Explication du tableau des abonnées*

N°Arc	longueur	Nature	Type	Sect.phas	Sect.neut	Nat.phas	Nat.neut	Nb.br2f	Nb.br4f
2023	3	A	R	38.2	38.2	CU	CU	0	0
2024	44	A	R	38.2	38.2	CU	CU	0	0
2025	63	A	R	38.2	17.8	CU	CU	2	2
2026	37	A	R	27.6	17.8	CU	CU	0	0
2027	62	A	R	27.6	17.8	CU	CU	0	0
2028	186	A	R	17.8	17.8	CU	CU	1	0
2029	86	A	R	17.8	17.8	CU	CU	1	0
2030	59	A	R	17.8	17.8	CU	CU	0	0
2031	28	A	R	17.8	17.8	CU	CU	1	0
2032	115	A	R	27.6	17.8	CU	CU	0	1
2033	59	A	R	17.8	17.8	CU	CU	1	0
2034	63	A	R	27.6	17.8	CU	CU	1	1
2035	27	A	R	17.8	17.8	CU	CU	2	0
2036	67	A	R	17.8	17.8	CU	CU	2	1
2037	240	A	R	27.6	17.8	CU	CU	6	2
2038	50	A	R	17.8	17.8	CU	CU	7	0
2039	42	A	R	27.6	17.8	CU	CU	1	0
2040	28	A	R	17.8	17.8	CU	CU	5	0
2041	108	A	R	27.6	17.8	CU	CU	12	0
2042	44	A	R	17.8	17.8	CU	CU	4	0
2043	51	A	R	17.8	17.8	CU	CU	2	0
2044	137	A	R	38.2	17.8	CU	CU	0	2
2045	142	A	R	27.6	17.8	CU	CU	2	0
2046	174	A	R	27.6	17.8	CU	CU	6	2
2047	155	A	R	17.8	17.8	CU	CU	2	1
2048	43	A	R	17.8	17.8	CU	CU	6	0
2049	94	A	R	17.8	17.8	CU	CU	4	0
2050	56	A	R	17.8	17.8	CU	CU	0	2
2051	61	A	R	17.8	17.8	CU	CU	2	2
2052	46	A	R	17.8	17.8	CU	CU	0	1

2053	36	A	R	17.8	17.8	CU	CU	0	2
2054	84	A	R	17.8	17.8	CU	CU	1	4
2055	28	A	R	17.8	17.8	CU	CU	0	1
2056	55	T	R	35	17.8	CU	CU	0	1
2057	221	A	R	17.8	17.8	CU	CU	4	4
2058	25	A	R	17.8	17.8	CU	CU	0	1
2059	64	A	R	17.8	17.8	CU	CU	0	1
2060	147	A	R	17.8	17.8	CU	CU	2	6
2061	79	A	R	17.8	17.8	CU	CU	2	5
2062	35	A	R	17.8	17.8	CU	CU	3	4
2063	36	A	R	17.8	17.8	CU	CU	4	0
2064	24	A	R	17.8	17.8	CU	CU	3	0
2065	24	A	R	17.8	17.8	CU	CU	0	1
2066	25	A	R	17.8	17.8	CU	CU	2	1
2067	27	A	R	17.8	17.8	CU	CU	2	1
2068	215	A	R	27.6	27.6	CU	CU	0	0
2069	90	A	R	27.6	17.8	CU	CU	0	0
2070	11	A	R	27.6	17.8	CU	CU	2	0
2071	37	T	R	35	54.6	CU	CU	6	0
2072	115	A	R	27.6	27.6	CU	CU	2	0
2073	48	A	R	17.8	17.8	CU	CU	6	0
2074	120	A	R	27.6	27.6	CU	CU	1	0
2075	45	A	R	27.6	27.6	CU	CU	0	0
2076	55	A	R	17.8	17.8	CU	CU	1	1
2077	60	A	R	27.6	27.6	CU	CU	1	0

II.3.Tableaux de donner post 297

Voire (II.3) le tableau suivant contient 6 colonnes :

- Colonne 1 : Support amont.
- Colonne 2 : Support aval.
- Colonne 3 : Courant limite thermique (A).
- Colonne 4 : r résistance de conducteur (Ω/km).
- Colonne 5 : x réactance de condecteur (Ω/km).
- Colonne 6 : Longueur de la ligne (km).

nœud amont	nœud aval	Imax	R (Ω/km)	X (Ω/km)	L(Km)
INJECT	POST297	400	0.000	0.000	0.000
POST297	02	200	0.472	0.350	0.018

02	03	200	0.472	0.350	0.035
03	04	200	0.472	0.350	0.034
04	05	118	1010	0.35	0.041
05	06	153	0.650	0.350	0.065
06	07	153	0.650	0.350	0.071
07	08	153	0.650	0.350	0.051
08	09	153	0.650	0.350	0.073
09	10	118	1.010	0.350	0.048
10	11	118	1.010	0.350	0.044
09	12	118	1.010	0.350	0.062
09	13	118	1.010	0.350	0.031
06	14	153	0.650	0.350	0.067
14	15	153	0.650	0.350	0.054
15	16	118	1.010	0.350	0.062
15	17	153	0.650	0.350	0.066
17	18	153	0.650	0.350	0.030
17	19	153	0.650	0.350	0.042
19	20	118	1.010	0.350	0.031
17	21	118	1.010	0.350	0.055
21	22	118	1.010	0.350	0.068
22	23	118	1.010	0.350	0.065
23	24	118	1.010	0.350	0.063
24	25	118	1.010	0.350	0.045
24	26	118	1.010	0.350	0.031
26	27	118	1.010	0.350	0.038
26	28	118	1.010	0.350	0.038
28	29	118	1.010	0.350	0.039
29	30	118	1.010	0.350	0.040
30	31	118	1.010	0.350	0.047
30	32	118	0.472	0.350	0.054
04	33	200	0.472	0.350	0.039
33	34	200	0.472	0.350	0.055
34	35	200	0.472	0.350	0.052
35	36	200	0.472	0.350	0.075
36	37	200	0.472	0.350	0.073
37	38	153	0.650	0.350	0.052
38	39	118	1.010	0.350	0.034
39	40	118	1.010	0.350	0.033
40	41	118	1.010	0.35	0.025
41	42	118	1.010	0.350	0.045
37	43	118	1.010	0.350	0.035
43	44	118	1.010	0.350	0.043
44	45	118	1.010	0.350	0.042
45	46	118	1.010	0.350	0.048
46	47	118	1.010	0.350	0.046
46	48	118	1.010	0.350	0.044
48	49	118	1.010	0.350	0.056

35	50	200	0.472	0.350	0.028
50	51	200	0.472	0.350	0.034
51	52	153	0.650	0.350	0.036
52	53	153	0.650	0.350	0.031
51	54	153	0.650	0.350	0.049
54	55	118	1.010	0.350	0.051
55	56	118	1.010	0.350	0.039
54	57	118	1.010	0.350	0.039
54	58	118	1.010	0.350	0.031
58	59	118	1.010	0.350	0.058
58	60	118	1.010	0.350	0.044
60	61	118	1.010	0.350	0.043
61	62	118	1.010	0.350	0.052
62	63	118	1.010	0.350	0.048
62	64	118	1.010	0.350	0.049
64	65	118	1.010	0.350	0.028
64	66	118	1.010	0.350	0.032
66	67	118	1.010	0.350	0.038
67	68	118	1.010	0.350	0.032
68	69	118	1.010	0.350	0.032
69	70	118	1.010	0.350	0.033
70	71	118	1.010	0.350	0.034
71	72	118	1.010	0.350	0.031
67	73	118	1.010	0.350	0.042
73	74	118	1.010	0.350	0.038
74	75	118	1.010	0.350	0.039
75	76	118	1.010	0.350	0.039
75	77	118	1.010	0.350	0.027
74	78	118	1.010	0.350	0.027
78	80	118	1.010	0.350	0.030
35	81	153	0.650	0.350	0.043
81	82	153	0.650	0.350	0.052
82	83	153	0.650	0.350	0.048
83	84	118	1.010	0.350	0.049
84	85	153	0.650	0.350	0.028
85	86	153	0.650	0.350	0.032
85	87	118	1.010	0.350	0.038
83	88	153	0.650	0.350	0.032
88	89	153	0.650	0.350	0.032
89	90	153	0.650	0.350	0.033
89	91	153	0.650	0.350	0.034
91	92	153	0.650	0.350	0.031
92	93	153	0.650	0.350	0.042
89	94	153	0.650	0.350	0.038
94	95	153	0.650	0.350	0.039
95	96	153	0.650	0.350	0.039
94	97	153	0.650	0.350	0.027
97	98	153	0.650	0.350	0.027

98	99	153	0.650	0.350	0.028
99	100	153	0.650	0.350	0.030
98	101	153	0.650	0.350	0.030
101	102	118	1.010	0.350	0.030
101	103	153	0.650	0.350	0.030
103	104	153	0.650	0.350	0.030

REFERENCES

[01] Pearl, J., "HEURISTICS - intelligent search strategies for computer problem solving", Addison-Wesley, 1984.

[02] Arinal, J.C. & Ludot, J.P., "Recherche d'un arbre réalisable en réseau maillé", E.D.F. Bulletin DER - série B, No 1,1967, pp. 87-100.

[03] Heish, J., "Méthode heuristique pour la recherche d'un schéma arborescent", E.D.F. Bulletin DER - série B, No 1, 1967, pp. 79-87.

[04] Glamocanin, V., "Optimal loss reduction of distribution networks", IEEE, Trans, on Power Systems, Vol. 5, No. 3, Aug, 1990, pp. 774-782.

[05] Merlin, A. & Back, H., "Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration in an Urban Power Distribution System", Proc. of the 5th Power Systems Computation Conference, Cambridge, Sep, 1975, paper 1.2/6.

[06] Shirmohammadi, D. & Wayne Hong, H., "Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction", IEEE, Trans, on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, Apr, 1989, pp. 1492-1498.

[07] Ross, D.W. & Patton, J. & Cohen, A.I. & Carson, M., "New Methods for Evaluating Distribution and Control (DAC) Systems Benefits", IEEE, Trans, on Power App. and Sys., Vol. PAS-100, No. 6, Jun, 1981, pp. 2978-2986.

[08] 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.

[09] Aoki, K. & Nara, K. & Itoh, M. & Satoh, T. & Kuwabara, H., "A New Algorithm for Service Restoration in Distribution Systems", IEEE, Trans, on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, Jul, 1989, pp. 1832-1839.

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

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

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

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

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

[15] 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.

[16] Luenberger, D.G., "Introduction ()‹linear and nonlinear programming", Addison-Wesley, 1973.

[17] 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.

[18] Laurière, J.L., "Intelligence Artificielle: résolution de problèmes par l'Homme et la machine", Eyrolles, Paris, 1987.

[19] de Coulon, F. ◦Jufer, M., "Introduction à l'électrotechnique", Volume I du traité d'électricité, Georgi, St-Saphorin, 1978.

[20] Chiang, H-D.& Wang, J-C. & Cockings, 0. & Shin, H-D., "Optimal Capacitor Placements in Distribution Systems: Part 1: A New Formulation and the Overall Problem", IEEE, Trans, on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, Apr, 1990, pp. 634-642.

[21] Boite, R.& Neirynck, j.,"Théorie des réseaux de Kirchhoff', Volume IV du traité d'électricité, Georgi, St-Saphorin, 1978.

[22] Dimo, P., "Analyse nodale des réseaux d'énergie", Eyrolles, Paris, 1971.

[23] de Werra, D., "Eléments de Programmation Linéaire avec Application aux Graphes", Presses polytechniques romandes, Lausanne, 1990.

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

[25] Pearl, J., "HEURISTICS - intelligent search strategies for computer problem solving", Addison-Wesley, 1984

[26] Morelato, A.L. & Monticelli, A., "Heuristic Search Approch to Distribution System Restoration", IEEE, Trans, on Power Delivery, Vol. 4, No.Oct, 1989, pp. 2235-2241.