

P0014/05A

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur  
Et de la recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département : **GENIE ELECTRIQUE**

Projet de fin d'étude pour l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat  
En Electrotechnique

Thème

**Application de TABU SEARCH pour le placement optimal des capacités  
dans un réseau électrique**

Proposé par : Pr A. HELLAL

Etudié par : A. DJERROUMI

Promotion : juin 2005

E.N.P.10, Avenue Hassen Badi, EL HARRACH, ALGER

إن هذا العمل يتعرض إلى دراسة مشكلة وضع المكثفات (مكثفات الموازنة) في شبكة كهربائية وحلها باستعمال تقنية البحث الممنوع (TS). إن مشكلة وضع المكثفات تأخذ بعين الاعتبار كل المتطلبات فيما يخص المكثفات، الزيادة في الطاقة، طاقة استيعاب الناقل، التوتر الكهربائي في كل مستوى استهلاك، وأيضا التقليل من تكلفة وضع المكثفات ومن الطاقة الضائعة في الشبكة. لهذا تم استعمال هذه التقنية لاختيار أماكن وضع المكثفات وذلك لتقليل مجال البحث.

هذه التقنية طبقت على شبكة مكونة من 16 عقدة، وتحصلنا على نتائج جيدة.

الكلمات المفاتيح: الشبكة الكهربائية، البحث الممنوع، الوضع الانتقائي للمكثفات

#### **Abstract:**

In this work, the Capacitor placement problem in a radial distribution system is formulated and solved by a Tabu Search (TS) based solution algorithm. The Capacitor placement problem considers practical operating constraints of capacitors, load growth, capacity of the feeder and the upper and lower bound constraints of voltage at different load levels to minimize the investment cost of capacitors and system energy loss.

We applied this technique (TS) to a network of 16 nodes, and good results were obtained.

*Keywords: Electrical network, Tabu Search, optimal placement of capacities*

#### **Résumé:**

Ce travail, présente le problème de placement de condensateur dans un réseau électrique et sa résolution par la technique tabu search (TS). Le problème de placement de condensateur considère les contraintes de fonctionnement pratiques des condensateurs, la croissance de charge, la capacité du conducteur, les contraintes attachées d'avant de la tension à différents niveaux de charge, et de réduire au minimum le coût de placement de condensateurs et de déperdition d'énergie de système.

On a appliqué cet technique (TS) sur un réseau de 16 nœuds, et on a obtenu un bon résultat.

*Mots-clés : Réseau Electrique, Tabu Search, placement optimal de capacités*



## *Dédicace*

*A celle qui a su me consolider durant les moments les plus difficiles de ma vie, mon modèle d'affection et de bonté*

*..Ma mère, Ma mère, Ma mère*

*A celui qui m'a guidé par ces précieux conseils, qui a été toujours présent dans les pénibles moments*

*..Mon père*

*A mes frères, particulièrement à mon très cher frère Mohamed pour les conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer durant toutes mes études.*

*A tous mes frères : Ahmed, Omar, Mohamed, Abdelhak, Abdelkader, Abdessalem, Abderrahmane et Redha pour leur patience avec moi*

*A ma Sœur*

*A ma tante Fatma et sa famille*

*A la mémoire de mes grands parents*

*A mon grand père Massaoud*

*A toute ma grand famille*

*A tous mes amis à l'ENP, en particulier les « fin de cycle » promotion 2003 / 2004.*

*A tout mes amis surtout : Abdelghani, Hichem, Abdelouaheb, Smail, Mouslem, Abdelhakim, Nabil, Hichem, Mnouar, Ahmed, Said, Talha, Naim, Abdelaziz, Samir, Mohamed et Ali*

*Et que tous ceux que je n'aurais pas cités m'excusent, m'excusent, m'excusent,...*

*Je dédie ce travail.*

*Abdellah,*

## *Remerciement*

Quelques lignes ne pourront jamais exprimer la reconnaissance que j'éprouve envers tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué, par leurs conseils, leurs encouragements ou leurs amitiés à l'aboutissement de ce travail.

Mes vifs remerciements accompagnés de toute notre gratitude vont tout d'abord à notre promoteur Mr A.Hallel, pour m'avoir proposé ce sujet, pour les conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer.

Notre reconnaissance va particulièrement à tous nos enseignants à l'ENP, en particulier : Mr A.Mekhaldi, le chef de département pour tous ces aides.

Je tenais aussi à témoigner notre reconnaissance aux étudiants en poste graduation de l'ENP, en particuliers Mr L.Amine, et Y.ratiba et Belkbir, ils m'a généreusement conseillé, orienté et encouragé tout au long de ce projet.

Enfin, mes sincères remerciements à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, et particulièrement mes amis : ....



<i>Introduction générale</i> .....	1
------------------------------------	---

## **Chapitre I : Etude bibliographique**



I.1	Introduction.....	4
I.2	Algorithme heuristique moderne .....	6
I.2.1	Algorithme Génétique .....	6
I.2.2	recuit simulé parallèle (parallel simulated annealing).....	7
I.2.3	La recherche Tabou (Tabu Search).....	9
I.2.4	recherche réactive de tabou .....	10
I.3	Etude comparative.....	11
I.4	Résumé .....	12

## **Chapitre II : Etude de la technique de Tabu Search**

II.1	Introduction .....	14
II.2	Concepts de base.....	15
II.2.1	Historique.....	15
II.2.2	La recherche de Tabou.....	16
II.2.3	L'espace de recherche et structure de voisinage.....	17
II.2.4	Tabous.....	19
II.2.5	Critères d'aspiration .....	20
II.2.6	Un calibre pour la recherche simple de tabou .....	20
II.2.7	Critères d'arrêt .....	21
II.2.8	Recherche Tabou et listes probabilistes de candidat .....	22
II.3	Concepts intermédiaires.....	22
II.3.1	Intensification.....	23
II.3.2	Diversification .....	23
II.3.3	Permettre les solutions infaisables.....	24
II.3.4	Objectifs de remplacement et auxiliaires.....	25
II.4	Matières avancées et tendances récentes dans la Recherche Tabou.....	26
II.5	Autres idées sur la technique.....	27
II.5.1	Idées sur la programmation .....	27
II.5.2	La meilleur résultats.....	27
II.5.3	Bouts additionnels pour les Recherches Tabous probabilistes.....	28

II.5.4 Calibrage de paramètre et essai informatique .....	29
II.6 Conclusion.....	30

***Chapitre III : Etude de problème de placement optimal des capacités dans un réseau électrique***

III.1 Introduction.....	31
III.2 L'Energie Réactive .....	32
III.2.1 Energie, Puissance, et Déphasage .....	33
III.2.2 L'Energie Réactive.....	35
III.3 Les consommateurs de l'énergie réactive .....	36
III.3.1 Les machines synchrones.....	36
III.3.2 Les moteurs.....	36
III.3.3 Les transformateurs .....	36
III.4 Compensation de l'énergie réactive .....	37
III.4.1 Condensateur.....	38
III.4.1.1 Définition .....	38
III.4.1.2 Caractéristique tension/courant d'un condensateur.....	38
III.4.1.3 Énergie stockée par un condensateur parfait.....	39
III.4.2 Batteries de condensateurs B.T des usagers.....	39
III.4.3 Batteries de condensateurs dans les réseaux B.T .....	40
III.4.4 Batteries de condensateurs M.T .....	40
III.5 Calcul de puissance à compenser .....	41
III.6 Répartition des condensateurs entre M.T et B.T.....	43
III.7 Commutation des batteries de condensateurs .....	43
III.7.1.1 Cas d'une batterie unique mise en service.....	44
III.7.1.2 Cas d'une batterie unique mise hors service.....	44
III.7.2 Cas de plusieurs batteries en parallèle .....	44
III.8 Implantation des Batteries.....	45
III.8.1 Implantation globale.....	45
III.8.2 Implantation par secteur ou partiel.....	46
III.8.3 Implantation individuelle .....	46
III.9 Les précautions à prendre .....	47
III.9.1 Auto excitation .....	47



III.9.2 Harmoniques .....	47
III.9.3 Puissance des pas de régulation .....	47
III.9.4 Résistances de décharges .....	47
III.10 Conclusion .....	48

***Chapitre IV : Application de la technique Tabu Search (TS) au placement optimal des capacités, résultats numériques et conclusions***

IV.1 Introduction.....	49
IV.2 Description de problème.....	50
IV.2.1 Formulation de problème.....	51
IV.2.2 Équations d'écoulement de puissance.....	52
IV.2.3 Analyse de sensibilité.....	53
IV.3 Méthode de Recherche Tabou .....	54
IV.3.1 Mouvements et sélection .....	54
IV.3.2 Liste de Tabou.....	55
IV.3.3 Critère d'aspiration .....	56
IV.3.4 Intensification et diversification.....	56
IV.4 Algorithme de solution pour le placement de condensateur.....	57
IV.5 Résultats numériques.....	58
IV.5.1 Données de réseau.....	58
IV.5.2 Résultats après compensation .....	62
IV.6 Conclusion .....	64

<b><i>Conclusion Générale</i></b> .....	65
---	----

<b><i>Bibliographie</i></b> .....	66
-----------------------------------	----

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# INTRODUCTION GENERALE



## Introduction générale



Pour ses besoins domestiques et industriels, le monde moderne a besoin de plus en plus d'énergie et une partie importante de celle-ci est produite et utilisée sous forme d'énergie électrique. L'accroissement de la consommation de cette forme d'énergie est d'ailleurs considéré comme une caractéristique de développement de la société.

Malheureusement, les gisements naturels d'électricité n'existent pas ! Alors, pour satisfaire la demande en énergie électrique, qui ne se trouve pas dans la nature sous une forme directement exploitable. Il est nécessaire de la produire à partir d'une autre forme d'énergie que l'on appelle « énergie primaire », de la transporter, puis de la distribuer.

Depuis de nombreuses années, le distributeur d'énergie électrique s'efforce de garantir la qualité de la fourniture d'électricité. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur. Aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique prend une place prépondérante dans les systèmes de commande et de contrôle. Ces dispositifs sensibles, mais qui dégradent également la qualité de la tension existent dans toutes les catégories d'utilisateurs.

La notion de qualité du produit « électricité » est attachée au niveau de satisfaction de l'utilisateur. Les performances de ses équipements sont directement liées à la qualité de la tension d'alimentation. Par exemple, une variation de 10 % de l'amplitude de la tension se traduira par une perte de couple de 19 % pour une machine asynchrone.

Les équipements d'un utilisateur peuvent apporter des perturbations sur le réseau susceptibles de gêner les autres utilisateurs. Le distributeur (système d'alimentation) et l'utilisateur (installations) sont l'un et l'autre concernés par la qualité de l'électricité.

Une variété de méthodes a été consacrée à résoudre le problème de placement de condensateur. Dans les premiers travaux, la plupart des chercheurs ont employé la méthode analytique conventionnelle en même temps que de l'heuristique. D'autres ont considéré les



tailles de condensateur en tant que variables discrètes et ont utilisé la programmation dynamique pour résoudre le problème. Concernant l'endroit et la taille du condensateur en tant que variable continue, on a proposé un procédé itératif basé sur la recherche de gradient pour traiter le type fixe et commuté du problème d'installation du condensateur [NEM, 04]. Chiang et autres [CHI, 90] utilisent la technique d'optimisation du recuit simulé, pour rechercher la solution optimale globale au problème de placement du condensateur. Ce dernier est formulé comme un problème combinatoire discret d'optimisation. La méthode de recuit simulée peut fournir une solution optimale presque globale.

La Recherche Tabou est une stratégie pour résoudre le problème combinatoire d'optimisation. La stratégie de Recherche Tabou a été appliquée dans divers champs, et a donné la possibilité pour obtenir des solutions de hautes qualités dans des bas raisonnables de durée de calcul vérifiée. Le mécanisme de descente polarise la recherche vers des points avec des valeurs plus basses de la fonction objective, alors qu'usages spéciaux sont ajoutés pour éviter d'être emprisonnés dans les minimums locaux.

Dans ce travail, nous avons appliqué la méthode de Recherche Tabou pour résoudre le problème de placement optimal du condensateur.

Pour parvenir à cette fin, notre travail a été effectué selon le plan de travail suivant :

**Chapitre I**, nous avons présenté les différentes méthodes d'optimisation et leur propriété : Algorithme génétique, recuit simulé parallèle, recherche de tabou, et recherche réactive de tabou pour la restauration de service dans des systèmes de distribution. Une étude comparative entre les quatre méthodes a ensuite été effectuée.

**Chapitre II**, les concepts fondamentaux de la recherche de tabou (Tabu Search) d'un mode d'instruction sont développés et expliqués. La considération particulière des méthodes locales classiques de recherche est mise en apparence sur les éléments de base de toutes les Recherches Tabous heuristiques, à savoir, la définition de l'espace de recherche, de la structure de voisinage, et de la mémoire de recherche. Des conseils récents sur les recherches tabous sont également brièvement discutés.



**Chapitre III**, présente la formulation générale du problème de placement optimale des condensateurs en considérant : les contraintes de fonctionnement pratiques des condensateurs, la croissance de charge, la capacité du conducteur, les contraintes attachées de la tension à différents niveaux de charge.

**Le Chapitre IV**, traite de l'application de l'algorithme de recherche Tabou au problème de placement optimal des condensateurs dans le réseau électrique.

Nous terminerons enfin par une **conclusion**.

# CHAPITRE 1

## Étude bibliographique



## 1.1 Introduction

Dans la vie courante, nous sommes fréquemment confrontés à des problèmes d'optimisation plus ou moins complexes. Ces problèmes peuvent être exprimés sous la forme générale d'un « problème d'optimisation ». On définit alors une fonction objective (fonction de coût ou fonction profil), que l'on cherche à optimiser (minimiser ou maximiser) par rapport à tous les « paramètres » concernés.

On va présenter une étude comparative pour quatre algorithmes heuristiques modernes (MHAs) à la restauration de service dans des systèmes de distribution : la recherche réactive de tabou (Reactive Tabu Search), recherche tabou, recuit simulé parallèle (Parallel Simulated Annealing), et l'algorithme génétique (Genetic Algorithm). Puisque la restauration de service est une commande de secours aux centres de commande de distribution pour reconstituer des secteurs hors service aussitôt que possible, elle exige des solutions de calcul rapides et de haute qualité pour la satisfaction des clients. Le problème peut être formulé comme un problème combinatoire d'optimisation pour diviser le secteur hors service à chaque source d'énergie.

La satisfaction du client et la fiabilité du service sont premièrement concernés dans l'industrie énergétique. Plusieurs études sur l'expérience des entreprises d'électricité suggèrent que la satisfaction du client soit étroitement corrélée avec la fréquence d'interruption du service et la durée d'interruption. L'objectif principal de la restauration du service est de reconstituer autant de charges en tant que possible (i.e minimise la charge dans des secteurs hors service) en transférant les charges désactivées dans les secteurs hors service à d'autres conducteurs de support de distribution sans opération de violation et contraintes de fonctionnement par l'intermédiaire des reconfigurations du réseau. Le développement des procédures de service effectif de restauration est une approche rentable pour améliorer la fiabilité du service et par conséquent, augmenter la satisfaction du client. Par conséquent, la restauration rapide du service à un avantage multiple. Dans l'utilisation réelle, des opérateurs de distribution sont priés à service de restauration des secteurs hors service aussitôt que possible.



Le problème de restauration du service est un problème combinatoire, non linéaire, et un problème de contrainte d'optimisation. La complexité d'un tel problème appelle dans des doutes l'efficacité des procédures de restauration basées sur les directives préétablies.

Dans le passé, les efforts considérables ont été consacrés au sujet de la restauration de service dans les systèmes de distribution [Aok, 87] [Ima, 93]. Le problème a été adressé avec des méthodes telles que les algorithmes heuristiques [Aok, 88] [Aok, 89], les systèmes experts [Lui, 88], la base de données [Lin, 89], et le raisonnement brouillé. Cependant, ces méthodes produisent les solutions, qui peuvent même ne pas être suboptimales. Cependant, ils ont consacré leurs efforts à analyser le réseau neurologique lui-même et la méthode elle-même n'est pas pratique.

Récemment, des algorithmes heuristiques modernes (AHMs) [Ree, 93] comme l'algorithme génétique [Gol, 89], le recuit simulé parallèle [Mor, 94], la recherche de tabou [Glo, 89] [Glo, 90], et la recherche réactive de tabou [Bat, 94] [Bat, 95] ont été employés pour différents problèmes combinatoires d'optimisation comprenant le service de restauration dans des systèmes d'alimentation. Les auteurs ont développé un algorithme génétique parallèle pour la restauration de service et ont montré des résultats prometteurs sur plusieurs réseaux de distribution [Fuk, 95]. Cependant, la méthode exige les processeurs parallèles et, malheureusement, le poste de travail conventionnel de technologie (EWS) ou l'ordinateur individuel (PC) est encore utilisé pour l'ordinateur principal aux centres de commande pratiques de distribution. Par conséquent, une méthode efficace EWS-basée ou PC- basée est ardemment attendue pour l'exécution pratique de restauration de service.

Ce chapitre étudie l'applicabilité des quatre différents AHMs suivant le problème de restauration de service : algorithme génétique (GA), recuit simulé parallèle (PSA), recherche de tabou (TS), et recherche réactive de tabou (RTS).



## **I.2 Algorithmes Heuristiques Modernes**

### **I.2.1 Algorithme Génétique**

L'Algorithme Génétique (GA) est l'un des algorithmes stochastiques de recherche basé sur les mécanismes des gènes normaux. Une variable de solution pour le problème est d'abord représentée en utilisant les chromosomes artificiels (cordes). En d'autre terme, le problème est codé aux cordes que GA peut manipuler.

Une corde représente un état (recherchant le point) dans l'espace de solution. Puisque GA utilise un ensemble (population) de cordes (i.e. Points de recherche multiples), il appartient à un genre de méthodes de recherche parallèle. Elle modifie des cordes (recherchant des points) employant le choix normal et les opérateurs génétiques tels que le pont et la mutation. Après convergence, des cordes sont décodées aux variables originales de solution et les solutions sont obtenues. Le procédé de GA peut être exprimé comme suit :

#### **Etape 1 : Représentation du problème en utilisant des cordes**

Les paramètres du problème original sont représentés en utilisant une série de nombre de virgules binaires, décimales, flottantes, à savoir la corde.

#### **Etape 2 : Génération d'un premier ensemble d'états (population de corde)**

Des cordes sont généralement produites aléatoirement. Cependant, il est parfois efficace de produire les cordes initiales en utilisant les méthodes de problème dépendantes. Ces méthodes produisent les points de recherche initiaux suboptimaux dans l'espace de solution. En utilisant les points de recherches initiales suboptimal on réalise parfois la convergence rapide à la solution optimale.

#### **Etape 3 : Évaluation et choix de chaque corde**

Des cordes sont évaluées en utilisant la fonction de forme physique, qui représente la tendance de la forme physique de chaque corde au problème de cible. Un bon candidat pour la fonction de forme physique est la fonction objective du problème. Fondamentalement, les cordes qui ont des valeurs plus élevées de forme physique sont choisies pour la prochaine génération avec la probabilité élevée. En d'autre terme, des meilleurs points de recherche sont



choisis selon leurs valeurs de fonction objective. Le GA original utilise le choix de roue de roulette [Gol, 89]. Cependant, on a proposé des méthodes améliorées telles que le prélèvement stochastique avec et sans la stratégie du remplacement et de l'élite.

**Etape 4 :** Opérations de corde (génération des états voisins).

GA effectue des opérations de corde telles que le pont et la mutation. Les opérations produisent de nouveaux points de recherche en utilisant les points de recherche courants. Le croisement produit des deux nouveaux points de recherche des deux points de recherche courants. La mutation produit un nouveau point de recherche à partir d'un point de recherche courant.

Des opérations normales de choix et de corde sont répétées jusqu'à ce que les cordes soient convergées à la solution optimale ou suboptimale.

### **1.2.2 Recuit Simulé Parallèle (Parallel Simulated Annealing)**

Le recuit simulé parallèle trouve ses origines dans la thermodynamique. Cette méthode est issue d'une analogie entre le phénomène physique de refroidissement lent d'un corps en fusion, qui le conduit à un état solide, de basse énergie. Il faut abaisser lentement la température, en marquant des paliers suffisamment longs pour que le corps atteigne l'«équilibre thermodynamique» à chaque palier de température. Pour les matériaux, cette basse énergie  $E$  se manifeste par l'obtention d'une structure régulière, comme dans les cristaux et l'acier.

Le recuit simulé parallèle est une extension de recuit simulé. Bien que recuit simulé soit une technique attrayante d'optimisation, la petite transition d'état fait souvent coincer recuit simulé dans des minimum locaux dans les cas où l'espace de solution du problème de cible est grand ou les contraintes du problème de cible sont strictes. Afin de surmonter les problèmes, PSA parallélise les sous-programmes de la transition d'état à recuit simulé initiale à obtenir mieux la recherche se dirige efficacement. PSA utilise fondamentalement un point de recherche comme recuit simulé.

Cependant, elle produit des états voisins multiples plutôt qu'un état simple comme recuit simulé. Elle laisse découvrir une solution près d'un minimum global sur un éventail dû



à manipuler un ensemble de candidats de solution. Les caractéristiques de PSA sont récapitulées comme suit :

- a) PSA a une possibilité distincte d'atteindre une solution optimale due aux points de recherche multiples.
- b) PSA a des meilleures caractéristiques de convergence en raison du choix du meilleur état parmi des candidats de solution.

L'analogie exploitée par le recuit simulé consiste à considérer une fonction  $f$  à minimiser comme fonction d'énergie et une solution  $x$  peut être considérée comme un état donné de la matière dont  $f(x)$  est l'énergie.

Pour une « température »  $T$  donnée, à partir d'une solution courante  $x$ , on considère une transformation élémentaire qui changerait  $x$  en  $S(x)$ . Si cette perturbation induit une diminution de la valeur de la fonction objective  $f$ ,  $\Delta f = f(S(x)) - f(x) < 0$ , elle est acceptée.

Dans le cas contraire, si  $\Delta f = f(S(x)) - f(x) > 0$ , la perturbation est acceptée tout de même

avec une probabilité  $p = e^{-\frac{\Delta f}{T}}$ .

L'algorithme de PSA peut être écrit comme suit :

#### **Etape 1 : Initialisation**

Donner l'état initial en recherchant le point  $x_0$  et la température  $T_0$  et évaluant la fonction  $E(x)$  d'énergie, qui est produite par la fonction objective du problème Original.

#### **Etape 2 : Génération et évaluation des états voisins**

Produire plusieurs états de perturbation  $\Delta x_i$  ( $\Delta x$  du point de recherche) de l'état actuel ( $x$ ) et évaluer la fonction d'énergie  $E(x + \Delta x_i)$  à chaque état voisin.

Calculer l'énergie  $\Delta E$  en utilisant l'équation suivante :

$$\Delta E = \min_i \{E(x + \Delta x_i)\} - E(x) \quad (1)$$

#### **Etape 3 : Génération du prochain état**

Si la condition suivante est satisfaite



$$\Delta E < 0 \quad (2)$$

D'où

$$\exp(-\Delta E / T_k) > R \quad (3)$$

Alors l'état actuel est changé en

$$x = x + \Delta x_i \quad (4)$$

Mettre à jour la température et répéter l'étape 2 et 3 jusqu'à ce que le critère de convergence est satisfait.

### 1.2.3 Recherche Tabou (Tabu Search)

Fred Glover a proposé en 1986 une nouvelle approche qu'il a appelé Recherche Tabou (Tabu Search). En fait, beaucoup d'éléments de cette première proposition de recherche Tabou, et quelques éléments des élaborations postérieures de Recherche Tabou ont été présentés par Glover en 1977, y compris la mémoire courte de limite pour empêcher l'inversion des mouvements récents, et la mémoire à plus long terme de fréquence pour renforcer les composants attrayants [Glo, 89].

Le principe de base de Recherche Tabou doit poursuivre la recherche locale toutes les fois qu'il rencontre un optimum local. Le cycle des solutions précédemment visitées est empêché par l'utilisation *des mémoires*, appelées *les listes de tabou*, de qui enregistrent l'histoire récente de la recherche, une idée principale qui peut être liée aux concepts d'intelligence artificielle [Glo, 90]. Il est intéressant de noter que, la même année, Hansen a proposé une approche semblable, qu'il a appelée *la rapidité de montée / descente la plus rapide*.

Des Recherche Tabou sont basés sur l'utilisation des techniques prohibitions basées et algorithmes heuristiques de base comme la recherche locale. Par conséquent, l'avantage principal de la Recherche Tabou en ce qui concerne GA conventionnel et SA mensonges dans l'utilisation intelligente de l'histoire passée de la recherche à affecter ses futures procédures de recherche. Puisque la méthode utilise a liste de tabou pour enregistrer l'histoire passée de la recherche, l'efficace la structure de la liste de tabou est importante pour le calcul rapide.



Le procédé des Recherches Tabou peut être exprimé comme suit :

**Étape 1 : Initialisation**

Donner l'état initial, en recherchant le point  $x_0$  et mettre état actuel dans la liste du tabu.

**Étape 2 : Génération et évaluation des états voisins**

Produire tous les états voisins possibles et vérifier que les états soient tabou ou pas.

**Étape 3 : Génération du prochain état**

Déplacer l'état actuel au prochain, déclarer qu'il n'est pas tabou et avoir la valeur la plus basse de fonction objective.

Répéter l'étape 2 et 3 jusqu'à ce que le critère de convergence soit satisfait.

### 1.2.4 Recherche Réactive de Tabou

Les méthodes heuristiques modernes conventionnelles aiment GA, SA, et les recherches tabous exigent ajuster des paramètres de recherche à la recherche efficace.

Cependant, en général, les valeurs des paramètres appropriés dépendent de chaque problème. Par conséquent, un problème d'accord de paramètre est connu en tant qu'un des inconvénients du MHAs. Le cadre de la Recherche Réactive propose l'introduction des arrangements (réactives) de rétroaction heuristique pour les problèmes discrets d'optimisation [Bat, 94]. RTS est l'une des méthodes de recherche réactive et il rétroaction a basé le mécanisme d'accord de la Longueur de Tabou (LT) et le mécanisme automatisé d'équilibre de la diversification et de l'intensification. RTS stocke tous les états recherchés. Après qu'un mouvement soit effectué, l'algorithme vérifie si le point de recherche courant a été déjà trouvé. Le LT augmente si un point de recherche est répété, alors que le LT diminue si aucune répétition ne se produit pendant une longue période suffisante. Ce mécanisme d'ajustement nous permet de nous échapper de la vallée locale. D'ailleurs, puisque le mécanisme de base de Tabu search ne peut pas éviter de longs cycles de recherche, RTS présente le procédé



d'évasion. Il se compose d'un certain nombre d'étapes aléatoires à partir du point de recherche courant.

La recherche efficace dans l'espace de solution exige l'équilibre de la diversification et de l'intensification. GA réalise l'équilibre par les opérations de corde et le mécanisme de choix, et exige parfois un procédé local plus efficace de recherche. PSA réalise la recherche parallèle par plusieurs procédures conventionnelles de recherche de SA. Cependant, elle exige les processeurs parallèles pour pratique accélèrent. Les recherches taboues réalisent l'équilibre entre la diversification et l'intensification en utilisant une liste de tabou. RTS, d'ailleurs, renforce le mécanisme en utilisant le mécanisme de réaction et d'évasion.

### 1.3 Etude Comparative

La même méthode est utilisée pour la génération de l'état initial parmi toutes les méthodes comparées. Bien que les méthodes probabilistes soient utilisées pour la génération de l'état initiale, le procédé de recherche peut être commencé employer la même sorte des états initiaux. Les caractéristiques probabilistes ont été étudiées dans la simulation. En conséquence, la cible pour la comparaison est comment changer les états recherchés du procédé de recherche. Le même procédé est utilisé pour la mutation par GA et génération des états voisins par PSA, TS, et RTS.

Le procédé effectue l'échange de la direction de source d'une charge terminale dans la plupart des cas, et lui correspond à des procédés de recherches locales. Au contraire, le pont par GA exécute l'échange d'une source de sous réseau partiel et lui est correspond à un procédé global de recherche. Le problème formulé pour la restauration de service devrait exécuter le circuit de calcul pour les points et le contrôle modifié la recherche si des contraintes sont violées ou pas. Par conséquent, elle prend du temps pour évaluer les points modifiés de recherche. Les observations suivantes peuvent être trouvées :

- GA peut utiliser le pont, un genre de procédé global de recherche. Par conséquent, GA peut changer les états actuels plus rigoureusement comparés à d'autres méthodes. GA



exécute le procédé global et local de recherche avec une certaine probabilité. Au contraire, PSA, TS, et RTS exécutent seulement le procédé local de recherche pour déplacer les prochains états chaque fois. Il n'est pas clair que les stratégies sont plus efficaces particulièrement pour la restauration de services.

- GA utilise beaucoup de points de recherche et cela prend du long temps à évaluer les points modifiés de recherche. Le nombre de l'évaluation pour rechercher des points dépend seulement du nombre de cordes et probabilité pour le pont et la mutation. Au contraire, PSA, TS, et RTS utilisent seulement un point de recherche. Cependant, ils doivent évaluer plusieurs états voisins pour se déplacer aux prochains états. Par conséquent, si le nombre d'états voisins est petit, PSA, TS, et RTS peut avoir moins de temps de calcul comparé à GA à se déplacer au prochain état.
- GA et PSA peuvent revisiter les états déjà recherchés beaucoup de périodes. Au contraire, les TS et les RTS interdisent à revisiter les états déjà recherchés et ils peuvent réaliser plus un procédé efficace de recherche. Quand les TS produisent de la recherche les cycles, RTS peuvent produire d'une solution plus de haute qualité que des TS. Autrement, les TS et le RTS peuvent tracer la trajectoire différente de recherche selon la modification de la Liste de Tabou (TL).

#### ***1.4 Résumé***

Dans ce chapitre, on a présenté différentes méthodes d'optimisation et leur propriété Algorithme génétique, recuit simulé parallèle, recherche de tabou, et recherche réactive de tabou, pour la restauration de service dans des systèmes de distribution.

Il est important de considérer la priorité et la fiabilité de charge et la complexité de commutation dans la restauration de service. Par exemple, une des manières de manipuler la priorité et la fiabilité de charge est d'utiliser les limites pesées de pénalité dans la fonction objective. Elle est également importante pour considérer la complexité de commutation. Une



manière simple est pour réduire au minimum la différence des états de commutation entre le réseau de défaut de post et la cible ont reconstituée le réseau. Autre manière de produire des procédures de commutation est de vérifier chacune des ordres de commutation avec précision. Elle prend du temps et elle peut ne pas convenir considérant la vitesse courante d'ordinateur.

Notre objectif final est de développer une méthode de reconfiguration de réseau considérant la minimisation de perte et la restauration de système.

# CHAPITRE 2

---

*Etude de la technique de Tabu search*

---



## II.1 Introduction

En optimisation combinatoire, de nombreux problèmes s'avèrent souvent difficiles à résoudre de manière exacte. Ceci n'est pas du à un manque de connaissance mathématique, mais plutôt à des problèmes techniques. En effet, la résolution d'un problème dans lequel on considère des instances de taille comparable à celles rencontrées dans la pratique conduit souvent à se heurter à des problèmes de taille mémoire et de temps de calcul trop importants.

De sorte à contrer ces obstacles, il faut recourir à des méthodes d'approximation de la solution. On ne cherchera plus à obtenir forcément la meilleure solution mais plutôt une solution de "bonne qualité" obtenue en un temps minimal. Deux principales classes d'algorithmes répondent à ce besoin :

Les algorithmes de type constructif qui construisent leur solution un élément à la fois sans jamais remettre en question les choix passés. Ces algorithmes fournissent souvent des solutions de mauvaise qualité.

Les méthodes d'exploration locale qui partant d'une solution réalisable cherchent à l'améliorer pas à pas. Ces méthodes restent très coûteuses en terme de ressources informatiques.

Cependant, ces deux approches présentent le défaut de ne pas pouvoir progresser au delà du premier optimum local rencontré. Ainsi, de nouvelles heuristiques ont été créées pour y faire face : recuit simulé, algorithmes génétiques et méthode tabou.

La méthode tabou s'est développée au début des années 80. Elle s'est révélée particulièrement efficace et a été appliquée avec succès à de nombreux problèmes difficiles.

Au cours des quinze dernières années, la présentation des applications de recherche de Tabou, une méthode heuristique à l'origine proposée par Glover en 1977 [Glo, 77], à de divers problèmes combinatoires sont apparues dans la littérature de recherche opérationnelle. Dans plusieurs cas, les méthodes décrites fournissent des solutions très près de l'optimalité et sont parmi le plus efficace, si pas le meilleur, pour aborder les problèmes difficiles actuels. Ces succès ont rendu de Recherche Tabou extrêmement populaire parmi ceux intéressés à trouver des bonnes solutions aux grands problèmes combinatoires produits dans beaucoup



d'arrangements pratiques. Plusieurs papiers, chapitres de livre, éditions spéciales et livres ont examiné la littérature riche de Recherche Tabou. Malgré cette littérature abondante, il semble toujours être beaucoup de chercheurs qu'ils sont désireux d'appliquer des Recherches Tabou à de nouveaux arrangements de problème, ils trouvent la difficulté de saisir correctement les concepts fondamentaux de la méthode, de ses forces et de ses limitations, et proposer des réalisations efficaces.

## II.2 Concepts de base

### II.2.1 Historique

Avant de présenter les concepts de base des Tabu Search, nous croyons qu'il est utile de retourner à temps d'essayer de comprendre mieux la genèse de la méthode et comment elle se relie aux travaux précédents.

L'heuristique, c-à-d, rapprochent des techniques de solution, ont été employées depuis les commencements de la recherche opérationnelle pour aborder des problèmes combinatoires difficiles. Avec le développement de la théorie de complexité au début des années 70, il est apparu clairement que, puisque la plupart de ces problèmes étaient en effet *un peu durs*, il y avait peu d'espoir de ne trouver jamais des procédures exactes efficaces de solution pour elles. Cette réalisation a souligné le rôle de l'heuristique pour résoudre les problèmes combinatoires qui ont été produits dans des applications réelles et qui ont dû être abordés. Tandis que beaucoup de différentes approches étaient proposées et expérimentées avec les plus populaires et ont été basées sur des techniques locales d'amélioration de la recherche (LS : local Search). Le LS peut être rudement récapitulé comme procédé itératif de recherche qui, à partir d'une première solution faisable, l'améliore progressivement en appliquant une série de modifications locales (ou *de mouvements*). A chaque itération, la recherche se déplace à une solution faisable d'amélioration qui diffère seulement et légèrement de la courante (en fait, la différence entre les solutions précédentes et nouvelles s'élève à une des modifications locales). La recherche se termine quand elle rencontre un optimum local en ce qui concerne les transformations qu'il considère, une limitation importante de la méthode : à moins qu'on



soit extrêmement chanceux, cet optimum local est souvent une solution assez médiocre. Dans le LS, la qualité des durées de calcul obtenues et de solution dépendent habituellement fortement de la "richesse" de l'ensemble de transformations (mouvements) considérées à chaque itération de l'heuristique.

En 1983, le monde de l'optimisation combinatoire a été brisé par l'aspect d'un papier en lequel les auteurs (Kirkpatrick, Gelatt et Vecchi) décrivaient une nouvelle approche heuristique appelée *le recuit simulé* (Simulated Annealing : SA) qui pourrait être montré pour converger à une solution optimale d'un problème combinatoire, quoique dans la durée de calcul infini. Basé sur l'analogie avec la mécanique statistique, SA peut être interprétée comme forme de promenade aléatoire commandée dans l'espace des solutions faisables. L'apparition de SA a indiqué qu'on pourrait rechercher d'autres manières d'aborder des problèmes combinatoires d'optimisation et a stimulé l'intérêt de la communauté de recherches. En années suivantes, beaucoup d'autres nouvelles approches, la plupart du temps basées sur des analogies avec des phénomènes normaux, ont été proposées (*des recherches tabou, des systèmes de fourmi, des méthodes de seuil*) et, ainsi avec des quelques plus anciennes, telles que *les algorithmes génétiques* (Hollande, 1975), elles ont gagné une popularité croissante. Maintenant collectivement connu sous le nom de Méta-Heuristique (une limite à l'origine inventée par Glover en 1986) [Glo, 86], ces méthodes sont devenues au cours des quinze dernières années le principal bord des approches heuristiques pour résoudre des problèmes combinatoires d'optimisation.

## II.2.2 La recherche de Tabou

Basé sur certains de ses travaux précédents, Fred Glover a proposé en 1986 [Glo, 86] une nouvelle approche, qu'il a appelée Recherche Tabou (Tabu Search), pour permettre à des méthodes de Recherche locale (LS) de surmonter des optimums locaux. En fait, beaucoup d'éléments de cette première proposition de Recherche Tabou, et quelques éléments des élaborations postérieurs de Recherche Tabou, ont été présentés en Glover, 1977, y compris la mémoire courte de limite pour empêcher l'inversion des mouvements récents, et de la mémoire à plus long terme de fréquence de renforcer les composants attrayants. Le principe de base de Recherche Tabou doit poursuivre le LS toutes les fois qu'il rencontre un optimum



local en laissant non-améliorant des mouvements ; le cycle de nouveau aux solutions précédemment visitées est empêché par l'utilisation *des mémoires*, appelée *les listes de tabou*, de qui enregistrent l'histoire récente de la recherche, une idée principale qui peut être liée aux concepts d'intelligence artificielle. Il est intéressant de noter que, la même année, Hansen a proposé une approche semblable, qu'il a appelée *la rapidité de montée / descente* la plus rapide.

Il est également important de remarquer que Glover n'a pas vu de Recherche Tabou en tant qu'heuristique approprié, mais plutôt en tant que Méta-Heuristique, c-à-d, une stratégie générale pour l'heuristique "intérieure" de guidage et de contrôle spécifiquement conçue pour problèmes actuels.

### II.2.3 L'espace de recherche et structure de voisinage

Comme nous avons juste mentionné, le Recherche Tabou est une prolongation des méthodes classiques de LS. En fait, un Recherche Tabou de base peut être vu comme simple combinaison de LS avec des mémoires à court terme. Il suit que les deux premiers éléments de base de toute la Recherche Tabou heuristique est la définition de son *espace de recherche* et sa *structure de voisinage*.

L'espace de recherche d'un LS ou de Recherche Tabou heuristique est simplement l'espace de toutes les solutions possibles qui peuvent être considérées (visité) pendant la recherche. Tandis que dans ce cas la définition de l'espace de recherche semble tout à fait normale, elle n'est pas toujours ainsi. Dans ce contexte, on a pu évidemment employer car un espace de recherche est le plein espace faisable.

En fait, ce type d'approche a été employé avec succès par Crainic, Gendreau et Farvolden (année 2000) pour résoudre le problème polyvalent de conception de réseau de charge fixe.

Il est également important de noter que ce n'est pas toujours une bonne idée de limiter l'espace de recherche aux solutions faisables; dans beaucoup de cas, permettre à la recherche de se déplacer aux solutions infaisables est souhaitable, et parfois nécessaire.

Étroitement lié à la définition de l'espace de recherche est cela de la structure de voisinage. A chaque itération de Recherche Tabou, les transformations locales qui peuvent



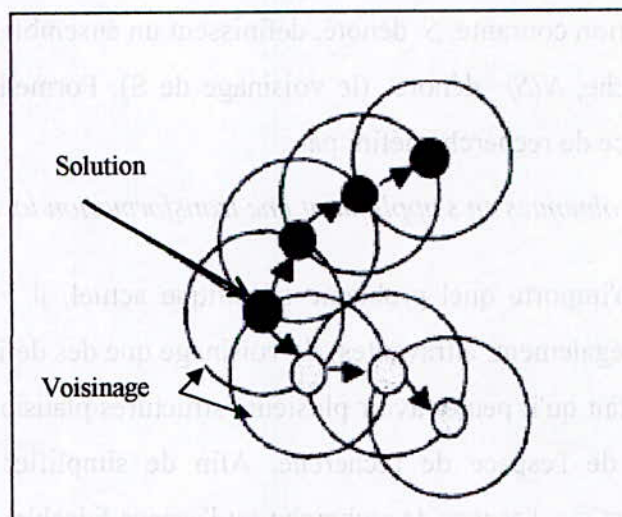
être appliquées à la solution courante,  $S$  dénoté, définissent un ensemble de solutions voisines dans l'espace de recherche,  $N(S)$  dénoté (le voisinage de  $S$ ). Formellement,  $N(S)$  est un sous-ensemble de l'espace de recherche défini par :

$$N(S) = \{\text{solutions obtenues en s'appliquant une transformation locale simple à } S\}.$$

En général, pour n'importe quel problème spécifique actuel, il y a beaucoup plus de structures possibles (et également, attrayantes) de voisinage que des définitions de l'espace de recherche. Ceci suit du fait qu'il peut y avoir plusieurs structures plausibles de voisinage pour une définition donnée de l'espace de recherche. Afin de simplifier la discussion, nous supposons dans le suivant que l'espace de recherche est l'espace faisable.

Quand différentes définitions de l'espace de recherche sont considérées pour n'importe quel problème donné, les structures de voisinage différeront inévitablement à un degré considérable. Si l'espace de recherche est défini en ce qui concerne les variables, les structures de voisinage impliqueront habituellement le prétendu *Ajouter/baisser* et "*permuter*" les mouvements qui changent respectivement le statut d'un emplacement (ce mouvement s'élève à effectuer simultanément un mouvement d'ajouter et un mouvement de baisser). Si, cependant, l'espace de recherche est l'ensemble de points extrêmes de l'ensemble de vecteurs faisables d'écoulement, ces mouvements deviennent sans signification.

La discussion précédente devrait avoir clarifié un point important : le choix d'un espace de recherche et d'une structure de voisinage est de loin l'étape la plus critique dans la conception de toutes les recherches tabous heuristiques. C'est à cette étape qu'on doit faire la meilleure utilisation de la compréhension et de la connaissance qu'il a du problème actuel.



**Figure II.1** : Schéma représentant la structure de voisinage et les solutions itératives.

## II.2.4 Tabous

Les tabous sont l'un des éléments distinctifs des Recherches Tabous une fois comparés au LS. Comme nous avons déjà mentionné, des tabous sont employés pour empêcher un cycle où éloigner des optimums locaux par la non-amélioration des mouvements. Ceci est réalisé en déclarant les mouvements *de tabou* (rejet) qui renversent l'effet des mouvements récents. Les tabous sont également utiles pour aider l'éloigner de recherche des parties précédemment visitées de l'espace de recherche et pour effectuer ainsi une exploration plus étendue.

Des tabous sont stockés dans *une mémoire à court terme* de la recherche (la *liste de tabou*) et habituellement seulement une quantité fixe et assez limitée d'information est enregistrée. Dans n'importe quel contexte donné, il y a plusieurs possibilités concernant l'information spécifique qui est enregistrée. On pourrait enregistrer les solutions complètes, mais ceci exige beaucoup de stockage et le rend cher de vérifier si un mouvement potentiel est tabou ou pas; il est donc rarement employé. Les tabous les plus généralement utilisés impliquent d'enregistrer les dernières transformations exécutées sur la solution courante et d'interdire des transformations renversées; d'autres sont basés sur les caractéristiques principales des solutions elles-mêmes ou des mouvements.

Des listes multiples de tabou peuvent être employées simultanément et sont parfois recommandées.



Des listes standard de tabou sont habituellement mises en application en tant que listes circulaires de longueur fixe. On lui a montré, cependant, que les tabous de longueur constante ne peuvent pas toujours empêcher le cycle, et quelques auteurs ont proposé de changer la longueur de liste de tabou pendant la recherche. Une autre solution est de produire aléatoirement de la tenure de tabou de chaque mouvement dans un certain intervalle indiqué ; employer cette approche exige un arrangement quelque peu différent pour les tabous d'enregistrement qui alors sont habituellement stockés pendant que *des étiquettes* dans une rangée, les entrées dans cette rangée enregistreront habituellement le nombre d'itérations jusqu'auquel un mouvement est tabou.

### II.2.5 Critères d'aspiration

Tandis que standard aux Recherches Tabous, les recherches tabous peut être parfois trop puissant : ils peuvent interdire des mouvements attrayants, même lorsqu'il n'y a aucun danger du cycle, ou ils peuvent mener à une stagnation globale du processus de recherche. Il est ainsi nécessaire d'utiliser les dispositifs algorithmiques qui nous permettront *de retirer* des tabous (d'annulation). Ceux-ci s'appellent *les critères d'aspiration*. Le critère d'aspiration le plus simple et le plus généralement utilisé (trouvé dans presque toutes les réalisations de recherche Tabou) consiste en permettant un mouvement, même si c'est un tabou, s'il a comme conséquence une solution avec une valeur objective meilleure que celle de la solution la plus connue courante (puisque la nouvelle solution évidemment n'a pas été précédemment visitée). Des critères beaucoup plus compliqués d'aspiration ont été proposés et avec succès mis en application, mais ils sont rarement employés. La règle principale à cet égard est que si le cycle ne peut pas se produire, des tabous peuvent être négligés.

### II.2.6 Un calibre pour la recherche simple de tabou

Nous sommes maintenant en position pour donner un calibre général pour des Recherches Tabous, intégrant les éléments que nous avons vus jusqu'ici. Nous supposons que nous essayons de réduire au minimum une fonction  $f(S)$  au-dessus d'un certain domaine et nous appliquons la prétendue version de la "meilleure amélioration" des Recherches Tabous,

c-à-d, la version dans laquelle on choisit à chaque itération le meilleur mouvement disponible (c'est la version la plus généralement utilisée des Recherches Tabous).

### Notation

- $S$ , la solution courante,
- $S^*$ , la solution la plus connue,
- $f^*$ , valeur de  $S^*$ ,
- $N(S)$ , le voisinage de  $S$ ,
- $\tilde{N}(S)$ , le sous-ensemble "admissible" de  $N(S)$  (c-à-d, non tabou ou permis par aspiration).

### Initialisation

Choisir (construction) une première solution  $S_0$ .

Faire  $S = S_0$ ,  $f^* = f(S_0)$ ,  $S^* = S_0$ ,  $T = \emptyset$ .

### Recherche

Tandis que *le critère d'arrêt non satisfait*

- Choisir  $S'$  dans *l'argmin*  $[f(S')]$  ;  
 $S' \in \tilde{N}(S)$
- si  $f(S) < f^*$ , faire alors  $f^* = f(S)$ ,  $S^* = S$  ;
- tabou record pour le mouvement courant dans  $T$  (l'entrée la plus ancienne d'effacement au besoin) ;

Fin boucle

### II.2.7 Critères d'arrêt

Dans la théorie, la recherche pourrait continuer pour toujours, à moins que la valeur optimale du problème actuel soit connue à l'avance. Dans la pratique, évidemment, la recherche doit être arrêtée à un certain point. Le plus généralement utilisé arrêtant des critères dans les Recherches Tabous sont :

- après un nombre fixe d'itérations (ou d'une quantité fixe de TEMPS- CPU) ;
- après un certain nombre d'itérations sans amélioration en valeur de fonction objective (le critère utilisé dans la plupart des réalisations) ;



- quand l'objectif atteint une valeur- seuil pré spécifiée.

Dans des arrangements complexes de tabou, la recherche est habituellement arrêtée après exécution d'un ordre *des phases*, la durée de chaque phase est déterminée par un des critères ci-dessus.

### **II.2.8 Recherche Tabou et listes probabilistes de candidat**

Dans les Recherches Tabous "réguliers", on doit évaluer l'objectif pour chaque élément du voisinage  $N(S)$  de la solution courante. Ceci peut prouver extrêmement cher du point de vue informatique. Une alternative doit considérer à la place seulement un échantillon aléatoire  $N'(S)$  de  $N(S)$ , de ce fait réduisant de manière significative le fardeau informatique. Un autre dispositif attrayant de cette alternative est que l'aspect aléatoire supplémentaire peut agir en tant que mécanisme de cycle; ceci permet à nous d'employer des listes plus courtes de tabou qu'être nécessaire si une pleine exploration du voisinage était effectuée. Un de côté négatif, il doit noter que, dans ce cas, on peut manquer d'excellentes solutions. Des probabilités peuvent également être appliquées aux critères de déclenchement de tabou.

Une autre manière de commander le nombre de mouvements examinés est au moyen de stratégies *de liste de candidat*, qui fournissent des manières plus stratégiques de produire d'un sous-ensemble utile  $N'(S)$  de  $N(S)$ . L'approche probabiliste peut être considérée comme un exemple d'une stratégie de liste de candidat, et peut également être employée pour modifier une telle stratégie. Le manque d'aborder en juste proportion les questions impliquées en créant les listes efficaces de candidat est l'une des imperfections plus remarquables qui différencie une exécution naïve de Recherche Tabou d'une qui plus solidement est fondue [Lag, 97].

### **II.3 Concepts intermédiaires**

Les Recherches Tabous simples comme décrit ci-dessus peuvent et avec succès résoudre des problèmes difficiles, mais dans la plupart des cas, des éléments additionnels doit être inclus dans la stratégie de recherche pour la rendre entièrement efficace. Nous passons en revue maintenant brièvement le plus important de ces derniers.



### II.3.1 Intensification

L'idée derrière le concept de l'intensification de recherche est que, car un intelligent humain être ferait probablement, on devrait explorer plus complètement les parties de l'espace de recherche qui semblent "promettant" afin de s'assurer que les meilleures solutions dans ces secteurs sont en effet trouvées. De temps en temps, on cesserait ainsi le processus de recherche normal pour exécuter une phase d'intensification. En général, l'intensification est basée sur une certaine *mémoire à moyen terme*, dans laquelle on enregistre le nombre d'itérations consécutives que les divers "composants de solution" ont été présents dans la solution courante sans interruption. Une approche typique à l'intensification est de remettre en marche la recherche de la meilleure solution actuellement connue et "geler" (difficulté) dans elle les composants qui semblent plus attrayants. Une autre technique qui est souvent employée consiste en changeant la structure de voisinage en une permettant des mouvements plus puissants ou plus divers. Dans les Recherches Tabous probabilistes, on a pu augmenter la dimension de l'échantillon ou commuter à la recherche sans prélèvement.

L'intensification est employée dans beaucoup de réalisations de Recherche Tabou, mais il n'est pas toujours nécessaire. C'est parce qu'il y a beaucoup de situations où la recherche exécutée par le processus de recherche normal est assez complète. Il n'y a ainsi aucun besoin de passer le temps explorant plus soigneusement les parties de l'espace de recherche qui ont été déjà visitées, et cette fois peut être employé plus efficacement car nous verrons en ce moment.

### II.3.2 Diversification

Un des problèmes principaux de toutes les méthodes basées sur la recherche locale s'approche, et ceci inclut des Recherches Tabous malgré l'impact salutaire des tabous, et qu'ils tendent à être trop des "gens du pays" (pendant que leur nom implique), c-à-d, ils tendent à dépenser la plupart, si pas tout, leur temps dans une partie restreinte de l'espace de recherche. La conséquence négative de ce fait est que, bien que de bonne solutions puissent être obtenues, on peut n'explorer pas les parties les plus intéressantes de l'espace de recherche et ne



ne finit pas ainsi vers le haut avec les solutions qui sont encore jolies loin des optimales. La *diversification* est un mécanisme algorithmique qui essaye d'alléger ce problème en forçant la recherche dans des secteurs précédemment encore inconnus de l'espace de recherche. Elle est habituellement basée sur une certaine forme de *mémoire à long terme* de la recherche, telle qu'une *mémoire de fréquence*, dans laquelle on enregistre tout le nombre d'itérations (depuis le commencement de la recherche) qui les divers "composants de solution" ont été présents dans la solution courante ou ont été impliqués dans les mouvements choisis. Dans les cas où il est possible d'identifier des "régions" utiles de l'espace de recherche, la mémoire de fréquence peut être raffinée pour dépister le nombre d'itérations dépensées dans ces différentes régions.

Il y a deux techniques principales de diversification. Le premier, appelé *diversification de relancement*, ce qui implique forcer quelques composants rarement utilisés dans la solution courante (ou la meilleure solution connue) et de remettre en marche la recherche de ce point. La deuxième méthode de diversification, *diversification continue* qui intègre des considérations de diversification directement dans le processus de recherche régulier. Ceci est réalisé en polarisant l'évaluation des mouvements possibles en ajoutant à l'objectif une petite limite liée aux fréquences composantes. Une troisième manière de réaliser la diversification est l'*oscillation stratégique*.

Avant de fermer cette sous-section, nous voudrions soumettre à une contrainte cela assurant la diversification appropriée de recherche est probablement l'issue la plus critique dans la conception de l'heuristique de Recherche tabou. Elle devrait être adressée avec soin extrême vers le commencement dans la phase de conception et être revisitée si les résultats obtenus ne sont pas jusqu'aux espérances.

### II.3.3 Permettre les solutions infaisables

La comptabilité pour toutes les contraintes de problème dans la définition de l'espace de recherche limite trop souvent le processus de recherche trop et peut mener aux solutions médiocres. Donc la relaxation de contrainte est une stratégie attrayante, puisqu'elle crée un plus grand espace de recherche qui peut être exploré avec des structures "plus simples" de voisinage. La relaxation de contrainte est facilement mise en application en laissant tomber des contraintes choisies de la définition de l'espace de recherche et en s'ajoutant aux pénalités



pesées objectives pour des violations de contrainte. Ceci, cependant, soulève la question de trouver la charge correcte pour des violations de contrainte. Une manière intéressante d'éviter ce problème est d'employer *des pénalités autoréglables*, c-à-d, des charges sont ajustées dynamiquement sur la base de l'histoire récente de la recherche : des charges sont augmentées si seulement des solutions infaisables étaient produites dans les dernières itérations, et sont diminués si toutes les solutions récentes étaient faisables. Des charges de pénalité peuvent également modifiés systématiquement pour conduire la recherche pour croiser la frontière de praticabilité de l'espace de recherche et pour induire ainsi la diversification. Cette technique, connue sous le nom d'oscillation *stratégique*, a été présentée dès 1977 par Glover il a employé plusieurs procédures réussies de Recherche Tabou [Glo, 77] (une variante importante oscille parmi les types alternatifs des mouvements, par conséquent de structures de voisinage, alors qu'une autre oscille autour d'une valeur choisie pour une fonction critique).

### II.3.4 Objectifs de remplacement et auxiliaires

Il y a beaucoup de problèmes pour lesquels la véritable fonction objective est tout à fait coûteuse pour évaluer. Quand ceci se produit, l'évaluation des mouvements peut devenir prohibitive même si le prélèvement est employé. Une approche efficace pour manipuler cette issue est d'évaluer des voisins en utilisant un objectif de remplacement, c-à-d, une fonction qui est corrélée avec l'objectif vrai, mais exige moins l'informatique, afin d'identifier ou a placer des candidats prometteurs (solutions potentielles réalisant les meilleures valeurs pour le substitut). L'objectif vrai est alors calculé pour ce petit ensemble de mouvements de candidats et les meilleurs choisis pour devenir la nouvelle solution courante.

Une autre difficulté fréquemment rencontrée est que la fonction objective peut ne pas fournir assez d'informations pour conduire efficacement la recherche à des secteurs plus intéressants de l'espace de recherche. En ce cas, il est absolument nécessaire de définir *une fonction objective auxiliaire* pour orienter la recherche. Une telle fonction doit mesurer d'une manière quelconque les attributs souhaitables des solutions. Il convient noter que proposer un objectif auxiliaire efficace n'est pas toujours facile et peut exiger un processus prolongé d'épreuve et d'erreurs. Dans quelques autres cas, heureusement, l'objectif auxiliaire est évident pour n'importe qui au courant du problème actuel.



## II.4 Matières avancées et tendances récentes dans la Recherche Tabou

Les concepts et les techniques décrites dans les sections précédentes sont suffisants pour concevoir l'heuristique efficace de Recherche Tabou pour beaucoup de problèmes combinatoires. La plupart des réalisations de Recherche Tabou, dont plusieurs étaient extrêmement réussies, comptaient en effet presque exclusivement sur ces composants algorithmiques. Cependant, la plupart de principales recherches de bord dans les Recherches Tabous se servent des concepts et des techniques plus avancés.

Une grande partie de la recherche récente dans les Recherches Tabous traite des diverses techniques pour rendre la recherche plus efficace. Celles-ci incluent des méthodes pour exploiter mieux l'information qui devient disponible pendant la recherche et créer des points mieux de départ, comme des opérateurs plus puissants de voisinage et des stratégies parallèles de recherche. Les nombreuses techniques pour la fabrication d'une meilleure utilisation de l'information sont d'importance particulière puisqu'elles peuvent mener aux améliorations dramatiques d'exécution. Beaucoup de ces derniers se fondent sur *des solutions d'élite* (les meilleures solutions précédemment produites) ou sur des parties de ces derniers pour créer de nouvelles solutions, le raisonnement étant que "réduit en fragments" des éléments d'excellentes solutions sont souvent identifiés tout à fait dans le processus de recherche, mais qui le défi est d'accomplir ces fragments ou pour les recombinaison.

Une autre tendance importante dans les Recherche Tabous (c'est une, en fait, tendance dominante dans le domaine entier de méta-heuristique) est *hybridation*, c-à-d, en utilisant des Recherches Tabous en même temps que d'autres approches de solution telles que des algorithmes génétiques, relaxation lagrangienne, programmation de contrainte, génération de colonne, et techniques de programmation de nombres entiers.

Les Recherches Tabous recherchent a également commencé à éloigner de ses domaines d'application traditionnels (problèmes de théorie de graphique, programmant, cheminement de véhicule) aux neufs : optimisation continue (Rolland, 1996), optimisation de multi-critères, programmation stochastique, programmation de nombre entier mélangée (Lokketangen et Glover, 1996 ; Crainic, Gendreau et Farvolden, 2000), problèmes en temps réel de décision (Gendreau et autres, 1999), etc... Ces nouveaux secteurs confrontent des chercheurs avec les nouveaux défis qui, à leur tour, réclament le roman et les prolongements originaux de la méthode.



## II.5 Autres idées sur la Technique

### II.5.1 Idées sur la programmation

Des nouveaux venus aux Recherches Tabous essayant de s'appliquer la méthode à un problème qu'ils souhaitent résoudre sont souvent confondus au sujet de ce qu'ils doivent faire pour proposer une exécution réussie. Fondamentalement, ils ne savent pas où commencer. Le procédé étape par étape suivant peut aider beaucoup et fournit un cadre utile pour faire commencer.

#### Un procédé étape par étape

1. **Penser** beaucoup au problème actuel en se concentrant sur la définition **de l'espace de recherche** et **de la structure de voisinage**.
2. **Mettre en application** une version **simple** basée sur cette définition de l'espace de recherche et cette structure de voisinage.
3. **Recueillir les statistiques** sur l'exécution de cet heuristique simple. Il est habituellement utile en ce moment de présenter une variété **de mémoires**, telles que des mémoires de fréquence, pour dépister vraiment ce que l'heuristique.
4. **Analyser les résultats** et **ajuster** le procédé en conséquence. C'est en ce moment qu'on devrait par la suite présenter des mécanismes pour l'intensification de recherche et la diversification ou d'autres dispositifs intermédiaires. Une particulière attention devrait être prêtée **à la diversification**, puisque c'est souvent où les procédures simples de Recherches Tabou échouent.

### II.5.2 Le meilleur résultat

Malgré que suivre soigneusement le procédé précédent, on finit vers le haut avec un heuristique qui néanmoins produit des résultats médiocres. Si ceci se produit, les bouts suivants peuvent s'avérer utiles :

1. S'il y a **des contraintes**, considérer **les comme pénalité**. Laisser la recherche se déplacer aux solutions infaisables est souvent nécessaire dans des problèmes fortement contraints de tenir compte d'une exploration significative de l'espace de recherche.
2. Reconsidérer **la structure de voisinage** et la changer au besoin. Beaucoup de réalisations de Recherche Tabou échouent parce que la structure de voisinage est trop



simple. En particulier, on devrait s'assurer que la structure choisie de voisinage tient compte d'une évaluation utile des mouvements possibles (c-à-d, les mouvements qui semblent intuitivement déplacer la recherche dans la "bonne" direction devraient être ceux qui sont susceptibles pour être choisis) ; ce pourrait également être une bonne idée de présenter **un objectif de remplacement** pour réaliser ceci.

3. **Recueillir plus de statistiques.**
4. **Suivre l'exécution de l'algorithme point par point** sur quelques exemples raisonnablement classés.
5. Reconsidérer **la diversification**. Comme cité précédemment, c'est un dispositif critique dans la plupart des réalisations de Recherche Tabou.

### **II.5.3 Bouts additionnels pour les Recherches Tabous probabilistes**

Tandis que c'est une manière efficace d'aborder beaucoup de problèmes, les Recherches Tabous probabilistes créent des problèmes de ses propres qui doivent être soigneusement adressés. Le plus important de ce dernier est le fait que, le plus souvent, les meilleures solutions retournées par les Recherches Tabous probabilistes ne seront pas des optimums locaux en ce qui concerne la structure de voisinage employé. C'est particulièrement ennuyant puisque, dans ce cas, des meilleures solutions peuvent être facilement obtenues, égalisent parfois manuellement. Une manière facile de venir autour de ceci est d'exécuter simplement une phase locale d'amélioration (employant le même opérateur de voisinage) de la meilleure solution trouvée à l'extrémité des Recherches Tabous elle-même. On pourrait alternativement commuter aux Recherches Tabous sans prélèvement (encore de la meilleure solution trouvée) pour une courte durée avant d'accomplir l'algorithme. Une technique probablement plus efficace doit ajouter dans toute la recherche une étape d'intensification sans prélèvement ; de cette façon, les meilleures solutions disponibles dans les diverses régions de l'espace de recherche exploré par la méthode seront trouvées et enregistrées [Glo, 89].

### **II.5.4 Calibrage de paramètre et essai informatique**

Le calibrage de paramètre et les expériences informatiques sont les étapes principales dans le développement de n'importe quel algorithme. C'est particulièrement vrai dans le cas des Recherches Tabous, puisque le nombre de paramètres exigés par la plupart des



réalisations est assez grand et puisque l'exécution d'un procédé donné peut changer tout à fait de manière significative quand des valeurs de paramètres sont modifiées. La première étape dans n'importe quelle expérimentation informatique sérieuse est de choisir un bon ensemble d'exemples de repères, de préférence avec une certaine mesure raisonnable de leur difficulté et avec un éventail de taille et de difficulté. Cet ensemble devrait être coupé en deux sous-ensembles, le premier étant employé aux étapes algorithmiques de calibrage de conception et de paramètre, et le deuxième réservé pour réaliser les essais informatiques finals. La raison de faire ainsi est tout à fait simple : quand les paramètres de calibrage, c-à-d, les valeurs de paramètres de conclusion sont excellentes pour les exemples actuels, mais ils sont pauvres en général, parce que ces valeurs fournissent trop bon "adapter" (du point de vue algorithmique). Des méthodes avec plusieurs paramètres devraient être calibrées ainsi sur des ensembles d'exemples beaucoup plus grands que ceux avec peu de paramètres pour assurer un degré raisonnable de robustesse. Le procédé de calibrage lui-même devrait procéder dans plusieurs étapes [Glo, 86]:

1. Réaliser l'essai exploratoire pour trouver de bonnes gammes de paramètres. Ceci peut être fait en courant l'heuristique avec une variété d'arrangements de paramètres.
2. Fixer la valeur des paramètres qui semblent être "robustes", c-à-d, qui ne semblent pas avoir un impact significatif sur l'exécution du procédé.
3. Réaliser l'essai systématique pour les autres paramètres. Il est habituellement plus efficace d'examiner des valeurs pour seulement un paramètre simple à la fois, les autres qui sont fixes à ce qui semblent être des valeurs raisonnables. On doit faire attention, cependant, pour des effets entre les paramètres. Là où de tels effets existent, il peut être important d'examiner conjointement des paires ou des triplets de paramètres, qui peuvent être une tâche extrêmement longue.



## II.6 Algorithme complet de la méthode Tabu Search

**Initialisation:**

Identification d'une solution initiale  
Création d'une liste tabou vide  
Poser meilleure solution = solution  
Définition d'une condition d'arrêt

**Répéter:**

**if** valeur de la solution > valeur de la meilleure solution **then**

Meilleure solution = solution

**If** la condition d'arrêt n'est pas satisfaite **then begin**

Ajouter la solution à la liste tabou

**If** la liste tabou est pleine **then**

Supprimer les anciennes solutions de la liste taboue

Trouver une nouvelle solution par des transformations de la solution.

**If** aucune solution trouvée **or**

**If** aucune nouvelle solution meilleure trouvée pour une longue période

**then**

Générer aléatoirement une nouvelle solution

**If** la liste tabou ne contient pas la nouvelle solution générée **then**

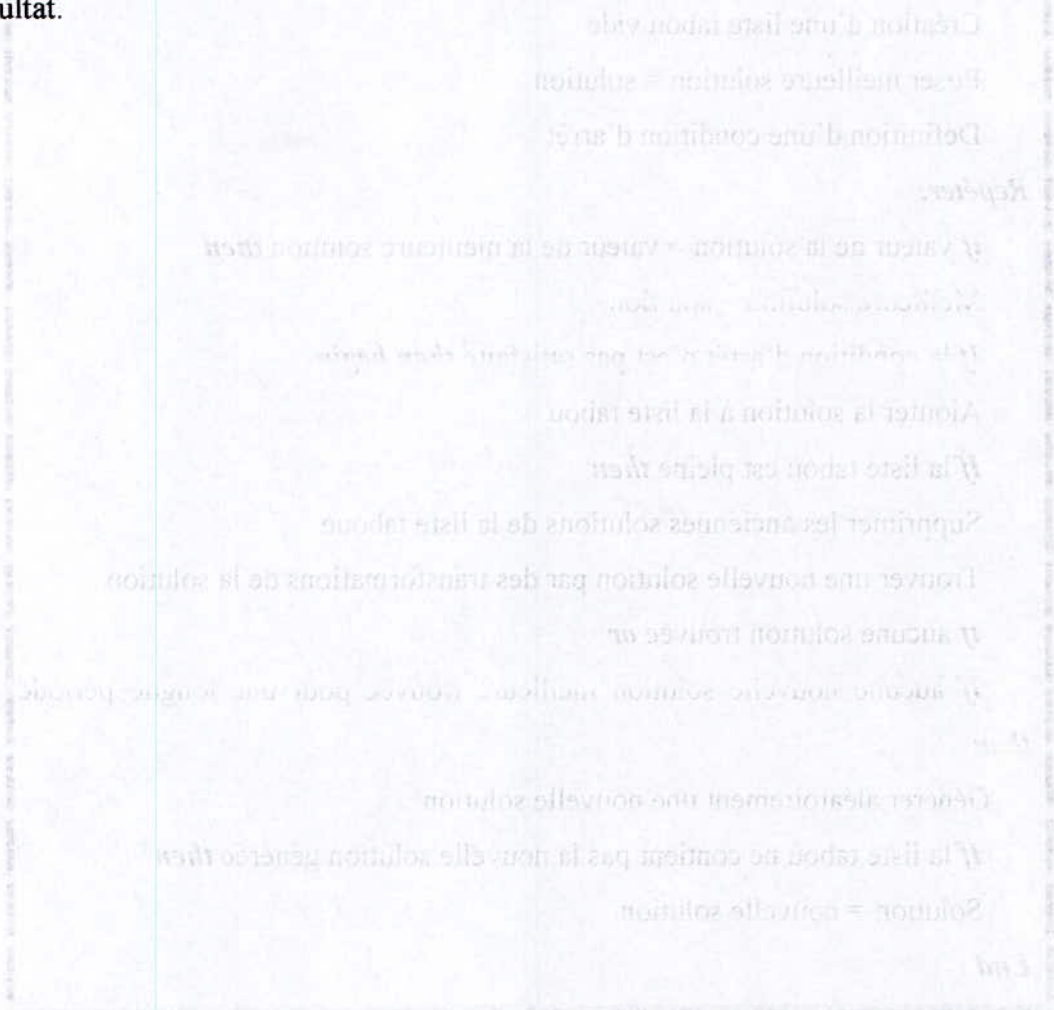
Solution = nouvelle solution.

**End**

## II.7 Conclusion

La recherche tabou est une approche algorithmique puissante qui a été appliquée avec le grand succès à beaucoup de problèmes combinatoires difficiles. Un dispositif particulièrement gentil des Recherches Tabous est que, comme toutes les approches basées sur la recherche locale, il peut tout à fait facilement manipuler même avec la complicité des contraintes qui sont typiquement trouvées dans des applications réelles. C'est ainsi une approche vraiment

pratique. Une bonne Recherche Tabou heuristiques peut développer pour un problème si la connaissance significative de problème est absolument exigée pour exécuter les étapes les plus fondamentales du développement de n'importe quel procédé de Recherche Tabou, à savoir le choix d'un espace de recherche et d'une structure efficace de voisinage. Si l'espace de recherche et/ou la structure de voisinage sont insatisfaisants, on ne peut pas obtenir aucune résultat.



II.7 Conclusion

La recherche tabou est une approche algorithmique puissante qui a été appliquée avec le grand succès à beaucoup de problèmes combinatoires difficiles. En réponse à particulièrement grand nombre de Recherches Tabou est que, comme toutes les approches basées sur la recherche locale, il peut être fait facilement manipuler même avec la complexité des problèmes qui sera typiquement trouvés dans des applications réelles. C'est ainsi que l'approche véritablement



# CHAPITRE 3

## CHAPITRE 3

---

**Etude de problème de placement optimal  
des capacités dans un réseau électrique**

---

# CHAPITRE 3

---

Étude de problème de placement optimal  
des capacités dans un réseau électrique

---



### III.1 Introduction

Tout système électrique utilisant le courant alternatif met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive. Dans les processus industriels utilisant l'énergie électrique seule l'énergie active est transformée au sein de l'outil de production en énergie mécanique, thermique, lumineuse, etc... L'autre, l'énergie réactive sert notamment à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques (moteurs, autotransformateurs, etc...). Par ailleurs, certains constituants des réseaux électriques de transport et de distribution (transformateurs, lignes, etc...) consomment également dans certains cas d'exploitation de l'énergie réactive.

#### **Point de vue du distributeur d'énergie**

La circulation des puissances active et réactive provoque des pertes actives et des chutes de tension dans les conducteurs. Les pertes actives réduisent le rendement global des réseaux et les chutes de tension sont néfastes au maintien d'une bonne tension que doit le distributeur à ses clients. Ainsi est-il donc préférable sur le plan technique de les produire le plus près possible des lieux de consommation.

- Pour la puissance active, on montre qu'il est plus économique de la produire d'une manière centralisée et de la distribuer ensuite aux clients. Le coût du transport est bien moins élevé que le surcoût d'une production réalisée localement.
- En revanche, pour la puissance réactive, il est économiquement plus intéressant de la produire, en tout ou partie, localement par des générateurs d'énergie réactive autonomes comme les condensateurs par exemple. Cette pratique est appelée COMPENSATION.

#### **Point de vue du client :**

Comme pour le distributeur, le transport de la puissance réactive sur le réseau intérieur du client entraîne les inconvénients suivants :

- surcharge ou surdimensionnement des installations (transfo, câbles, etc...).
- pertes actives plus importantes dans ces ouvrages.
- augmentation de la facture d'électricité.

## III.2 L'Energie Réactive

### III.2.1 Energie, Puissance, et Déphasage

Tout récepteur dont l'intensité est déphasé par rapport à la tension, absorbe une énergie totale que l'on appelle énergie apparente ( $E_{app}$ ). Cette énergie, qui s'exprime généralement en kilovolt-ampère-heure (kVAh), correspond à la puissance apparente  $S$  (kVA) et se répartit comme suit :

- **Énergie active** ( $E_a$ ) : exprimée en kilowatt heure (kWh). Elle est utilisable, après transformation par le récepteur, sous forme de travail ou de chaleur. A cette énergie correspond la puissance active  $P$  (kW).
- **Énergie réactive** ( $E_r$ ) : exprimée en kilovar heure (kvarh). Elle sert en particulier à créer dans les bobinages des moteurs, transformateurs, le champ magnétique sans lequel le fonctionnement serait impossible. A cette énergie correspond la puissance réactive  $Q$  (kvar). Contrairement à la précédente, cette énergie est dite "improductive" pour l'utilisateur.

$$E_{app} = E_a + E_r$$

$$E_{app} = \sqrt{(E_a)^2 + (E_r)^2}$$

Et pour les puissances :

$$S = P + Q$$

$$S = \sqrt{(P)^2 + (Q)^2}$$

En réseau triphasé :

$$S = \sqrt{3}UI$$

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

$$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi$$

En réseau monophasé, le terme  $\sqrt{3}$  disparaît.



### Facteur de puissance ( $\cos \varphi$ )

Par définition le facteur de puissance -autrement dit le  $\cos \varphi$  d'un appareil électrique- est égal au rapport de la puissance active P (kW) sur la puissance apparente S (kVA) et peut varier de 0 à 1.

$$\cos \varphi = \frac{P(\text{kW})}{S(\text{kVA})}$$

Il permet ainsi d'identifier facilement les appareils plus ou moins consommateurs d'énergie réactive.

- Un facteur de puissance égal à 1 ne conduira à aucune consommation d'énergie réactive (résistance pure).
- Un facteur de puissance inférieur à 1 conduira à une consommation d'énergie réactive d'autant plus importante qu'il se rapproche de 0 (inductance pure).

Dans une installation électrique, le facteur de puissance pourra être différent d'un atelier à un autre selon les appareils installés et la manière dont ils sont utilisés (fonctionnement à vide, pleine charge, ...).

Les appareils de comptage d'énergie mesurant plus facilement les consommations d'énergie active et réactive, on a choisi de faire apparaître pour sa clientèle au niveau des factures d'électricité le terme de  $\text{tg} \varphi$ .

La  $\text{tg} \varphi$  est le quotient entre l'énergie réactive  $E_r$  (kvarh) et l'énergie active  $E_a$  (kWh) consommées pendant le même temps.

$$\text{tg} \varphi = \frac{E_r}{E_a}$$

A l'inverse du  $\cos \varphi$ , on s'aperçoit facilement que la valeur de la  $\text{tg} \varphi$  doit être la plus petit possible afin d'avoir le minimum de consommation d'énergie réactive.

Cos $\varphi$  et tg $\varphi$  sont liés par la relation suivante :

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1+(\text{tg} \varphi)^2}}$$

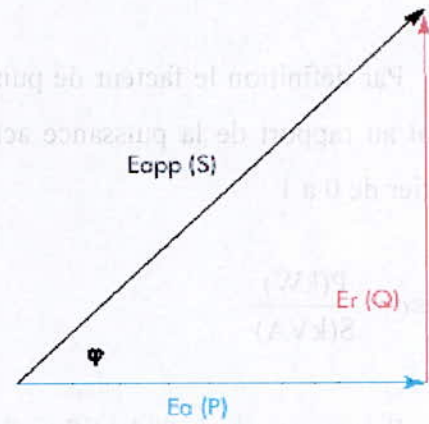
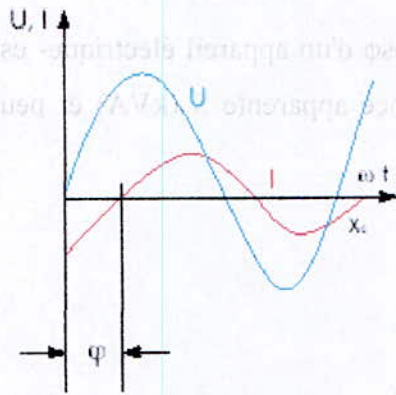


Figure III.1 Déphasage entre intensité et tension (angle φ) et diagramme de l'énergie

### III.2.2 L'Énergie Réactive

L'énergie réactive est liée à l'existence des champs électriques et magnétiques, au fond, à l'aspect ondulatoire de l'énergie électrique. Dans le langage de la physique moderne, on dira que les énergies électriques et magnétiques sont liées aux déformations « élastiques » de l'espace caractéristique des champs électriques et d'induction magnétique. En effet, l'énergie est emmagasinée dans tout volume élémentaire  $dv$  de l'espace environnant un conducteur. Cette énergie est cependant plus dense à proximité du conducteur que loin de lui.

$$Dw = \frac{1}{2} (\epsilon \epsilon_0 E^2 + 1/\mu \mu_0 B^2) dv$$

En régime sinusoïdal ( $u = \sqrt{2} U \cos \omega t$ ) on a :

- $P = U^2/R (1 + \cos 2\omega t)$  - la puissance active,
- $Q_c = U^2 \omega C \sin 2\omega t$  - la puissance réactive,
- $Q_m = (U^2 / L\omega) \sin 2\omega t$  - la puissance magnétique.

En général ou les puissances  $Q_c$  et  $Q_m$  ont des modules différents, le réseau doit véhiculer une puissance supplémentaire : la puissance réactive qu'on désigne généralement par  $Q$ .

Le réseau fournit au point considéré :  $Q = Q_m - Q_c$



On dit que l'appareil auquel est fourni cette puissance réactive :

- consomme de l'énergie réactive si  $Q$  est positif.
- produit de l'énergie réactive si  $Q$  est négative.

Le transit de puissance réactive accroît les pertes actives et réactives dans le réseau

$$S = ((P^2 + Q^2)/U^2 (R + jX)) \quad \text{et les chutes de tension } \Delta U = \frac{PR + QX}{U}.$$

### III.3 Les consommateurs de l'énergie réactive

La plupart des appareils d'utilisations sont des consommateurs d'énergie réactive puisqu'ils fonctionnent grâce à un champ magnétique.

#### III.3.1 Les machines synchrones

Ont la faculté de consommer ou de produire l'énergie réactive suivant qu'elles sont respectivement sous ou surexcitées.

#### III.3.2 Les moteurs

Parmi les moteurs les plus courants durant leur marche normale, on peut donner les valeurs habituelles suivantes :

- moteur synchrone monophasé  $\text{tg}\varphi = 1 - 0,75$ ,
- moteur synchrone triphasé  $\text{tg}\varphi = 1,3 - 0,9$ ,
- moteur à collecteur  $\text{tg}\varphi = 1,3 - 1$ .

Au moment de démarrage, il y un appel très important du puissance réactive et on peut atteindre des valeurs de  $\text{tg}\varphi$  de 4 à 5.

#### III.3.3 Les transformateurs

Les transformateurs absorbent de la puissance réactive de deux façons :

- une puissance réactive magnétique pour maintenir le champ magnétique dans le noyau. Elle atteint (2-3) %  $S_n$ , pour les transformateurs de distribution et 1 - 2%  $S_n$ , pour les plus gros transformateurs. On la mesure en pratique par le courant à vide.

- La réactance de fuite de ces appareils appelle une puissance égale à 4% de la puissance transitée pour les transformateurs de distribution et à 7 – 13% pour les transformateurs du réseau de transport.

Compte tenu du nombre moyen de transformateurs traversé par la charge appelée par la consommation et du taux moyen de charge de ces appareils, on peut estimer que les transformateurs consomment en moyenne une énergie réactive totale  $Q$  d'ordre de la moitié de l'énergie active  $P$  transitée par les réseaux ( $\text{tg}\varphi = 0,5$ ).

Les autres usages qui consomment de l'énergie réactive sont les lampes fluorescentes ( $\text{tg}\varphi = 2$ ). D'autres les grands consommateurs industriels, les fours électriques ont un  $\text{cos}\varphi$  assez faible.

### III.4 Compensation de l'énergie réactive

Les réseaux de distributions à M.T (Moyenne Tension) ou B.T (Basse Tension) sont toujours des consommateurs d'énergie réactive. La compensation de cette énergie procure des économies dans l'exploitation des réseaux de distribution (diminution des pertes, l'amélioration de la qualité de la tension).

Le transit par le réseau de transport de l'énergie réactive appelée par la distribution est une gêne importante pour l'exploitation de ces réseaux, non seulement par son coût mais aussi par ses conséquences techniques qui compliquent beaucoup le réglage de la tension de transport.

La solution idéale du point de vue technique serait donc la fourniture de l'énergie réactive par des sources localisées à coté de chaque appareil consommateur. Néanmoins il est évident que plus on subdivise la production de l'énergie réactive, plus cela entraîne des dépenses élevées par la multiplication de l'appareillage de commande et de protection.

La solution optimale est celle qui conduit aux dépenses globales minimales, ces dépenses étant la somme d'une part de coût d'achat et d'exploitation des condensateurs et de leur appareillage annexe et d'autre part, du coût actualisé des pertes dans les réseaux de distribution et de transport.



On y parvient par un compromis qui laisse au transport une partie de compensation. L'effort de compensation qui reste imposé aux réseaux de distribution doit être réparti au mieux entre différents moyens :

1. les batteries de condensateurs B.T et M.T des utilisateurs sont donc placées aux bornes mêmes des moteurs. Les usagers sont incités à installer de telles batteries par un tarif qui leur fait payer l'énergie réactive lorsque  $\text{tg}\phi = 0$ . Cette condition fait supporter à l'usage qu'une partie du coût réel de l'énergie réactive qu'il consomme.
2. Les batteries de condensateurs B.T nécessaires dans les réseaux B.T si les précédentes n'ont pas permis de réduire assez fortement les chutes de tension et les pertes dans ces réseaux.
3. Les batteries de condensateurs M.T qui selon les circonstances peuvent être dispersées le long de lignes ou au contraire, regroupées en batteries de forte puissance.

### III.4.1 Condensateur

#### III.4.1.1 Définition

Un condensateur est formé de deux plaques métalliques séparées par un isolant. Le condensateur est caractérisé par sa capacité  $C$  qui s'exprime en farad (F):

$$C = \varepsilon S/e$$

$C$  : capacité en farad [F]

$S$  : surface de l'armature du condensateur

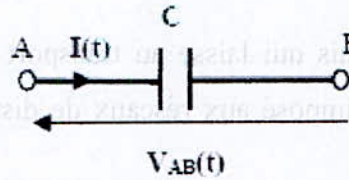
$e$  : distance entre les deux armatures

$\varepsilon$  : permittivité en Farad/mètre (F/m)

La valeur de la permittivité dépend du matériau utilisé, pour le vide  $\varepsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-12}$  (F/m)

#### III.4.1.2 Caractéristique tension/courant d'un condensateur

Le symbole utilisé pour représenter un condensateur parfait dans les schémas de circuits est le suivant :



**Figure III.2** Symbole d'un condensateur parfait

La tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$I(t) = C \, dV_{AB}(t)/dt$$

$I(t)$  : courant en ampère [A]

$V_{AB}(t)$  : tension en volt [V]

$C$  : capacité en farad [F]

### III.4.1.3 Énergie stockée par un condensateur parfait

La quantité de charge électrique emmagasinée par un condensateur est :

$$Q(t) = CV_{AB}(t)$$

$Q$  : charge électrique en coulomb [C]

$C$  : capacité en farad [F]

$V_{AB}(t)$  : tension en volt [V]

La quantité d'énergie électrostatique emmagasinée par un condensateur dépend directement de la tension à ses bornes et de la valeur de la capacité. La tension est limitée par la nature et par l'épaisseur du diélectrique. Lorsqu'elle dépasse une certaine valeur, un arc prend naissance entre les armatures et détruit l'isolant.

$$Ee = \frac{1}{2} CV_{AB}^2(t)$$

$Ee$  : énergie électrostatique en joule [J]

$C$  : capacité en farad [F]

$V_{AB}(t)$  : tension en volt [V]

### III.4.2 Batteries de condensateurs B.T des usagers

Les condensateurs B.T sont fabriqués en unités monophasées de petite puissance. Leur coût augmente sensiblement lorsque la tension entre les bornes décroît au dessous de 500V ; cela conduit à adopter systématiquement en B.T un montage en triangle.



La protection contre les défauts internes aux condensateurs se fait par des fusibles en série de chaque unité. Et d'autres parts protéger la batterie B.T :

- contre les surtensions (on utilise un relais de tension temporisé).
- contre les harmoniques de tension (avec des inductances).

### **III.4.3 Batteries de condensateurs dans les réseaux B.T**

La compensation de l'énergie réactive chez les usagers mêmes ne peut pas être totale, ne serait-ce que du fait de l'existence de nombreux usagers dont la puissance installée est trop faible pour justifier une telle compensation.

Il serait logique d'installer les batteries de condensateurs B.T le long des lignes. Des telles batteries B.T sont parfaitement justifiées dans les réseaux B.T urbains. Dans ce cas le réseau M.T qui est en câbles souterrains est producteur de l'énergie réactive et l'installation des batteries M.T ne se justifie que rarement. En outre, l'installation des batteries B.T devient plus simple puisqu'on évite le coffret de protection coûteux des batteries pour réseaux aériens. Les réseaux urbains des U.S.A utilisent de telles batteries qui sont placées soit dans les postes M.T/B.T, soit dans des nœuds des réseaux maillés. En France on a normalisé des batteries pour postes M.T/B.T souterrains que l'on doit installer en principe dans tout poste où la puissance nominale des transformateurs dépasse 100 kVA.

### **III.4.4 Batteries de condensateurs M.T**

Dans les réseaux aériens, M.T la compensation de la charge appelée par les consommateurs raccordés en M.T et par les réseaux de distribution B.T n'est jamais que partielle. On estime qu'elle n'est pas mauvaise, le rapport  $Q/P = \text{tg}\phi$  moyen des heures pleines reste inférieur à 0,6. Mais il ne faut pas demander aux réseaux de transport de transiter une telle puissance réactive car le réglage de tension y deviendrait trop délicat et onéreux. Il faut alors tendre à la compensation totale de l'énergie réactive.

Les batteries de condensateurs installées dans les réseaux M.T sont constituées d'unités dont la puissance nominale normalisée est 50 kVAr en France.



Chaque batterie est équipée :

- d'un interrupteur de commande, qui doit être d'un type spécial à rupture très brusque pour éviter absolument le réamorçage à l'ouverture et à l'ouverture quasi simultanée des trois pôles pour éviter des phénomènes transitoires.
- Des fusibles généraux qui en cas de claquage d'une unité, coupent la phase avariée. La fusion d'un sel des trois fusibles doit entraîner la commande de déclenchement de l'interrupteur car le fonctionnement déséquilibré risquerait d'entraîner des perturbations dans le réseau.
- D'inductance de décharge, calculée de façon que après l'ouverture de l'interrupteur, les condensateurs se déchargent en un temps suffisamment court (quelques secondes) pour éviter les accidents du personnel chargé de travailler sur la batterie.
- D'un relais de déséquilibre.
- D'un relais wadmétrique.

Aussi la batterie de condensateurs M.T peut être raccordée directement aux jeux de barres M.T. Dans cette situation :

- ◆ On divise la batterie en plusieurs gradins permettant un certain réglage de la puissance réactive, chaque gradin aura une certaine puissance.
- ◆ On chaque gradin séparément par un interrupteur comme pour les batteries non fractionnées, mais on dispose un disjoncteur général soumis à l'action de relais de courant.
- ◆ On supprime les fusibles généraux des gradins.
- ◆ On ajoute des inductances de choc en série sur chaque gradin car, lors de sa mise sous tension, les gradins préalablement en service se décharge sur lui. Cette inductance limite le courant de décharge à une valeur acceptable.

### **III.5 Calcul de puissance à compenser**

La puissance réactive appelée par les réseaux est très variable dans le temps. La production de la puissance réactive nécessite certaines dépenses et il y a donc un optimum économique à trouver entre :



1. les différentes sources d'énergie réactive (dont les coûts par kVAr produit sont différents).
2. Le coût du transport de cette énergie dans le réseau.
3. La qualité de tension à transporter.

Par exemple, pour trouver la grandeur et l'endroit des sources réactives on doit minimiser une fonction qui tient compte des pertes d'énergie et de frais de compensation. Si on note :

$P$  (kW) – la puissance de la charge.

$x$  (DA / kVAr et année) – le coût spécifique d'installation de compensation.

$y$  (DA / kVA et année) - le coût spécifique du système d'alimentation.

$Z$  (DA / kW et année) -le coût des pertes.

$r$  (%) - les pertes en % pour  $\cos\varphi = 1$ .

$k$  – une constante des pertes.

$R$  (DA) – les bénéfices pour amélioration du  $\cos\varphi$ , de  $\cos\varphi_1$  à  $\cos\varphi_2$ .

Alors :

$$R = y (P \cdot \sec\varphi_1 - P \cdot \sec\varphi_2) + Z \cdot k (\sec^2\varphi_1 - \sec^2\varphi_2) P^2 - x \cdot P (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)$$

On rend  $R = \text{optimum}$  et  $\frac{dR}{d\varphi_2} = 0$ , d'où :

$$\sin\varphi_2 = \frac{1}{x} (y + 2 \cdot Z \cdot P \cdot k \cdot \cos\varphi_2); \text{ mais } kP^2 = \frac{r \cdot P}{100} \text{ et :}$$

$$\sin\varphi_2 = \frac{1}{x} (y + z \cdot \cos\varphi_2), \text{ où } z = \frac{2 \cdot Z \cdot r}{100}$$

Si on met encore :

$$a = \frac{z}{y}; \quad b = \frac{x}{y} \quad \text{on a} \quad \cos\varphi_2 = \frac{a \cdot \sin\varphi_2}{b - \sin\varphi_2}$$

Si  $t = \operatorname{tg} \frac{\varphi_2}{2}$ , on peut écrire encore :

$$b \cdot t^4 + 2 \cdot t^3 \cdot (a-1) + 2 \cdot t \cdot (a+1) - b = f(t).$$

Pour  $t = \text{petit}$ ,

$$2t = \frac{b}{a+1} = \varphi_2, \text{ ou mieux :}$$

$$t = \frac{b}{2(a+1)} - \frac{f(t)}{f'(t)} \quad (\text{méthode de Newton})$$

La solution :

$$t = \frac{b}{2(a+1)} \quad \text{Suffisamment exacte. Alors :}$$

$$\cos \varphi_2 = 1 - \frac{b^2}{2(a+1)^2}, \quad \text{qui également a une bonne précision.}$$

En partant de la dernière formule, on trouve  $\cos \varphi_2 = 1 - \frac{x^2}{2(z+y)^2}$ .

### III.6 Répartition des condensateurs entre M.T et B.T

La puissance réactive  $Q_c$  devra être répartie entre les M.T (6-10 kV) et la B.T (0,4 kV) d'une manière optimale. On démontrera que la puissance des condensateurs B.T se calcule à partir de la formule :

$$Q_{BT} = Q - M / (r_{et} + r_{er})$$

Où :

$Q$  – la puissance totale appelée côté B.T.

$r_{et}$ ,  $r_{er}$  – les résistances équivalentes du transformateur et du réseau B.T.

$$M = U^2 \left( \frac{112,5.Kd}{c.T} + 0,5 \right)$$

$Kd$  – la différence de prix entre 1kVAr B.T et 1kVAr M.T.

$c$  – prix d'un kWh d'énergie perdue.

$T$  – le temps d'utilisation des condensateurs.

Alors la puissance des condenseurs cotés M.T est :

$$Q_{MT} = Q_c - Q_{BT}$$

### III.7 Commutation des batteries de condensateurs

Au moment de la commutation des batteries de condensateurs (mise en service ou hors de service) de nombreux phénomènes transitoires peuvent se produire et avoir dans certains cas des conséquences néfastes si des dispositions convenables n'ont pas été adoptées, en particulier lorsque les batteries sont reliées à un réseau à M.T ou H.T.



### III.7.1.1 Cas d'une batterie unique mise en service

A l'instant où les contacts des interrupteurs se rapprochent, un arc s'établit et une onde de courant à la fréquence propre du circuit se forme. La valeur maximale du courant  $i_m$  est donnée en ampère par :

$$i_m = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U \sqrt{\frac{C_1}{L_0}}$$

Où,  $U$  (V) - la valeur efficace de la tension entre phase.

$C_1$  (F) - la capacité d'une phase de la batterie.

$L_0$  (H) - l'inductance de la source (par phase).

L'inductance de la source  $L_0$  a généralement une valeur suffisante pour limiter les surintensités lors de la mise en service. Lorsqu'il n'en est pas ainsi, il faut ajouter une inductance supplémentaire dans le circuit.

Pendant le régime transitoire à fréquence élevé, il se produit des passages par zéro des courants, qui peuvent provoquer des réamorçages et des surtensions.

### III.7.1.2 Cas d'une batterie unique mise hors service

Lorsque les contacts de l'interrupteur se séparent, un arc se forme et doit s'éteindre au premier passage par zéro du courant, i.e par suite du déphasage, lorsque la tension atteint sa valeur de crête. Si la rigidité diélectrique entre le contact est insuffisante, l'arc s'amorce de nouveau, une onde de courant à fréquence élevée se superpose au courant normal et la tension peut doubler. Si ce phénomène se répète à plusieurs reprises, des surtensions très dangereuses se forment et se propagent le long des lignes. Pour éviter les surtensions de ce type, à la mise en ou hors service on utilise des interrupteurs à régénération très rapide dont le contact mobile se déplace à une vitesse élevée.

### III.7.2 Cas de plusieurs batteries en parallèle

Nous supposons que  $n$  batteries identiques sont déjà alimentées et que l'on met en service une batterie supplémentaire. Il se produit alors, entre batteries chargées et la nouvelle batterie non chargée, une onde de courant dont la valeur maximale est donnée par :

$$i_m = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U \frac{n}{n+1} \sqrt{\frac{C_1}{L_1}}$$

$L_1$  est l'inductance par phase reliant chaque batterie à la source commune. Si les batteries sont rapprochées, cette inductance est très faible.

En M.T, on peut prendre :  $L_1=0,65$  H/m pour un câble.

$L_1=1,3$  H/m pour un jeu de barres.

La surintensité atteindre alors plusieurs dizaines de kA. Il est indispensable, lorsqu'on utilise des batteries fractionnées, d'insérer des réactances dans les liaisons. On prend habituellement des valeurs de 50 à 200H.

### III.8 Implantation des Batteries

Dans une installation électrique B.T., les batteries de condensateurs peuvent être implantées à 3 niveaux différents :

#### III.8.1 Implantation globale

Ce mode de compensation convient lorsque la charge est stable et continue.

##### Avantages :

- Supprime la facturation d'énergie réactive.
- Représente la solution la plus économique car toute la puissance est concentrée en un point et le coefficient de foisonnement permet des batteries bien optimisées.

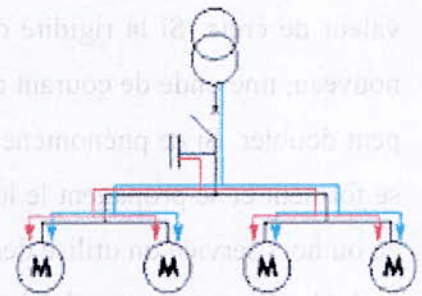


Figure III.3 compensation globale



### III.8.2 Implantation par secteur ou partiel

Ce mode de compensation convient lorsque l'installation est étendue et comporte des ateliers dont les régimes de charge sont différents.

#### Avantages :

- Supprime la facturation d'énergie réactive.
- Soulage une grande partie des feeders d'alimentation et diminue dans ces feeders les pertes joules ( $RI^2$ ).
- Intègre le foisonnement de chaque secteur.
- Soulage le transformateur.
- Reste économique.

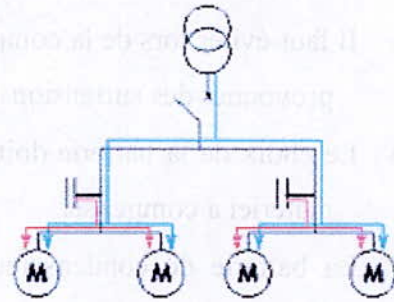


Figure III.4 compensation partiel

Remarque : Solution généralement utilisée pour un réseau usine très étendu.

### III.8.3 Implantation individuelle

La batterie de condensateurs est raccordée directement aux bornes de chaque récepteur du type inductif, notamment les moteurs. Elle convient lorsque la puissance de certains récepteurs est très importante par rapport à la puissance totale, elle offre le plus d'avantages.

#### Avantages :

- Supprime la facturation d'énergie réactive.
- Constitue, sur le plan technique, la solution idéale puisque l'énergie réactive est produite à l'endroit où elle est consommée ; les pertes joules ( $RI^2$ ) sont donc diminuées dans toutes les lignes.
- Soulage le transformateur.

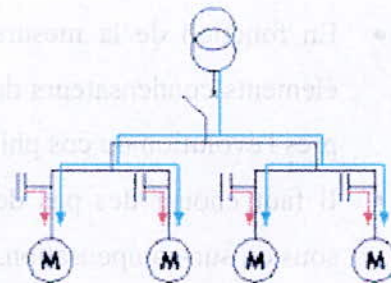


Figure III.5 compensation individuelle

### III.9 Les précautions à prendre

#### III.9.1 Auto excitation

- Il faut éviter lors de la compensation de moteur les risques d'auto-excitation pouvant provoquer des surtensions.
- Le choix de la batterie doit donc être fait en tenant compte des caractéristiques du matériel à compenser.
- La batterie de condensateurs doit avoir une puissance inférieure à la puissance nécessaire à l'auto-excitation du moteur. A défaut, il doit être prévu, dans l'appareillage de commande des condensateurs, une coupure évitant cette auto-excitation.

#### III.9.2 Harmoniques

- Lors du placement d'une batterie de condensateurs, il faut effectuer une vérification de la présence d'harmoniques dans l'installation: celles-ci peuvent endommager les batteries de condensateurs et provoquer des surtensions dangereuses pour l'installation. Elles peuvent être à l'origine du "claquage des condensateurs".
- Les harmoniques sont présentes dans les systèmes utilisant des redresseurs. On en trouve dans les systèmes d'alimentation des salles informatiques, par exemple.

#### III.9.3 Puissance des pas de régulation

- En fonction de la mesure du  $\cos \phi$  ou  $\tan \phi$ , on enclenche ou déclenche des éléments condensateurs dont la puissance en kVAR doit permettre de suivre au plus près l'évolution du  $\cos \phi$  souhaité.
- Il faut choisir des pas de régulation suffisamment faibles de manière à éviter la sous ou sur-compensation.

#### III.9.4 Résistances de décharges



- Des précautions seront également prises pour l'appareil de protection des batteries de condensateur car des courants transitoires importants apparaissent à l'enclenchement et au déclenchement des batteries.
- Pour limiter ce phénomène, des résistances de décharge sont installées en parallèle sur la batterie de condensateurs :

### **III.10 Conclusion**

Un mauvais Cosinus Phi c.a.d qu'il n'y'a pas de compensation ou bien il y'a une mauvaise compensation conduit à:

- accroît les chutes de tension dans les câbles,
- augmente les pertes par effet joule lors du transport de l'énergie électrique
- entraîne une surfacturation par une surconsommation ou une pénalité
- dégrade la capacité de transport de l'énergie électrique par des câbles
- entraîne un surdimensionnement des installations neuves: câbles (section), transfo (S), etc...
- entraîne des renforcements prématurés des installations existantes
- Ne laisse pas de réserve de marche au secondaire du transformateur

L'amélioration du Cosinus Phi doit passer par l'installation d'un moyen de compensation qui constitue la solution la plus efficace : très généralement une ou plusieurs batteries de condensateurs (Véritable générateur d'énergie réactive : I en avance de  $90^\circ$  sur U réseau)

Donc, un dimensionnement correct des batteries de condensateurs est très important. mais inversement une surcompensation se traduira par un renvoi d'énergie réactive capacitive vers le réseau qui sera également comptabilisée et facturée.

# CHAPITRE 4

## CHAPITRE 4

---

**Application de la technique TS au  
placement optimal des capacités,  
résultats numériques et conclusions**

---



### IV.1 Introduction

Le problème de placement de condensateur considère des contraintes de fonctionnement pratiques des condensateurs; la croissance de charge, la capacité du conducteur et le haut et les contraintes attachées d'auvent de la tension à différents niveaux de charge pour réduire au minimum la charge de placement de condensateurs et de déperdition d'énergie de système. Une méthode d'analyse de sensibilité est employée pour choisir les endroits d'installation de candidat des condensateurs pour réduire l'espace de recherche de ce problème a priori. Les résultats de comparaison de la méthode de Recherche Tabou prouvent que la méthode proposée de Recherche Tabou peut offrir la solution presque optimale au problème de placement de condensateur dans la durée de calcul raisonnable.

Les condensateurs sont souvent installés dans le système de distribution pour que la compensation de puissance réactive effectue la réduction des pertes de puissance et d'énergie, le réglage de tension, l'amélioration de sécurité de système. Les avantages économiques du condensateur dépendent principalement d'où et combien de condensateurs sont installés et des arrangements appropriés de commande des condensateurs à différents niveaux de charge dans le système de distribution.

Une variété de méthodes a été consacrée à résoudre le problème de placement de condensateur. Dans les premiers travaux, la plupart des chercheurs ont employé la méthode analytique conventionnelle en même temps que de l'heuristique [Kap, 84]. Duran [Dur, 83] a considéré les tailles de condensateur en tant que variables discrètes et a utilisé la programmation dynamique pour résoudre le problème. Concernant l'endroit et la taille de condensateur en tant que variables continues, on a proposé un procédé itératif basé par recherche de gradient pour traiter le type fixe et commuté le problème d'installation de condensateur [Gra, 84].

Chiang et autres [Chi, 90] utilisent la technique d'optimisation, recuit simulé, pour rechercher la solution optimale globale au problème de placement de condensateur, qui est



formulée comme problème combinatoire discret d'optimisation [Bar, 89]. La méthode de recuit simulé peut fournir la solution optimale presque globale, mais le fardeau informatique associé est lourd. Sundhararajan et Pahwa [Sun, 93] ont proposé l'approche génétique d'algorithme pour déterminer le placement optimal des condensateurs. Cependant, l'arrangement des paramètres de commande dépend légèrement des expériences et demeure comme un problème non résolu à étudier.

Les Recherches Tabous sont une stratégie pour résoudre le problème combinatoire d'optimisation. La stratégie de Recherche Tabou a été appliquée dans divers champs, et la possibilité des Recherches Tabous pour obtenir des solutions de haute qualité dans des bas raisonnables de durée de calcul vérifié. La méthode de Recherche Tabou est établie sur un mécanisme de descente d'un processus de recherche. Le mécanisme de descente polarise la recherche vers des points avec des valeurs plus basses de fonction objective, alors des dispositifs spéciaux sont ajoutés pour éviter d'être emprisonnés dans les minimum locaux [Glo, 89].

Basé sur ce mécanisme, ce chapitre a avec succès appliqué la méthode de Recherche Tabou pour résoudre le problème de placement de condensateur. La description de problème du placement de condensateur est d'abord adressée. Puis l'arrangement général de la méthode de Recherche Tabou et ses applications au problème de placement de condensateur sont présentés.

## IV.2 Description de problème

Le problème de placement de condensateur considéré en ce chapitre est de déterminer les endroits, des types, nombres et tailles de condensateurs à installer dans un système radial de distribution, et les arrangements de commande du condensateur à différents niveaux de charge. L'objectif est visé pour réduire les déperditions d'énergie dans le système et pour maintenir les importances de tension du système dans le maximum prescrit et des valeurs permises minimum pour différents niveaux de charge tout en réduisant au minimum tout le coût du système.

Depuis que les tailles de condensateur sont traitées comme des arrangements de commande en tant que variables discrètes de décision, le problème de placement de condensateur est formulé comme problème combinatoire d'optimisation avec une fonction



objective non différentielle. Par exemple, comme montré dans fig. IV.1, l'investissement de placement du condensateur est exprimé en tant que fonction non différentielle de la capacité.

La courbe annuelle de durée de charge à servir par le système de distribution est montrée dans fig. IV.2. La période de la charge annuelle est divisée en un certain nombre d'intervalles. Pendant chaque intervalle, le niveau de charge est assumé que la constante et une valeur de coût liée à la déperdition d'énergie qui est donnée en p.u.

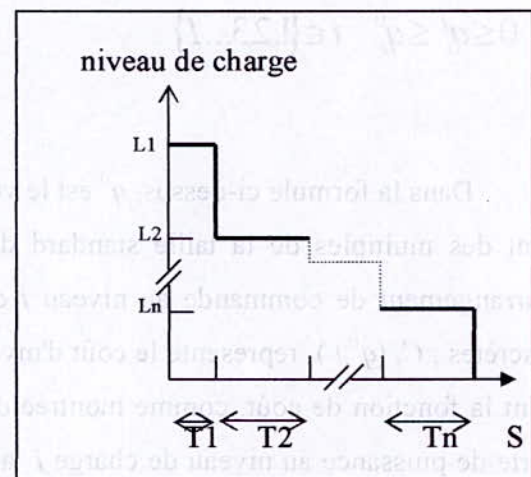
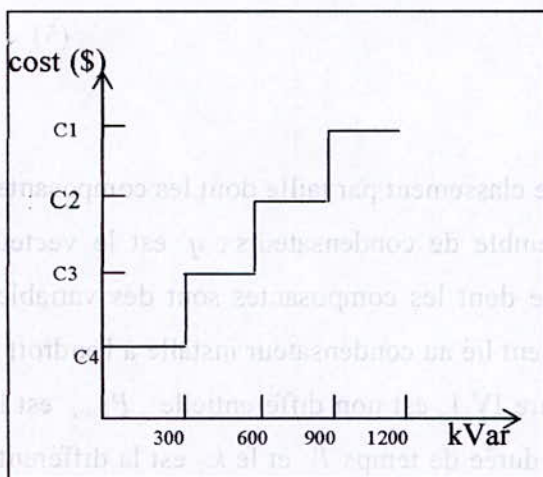


Fig. IV.1 : la fonction de charge de placement de condensateur

Fig. IV.2 : durée de charge

### IV.2.1 Formulation de problème

La fonction objective du problème peut être exprimée comme suit pour réduire au minimum le coût d'investissement de capacité et les pertes:

$$\text{Min}_{q^0, q^j} \sum_{i=1}^I C_i(q_i^0) + \sum_{j=1}^L k_{ej} T_j P_{lossj}(x^j, q^j) \tag{1}$$

Avec :

$$P_{flow}(Z^j, q^j) = 0 \quad (\text{contraintes d'écoulement de puissance}) \quad (2)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i^j \leq V_i^{\max} \quad (\text{contraintes de tension}) \quad (3)$$

$q_i^j$  : Variable discrète.

Pour les condensateurs de même type :

$$q_i^j = q_i^j = q_i^0 \quad l, j \in \{1, 2, 3, \dots, L\} \quad (4)$$

Pour les condensateur de type commutés :

$$0 \leq q_i^j \leq q_i^0 \quad i \in \{1, 2, 3, \dots, I\} \quad (5)$$

Dans la formule ci-dessus,  $q^0$  est le vecteur de classement par taille dont les composantes sont des multiples de la taille standard d'un ensemble de condensateurs ;  $q^j$  est le vecteur d'arrangement de commande au niveau  $j$  de charge dont les composantes sont des variables discrètes ;  $C_i(q^0)$  représente le coût d'investissement lié au condensateur installé à l'endroit  $i$ , dont la fonction de coût, comme montrée dans figure IV.1, est non différentielle ;  $P_{lossj}$  est la perte de puissance au niveau de charge  $j$  avec une durée de temps  $T_j$  et le  $k_{ej}$  est la différence pertes d'énergie pour chaque niveau de charge ;  $x_k = [P_k, Q_k, |V_k|^2]$ ,  $z_k = [P_k, Q_k]$  représente des vecteurs variables d'état des puissances actives et réactives  $P_k$ ,  $Q_k$  aussi bien que la grandeur carrée de tension  $|V_k|^2$  à la branche  $k$  ;  $L$  et  $I$  indiquent des nombres des niveaux de charge et les candidats d'endroits pour installer les condensateurs.

### IV.2.2 Équations d'écoulement de puissance

L'écoulement des puissances active et réactive à l'extrémité de réception de la branche  $k+1$ ,  $P_{k+1}$ ,  $Q_{k+1}$  et la grandeur de tension à l'extrémité d'émetteur  $|V_k|$ , comme montré dans fig. IV.3, peuvent être exprimés par l'ensemble itératif d'équations suivant [Bar 89] :



$$|V_{k+1}|^2 = |V_k|^2 - 2(r_{k+1}P_k + x_{k+1}Q_k) + (r_{k+1}^2 + x_{k+1}^2)(P_k^2 + Q_k^2)/|V_k|^2 \quad (6)$$

$$P_{k+1} = P_k - r_{k+1}(P_k^2 + Q_k^2)/|V_k|^2 - P_{L,k+1} \quad (7)$$

$$Q_{k+1} = Q_k - x_{k+1}(P_k^2 + Q_k^2)/|V_k|^2 - Q_{L,k+1} + Q_{c,k+1} \quad (8)$$

Dans le système des équations d'écoulement de puissance, plusieurs conditions limites doivent être satisfaites :

- 1) la grandeur de tension  $|V_0|$  est donnée,
- 2) à l'extrémité du conducteur principal :

$$P_{on}=0 \quad (9)$$

$$Q_{on}=0 \quad (10)$$

- 3) à l'extrémité de la partie latérale  $k$  :

$$P_{km}=0 \quad (11)$$

$$Q_{km}=0 \quad (12)$$

Où  $n$  et  $m$  sont les nombres de noeuds des branches 0 et  $k$ , respectivement.

Les pertes de puissance dans le réseau peuvent être calculées comme somme de la perte  $i^2r$  dans chaque branche. Les pertes totales peuvent être calculées par :

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^b \sum_{j=0}^{m_i-1} r_{i,j+1} (P_{i,j}^2 + Q_{i,j}^2) / V_{i,j}^2 \quad (13)$$

Où  $r_{i,j+1}$  est la résistance du  $(j+1)^{ème}$  noeud de la  $i^{ème}$  branche, et  $b$  est la nombre de branches,  $m_i$  est le nombre de noeuds de la  $i^{ème}$  branche.

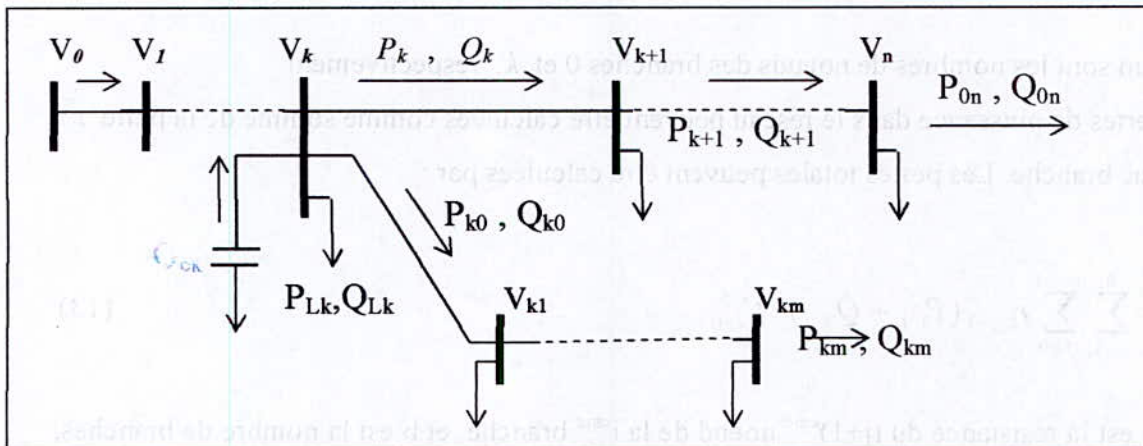
### IV.2.3 Analyse de sensibilité

Pour considérer les contraintes pratiques, des jugements heuristiques et de techniques sont d'abord employés pour choisir les endroits potentiels où des condensateurs peuvent être installés. Alors une approche d'analyse de sensibilité est encore introduite à l'algorithme pour

déterminer les endroits candidat pour placer le condensateur dans le système de distribution. A priori, l'estimation de ces endroits candidats peut aider à réduire l'espace de recherche du problème d'optimisation.

L'analyse de sensibilité est un procédé systématique pour choisir ces endroits qui ont un impact maximum sur les vraies pertes de puissance de système en ce qui concerne la puissance réactive des noeuds. L'équation (14) est employée pour évaluer les influences du changement de puissance réactive des nœuds sur les pertes de puissance dans le choix des emplacements d'installation de condensateur candidat :

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial Q_{i,j}} = \sum_{i=0}^b \sum_{j=0}^n r_{i,j+1} \left[ (2P_{i,j} \frac{\partial P_{i,j}}{\partial Q_{i,j}} + 2Q_{i,j}) / V_{i,j}^2 - 2 \frac{\partial V_{i,j}}{\partial Q_{i,j}} (P_{i,j}^2 + Q_{i,j}^2) / V_{i,j}^3 \right] \quad (14)$$



**Figure IV.3:** une ligne de distribution

### IV.3 Méthode de Recherche Tabou

Les principes fondamentaux des Recherche Tabou sont l'utilisation de la mémoire flexible de l'histoire de recherche et ainsi guider le processus de recherche pour surmonter les solutions optimales locales.



### **IV.3.1 Mouvements et sélection**

La première étape des Recherches Tabous est de définir un ensemble de mouvements qui peuvent être appliqués à une solution pour produire une nouvelle solution. Parmi toutes les solutions voisines ainsi produites, les Recherches Tabous recherchent celle qui améliore encore la fonction objective. Dans certaines situations, s'il n'y a aucun mouvement d'amélioration, un fait qui signifie un certain optimum local existe, la Recherche Tabou choisit celui qui dégrade la fonction objective.

Dans le problème de placement de condensateur, le processus recherchant un vecteur de la solution d'essai à l'autre s'appelle un mouvement. Un vecteur de la solution d'essai désigne les endroits de condensateur candidat, l'arrangement de condensateur (arrangements de commande) pour les différents niveaux de charge, la capacité installée, les pertes de puissance, la grandeur de tension et la valeur de fonction objective correspondant à ce mouvement, et au compteur de fréquence. Le compteur de fréquence est employé pour indiquer les périodes totales qui les bas de solution visité. La structure de solution est représentée comme suit : solution de structure (endroits de candidat, arrangement de condensateur, capacité installée, pertes de puissance, grandeur de tension, valeur de fonction objective, fréquence contre).

### **IV.3.2 Liste de Tabou**

Afin d'éviter de retourner à l'optimum local juste visité, on doit interdire le mouvement retourné qui est malheureux à la réalisation de la solution optimale. Ceci est fait en stockant ce mouvement dans une structure de données, telle qu'une longueur finie de la structure, appelée la liste de Tabou. Les éléments de la liste de tabou s'appellent les mouvements de Tabou. En raison des mouvements de Tabou, nous pouvons maintenir la recherche concentrée vers des points avec des valeurs plus basses de fonction objective et nous échapper de la solution optimum locale. Dès qu'une solution d'essai sera produite, la solution d'essai est vérifiée pour être, que dans la liste tabou ou pas. Si oui, l'espace correspondant de recherche est considérablement réduit (par exemple, un tiers, appelé le taux de réduction de voisinage de recherche) de la gamme normale.



La dimension de la liste de tabou s'appelle taille de liste de tabou. Le choix de la taille de liste de tabou est critique. Si la taille est trop grande, on peut interdire en appelant à des mouvements et des solutions de plus haute qualité ainsi ne peuvent pas être explorées. Tandis que si cette valeur est trop petite, le cycle peut se produire dans le processus de recherche et le processus souvent revient à la solution juste visitée. Empiriquement, les tailles de liste de tabou devraient se développer avec la taille du problème. Nous employons une liste dynamique de lien pour servir comme liste de tabou, dont la taille est 15 pour enregistrer les états de solution juste visités. Ceci signifie que le mouvement sera gardé tabou pour la durée de 15 mouvements. Le mouvement plus ancien de tabou est libéré avant l'adresse de l'élément de tabou. Le nouveau mouvement de tabou est attaché à la liste de tabou en assignant la mémoire et en lui donnant un indicateur d'effacement.

### IV.3.3 Critère d'aspiration

Puisque la liste de tabou peut interdire certains dignes ou intéressants à mener les mouvements possibles à une meilleure solution que la meilleure trouvée jusqu'ici. Un critère d'aspiration est employé pour permettre à des mouvements de tabou d'être libérés s'ils sont jugés pour être intéressants. En d'autres termes, le critère d'aspiration doit permettre à des "excellents" mouvements de tabou d'être choisis si le niveau d'aspiration est atteint.

Un critère d'aspiration prend la forme : si un mouvement de tabou (mouvement de tabou) de la solution courante  $S_k$  peut atteindre une solution ( $S_k + \text{tabou mouvement}$ ) meilleure que la meilleure solution jusqu'ici  $S_k^*$  obtenue jusqu'à l'itération  $k$ , alors ce mouvement de tabou peut être attrayant ou disponible pour être libéré c-à-d, si :

$$f(S_k + \text{mouvement tabou}) < f(S_k^*)$$

Alors la restriction de tabou sera dépassée, et ( $S_k + \text{mouvement tabou}$ ) est vu comme prochaine solution d'essai. Donc  $f(S_k + \text{mouvement tabou})$  est la fonction objective à réduire.



#### **IV.3.4 Intensification et diversification**

Afin d'obtenir la solution optimale, les Recherches Tabous emploient des techniques d'intensification et de diversification. L'ancienne intensification moyenne de la recherche dans le voisinage de la solution suboptimale, la dernière diversification moyenne de la recherche aux régions jusqu'ici encore inconnue de l'espace de solution. Si l'intensification est absente, la recherche devient un échantillonnage aléatoire itératif; si la diversification est absente, le processus peut être emprisonné dans une région suboptimale.

Le compteur de fréquence dans la structure de solution est employé dans les techniques d'intensification et de diversification. Le compteur de fréquence indique les temps de la solution (ou le mouvement) ayant été visité dans tout le processus de solution.

Par exemple, selon la taille du voisinage à rechercher dans le problème de placement de condensateur, un seuil (appelé le seuil de compteur de fréquence) est placé à trois, c.à.d, si la solution a été visitée trois fois ou plus, il sera fortement pénalisé et ainsi lâche son attraction. La recherche sera donc dirigée vers la région jusqu'ici encore inconnue de l'espace de solution pour diversifier le processus de recherche. Quand le compteur de fréquence est moins de trois fois, l'intensification de la recherche dans le voisinage de la région suboptimale est possible. De cette manière, on s'attend à ce que la Recherche Tabou puisse trouver la solution optimale au problème combinatoire d'optimisation.

#### **IV.4 Algorithme de solution pour le placement de condensateur**

Dans cette section, l'algorithme de solution de Recherche Tabou est présenté étape par étape pour résoudre le problème de placement des condensateurs.

**Étape 1 :** les Données de système d'entrée. Configuration de système d'entrée, de données de réseau et de paramètre (par exemple, limites inférieures et supérieures de la tension d'opération, la taille de liste de tabou, etc.).

**Étape 2 :** Analyse de sensibilité d'écoulement. Nous choisissons les noeuds qui ont l'impact maximum sur les pertes de puissance réel de système en ce qui concerne la puissance réactive des noeuds comme endroits candidats pour installer les condensateurs.

**Étape 3 :** Produire un premier état des solutions réalisables.

- 1) aléatoirement, choisir un état de solution à partir de l'espace de solution.
- 2) pour assurer chaque niveau de charge, exécuter l'écoulement de puissance de distribution pour examiner la praticabilité. Si n'importe quelle contrainte est violée, aller à (1) ; autrement procéder à la prochaine étape.

**Étape 4 :** Exécuter le procédé de Recherche Tabou.

- 1) Choisir le meilleur mouvement comme la prochaine direction de mouvement à partir de l'ensemble de mouvement basé sur la fonction objective à évaluer.
- 2) vérifier la praticabilité comme dans l'étape 3 et 2. Si n'est pas faisable, aller à (1) ; autrement procéder à la prochaine étape.

**Étape 5 :** Mettre à jour le meilleur état de solution. Si le mouvement n'est pas Tabou et mener à un autre état de solution mieux que la solution jusqu'ici visitée, ou si le mouvement est tabou mais le critère d'aspiration est atteint, alors mettre à jour le meilleur état de solution.

**Étape 6 :** Ensemble/dégagement de mouvement de tabou. Enregistrer le mouvement exécuté comme mouvement de tabou dans la liste de tabou, ou libérer le mouvement de tabou si le critère d'aspiration est atteint.



**Étape 7 :** Vérifier le critère d'arrêt. Si le changement de la valeur de fonction objective de la meilleure solution successive jusqu'ici est moins qu'une valeur donnée, alors la critère d'arrêt est satisfait et procéder à la prochaine étape ; autrement, revenir à l'étape 4, et continuer le procédé de recherche de tabou.

**Étape 8 :** Produire la solution optimale. Le rendement de l'algorithme de solution inclut les endroits optimaux, les types, le nombre et les tailles de condensateurs à installer et les arrangements optimaux de commande pour différents niveaux de charge.

## IV.5 Résultats numériques

### IV.5.1 Données de réseau

La méthodologie proposée de solution basée par la Recherche Tabou pour le placement de condensateur a été mise en application en utilisant le langage Matlab. Le système d'essai est un système radial de la distribution à 16 nœuds dont 13 sont des nœuds de charge, 2 nœuds de génération, et un seul nœud bilan (slack bus). Ce système comportant aussi 7 transformateurs est schématisé dans la figure IV.4 [Lad, 05]. Les paramètres de commande des Recherches Tabous ont été choisis à 15 pour la taille de la liste de tabou, à 1/3 pour le taux de réduction de voisinage de recherche, et à 3 pour le seuil du compteur de fréquence.

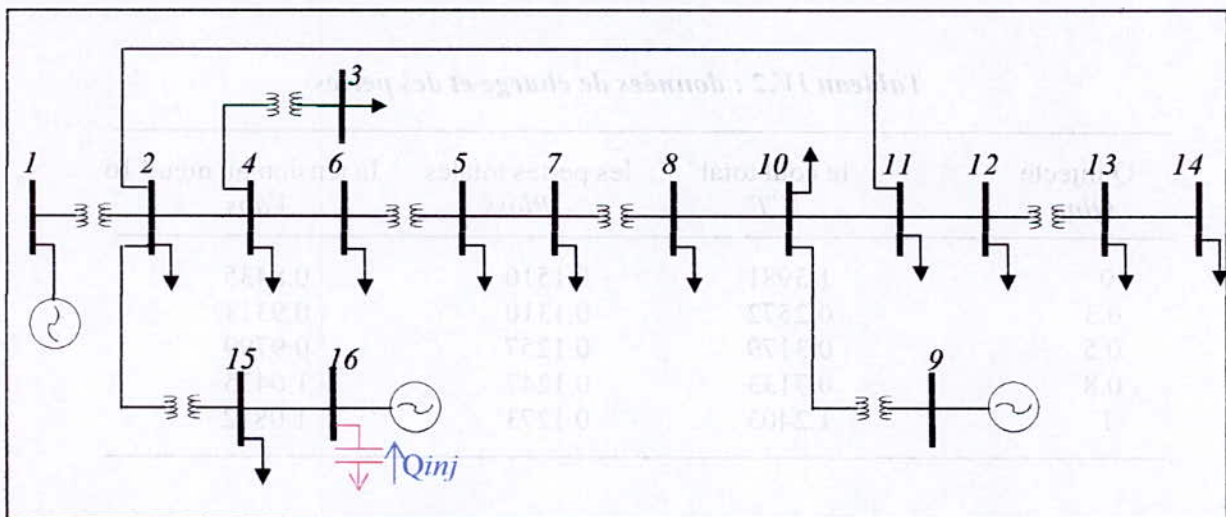


Figure IV.4 : le diagramme du système de 16 nœuds

Nœuds	2	4	5	6	7	8	10	11	12
La tension (p.u)	0.9922	1.0193	1.0064	1.0121	1.0093	1.0217	1.0373	1.0176	1.0093
	13	14	15	16					
	0.9792	0.9527	0.9637	0.8435					

**Tableau IV.1 : données de tension**

Dans l'écoulement de puissance effectué, nous remarquons que dans le nœud 16 il y a un manque de puissance réactive car la tension est faible (0.8435 pu). Par suite, il faut placer un condensateur au niveau de ce nœud, et qui aura pour rôle de réguler les niveaux de tension/ *Lad, 05j*.

Le tableau IV.1 représente les données d'écoulement de puissance, qui sont le coût total et les pertes totales avec les niveaux de tension des nœuds. Notre étude s'est basée sur le nœud 16 car ce nœud n'est pas stable quelque soit les niveaux de charge ( $Q_i$ ).

**Tableau IV.2 : données de charge et des pertes**

Q injecté $Q_{inj}$	le coût total $CT$	les pertes totales $P_{loss}$	la tension au nœud 16 $V_{abs}$
0	1.3981	0.1510	0.8435
0.3	0.2572	0.1310	0.9313
0.5	0.3179	0.1257	0.9799
0.8	0.7133	0.1247	1.0435
1	1.2403	0.1273	1.0812



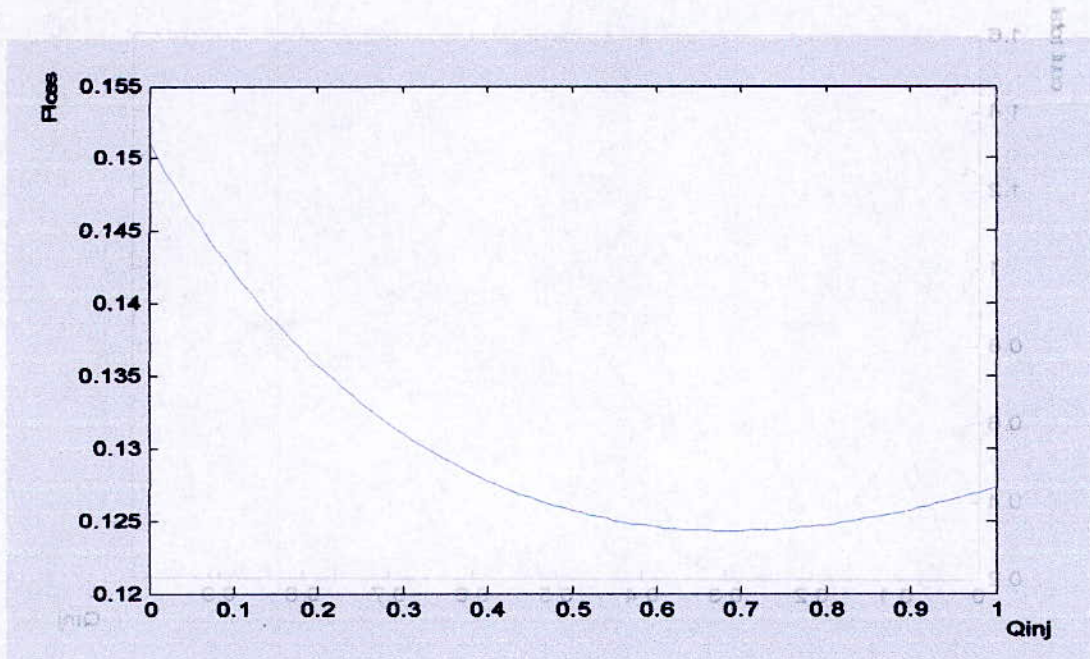


Figure IV.5 : les pertes totales à chaque puissance injectée

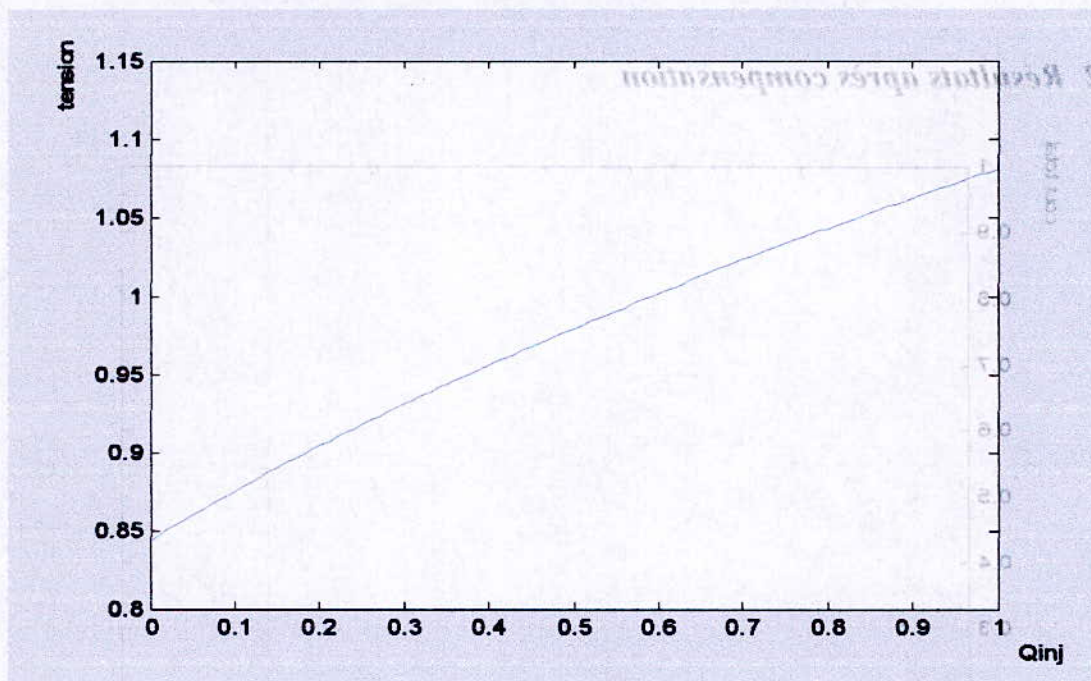


Figure IV.6 : la tension au nœud 16

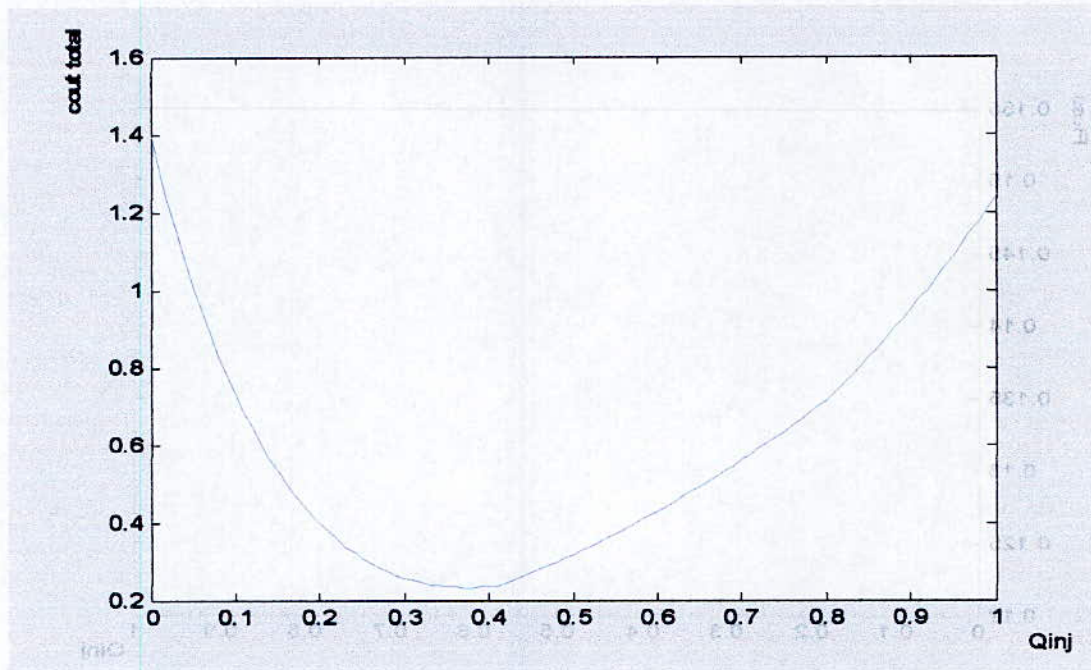


Figure IV.7 : le coût total

#### IV.5.2 Résultats après compensation

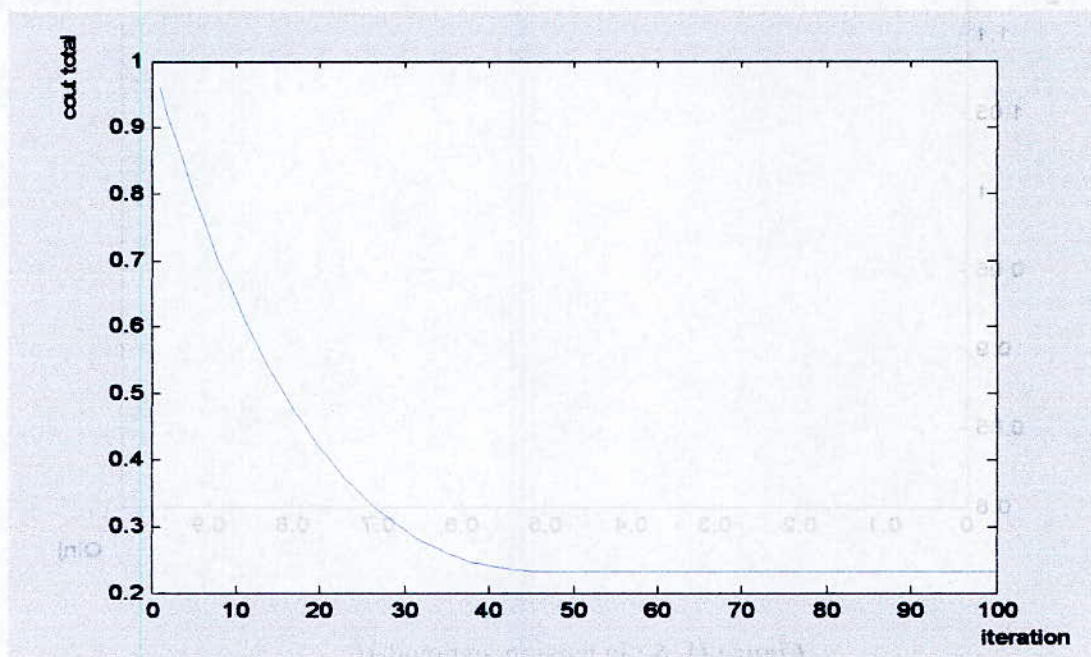


Figure IV.8 : Le coût total



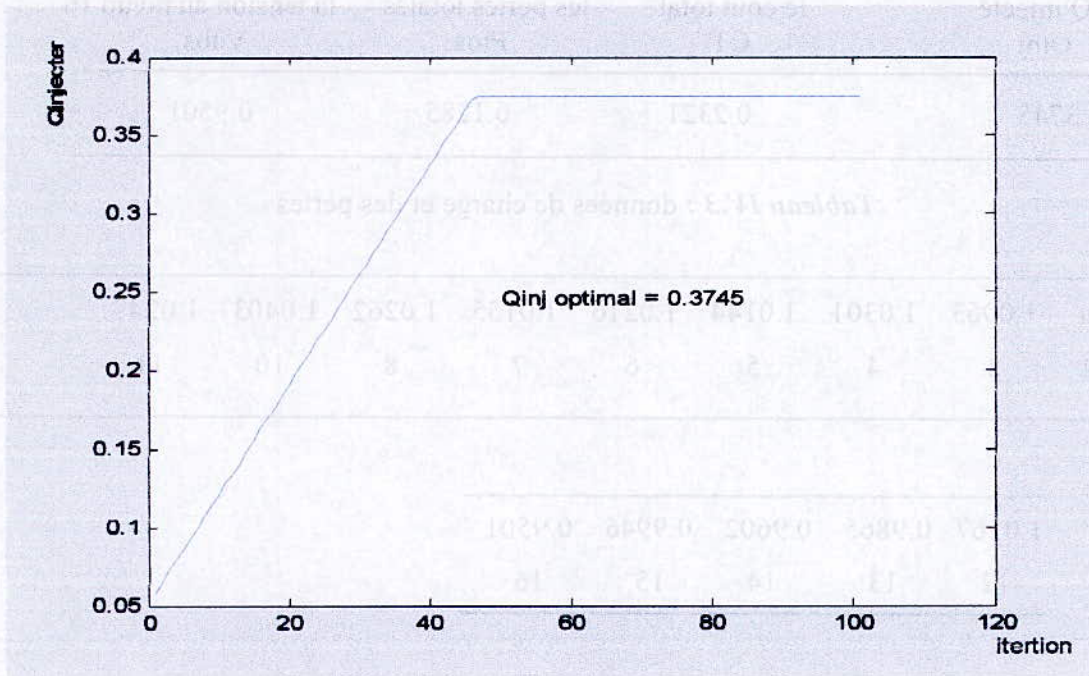


Figure IV.9 : la puissance optimale a injectée

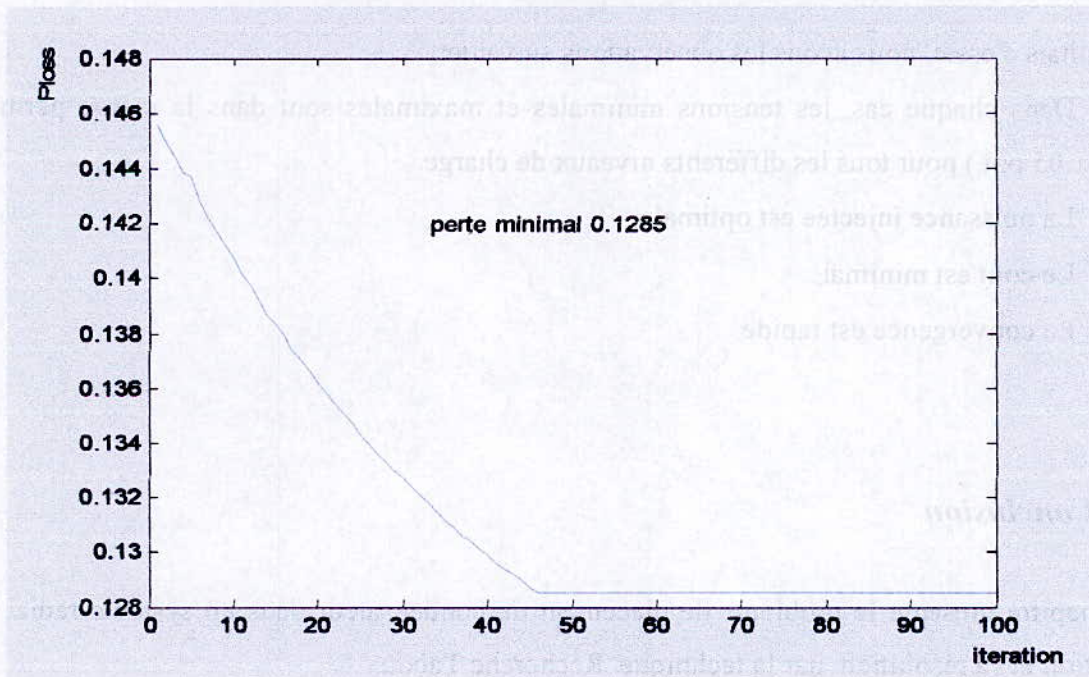


Figure IV.10 : Les pertes totales

Q injecté Qinj	le coût total CT	les pertes totales Ploss	la tension au nœud 16 Vabs
0.3745	0.2321	0.1285	0.9501

**Tableau IV.3 : données de charge et des pertes**

Tension	1.0063	1.0301	1.0144	1.0216	1.0155	1.0262	1.0403	1.0249
Nœuds	2	4	5	6	7	8	10	11

1.0167	0.9865	0.9602	0.9946	0.9501
12	13	14	15	16

**Tableau IV.4 : la tension dans chaque nœud**

Des résultats d'essai, nous avons les observations suivantes :

- Dans chaque cas, les tensions minimales et maximales sont dans la marge permise (0.95-1.05 p.u.) pour tous les différents niveaux de charge.
- La puissance injectée est optimale.
- Le coût est minimal.
- La convergence est rapide.

#### IV.6 Conclusion

Ce chapitre présente le problème de placement de condensateur dans un système radial de distribution et sa résolution par la technique Recherche Tabou.

Dans ce chapitre, nous avons proposé la Recherche Tabou basée comme méthodologie de résolution pour déterminer :

- les endroits d'installations des condensateurs.



- les types, le nombre et les tailles de condensateur.
- les arrangements de commande de ces condensateurs à différents niveaux de la charge.

Une méthode basée sur l'analyse de sensibilité a été employée pour choisir les endroits candidats pour installer les condensateurs et pour réduire l'espace de solution du problème.

L'efficacité de la méthode de Recherche Tabou pour résoudre le problème combinatoire d'optimisation du choix de l'emplacement de condensateur a été démontrée par les exemples numériques. Dans nos expériences, commander les paramètres des Recherches Tabous, par exemple, la taille de la liste de Tabou, le taux de réduction de voisinage de recherche, et le seuil de compteur de fréquence, et qui sont facilement accordés dans le processus de solution.

---

## **CONCLUSIONS GENERALS**

---



## ***Conclusion Générale***

Dans ce travail, nous avons appliqué avec succès la méthode recherche tabou pour résoudre le problème de placement de condensateur. La description de problème du choix du nœud d'implantation des condensateurs est d'abord adressée. L'arrangement général de la méthode recherche tabou et ses applications au problème de placement de condensateur ont été présentées.

Une méthode basée sur l'analyse de sensibilité a été utilisée pour choisir les endroits candidats pour installer les condensateurs et pour réduire l'espace de solution du problème.

De plus, en appliquant les différents Algorithmes de Recherche Tabou, pour la résolution du problème de l'optimisation de puissance réactives, les différents résultats obtenus nous ont permis de constater que cette technique offre des avantages considérables en :

- permettant une expression naturelle du problème étudié, du moment où aucune analyse n'est effectuée (gradient, lagrangien)
- l'aspect de convergence globale, permet d'obtenir les solutions les plus optimales.
- la possibilité d'avoir un ensemble de solutions, et d'appliquer des critères des ensembles d'intensification et de diversification, durant ou après la recherche permet de faciliter la prise de décision.

En conclusion, les résultats numériques de la méthode recherche tabou appliquée dans un système radial de distribution réseau électrique composé de 16 nœuds, ont montré que la compensation obtenue est idéale car elle permet de produire l'énergie réactive à l'endroit où il y a manque de cette énergie et en quantité ajustée à la demande (compensation locale).

---

## Références bibliographiques

---



## ***Bibliographie***

- [Nem, 04]** Nemouchie et Aliouat, " Application des Algorithmes Génétique pour résoudre le problème de répartition économique de charge dans un réseau électrique Juin 2004.
- [Aok, 87]** K. Aoki, "Outage State Optimal Load Allocation by Automatic Sectionalizing Switches Operation in Distribution Systems", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. PWRD-2, No. 4, pp. 1177-1185, October 1987.
- [Lui, 88]** C.Lius, "An Expert System Operational Aid for Restoration and Loss Reduction of Distribution Systems", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 3, No. 2, pp. 619-626, May 1988.
- [Aok, 88]** K.Aoki, "Voltage Drop Constrained Restoration of Supply by Switch Operation in Distribution Systems", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 3, No., 3, pp. 1267-1274, July 1988.
- [Lin, 89]** C.Lin "A Distribution System Outage Dispatch by Data Base Method with Real-Time Revision", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 4, No. 1, January 1989.
- [Aok, 89]** K.Aoki, "A New Algorithm for Service Restoration in Distribution Systems", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 4, No. 3, July 1989.
- [Fuk,90]** C. Fukui, "Switch Pattern Planning in Electric Power Distribution Systems by Hopfield-type Neural Network", *Proc. of IJCNN* Wash. DC. Vol. II-591, 1990.
- [Ima, 93]** Imamura, "An Application of Fuzzy Reasoning for Service Restoration", *Trans. of IEE of Japan*, Vol.113C, No.5, May 1993.
- [Ree, 93]** C.Reeves, "Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems, Blackwell Scientific Publications", 1993.
- [Gol, 89]** D.E.Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley, 1989.
- [Mor, 94]** H.Mori, "Parallel Simulated Annealing for Power System Decomposition", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.9, No.2, May 1994.
- [Glo, 89]** F. Glover, "Tabu Search Part I", *ORSA(Operations Research Society of America) Journal of Computing*, Vol. 1, No. 3, Summer 1989.
- [Glo, 90]** F. Glover, "Tabu Search Part II", *ORSA Journal of Computing*, Vol. 2, No. 1, Winter 1990.
- [Bat, 94]** R. Battiti, "The Reactive Tabu Search", *ORSA Journal on Computing*, Vol. 6, No. 2, pp.126-140, 1994.



**[Bat, 95]** R. Battiti, "Reactive Search: Toward Self-tuning Heuristics", keynote talk at Applied Decision Technologies, April 1995, Brunel, UK.

**[Fuk, 95]** Y. Fukuyama and H. D. Chiang, "A Parallel Genetic Algorithm for Service Restoration in Electric Power Distribution Systems", Proc. of IEEE FUZZ/IFES conference, Yokohama, March 1995.

**[Kap, 84]** M. Kaplan, "Optimization of number, location, size, control type, and control setting of shunt capacitors on radial distribution feeder," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 103, No. 9, pp. 2659-2663, September 1984.

**[Dur, 83]** H. Duran, "Optimum number, location, and size of shunt capacitors in radial distribution feeder: A dynamic programming Approach," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 87, No. 9, pp. 1769-1774, January 1983.

**[Gra, 84]** J. Grainger, S. Civanlar, and K.N. Clinard, "Optimal voltage dependent continuous-time control of reactive power on primary feeders," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 103, No. 9, pp. 2714-2722, September 1984.

**[Chi, 90]** H.D. Chiang, J.C. Wang, O. Cockings and H.D. Shin, "Optimal capacitor placements in distribution systems: Part I and Part II," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 5, No. 2, pp. 634- 649, January 1990.

**[Bar, 89]** M.É. Baran and F.F. Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution system," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 4, No. 1, pp. 725-734, January 1989.

**[Glo, 77]** "Heuristics for Integer Programming Using Surrogate Constraints," decision Sciences, Vol 8, No 1, 156-166, 1977.

**[Glo, 86]** F. Glover, "Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence", p.13, 533-549, 1986

**[Sun, 93]** S. Sundhararajan and A. fahwa, "Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using a genetic algorithm," IEEE PES Summer Meeting, no. 93 SM 499-4, 1993.

**[Glo, 89]** F. Glover, "Tabu search - Part I," ORSA J. Comput., vol. 1, pp. 190-206, 1989.

**[Glo, 90]** F. Glover, "Tabu search - Part II," ORSA J. Comput., vol. 2, pp. 4-32, 1990.

**[Lag, 97]** M. Laguna and F. Glover., "Tabu Search, Kluwer Academic Publishers", 1997.

**[Bar, 89]** *M.E. Baran et F.F. Wu*, "optimal capacitor placement on a radial distribution system". *IEEE trans. On power delivery, vol. 4, No 1, pp 725-734, January 1989.*

**[Lad, 05]** *A.Ladjici*, thèse de magister 2005, " Application des differentes methodes pour la compensation de l'énergie réactive"



### Annexe 1

%Données des Noeuds

```
chrg = 1.;
Bus.Vmag=[1.0000;1.0000;1.0500;1.0000;1.0000;1.0000;1.0000;1.0000;1.0500;1.0000;1.000
0;1.0000;1.0000;1.0000;1.0000;1.0000];
Bus.Vang = zeros(Bus.Number,1);
Bus.Type = strvcat('S','PQ','PV','PQ','PQ','PQ','PQ','PQ','PV','PQ','PQ','PQ','PQ','PQ','PQ');
Bus.PG=chrg*[0.0000;0.0000;1.1000;0.0000;0.0000;0.0000;0.0000;0.0000;2.2000;0.0000;0.0
000;0.0000;0.0000;0.0000;0.0000;0.0000];
Bus.QG=chrg*[0.0000;0.0000;0.0000;0.0000;0.0000;0.0000;0.0000;0.0000;0.0000;0.0000;0.0000;0.
0000;0.0000;0.0000;0.0000;0.0000];
Bus.PL=chrg*[0.0000;0.0000;0.1000;0.0000;0.7500;0.0000;0.9000;0.0000;0.1500;0.0000;0.0
000;0.0000;0.5000;0.3500;0.0000;1.5000];
Bus.QL=chrg*[0.0000;0.0000;0.5500;0.0000;0.1500;0.0000;0.2000;0.0000;0.0400;0.0000;0.
0000;0.0000;0.0200;0.0300;0.0000;0.2000];
Bus.SG = (Bus.PG+j*Bus.QG);
Bus.SL = (Bus.PL+j*Bus.QL);
```

```
Bus.PQlist =strmatch('PQ',Bus.Type);
Bus.PVlist =strmatch('PV',Bus.Type);
Bus.SlackList =strmatch('S',Bus.Type);
Bus.NonSlack =union (Bus.PQlist,Bus.PVlist);
```

%Données des lignes

```
Line.BusNumber = 16;
Line.LineNumber= 9;
Line.From = [4;8 ;10;2;2 ;5;15;11;13];
Line.To = [6;10;11;4;11;7;16;12;14];
Line.X = [0.03519;0.03519;0.05279;0.08798;0.08798;0.04555;0.15180;0.035192;0.1773];
Line.R = [0.00665;0.00665;0.00998;0.01664;0.01664;0.008302;0.02768;0.006656;0.0521];
Line.Suscp,=
[0.07458;0.07458;0.1119;0.18644;0.18644;0.008129;0.0271;0.074576;0.003707]*.5;
Line.Srat = [3.585;3.585;3.585;3.585;3.585;2.012;2.012;3.585;0.872];
```

%données des Noeuds Controlé

```
Reg.Number= 3;
Reg.BusNum= [3;9];
Reg.QGmin(3) = chrg*-0.400;
Reg.QGmin(9) = chrg*-1.000;
Reg.QGmax(3) = chrg*0.8000;
Reg.QGmax(9) = chrg*1.4000;
```

%Données des transformateurs

```
Transfo.Number = 7;
Transfo.From = [1;15;13;3;5;7;9 ];
Transfo.To = [2;2 ;12;4;6;8;10];
Transfo.R = [0.003500;0.002722;0.002083;0.003846;0.001667;0.001667;0.001200];
Transfo.X = [0.035000;0.032670;0.041670;0.038460;0.041670;0.041670;0.024000];
Transfo.Srat = [2.000;2.000;1.200;1.300;1.200;1.200;2.500];
Transfo.Tap = [1.0000;1.0000;1./1.0250;1.0000;1.0000;1.0000;1.0000];
```