HAL
open science

ARCHITECTURES DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION DU FUTUR EN PRÉSENCE DE PRODUCTION DÉCENTRALISÉE

Marie-Cécile Alvarez-Hérault

To cite this version:

Marie-Cécile Alvarez-Hérault. ARCHITECTURES DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION DU FUTUR EN PRÉSENCE DE PRODUCTION DÉCENTRALISÉE. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2009. Français. NNT : . tel-00471172v3

HAL Id: tel-00471172

https://theses.hal.science/tel-00471172v3

Submitted on 28 Apr 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

N° attribué par la bibliothèque
|__|__|__|__|__|__|__|__|__|__|

T H E S E

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'Institut polytechnique de Grenoble

Spécialité : *« Génie Électrique »*

préparée au laboratoire de Génie Électrique de Grenoble (G2Elab)

dans le cadre de **l'Ecole Doctorale** *« Électronique, Électrotechnique, Automatique et Traitement du Signal »*

présentée et soutenue publiquement

par

Marie-Cécile ALVAREZ-HÉRAULT
Ingénieur ENSIEG

le 10 décembre 2009

ARCHITECTURES DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION DU FUTUR EN PRÉSENCE DE PRODUCTION DÉCENTRALISÉE

DIRECTEUR DE THESE
Nouredine HADJSAID

JURY

M. Mohamed El Hachemi Benbouzid	, Président
Mme Zita Alameida Vale	, Rapporteur
M. Nouredine Hadjsaïd	, Directeur de thèse
M. Raphaël Caire	, Co-encadrant
M. Bertrand Raison	, Co-encadrant
M. Frédéric Gorgette	, Examinateur

A ma filleule, Eve

A mon mari, Jérémy

A mes frères et soeur

A mes parents

« Le bonheur est à votre foyer, ne le cherchez pas dans le jardin des étrangers »

D. Jerrold

Remerciements

En premier lieu je tiens à remercier Monsieur Mohamed El Hachemi Benbouzid, Madame Zita Alameida Vale et Monsieur Frédéric Gorgette pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse. Je les remercie également pour leurs précieuses remarques et conseils mais également pour leurs questions pertinentes qui suscitent des perspectives intéressantes à ces travaux de thèse.

Je remercie également mon directeur de thèse, Monsieur Nouredine Hadjsaïd. J'admire son esprit de synthèse, sa façon d'analyser les problèmes et de cibler rapidement les points faibles. Il m'a appris comment aborder une problématique de thèse et comment rester logique lors d'une démarche scientifique.

Je tiens à remercier particulièrement mes co-encadrants de thèse, Raphaël Caire et Bertrand Raison. Tout d'abord, et en toute objectivité, ce sont les meilleurs encadrants de la Terre. Ils sont disponibles, rigoureux, compréhensifs et toujours d'un grand soutien. Ces qualités sont nécessaires pour qu'un doctorant puisse s'épanouir lors de sa thèse. Il y aurait

tellement de choses à dire sur leur sujet qu'on pourrait justement en faire une thèse ! Mais je tiens quand même à remercier Raphaël pour sa rapidité et sa concision lors des corrections. Quel bonheur de pouvoir être en sa compagnie jusqu'à 22h… Quand à Bertrand, je pense que c'est le meilleur pâtissier du laboratoire et sûrement le meilleur en badminton à en juger par le volant qu'il m'a offert et qu'il a généreusement baptisé MC… Plus sérieusement, ils ont su me donner goût à la recherche. Initialement, j'ai effectué un Master 2 Recherche uniquement pour ne pas me fermer de portes. Mais au fond de moi, il était hors de question de faire une thèse par la suite et encore moins d'envisager une carrière en tant qu'enseignant-chercheur. Raphaël et Bertrand m'ont transmis leur passion pour la recherche et je suis convaincue que si j'avais eu d'autres encadrants, je n'aurai pas eu envie de poursuivre dans le monde de la recherche. Ils ont été des modèles pour moi et le resteront tout au long de ma vie professionnelle.

Un grand merci à Wojciech, pour sa patience et sa disponibilité, parce que sans lui cette thèse n'aurait pas pu aboutir! Il a su prendre le temps de m'expliquer des choses qui ne sont simples que pour les mathématiciens. Il m'a fait découvrir le monde complexe des graphes et de l'optimisation combinatoire. J'ai été très heureuse de collaborer avec lui et j'espère pouvoir renouveler cette collaboration par la suite. Lui qui pensait m'avoir fait peur avec ses matroïdes et ses problèmes NP-difficile!

Je tiens à remercier également Monsieur Alain Malot (Schneider Electric) pour m'avoir fait partager sa culture des réseaux qu'il a pu acquérir lors de ses voyages à travers le monde. Merci également à Monsieur Alain Coiffier (ERDF), Monsieur Guillaume Roupioz (EDF - R&D) et Monsieur Sébastien Grenard (EDF - R&D) pour leur aide précieuse. Ils m'ont consacré du temps et ont répondu à la moindre de mes interrogations.

J'arrive maintenant à un point essentiel : les amis. La thèse m'a permis de rencontrer de nombreuses personnes merveilleuses dont certaines resteront je pense mes amis à jamais. Je vais donc faire une petite dédicace pour quelques personnes qui me sont chères. Pour éviter les jalousies, je vais les citer par ordre alphabétique…

Asma, tu es celle qui m'a accueillie en premier dans ce labo et qui m'a fait me sentir à l'aise. C'est grâce à toi que j'ai pu rencontrer Jérémie, Feu, Abdel et bien d'autres ! On s'est soutenu mutuellement durant ses années en faisant du shopping et en se goinfrant de chocolat. J'espère sincèrement que notre amitié se poursuivra par delà les frontières, Asmita mia !

Bibou, la première fois que je t'ai rencontré, tu ressemblais à un petit nain chauve avec le bras en écharpe. Qui aurait cru qu'on se serait lié d'amitié !! Plus sérieusement, je n'oublierai jamais tous les moments que nous avons passés ensemble : nos longues discussions à propos de tout et de rien, nos soirées Disney, nos pauses Questions pour un Champion, mes semaines célibataire… J'espère que tout cela va continuer !

Carolina, pour moi incontestablement Miss G2Elab ! ¡Siempre tienes chismecitos que contarnos! Tu dinamismo y tu sonrisa eran como un rayo de sol al comenzar une semana lluviosa de intenso trabajo. ¡Te hecho de menos!

Diem, tu m'as fait découvrir le Viêt Nam. Nous avons pu partager notre vision du monde et nos valeurs. J'ai beaucoup appris avec toi. J'ai hâte de pouvoir venir te voir au Viêt Nam !

Feu, qui pourrait croire que sous les traits de ce petit bout de femme se cache la personne la plus forte, la plus déterminée et la plus généreuse que je connaisse. Souvent dans mes réactions un peu gamines, je me disais « pense à ce que Feu ferait à ta place.. ». Nous partageons beaucoup de choses ensemble et mis à part le physique, je pense sincèrement qu'on aurait pu être jumelles.

Lina, tu es sûrement la plus folle de ce labo mais c'est ce qui te rend si particulière ! ¡Hay no Lina…, me imagino tu cara cuando estés leyendo esto! Pero, Lina mía, eres un ejemplo de optimismo. ¡Aunque la Tierra te cayera encima, seguirías siempre sonriendo! ¡Tengo suerte de compartir la oficina contigo y Fuego! ¡No dudes de ti! ¡Eres la mejor!

Jérémie, j'ai mis trois ans pour trouver comment te faire piquer une crise de nerf : en mangeant ton goûter !! Ne t'inquiète pas, je ne le tenterai jamais ! C'est merveilleux de t'avoir comme ami car on sait que l'on peut toujours compter sur toi. Tu aides les autres sans jamais les juger et c'est une qualité qui est rare. Reste comme tu es !

Yann, sous tes airs de charmeur se cache quelqu'un d'extrêmement sensible et toujours à l'écoute. C'est très agréable de discuter avec toi car tu es très ouvert et as plein de rêves dans la tête. Ne t'inquiète pas Yann, je suis sûre qu'un jour tout le monde aura son panneau solaire sur le toit de sa maison, se déplacera en vélo et mangera bio !

Je remercie également tous les autres doctorants, notamment de l'équipe Syrel pour tous les bons moments passés dans la salle « Sangate », des courses de chaises jusqu'à l'hélicoptère télécommandé en passant par les citations célèbres et les trafics de PC. Merci donc à Benoit, Damien, Sczymon, Teu, Hieu.

Petit clin d'œil au D055, le fameux ! De super moments s'y sont déroulés : petits déjeuners, repas, pausettes et boulot par moment avec Abdel, Sylvain et tous les autres!

Je tiens également à remercier tous les autres membres du G2Elab. C'est vraiment très agréable de pouvoir travailler avec des gens qui sont toujours de bonne humeur, qui sont toujours prêts à rendre service ! Un grand merci à Sylvie et Mireille que j'aurais vraiment fait tourner en bourrique !

Je voudrais clore ces remerciements par le plus important : ma famille. Je remercie mes parents parce qu'ils m'ont toujours poussée et motivée. Ils m'ont donné la chance de pouvoir réaliser mes rêves. Je sais qu'ils donneraient beaucoup pour être à ma place aujourd'hui ! Je remercie mon frère et ma belle-sœur pour m'avoir fait une aussi jolie filleule. Sa photo a pris place sur mon bureau et a égayé certaines journées de boulot difficiles. Merci à mon petit frère pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail. Nos discussions m'ont parfois même donné des idées ! Je remercie également mes beaux-parents pour leur soutien et leur attention depuis qu'ils m'ont accueillie au sein de leur famille. Merci au petit Antonio pour sa joie de vivre !

Et enfin je remercie mon mari, Jérémy, parce que sans lui je ne serais pas docteur aujourd'hui ! Il m'a apporté tout le soutien dont j'avais besoin. Il est mon autre moitié et c'est pour cela que je l'ai épousé.

« Mariage : c'est ainsi que je nomme la volonté de créer à deux l'unique qui est plus que ceux qui l'ont créé.»

F. Nietzsche

Table des matières

Chapitre 0 : Introduction générale : nouvelles architectures des réseaux de distribution en présence de productions décentralisées 17

Chapitre I : Etat des lieux des réseaux de distribution en France et dans le monde 23

I.1. Définitions générales 25

I.1.1. Hiérarchisation du réseau électrique 25

I.1.2. Les différents niveaux de tension en France 25

I.1.3. Caractéristiques des grandeurs dimensionnantes 26

I.1.4. Le réseau de distribution HTA 28

I.2. Modes de distribution des réseaux HTA de par le monde 31

I.2.1. Historique 31

I.2.2. Les réseaux ruraux 33

I.2.3. Les réseaux urbains : réseaux en double dérivation simple 33

I.2.4. Les réseaux urbains : réseaux en dérivation multiples 34

I.2.5. Les réseaux urbains : Structures en coupure d'artère 35

I.2.6. Système nord-américain (E.U., Canada) 38

I.2.7. Système sud européen 40

I.2.8. Quelques architectures particulières détaillées 44

I.3. Principe de planification 52

I.3.1. Définitions 52

I.3.2. Calcul technico-économique pour le choix final d'une stratégie 59

I.3.3. Exemple d'application : étude de raccordement d'un client HTA 60

I.4. Conclusion 63

Chapitre II : Problèmes posés par l'insertion massive de GED dans le réseau de distribution et solutions possibles 67

II.1. Production décentralisée : définition et contraintes de raccordement 68

II.1.1. Impact de l'insertion de GED sur les grandeurs électriques 68

II.1.2. Impact de l'insertion de GED sur la planification et l'exploitation 73

II.2. Méthodes actuelles pour raccorder des GED sur le réseau de distribution 75

II.2.1. Procédure actuelle ERDF 75

II.2.2. Méthode de renforcement 77

II.2.3. Méthode du départ dédié 77

II.2.4. Limites et inconvénients des méthodes actuelles en cas d'insertion massive 78

II.3. Solution proposée : bouclage des réseaux de distribution 78

II.3.1. Evaluation de l'impact du bouclage : effet sur le taux d'insertion..... 79

II.3.2. Application de la méthode sur un réseau réel 85

II.3.3. Comparaison entre renforcement et exploitation bouclée du réseau..... 89

II.3.4. Proposition d'une nouvelle architecture bouclée : la structure hybride 92

II.4. Conclusions 95

Chapitre III : Méthodes combinatoires appliquées à la planification..... 99

III.1. Formalisation pour la recherche d'architectures cibles 100

III.1.1. Modélisation idéale 100

III.1.2. Problèmes posées..... 102

III.1.3. Méthodologie proposée 103

III.2. Outil de construction d'architecture 105

III.2.1. Définitions générales de la théorie des graphes..... 105

III.2.2. Les problèmes de tournées 108

III.2.3. Application à la construction de réseau 110

III.3. Algorithmes retenus pour la résolution du problème du voyageur de commerce..... 111

III.3.1. Voyageur de commerce bouclé 111

III.3.2. Voyageur de commerce non bouclé 114

III.4. Conclusion..... 117

Chapitre IV : Mise en œuvre et évaluation des solutions proposées : bouclables contre bouclées 121

IV.1. Démarche adoptée et données électriques 122

IV.1.1. Rappel des objectifs 122

IV.1.2. Données électriques 122

IV.2. Partitionnement de données..... 123

IV.2.1. Etape 1 - Algorithme de flot de coût minimal..... 124

IV.2.2. Etape 2 - Couplage des postes sources..... 129

IV.2.3. Etape 3 - Répartition des points entre les couples..... 130

IV.2.4. Résultat final 131

IV.3. Outil automatique de construction d'un réseau en coupure d'artère..... 131

IV.3.1. Algorithme proposé..... 131

IV.3.2. Exploitation des résultats 142

IV.3.3. Synthèse 149

IV.4. Outil automatique de construction de boucles hybrides 150

IV.4.1. Algorithme proposé..... 150

IV.4.2. Exploitation des résultats 155
IV.4.3. Synthèse 158

IV.5. Conclusion générale 159

Chapitre V : Recherche de solutions complémentaires 163

V.1. Transition vers les architectures cibles 163

V.2. Problème combinatoire 164

V.2.1. Algorithme des colonies de fourmis pour la recherche de chemins d'investissements optimaux .. 166
V.2.2. Application sur un exemple simple 170

V.3. Conclusion 172

Chapitre VI : Conclusion générale et perspectives 177

Références 181

Annexes 189

Annexe 1 : Méthode de calcul des intervalles de confiance 191

Annexe 2 : Caractère contradictoire de PL et de L 193

Annexe 3 : Différents coûts du réseau 194

Annexe 4 : Construction de 10 boucles 195

Glossaire

SAIDI : System Average Interruption Duration Index. Il s'agit d'un indice de fiabilité qui donne le temps moyen de coupure par an et par client en minutes.

SAIFI : System Average Frequency Duration Index. Il s'agit d'un indice de fiabilité qui donne la fréquence moyenne de coupure par an et par client.

END : Energie Non Distribuée en kWh par an. Il s'agit également d'un indice de fiabilité.

Produit PL : Produit de la puissance totale d'une zone donnée par la longueur totale de cette zone. L'équilibrage du produit de PL de plusieurs zones permet d'avoir une puissance coupée statistiquement identique dans ces zones.

GED : Générateur d'énergie distribuée

VC : Problème du Voyageur de Commerce. Ce problème est connu en anglais sous l'acronyme de TSP pour Travelling Salesman Problem.

VRP : Vehicle Routing Problem. Il s'agit du problème de tournée de véhicules.

Loadflow : Il s'agit d'un calcul de répartition des charges. Ce calcul permet de connaître l'état du réseau en régime permanent c'est-à-dire les transits de puissances active et réactive ainsi que la valeur de la tension (module et phase) en chaque nœud du réseau.

Chapitre 0

« Une nouvelle manière de penser est nécessaire si l'humanité veut survivre. »

A. Einstein

Chapitre 0

Introduction générale : nouvelles architectures des réseaux de distribution en présence de productions décentralisées

De nos jours, l'énergie électrique est un bien de consommation à part entière devenu indispensable, non seulement pour la vie quotidienne de chacun mais, également, pour l'économie des pays. En effet, les moindres pannes électriques ont des conséquences économiques et sociétales considérables. Par exemple, au nord est des Etats-Unis, la perte financière due à une panne généralisée a été estimée entre sept et dix milliards de dollars [ICF 2003]. Ainsi la nécessité d'avoir des réseaux électriques fiables et économiques est un enjeu de plus en plus important.

D'autres aspects comme l'ouverture des marchés, la volonté de préserver l'environnement et l'inquiétude grandissante face à la question de l'épuisement des réserves d'énergies fossiles

conduira, de plus en plus, à envisager l'utilisation accrue de productions décentralisées à base d'énergies renouvelables (éolien, photovoltaïque, entre autres). Ces productions seront intégrées au réseau de distribution qui devra, de la même façon que le réseau de transport, assurer la disponibilité de divers services pour les gestionnaires de réseau. En d'autres termes, le réseau de distribution doit évoluer vers un réseau flexible et intelligent qui intègre au mieux les énergies locales et/ou renouvelables. Cette évolution peut être envisagée en développant des systèmes intelligents, capables de minimiser les impacts engendrés par l'insertion de productions décentralisées et/ou par la recherche de nouvelles architectures. Ces deux solutions devraient permettre l'augmentation du taux de production décentralisée dans le réseau de distribution dans les meilleures conditions économiques et de sécurité.

Le réseau de distribution n'a pas été conçu, à l'origine, pour accueillir des unités de production mais pour acheminer, de manière unidirectionnelle, l'électricité qui provient du réseau de répartition jusqu'aux consommateurs moyenne et basse tension. L'utilisation de systèmes intelligents répartis, seuls, ne suffira pas à enrayer tous les problèmes auxquels le réseau de distribution sera confronté en cas de pénétration importante de productions décentralisées. Une modification d'architecture des réseaux de distribution semble être un axe de recherche.

Ainsi, le but de ces travaux est de rechercher des architectures cibles à atteindre à un horizon de trente années capables d'accueillir une insertion massive de production décentralisée tout en garantissant les contraintes de qualité, de continuité et d'égalité de fourniture à moindre coût. Dans cette optique, le chapitre I présentera le concept de planification des réseaux de distribution en détaillant les différentes structures utilisées et les différentes règles adoptées. Le chapitre II se concentrera sur les impacts de la production décentralisée sur le fonctionnement des réseaux de distribution actuels. Cette analyse conduira à la proposition d'une nouvelle architecture, née de l'hybridation de structures existantes, favorable à l'insertion de production décentralisée. Ensuite, le chapitre III sera consacré à la modélisation du problème de construction d'architectures cibles puis à l'analyse et au choix de méthodes pour construire ces architectures. Le chapitre IV de la thèse présentera l'apport d'une architecture particulière sur l'automatisation des réseaux de distribution, un nouveau pas nécessaire pour rendre les réseaux plus flexibles et exploiter, aux mieux, les capacités des futurs réseaux intelligents (*Smart Grids*). Enfin, le chapitre V proposera une méthodologie de

planification des investissements pour la mutation optimale des réseaux actuels vers les architectures cibles définies auparavant.

Chapitre I

« Le serpent qui ne peut changer de peau, meurt. Il en va de même des esprits que l'on empêche de changer d'opinion : ils cessent d'être esprit. »

F. Nietzsche

Chapitre I

Etat des lieux des réseaux de distribution en France et dans le monde

Les réseaux électriques se sont développés dès le début du XXème siècle, poussés par la nécessité d'interconnexion tant à l'échelle nationale qu'internationale. En effet, les premières sources de production provenaient principalement de sources hydrauliques puis thermiques. Comme toute la puissance produite n'était pas consommée localement et comme l'électricité se stocke difficilement, il était alors souvent nécessaire de lui faire passer les frontières politiques. Certaines zones, voire même quelques pays, n'avaient pas de ressources énergétiques propres et avaient donc besoin d'acheter de l'électricité à leurs voisins excédentaires. Dans divers cas particuliers, il pouvait être plus intéressant, financièrement, de consommer de l'électricité d'une centrale plus éloignée que de produire localement. L'électricité devenant un bien de consommation de plus en plus indispensable, la notion de continuité de fourniture apparut. Tous les facteurs cités précédemment ont contribué à la création de réseaux électriques interconnectés à l'échelle nationale et même internationale

[PER 1994]. Les avantages de l'interconnexion, conduisant à la création de blocs synchrones vastes étaient donc :

- une meilleure utilisation des ressources hydrauliques et thermiques,
- une meilleure continuité de service (grâce aux secours mutuels),
- une réduction du coût d'installation (diminution des suréquipements pour garantir la sécurité du système).

Ces zones synchrones sont devenues aussi complexes et étendues que l' « Union for the Coordination of the Transmission of Electricity » (UCTE) qui partage depuis juillet 2009 ces règles de conduite avec d'autres associations de transporteurs européens, nordiques, anglais, irlandais et même baltes. Ils forment l'« European Network of Transmission System Operators for Electricity » (ENTSOE) [ENT 2009].

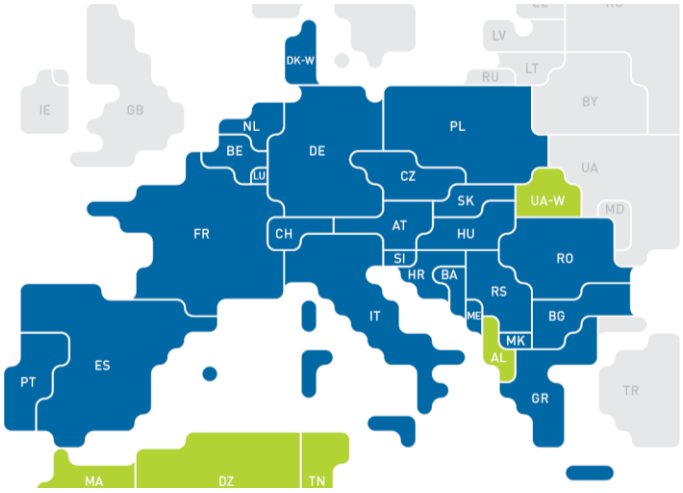


Figure I-1 : Le réseau synchrone de l'UCTE (source ENTSOE)

Ainsi avant d'aborder le concept de planification des réseaux électriques de distribution, il est nécessaire de définir la structure du réseau électrique ainsi que les différents éléments qui la composent. La première partie de ce chapitre sera donc consacrée aux définitions générales nécessaires à la compréhension du fonctionnement des réseaux. Dans une seconde partie, nous nous focaliserons plus particulièrement sur le réseau de distribution. Et enfin, nous détaillerons le principe de planification et son rôle majeur dans le développement du réseau de distribution.

I.1. Définitions générales

I.1.1. **Hiérarchisation du réseau électrique**

Le réseau électrique français est hiérarchisé en trois parties dont les fonctions actuelles sont très différentes. Tout d'abord, le réseau de transport a pour rôle de transporter l'énergie en très haute tension depuis les centres de productions jusqu'au premières zones de consommation. Le réseau de répartition alimente directement les gros consommateurs industriels puis achemine l'énergie jusqu'aux réseaux de distribution chargés d'approvisionner les consommateurs moyenne et basse tension.

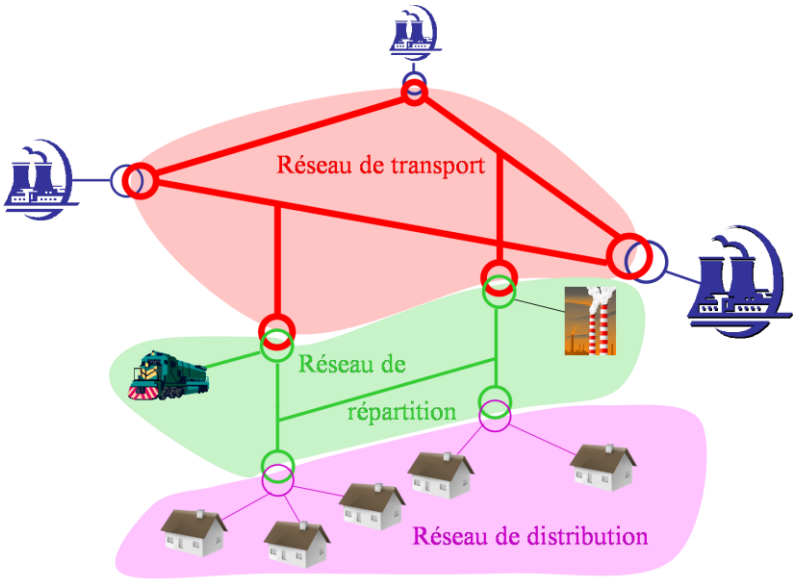


Figure I-2 : Le réseau électrique français

La Figure I-2 illustre le découpage des différentes parties du réseau électrique français. Ces trois niveaux de réseau sont délimités grâce à des transformateurs. Ces transformateurs permettent d'acheminer l'énergie à différents niveaux de tension.

I.1.2. **Les différents niveaux de tension en France**

La norme française des réseaux électriques, UTE C 18-510, définit, depuis 1989, les différents niveaux de tensions. Ils sont indiqués dans la Figure I-3. Nous utiliserons par la suite ces abréviations. Ainsi le réseau de transport et de répartition se situe au niveau de la HTB. Le gestionnaire du réseau de transport est responsable, à l'échelle nationale, de l'équilibre production/consommation et du respect des échanges transfrontaliers. Le réseau de distribution est au niveau de la HTA et de la BTA. Le rôle du gestionnaire du réseau de distribution est l'entretien et la gestion de ce dernier et aussi l'alimentation des clients de type

petites et moyennes entreprises et résidentiels au travers du réseau moyenne tension (HTA) et du réseau basse tension (BTA).

U < 50 V	50 V < U < 500 V	500 V < U < 1 kV	1 kV < U < 50 kV	50 kV < U < 100 kV	U > 100 kV
TBT	BT		MT	HT	THT
TBT	BTA	BTB	HTA	HTB	

Normes avant 1989

Normes après 1989

Figure I-3 : Les différents niveaux de tension en France, norme UTE C 18-510

I.1.3. **Caractéristiques des grandeurs dimensionnantes**

Les conducteurs aériens et souterrains permettent de transporter l'énergie électrique. Cependant, le coût de la matière première et l'encombrement du territoire font qu'il n'est pas possible d'investir dans d'immenses plaques de conducteurs métalliques. Ainsi, les tailles de conducteurs limitées créent des imperfections sur le réseau comme la chute de tension, les puissances limitées dans le réseau et enfin les pertes. Nous allons rappeler la définition de ces imperfections dans les paragraphes qui suivent.

Chute de tension

Soit un conducteur électrique triphasé de longueur L alimentant une charge électrique. Le conducteur est caractérisé par sa résistance kilométrique r et sa réactance kilométrique x. La Figure I-4 représente le système triphasé considéré ainsi que son schéma équivalent monophasé. En effet, un système triphasé équilibré de tension composée U (entre phases) est équivalent à trois systèmes indépendants triphasés de tension V (phase - neutre).

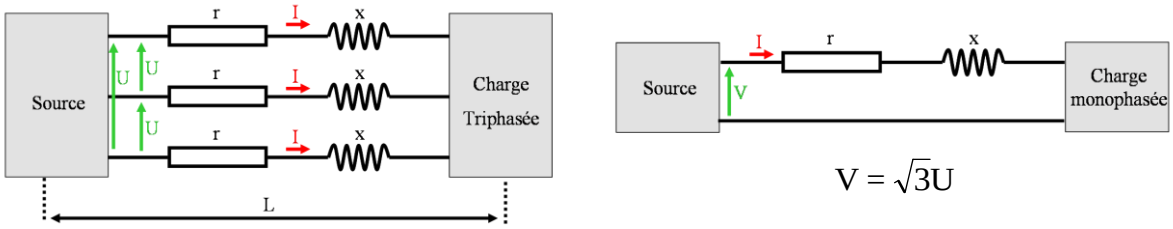


Figure I-4 : Système triphasé étudié

On peut alors dessiner le triangle de Kapp pour ce schéma monophasé comme présenté dans la Figure I-5. On approxime généralement la chute de tension entre la source et la charge à ΔV, partie de la chute de tension réelle colinéaire à V_{charge}. Cela se traduit donc par

l'expression de la chute de tension suivante : $\Delta V = r \times L \times I \times \cos(\varphi) + x \times L \times I \times \sin(\varphi)$. Par définition, on a :

$$S = VI \text{ (VA)}$$

$$P = V \text{ x } I \text{ x } \cos(\varphi) \text{ (W)}$$

$$\text{d'où } I \times \cos(\varphi) = \frac{P}{V} \qquad \text{(I-1)}$$

$$Q = V \text{ x } I \text{ x } \sin(\varphi) \text{ (VAr)}$$

$$\text{d'où } I \times \sin(\varphi) = \frac{Q}{V}$$

S = puissance apparente

P = puissance active de la charge monophasée équivalente

Q = puissance réactive de la charge monophasée équivalente

La chute de tension relative (en %) est donc :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{r \times L \times I \times \cos(\varphi) + x \times L \times I \times \sin(\varphi)}{V}$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{r \times L \times P + x \times L \times Q}{V^2}$$

En triphasé, nous définissons :

$$U^2 = 3V^2$$

$$P_{tri} = 3 \times V \times I \times \cos(\varphi) = 3P$$

$$Q_{tri} = 3 \times V \times I \times \sin(\varphi) = 3Q$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{3 \times r \times L \times P + 3 \times x \times L \times Q}{3V^2}$$

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{r \times L \times P_{tri} + x \times L \times Q_{tri}}{U^2} \qquad \text{(I-2)}$$

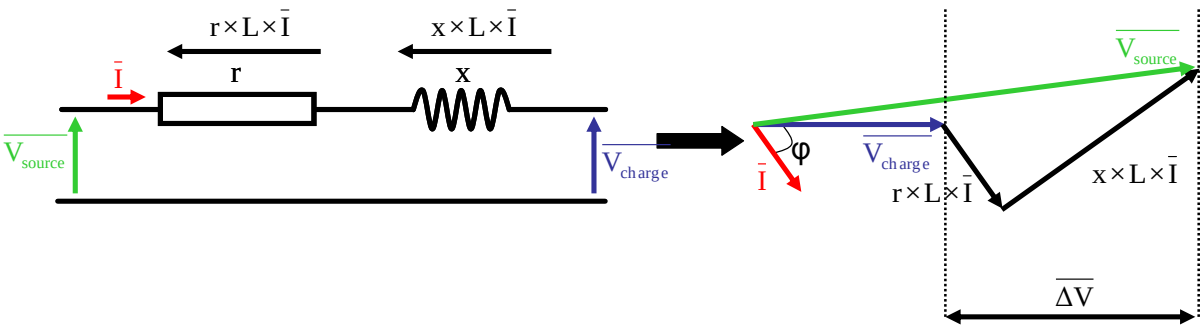


Figure I-5 : Triangle de Kapp du schéma monophasé équivalent

Ainsi on peut voir que plus les conducteurs utilisés sont longs ou impédants, plus il y aura de chute de tension.

Courant admissible dans un conducteur

Le courant admissible d'un conducteur est le courant maximal en régime permanent qui peut circuler dans ce dernier sans dépasser ses contraintes thermiques. Au-delà de ces températures, l'isolant et/ou le conducteur se détériorent et cela peut causer des incendies. Ainsi, il est nécessaire de dimensionner correctement les conducteurs utilisés pour alimenter les charges afin que les courants qui circulent respectent l'intensité admissible.

Pertes

Les pertes électriques sont liées au caractère résistif des conducteurs. Soit un conducteur triphasé de résistance linéique r (Ω/km) et de longueur L (km) permettant d'alimenter une charge. Les pertes s'expriment par la formule suivante : $Pertes = 3 \times r \times L \times I^2$. Or on sait que $S_{charge} = \sqrt{3} \times U \times I$ d'où $Pertes = \frac{3 \times R \times S_{charges}^{\ 2}}{\left(\sqrt{3} \times U\right)^2}$. L'expression des pertes est donc :

$$Pertes = \frac{R \times S_{charges}^{\ 2}}{U^2} \tag{I-3}$$

Ainsi, l'utilisation d'une tension élevée permet de diminuer les pertes. Par ailleurs, $S^2 = P^2 + Q^2$ d'où

$$Pertes = \frac{R}{U^2} \times (P^2 + Q^2) \tag{I-4}$$

Ainsi, on peut également constater que le transport de puissance active et réactive augmente les pertes.

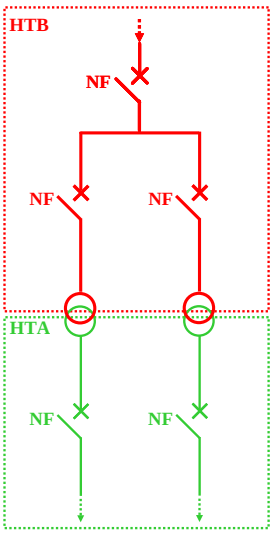
I.1.4. **Le réseau de distribution HTA**

Le réseau de distribution moyenne tension commence à partir du poste source HTB/HTA d'où partent plusieurs départs HTA constitués d'un ensemble de conducteurs et d'appareils de coupure qui alimentent les charges moyenne tension ou les postes de distribution publique (HTA/BTA). Tous ces termes vont être explicités dans les sections suivantes.

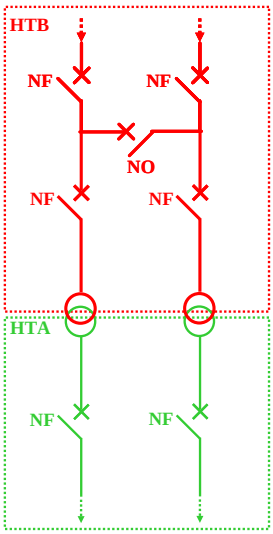
Postes source HTB/HTA

Les postes source HTB/HTA sont parfois alimentés en antenne mais, le plus souvent, ils sont alimentés avec un jeu de barre recevant plusieurs arrivées (ou lignes) HTB. Un ou

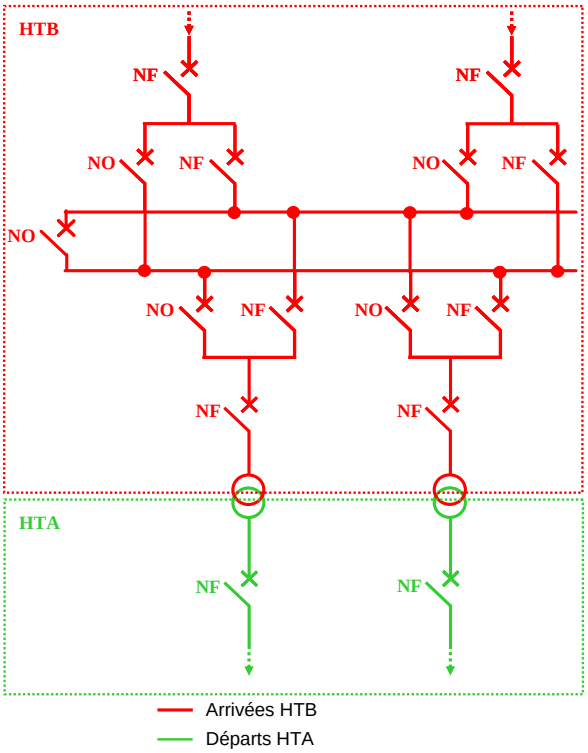
plusieurs transformateurs HTB/HTA sont raccordés sur ces jeux de barre HTB simples ou multiples. A l'aval de ces transformateurs, des départs moyenne tension partent d'un ou plusieurs jeux de barres HTA. La Figure I-6 illustre les différents postes source HTB/HTA usuels. Un départ est la portion du réseau dont l'extrémité amont est un poste source HTB/HTA et l'extrémité aval un organe de coupure normalement ouvert (si c'est un départ bouclé à un autre) et le dernier poste de distribution publique HTA/BTA le cas échéant.



Simple antenne



Double antenne – simple jeu de barre



Double antenne – double jeu de barre

Figure I-6 : Postes source HTB/HTA

Les réseaux HTA

Les réseaux HTA sont, en France, et depuis les années 1985 [CAR 1991], soit réalisés avec des câbles souterrains quasiment toujours bouclables mais exploités en radial (réseaux urbains principalement), soit réalisés avec des lignes aériennes, elles aussi le plus souvent bouclables (réseaux ruraux). Il reste quelques structures aériennes en antenne sans secours possible. Avant 1985, les réseaux étaient en grande majorité construits avec des lignes aériennes. Mais des contraintes liées à l'esthétique, à la fiabilité et à l'encombrement ont poussé au développement des câbles souterrains. Par ailleurs, des techniques modernes de pose mécanisée des câbles souterrains ont rendu leur utilisation plus compétitive.

Le long des liaisons HTA, on trouve :

- pour les câbles souterrains, des postes de transformation maçonnés HTA/BTA raccordés en coupure d'artère ou en double dérivation,
- pour les lignes aériennes, des postes de transformation simplifiés raccordés par des piquages en antenne alimentant, soit des transformateurs aériens sur poteaux (dits H61), soit des transformateurs sous abris dits « cabine ou bas de poteau ».

Nous détaillerons les structures des postes de distribution publique HTA/BTA dans la partie I.2. A l'aval de ces transformateurs HTA/BTA, on trouve principalement des réseaux BTA non bouclables sauf quelques exceptions en réseaux urbains. Parfois, ces réseaux sont très courts comme, par exemple, dans les zones rurales d'Amérique du Nord où le distributeur alimente directement en biphasé haute tension de quelques kilovolts des charges dispersées ponctuelles allant de 10 à 20 voire 30 kW. Les branchements très courts en basse tension viennent alors directement du transformateur moyenne tension (MV)/basse tension (LV). En France, les longueurs de ces réseaux basse tension varient mais excèdent rarement deux kilomètres.

Milieu urbain, milieu rural

Dans le réseau de distribution français, les principales contraintes dépendent de la répartition géographique des charges. Ainsi, un milieu rural se caractérise-t-il par une densité de charge faible répartie sur une grande zone. On a donc de grandes longueurs de conducteurs, souvent aériens. Ainsi, les problèmes qui peuvent intervenir dans les réseaux ruraux sont principalement liés aux chutes de tension admissibles en bout de ligne.

Un milieu urbain, quant à lui, est caractérisé par une densité de charge élevée avec des longueurs de conducteurs faibles. Ainsi, les puissances appelées sont importantes et les problèmes qui peuvent intervenir sont principalement liés aux courants admissibles dans les conducteurs [CAR 1991].

I.2. Modes de distribution des réseaux HTA de par le monde

L'architecture des réseaux de distribution ainsi que le placement des appareils de coupure dépend de plusieurs paramètres technico-économiques comme le type de zone (rurale ou urbaine), la qualité de service désirée (temps moyen de coupure par client) et donc l'investissement que l'on est prêt à engager. Dans la suite de ce chapitre, nous allons décrire la structure générale des réseaux de distribution ainsi que les modes de distribution associés.

I.2.1. **Historique**

Les premiers systèmes de distribution HTA au début du XXème siècle étaient constitués de réseaux triphasés courts et le plus souvent aériens. Le neutre du réseau était souvent isolé de la terre. Les défauts non permanents susceptibles de se produire étaient en général auto-extincteurs (qui disparaissent spontanément en un temps très court, inférieur à 100 ms, sans provoquer le déclenchement des organes de protection du réseau) car la capacité du réseau était très faible [GAI 1993].

Puis, le courant de défaut se mit à augmenter en raison de :

- l'augmentation des niveaux de tension,
- l'utilisation de câbles souterrains,
- la diminution des longueurs de réseaux issus d'une même source
- l'interconnexion d'ensembles initialement séparés.

Il constitua alors un danger pour l'homme à cause des élévations locales de potentiel qu'il provoquait [CHA 2005].

Dès lors, deux grandes tendances apparurent : le système nord-américain et le système européen :

- en Amérique du Nord, le neutre fut directement relié à la terre régulièrement pour avoir de forts courants de court-circuit et ainsi pouvoir réaliser une détection et isolation des défauts reposant sur des logiques de protection de type fusibles,
- en Europe du Nord, le neutre fut mis à la terre par une réactance accordée à la capacité du réseau pour compenser le courant de défaut monophasé et pour pouvoir, le cas échéant, continuer d'alimenter les charges lors de défauts monophasés,

- en Europe du Sud, le neutre fut raccordé par une impédance pour réduire la valeur du courant de défaut à une valeur raisonnable,

- pour le reste du monde, l'une de ces tendances précédentes furent adoptées.

Le choix des modes de distribution de l'électricité de par le monde dépend de deux principaux critères : un critère géographique et humain (étendue du territoire, répartition de la population et les puissances à desservir entre autres) et un critère historique (les savoirs faire introduits pas les zones d'influence ou colonies).

L'avantage du triphasé est qu'il permet le transport de la même quantité d'énergie avec une section conductrice totale plus petite qu'en monophasé. Ainsi toutes les structures rencontrées dans le monde ont au moins leur ossature principale en triphasée. Il peut cependant s'avérer que l'alimentation monophasée soit économiquement intéressante dans le cas, par exemple, de charges faibles et dispersées.

Il existe deux principaux systèmes de distribution de par le monde : le système nord-américain et le système européen. Dans un premier temps, nous allons définir les différentes structures HTA rencontrées en France, puis nous ferons un tour du monde des modes de distribution puis nous détaillerons quelques structures particulières. Nous verrons dans cette section que la structure d'un réseau de distribution est à la fois image des contraintes d'exploitation, du matériel disponible et des pratiques d'exploitation héritées de l'histoire du pays.

La qualité de service est encore plus importante en milieu urbain notamment à cause de certaines infrastructures qui ne doivent pas être déconnectées comme par exemple les hôpitaux. Le réseau est donc très souvent enterré à cause de ces contraintes d'encombrement et de qualité. La principale différence entre les réseaux aériens et souterrains provient du fait que si le défaut est moins fréquent en souterrain, il est en revanche plus long à réparer. Par ailleurs, un nombre plus important de clients peut être affecté.

L'exploitation est généralement en boucle ouverte. Cependant, on trouve une exploitation maillée à l'est de l'Allemagne (ex RDA). On trouve deux classes de structures : les structures à une voie d'alimentation ou encore appelées structures radiales ou en antenne (généralement dans les réseaux aériens) et les structures à deux voies d'alimentation ou en double dérivation [PER 1994], [CAR 1991], [FUL 2001], [PUR 2001].

I.2.2. **Les réseaux ruraux**

En milieu rural, on trouve des architectures arborescentes bouclables mais exploitées en radial. Les boucles peuvent se situer entre les postes HTB/HTA ou entre départs voisins (du même poste source). La Figure I-7 illustre la structure radiale.

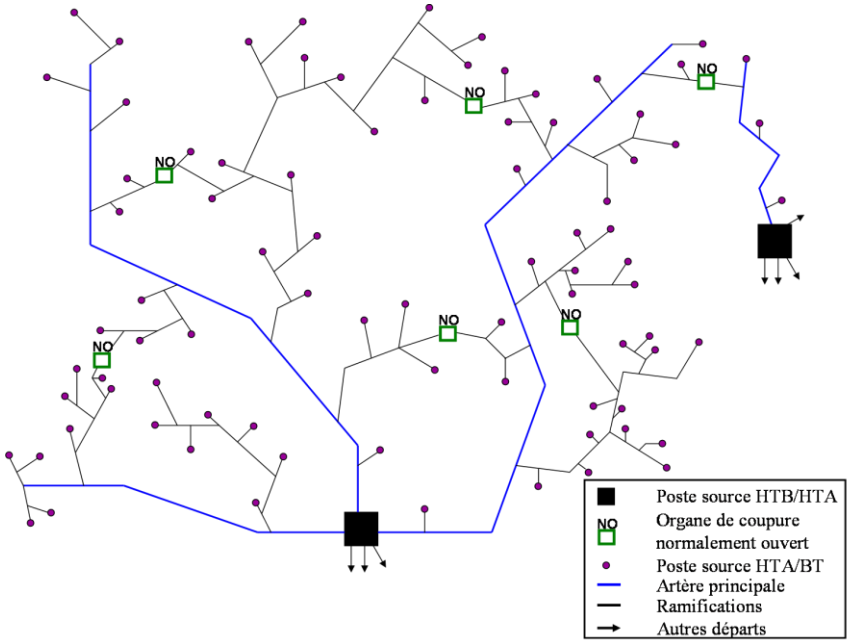


Figure I-7 : Réseau rural radial

I.2.3. **Les réseaux urbains : réseaux en double dérivation simple**

Le réseau radial en antenne est doublé à partir du jeu de barre du poste source HTB/HTA. Ainsi chaque transformateur HTA/BTA est connecté à un câble normal et à un câble de secours par le biais de dispositifs inverseurs comme le montre la Figure I-8. C'est une structure difficilement exploitable manuellement mais facilement automatisable malgré les coûts.

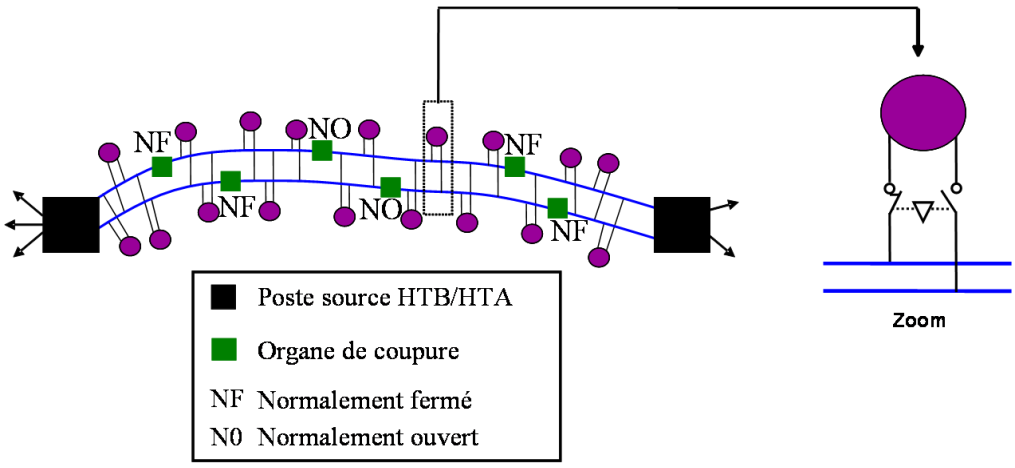


Figure I-8 : Réseau en double dérivation

I.2.4. **Les réseaux urbains : réseaux en dérivation multiples**

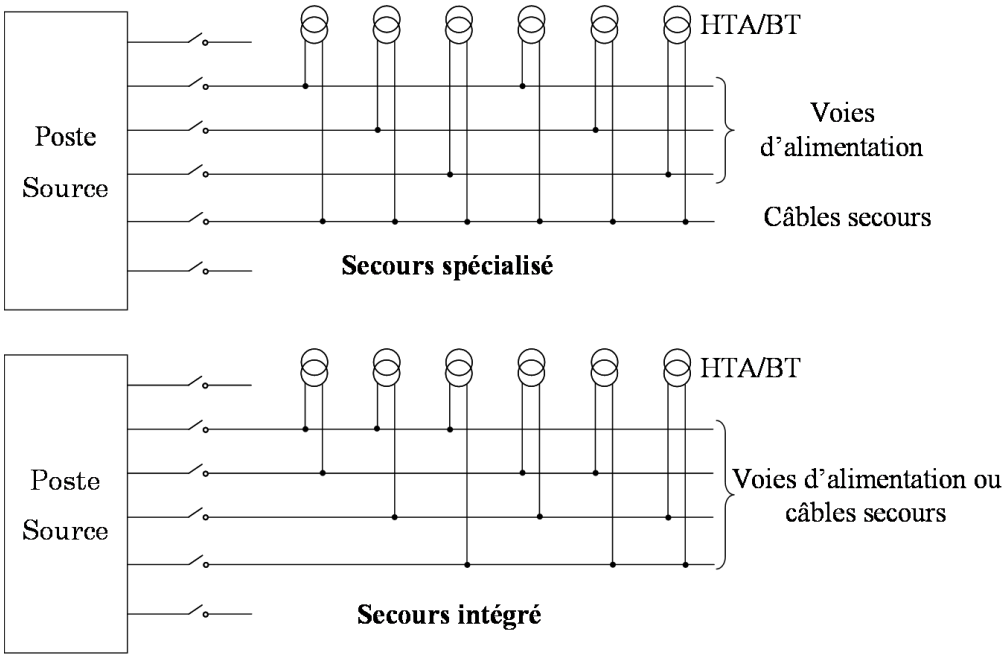


Figure I-9 : Double dérivation multiple

On trouve cette structure à Paris. Chaque poste source HTA/BTA ne dispose que de deux voies d'alimentation mais ces deux voies sont raccordées alternativement à entre trois et six câbles partant du poste source HTB/HTA. En cas de défaut, la charge peut être basculée soit sur un câble secours, soit sur les autres câbles (secours intégré) comme le montre la Figure I-9.

Dans tous les cas, on a intérêt à mettre un poste de coupure réparti tous les 10 à 15 postes HTA/BTA de façon à limiter les manœuvres lors de l'élimination du défaut. La Figure I-10 donne un exemple d'un poste de coupure sur deux départs d'une structure en double dérivation multiple de la Figure I-9.

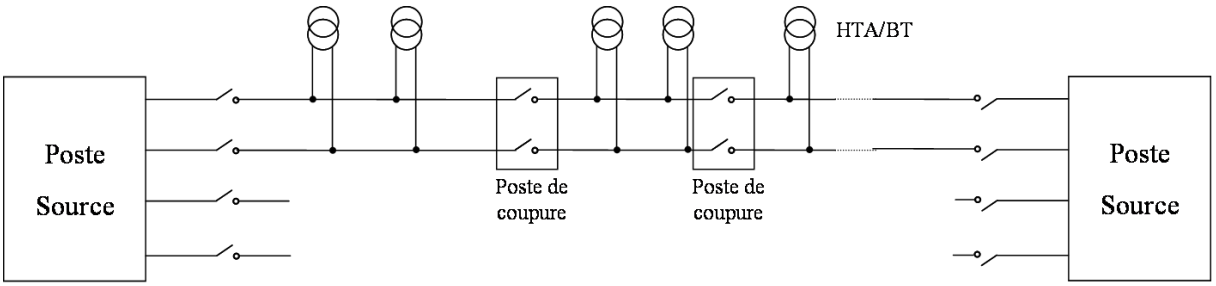


Figure I-10 : Poste de coupure

Dans le cas de fortes densités de charges ou quand une qualité de service accrue est demandée, cette structure peut être envisagée.

I.2.5. **Les réseaux urbains : Structures en coupure d'artère**

Dans cette architecture, un câble part d'un poste source HTB/HTA, passe successivement par les postes HTA/BTA à desservir avant de rejoindre soit un autre poste source HTB/HTA, soit un départ différent du même poste source HTB/HTA, soit un câble secours.

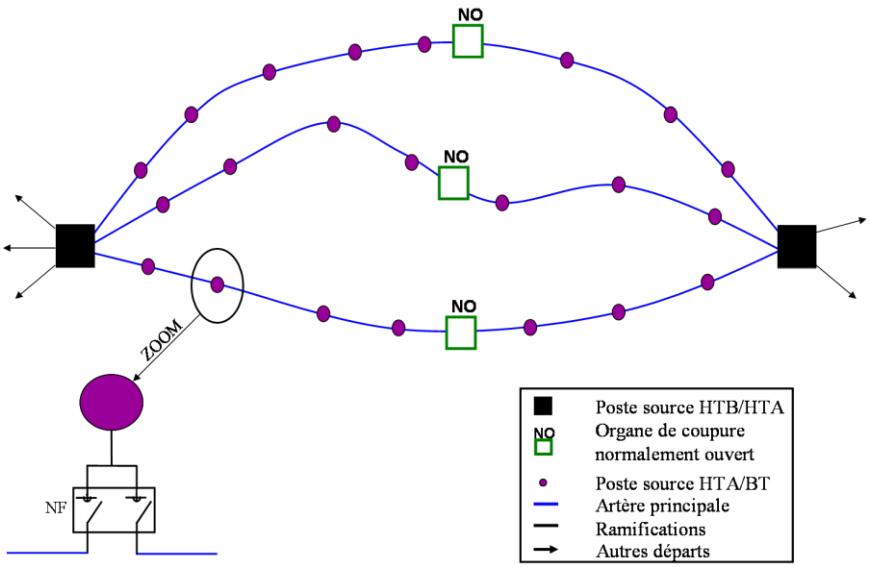


Figure I-11 : Coupure d'artère

Au niveau des postes HTA/BTA, des interrupteurs sont placés de part et d'autre des postes sources. Ils sont tous normalement fermés sauf un qui permet l'exploitation radiale. Ainsi en cas de défaut sur un tronçon de câble, on peut l'isoler en ouvrant les deux interrupteurs qui l'encadrent. La fermeture de l'interrupteur normalement ouvert permet la réalimentation du reste des charges non touchées par ce défaut. Le Tableau I-1 résume les avantages et inconvénients de la coupure d'artère.

Avantages	Inconvénients
▪ Plus économique que la double dérivation ▪ Exploitation manuelle : temps d'intervention d'environ 1h	Automatisation coûteuse et difficile mais qui sera amenée à se développer en raison de la baisse des coûts de transmission et des systèmes de gestion centralisée.

Tableau I-1 : Avantages et inconvénients de la structure en coupure d'artère

La coupure d'artère présente plusieurs variantes que nous allons détailler ci-dessous.

Les réseaux urbains : le fuseau

Dans le cas du fuseau (Figure I-12), tous les câbles issus d'un même poste convergent vers un même point appelé point de réflexion (PR sur la figure). Ce point pourrait constituer

le lieu privilégié pour la création future d'un poste source HTB/HTA. Lorsqu'il s'agit d'un point de réflexion, alors il peut être intéressant de mettre un câble de secours. Dans ce cas, la structure est alors dite à secours spécialisé (un câble secours pour, au maximum six câbles « travail »). Cette structure est simple et son exploitation facile. Par ailleurs, la qualité de fourniture est bonne.

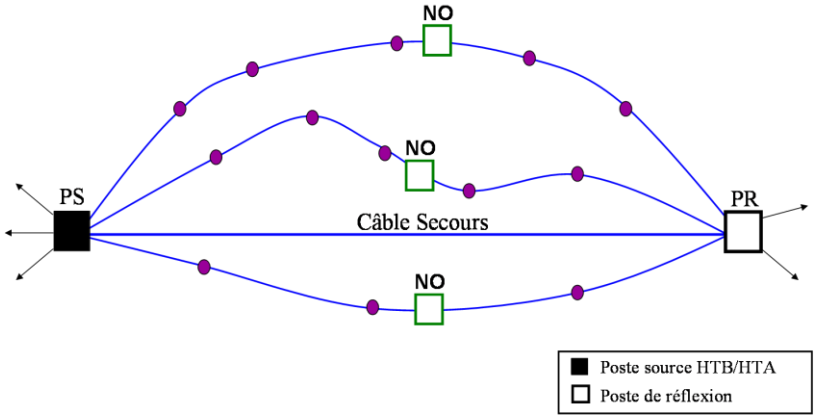


Figure I-12 : Le fuseau

Les réseaux urbains : l'épi

Il s'agit d'une variante du fuseau où il y a plusieurs points de réflexion répartis sur le câble secours. Il n'y a pas plus de six câbles travail pour un câble secours. Les câbles de travail partent du poste source et rejoignent un câble de secours qui suit une certaine direction. Le développement autour d'un même poste est économique et plus souple que le fuseau. En effet, cette structure tient compte de la réelle répartition des charges. La longueur des câbles de travail dépend de la répartition des charges alors que pour le fuseau, il faut tirer à chaque fois un câble depuis le poste source jusqu'au point de réflexion. La longueur des câbles est bien adaptée à la répartition des charges. On peut pallier une double indisponibilité et enfin ce réseau peut évoluer vers le fuseau.

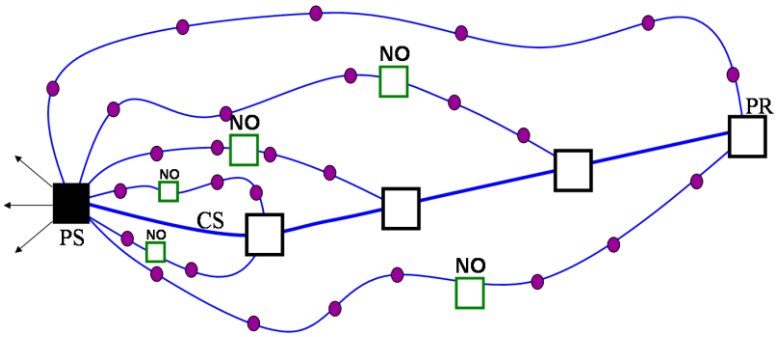


Figure I-13 : L'épi

Les réseaux urbains : la maille

Cette structure est composée de boucles alimentées directement par les sources HTB/HTA ou via des postes têtes de boucle reliés aux sources HTB/HTA par des conducteurs de section importante appelés câbles de structure. Les postes têtes de boucle ont la même structure que les postes source sauf qu'il n'y a pas de transformateur HTB/HTA. Des liaisons inter-boucles permettent le report de charge d'une boucle sur l'autre en cas de perte d'un câble de structure.

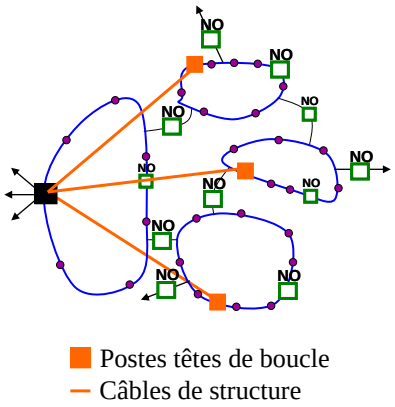


Figure I-14 : la maille

Les réseaux urbains : boucles ou pétales de marguerite

Cette structure est pratique lorsque le centre de gravité des charges est excentré par rapport au poste source. Dans ce cas, on alimente un poste nommé poste tête de pétales par un ou deux départs issus du poste source HTB/HTA. Par ailleurs, la puissance des câbles est limitée à la puissance maximale divisée par deux pour que ceux-ci puissent tenir en cas de défaut. Contrairement à la maille, il n'y a plus de liaisons entre les boucles.

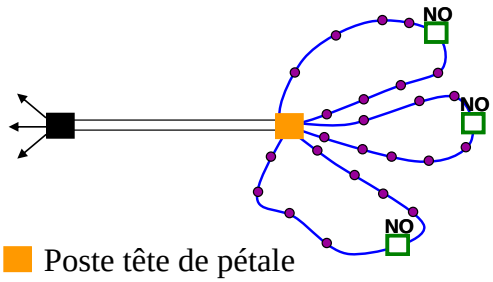


Figure I-15 : Boucles ou pétales de marguerite

Les réseaux urbains : structure maillée

La structure maillée est composée de conducteurs *intra postes* et *inter postes*. Les conducteurs *intra poste* relient deux postes sources HTB/HTA. Les conducteurs *inter poste*

relient des conducteurs *intra poste* ente eux. Des organes de coupure normalement ouverts sont répartis dans la structure maillée afin de permettre une exploitation radiale.

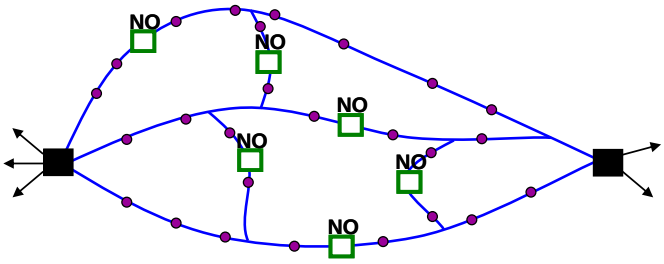


Figure I-16 : La grille

Des disjoncteurs repartis dans le réseau pourraient permettre un fonctionnement maillé mais c'est rarement utilisé. Cette structure permet une excellente qualité de service. Cependant, c'est une structure très coûteuse et dont le plan de protection est compliqué à réaliser.

I.2.6. **Système nord-américain (E.U., Canada)**

Description

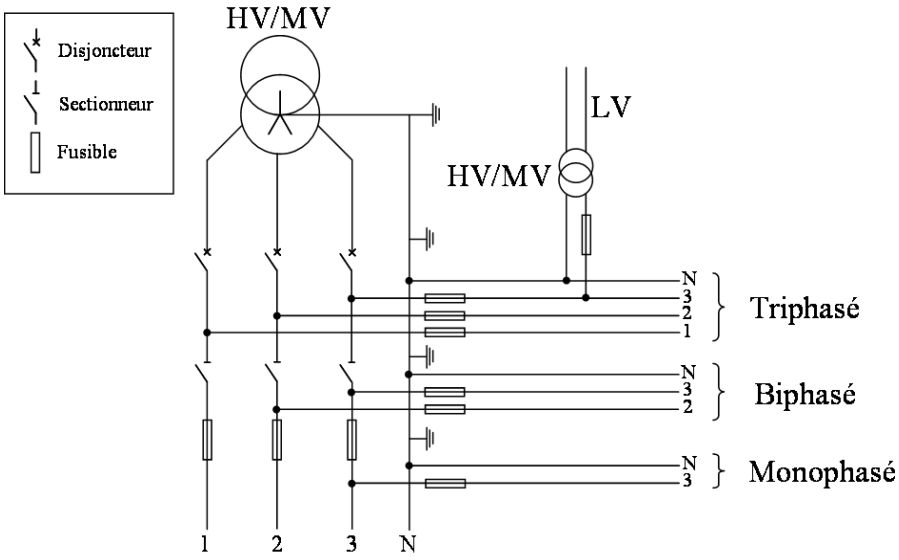


Figure I-17 : Système de distribution de type nord-américain

Cette architecture est composée de quatre conducteurs : trois conducteurs de phases et un conducteur de neutre. Le neutre est mis à la terre au niveau du poste source HTB/HTA puis régulièrement (tous les 200 à 300 mètres) ainsi qu'à chaque transformateur ou branchement de clients. A partir de cette ossature principale, des dérivations de type arborescentes se développent. Celles-ci peuvent être triphasées, biphasées ou monophasées. La Figure I-17 illustre la distribution de type nord-américaine.

Conditions d'utilisation

Cette architecture permet une alimentation en biphasé et monophasé ce qui est intéressant étant donné que dans ces vastes régions, il y a certaines zones géographiquement importantes où la densité de population, et donc les puissances à desservir, sont hétérogènes.

Exploitation

Cette architecture induit des courants de défaut très importants (jusqu'à plus de 10 000 A [GAIN 1993]). Ils sont donc facilement détectables. Plus leurs valeurs sont élevées, plus ils sont éliminés rapidement grâce à des protections adaptées et/ou à des fusibles.

Le système de mise à la terre utilisé impose un appareillage coordonné constitué de fusibles (près des transformateurs HTA/BTA ou en tête de petites dérivations), de sectionneurs automatisés (interrupteurs à coupure automatique dans le creux de tension) ailleurs et de reclosers (disjoncteurs réenclencheurs qui tirent leur énergie de manœuvre du courant de défaut) le plus souvent. Le réseau principal et les dérivations importantes sont alimentés en triphasé mais les dérivations les moins importantes sont souvent réalisées en monophasé (1 phase + neutre) ou biphasé (deux phases).

Le cas du monophasé à un seul conducteur (la terre jouant le rôle de neutre) est parfois envisagé pour son faible coût mais il existe certains risques. Il s'agit du SWER (Single Wire Earth Return). Si la terre a une résistivité qui varie en fonction des saisons, elle peut alors être plus élevée que celle d'un conducteur retour et donc engendrer d'importantes montées en potentiel. Une solution pour baisser la résistivité du sol serait d'enterrer du cuivre mais cela revient alors plus cher que de mettre un conducteur retour. Mais en général, distribuer en BTA monophasé dans les pays du tiers-monde est trop coûteux car il faut alimenter de très faibles charges dispersées. La résistivité des pays africains est élevée pendant toute la saison sèche. En Amérique du nord en revanche, le réseau basse tension est très court (départs dédiés inférieurs à 300 m) et les charges domestiques sont directement reliées aux transformateurs (4 à 6 particuliers par transformateur).

Avantages et inconvénients de ce type de distribution

Pour des charges dispersées mais importantes réparties sur le territoire, ce système est le plus économique. Il est utilisé, par exemple, pour de grosses exploitations agricoles distantes les unes des autres du fait même de leur taille.

Mais la distribution du neutre implique une surveillance accrue de la continuité de ce conducteur car toute rupture produirait alors un neutre flottant qui pourrait imposer une tension composée au lieu d'une tension simple aux consommateurs. Par ailleurs, d'importantes surtensions pourraient apparaître aux niveaux des mises à la terre dues au courant circulant dans la terre. De plus, il faut également surveiller l'état des systèmes de protections car ils sont soumis à des courants de court-circuit importants. Le Tableau I-2 résume les avantages et inconvénients du neutre relié directement à la terre.

Avantages	**Inconvénients**
▪ Minimisation des surtensions. ▪ Elimination sélective des défauts (fusibles). ▪ Economique (possibilité de dérivations monophasées).	▪ Courants de défaut importants. ▪ Déclenchements fréquents. ▪ Contraintes sur les équipements de protection (car courants de court-circuit élevés). ▪ Nécessité de surveiller le conducteur de neutre (notamment une éventuelle rupture de celui-ci qui entraînerait de forts gradients de potentiels au niveau des connexions de terre).

Tableau I-2 : Avantages et inconvénients du neutre relié directement à la terre

I.2.7. **Système sud européen**

Description

Cette architecture est composée, au niveau de la moyenne tension, de trois conducteurs qui sont les trois conducteurs de phase. Le neutre est directement relié à la terre par une impédance au niveau du poste source HTA/HTB. Cette architecture présente une ossature principale de forte section (usuellement 148 mm² en aluminium pour l'aérien) de laquelle partent des dérivations plus économiques (usuellement 54 mm² pour l'aérien) qui alimentent des grappes de postes sources HTA/BTA. La Figure I-18 illustre la distribution de type européenne.

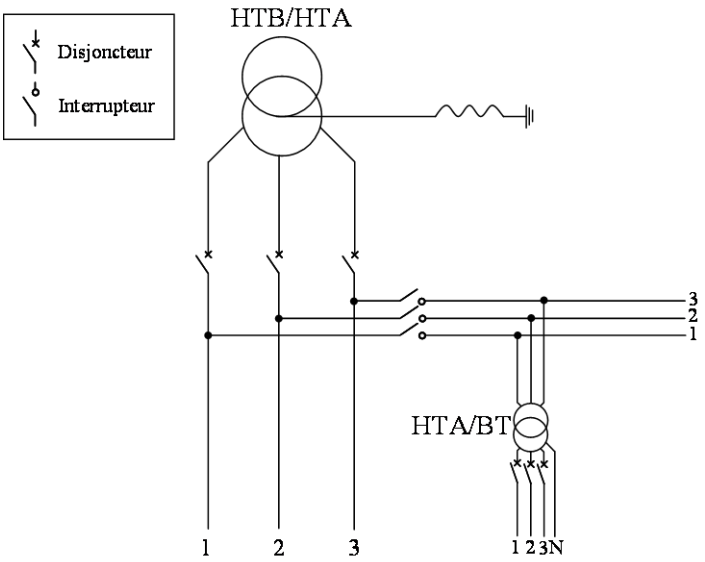


Figure I-18 : Système de distribution de type européen.

Système de protection

Le poste source est protégé par des disjoncteurs à cycle de réenclenchements rapides puis lents [PHA 2005] pour éliminer les défauts fugitifs, auto-extincteurs et semi-permanents dans le cas de réseaux aériens. Les lignes sont protégées par des disjoncteurs automatisés disposés sur l'ossature principale et en tête de dérivation. Ces disjoncteurs permettent d'isoler une zone en cas de défaut permanent en continuant d'alimenter le reste des clients raccordés à des artères non touchées par le défaut.

Avantages et inconvénients de ce type de distribution

Le coût immédiat de ce type de distribution peut être élevé à cause de l'utilisation systématique de trois conducteurs et de transformateurs triphasés. Cependant elle présente une grande capacité d'évolution et d'adaptation aux besoins d'une clientèle artisanale et de petites industries.

Variante N°1 : système utilisé en Grande-Bretagne ou en Irlande (à neutre non distribué)

Les architectures sont de type européenne mais permettent en plus une alimentation biphasée ou monophasée en utilisant deux fils de phases. Cette solution, utilisée pour alimenter des zones à habitats dispersés, est économiquement plus intéressante qu'une solution entièrement triphasée. La Figure I-19 illustre la première et deuxième variante de la distribution de type européen.

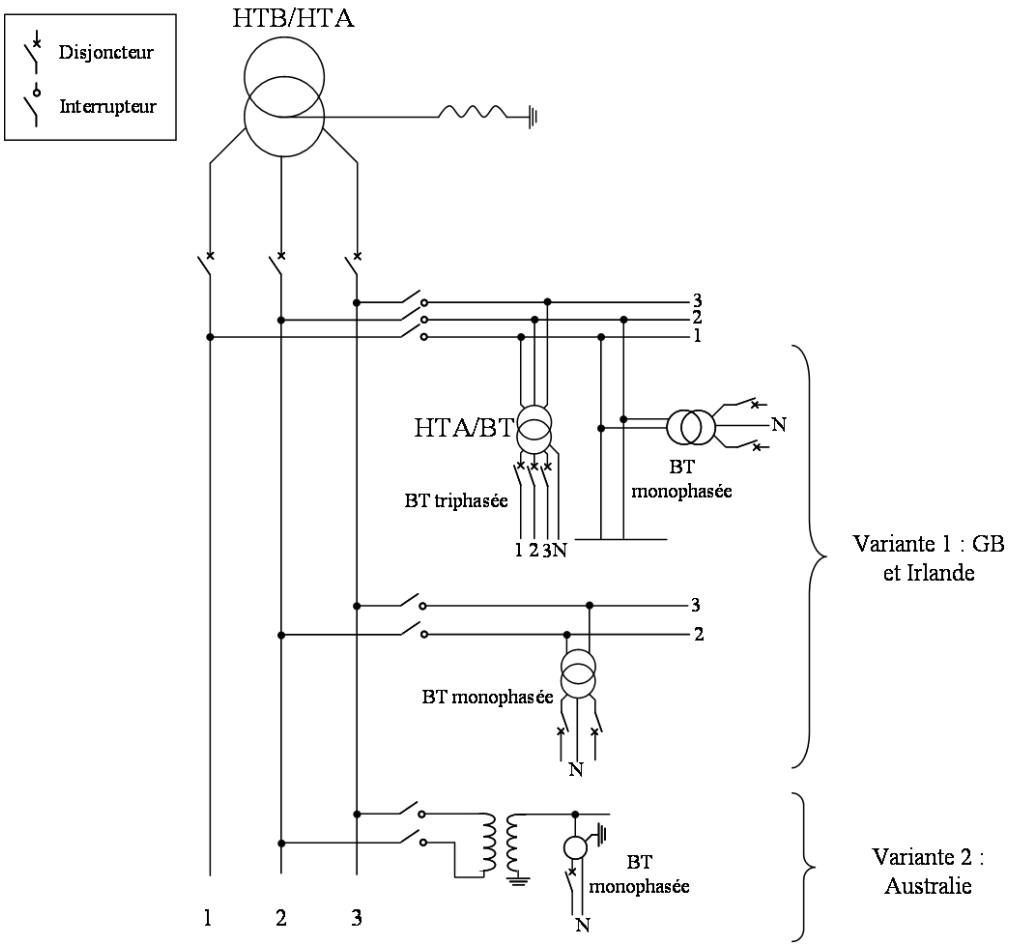


Figure I-19 : Variantes 1 et 2 de la distribution de type européenne.

L'avantage d'une telle solution, lorsqu'elle est employée correctement, peut aller jusqu'à économiser 15 à 25% des coûts du système sud européen classique. En revanche, des taux de déséquilibres importants peuvent apparaître.

Variante N°2 : le système australien

Cette architecture est de type européenne mais elle a la particularité d'avoir des distributions monophasées à un seul conducteur avec retour par la terre (SWER : Single Wire Earth Return). La Figure I-19 illustre le système australien. La résistivité du sol est faible et les distances pour desservir les consommateurs sont énormes donc c'est économiquement intéressant.

Avantages et inconvénients du neutre non distribué

Le Tableau I-3 résume les avantages et inconvénients de chaque régime de neutre non distribué ainsi que les pays où ils sont utilisés.

Régime de neutre	**Pays**	**Avantages**	**Inconvénients**
Neutre relié à la terre par une impédance	Belgique, France, GB, Irlande, Japon, Suède et Europe du sud	▪ Limitation des intensités des courants de court-circuit des défauts phase-terre. ▪ Surtensions modérées. ▪ Courant de défaut peu élevé donc pas besoin de neutre	Déclenchement au premier défaut
Neutre relié à la terre par bobines de Petersen	Allemagne, Finlande, Norvège, Europe du nord	▪ Courant de défaut monophasé quasi nul ▪ Bonne continuité de service	▪ A chaque changement de configuration de réseau il faut réadapter la bobine ▪ Surtensions (mais moins élevées que neutre isolé) ▪ Nécessité de personnel de surveillance
Neutre isolé	Allemagne, Belgique, Italie, Japon, Norvège	▪ Bonne qualité de service ▪ Evite déclenchement en cas de défaut phase-terre ▪ Courants de défauts très faibles	▪ Surveillance attentive ▪ Surtensions importantes donc matériels surisolés

Tableau I-3 : Synthèse sur les régimes de neutre non distribué

Résumé des solutions de desserte rurale à partir d'une ossature HTA existante

Charge prévue sur la dérivation	**Système nord-américain**	**Système européen**
Forte	3 phases + Neutre	3 phases
Moyenne	2 phases + Neutre	3 ou 2 phases
Faible	1 phase + Neutre	2 phases
Très faible	1 phase (retour par la terre)	1 phase (retour par la terre)

Tableau I-4 : Résumé sur les solutions de dessertes rurales [PER 1984]

I.2.8. **Quelques architectures particulières détaillées**

Dans cette partie, nous donnons quelques exemples d'architectures à travers le monde plus ou moins différentes de celles citées précédemment. Nous illustrons ainsi le lien étroit entre le choix d'architectures, le choix d'investissement et les différentes doctrines électriques des pays.

Réseau parisien

Le réseau de distribution parisien est un rare exemple d'application de la dérivation multiple comme illustré sur la Figure I-20. Il se présente sous la forme de trois couronnes de 20 kV.

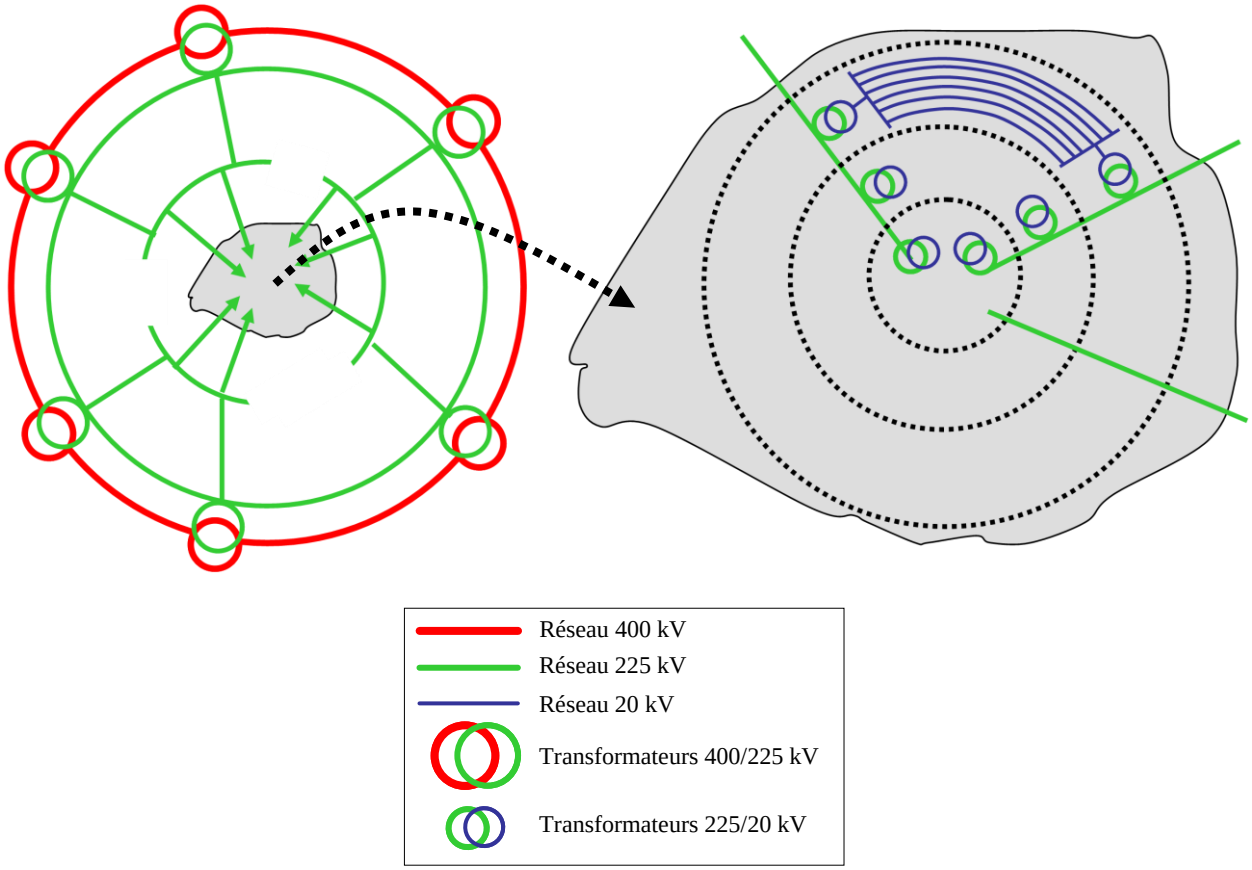


Figure I-20 : Réseau électrique parisien

Le réseau HTA parisien est constitué de 37 postes sources HTB/HTA et de 800 départs HTA (5300 km de câbles HTA) desservant 7000 postes HTA/BTA représentant un total de 1563000 compteurs et une consommation annuelle de 14000 GWh (Chiffre de 2001). Le temps moyen de coupure par client BTA était de 16,1 min en 2001.

Réseau de Tokyo (TEPCO)

Dans la ville de Tokyo, le réseau de distribution est un réseau 6 kV souterrain en coupure d'artère entièrement automatisé grâce au DAS (Distribution Automation System) [KOI 2005]. Il s'agit d'un système qui acquiert l'information sur le réseau de distribution (tension, courant entre autres) grâce à des capteurs intégrés aux interrupteurs et qui transmet les données au système informatique des centres de contrôle. Il y a des interconnexions entre postes sources HTB/HTA. Ainsi, contrairement à la simple coupure d'artère où les postes sources ne sont utilisés qu'à 50 % pour pallier un éventuel défaut, la coupure d'artère de Tokyo permet d'augmenter considérablement ce pourcentage en fonction du nombre d'interconnections. La Figure I-21 illustre le fonctionnement de ce réseau en cas de défaut au poste source PS1 par exemple. Les charges alimentées par PS1 sont alors alimentées par les autres postes sources.

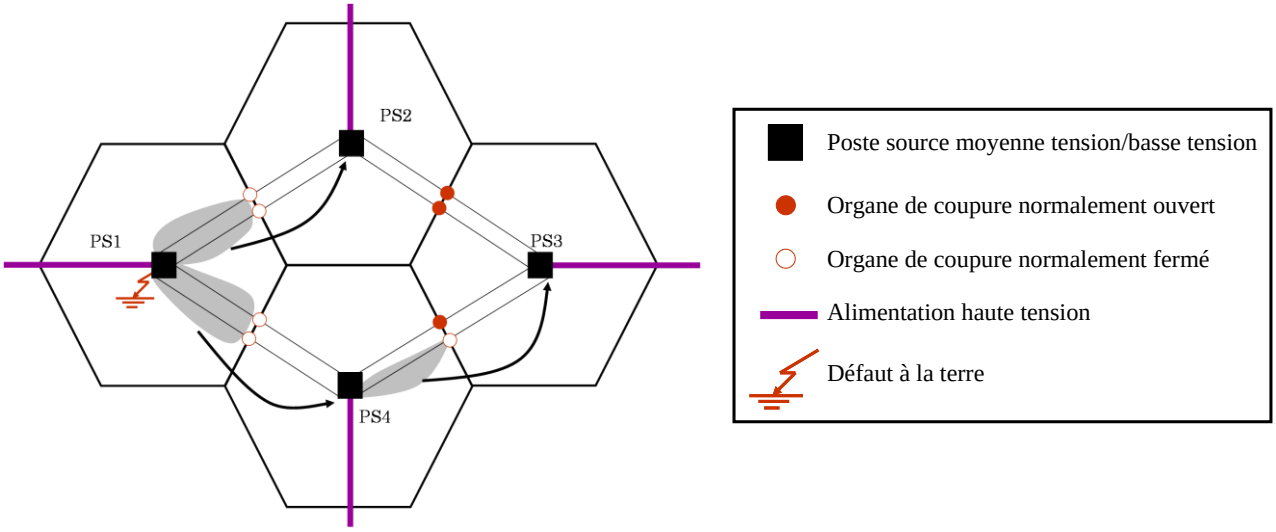


Figure I-21 : Réseau de Tokyo

Les avantages d'un tel réseau sont :

- une amélioration de la fiabilité,
- la possibilité de transfert de charges entre les postes sources,
- l'automatisation et donc reprise rapide de service,
- l'augmentation du niveau d'exploitation.

Région autour de Stuttgart (EnBW : Energie Baden-Württemberg)

Dans cette région, 50 % du réseau est souterrain sauf à Stuttgart où l'on atteint 70 %. Le réseau est exploité à défaut maintenu pendant la recherche de défaut. En général, les conducteurs sont rebouclés au même jeu de barre. L'architecture utilisée est la coupure d'artère avec 20 postes sources en urbain et 40 en rural.

La qualité de fourniture est excellente car :

- une partie importante des conducteurs sont enterrés,
- les départs sont courts,
- il y a de multiples redondances au niveau des postes sources,
- la coupure d'artère est systématique.

La Figure I-22 montre quelques structures de postes sources rencontrés dans cette région.

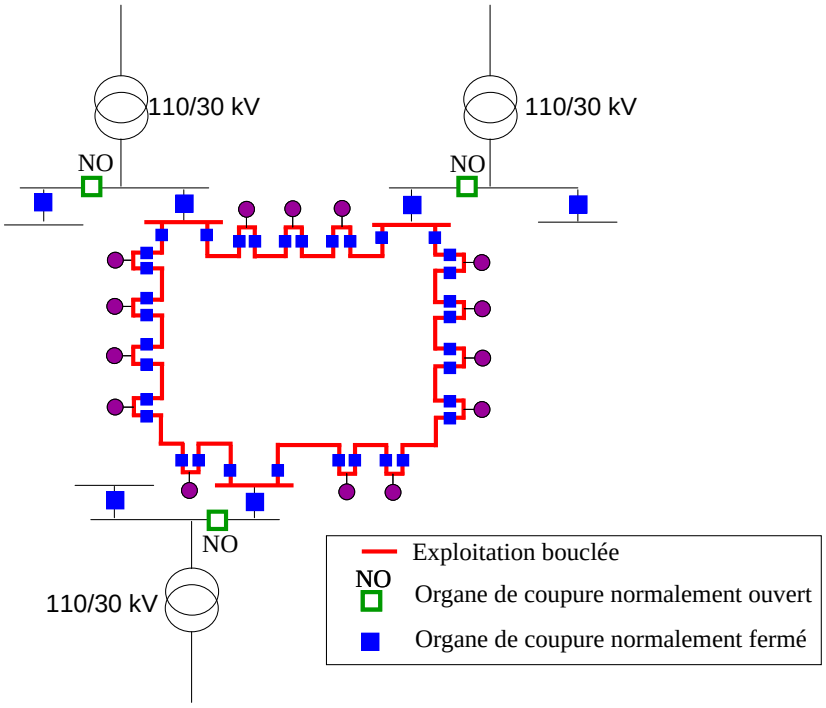


Figure I-22 : Structures de quelques postes sources de la région de Stuttgart

Réseau pseudo-maillé

La Figure I-23 est une architecture pseudo-maillée que l'on trouve principalement en Chine. On retrouve encore cette structure dans les vieux centres historiques (Madrid, Berlin entre autres). Ce réseau a été créé par les anglais dans les années 1970 - 1980. A cette époque, les câbles étaient de mauvaise qualité et donc le taux de défaillance était très élevé. Pour résoudre ce problème, les Anglais ont introduit de la redondance dans le réseau pour pouvoir reconfigurer en cas de défaut. Cependant, la conduite de ce type de réseau est très complexe. Par ailleurs, les câbles ayant été renouvelés et étant maintenant de bonne qualité, les anglais n'utilisent plus ce type d'architecture. On en rencontre cependant encore en Chine, dans les centres historiques où le réseau est vieux et les câbles de mauvaise qualité.

Les Chinois ont un réseau de distribution de 10 kV. Pour garantir un plan de tension correct, ils ont donc un courant de défaut important (i.e. une impédance de court-circuit faible) et des câbles de forte section.

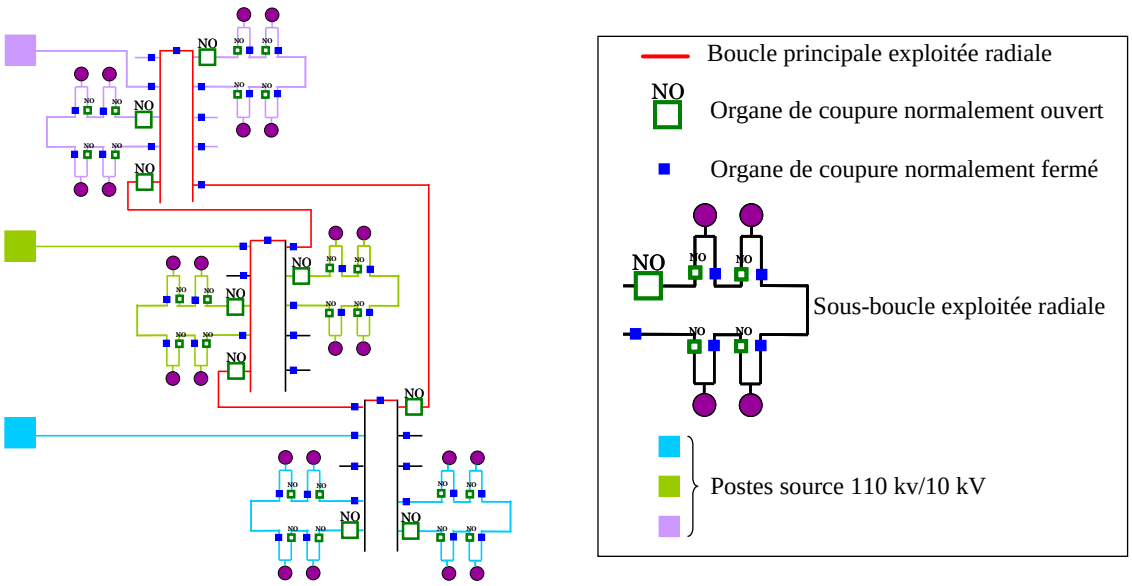


Figure I-23 : Réseau pseudo-maillé 10 kV

La ville de Shanghai est intéressante car elle est constituée de plusieurs réseaux différents. Il s'agit d'une ancienne concession anglaise dont une partie est maillée. Les autorités veulent, maintenant la démailler car c'est une structure très compliquée à exploiter. On trouve ce réseau maillé dans la zone de Pudong qui est un pôle financier de Shanghai. Outre l'influence anglaise due à la colonisation, il apparaît l'influence allemande car SIEMENS est bien implanté.

Vers la fin des années 1990, dans le quartier des affaires de Hong Kong, une défaillance d'un composant accompagnée d'une défaillance humaine ont provoqué un blackout de quelques heures. Le système est complexe et mixte et le personnel était mal formé. Ainsi, le réseau maillé permet une excellente qualité de fourniture mais nécessite du personnel compétent en raison de sa complexité.

Réseaux de Singapour et Hong Kong

Le réseau de la ville de Singapour et celui de Hong Kong fonctionnent en boucle ouverte télécommandée. Tout le réseau est enterré et représente 2200 MVA avec un SAIDI de 30 secondes (System Average Interruption Duration Index, c'est-à-dire le temps moyen de coupure par an et par client) qui sera défini plus en détail au paragraphe 2.1.3. L'exploitation est homogène et la gestion de la production est simplifiée. En 1965, Singapour est devenu indépendante du Royaume Uni. Il en a résulté une cohabitation du réseau maillé d'origine avec un réseau en boucle ouverte construit à partir de cette date. Entre 1970 et 1985, sous l'influence du fabricant SIEMENS, le réseau a été complètement exploité en maillé.

Le réseau de Singapour est constitué de 10 000 postes de distribution publique à disjoncteurs et protections différentielles à fil pilote (influence anglaise) et 100 % téléconduit. 5000 postes sont 22 kV/BT et 5000 postes sont 6 kV/BT. Le neutre est direct à la terre (10 000 A de courant de défaut). Le réseau est riche, homogène et cher. Mais en cas de disfonctionnement, une exploitation maillée peut avoir des conséquences importantes. Par exemple, un blackout de quelques heures s'est produit dans le quartier central des affaires. Il y a eu un disfonctionnement qui s'est propagé.

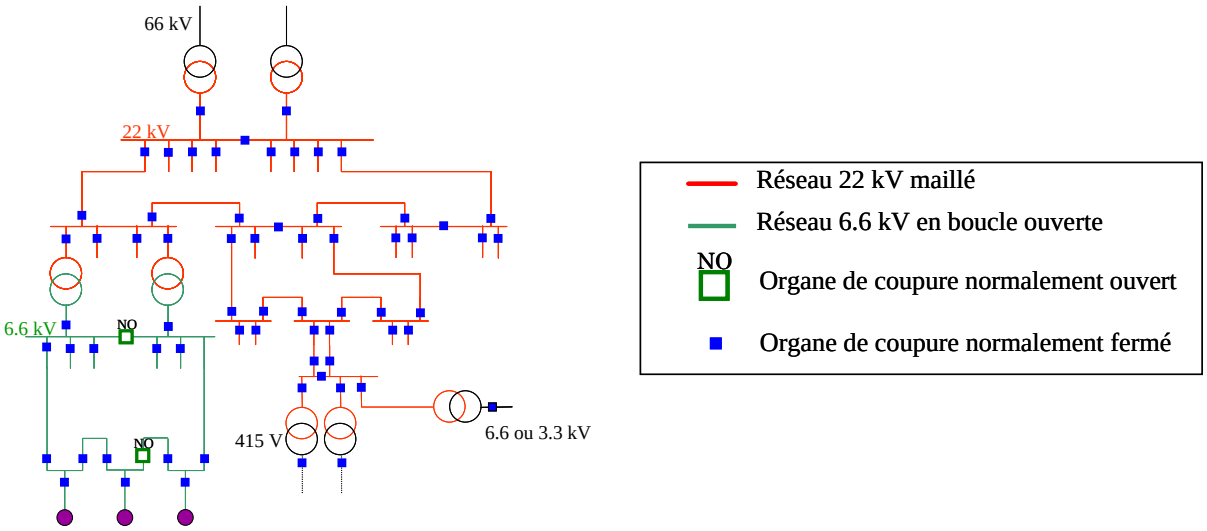


Figure I-24 : Exemple d'une partie du réseau électrique de Singapour

Hong Kong est un modèle pour les chinois. En effet, une partie importante du réseau est maillée. En 2006, le SAIDI était de 4 à 5 minutes dans le centre ville des affaires (Central Business District).

Réseau indonésien

Dans les années 1980-1990, EDF était très présent à Jakarta et on y retrouve une influence française forte. Ainsi on a les mêmes résultats en matière de coût et de compétence. Le réseau est en boucle ouverte. Le taux de défauts des composants est important en raison de la différence entre les normes indonésiennes et françaises. En effet, le schéma directeur est établi par EDF en lien avec les normes françaises. Ce réseau est bon mais le matériel est choisi en fonction des normes indonésiennes qui sont différentes des normes françaises d'où une forte défaillance du réseau.

Réseau Malais

Auparavant, la Malaise et Singapour ne formaient qu'un seul pays. Puis, il y a eu séparation en 1965. L'arrivée de SIEMENS à Singapour a terminé d'enlever cette influence anglaise qui est cependant restée dans le réseau de Malaisie.

On trouve du maillé en Malaisie à Putrajaya (Silicon Valley asiatique). Il y a un double transformateur au niveau du poste source ce qui permet d'améliorer la qualité de service. Par ailleurs, les gestionnaires de réseau disposent d'une équipe spéciale pour les réseaux maillés donc très compétente. De même qu'à Singapour, un réseau de qualité de service excellente est souhaité. Le problème est que la Malaisie a une production d'électricité mauvaise et un transport mal protégé. Le réseau ressemble à Stuttgart avec un maillage éventuel entre les sous boucles. Le schéma est typiquement anglais avec des protections à fils pilotes. Le problème est de conserver cette architecture avec des disjoncteurs économiques. En effet, contrairement à Singapour, la Malaisie accorde une importance au coût d'investissement.

Le réseau malais a recours au *spot-network* (E. U.) comme les grandes villes américaines. La Figure I-25 illustre la structure du *spot-network*. Le *spot-network* est constitué d'un poste source ayant deux transformateurs abaisseurs connectés à deux réseaux amont HT différents. La partie aval de chaque transformateur est connectée à un bus commun grâce à des disjoncteurs équipés de relais qui sont réglés de façon à déclencher le disjoncteur sur des flux de puissance qui remontent vers les transformateurs et de refermer le disjoncteur lors de la restauration de la bonne tension et de la phase des secondaires des transformateurs. Le bus commun a un ou plusieurs départs radiaux [IEE 1993].

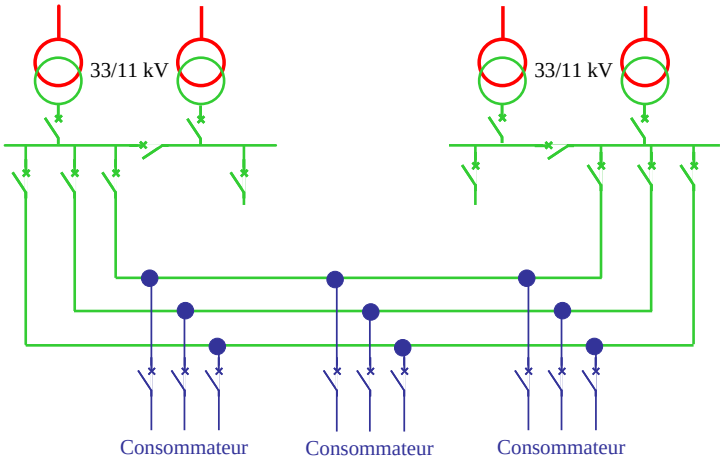


Figure I-25 **:** *Spot-network* inventé dans les années 1920 à New York

C'est un réseau spécial qui présente des redondances. On retrouve ce réseau également au Japon (beaucoup de *spot-networks* à Tokyo), en Indonésie et à Taiwan, c'est-à-dire à chaque

fois qu'il y a un investissement d'origine américaine. En effet, comme les investisseurs américains le préfèrent et pour garantir leur réseau électrique, les planificateurs ont donc recours au *spot-network*.

En conclusion, on trouve en Malaisie du maillé et du *spot-network* pour les entreprises malaisiennes avec comme envie de « rattraper » Singapour et attirer les investisseurs (notamment américains). Pour le reste, on trouve de la coupure d'artère (Standard design).

Réseau urbain des Emirats Arabes Unis

Ce réseau ressemble au réseau en coupure d'artère que l'on rencontre dans les réseaux urbains français (voir Figure I-11). Néanmoins, toutes les artères principales sont reliées à une station de commutation. Cette station de commutation permet en fait à chaque départ de secourir un autre départ à condition qu'ils soient dimensionnés en conséquence. Un câble de secours permet aussi de reconfigurer le réseau. Dans la coupure d'artère, un départ ne peut être secouru que par un seul autre départ. Les deux inconvénients majeurs de ce type de structure sont d'une part le coût et d'autre part le fait que le câble de secours ne travaille pas. Il faut donc penser à l'utiliser de temps en temps pour éviter que l'humidité ne dégrade les isolants. Ce réseau est une variante du réseau pseudo-maillé. On en trouve encore dans beaucoup de centres historiques, en Espagne et à Djakarta. Dans ces pays, il y a une grande influence anglaise (avec la notion de sous-station de commutation que l'on peut voir sur la Figure I-26).

Dubaï constituait une zone à forte croissance économique où Siemens et Schneider Electric sont présents. On trouve du réseau maillé. Ce réseau est constitué de postes à disjoncteurs avec une notion de câbles secours. C'est un système en boucle fermée avec des sous-stations de commutation et des disjoncteurs.

En ce qui concerne le résidentiel, on trouve de la boucle ouverte sinon partout ailleurs du maillé. Les Emirats Arabes Unis étaient prêts à investir pour avoir le réseau du futur.

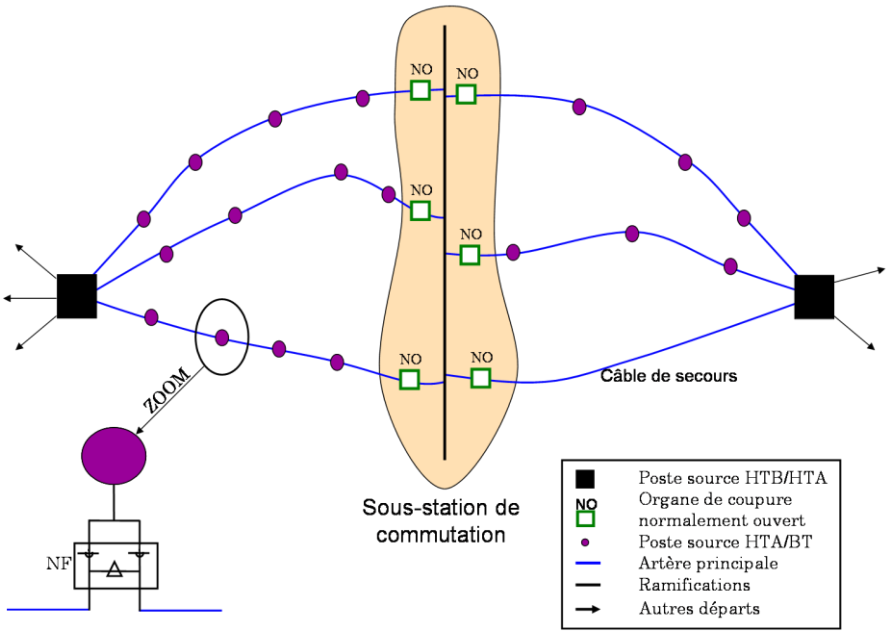


Figure I-26 : Réseau Emirats Arabes Unis

Closed loop aux Etats Unis

Le *closed loop* est une solution pour les investisseurs pour avoir un réseau de qualité. Certains de ces réseaux privés, aux Etats-Unis, ont des disjoncteurs avec des protections spécifiques (à fils pilotes ou à fibre optique). La Figure I-27 montre la structure de ce type de réseau.

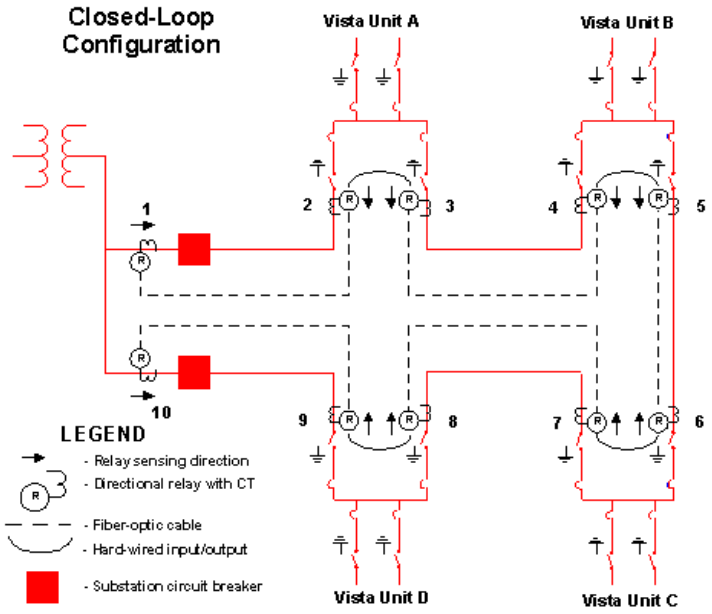


Figure I-27 : *Closed-loop* network [S&C 2001]

Conclusion

Contrairement au cas européen, les réseaux étrangers sont hétérogènes ce qui est parfois la cause d'incidents car les équipes de conduite ou de maintenance ne sont pas formées à ces différents modes d'exploitation. Il est très difficile d'entretenir des réseaux avec des technologies très différentes. La structure de nombreux réseaux étrangers est principalement issue de l'influence coloniale. L'expérience montre que maintenir un système historique est possible avec des compétences et des moyens financiers. On trouve des cas d'architectures maillées :

- dans des milieux où l'on veut assurer une qualité de service excellente dans le cas d'intérêts économiques (alimenter une zone économique importante, attirer des investisseurs entre autres),
- dans le cas d'héritage historique.

Regardons maintenant quels sont les éléments à prendre en compte lorsqu'il s'agit de construire un réseau de distribution. C'est ce que l'on appelle la planification.

I.3. Principe de planification

I.3.1. **Définitions**

La planification permet de choisir une solution technique à un problème posé grâce à des études technico-économiques. Les problèmes techniques peuvent être des problèmes à court terme, dans l'année, (raccordement de producteurs, de charges, étude de renforcement) ou à long terme, dans un horizon de 30 - 40 ans, (construction de réseaux HTA ou encore mise en place d'un poste source HTB/HTA). Dans le cas de problèmes à court terme, des calculs technico-économiques simples permettent de trouver les solutions adaptées. Dans le cas de problèmes à long terme, une étude plus approfondie est nécessaire ce qui introduit la notion de schéma directeur.

Schémas directeurs

La planification long terme consiste à mettre en place des schémas directeurs de développement du réseau électrique c'est-à-dire à trouver son avenir le plus probable en se fondant sur des hypothèses réalistes afin de s'adapter à l'évolution des contraintes (charges, environnement, production). La mise en place de schémas directeurs permet d'étudier les

réseaux existants, d'analyser leur performance et leurs failles de façon à établir des stratégies de développement à coût minimal. On peut citer deux exemples d'application :

- La décision d'opérations de maintenance sur le réseau. Celles-ci vont dépendre, entre autres, du type de matériels (lignes aériennes, souterraines, organes de coupure entre autres), de leur âge, de leur coût, du nombre de clients qui pourraient être affectés par une défaillance du matériel).
- La prévision des investissements à réaliser sur une période donnée. Les différents choix possibles peuvent être la construction et/ou le démantèlement de conducteurs, la modification d'architectures par la création de circuits de secours, entre autres.

Objectifs de la planification

Les objectifs de la planification sont de développer un réseau électrique plus fiable, plus économique et respectant au mieux l'environnement. Pour cela, les différentes solutions proposées doivent respecter un ensemble de critères que nous allons définir.

Indices de fiabilité et produit PL équivalent

Le **SAIDI** (System Average Interruption Duration Index) est le temps moyen de coupure par an et par client. Le **SAIFI** (System Average Frequency Duration Index) est la fréquence moyenne de coupure par an et par client. Enfin, l'**END** est l'Energie Non Distribuée par an. Ces trois indices de fiabilité donnent une image de la qualité du réseau. Plus ces indices sont petits et plus le réseau sera de bonne qualité. Pour chaque tronçon i délimité par deux organes de coupure, si un défaut se produit sur le tronçon i, on définit :

$$\mathrm{SAIDI}(i) = \frac{T_{cou}(i) \times N_{cl}(i) \times N_{cou}(i)}{N_{tot}(i)} \tag{I-5}$$

$$\mathrm{SAIFI}(i) = \frac{N_{cl}(i) \times N_{cou}(i)}{N_{tot}(i)} \tag{I-6}$$

$$\mathrm{END}(i) = \frac{P_{cou}(i) \times T_{cou}(i) \times N_{cou}(i)}{N_{tot}(i)} \tag{I-7}$$

Avec :

- $T_{cou}(i)$ = Durée de la coupure du tronçon i(min)
- $N_{cl}(i)$ = Nombre de clients coupés,
- $N_{cou}(i)$ = Nombre de coupures,
- $N_{tot}(i)$ = Nombre total de clients,
- $P_{cou}(i)$ = Puissance coupée.

Pour calculer un indice de fiabilité IND total (IND représentant le SAIDI, SAIFI ou END), on aura donc : $IND = \sum_{ij=1}^{n} IND(i)$ où n est le nombre de tronçons du réseau. Les formules (I-5), (I-6), et (I-7) sont générales. Le calcul de T_{cou}, N_{cl}, N_{tot} et P_{cou} dépendent des organes de coupure utilisés et de leur emplacement ainsi que du mode d'exploitation du réseau.

Le produit **PL** pour une zone donnée est le produit de la puissance totale consommée par les clients de la zone par la longueur totale de la zone qui alimente les clients. En d'autres termes, si on tente d'équilibrer cet indice, des clients qui consomment peu d'énergie seront alimentés par une longueur de conducteur plus importante que des clients qui consomment beaucoup d'énergie. La probabilité de défaut étant proportionnelle à la longueur de conducteur, on minimise ainsi la puissance coupée lors d'un défaut et donc on améliore la qualité de service. Par ailleurs, l'équilibrage de ce critère permet d'assurer une équipartition des risques de défauts.

Ensemble des critères que doivent respecter les architectures proposées

Le Tableau I-5 résume les différents critères (techniques, de fiabilité et environnementaux) que doivent vérifier les solutions proposées.

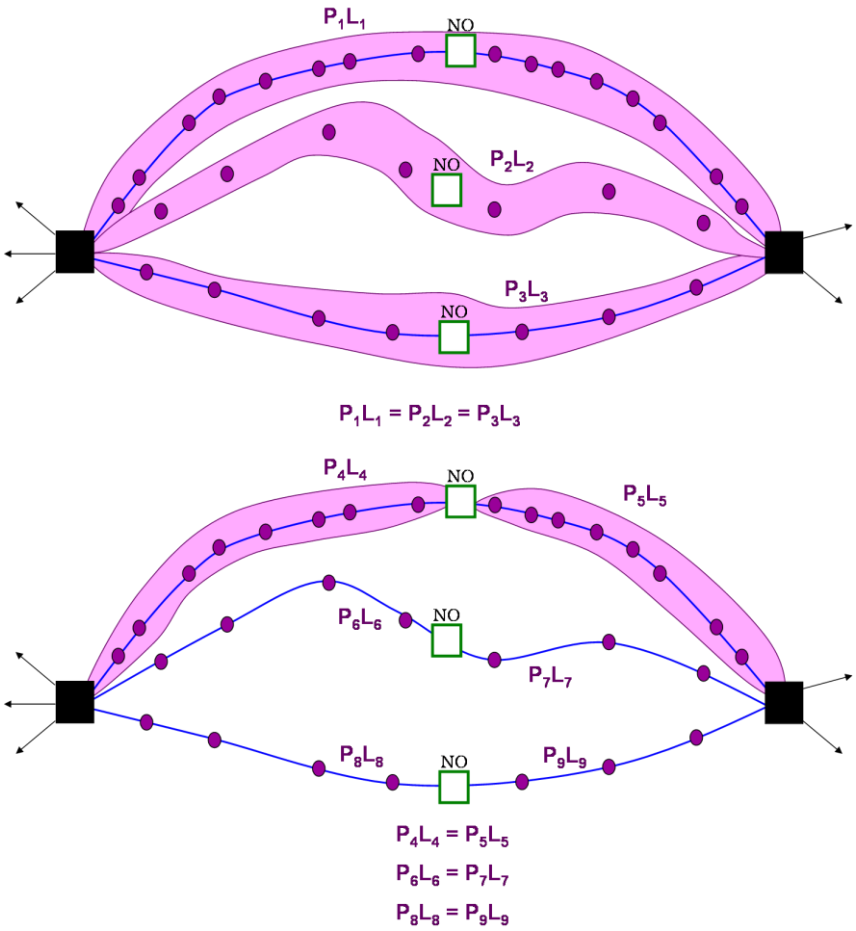
Critères techniques	**Critères de qualité**	**Critères environnementaux**
- Courant admissible du matériel - Courant de court-circuit admissible du matériel	Urbain - SAIDI par départ HTA de 15 min/an - END par départ HTA de 300 kWh/an - Zones de produit PL équivalent	- Réduction de la pollution - Diminution de la pollution visuelle en enfouissant les câbles
Chute de tension +/- 5 % en mode normal +/- 8 % en mode secours	Rural - END par départ HTA de 1250 kWh/an - SAIDI par départ HTA de 75 min/an - Zones de produit PL équivalent	Encombrement du territoire

Tableau I-5 : Critères que doivent valider les solutions proposées [Source ERDF]

Exemple sur un réseau en coupure d'artère

Nous allons détailler les différents critères de qualité sur l'exemple d'un réseau de type coupure d'artère. On appelle artère principale l'ensemble des conducteurs reliant des consommateurs d'une source à l'autre. On appelle départ l'ensemble des conducteurs reliant les consommateurs d'une source à un organe de coupure normalement ouvert. Ainsi, une artère est composée de deux départs.

Tout d'abord, les zones dont les produits PL doivent être équivalents sont représentées sur la Figure I-28. Toutes les artères principales doivent avoir un PL équivalent. De plus, les deux départs qui forment l'artère principale doivent avoir un PL équivalent. Par ailleurs, les organes de coupure télécommandés (OMT) de chaque artère doivent être placés en respectant des zones de PL équivalent. Nous allons détailler les règles de placement des OMT sur une artère.



P_i = Puissance de la zone i

L_i = Longueur de la zone i

Figure I-28 : Zones de PL équivalent pour la coupure d'artère

La Figure I-29 représente une artère principale d'un réseau en coupure d'artère constitué par deux postes sources HTB/HTA. Un organe de coupure télécommandé normalement ouvert (OMT_3) sépare l'artère principale en deux départs alimentés chacun par un poste source tel que les PL des deux zones ainsi formés soient équivalents. Sur chaque départ, deux autres organes de coupure télécommandés sont placés de sorte que le produit PL des 3 zones formées de chaque départ soit équivalent. Les postes sources situés entre deux organes de coupure télécommandés sont équipés d'organes de coupures manuels. La Figure I-29 illustre donc aussi l'emplacement des différents organes de coupure sur une artère principale [Source ERDF].

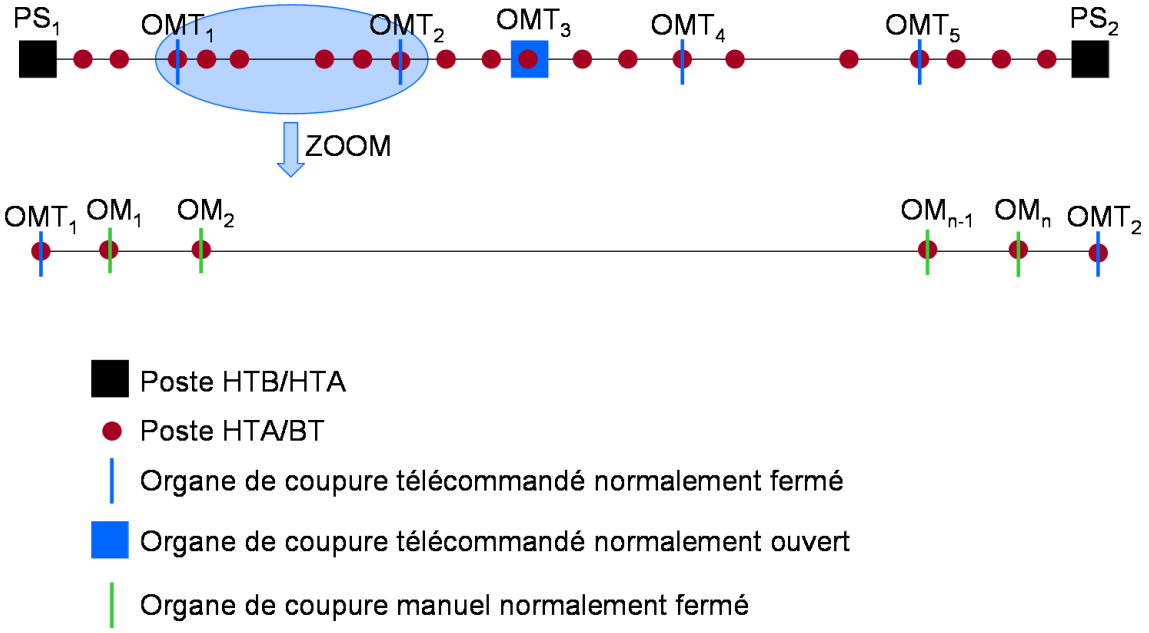


Figure I-29 : Deux départs d'un réseau en coupure d'artère

La Figure I-30, quant à elle, illustre la procédure de détection et d'isolement du défaut. Lorsqu'un défaut se produit entre l'OMT_1 et l'OMT_2, le disjoncteur de la cellule de départ déclenche et tous les clients du départ sont coupés. En quelques minutes, les conducteurs de réseaux manœuvrent les organes de coupure télécommandés de façon à isoler la partie en défaut et à réalimenter le plus de clients. Dans le cas de la Figure I-30, les OMT_1 et OMT_2 sont ouverts. Ensuite, le poste source PS_1 réalimente les charges du côté amont du défaut puis l'OMT_3 normalement ouvert est fermé afin de réalimenter les charges du côté aval du défaut. L'étape 2 terminée, une équipe part sur le terrain afin de manœuvrer les organes de coupure manuels des postes HTA/BTA de façon à réalimenter des clients supplémentaires. Ils peuvent ensuite effectuer la réparation sur le conducteur en défaut. Cette dernière étape de réalimentation prend entre 40 et 60 min.

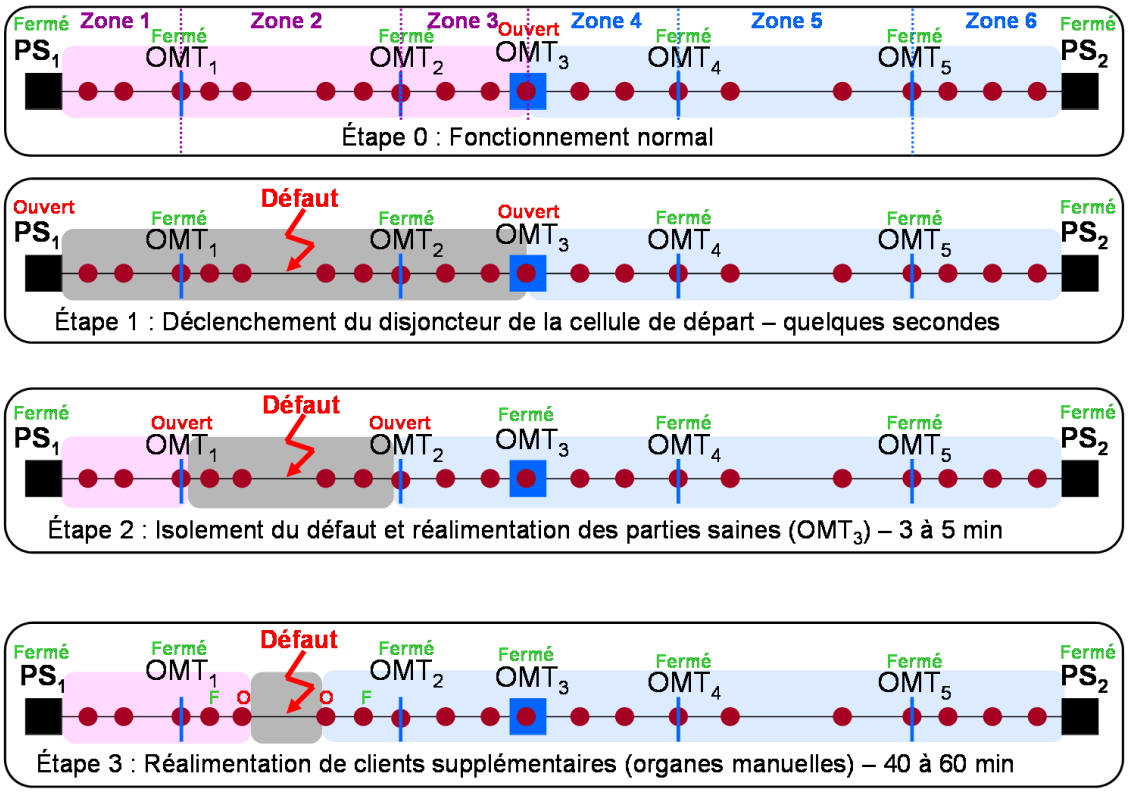


Figure I-30 : Procédure de localisation et d'isolement d'un défaut

Chaque départ d'un réseau en coupure d'artère est usuellement découpé en 3 zones. Pour chaque zone Z_i, on définit :

$$SAIDI(i) = \tau \times L_i \times \left(T_d + T_m \times \frac{Ni}{N_1 + N_2 + N_3} \right)$$

$$SAIFI(i) = \tau \times Li \times \left(\frac{Ni}{N_1 + N_2 + N_3} \right) \qquad \text{(I-8)}$$

$$END(i) = \tau \times L_i \times \left(T_d \times P_{depart} + T_m \times P_i \right)$$

- τ = Taux de défaillance d'un conducteur souterrain,
- T_d = Temps de l'étape 1 et 2,
- T_m = Temps de l'étape 3,
- N_i = Nombre de clients de la zone Z_i,
- L_i = Longueur de conducteur de la zone Z_i,
- P_i = Puissance totale de la zone Z_i,
- P_{depart} = Puissance totale du départ,
- L_{depart} = Longueur totale du départ,

Le SAIDI (respectivement SAIFI et l'END) pour un départ est donc égale à la somme des SAIDI (respectivement SAIFI et END) des trois zones. On a donc :

$$SAIDI_{départ_j} = \sum_{j=1}^{3} SAIDI(i)\,,\ SAIFI_{départ_j} = \sum_{j=1}^{3} SAIFI(i) \text{ et } END_{départ_j} = \sum_{j=1}^{3} END(i) \qquad \text{(I-9)}$$

D'où en notant n le nombre de départs du réseau,

$$SAIDI = \frac{\sum_{j=1}^{n} SAIDI_{départ_j}}{n}$$

$$SAIFI = \frac{\sum_{j=1}^{n} SAIFI_{départ_j}}{n} \qquad \text{(I-10)}$$

$$END = \frac{\sum_{j=1}^{n} END_{départ_j}}{n}$$

Planification long terme et planification moyen terme

On distingue deux horizons de temps pour la planification. La planification long terme permet de construire une cible à 30 ans à partir d'un ensemble d'hypothèses cohérentes (évolution de la charge et de la production entre autres) et de contraintes à respecter (techniques, économiques, fiabilité entre autres). La planification moyen terme consiste à construire une cible intermédiaire à 10 ans qui est un sous-ensemble de la cible à long terme. Elle permet de donner l'ensemble des opérations à effectuer sur le réseau sur la période [0-10 ans]. La Figure I-31 résume la démarche à suivre pour mettre en place les schémas directeurs.

Principaux paramètres influençant le choix de la cible

Les principaux paramètres influençant le choix de la cible sont les suivants :

- L'emplacement des postes sources HTB/HTA par rapport aux charges à desservir, il dépend des contraintes géographiques (place, passage de lignes HTB, sortie des départs HTA) et de contraintes économiques.
- La conception de la source, selon la nature du poste, certaines structures sont mieux adaptées que d'autres. Par exemple, le fuseau est bien adapté si le poste est à simple antenne.
- Les contraintes topologiques, représentent l'ensemble des contraintes liées aux constructions de l'homme (pont, passage à niveau entre autres) mais aussi les contraintes géographiques (réserve naturelle),

- Les densités de charges (si la charge est dense alors on peut améliorer la qualité générale à moindre coût). Des structures comme la coupure d'artère, la grille ou la maille sont bien adaptées à de fortes densités de charges. Par contre, si la densité de charges est faible, des structures en antenne conviennent plus car sont moins coûteuses.)

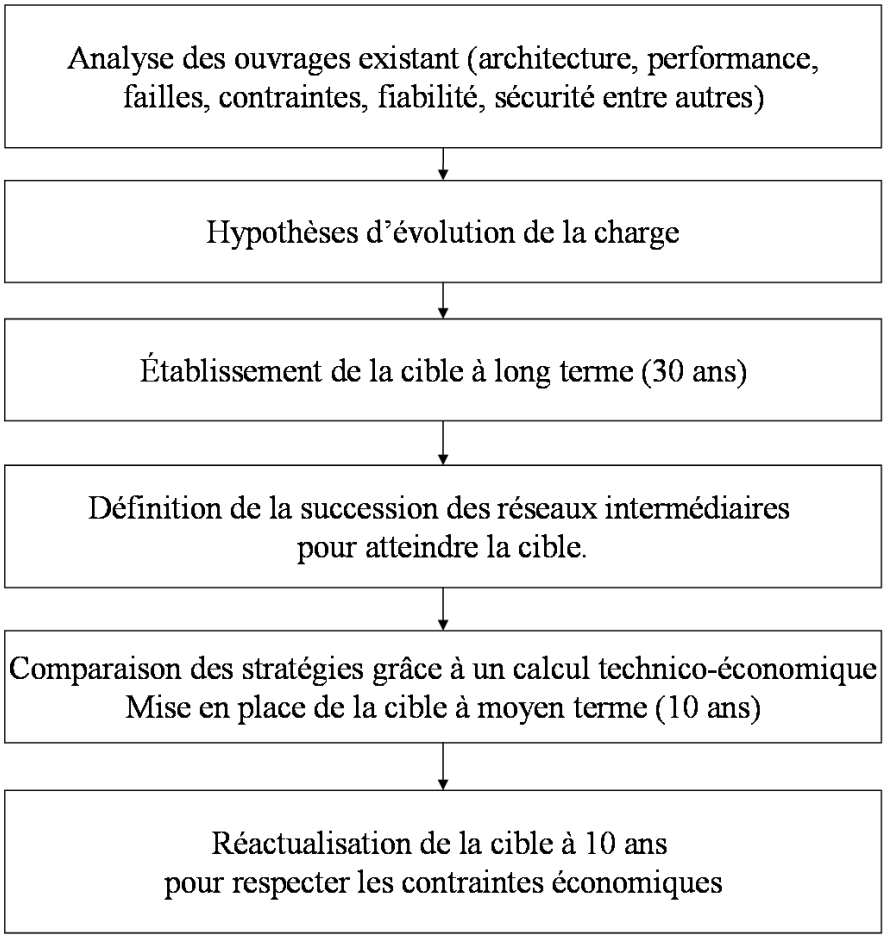


Figure I-31 : Procédure de mise en place des schémas directeurs

I.3.2. **Calcul technico-économique pour le choix final d'une stratégie**

Le Figure I-31 indique qu'un calcul technico-économique permet de comparer puis de choisir les différentes solutions envisagées. Ce calcul doit donc prendre en compte l'évolution des charges à alimenter, les différents coûts (investissement, pertes), le niveau de qualité souhaitée et enfin, les contraintes environnementales (choix du matériel et zone d'implantation).

Afin de prendre en compte la fluctuation de la monnaie, le calcul technico-économique utilise le principe de l'actualisation. Le taux d'actualisation est une valeur i fixée qui traduit le fait que N euros aujourd'hui vaudront N x $(1+i)^t$ dans t années. Autrement dit si à l'année t

une entreprise dépense D(t) euros alors aujourd'hui cela revient à $\frac{D(t)}{(1+i)^t}$. Le taux d'actualisation français était fixé pendant de longues années à 8 % [DGE 2003].

On définit ainsi le coût actualisé à prendre en compte dans une étude technico-économique. Soit C(t) pour t = 1, …, n, l'ensemble des coûts d'une entreprise. Alors le coût actualisé est défini par la formule suivante :

$$C_{act} = \sum_{n=0}^{N} \frac{C(t)}{(1+i)^n} \qquad \text{(I-11)}$$

I.3.3. **Exemple d'application : étude de raccordement d'un client HTA**

Description du problème et solutions possibles

On veut connecter un client HTA à un poste source HTB/HTA par une liaison souterraine. Le but est de choisir le câble qui minimise l'investissement et le coût actualisé des pertes sur la durée de vie de l'ouvrage qui est de 40 ans.

Cette charge est modélisée par une courbe de charge comme indiquée sur la Figure I-32. On peut estimer la consommation du client en considérant qu'il fonctionne à puissance maximale pendant une durée H. Des valeurs typiques de H sont de 4000 h en urbain et 3200 h en rural. Ces chiffres reposant sur des historiques donnent un équivalent des pertes correct [Source ERDF].

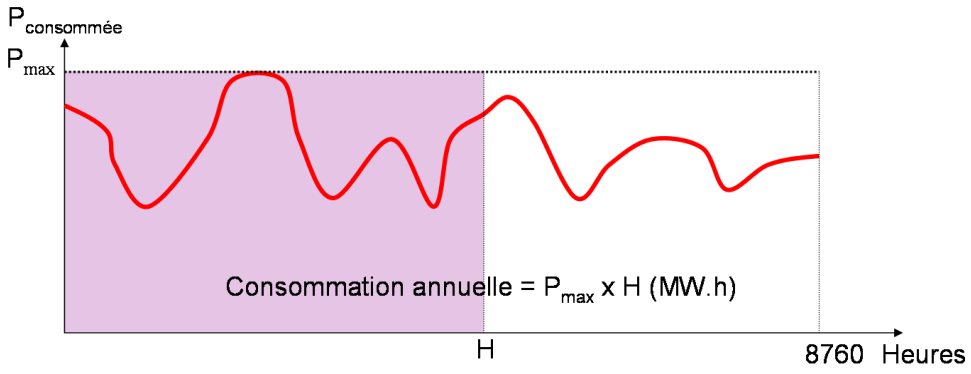


Figure I-32 : Approximation de la consommation annuelle d'un client

L'ensemble des données électriques et économiques est résumé dans le Tableau I-6.

Données électriques		Données économiques	
Tension d'alimentation U (kV)	20	Taux d'actualisation	8%
Puissance consommée à la pointe P_{max} (MW)	5	Taux de croissance annuelle de la charge	0,50%
Durée d'utilisation à la P_{max} H (h)	4000	Coût d'une tranchée (k€/km)	15,2
Facteur de puissance cos(φ)		Coût de deux tranchées (k€/km)	

Tableau I-6 : Données électriques et économiques

Les valeurs normalisées des câbles sont données dans le Tableau I-7.

CABLES SOUTERRAIN HTA					
Type	Section (mm²)	Résistance (ohm/km)	Réactance (ohm/km)	Intensité maximale admissible(A)	Coût (k€/km)
AL	95	0,320	0,1	230	12,8
AL	150	0,206	0,1	300	14,8
AL	240	0,125	0,1	405	20,1
CU	240	0,075	0,1	505	30,1

Réalisation de tranchée pour 1 câble (k€/km)	15,2
Réalisation de tranchée pour 2 câbles (k€/km)	18,4

Tableau I-7: Câbles normalisés utilisés [Source ERDF]

Choix de la solution la plus économique

Le câble choisi doit respecter la contrainte de courant admissible à l'horizon choisi (40 ans) avec des hypothèses d'évolution de la charge. Le résultat obtenu garantira la tenue du conducteur mais ne sera pas forcément l'optimum technico-économique. Un calcul de coût actualisé prenant en compte l'investissement initial et les pertes cumulées permettra alors, dans un second temps de choisir le bon type de conducteur. Le choix final respectera donc les contraintes techniques et minimisera le coût actualisé des pertes.

Pour dimensionner le conducteur, il faut déterminer la puissance qui sera consommée à l'horizon choisi. On suppose que les charges évoluent de manière constante de t% par an sur N années. La puissance consommée à l'année N est :

$$P_{max}(N) = P_{max}(0) \times (1+t)^N \qquad \text{(I-12)}$$

Le lien entre la puissance maximale consommée, $P_{max}(N)$, et l'intensité, $I_{max}(N)$, qui transite dans les conducteurs est :

$$P_{max}(N) = U \times I_{max}(N) \times \sqrt{3} \times \cos(\varphi) \qquad \text{(I-13)}$$

U = tension (kV)

$\cos(\varphi)$ = facteur de puissance de la charge

On obtient donc :

$$I_{max}(N) = \frac{P_{max}(N)}{U \times \sqrt{3} \times \cos(\phi)} \qquad \text{(I-14)}$$

On peut ainsi déterminer le type de conducteur et sa section minimale. Dans notre exemple, $I_{max}(N) = \frac{5 \times 10^6}{20 \times 10^3 \times \sqrt{3} \times 0{,}9} = 160{,}37A$. Ainsi dans cet exemple tous les types de

câbles conviennent car leur courant maximal admissible est supérieur. Il serait alors logique de prendre le moins cher c'est-à-dire le 95 mm². Un calcul de coût actualisé permet de vérifier si cette stratégie est la meilleure à long terme.

Le coût actualisé sur N années du réseau pour différents types de conducteurs permet de déterminer la section économique du câble à utiliser tout en tenant compte de la section minimale imposée par la contrainte de courant maximal. Cette méthode de calcul prend en compte l'investissement initial (coût de la fourniture du conducteur) ainsi que celui des pertes par effet Joule. L'expression du coût actualisé est donc :

$$C_{act} = I + \sum_{n=0}^{N} \frac{C \times P(n)}{(1+i)^n} \qquad \text{(I-15)}$$

$$\begin{cases} C_{act} = \text{ coût actualisé en k€} \\ I = \text{ investissement à l'année 0 en k€} \\ C = \text{ coût d'un kW de pertes à la pointe en k€} \\ P(n) = \text{ pertes à la pointe à l'année n en kW} \\ i = \text{ taux d'actualisation en \%} \end{cases}$$

L'expression des pertes est donnée par la formule suivante :

$$P(n) = 3 \times R \times I(n)^2 \text{ avec } I(n) = \frac{S(n)}{\sqrt{3} \times U} \text{ d'où } P(n) = \frac{R \times S(n)^2}{U^2}.$$

Par ailleurs, d'après le paragraphe précédent :

$S(n) = S(0) \times (1+t)^n$, $S(0)$ étant la charge à l'année 0.

Ainsi, $P(n) = \dfrac{R \times S(0)^2 \times (1+t)^{2n}}{U^2}$ d'où $C_{act} = I + C \times \dfrac{RS_0{}^2}{U^2} \sum_{n=0}^{N} \left(\dfrac{(1+t)^2}{1+i} \right)^n$.

On pose $X = \dfrac{(1+t)^2}{1+i}$ alors $X \leq 1$ et $\sum_{n=0}^{N} X^n$ est une suite géométrique de raison X. Ainsi l'expression du coût actualisé est :

$$\boxed{C_{act} = I + C \times \frac{RS_0{}^2}{U^2} \times \frac{1 - X^{N+1}}{1 - X}} \qquad \text{(I-16)}$$

Le coût actualisé C_{act} est donc calculé pour les 4 types de câbles présentés dans le Tableau I-7 dans le cas où l'on met un seul câble et dans le cas où l'on en met deux ; ceci permet d'augmenter le courant maximal admissible. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le Tableau I-8.

	Coût actualisé pour 1 câble (k€)	Coût actualisé pour 2 câbles (k€)
95² AL	185,10	152,55
150² AL	143,11	137,56
240² AL	121,03	142,42
240² AL	120,86	172,33

Tableau I-8 : Coût actualisé des différentes solutions possibles

Le calcul de coût actualisé indique qu'à long terme la solution de mettre un câble de section 240 mm² est plus économique que celle de mettre un câble à 95 mm².

I.4. Conclusion

Ainsi, nous avons vu les différentes architectures de réseau de distribution actuellement utilisées en France ainsi que quelques unes utilisées dans d'autres pays. Bien qu'elles soient parfois très différentes (dans leur structure voire dans leur mode d'exploitation), elles ont toutes les mêmes objectifs : assurer la qualité et la continuité de fourniture à moindre coût tout en assurant la sécurité des biens et des personnes. La question de priorité est leur principale différence car qualité et coût sont bien souvent des critères antagonistes. C'est pour cela que la planification a pour but d'étudier chaque solution potentielle à un problème technique donné de façon à trouver le meilleur compromis technico-économique. Ces problèmes peuvent être des problèmes court terme (comme le raccordement d'un client ou des opérations de maintenance) ou des problèmes long terme (restructuration du réseau, création d'un nouveau poste source HTB/HTA).

Dans la planification traditionnelle, le paramètre production décentralisée n'est pas pris en compte. Ainsi, il est possible qu'une insertion massive de ces productions ait un impact sur le bon fonctionnement du réseau de distribution et donc sur la manière dont il est planifié. Dans le chapitre II nous allons étudier les impacts de la production décentralisée sur les grandeurs électriques, sur l'exploitation et sur la planification du réseau de distribution. De façon à intégrer le critère production décentralisée dans les objectifs de la planification, nous proposerons une nouvelle architecture que nous nommerons structures hybrides.

Chapitre II

« Le monde contient bien assez pour les besoins de chacun mais pas assez pour la cupidité de tous. »

M. K. Gandhi

Chapitre II

Problèmes posés par l'insertion massive de GED dans le réseau de distribution et solutions possibles

Les principaux problèmes liés au raccordement de Génération d'Energie Décentralisée (nommées GED) sur le réseau de distribution sont liés aux problèmes de capacité technique d'accueil d'une part et aux problèmes réglementaires qui obligent le distributeur à accepter le raccordement d'un producteur sur le réseau de distribution d'autre part. En effet, le réseau de distribution n'a pas été conçu, à la base, pour accepter de la production. Cette problématique peut remettre largement en cause la façon de planifier et d'exploiter les réseaux de distribution.

Ce chapitre se divisera en trois parties. La première partie sera consacrée à la mise en évidence des impacts liés au raccordement de GED dans le réseau de distribution (impacts sur les grandeurs électriques et sur la planification et l'exploitation du réseau de distribution).

Ensuite, les méthodes actuellement adoptées par le gestionnaire du réseau de distribution français, ERDF, (le renforcement, entre autres) seront détaillées et leurs limites seront étudiées. Cette seconde partie conduira à étudier une nouvelle solution, l'exploitation bouclée en régime permanent des réseaux de distribution, comme possibilité pour favoriser l'insertion de GED. Pour cela, nous chercherons donc à quantifier la part maximale de puissance fournie par les GED raccordées sur le réseau de distribution aux clients du réseau par rapport à leur consommation totale. Le reste de la puissance provient du réseau amont c'est-à-dire des autres centrales de production (nucléaire, hydraulique entre autres). Cette valeur que nous nommerons taux maximal d'insertion de GED permettra de comparer différentes stratégies pour améliorer ce taux, dont l'exploitation bouclée des réseaux de distribution.

II.1. Production décentralisée : définition et contraintes de raccordement

Les GED (Générateurs d'Energie Dispersés) sont des sources de productions intermittentes (éolien, photovoltaïque entre autres) ou non (centrale thermique, groupe diesel entre autres) qui sont connectées au réseau de distribution. Leur puissance installée doit être inférieure à 12 MW au point de livraison lorsque l'installation est raccordée dans une zone qui n'est pas interconnectée avec le réseau métropolitain (exemple départements et territoires d'outre mer, entre autres) et inférieure à 17 MW sinon [ABA-1 2008]. Les parcs de production, éoliens par exemple, de plus grande puissance sont généralement connectés directement au réseau de transport ou tronçonnés en lots plus petits [ABA-2 2008].

Dans les années à venir, les préoccupations grandissantes vis-à-vis de la protection de l'environnement, de l'augmentation de l'indépendance énergétique et du développement durable visent à augmenter l'insertion de productions décentralisées principalement à base de sources d'énergies renouvelable. Ces productions devront être connectées au réseau de distribution qui a été conçu, à la base, pour faire transiter des flux de puissance unidirectionnels. Malheureusement, suivant les conditions de charge et de production, l'apparition de ces productions peut engendrer des flux bidirectionnels et peut causer de nombreux problèmes [CAN 2000].

II.1.1. **Impact de l'insertion de GED sur les grandeurs électriques**

Impact sur le plan de tension

Le réseau de distribution fonctionne sous une tension de 20 kV. L'utilisation de conducteurs pour transporter l'énergie aux consommateurs est responsable d'une chute de

tension c'est-à-dire que la tension relevée aux nœuds consommateurs est plus faible que la tension relevée au niveau du poste source. Une tension trop faible provoque le dysfonctionnement du matériel chez le consommateur et une tension trop forte peut endommager les équipements du réseau et ceux du consommateur. Ainsi un compromis technico-économique exige que la tension sur le réseau de distribution doive rester dans les limites de +/- 5 % de la tension nominale ce qui donne en France l'intervalle [19 ; 21] kV.

Pour pallier ce problème, on utilise des transformateurs régleurs en charge au niveau du poste source HTB/HTA. Ces sont des transformateurs dont on peut changer les prises c'est-à-dire faire varier le rapport de transformation et donc soit diminuer soit augmenter la tension.

On rappelle pour mémoire que la chute de tension en régime triphasé s'exprime par la formule suivante (cf Équation II-1 du chapitre I) :

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{r \times L \times P_{tri} + x \times L \times Q_{tri}}{U^2}$$

On constate donc que la chute de tension dépend directement des puissances actives et réactives injectées mais également du type et de la longueur des conducteurs utilisés. Ainsi la connexion de GED sur le réseau peut faire varier le plan de tension. La tension peut alors dépasser les limites admissibles même avec le fonctionnement des régleurs en charge [CAI 2004].

Pour montrer les effets de la GED sur le plan de tension, prenons l'exemple de la Figure II-1. Le réseau est constitué de 5 charges régulièrement espacées de 5 km consommant au total 10 MW. Les conducteurs utilisés sont en aluminium et ont une section de 150 mm². Les paramètres des conducteurs sont donc r = 0,206 Ω/km et x = 0,1 Ω/km. Le nœud 1 représente le transformateur du poste source HTB/HTA (63 kV/20 kV) doté d'un régleur en charge.

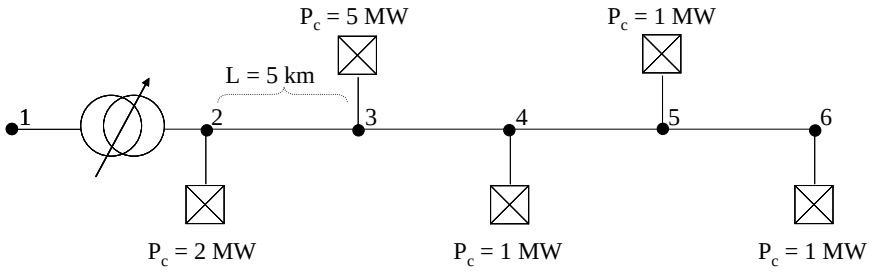


Figure II-1 : Réseau d'étude utilisé pour la mise en évidence des impacts de l'insertion de GED

La Figure II-2 illustre un exemple d'impact bénéfique de l'insertion de GED sur la tension. On peut constater qu'au nœud 2 la tension est de 1,02 pu. Cela correspond à la tension de consigne du régleur en charge. En connectant une GED de 2 MW au nœud 6, l'énergie est consommée plus localement que dans le cas sans GED. La puissance active

injectée étant moins importante au nœud 3, 4, 5, la chute de tension est moins importante. Le plan de tension avec une GED connectée permet dans ce cas de remonter la tension tout en restant dans les limites admissibles. Ceci est bénéfique pour le réseau car cela permet de diminuer les pertes.

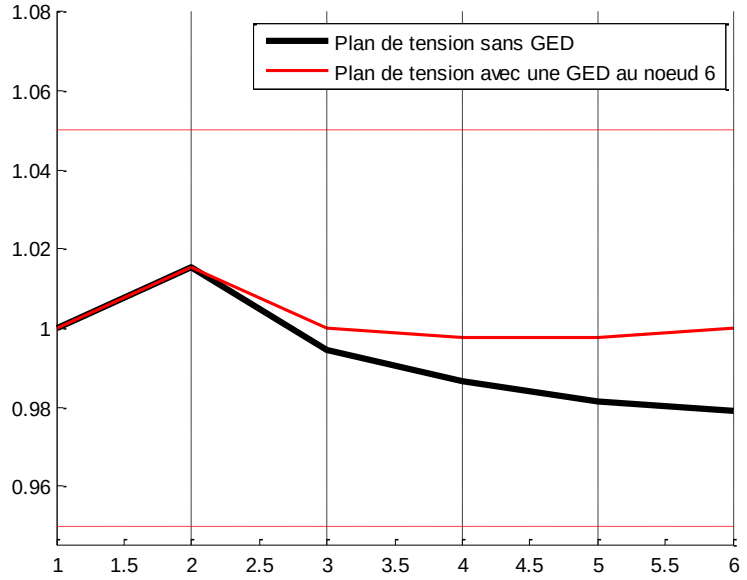


Figure II-2 : Exemple d'effet bénéfique de l'insertion de GED dans le réseau test

En revanche, l'insertion de GED peut provoquer des surtensions comme l'illustre la Figure II-3. Une GED de 10 MW est connectée au nœud 5. L'export de puissance provoque une augmentation de la tension qui dépasse la limite supérieure admissible.

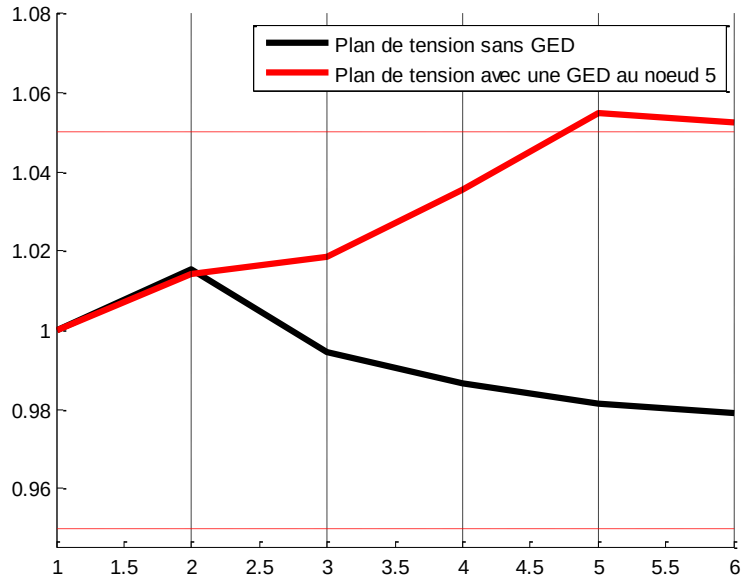


Figure II-3 : Exemple de surtension provoquer par l'insertion de GED

Les GED connectées à un départ peuvent provoquer le changement de prises du régleur en charge. Ainsi, d'autres départs de ce régleur en charge peuvent voir leur tension diminuer en raison du changement de prises du régleur, avec la logique de compoundage appliquée au régleur en charge [CAN 2000].

Impact sur les transits de puissances

La connexion de GED sur le réseau de distribution modifie le transit de puissance dans le réseau. Nous reprenons l'exemple de la Figure II-1. La Figure II-4 montre les transits de puissance obtenus sur ce réseau test sans GED. Les flux de puissance sont unidirectionnels et proviennent du réseau amont, le réseau de transport. Le transformateur HTB/HTA symbolise la frontière entre le réseau de distribution et le réseau de transport.

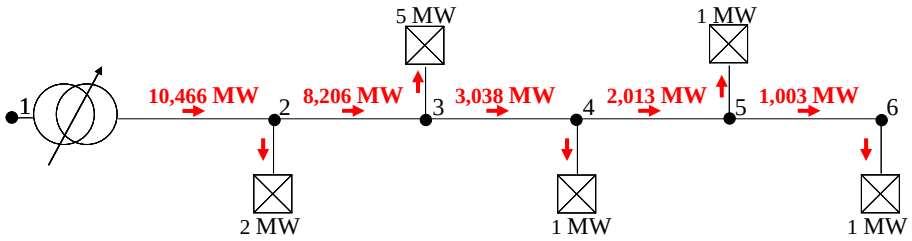


Figure II-4 : Transit des puissances dans le réseau test sans GED

On connecte une GED au nœud 5 de puissance 5 MW comme indiquée sur la Figure II-5. On suppose que cette GED fonctionne à sa puissance maximale. Non seulement elle alimente la charge connectée au même nœud mais, en plus, elle va exporter de la puissance vers les autres charges. Les flux de puissance deviennent alors bidirectionnels. La puissance provenant du réseau de répartition est alors de 5,123 MW. Par ailleurs, dans le cas précédent où la puissance provenait intégralement du réseau amont, les pertes sur le réseau de distribution étaient de 465,6 kW. Dans le cas d'une GED connectée au nœud 5, les pertes sont réduites à 122,5 kW. L'introduction de cette GED a donc diminué les pertes sur le réseau d'un facteur 3,8. Au chapitre I, nous avons vu que les pertes peuvent s'exprimer par la formule suivante :

$$\text{Pertes} = \frac{R}{U^2} \times (P^2 + Q^2)$$

Ainsi grâce à la production locale de cette GED, les transits de puissance active ont diminué et par conséquent les pertes également.

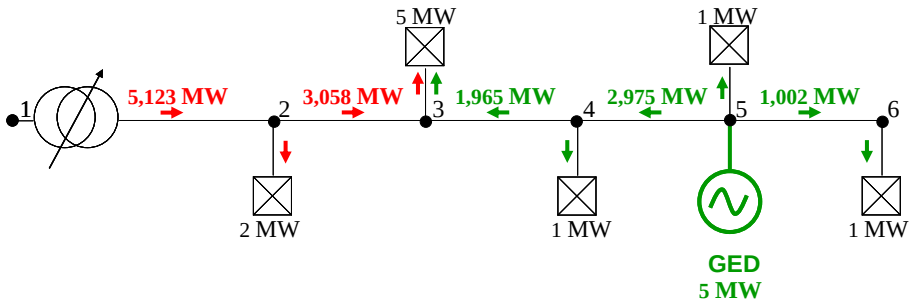


Figure II-5 : Transit de puissance dans le réseau test avec une GED connectée au nœud 5

Selon le nombre et la taille des GED connectées au réseau, on peut se trouver dans une situation d'export d'énergie vers le réseau de transport. La Figure II-6 illustre un exemple de cas d'export de puissance si on connecte, par exemple, 1 GED au nœud 3 de 5 MW et 1 GED au nœud 5 de 6 MW.

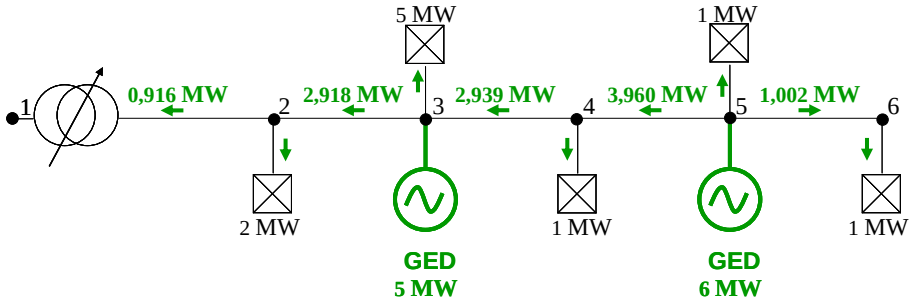


Figure II-6 : Exemple d'un export de puissance vers le réseau de transport

Impact sur les courants de court-circuit

L'introduction de GED dans le réseau de distribution modifie l'impédance globale du réseau et donc les courants de court-circuit et la puissance de court-circuit. Ainsi il est possible que le courant de court-circuit soit modifié [CAI 2002] et puisse provoquer le dysfonctionnement du matériel de protection (aveuglement ou déclenchement intempestif que nous présenterons dans la partie II.1.2). Par ailleurs, lors d'un défaut, les producteurs alimentent le courant de défaut. Celui-ci peut alors dépasser la limite admissible des éléments du réseau (conducteurs entre autres). L'impact sur le plan de protection sera plus approfondi dans le paragraphe I.I.3.

Impact sur la qualité de la tension

La connexion de GED sur le réseau de distribution peut également altérer la qualité de l'onde de tension. Celle-ci est déterminée grâce à un ensemble d'indices.

Le « flicker »

Il s'agit de variations rapides de la tension inférieures à 10 % de la tension nominale de manière répétitive. Il provient du fonctionnement de certaines machines comme les fours à arcs par exemple. Le « flicker » n'a aucune incidence sur les matériels. Cependant il provoque une gêne visuelle car il est responsable du papillotement des ampoules à incandescence. Le « flicker » peut apparaître en raison de l'intermittence des GED si celles-ci sont des éoliennes ou encore des panneaux photovoltaïques.

Les creux de tension

Il s'agit d'une diminution brutale de la tension qui peut aller jusqu'à 90 % de la tension nominale pendant une durée comprise entre 10 ms et 1 minute. Le fonctionnement des protections limite la durée des creux de tension suite à des défauts polyphasés. Ils peuvent intervenir également lorsqu'une GED se couple au réseau.

Les harmoniques

Les harmoniques sont une déformation de l'onde de tension ou de courant. Certaines GED (photovoltaïque entre autres) peuvent avoir des interfaces d'électronique de puissance. Or ce sont ces dispositifs d'électronique de puissance qui sont responsables de la création d'harmoniques plutôt hautes fréquences qui peuvent provoquer un vieillissement prématuré des matériels. Par ailleurs, elles sont responsables de gênes acoustiques dans les transformateurs et de vibrations dans les machines tournantes [ERD 2009].

Les déséquilibres du système triphasé

Le déséquilibre du système triphasé est dû à un mauvais équilibrage des phases et peut provoquer des déséquilibres de tension (diminutions ou élévations). Ces déséquilibres au niveau de la moyenne tension peuvent apparaître lors du raccordement de GED monophasées sur le réseau basse tension, au même titre que les charges monophasées classiques.

II.1.2. **Impact de l'insertion de GED sur la planification et l'exploitation**

Dans la partie précédente, les impacts de l'insertion de production décentralisée sur les grandeurs électriques ont été mis en évidence. Ceux-ci laissent penser que le réseau de distribution n'a pas été conçu pour accueillir ces productions. Nous allons donc détailler les impacts possibles de l'insertion de GED sur le plan de protection et sur les calculs technico-économiques réalisés en planification.

Impact sur le plan de protection

La modification des courants de court-circuit due à l'insertion de GED peut conduire à une modification du réglage des protections voire même à leur changement. Deux principaux problèmes apparaissent suite à une insertion de GED : le problème d'aveuglement de protections et celui déclenchement intempestif des protections.

Problème d'aveuglement des protections

Le problème d'aveuglement de protections se produit lorsqu'un défaut apparaît sur un départ possédant une GED. Ce problème est illustré sur la Figure II-7. En effet, en l'absence de GED, le seuil de la protection P2 est réglé à $I_{seuil\ P2} = I_{df\ 1}$ (courant de défaut provenant du réseau amont). Si on raccorde une GED, alors la GED va participer au courant de défaut. Le courant de défaut apporté par le réseau amont, $I_{df\ 2}$, est alors plus faible que $I_{df\ 1}$ est donc inférieur au seuil de la protection P2 qui ne déclenche pas d'où le terme d'aveuglement.

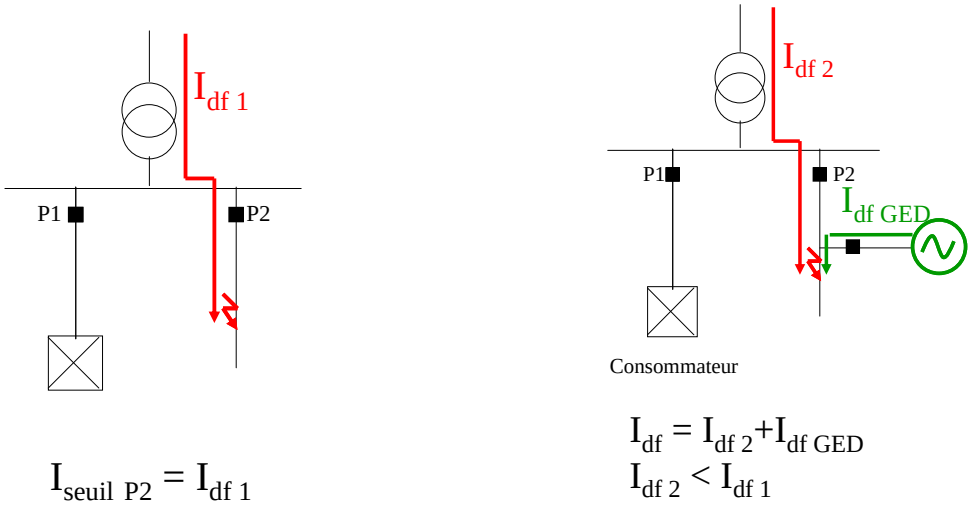


Figure II-7 : Problème d'aveuglement de protections

Problème du déclenchement intempestif des protections

Le problème de déclenchement intempestif (illustré sur la Figure II-8) se produit lorsqu' un défaut apparaît sur un départ adjacent au départ possédant une GED. En effet, la GED participant au courant de défaut peut faire déclencher la protection P2 si le courant de défaut apporté par la GED est supérieur au seuil de la protection P2.

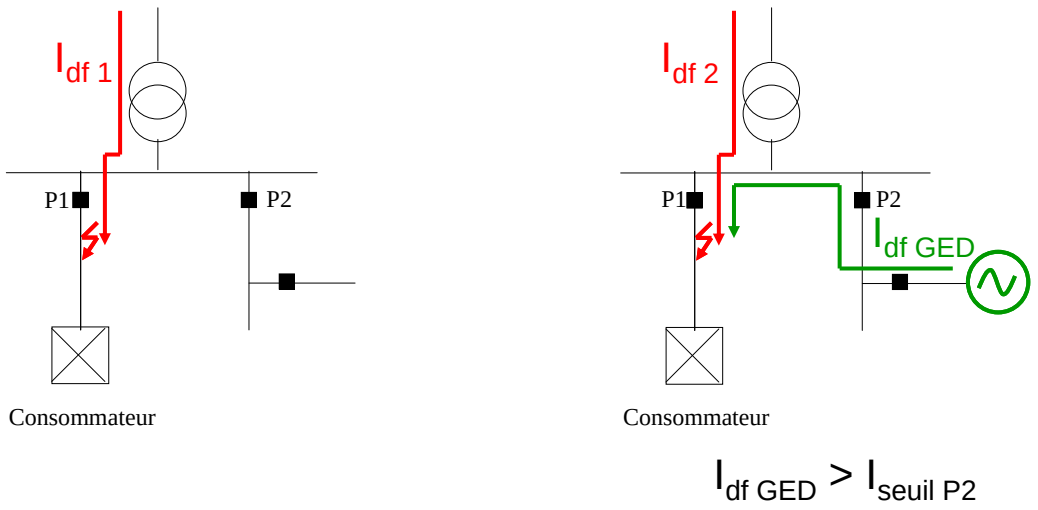


Figure II-8 : Problème du déclenchement intempestif de protections

Impact sur les calculs technico-économiques des études de planification

L'introduction de production décentralisée dans le réseau modifie les transits de puissance et le plan de tension. Ainsi, c'est un paramètre qui doit être introduit dans les études de planification. Par exemple, une décision de renforcement de réseau sans GED et avec GED n'aura pas les mêmes coûts actualisés. Il est en effet possible que selon qu'il y ait une GED ou non, les parties du réseau à renforcer changent. Les coûts actualisés des pertes, ou encore de l'énergie non distribuée, peuvent donc être très différents.

II.2. Méthodes actuelles pour raccorder des GED sur le réseau de distribution

II.2.1. **Procédure actuelle ERDF**

Le raccordement d'un producteur au réseau de distribution moyenne tension doit répondre à des règles de sécurité et de qualité. Les principales règles actuellement utilisées par ERDF sont résumées dans le Tableau II-1 [ERD 2009].

Pour respecter ces règles de raccordement et si les études l'imposent, ERDF a recours soit au renforcement soit à la création d'un départ dédié pour le producteur.

Puissance raccordable en triphasé	P ≤ 17 MW (tarif de rachat)
Tenue aux courants de court-circuit	Les courants de court-circuit ne doivent pas endommager les appareillages du réseau tels que : - les conducteurs (2 à 22 kA efficace) - les organes de coupure (pouvoir de coupure de 8 ou 12,5 kA efficace)
Emission des harmoniques	Les taux de courants harmoniques émis par le site de production ne doivent pas dépasser les limites fixées par l'arrêté du 17 mars 2003.
Transmission tarifaire	Le raccordement de productions ne doit pas perturber le système de diffusion des ordres de commande du passage des signaux tarifaires (tarifs heures pleines/heures creuses, entre autres).
Variations rapides de tension	L'à-coup de tension dû à l'enclenchement des transformateurs du site de production ne doit pas dépasser 5 % au point de livraison des installations. Les fluctuations de puissance dues à la présence d'un site de production ne doivent pas générer de « flicker » trop important (norme CEI 1000-2-2).
Plan de tension et tenue thermique des ouvrages	Le raccordement d'un site de production ne doit pas provoquer la circulation de courants trop élevés. La tension en tout point du réseau doit être comprise entre +/-5 % de la tension nominale.
Protection générale C13-100 du producteur	Le réglage de la protection générale du site est possible si $0{,}8\ I_{ccbi\ g} < 1{,}3\ I_M$ Avec $I_{ccbi\ g}$ = courant de court-circuit biphasé chez le producteur lorsqu'il est le seul en service I_M = courant maximal injecté ou soutiré par l'installation de production sur le réseau en régime permanent.
Protection du départ du producteur	La protection du départ sur lequel est connecté le producteur ne risque pas d'être aveuglée. Pour cela il faut $0{,}8\ I_{ccbi} < 1{,}3\ I_M$ Avec I_{ccbi} = courant de court-circuit biphasé au point le plus impédant du départ sur lequel le site est connecté en schéma secourant.

Tableau II-1 : Règles de raccordement d'un producteur au réseau de distribution HTA

II.2.2. **Méthode de renforcement**

La méthode de renforcement consiste à remplacer des conducteurs existants par des conducteurs de section plus importante. Ainsi, lors d'une étude de raccordement de GED, les conducteurs du réseau qui sont contraints sont alors renforcés. La Figure II-9 montre un exemple où les lignes ont cette fois une section de 95 mm². Les paramètres sont alors r = 0,32 Ω/km et x = 0,1 Ω/km. Dans ce cas, les lignes (3-4) et (4-5) sont en surintensité suite à la connexion d'une GED de 12 MW. Les conducteurs initiaux avaient pour courant maximal admissible 230 A. La connexion de la GED de 12 MW provoque une augmentation des courants qui atteignent 236 A dans la ligne (3-4) et 264 A dans la ligne (4-5). Une solution est de remplacer les lignes (3-4) et (4-5) par des conducteurs de section 150 mm² qui auront un courant maximal admissible de 300 A.

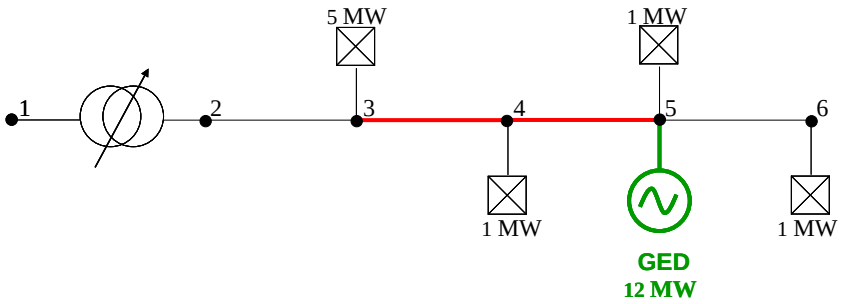


Figure II-9 : Exemple de renforcement à faire

Etant données toutes les autres contraintes de raccordement citées dans le paragraphe précédent, une étude préalable détermine quels seront les problèmes posés suite au raccordement d'une GED. Si le problème ne peut pas se résoudre simplement (renforcement) la GED sera raccordée au réseau par un départ dédié.

II.2.3. **Méthode du départ dédié**

Raccorder une GED par un départ dédié consiste à connecter la GED directement au niveau du poste source grâce à un départ relié directement au jeu de barre à la sortie d'un transformateur HTB/HTA. Ainsi les flux redeviennent unidirectionnels dans les autres départs du réseau de distribution comme si l'énergie provenait du réseau amont.

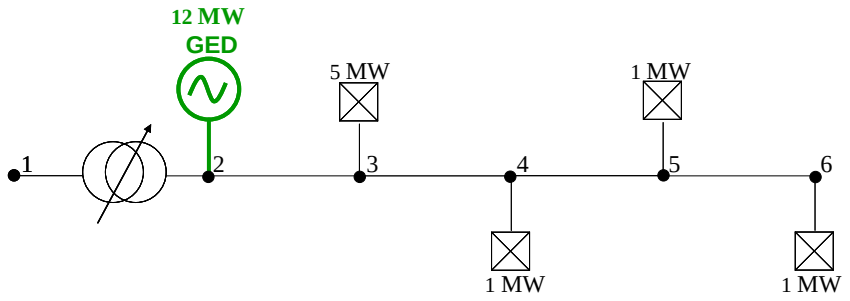


Figure II-10 : Exemple de départ dédié

II.2.4. **Limites et inconvénients des méthodes actuelles en cas d'insertion massive**

Le raccordement de quantités marginales de GED sur le réseau de distribution est donc actuellement bien maîtrisé par des techniques simples. Le renforcement de réseau est une méthode basique qui permet de résoudre certains problèmes techniques qui pourraient arriver sur le réseau. Le départ dédié est un moyen efficace de raccorder une GED si trop de contraintes apparaissent ou si cela devient plus intéressant économiquement que de renforcer.

Mais si le développement des GED devient très important, les départs dédiés systématiques pourraient ne pas être effectués (encombrement du territoire). D'autre part, il faudra sûrement renforcer une partie importante du réseau ce qui pourrait devenir irréalisable économiquement. Ainsi les méthodes actuellement employées pour raccorder les GED pourraient être remises en cause.

De nouvelles solutions doivent donc être envisagées afin de pouvoir introduire une grande quantité de GED dans le réseau de distribution. De nombreux travaux de recherche se penchent sur cette question. Certains travaux proposent de repenser le mode d'exploitation des réseaux de distribution en s'inspirant du réseau de transport qui est exploité en bouclé.

II.3. Solution proposée : bouclage des réseaux de distribution

La solution du bouclage nous a semblé intéressante et a conduit à l'étude qui suit. En effet, longtemps considérée comme impossible à cause du bouclage du réseau de transport par le réseau de distribution, des travaux récents montrent la possibilité d'utiliser des limiteurs de courant [LEP 2007] qui peuvent aussi réduire les courants de boucles, utilisés en D-FACTS séries [ETX 2003]. De nombreuses publications étudient la possibilité de boucler les réseaux de distribution pour augmenter le taux de GED ([CEL_1 2005], [CEL_3 2005], [CEL 2004]). Leurs principales conclusions sur les avantages et inconvénients majeurs d'une exploitation bouclée sont énumérées dans le Tableau II-2.

Avantages	Inconvénients
- Certains inconvénients liés aux GED diminuent, - Pertes peuvent diminuer, - Plan de tension meilleur, - Report d'investissement possible pour du renforcement, - Meilleure flexibilité, - Meilleure adaptation à l'augmentation de la charge,	- Planification plus complexe - Exploitation plus complexe si non automatisée, - Le courant de court-circuit peut augmenter, - Protections à vérifier voire à changer, - **Si mal maillé** - Augmentation des pertes, - Equipements surchargés.

Tableau II-2 : Avantages et inconvénients liés à la solution maillée

Les réseaux de distribution français étant planifiés de manière bouclable, l'option du bouclage permanent semble assez intéressante et demande peu de modifications structurelles comme solution pour augmenter le taux d'insertion de GED. Ainsi, une étude approfondie nous a-t-elle semblé importante afin de prouver l'impact de l'exploitation maillée sur le taux d'insertion de GED dans le réseau de distribution.

II.3.1. **Evaluation de l'impact du bouclage : effet sur le taux d'insertion**

Définition du taux maximal d'insertion de GED

Pour déterminer si une architecture donnée favorise l'insertion de GED, il faut pouvoir évaluer le taux maximal d'insertion de GED. Ce taux correspond à la puissance maximale de GED que l'on peut installer dans le réseau tout en respectant les contraintes techniques. Le reste de la puissance est fournie par le réseau de transport. Ce taux est donc exprimé comme le ratio de la puissance totale maximale de GED installée ($P_{max\ GED}$) sur la puissance totale consommée (P_c) dans le réseau considéré. Le taux maximal d'insertion de GED (en %) est donc défini par :

$$\tau_{max} = \frac{P_{maxGED}}{P_c} \times 100 \qquad \text{(II-1)}$$

Hypothèses choisies

Faire des hypothèses sur la puissance et la localisation des GED est trop risqué à cause des incertitudes trop importantes sur celles-ci. Ainsi, pour évaluer de manière exhaustive ce taux, il faudrait tester toutes les gammes possibles de GED et tous les emplacements possibles. Les

réseaux de distribution ont souvent plusieurs centaines de nœuds par poste source et il est donc impossible de déterminer le taux maximal d'insertion de GED en un temps acceptable par cette méthode. Une approche statistique de type Monte Carlo nous a donc semblé adaptée pour résoudre ce problème. Déjà utilisée pour calculer des indices de sûreté dans les réseaux électriques, elle permet de mieux modéliser les systèmes complexes par rapport aux méthodes analytiques malgré un temps de calcul qui reste important [OCN 2008].

Algorithme de type Monte Carlo pour estimer le taux maximal d'insertion de GED dans un réseau donné

Principe de la méthode de Monte Carlo

La méthode de Monte Carlo est une méthode numérique qui consiste à effectuer un certain nombre de tirages aléatoires afin de calculer une valeur déterministe. L'exemple du calcul d'une intégrale permet d'illustrer la méthode de Monte Carlo [RIO 1999]. Soit f la fonction continue définie par :

$$\begin{aligned} f : [a,b] &\rightarrow [0,h] \\ x &\mapsto f(x) \end{aligned}.$$

L'intégrale de la fonction f correspond à l'aire située sous la courbe de la fonction f c'est-à-dire correspond à l'ensemble I_f : $\{(x,y) : a \leqslant x \leqslant b, 0 \leqslant y \leqslant f(x)\}$.

Soit le rectangle défini par Rec : $\{(x,y) : a \leqslant x \leqslant b, 0 \leqslant y \leqslant h\}$. La Figure II-11 illustre l'exemple traité. L'aire du rectangle est $A_{Rec} = h \times (b - a)$.

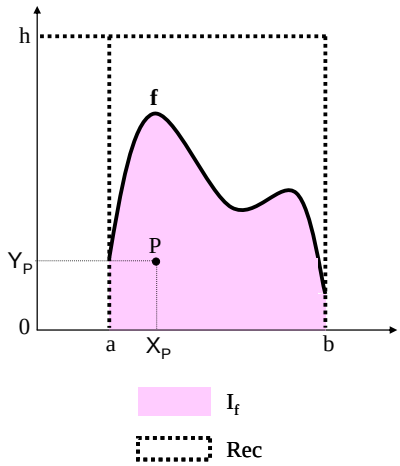


Figure II-11 : Calcul d'intégrale par la méthode de Monte Carlo

On tire n points (X,Y) appartenant à l'ensemble Rec selon une loi uniforme sur [a,b] pour x et [0 h] pour y. Pour un tirage donné, on obtient un succès si le point P tiré appartient à I_f c'est-à-dire si $Y_P \leq f(X_P)$. On note alors $n_{succès}$ le nombre de succès obtenu pour n tirages

effectués. On définit la probabilité $p=\frac{n_{succès}}{n}$ comme la probabilité que le point tiré appartienne à I_f. Lorsque n tend vers l'infini on a $p=\frac{I_f}{A_{rec}}$ d'où

$$I_f = \frac{n_{succès}}{n} \times A_{rec}. \qquad \text{(II-2)}$$

En tirant un nombre important de points, on peut arriver à estimer la valeur I_f avec une bonne précision.

Application à l'estimation du taux maximal d'insertion de GED

Soit un réseau constitué de n nœuds. On définit les différents paramètres suivants :

- $T = \{T_1, \ldots, T_m\}$ est l'ensemble des nœuds du réseau étudié,
- P = puissance totale consommée dans le réseau (en MW),
- P_{GED} = puissance totale de GED insérées dans le réseau (en MW),
- τ = taux d'insertion de GED dans le réseau (en %),
- P_{min} et P_{max} = puissances minimale et maximale pour une GED.

Il existe plusieurs puissances nominales de GED allant de quelques watts pour des cellules solaires jusqu'à plusieurs MW pour des parcs éoliens par exemple.

Le principe de l'algorithme est synthétisé dans la Figure II-12. Pour chaque taux de GED τ, n itérations sont effectuées. Pour chaque itération, le nombre, la puissance (comprise entre P_{min} et P_{max}) et l'emplacement des GED sont générés suivant une loi uniforme sur les nœuds existants dans le réseau ce qui correspond assez bien à la répartition de la population. Un calcul de répartition de charges ou *loadflow* est ensuite effectué [KUN 1994]. Il prend également en compte la présence de régleurs en charge au niveau des transformateurs HTB/HTA. Grâce à ce calcul, il est possible de contrôler :

- le plan de tension (vérification que la tension en tout point du réseau reste dans les limites admissibles (+/- 5 % de la tension nominale)),
- le courant dans les éléments du réseau (vérification que le courant qui transite dans les lignes et les transformateurs est bien inférieur au courant maximal admissible),
- la valeur des pertes dans l'ensemble du réseau.

Le respect ou non des contraintes est mis en mémoire sous forme binaire (1 si respectées et 0 sinon).

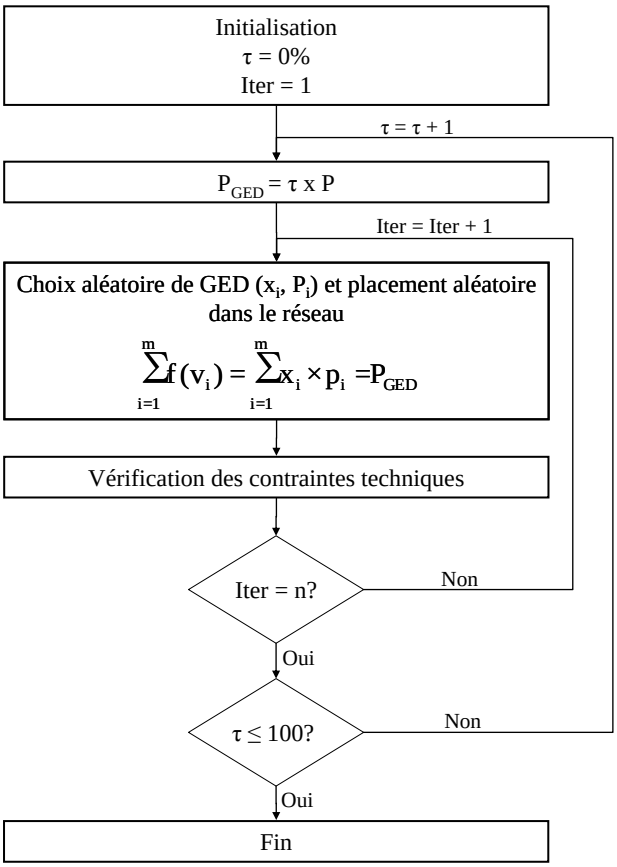


Figure II-12 : Algorithme de Monte Carlo pour la détermination du taux maximal d'insertion de GED

Exploitation des résultats

A l'issue de la simulation Monte Carlo, pour chaque taux d'insertion de GED testé, on obtient le nombre de succès c'est-à-dire le nombre de fois où le test d'insertion à respecter les contraintes de courant et de tension ainsi que le nombre d'échecs. La Figure II-13 donne un exemple du nombre de succès et d'échecs obtenu pour une simulation Monte Carlo effectuée tous les τ_i% d'insertion, pour i variant de 10 en 10. Pour chaque τ_i%, plusieurs tirages sont effectués. Les études de fiabilité que nous présenterons par la suite ont permis de conclure que si l'on prenait le nombre de nœuds comme nombre de tirages alors les résultats étaient suffisamment fiables pour être exploitables. Nous reviendrons un peu plus tard sur la fiabilité des résultats obtenus.

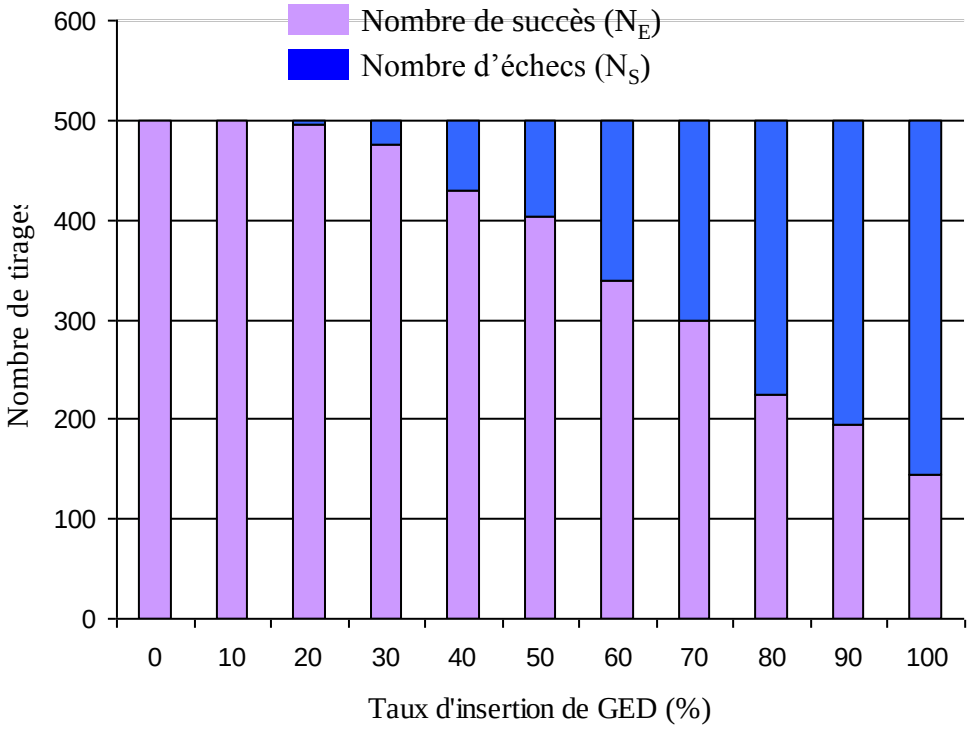


Figure II-13 : Illustration du résultat obtenu à l'issue d'une simulation Monte Carlo

On définit la probabilité de succès par la formule (II-3) :

$$p(\tau_i) = \frac{N_S(\tau_i)}{N_E(\tau_i)} \qquad \text{(II-3)}$$

Avec :

- $N_S(\tau_i)$: Nombre de succès pour τ_i% d'insertion d'éoliennes sur le réseau
- $N_E(\tau_i)$: Nombre d'essais de τ_i% d'insertion d'éoliennes sur le réseau
- τ_i variant de τ_{min} à 100 %

Sur la Figure II-13, pour un taux d'insertion de 40 % de GED, on obtient 437 succès et 63 échecs pour 500 tirages. Ainsi, la probabilité de succès pour un taux d'insertion de 40 %, vaut $p(40\%) = \frac{437}{500} = 0{,}874$ soit 87,4 % de probabilité de succès.

Il est important de savoir si nos résultats sont fiables et cela dépend du nombre d'itérations n effectuées pour chaque taux d'insertion. Pour cela, le calcul d'intervalles de confiance permet de savoir si on est proche de la solution réelle ou pas. On note :

- α = marge d'erreur tolérée (par exemple 0,01),
- $p_{re}(\tau)$ = probabilité réelle pour un taux donné,
- $p_{cal}(\tau)$ = probabilité calculée pour un taux donné par la méthode de Monte Carlo,

- $[p_{inf} ; p_{sup}]$ = intervalle de confiance

Alors, il existe deux réels (p_{inf}, p_{sup}) tels que p_{re} a (1-α) de chance d'être dans l'intervalle $[p_{inf} ; p_{sup}]$. Ainsi, plus $[p_{inf} ; p_{sup}]$ sera petit, plus p_{cal} sera proche de p_{re}.

Des statisticiens ont réussi à calculer ces intervalles de confiance pour certaines lois connues et notamment pour la loi de Bernoulli. Dans le paragraphe suivant, nous allons voir que les épreuves de Monter Carlo effectuées précédemment sont en réalité une succession d'épreuves de Bernoulli.

Identification de l'algorithme comme épreuves de Bernoulli [AGR 2002], [DES 2009]

Une loi de Bernoulli de paramètre p consiste à réaliser une expérience ayant deux issues possibles : le succès avec une probabilité p ou l'échec avec une probabilité 1-p. On peut citer par exemple le tirage à pile ou face. Il s'agit d'une loi de Bernoulli de paramètre ½ car on a une chance sur deux de tomber sur pile ou sur face.

- Dans l'algorithme de la Figure II-12, pour un taux donné τ, soit Ω_τ l'ensemble des fonctions f qui à chaque nœud v_i du réseau associent une puissance de GED comprise entre P_{min} et P_{max} ou 0 telle que la somme de ces valeurs pour tous les nœuds du réseau soit égale à la puissance totale de GED insérées. On a $\Omega_\tau = \{ \left\{ f : V \rightarrow \{0\} \cup [P_{\min} ; P_{\max}] / \sum_{i=1}^{m} f(v_i) = \tau \times P \right\} \}$.

- Soit la fonction $X_\tau : \Omega_\tau \rightarrow [0;1]$ telle que $X_\tau(f) = 1$ si le réseau fonctionne correctement avec la répartition de GED donnée par f et 0 sinon.

- Soit p la probabilité que le réseau fonctionne bien.

Avec ces définitions, pour un taux donné, l'algorithme réalisé consiste à tirer aléatoirement une répartition de GED f dans Ω_τ. L'issue de ce tirage est soit un succès soit un échec. On réalise n tirages dans Ω_τ. On a donc réalisé n épreuves de Bernoulli de paramètre p. Soit X_i une épreuve de Bernoulli pour un taux donné. On pose $Y = \sum_{i=1}^{n} X_i$. Alors Y suit une loi binomiale de paramètre n et p. Ainsi la probabilité qu'il y a ait k succès sur les n tirages est définie par $P(Y=k) = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}$.

Les statisticiens Clopper et Pearson [AGR 2002] ont déterminé des intervalles de confiance pour p. Soit r le nombre de succès.

Soit $p_{inf} \in [0 ; 1]$, la probabilité que p soit supérieure à p_{inf} est $\sum_{k=r}^{n} C_n^k p_{inf}^{\ k} (1 - p_{inf})^{n-k}$.

Soit $p_{sup} \in [0\ ;1]$, la probabilité que p soit inférieure à p_{sup} est $\sum_{k=0}^{r} C_n^k p_{sup}^{\ k} (1 - p_{sup})^{n-k}$.

D'après Clopper et Pearson, l'unique solution (p_{inf}, p_{sup}) vérifiant les équations ci-dessous donne l'intervalle de confiance le plus précis c'est-à-dire que l'on a un niveau de confiance de 1-α dans le fait que p appartienne à l'intervalle [p_{inf} ;p_{sup}].

$$\sum_{k=r}^{n} C_n^k p_{inf}^{\ k} (1 - p_{inf})^{n\ \ k} = \frac{\alpha}{2}$$

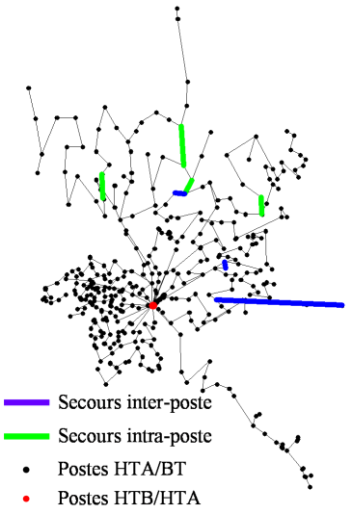
$$\sum_{k=0}^{r} C_n^k p_{sup}^{\ k} (1 - p_{sup})^{n\ \ k} = \frac{\alpha}{2}$$

A l'issue de l'algorithme, pour chaque taux inséré, on a le nombre de succès obtenu. On peut donc en déduire l'intervalle de confiance [p_{inf} ;p_{sup}] correspondant. La méthode de calcul utilisée est une méthode par dichotomie dont le principe est expliqué dans l'Annexe 1.

II.3.2. **Application de la méthode sur un réseau réel**

Description du réseau

Le réseau étudié est issu d'un réseau réel EDF. Il comporte un poste source HTB/HTA connecté à un réseau amont de puissance de court-circuit de 1590 MVA. Il est muni de trois transformateurs de, respectivement, 36, 80 et 20 MVA et de 419 postes de distribution HTA/BT. La consommation totale est de 61 MW. Ce réseau possède plusieurs départs qui peuvent se secourir. Deux types de secours existent. Les secours dits *intra-poste* bouclent deux départs appartenant au même transformateur tandis que les secours dits *inter-poste* bouclent deux départs appartenant à des transformateurs différents. La Figure II-14 montre le réseau étudié.



- Réseau urbain
- 1 poste source HTB/HTA
- 419 postes HTA/BT
- 44 666 clients BT
- 81 clients MT
- Puissance totale consommée = 61 MW
- 4 secours intra-postes
- 3 secours inter-postes

Figure II-14 : Description du réseau étudié

Dans les tests d'insertion, la gamme possible de GED sera comprise entre 2,2 kW et 6 MW. En effet, nous partons sur l'hypothèse que les GED supérieures à 6 MW auront un départ dédié au niveau du poste source et donc ne perturberont pas le réseau de distribution (voir paragraphe I.2.2).

Comparaison de deux scénarii de consommation

La consommation des différentes charges du réseau varie au cours du temps. On pourrait introduire des courbes de charges dans le *loadflow* mais alors le temps de calcul augmenterait considérablement car il faudrait effectuer autant de *loadflow* que de pas de temps de la courbe de charge. En revanche, on connaît une estimation de la consommation minimale des charges grâce à des études statistiques d'après l'arrêté du 3 juin 1998. La consommation minimale est estimée à 20 % de la consommation maximale. On utilise donc le test d'insertion de GED décrit par l'algorithme de la Figure II-12 sur le réseau urbain de la Figure II-14. La Figure II-15 donne les résultats obtenus pour le scénario de consommation maximale avec celui de consommation minimale en considérant la production de GED maximale. Nous avons fixé a priori que le taux maximal d'insertion de GED correspond à une probabilité supérieure à 0,97. On constate que le test à consommation minimale diminue le taux maximal d'insertion de GED de 8 %. En effet, pour une même puissance de GED produite, dans le cas de la consommation maximale, il y a plus de puissance consommée que dans le cas de la consommation minimale. Il y a donc plus de transit de puissance dans les conducteurs car les GED devront exporter leur énergie plus loin dans le réseau. Par ailleurs, au-delà d'un taux de 20 % de GED, celles-ci produisent plus que ce qui est consommé donc de la puissance est « refoulée » au niveau du poste source. Ainsi, les éléments du réseau sont plus contraints et des problèmes de tension peuvent apparaître. Nous pouvons donc conclure que le cas de consommation minimale et de production maximale est le cas le plus contraignant qui puisse se produire.

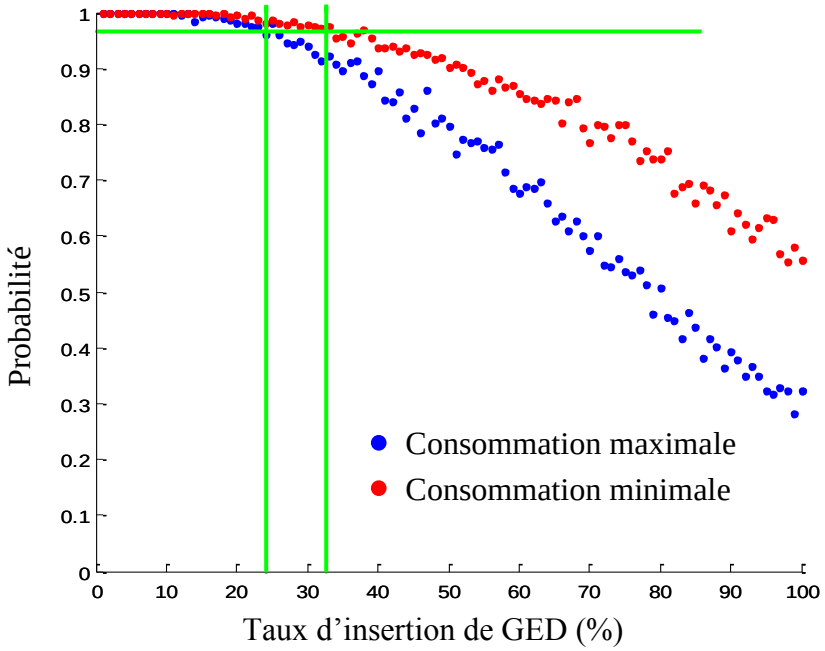


Figure II-15 : Comparaison consommation minimale et maximale

Influence de la taille des GED insérées

Le profil de la courbe de probabilité de succès en fonction du taux d'insertion de GED est le même quels que soient les tests. Cette courbe est constituée d'une partie constante pour un taux d'insertion faible de GED. Pour un taux donné, on peut observer un décrochage et la probabilité diminue avec une pente qui indique la tendance générale d'acceptation de GED. On a vu, au paragraphe précédent, que la consommation possède un impact sur ces deux paramètres au même titre que la gamme des GED insérées. La Figure II-16 représente la probabilité de succès en fonction du taux d'insertion de GED pour 3 gammes différentes. La gamme numéro 1 concerne les GED de petites tailles c'est-à-dire inférieures à 2 MW, la gamme numéro 2 concerne les GED comprises entre 2 MW et 4 MW et la gamme numéro 3 concerne les GED comprises entre 2 et 5 MW. On constate effectivement que les GED de grandes tailles s'insèrent plus difficilement que les GED de petite taille. En effet, plus les GED seront de petites, plus leurs puissances seront consommées en local et elles n'auront pas besoin d'exporter leur énergie. Or ce sont les transits de puissance active et réactive qui provoquent les problèmes de surtension et/ou de surcourant.

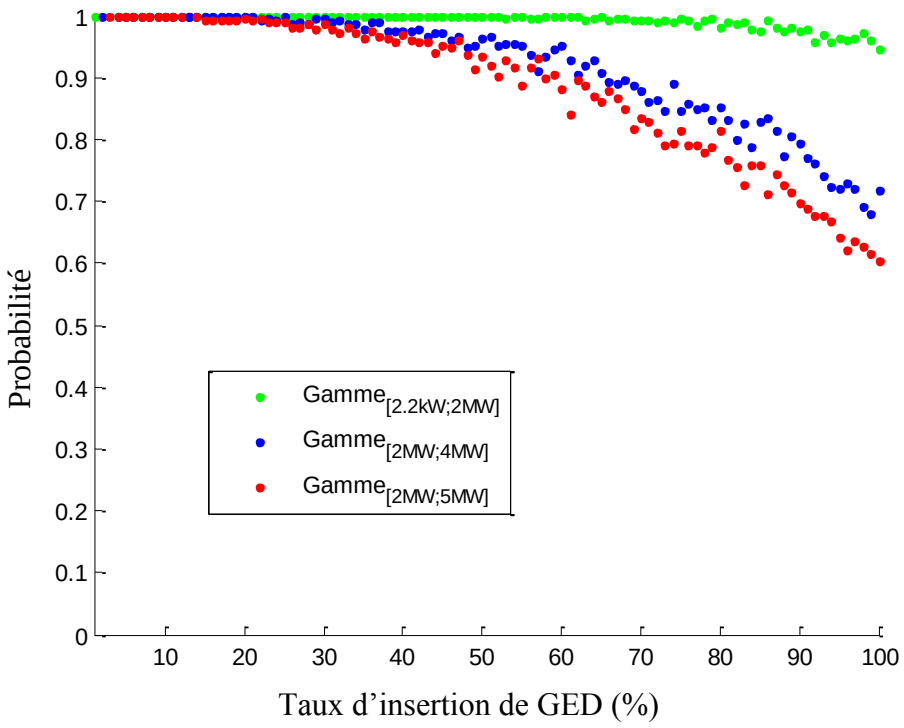


Figure II-16 : Influence de la gamme de GED insérées sur le taux maximal de pénétration de GED

Fiabilité des résultats

La Figure II-17 présente les intervalles de confiance des résultats obtenus pour le réseau radial initial en utilisant les propriétés données par les lois binomiales. On peut remarquer que plus le taux d'insertion de GED augmente, plus les intervalles de confiance sont larges. Cela est dû au fait que le nombre de cas possibles augmente avec le taux d'insertion de GED. Pour un taux compris entre 0 et 40 % et pour notre cas d'étude, les intervalles de confiance sont assez fins ce qui est suffisant car notre but n'est pas de tracer toute la courbe de probabilité de succès en fonction du taux d'insertion de GED mais de déterminer le taux maximal de celles-ci garantissant une probabilité de succès donnée (seuil). Donc, dans le cas de ce réseau, le nombre d'essais est suffisant pour approximer le taux maximal d'insertion de GED. Dans le cas où l'intervalle de confiance serait trop large, il suffirait de faire des essais supplémentaires pour le taux considéré.

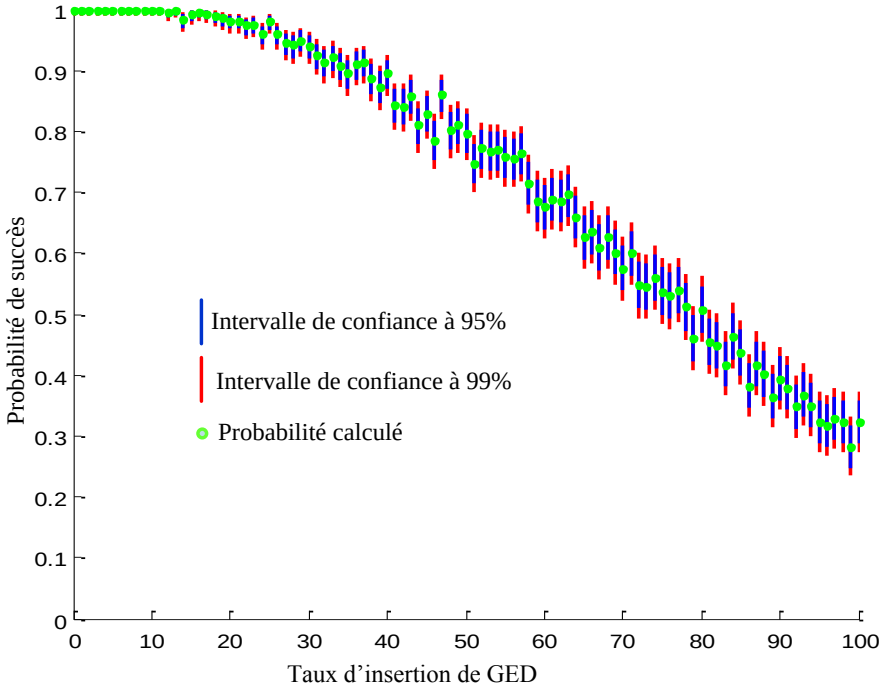


Figure II-17 : Intervalles de confiance dans le cas du réseau initial radial

Conclusion sur les paramètres de calcul

Dans les paragraphes I.3.2 et I.3.3, on a vu la puissance consommée (puissance maximale ou minimale) des clients ainsi que la gamme de GED insérées ont un impact sur l'évaluation du taux maximal d'insertion de GED. Dans la suite de l'étude, nous effectuerons les simulations dans le cas de la consommation minimale car c'est le cas le plus défavorable. Par ailleurs, on considèrera la gamme de GED numéro 3 c'est-à-dire de 2 MW à 5 MW pour tenir compte de tous les scénarii possibles d'insertion de façon à rester le plus général possible. Enfin, le paragraphe I.3.4 indique que le nombre de tests effectués pour chaque taux d'insertion est suffisant pour ce réseau. Si, dans les tests suivants, le taux maximal d'insertion de GED dépassait 40 %, il faudrait faire des itérations supplémentaires.

II.3.3. **Comparaison entre renforcement et exploitation bouclée du réseau**

Le but de cette partie consiste à comparer différentes solutions pour augmenter le taux d'insertion de GED dans le réseau. Pour cela, trois stratégies sont envisagées : le renforcement de réseau, le bouclage en utilisant les secours intra-poste et enfin le bouclage utilisant les secours intra-poste et des boucles additionnelles créées par la construction de nouvelles lignes. Dans un premier temps, les trois méthodes seront expliquées puis nous comparerons les résultats obtenus grâce à l'algorithme de Monte Carlo.

Méthode 1 : renforcement des lignes surchargées

La première méthode envisagée pour augmenter le taux d'insertion de GED dans le réseau est la solution actuellement utilisée par ERDF à savoir le renforcement de réseaux. Il s'agit de repérer les lignes surchargées et de les remplacer par des lignes de section plus importante. Le réseau étudié est un réseau urbain. Comme nous l'avons vu dans le chapitre I, les réseaux urbains ont le plus souvent des problèmes de surcharges plutôt que des problèmes de tension. En effet, la densité de charges est importante et la longueur des conducteurs est faible. Au cours de l'algorithme de Monte Carlo, les lignes dont les transits de courant ont dépassé le courant maximal admissible sont fournies pour chaque itération. A l'issue de l'algorithme, ces lignes sont classées selon le nombre de fois où la contrainte en courant a été violée. Elles sont alors renforcées en fonction de la quantité de conducteur que l'on s'autorise à rajouter en commençant par les lignes qui sont le plus souvent contraintes.

Méthode 2 : bouclage des secours intra-postes

L'impact du maillage est étudié dans un premier temps en n'utilisant que les secours intra-postes. En effet, les secours inter postes bouclent des départs dont les régleurs en charge ne sont pas réglés à la même tension. Il en résulte alors des courants de boucles qui, au lieu d'améliorer le taux d'insertion de GED, pourraient le réduire. Il existe des solutions structurelles pour traiter le bouclage inter-poste [LEP 2007] mais nous n'avons pas décidé de traiter ce cas dans cette étude.

Méthode 3 : bouclage intra-postes et ajout de lignes supplémentaires

Pour pouvoir comparer la solution maillée avec la solution de renforcement de réseau, on veut comparer le bénéfice obtenu en ajoutant la même quantité de conducteur. On choisit alors de prendre une section normalisée de 240 mm² dans les deux cas. Ainsi, dans les deux cas, on ajoutera la même longueur de conducteur. La seule différence est que, dans le cas du renforcement, il s'agit d'un remplacement de lignes alors que dans le cas du bouclage, il s'agit d'un ajout de ligne. La méthode utilisée pour boucler le réseau consiste à repérer les lignes qui sont le plus souvent contraintes (cf § I.4.1) et à boucler le réseau dans le voisinage de ces lignes. Le but est de faire passer les flux de puissance par d'autres chemins et ainsi de soulager les lignes en surintensité.

Comparaison des différentes méthodes

La Figure II-18 donne les résultats obtenus pour les méthodes 1 et 3 ainsi que pour le cas radial initial.

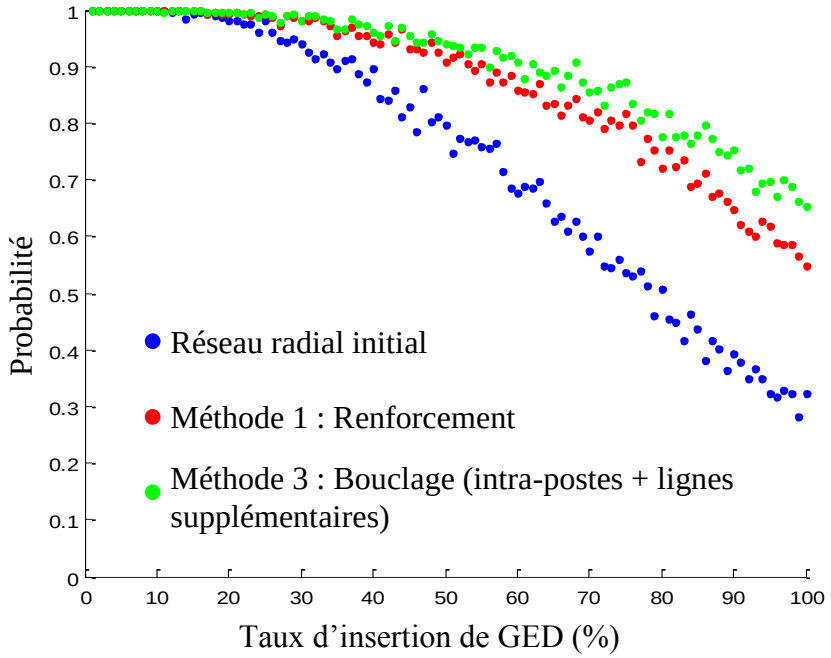


Figure II-18 : Comparaison entre le cas initial et la méthode 1 et 3

	Taux maximal d'insertion de GED à consommation minimale	Longueur de lignes ajoutées (km)
Réseau initial radial	25 %	0
Réseau renforcé	34 %	6,2
Réseau bouclé (intra-postes)	26 %	0
Réseau bouclé (intra-postes + lignes additionnelles)	39 %	6,2

Tableau II-3 : Comparaison des stratégies possibles pour améliorer le taux maximal de GED dans le réseau

On remarque qu'il y a très peu de différence entre le cas radial et le cas bouclé avec les secours intra-poste. Le décrochage se fait pratiquement au même endroit. On obtient juste un gain de 1 % en bouclant. Cependant la pente de la courbe du cas bouclé est légèrement supérieure de celle du cas radial. Cela peut s'expliquer par le fait qu'il n'y a que 4 secours ce

qui est faible devant le nombre de lignes de réseau (418). On peut donc supposer que le bouclage est ici insuffisant pour noter une réelle amélioration du taux maximal d'insertion de GED.

Le cas bouclé avec les secours intra-poste et des lignes supplémentaires est en revanche très intéressant puisque l'investissement est le même qu'avec la méthode de renforcement mais le gain obtenu est de 5 % plus élevé.

Ainsi, nous avons pu montrer grâce à la méthode de Monte Carlo que l'exploitation bouclée du réseau pouvait augmenter le taux d'insertion de GED. Cette conclusion conduit à la création d'une nouvelle structure de réseau autorisant une exploitation partiellement bouclée que nous allons présenter dans la partie qui suit.

II.3.4. **Proposition d'une nouvelle architecture bouclée : la structure hybride**

Description et mode d'exploitation

Le nouveau type de réseau que nous proposons est une hybridation entre la maille et la coupure d'artère (cf Chapitre I). Nous le nommerons structure hybride par la suite. La Figure II-19 résume l'origine de cette structure. Le bon compromis technico-économique de la coupure d'artère lié à l'impact bénéfique attendu du bouclage sur l'insertion de GED ont conduit à la structure hybride.

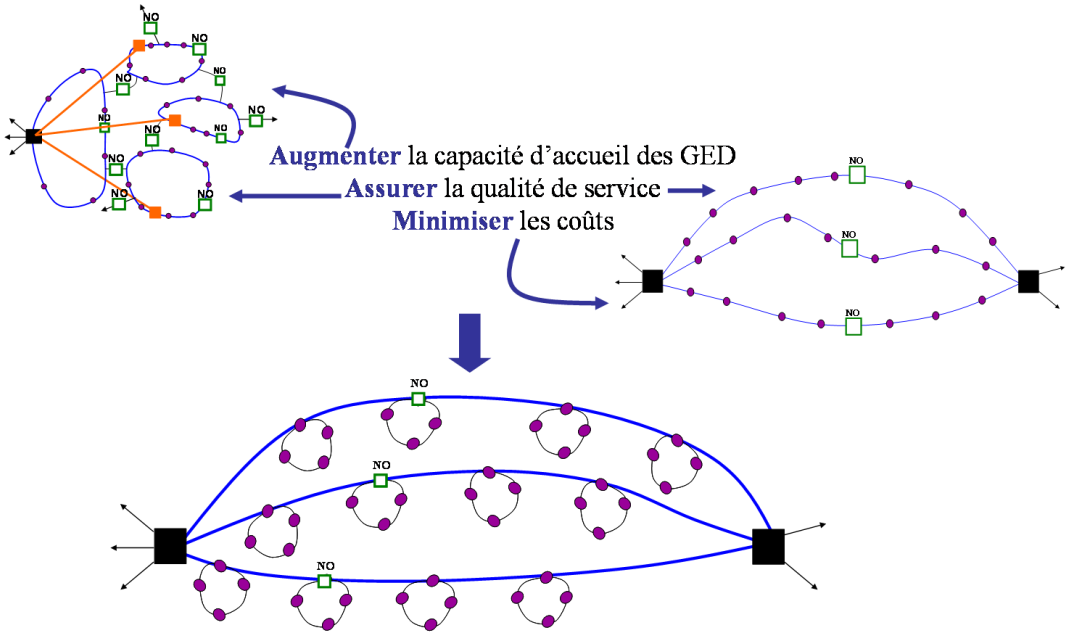


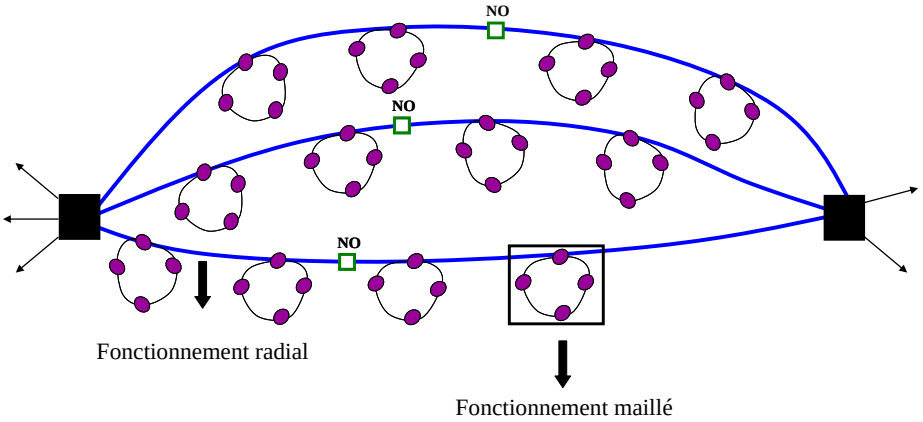
Figure II-19 : Génération de la structure hybride

La Figure II-20 présente le principe de fonctionnement de cette architecture. Elle est constituée de boucles comme la maille (cf chapitre I partie I.2.6) mais ces boucles sont

connectées en coupure d'artère. Les artères principales sont exploitées en radial et les boucles sont exploitées en maillé.

Chaque boucle est connectée à une artère principale qui est exploitée en radial grâce à un organe de coupure télécommandé. Lorsqu'un défaut apparaît sur une artère principale, les organes de manœuvre télécommandés (OMT) sont manœuvrés de façon à isoler le défaut et à réalimenter les consommateurs.

La boucle est entièrement automatisée. Les charges sont reliées à la boucle par des organes de coupure automatisés. Lorsqu'un défaut apparaît dans une boucle, la protection amont de la boucle déclenche et tous les interrupteurs des consommateurs s'ouvrent. La protection se referme et les interrupteurs se ferment alors automatiquement dans un sens avec une temporisation de 10 s jusqu'à retomber sur le défaut. La protection déclenche de nouveau et le dernier interrupteur ouvert est connu. La même procédure s'effectue dans l'autre sens. Le défaut est alors localisé et la réalimentation des clients en radial est possible jusqu'à temps que le défaut soit réparé.



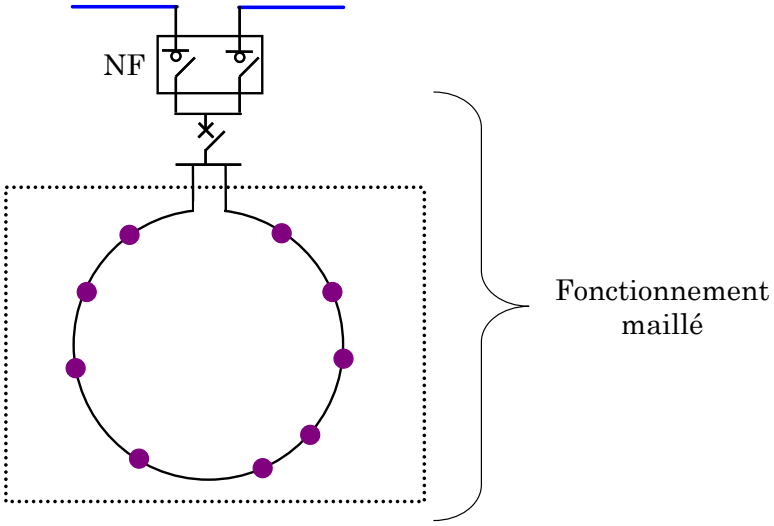


Figure II-20 : Structure générale de la structure hybride

De façon à garantir une égalité des clients vis-à-vis de la continuité de fourniture, nous avons défini des zones de produit PL équivalent comme pour la coupure d'artère. La Figure II-21 illustre les zones de PL équivalent : les départs d'une même artère d'une part et toutes les boucles d'autre part.

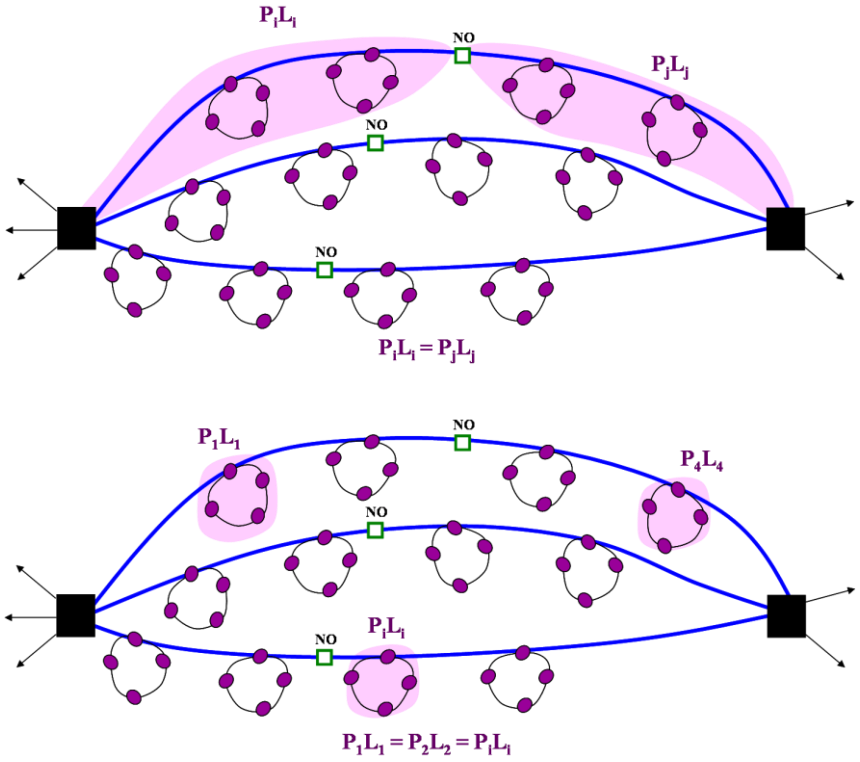


Figure II-21 : Zones PL équivalent pour la structure hybride

Calcul des indices de fiabilité (SAIDI, SAIFI et END)

Les boucles fonctionnement en maillé et les artères principales en radial. Ainsi pour chaque artère, deux types de défaut sont envisagés : un défaut sur une artère principale et un défaut dans une boucle. Pour calculer un indice de fiabilité IND (représentant le SAIDI, SAIFI ou END), on aura donc : $IND = \sum_{j=1}^{n} IND_{départ_j}$, n = nombre de départs du réseau avec $IND_{départ_j} = IND_{dft_artère_j} + IND_{dft_boucles_i}$, pour j = 1, …, n et i = 1, …, nombre de boucles.

Si un défaut se produit sur une artère principale alors, de la même façon que pour la coupure d'artère, les organes de coupure télécommandés sont manœuvrés en un temps variant de 3 à 5 min.

Si un défaut se produit dans une boucle alors les automatismes présents font que tous les clients sont réalimentés en un temps qui dépend du temps de l'automatisme et du nombre de clients raccordés à la boucle.

Le SAIDI, SAIFI et l'END du départ i sont définis par les formules (II-4), (II-5) et (II-6).

$$SAIDI_{boucle}(i) = \frac{\sum_{j=1}^{nb_boucles} \tau \times T_m \times L_{boucle}(j) \times N_{boucle}(j) \times NT_{boucle}(j)}{N_{départ}(i)} \quad \text{(II-4)}$$

$$SAIFI_{boucle}(i) = \frac{\sum_{j=1}^{nb_boucles} \tau \times L_{boucle}(j) \times N_{boucle}(j)}{N_{départ}(i)} \quad \text{(II-5)}$$

$$END_{boucle}(i) = \sum_{j=1}^{nb_boucles} \tau \times L_{boucle}(j) \times P_{boucle}(j) \times NT_{boucle}(j) \times T_m \quad \text{(II-6)}$$

Avec :

- τ = Taux de défaillance d'un conducteur souterrain,
- T_m = Temps des automatismes,
- $L_{boucle}(j)$ = Longueur de conducteur de la boucle j,
- $N_{boucle}(j)$ = Nombre de clients de la boucle j,
- $NT_{boucle}(j)$ = Nombre de postes HTA/BT de la boucle j,
- $N_{départ}$ = Nombre de clients du départ i
- $P_{boucle}(j)$ = Puissance de la boucle j,

II.4. Conclusions

Ainsi, l'introduction de production décentralisée dans le réseau de distribution provoque de nombreuses modifications du comportement du réseau. Tout d'abord, les transits de puissance, le plan de tension et les courants de court-circuit sont modifiés. Ces modifications peuvent être bénéfiques pour le réseau mais également préjudiciables (augmentation des tensions et des courants de court-circuit). De plus, les GED peuvent également modifier le comportement du système de protection et amener à des situations d'aveuglement ou de déclenchement intempestif. Enfin les méthodes actuelles de planification pourraient atteindre leur limite si une introduction massive de GED se produisait. Il est donc nécessaire de prendre

en compte le critère lié à l'introduction de GED dans une optique de planification long terme des réseaux de distribution.

Dans cette optique, nous proposons une nouvelle architecture, la structure hybride, résultant d'une hybridation entre la maille et la coupure d'artère. Cette architecture dont les artères principales fonctionnent de manière radiale, permet un fonctionnement bouclé au niveau des boucles. Des protections décentralisées situées dans chaque boucle permettent ainsi aux clients d'être rapidement réalimentés en cas de défaut.

Les travaux qui suivent vont donc consister à construire ce nouveau réseau et à le comparer avec le réseau obtenu via la planification traditionnelle en termes de qualité et de continuité de fourniture, en termes de coût et enfin en termes d'insertion de production décentralisée grâce à l'algorithme reposant sur la méthode de Monte Carlo. Dans un premier temps, le chapitre III modélisera le problème de construction d'architecture et présentera ensuite les méthodes combinatoires que nous pourrons appliquer.

Chapitre III

« Va toujours par le chemin le plus court, et le plus court est le chemin tracé par la nature. »

M. Aurèle

Chapitre III

Méthodes combinatoires appliquées à la planification

Dans le chapitre I, le principe de planification, son rôle et ses objectifs ont été présentés. Le choix de la section d'un câble pour le raccordement d'un client HTA, le choix entre le renouvellement et la maintenance d'un ouvrage ou encore la décision de boucler ou non deux départs sont des exemples d'études du planificateur. Nous avons vu au chapitre II que l'insertion massive de production décentralisée vient remettre en cause le mode de planification actuel. C'est pourquoi le but des travaux consiste à trouver de nouvelles architectures de réseau de distribution afin d'augmenter le taux d'insertion de GED, de garantir une qualité et une continuité de fourniture ainsi qu'une égalité de traitement des clients et de minimiser le coût global du réseau. Pour cela, nous allons avoir recours à des méthodes décisionnelles pour construire le réseau cible respectant les objectifs et contraintes mentionnés ci-dessus.

Ce chapitre est ainsi divisé en trois parties principales. Dans une première partie, les différents objectifs et contraintes du problème que l'on souhaite résoudre seront identifiés afin de pouvoir être formalisés. Ensuite, une analogie avec des problèmes de tournées de véhicules (par exemple le ramassage d'ordure) permettra de donner les premières pistes de résolution du problème. Enfin, la dernière partie présentera les outils mathématiques de base retenus qui serviront dans les algorithmes de résolution présentés dans le chapitre IV.

III.1. Formalisation pour la recherche d'architectures cibles

III.1.1. **Modélisation idéale**

La Figure III-1 donne une illustration du problème que l'on cherche à résoudre en présentant les différents objectifs et contraintes.

- *Fonction objectif*

La fonction objectif de l'algorithme doit contenir un critère qui traduit la volonté de créer des architectures acceptant un maximum de GED. Ensuite, les architectures doivent aussi garantir une qualité et une continuité de fourniture. Les indices de fiabilité définis au chapitre I permettent d'évaluer ce paramètre. Il s'agit :

- du SAIDI : temps moyen de coupure par an et par client,
- du SAIFI : fréquence moyenne de coupure par an et par client,
- de l'END : Energie Non Distribuée par an,
- des zones de produit PL équivalent : pour une zone donnée, produit de la puissance totale consommée par les clients par la longueur totale de l'artère qui alimente les clients. Cette grandeur traduit une puissance non desservie au travers d'un taux de défaillance linéique des conducteurs et de la puissance alimentée.

Enfin, le coût global de ces architectures cibles doit être minimisé. Ce coût comprend :

- les investissements initiaux (achat des conducteurs, des appareils de protection, pose du matériel entre autres),
- le coût d'exploitation du réseau (principalement les pertes dans le réseau),
- le coût de la défaillance c'est-à-dire le coût de l'énergie non distribuée,
- le coût d'exploitation des GED.

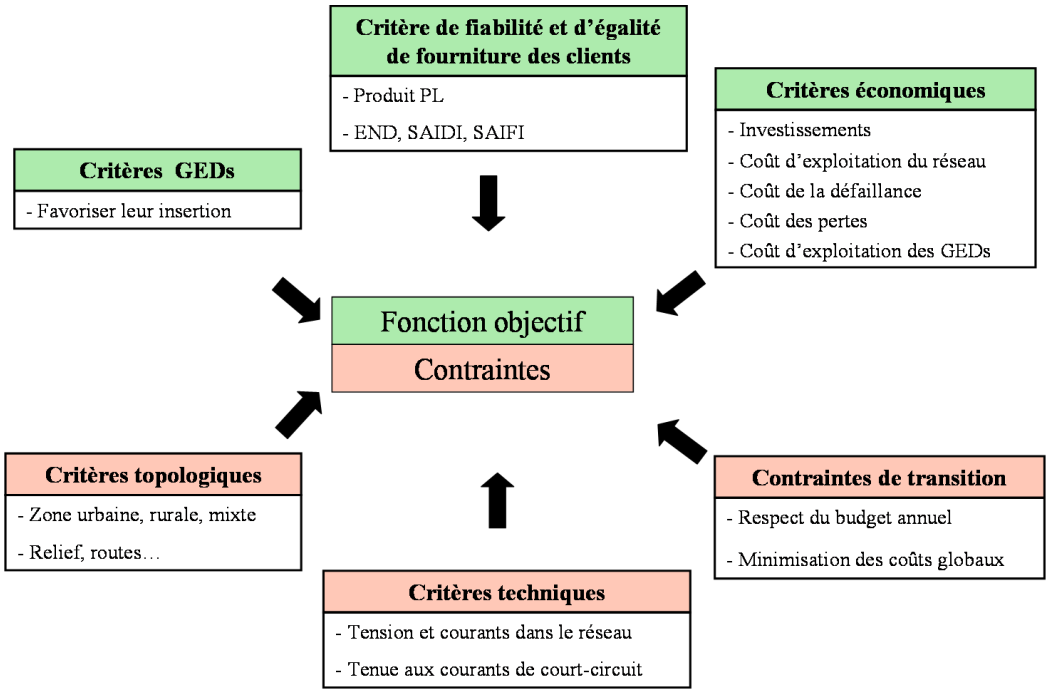


Figure III-1 : Modélisation du problème

- *Contraintes*

Cette optimisation doit respecter un ensemble de contraintes topologiques c'est-à-dire prendre en compte les éléments extérieurs existants comme les constructions, les routes, le relief, les parcs naturels entre autres. Des contraintes de densité de charges changent également la manière de planifier. Le réseau n'est pas soumis aux mêmes contraintes techniques (courant, tension, entre autres) s'il est dans une zone urbaine ou rurale (cf § I.1.4). Enfin, la mutation des réseaux existants vers ces réseaux cibles doit être réalisée à coût minimal tout en respectant les budgets fixés (pour la transition et le fonctionnement annuel).

- *Hypothèses*

Deux stratégies se présentent pour mettre en place ces réseaux cibles. On pourrait construire petit à petit le réseau en déterminant les modifications à faire en fonction des besoins pour un horizon temporel « court ». On pourrait ainsi par exemple garantir chaque année des architectures fiables et à moindre coût. En revanche, la cible finale à 30 ans ne serait pas maîtrisée. Par ailleurs, si une arrivée massive de GED se produisait alors les investissements nécessaires pour respecter les contraintes techniques du réseau risquerait d'être très importants. Au final, l'évolution de ce réseau pourrait être très coûteuse.

La seconde possibilité consiste à repenser totalement les architectures en se projetant dans le futur grâce à un jeu d'hypothèses cohérentes (sur la consommation, production entre

autres). Ainsi, si l'objectif est d'obtenir des réseaux robustes à l'insertion de production décentralisée alors une hypothèse cohérente serait d'avoir recours à des architectures bouclées car c'est un paramètre favorable à l'insertion de GED (voir chapitre II). L'idée est de ne conserver des réseaux existants que l'emplacement des charges modélisées par les postes HTA/BT ainsi que les postes sources HTB/HTA. L'algorithme à mettre en place doit donc trouver et dimensionner l'ensemble des conducteurs, c'est-à-dire la façon de relier les charges entre elles et avec les postes sources. On obtiendrait alors des réseaux cibles à plus de 30 ans répondant aux différents objectifs et contraintes. En revanche, la faisabilité de la mutation d'une partie des réseaux existants (les conducteurs les plus récents) vers ces réseaux cibles serait à étudier également.

Dans ces travaux de thèse, nous avons opté pour la seconde méthode. Etant donnés les objectifs et contraintes que nous avons cités précédemment, il nous a semblé plus judicieux de construire un réseau cible répondant aux objectifs puis de trouver la trajectoire optimale pour l'atteindre.

III.1.2. **Problèmes posés**

Tous les éléments de la fonction objectif ne peuvent pas être pris en compte directement dans l'algorithme. En effet, les incertitudes face à la quantité de production décentralisée et à sa localisation rendent la prise en compte de ce paramètre complexe dans la fonction objectif. Il serait envisageable de faire des études stochastiques en introduisant des densités de probabilités pour modéliser les GED et les charges. Nous n'avons pas choisi d'adopter cette démarche déjà étudié dans d'autres travaux de thèse [SOR 2008].

Ensuite, nous ne tiendrons pas compte des contraintes liées au relief et aux routes et constructions existantes. En effet, ce paramètre n'est pas primordial pour le choix de la méthode. Pour le prendre en compte, il suffirait de créer une liste de *lignes interdites* (ou d'exception) que l'on ne peut pas déconstruire voire même de *zones interdites* et de les intégrer à l'algorithme. Les études ont été réalisées sur des données réelles d'implantation de charges.

Enfin, comme on ne conserve du réseau existant que l'emplacement des postes HTA/BT et des postes source HTB/HTA, on choisit de reconstruire un nouveau réseau totalement indépendant du réseau existant. L'algorithme proposé ne produira pas les étapes de transition qui seront respectées dans un second temps au cours de la phase de recherche de trajectoire optimale. Un second algorithme pourra permettre, une fois le réseau cible trouvé, de mettre en place le planning temporel des investissements optimaux de façon à faire évoluer

progressivement le réseau initial tout en respectant les contraintes techniques et en minimisant l'ensemble des coûts du réseau.

III.1.3. **Méthodologie proposée**

- *Principe général*

Nous avons mis en évidence, au chapitre II, l'intérêt du bouclage des réseaux de distribution sur l'augmentation du taux d'insertion de productions décentralisées. Nous avons proposé à la fin de ce même chapitre une nouvelle architecture pouvant être exploitée partiellement en bouclé comme solution pour augmenter la capacité d'accueil de GED dans le réseau de distribution. Pour réaliser cet objectif, nous proposons un algorithme en deux étapes. La première étape consiste à construire une architecture respectant des critères économiques et de fiabilité. Cette architecture doit permettre un fonctionnement maillé afin de prendre en compte le critère de capacité d'insertion de GED. Le critère considéré étant le critère PL qui est un critère simplifié par rapport aux objectifs, il est nécessaire de vérifier que les objectifs sont bel et bien vérifiés. Ainsi, la seconde étape consiste à vérifier quantitativement le taux d'insertion maximal de GED ainsi que les indices de fiabilité (SAIDI, SAIFI, END) et le coût global de l'architecture définis au paragraphe III.2.I. Par ailleurs, nous nous intéresserons aux réseaux de types urbains et urbains mixtes.

De façon à pouvoir comparer l'architecture mise en place avec une architecture qui serait déterminée avec les règles de planification usuelles, nous construirons également un réseau en coupure d'artère (cf Chapitre I) car c'est le réseau typique urbain français et promu comme tel dans les schémas directeurs des planificateurs.

- *Critère à réduire : le produit PL*

Nous avons choisi, dans ces travaux, de privilégier l'équité des clients par rapport à la fourniture d'énergie ce qui se traduit par le critère PL identique pour chaque portion de réseau délimitée entre deux organes de coupure tout minimisant le plus possible la longueur totale de conducteurs. Cette méthode permet de définir des zones à haute continuité de fourniture. D'autres paramètres pourraient aussi être optimisés comme la longueur totale de conducteur qui possède un impact sur le coût d'investissement et la qualité générale du réseau, les pertes dans le réseau qui possèdent un impact sur le coût d'exploitation ou encore les critères de fiabilité (SAIDI, SAIFI, END). Le problème est que ces différents paramètres peuvent être contradictoires. En effet, l'équilibrage des PL de chaque départ tend à augmenter la longueur

des conducteurs (cf exemple illustratif en Annexe 2). En effet, si on met l'accent sur la fiabilité alors il faut augmenter la redondance des chemins pour créer des voies de secours en cas de défaut donc la longueur des conducteurs pour l'ensemble des départs est aussi pénalisée. On pourrait envisager des fonctions multi-objectif pour trouver un compromis entre tous ces paramètres. Néanmoins, ceci ne fait pas l'objet des travaux présentés dans ce mémoire.

Dans le cas de la coupure d'artère comme dans celui des boucles hybrides, le but est donc de minimiser le critère E défini par la formule (III-1) dans le but d'obtenir des zones de PL équivalent. Cet équilibrage de produit PL doit être fait tout en minimisant la longueur totale de conducteur L.

$$E = \frac{\sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}(PL(i) - \overline{PL})^2}{n}}}{\overline{PL}} \times 100 \qquad \text{(III-1)}$$

Avec :

- E = Ecart type des PL par rapport à la moyenne (%),
- n = Nombre de zones
- PL(i) = Produit PL de la zone i (MVA.km),

La Figure III-2 résume l'architecture générale de l'algorithme qui sera mise en place dans le Chapitre IV. L'algorithme développé permettra de construire un réseau en coupure d'artère et des boucles hybrides à partir de la connaissance des postes de distribution publique HTA/BT et des postes sources HTB/HTA. Ces réseaux respecteront le critère d'équilibrage des PL et minimiseront les longueurs de conducteurs utilisés. Ensuite, l'outil d'évaluation permettra de comparer ces deux architectures en termes de taux d'insertion de GED et de fiabilité (SAIDI, SAIFI, END).

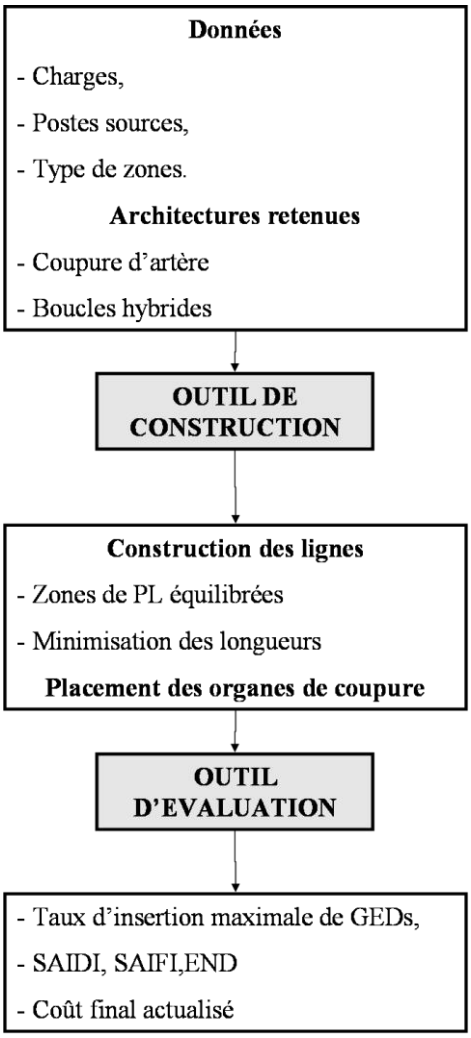


Figure III-2 : Outil de planification long terme

III.2. Outil de construction d'architecture

Nous avons vu dans la partie précédente que l'outil de construction d'architecture doit minimiser l'écart type des produits PL par rapport à la moyenne des PL tout en minimisant les longueurs de conducteur utilisées. Dans cette partie, nous allons identifier la construction des deux architectures cibles comme des problèmes de tournées. Ensuite, nous passerons en revue les différentes méthodes existantes pour résoudre ces types de problèmes. Enfin, nous nous inspirerons de ces méthodes pour mettre en place notre méthodologie de construction d'architectures.

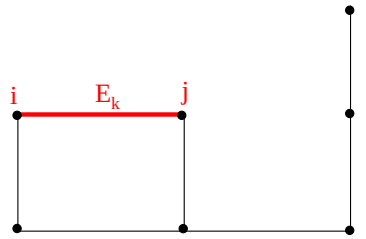
III.2.1. **Définitions générales de la théorie des graphes [GON 2009]**

Les architectures de réseau sont assimilables à des graphes où les consommateurs HTA/BT et les postes sources HTB/HTA sont représentés par des sommets et les conducteurs

par des arcs. C'est pourquoi il est nécessaire de fournir quelques définitions préalables dont nous nous servirons dans les parties et chapitres qui suivent.

- *Graphe*

Un graphe G = (V, E) non orienté est défini par l'ensemble fini $V = \{V_1, \ldots, V_n\}$ (sommets ou nœuds) et par l'ensemble fini $E = \{E_1, \ldots, E_m\}$ (arêtes). On note |V| =n le nombre de sommets du graphe et |E| =m le nombre d'arêtes du graphe. Pour $1 \leq i, j \leq n$, on note $E_k = (i\text{-}j)$ la $k^{ième}$ arête du graphe dont les extrémités sont i et j. La Figure III-3 donne un exemple de graphe composé de 7 nœuds et 7 arêtes dans lequel l'arête E_k est mise en exergue.



-i et j sont des sommets du graphe

- E_k = (i-j) est une arête du graphe

Figure III-3 : Exemple de graphe

- *Degré*

Soit G = (V, E) un graphe non orienté. Soit x un sommet du graphe. On définit le degré de x comme étant le nombre d'arêtes incidentes à x. Dans l'exemple de la Figure III-4, le degré de x est de 3.

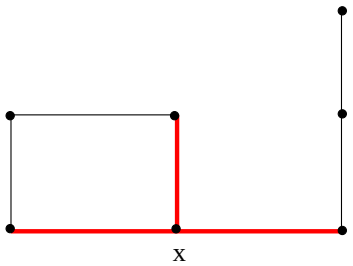


Figure III-4 : Illustration du degré du nœud x

- *Chaîne et cycle*

Soit G = (V, E) un graphe non orienté. Soit x et y deux sommets du graphe G. On appelle chaîne de x à y une séquence d'arêtes ($e_{1s}, \ldots, e_{mr}$) telle que :

- x soit un sommet incident de e_{ls},
- y soit un sommet incident de e_{mr},
- chaque arc e_{ij} pour $2 \leq i,j \leq n-1$ de la séquence ait une extrémité commune avec l'arc précédent et l'autre extrémité commune avec l'arc suivant.

Il peut exister plusieurs chaînes différentes de x à y.

Soit x un sommet de G, un chemin de x à x est un cycle. La Figure III-5 montre un exemple de chaîne et de cycle.

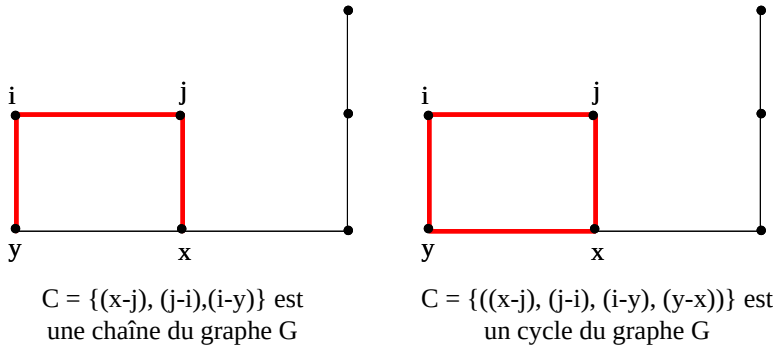


Figure III-5 : Illustration d'une chaîne et d'un cycle

- *Connexité*

Un graphe G = (V, E) est connexe si pour tous sommets (x, y) de X, il existe une chaîne de x à y. La Figure III-6 montre un exemple de graphe connexe et non connexe.

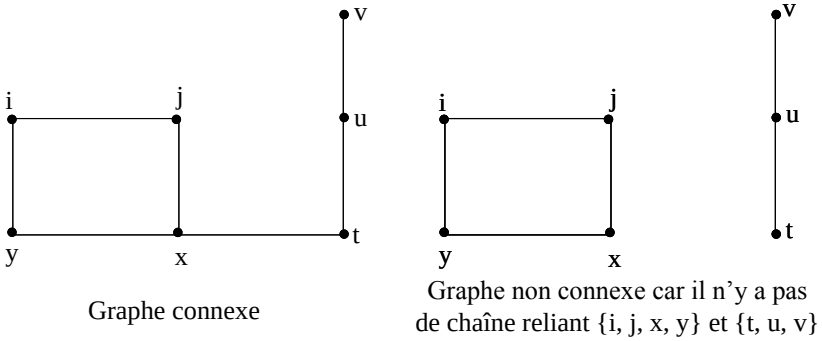


Figure III-6 : Illustration de la connexité

- *Arbre*

On définit un arbre comme étant un graphe connexe sans cycle. La Figure III-7 donne l'exemple d'un arbre du graphe connexe de la Figure III-3.

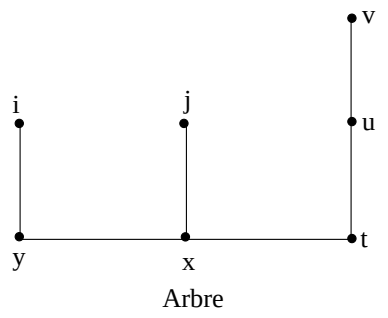


Figure III-7 : Illustration d'un arbre

III.2.2. **Les problèmes de tournées**

- *Définition*

Les problèmes de tournées classiques correspondent au problème du voyageur de commerce connu sous le nom de TSP (Travelling Salesman Problem) et au problème de tournée de véhicules connu sous le nom de VRP (Vehicle Routing Problem) [TOT 2001]. Le problème du voyageur de commerce consiste à trouver la tournée de coût minimal passant par tous les sommets (villes) du graphe. Le coût étant une grandeur associée aux arcs (par exemple la longueur des arcs). On peut ajouter à ce problème des contraintes de consommation (chaque nœud a une demande) et de capacité (chaque arc a un transit limité qui est inférieur à la consommation totale des clients). Il peut donc être nécessaire de faire plusieurs tournées (en utilisant des arcs différents) pour satisfaire la demande, respecter les contraintes de flot maximal tout en minimisant la contrainte de coût. Ce problème est le problème de tournée de véhicules. La Figure III-8 illustre ces deux classes de problèmes.

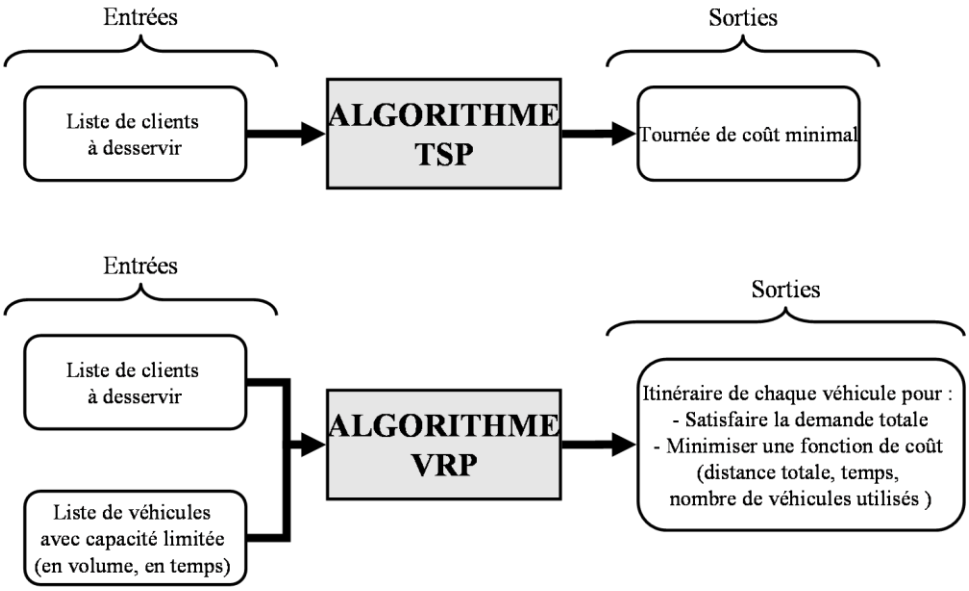


Figure III-8 : Problème du voyageur de commerce et de tournée de véhicules

Pour des problèmes de tournées, il n'existe pas d'algorithme capable de les résoudre exactement en un temps raisonnable (polynomial). Seuls des algorithmes approximatifs permettent d'obtenir de bonnes solutions mais qui ne seront pas forcément optimales [TOT 2001] et [SCH 2002]. Il existe donc de nombreuses variantes pour résoudre le problème de tournée de véhicule. Plusieurs fonctions objectifs sont possibles (minimiser le nombre de véhicules, minimiser la durée totale des tournées, minimiser la longueur totale des tournées entre autres). Par ailleurs, on peut ajouter des contraintes liées à la gestion des stocks, par exemple, ou encore une notion d'incertitude par rapport à la demande.

- *Méthodes de résolution existantes*

Tournée de véhicules

De nombreuses heuristiques existent pour tenter de résoudre le problème de tournée de véhicules. On peut regrouper celles-ci en deux classes : les heuristiques classiques développées principalement entre 1960 et 1990 et les métaheuristiques qui se sont développées ces dernières années. Le lecteur pourra trouver de plus amples informations sur les différentes méthodes dans la référence [TOT 2001].

Les heuristiques classiques sont des méthodes de recherche locale c'est-à-dire qui ne cherchent pas dans tout l'espace des solutions. Elles permettent d'obtenir de bonnes solutions en un temps raisonnable et sont facilement adaptables à de nombreux problèmes de la vie courante. Il existe trois catégories d'heuristiques pour la résolution du VRP [TOT 2001]. Tout d'abord, les heuristiques constructives (méthode de Clark et Wright [CLA 1964], Christofides, Mingozzi et Toth [CHR 1979] entre autres) construisent une solution faisable tout en gardant un œil sur le coût de la solution. Ensuite, les heuristiques à deux étapes (l'algorithme *sweep* [GIL 1974], méthode de Fisher et Jaikumar [FIS 1981] entre autres) décomposent le problème en deux parties. Dans un premier temps, chaque nœud est affecté à un véhicule puis dans un second temps, les différentes routes sont construites. Des méthodes d'échange local peuvent être utilisées pour améliorer la solution. Selon les algorithmes proposés, les méthodes utilisées pour affecter les nœuds aux véhicules et pour construire les routes sont différentes. Il existe également la méthode inverse qui consiste d'abord à construire une seule route puis à la segmenter en plusieurs routes ([BEA 1983]). Enfin, les méthodes d'amélioration essaient d'améliorer n'importe quelle solution possible en faisant des échanges de nœuds ou d'arêtes (croisement, échange ou réaffectation).

Les métaheuristiques consistent à explorer l'espace des solutions de façon à identifier les meilleures. Ces méthodes autorisent des solutions moins bonnes voire fausses de façon à pouvoir éviter de se faire piéger dans un minimum local. Elles combinent des règles sophistiquées de recherche de voisinage, de mémoire et de recombinaisons de solutions et ont parfois recours aux méthodes heuristiques expliquées précédemment. Plusieurs métaheuristiques sont applicables [TOT 2001] : recuit simulé [ROB 1990], recuit déterministe [DUE 1990], recherche avec tabou [WIL 1989], algorithmes génétiques [HOL 1975], colonies de fourmis [KAW 1998] et réseaux de neurones [GHA 1991].

Les solutions obtenues sont meilleures qu'avec l'autre classe de méthodes mais le temps de calcul est beaucoup plus important. Dans la référence [TOT 2001], les algorithmes sont testés sur plusieurs exemples différents. Les méthodes heuristiques n'excèdent pas plus de 150s de durée de calcul en général tandis que les métaheuristiques prennent fréquemment plusieurs centaines de secondes voire plusieurs milliers. Par ailleurs, ces méthodes nécessitent des réglages fins de nombreux paramètres qui dépendent du problème étudié. Elles sont donc difficilement généralisables.

Voyageur de commerce

Il existe également de nombreuses méthodes de résolution du problème du voyageur de commerce. Toutes les méthodes heuristiques et métaheuristiques peuvent être appliquées ou encore des algorithmes de type gloutons [ENA 2007]. Les solutions obtenues seront différentes selon l'algorithme utilisé et le temps de calcul également. Un algorithme très connu est celui de Christofides [SCH 2002]. Non seulement, il permet de résoudre le problème du voyageur de commerce en un temps très bon par rapport à toutes les autres méthodes existantes mais, en plus, c'est le seul algorithme qui garantisse que la solution obtenue est au pire loin de la solution optimale de 50% [SCH 2002].

III.2.3. **Application à la construction de réseau**

La différence entre notre problème et celui de tournées classiques est que la fonction objectif est une fonction multicritères non linéaire. Il s'agit, en effet, d'équilibrer le produit PL (critère non linéaire) tout en minimisant la longueur totale.

Les heuristiques constructives ou à deux étapes citées précédemment ne sont donc pas applicables car il est impossible d'affecter un coût à une arête qui prenne en compte le critère PL total car ce n'est pas un critère linéaire. Ensuite, les algorithmes métaheuristiques nécessitent des réglages de paramètres très fins. Etant donnée la répartition des charges du

réseau qui peut être vraiment très diverse, cela nécessiterait un réglage dédié à chaque cas. En revanche, une méthode d'amélioration semble bien adaptée. En partant d'une solution initiale (si possible favorable à l'un des deux critères), les artères (ou boucles) échangent des points (des charges) de façon à minimiser les critères E et L. Dans les deux cas, il faudra tracer soit des boucles soit des artères tout en minimisant la longueur, ce qui correspond à différentes variantes du problème du voyageur de commerce. La Figure III-9 illustre la méthode d'amélioration que nous utiliserons dans la construction de la coupure d'artère et des boucles hybrides. Dans le cas des boucles hybrides, les artères permettant la connexion des boucles aux postes sources seront construites une fois le produit PL des boucles équilibré. C'est pour cela que nous n'avons pas représenté ces artères sur la figure.

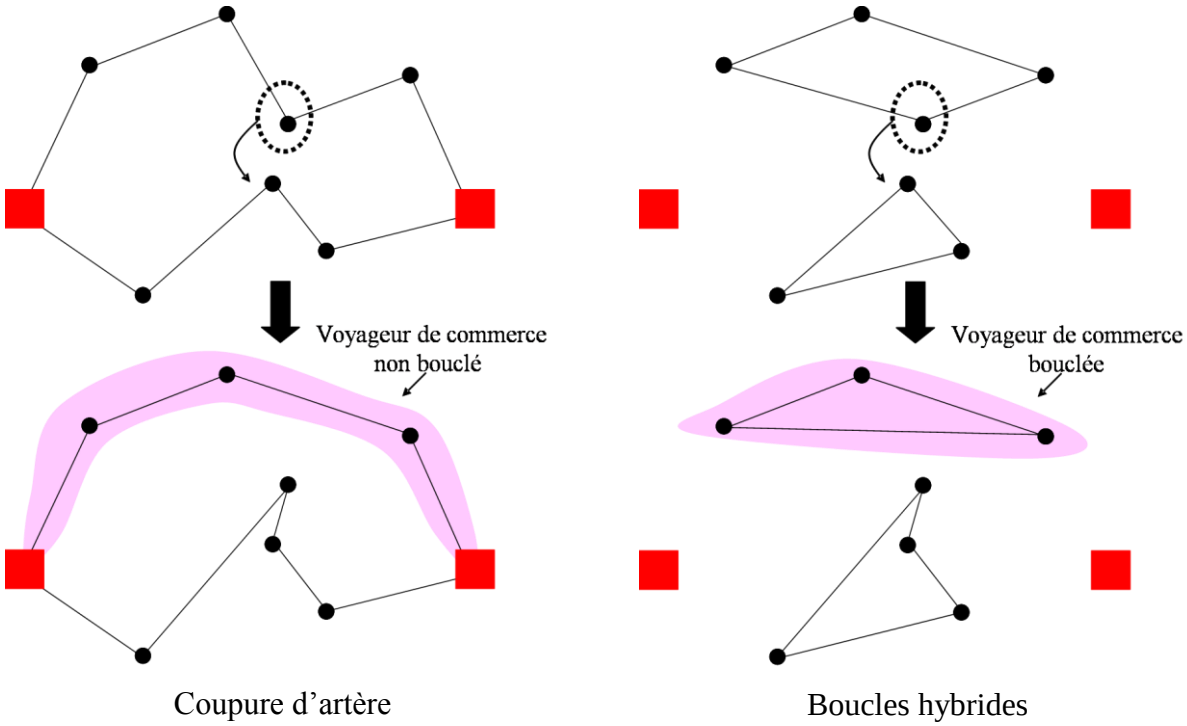


Figure III-9 : Méthode d'amélioration utilisée dans notre problème

III.3. Algorithmes retenus pour la résolution du problème du voyageur de commerce

III.3.1. **Voyageur de commerce bouclé**

Soit $V=\{V_1,\ldots, V_n\}$ un ensemble de n points d'un plan avec les distances euclidiennes. On cherche à relier ces points par une boucle de longueur minimale. Pour résoudre le problème du voyageur de commerce cité dans le paragraphe I.3.2, nous avons choisi l'algorithme de

Christofides [SCH 2002] pour les raisons expliquées dans le paragraphe III.3.3. La Figure III-10 présente son déroulement. Nous allons détailler les différentes étapes de cet algorithme en prenant un exemple de 10 points.

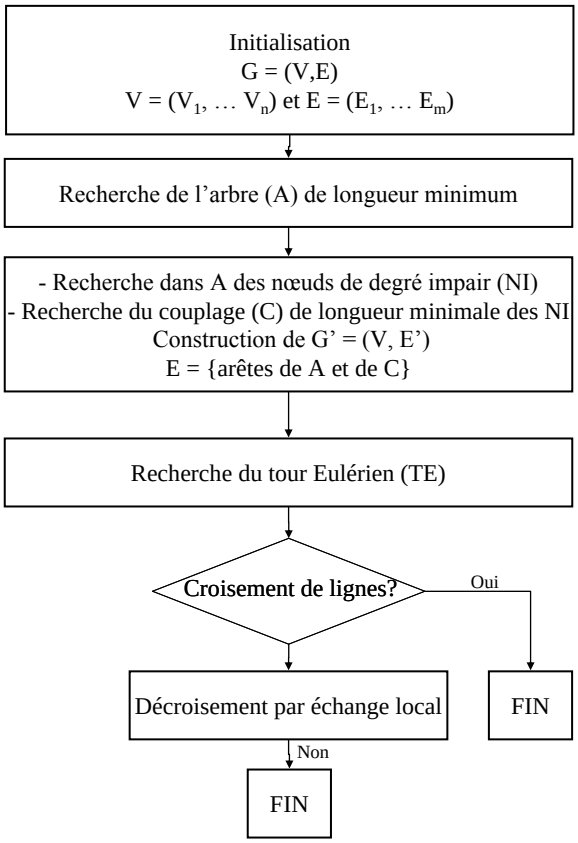


Figure III-10 : Algorithme de Christofides appliqué au voyageur de commerce

- *Etape 1 : Recherche de l'arbre de longueur minimum (A)*

La première étape consiste à cherche l'arbre de longueur minimale c'est-à-dire l'ensemble $E_A = \{Ea_1, \ldots, Ea_{n-1}\}$ tel que le graphe non orienté $G_A = (V,E_A)$ soit radial et $\sum_{i=1}^{n-1} Ea_i$ soit minimale. Pour cela, les algorithmes de Kruskal ou de PRIM permettent de trouver l'arbre de poids minimum [SAK-1 1984]. La Figure III-11 donne l'arbre de longueur minimale obtenu pour un exemple de 10 nœuds.

- *Etape 2 : Création du graphe G' = (V,E') ou E' = {arêtes de A et de C}*

Dans la Figure III-11, les 4 nœuds en rouge sont de degré impair : trois d'entre eux ont une arête incidente et un autre trois arêtes incidentes. Le but de cette étape est d'obtenir un graphe connexe dont tous les nœuds soient de degré pair (graphe eulérien). Les nœuds de

degré impair sont alors couplés entre eux. Ainsi leur degré augmente de 1 et devient pair (Figure III-12).

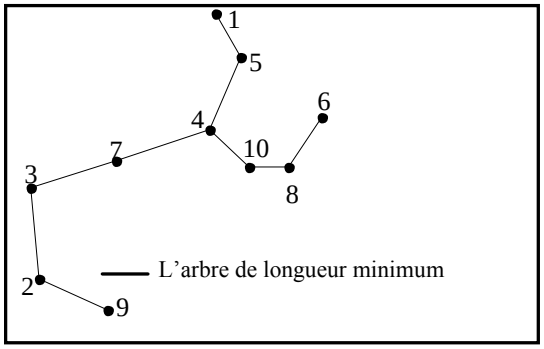


Figure III-11 : Arbre de longueur minimale

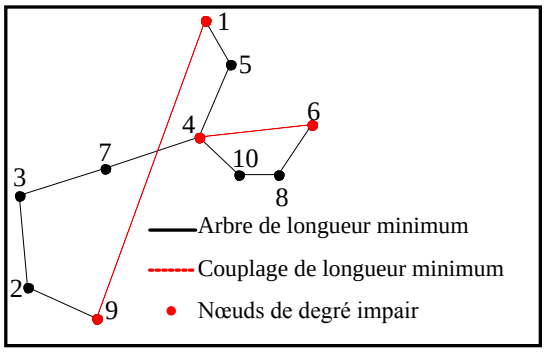


Figure III-12 : Graphe eulérien

Il existe plusieurs algorithmes performants qui permettent de trouver le couplage de longueur minimale entre des nœuds donnés (par exemple la méthode hongroise [SCH 2002]). Etant donné qu'à la fin de l'algorithme nous utiliserons une heuristique d'amélioration (détecter des croisements éventuels et les décroiser), on se contentera de chercher un couplage sous-optimal et regrouper successivement les points les plus proches entre eux.

- *Etape 3 : recherche du tour eulérien*

Un tour eulérien est une séquence d'arêtes du graphe telle que :

– chaque arête de la séquence ait une extrémité en commun avec l'arête précédente et l'autre extrémité en commun avec l'arête suivante ;
– la première et la dernière arête de la séquence aient une extrémité en commun ;
– la même arête ne figure pas deux fois dans la séquence ;
– chaque nœud du graphe apparaît au moins une fois.

Le tour eulérien obtenu sur la Figure III-13 est T_{Eul}:

$$T_{Eul} = \{(1\text{-}5), (5\text{-}4), (4\text{-}10), (10\text{-}8), (8\text{-}6), (6\text{-}4), (4\text{-}7), (7\text{-}3), (3\text{-}2), (2\text{-}9), (9\text{-}1)\}.$$

Etant donné qu'au final on cherche un cycle, il ne faut pas qu'il y ait de répétition de nœuds car chaque noeud doit ne doit avoir que deux arêtes incidentes. Dans cet exemple, le nœud 4 possède 4 arêtes incidentes.

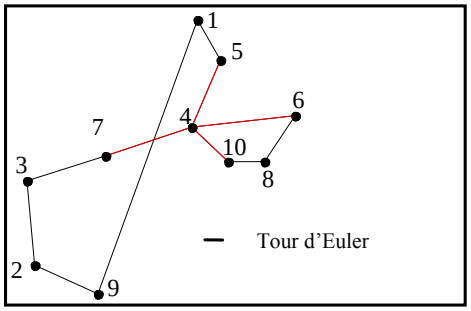


Figure III-13 : Tour eulérien

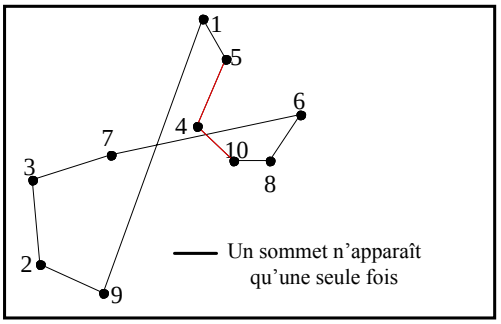


Figure III-14 : Tour obtenu

Un nouveau tour T obtenu est illustré dans la Figure III-14 :

T = {(1-5), (5-4), (4-10), (10-8), (8-6), (6-7), (7-3), (3-2), (2-9), (9-1)}.

Si le tour obtenu possède des croisements alors, nécessairement, la longueur n'est pas optimale. La Figure III-15 illustre le cas d'un croisement sur un chemin. Intuitivement, on voit que dans un espace euclidien, si le poids affecté aux arêtes est la longueur de celles-ci alors un croisement n'est jamais optimal. La solution obtenue en décroisant est forcément meilleure mais pas nécessairement optimale. Après le traitement de ces croisements, on obtient le tour de la Figure III-16.

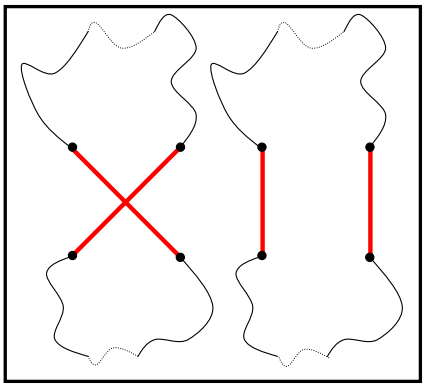


Figure III-15 : Non optimalité des croisements

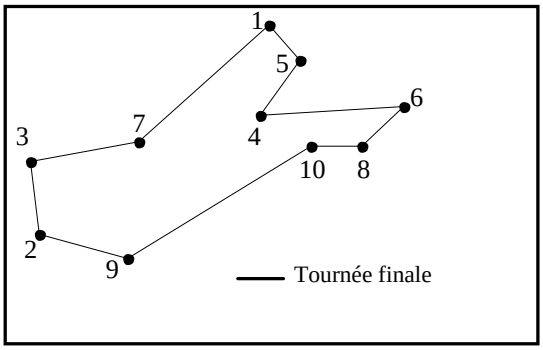


Figure III-16 : Tour final

L'intérêt de l'algorithme de Christofides est dans sa vitesse d'exécution. De plus, on a la garantie que l'erreur relative de la solution approchée ne peut pas dépasser 50%, c'est-à-dire $C_{Chr} \leq 1{,}5C_{opt}$ où C_{Chr} représente le coût de la solution trouvée par l'algorithme de Christofides et C_{opt} le coût de la solution optimale [SCH 2002].

III.3.2. **Voyageur de commerce non bouclé**

Dans le cas de la construction de la coupure d'artère, le but est de construire des artères dont le point de départ et d'arrivée sont connus (ce sont les postes sources). Il ne s'agit donc plus de tracer un tour mais une trajectoire. Un algorithme de type glouton nommé *VC4* dans la référence [SAK-2 1984] nous a semblé adapté car les tests ont montré qu'il était plus

performant que les autres. Il consiste à partir de l'artère constituée du point de départ et du point d'arrivée, puis, d'insérer successivement des sommets selon des critères que nous allons définir. Le principe général de l'algorithme est expliqué dans la Figure III-17.

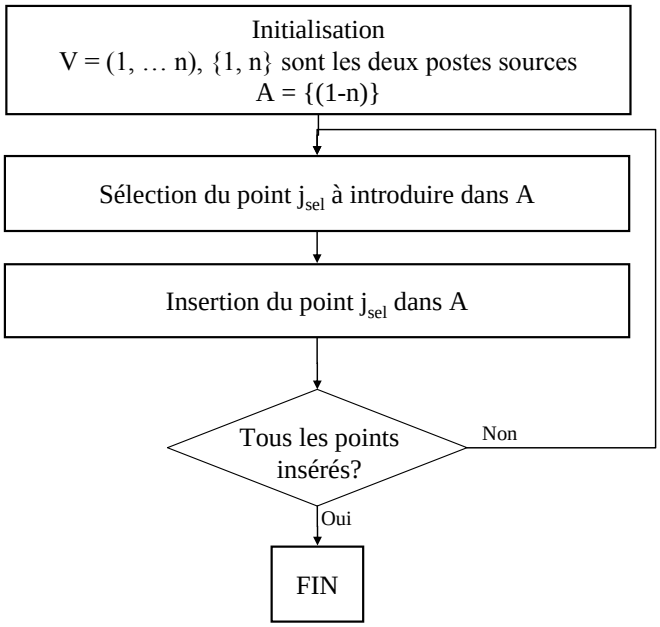


Figure III-17 : Principe général de l'algorithme *VC4*

Soit V = {1, …, n} un ensemble de sommets. Les sommets {1, n} sont les deux sommets représentant les postes sources. On souhaite donc trouver le trajet dont l'extrémité initiale est 1 et l'extrémité finale est n en passant par tous les autres sommets {2, …, n-1}.

- *Etape 0 : Initialisation*

L'artère initiale est celle reliant les deux postes sources c'est-à-dire A = {1, n}.

- *Etape 1 : Sélection du point j à connecter à l'artère A*

- Soit A = {(1-r), (r-s), …, (k-n)} l'artère construite au bout de plusieurs itérations,
- Soit X_Γ l'ensemble des sommets de l'artère A,
- Soit $X_{\Gamma'}$ l'ensemble des sommets restants à construire, $X_{\Gamma'}$ = {2, …, n-1}.

Le point qui sera inséré à A est le point j_{sel} de $X_{\Gamma'}$ vérifiant :

$$\mathrm{Max}_{j\in\Gamma'}(\mathrm{Min}_{i\in X_\Gamma}\{l(ij)\})$$ où l(ij) est la longueur de l'arête (i-j).

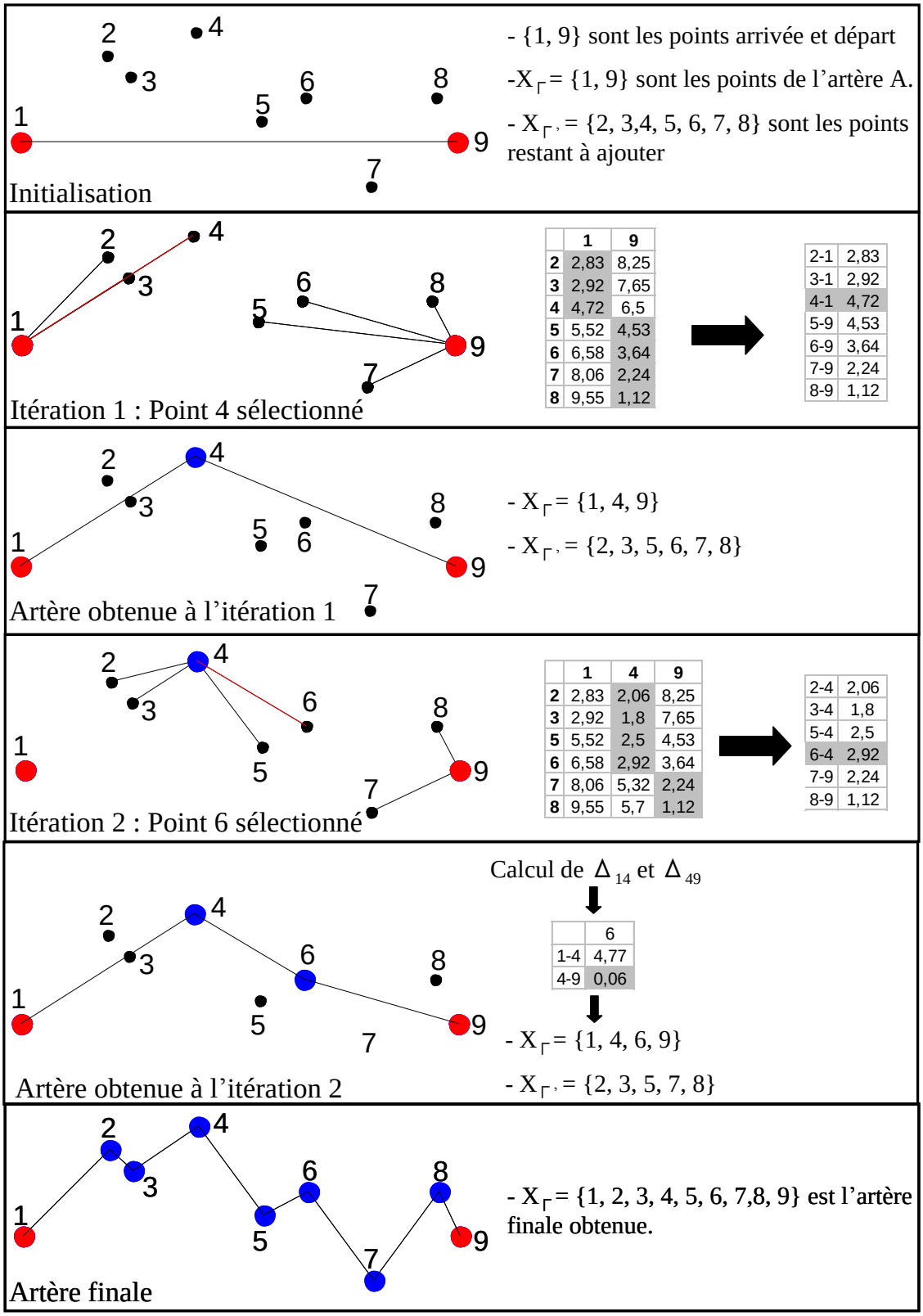
- *Etape 2 : Insertion du point j_{sel} à l'artère A*

- Soit $\Delta_{rs} = l(rj_{sel}) + l(j_{sel}s) - l(rs)$. Δ_{rs} représente la longueur ajoutée si on introduit le point j_{sel} entre le point r et s de X_Γ.

Alors le point j_{sel} sera introduit entre les points r_{sel} et s_{sel} vérifiant :

$$\Delta_{r_{sel}s_{sel}} = \mathrm{Min}_{(r\text{-}s)\in A}\Delta_{rs} \qquad \text{(III-2)}$$

La Figure III-18 illustre le principe de l'algorithme VC4 sur un exemple simple.



	1	9
2	2,83	8,25
3	2,92	7,65
4	4,72	6,5
5	5,52	4,53
6	6,58	3,64
7	8,06	2,24
8	9,55	1,12

2-1	2,83
3-1	2,92
4-1	4,72
5-9	4,53
6-9	3,64
7-9	2,24
8-9	1,12

	1	4	9
2	2,83	2,06	8,25
3	2,92	1,8	7,65
5	5,52	2,5	4,53
6	6,58	2,92	3,64
7	8,06	5,32	2,24
8	9,55	5,7	1,12

2-4	2,06
3-4	1,8
5-4	2,5
6-4	2,92
7-9	2,24
8-9	1,12

	6
1-4	4,77
4-9	0,06

Figure III-18 : Exemple d'application de l'algorithme VC4

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le problème de recherche d'architectures cibles et fait des choix quant à sa mise en œuvre. La méthode retenue consiste à trouver les structures en coupure d'artère (méthode actuelle de planification optimale choisie par ERDF, méthode de référence) et en boucles hybrides qui minimisent le critère de PL (dans le but de garantir une fourniture égale entre les clients) tout en minimisant au mieux la longueur L de conducteur utilisée. D'autres objectifs auraient pu être considérés comme la longueur totale de conducteur uniquement, les pertes ou les indices de fiabilité. Les algorithmes pourront alors être adaptés mais dans les deux cas reposeront sur le principe du voyageur de commerce.

Une fois les architectures construites, il sera alors nécessaire de dimensionner les conducteurs à mettre en place pour respecter les courants admissibles dans les lignes d'une part et pour minimiser le coût global actualisé d'autre part. La fiabilité des architectures trouvées sera évaluée à l'aide du SAIDI (temps moyen de coupure par an et par client), du SAIFI (fréquence moyenne de coupure par an et par client) et de l'END (Energie Non Distribuée par an). Enfin, la détermination du taux maximal d'insertion de GED détaillée dans le chapitre II permettra de comparer les boucles hybrides à la coupure d'artère, architecture qui, suite à de nombreuses années de planification, s'est avérée être la mieux adaptée.

Chapitre IV

« Face au monde qui change, il vaut mieux penser le changement que changer le pansement. »

F. Blanche

Chapitre IV

Mise en œuvre et évaluation des solutions proposées : bouclables contre bouclées

Le but de cette partie est la méthodologie de création des deux architectures cibles, coupure d'artère et boucles hybrides, vues au chapitre II, à partir de la connaissance des postes HTB/HTA et des charges HTA/BT.

Dans une première partie, nous détaillerons le domaine d'étude et les données électriques puis la construction de la coupure d'artère et des boucles hybrides. Les algorithmes seront ensuite, détaillés sur la base des méthodes présentées au chapitre III. Enfin, la dernière partie permettra de comparer ces deux architectures de réseau en termes de fiabilité (SAIDI, SAIFI, END), de taux d'insertion maximal de GED et de coût global de l'architecture (coût des conducteurs, des organes de coupure, coût des pertes et coût de l'énergie non distribuée). Une conclusion générale permettra de déterminer si la solution bouclée est effectivement envisageable comme moyen d'augmenter le taux d'insertion de GED dans le réseau de distribution.

IV.1. Démarche adoptée et données électriques

IV.1.1. **Rappel des objectifs**

Les paramètres d'entrée de l'algorithme de construction d'architectures sont les emplacements des postes HTB/HTA (arrivée de l'énergie électrique du réseau de répartition) et HTA/BT (représentant les charges) définis par leurs coordonnées géographiques (X,Y) et par leurs puissances. Ainsi, la structure des postes sources n'est pas remise en cause dans cette étude. Nous nous intéressons uniquement à l'architecture du réseau HTA.

La coupure d'artère et les boucles hybrides ont été décrites dans les chapitres précédents dans le cas de deux postes sources. Dans le cas de plusieurs postes sources, il s'agira de partitionner le réseau électrique en plusieurs sous-réseaux constitués de 2 postes sources étudiés indépendamment. Pour chaque zone contenant 2 postes sources, on construira les motifs élémentaires souhaités.

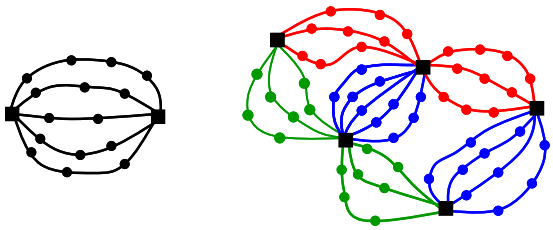
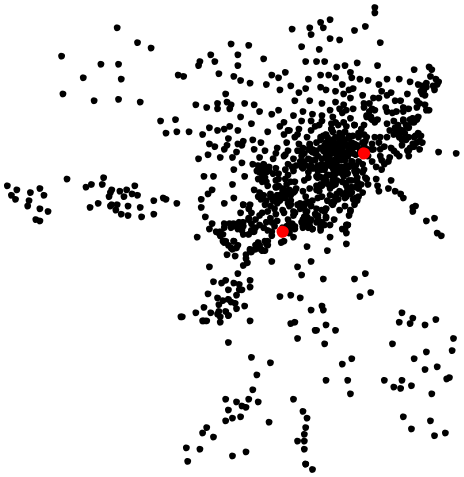


Figure IV-1 : Exemple de reproduction de motif élémentaire dans le cas de plusieurs postes sources

La Figure IV-1 illustre le principe de reproduction de motifs élémentaires dans le cas de la coupure d'artère. Chaque couple de postes source possible est relié selon le motif élémentaire de la coupure d'artère entre deux postes sources.

IV.1.2. **Données électriques**

Pour tester nos algorithmes de construction d'architecture, nous considérerons des données électriques issues d'un réseau réel d'EDF (rendu anonyme) et constitué de 2 postes sources. La Figure IV-2 illustre le réseau test utilisé dans notre étude.



- Type de réseau : urbain
- Nombre de postes HTA/BT : 984
- Nombre de clients : 85 239 (BT et HTA)
- Puissance active totale consommée : 151.4 MW
- Puissance totale réactive consommée : 59.56 MVAr

Figure IV-2: Données électriques pour la construction d'architectures

IV.2. Partitionnement de données

L'algorithme qui gère le partitionnement d'un réseau en zones constituées de deux postes sources est décrit dans le Diagramme IV-1.

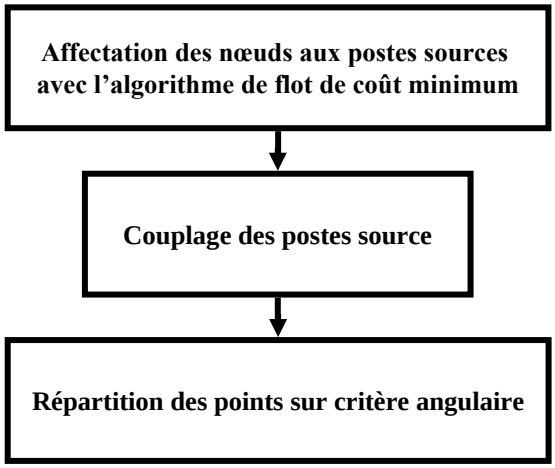


Diagramme IV-1: Algorithme de partitionnement du réseau

La première étape consiste à partitionner le réseau en un nombre de zones égal au nombre de postes sources. Ce partitionnement est effectué grâce à l'algorithme de flot de coût minimal que nous allons définir dans la section IV.1.3. A l'issue de cette première étape, chaque consommateur du réseau est affecté à un seul poste sources comme l'illustre la Figure IV-3.

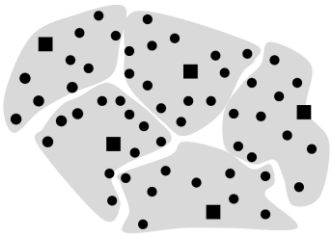
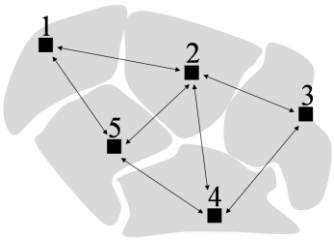


Figure IV-3 : Etape 1 - partitionnement

Ensuite, une seconde étape consiste à déterminer les couples de postes source sur lesquels les motifs élémentaires seront construits. Ainsi pour un poste source donné, on aura une liste de postes sources avec lesquels il formera un motif élémentaire.



Dans cet exemple, il y a six couplages possibles :
(1-2), (1-5), (2-5), (2-3), (3-4), (5-4)

Figure IV-4 : Etape 2 - couplage des postes sources

Enfin, la dernière étape consiste à partitionner les zones de points associés à un même poste source en un nombre de zones correspondant aux nombres de motifs élémentaires qui seront construits avec ce poste source. La Figure IV-5 illustre le partitionnement des points affectés à un poste source.

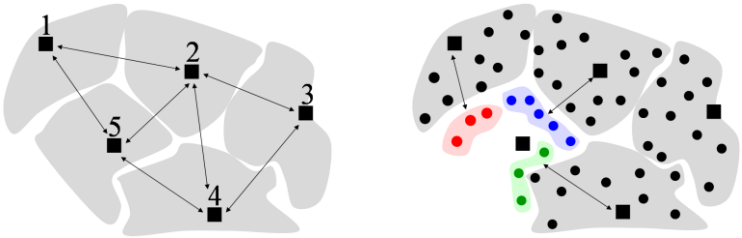


Figure IV-5 : Exemple de partitionnement des points affectés à un poste source

IV.2.1. **Etape 1 - Algorithme de flot de coût minimal**

L'étape de partitionnement consiste à affecter à chaque poste source un certain nombre de consommateurs à alimenter. Le but est donc, d'une part, de tenir compte de la capacité de chaque source, et, d'autre part, de minimiser la distance des points aux sources de façon à minimiser la quantité totale de conducteur utilisé. Ce problème peut être modélisé par l'algorithme de flot de coût minimal dont la résolution est rapide.

Dans le chapitre III, des définitions générales de la théorie des graphes ont été exposées. Nous rappelons néanmoins ici celles dont nous allons nous servir dans cette partie.
Par ailleurs, nous utiliserons les deux termes de la théorie des graphes : « arc » et « arêtes ». Nous parlerons d'arcs lorsque le graphe est orienté et d'arêtes lorsqu'il ne l'est pas.

Définitions préalables

Le flot

Soit G = (V, E), un graphe orienté où V = {1, 2, …, n} est un ensemble de sommet et E = $\{e_1, \ldots, e_m\}$ est un ensemble d'arcs. Pour tout arc e_r Є E reliant le couple de sommets (i, j) Є V^2, on affecte la quantité notée f_{ij} Є [0 ; +∞[. f_{ij} est un flot si, et seulement si, il vérifie la loi de conservation de Kirchhoff (loi des nœuds). Sur la Figure IV-6, la loi de conservation du flot au nœud i s'écrit $f_{hi} = f_{ij}+f_{ik}+f_{il}$ c'est-à-dire le flot qui arrive au nœud est égal à la somme des flots qui sortent du nœud i. Par exemple, le courant électrique dans un conducteur est un flot.

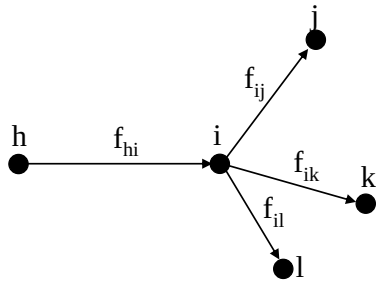


Figure IV-6 : Illustration de la conservation du flot

La capacité d'un arc

On affecte, à chaque arc, une capacité minimale notée c_{min} et une capacité maximale notée c_{max}. Ces valeurs fixent alors le flot minimal (respectivement maximal) qui peut circuler dans cet arc. Dans le cas du courant électrique, la capacité maximale peut être le courant maximal admissible en régime permanent. La Figure IV-7 illustre, entre autres, la notion de capacité de l'arc i-j.

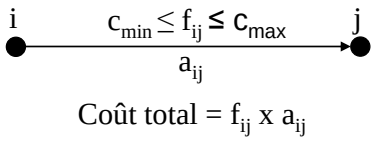


Figure IV-7 : Capacité minimale et maximale de l'arc i-j

Coût d'un arc

On affecte également à chaque arc i-j un coût noté a_{ij} par unité de flot comme indiqué sur la Figure IV-7. Ce coût peut être la longueur de l'arc par exemple. Ainsi la circulation d'un flot f_{ij} dans l'arc i-j coûte a_{ij} x f_{ij}.

Source et puits

La source (S) et le puits (P) sont deux points particuliers du graphe tels que tous les arcs incidents à la source sont des arcs sortant et tous les arcs incidents au puits sont des arcs entrant.

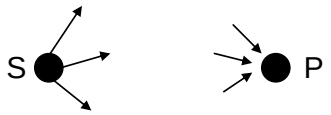


Figure IV-8 : Illustration d'une source et d'un puits

Problème du flot de coût minimal

On considère l'exemple de la Figure IV-9. Dans cet exemple, 13 nœuds représentent des consommateurs (points en noir) et trois nœuds représentent des sources d'énergie (carrés en rouge). Les trois sources doivent alimenter tous les consommateurs, c'est-à-dire leur envoyer un flot. Le coût affecté à un arc reliant 2 nœuds correspond à la longueur de cet arc. Le flot qui circule dans un arc correspond ici au transit de puissance. Le but étant ici d'affecter les consommateurs aux différentes sources sans dimensionner les conducteurs, on ne tiendra pas compte des pertes.

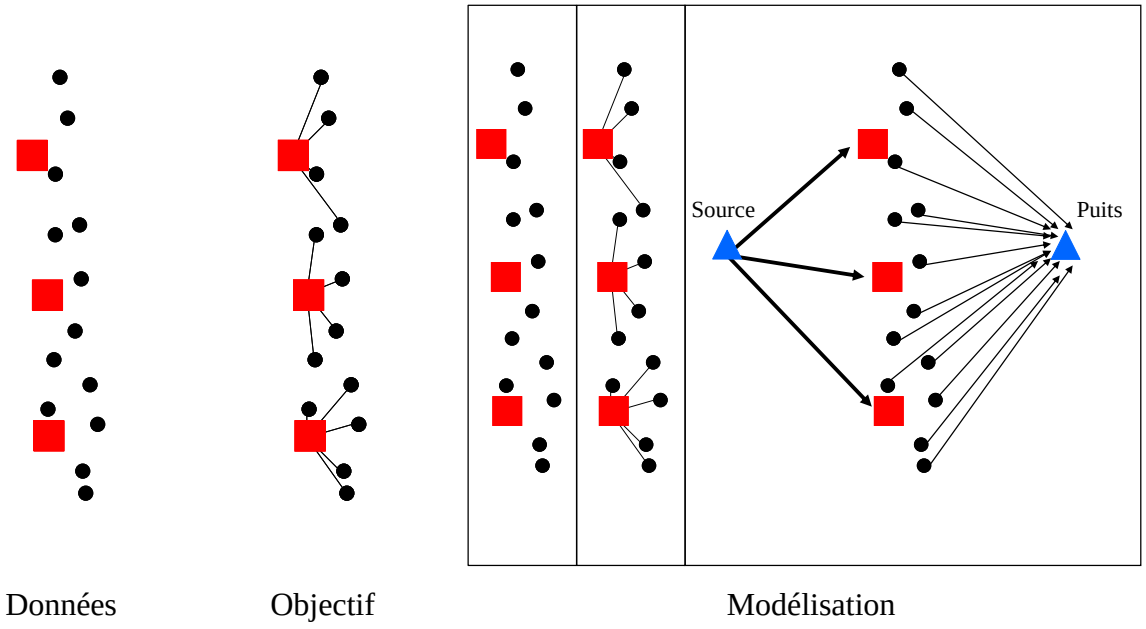


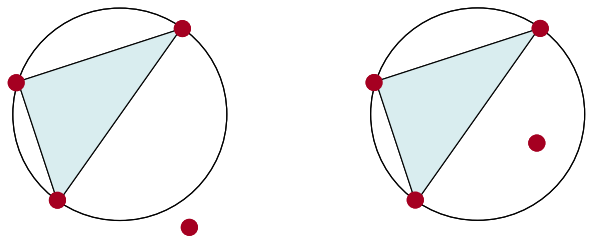
Figure IV-9 : Illustration du problème de flot de coût minimal

L'objectif est de relier les consommateurs aux sources d'énergie en minimisant le coût total du flot.

Pour cela, on introduit une source (triangle bleu) reliée à chaque source d'énergie par des arcs orientés vers ces sources d'énergie. Le coût affecté aux arcs est nul et leur capacité maximale correspond à la puissance maximale que peut fournir chaque source d'énergie. Ainsi, on est sûr que le flot final proviendra des sources d'énergie et que les puissances maximales ne seront pas dépassées. Par ailleurs, tous les consommateurs sont reliés à un nœud puits par un arc orienté vers ce puits. Le coût affecté aux arcs est nul et leur capacité minimale et maximale correspond à la puissance consommée aux nœuds. Ainsi, on respecte la loi de conservation de la puissance. La Figure IV-9 donne un exemple de comportement de l'algorithme de flot de coût minimal.

Formation de la liste des arcs

Pour pouvoir résoudre le problème, il faut tout d'abord avoir une liste des arcs possibles. Lorsque le réseau a un grand nombre de nœuds, décrire tous les liens possibles conduit à un nombre d'arcs très important, ce qui ralentit considérablement le temps de calcul. A priori, il n'est pas judicieux de considérer toutes les liaisons possibles entre tous les nœuds du réseau car les points extrêmes du réseau ont peu de chance d'être reliés directement (distance importante). Nous avons alors recherché un outil de maillage intelligent qui ne réaliserait pas la jonction de points trop éloignés (cf. problématique de maillage 2D sous des logiciels de calculs à éléments finis), ni de croisement d'arcs (graphe planaire). Nous avons utilisé, sous MATLAB, un mailleur qui repose sur la méthode de maillage de Delaunay [DEL 1979]. Cette méthode consiste à mailler un semis de points avec des triangles dont les sommets sont les points du semis. Le maillage doit vérifier cette condition : l'intersection de deux triangles est soit l'ensemble vide, soit un des points du maillage, soit un arc. La méthode de Delaunay construit ce maillage de telle sorte que, si l'on considère un triangle T du maillage, aucun point du semis n'est contenu dans le cercle circonscrit à T. Il réalise donc la synthèse d'un graphe 2D planaire de manière automatique et vérifie les conditions d'optimalité de Delaunay, intéressantes d'un point de vue de calculs par éléments finis.



Triangle Delaunay Triangle non Delaunay

Figure IV-10 : Illustration du maillage Delaunay

Chaque arête créée par le maillage Delaunay est dédoublée pour être orientée et ainsi considérer les 2 orientations possibles. Les arcs orientés reliant la source aux postes sources HTB/HTA sont ajoutés à cette liste d'arcs ainsi que les arcs orientés reliant les postes HTA/BT au puits.

Programme linéaire

Le problème de flot de coût minimal peut être modélisé par un programme linéaire. Soit X un vecteur ayant pour dimension le nombre total de lignes initiales possibles que l'on notera p. X doit répondre au problème suivant :

$$\underset{X}{\mathrm{Min}}\, L^T X$$

avec comme contraintes : (IV-1)

$$AX=b$$

$$L_b \leq X \leq L_u$$

Avec :

- L = Vecteur colonne représentant la longueur des arcs
- A = Matrice incidence du graphe

$$\begin{cases} a_{ij} = 1 \text{ si le nœud i est le point de départ de la ligne j,} \\ a_{ij} = -1 \text{ si le nœud j est le point d'arrivée de la ligne i,} \\ a_{ij} = 0 \text{ sinon.} \end{cases}$$

- $b_i = 0$ pour i = 1, …, p-2
- $b_{p-1} = P_{totale}$ et $b_p = -P_{totale}$, p-1 est l'indice du puits et p de la source
- L_b (respectivement L_u) = vecteur capacité minimale (respectivement maximale) des arcs.

Résultats

Dans l'exemple de la Figure IV-11 (b), l'algorithme de flot de coût minimal est appliqué sur un réseau électrique comportant 3 postes sources.

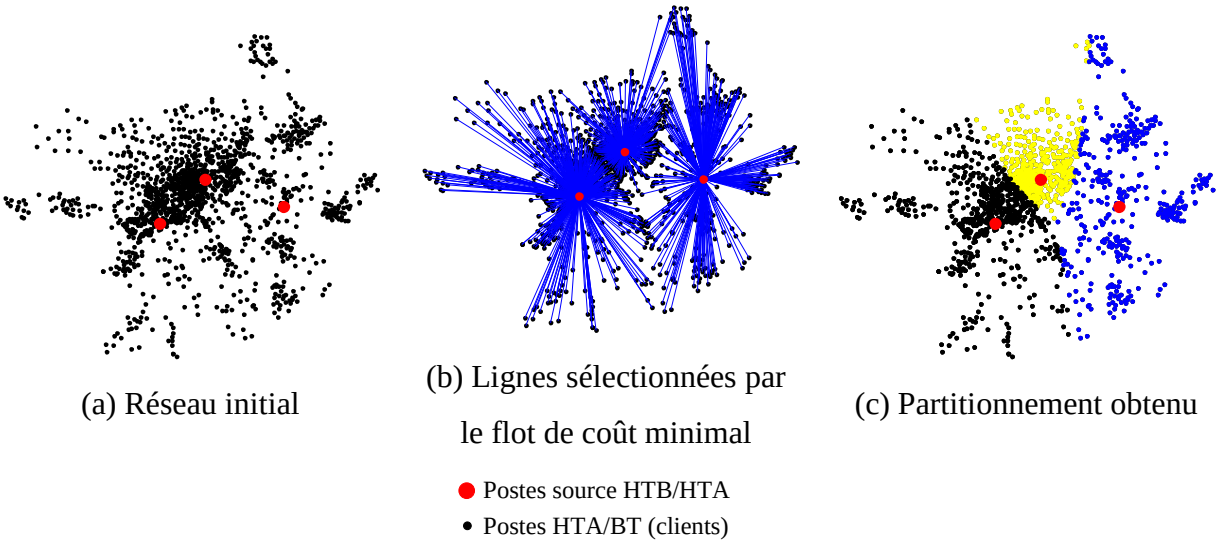


Figure IV-11 : Illustration de l'algorithme de flot de coût minimal sur un exemple à 3 postes sources

IV.2.2. **Etape 2 - Couplage des postes sources**

Tous les couples possibles des postes sources sont envisagés et classés par ordre croissant de distance entre postes sources. Ces couples sont ensuite pris dans l'ordre en éliminant, au fur et à mesure, les couples dont le segment reliant les deux postes sources intersecte un segment déjà considéré. On obtient, au final, la liste des couples de postes sources voisins sur lesquels on reproduira les motifs élémentaires. Si on reprend l'exemple de la Figure IV-4, les couples possibles de postes sources, leur classement par ordre croissant et la méthode pour les choisir sont illustrés dans la Figure IV-12.

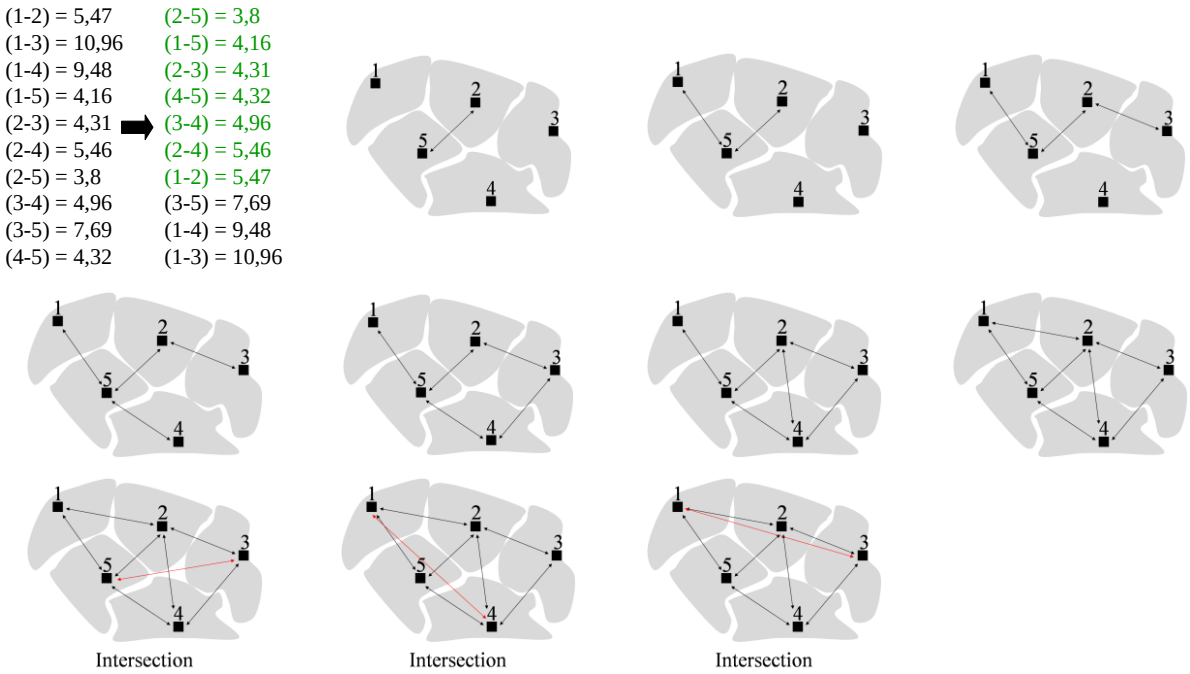


Figure IV-12 : Couplage des postes source sur l'exemple de la Figure IV-4

Dans l'exemple du réseau réel de la Figure IV-11, les trois postes sources ont des zones communes. Il y aura donc trois motifs élémentaires : PS_1-PS_2, PS_2-PS_3, PS_1-PS_3.

IV.2.3. **Etape 3 - Répartition des points entre les couples**

A la suite de l'étape 2, chaque poste source va partager ses points avec les postes sources voisins. Dans l'exemple de la Figure IV-13, le poste source 1 doit partager ses points avec PS_2, PS_3, PS_4 et PS_5. Il y a donc 4 zones de puissance P^i_{PS1} telles que $\sum_{i=1}^{4} P^i_{PS1} = P_{PS1}$, P_{PS1} étant la puissance totale que peut fournir le poste source 1. Chaque zone doit donc être partagée entre deux postes sources.

Un critère angulaire a été utilisé pour effectuer ce partage. L'angle de ces postes sources ainsi que des nœuds affectés au poste source 1 sont calculés par rapport à l'axe horizontal ayant pour origine PS_1. Ces angles sont ensuite classés par ordre croissant. Le poste source ayant l'angle par rapport à l'horizontal d'origine PS_1 le plus petit est PS_4 (Figure IV-13). Les points de la zone comprise entre PS_4 et PS_5 sont alors répartis entre ces deux postes en fonction de la capacité de chacun (Figure IV-13). Puis, on passe à la zone comprise entre PS_3 et PS_4 et ainsi de suite.

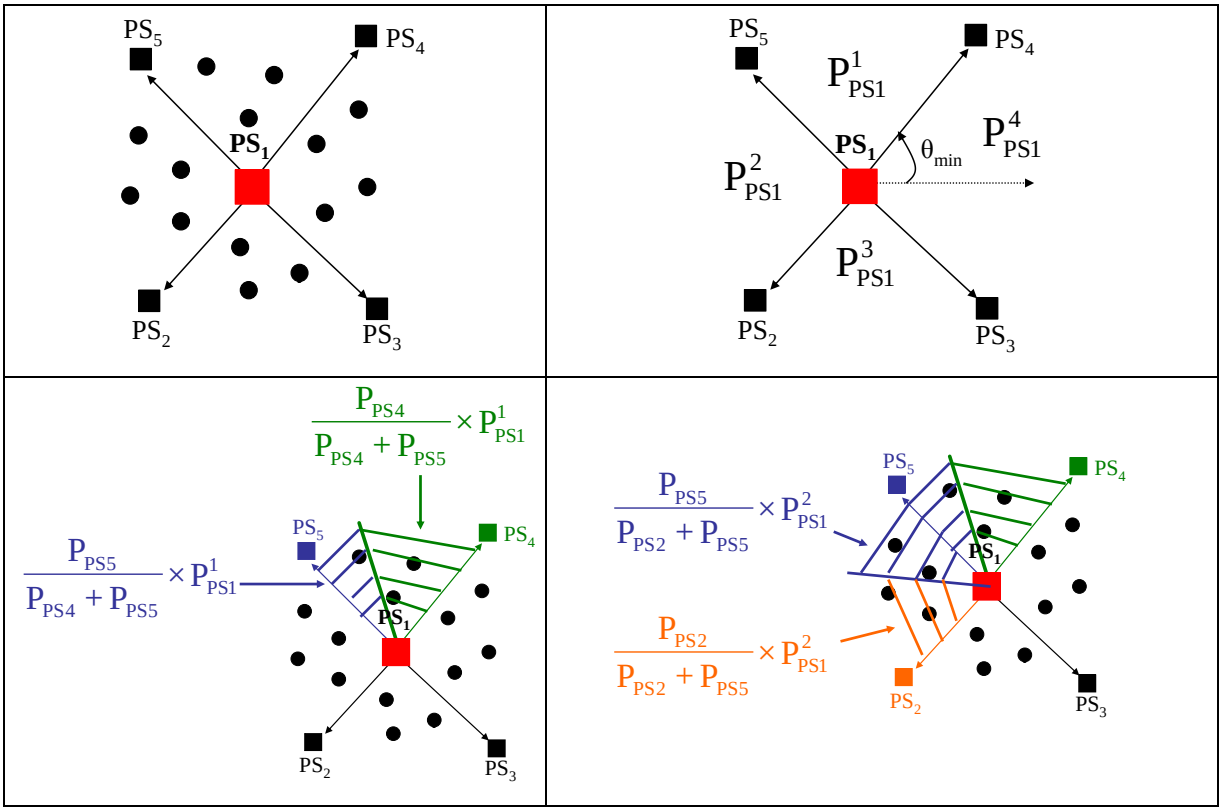


Figure IV-13 : Répartition des nœuds affectés au PS_1

IV.2.4. **Résultat final**

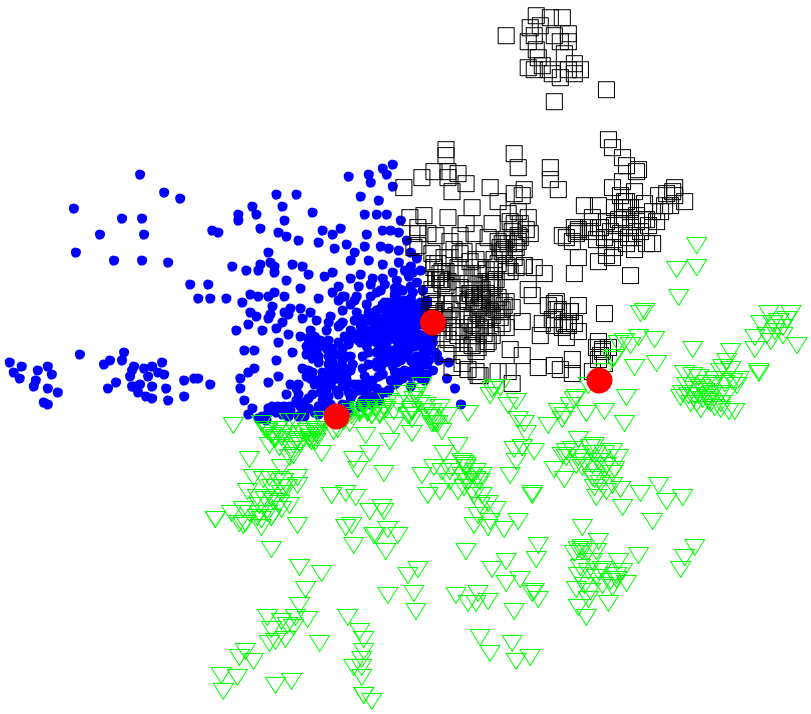


Figure IV-14 : Partitionnement final

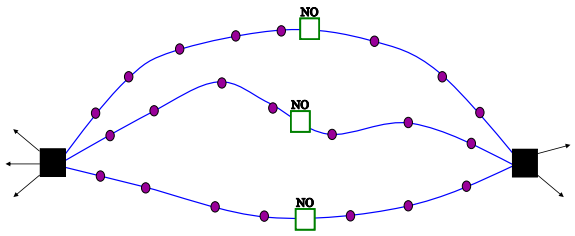
La Figure IV-14 montre le partitionnement final obtenu. Ce réseau comportera trois motifs élémentaires dont les points sont représentés par trois couleurs et symboles différents sur la figure. L'intérêt de ce découpage est que, d'une part, il tient compte de la capacité des postes sources existants et que, d'autres par, les points sont affectés aux postes sources en minimisant les longueurs.

IV.3. Outil automatique de construction d'un réseau en coupure d'artère

IV.3.1. **Algorithme proposé**

Rappel des objectifs

L'architecture en coupure d'artère ainsi que son exploitation sont décrites dans le chapitre I (§I.2.6 et §I.3.1). C'est le motif élémentaire retenu prioritairement par ERDF pour planifier ses réseaux de distribution. Pour mémoire, la Figure IV-15 rappelle le schéma de la coupure d'artère ainsi que les objectifs et contraintes. Chaque artère (ensemble des conducteurs reliant deux sources) doit avoir un produit PL équivalent et chaque départ (ensemble de conducteurs reliant une source à un organe de coupure normalement ouvert) également.



Objectifs (chapitre I partie I.3)

- Equilibrer le produit PL des artères
- Minimiser la longueur totale de conducteur

Contraintes

- Respecter P_{max} par artère = 12 MW [Source ERDF]

Figure IV-15 : Rappel de l'architecture en coupure d'artère

Le critère permettant de traduire l'équilibrage des produits PL est le critère E dont on rappelle l'expression dans la formule (IV-2).

$$E = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(PL(i) - \overline{PL}\right)^2}{n}}}{\overline{PL}} \times 100 \qquad \text{(IV-2)}$$

Avec :

- E = Ecart type des PL par rapport à la moyenne (%),
- n = nombre de zones
- PL(i) = Produit PL de la zone i (MVA.km),
- $\overline{PL} = \frac{\sum_{i=1}^{n} PL(i)}{n}$ (MVA.km).

Description générale de l'algorithme

L'algorithme proposé pour construire cette architecture est une méthode heuristique (cf chapitre III § III.3.3). Dans un premier temps, une solution initiale est mise en place. Cette solution doit respecter les contraintes de puissance maximale par artère. Par ailleurs, nous avons aussi considéré que le chevauchement entre artères n'est pas autorisé (graphe planaire). L'architecture obtenue ne respecte pas les contraintes de produit PL équivalent du fait de son mode de construction. Une méthode d'amélioration par échange local est alors appliquée dans un second temps.

Mise en place de la solution initiale

La méthode utilisée pour construire la solution initiale est une méthode géométrique qui utilise un critère angulaire. Cette méthode nous a semblé a priori la plus logique géométriquement afin d'obtenir des artères qui ne se chevauchent pas. Avant toute chose, on sépare la zone à traiter en deux demi-plans délimités par la droite reliant les deux postes

source. Dans un premier temps, on construit les artères liant les points situés au dessus de la droite joignant les deux postes sources. Ensuite, on bâtit les artères du demi-plan inférieur, voir Figure IV-16. Le Diagramme IV-2 décrit l'algorithme utilisé pour créer les artères de la partie supérieure. Pour celles de la partie inférieure, l'algorithme utilisé est le même mais au lieu de considérer les angles maximaux on considère les angles minimaux. Les artères sont construites petit à petit en partant de l'extérieur et en se rapprochant des postes sources. Nous allons illustrer chaque étape de l'algorithme avec un exemple simple. Les angles sont définis dans l'intervalle [0 ; 2π].

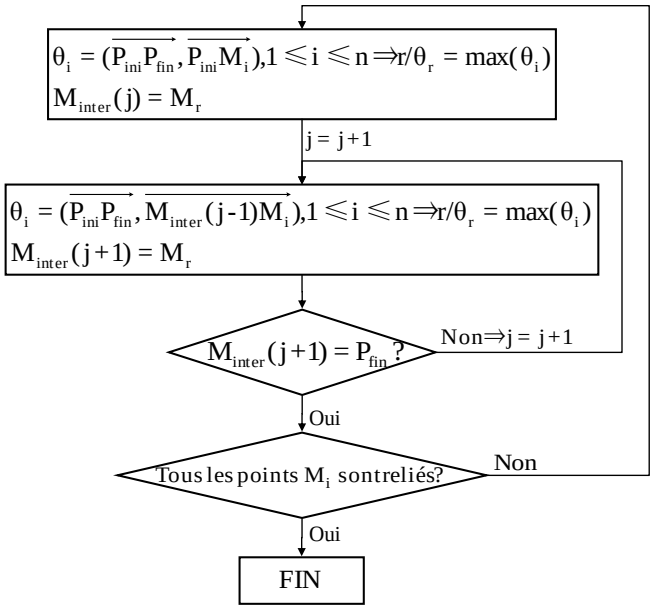


Diagramme IV-2 : Algorithme de création d'artères initiales

Soient deux postes sources P_{ini} et P_{fin}. Alors P_{ini} est le poste source tel que l'angle $\theta = (\overrightarrow{P_{ini}O}, \overrightarrow{P_{ini}P_{fin}})$ soit dans l'intervalle $[-\frac{\pi}{2};+\frac{\pi}{2}]$, le vecteur $\overrightarrow{P_{ini}O}$ étant un vecteur horizontal. Une artère a donc pour point de départ P_{init} et pour point d'arrivée P_{fin}.

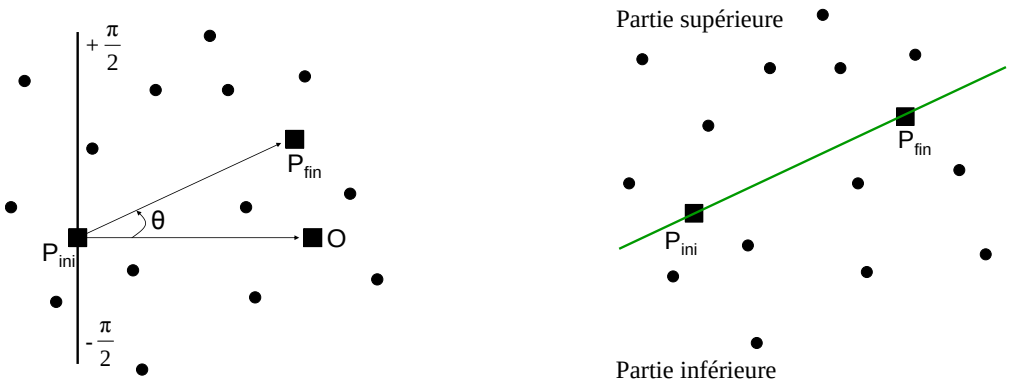


Figure IV-16 : Orientation des postes sources et découpage en deux parties

On commence par la partie supérieure. On note A_c l'artère que l'on va construire. A ce stade, on a $A_c = \{P_{ini}\}$. Pour tous les points consommateurs M_i, on calcule l'angle $\theta_i = (\overrightarrow{P_{ini}P_{fin}}, \overrightarrow{P_{ini}M_i})$. On note $M_{inter}(1)$ le point M_i tel que θ_i soit maximal. On a alors $A_c = \{P_{init}, M_{inter}(1)\}$. On calcule alors $\theta_i = (\overrightarrow{P_{ini}P_{fin}}, \overrightarrow{M_{inter}(1)M_i})$ et on note $M_{inter}(2)$ le point M_i tel que θ_i soit maximal. On a alors $A_c = \{P_{init}, M_{inter}(1), M_{inter}(2)\}$. La Figure IV-17 illustre ces deux premières itérations.

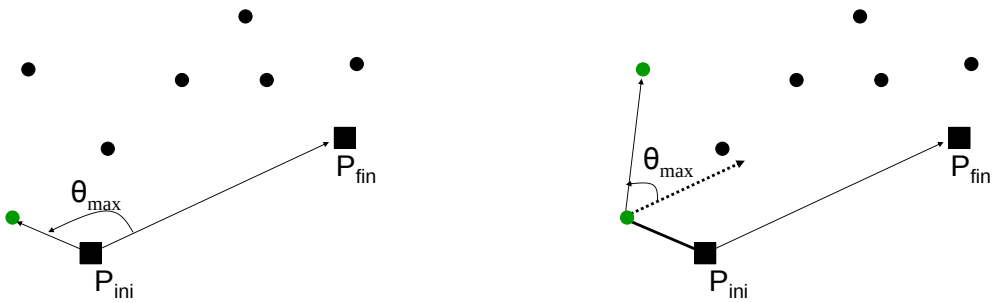


Figure IV-17 : Construction des deux premiers points de l'artère

On continue à construire l'artère jusqu'à l'indice j tel que $M_{inter}(j) = P_{fin}$ (Figure IV-18). Tant qu'il reste des points non reliés par des artères, on recommence les étapes précédemment expliquées. Les artères de la partie supérieure sont représentées sur la Figure IV-18.

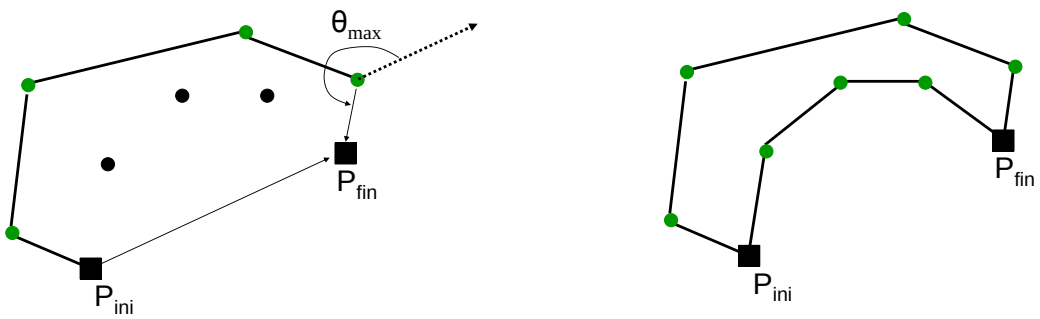


Figure IV-18 : Illustration de la première artère construite puis de toute la partie supérieure

On effectue ensuite les mêmes étapes pour la partie inférieure mais en sélectionnant cette fois les angles minimaux comme illustré sur la Figure IV-19. Une fois les artères des deux parties créées, on les rassemble (Figure IV-19).

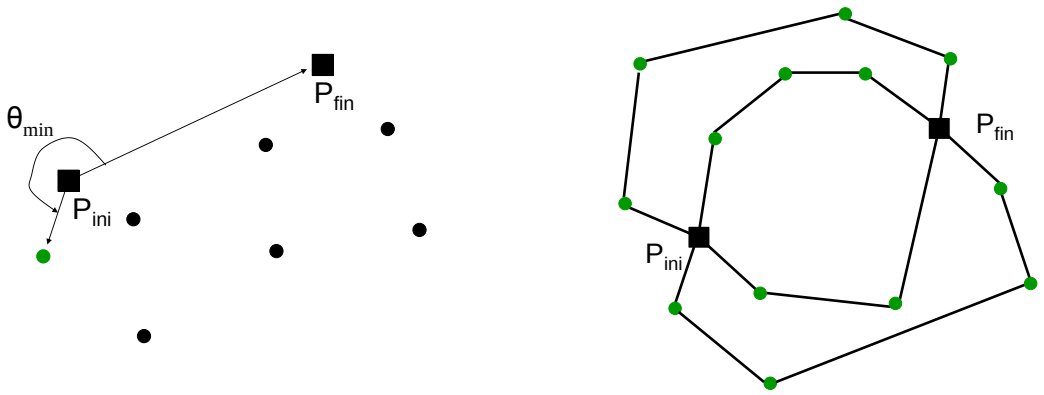


Figure IV-19 : Première itération de la partie inférieure et réseau final

Les artères ainsi créées représentent le nombre maximal d'artères possibles pour un réseau donné sans provoquer de croisement. La puissance maximale par artère est limitée à 12 MW. Il se peut que, dans cette construction initiale, la puissance maximale de certaines artères soit bien en dessous de cette limite. Ainsi, plusieurs artères successives sont sélectionnées jusqu'à ce que la puissance atteigne 12 MW. Ces artères sont alors supprimées et on ne conserve que les points. L'algorithme du voyageur de commerce permet alors de reconstruire une artère passant par ces points.

Nous avons illustré la construction de l'architecture initiale sur la partie supérieure du réseau étude de la Figure IV-2. La partie gauche de la Figure IV-20 illustre les artères obtenues par construction géométrique. La puissance maximale des artères est alors de 4,5 MW. Nous pouvons alors fusionner ces artères tant que la limite de 12 MW n'est pas atteinte. La partie droite de la Figure IV-20 montre le nouveau réseau initial obtenu.

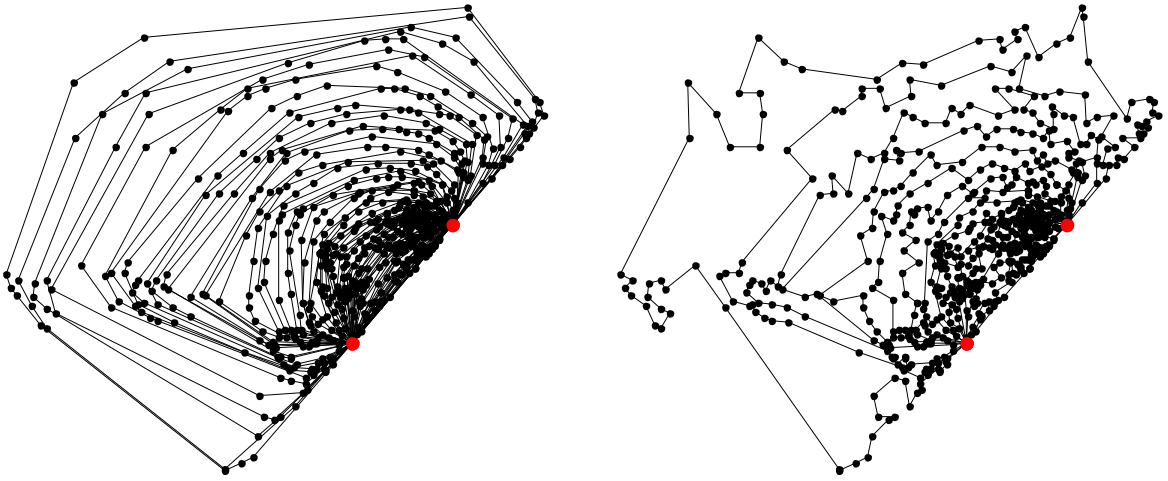


Figure IV-20: Partie supérieure du réseau test

L'algorithme d'amélioration qui sera appliquée sur cette structure aura pour but d'équilibrer le produit PL des artères tout en minimisant la longueur totale du réseau. Pour

cela, il va déséquilibrer les artères en puissance : une artère courte aura tendance à être plus chargée qu'une artère longue. Ainsi, même si les artères initiales ont une puissance inférieure à 12 MW, il est possible que certaines artères finales dépassent cette puissance limite. De façon à trouver le réseau qui convient le mieux, plusieurs artères « initiales » seront testées en faisant varier la puissance maximale par artère construite. La liste des tests effectués est résumée dans le Tableau IV-1.

Puissance maximale par artère (en MW)	Nombre d'artères	Ecart type E (en %)	Longueur totale (en km)
12	15	73,74	335,28
10	18	85,28	346,30
9	20	71,16	365,3
8	24	90,95	376,7
7	26	81,48	393,27
6	31	77,62	443,58

Tableau IV-1 : Paramètres des solutions initiales en fonction du nombre d'artère

Algorithme d'amélioration

L'algorithme d'amélioration du critère équilibrage des produits PL, utilisé pour effectuer les échanges locaux de charges entre les artères, est décrit dans le Diagramme IV-3.

A partir de la solution initiale générée dans le paragraphe précédent, on calcule le critère E et l'écart des PL de chaque artère par rapport à la moyenne des PL. Cet écart (EC) est défini par la formule (IV-3).

$$EC(i) = \frac{PL(i) - PL_{moy}}{PL_{moy}} \times 100, \; i = 1,\ldots,n_a \qquad \text{(IV-3)}$$

Avec :

- PL(i) = Produit PL de l'artère N°i (MVA.km),
- PL_{moy} = Moyenne des PL des artères,
- n_a = Nombre d'artères

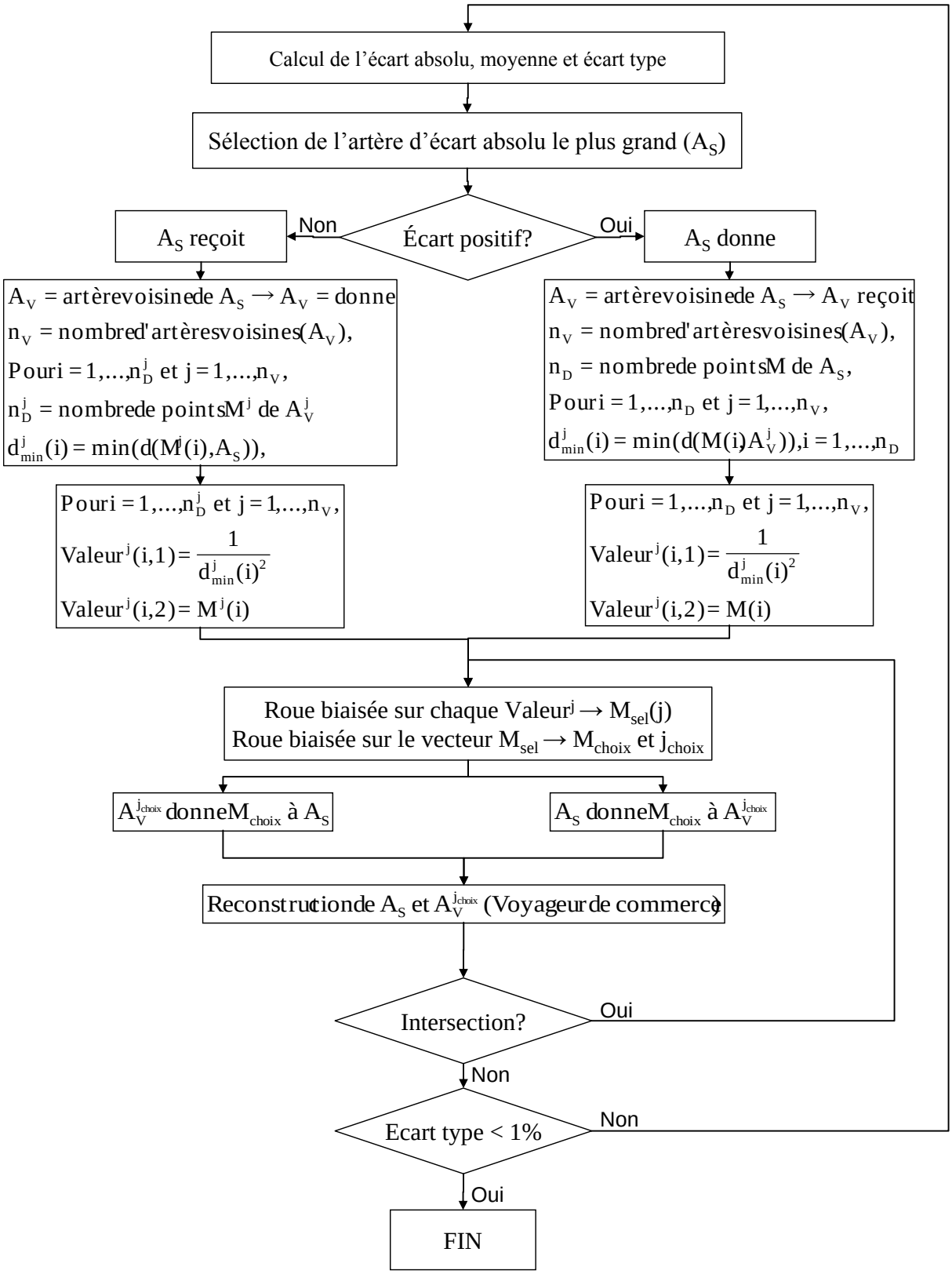


Diagramme IV-3 : Heuristique d'amélioration

Etape 1 : Sélection d'artère

On sélectionne l'artère dont l'écart absolu des PL est le plus important. Si cet écart est négatif alors l'artère doit recevoir des charges. Dans le cas inverse, elle doit en donner. On note A_S, l'artère sélectionnée.

Etape 2 : Sélection des artères voisines

Les artères voisines de A_S sont notées A_V. Uniquement deux artères sont voisines si elles peuvent échanger des points sans se croiser. Dans le cas de la coupure d'artère, les deux artères voisines d'une artère i sont l'artère située juste au dessus de i et celle située juste en dessous. Par conséquent, si l'artère sélectionnée est une des deux artères extrémales (demi-plans), alors elle n'aura qu'une artère voisine. Ces artères voisines seront toutes deux soit donneuses si A_S doit recevoir, soit receveuses si A_S doit donner.

Etape 3 : Mise en place d'une roue biaisée

Une première option consisterait à sélectionner systématiquement le point de l'artère donneuse le plus proche d'une des artères receveuses. Cependant, cela risquerait de « bloquer » l'algorithme dans un minimum local où plus aucun échange ne serait possible, sans toutefois être parvenu à faire converger le calcul vers une solution satisfaisante. C'est pourquoi l'étape 3 consiste à mettre en place deux roues biaisées pour déterminer quelle artère voisine sera choisie ainsi que le point qui sera échangé entre l'artère voisine choisie et A_S. Il faut prendre soin de biaiser les probabilités afin de privilégier les points les plus proches de l'artère receveuse. Dans cette optique, deux cas sont envisagés :

- Si A_S est une artère receveuse alors, pour chaque artère voisine j et pour chaque point $M^j(i)$ de l'artère j, on détermine la distance minimale entre le point $M^j(i)$ et l'artère A_S notée $d^j_{min}(i)$. On définit alors le matrice $Valeur^j$ avec, en première colonne $\frac{1}{d^j_{min}(i)^2}$[1] et, en deuxième colonne, le point $M^j(i)$ correspondant pour i variant de 1 au nombre d'éléments de l'artère j.

- Si A_S est une artère donneuse alors pour chaque artère voisine j et pour chaque point M(i) de A_S, on détermine la distance minimale entre le point M(i) et l'artère A^j_V notée $d^j_{min}(i)$.

[1] Nous justifierons le choix de l'inverse du carré de la distance dans la suite de cette partie.

On définit alors la matrice Valeur^j avec, en première colonne $\frac{1}{d^j_{min}(i)^2}$ et, en deuxième colonne, le point M(i) correspondant pour i variant de 1 au nombre d'éléments de l'artère A_S. Le but de la matrice Valeur^j est de fournir les paramètres de la roue biaisée.

Pour construire la roue biaisée, on définit dans un premier temps la probabilité qu'un point soit sélectionné par la formule (IV-4) (les différents indices sont définis dans le Diagramme IV-3) :

Si A_S est une artère receveuse,

$$\text{Pour } i = 1,\ldots,n^j_D \text{ et } j = 1,\ldots,n_V$$

$$\text{Proba}(i) = \frac{\text{Valeur}^j(i)}{\text{sum}(\text{Valeur}^j)}$$

$$\text{Proba}(i) = \frac{\frac{1}{d^j_{min}(i)^2}}{\text{sum}(\frac{1}{d^j_{min}(i)^2})}$$

Si A_S est une artère donneuse,

$$\text{Pour } i = 1,\ldots,n_D \text{ et } j = 1,\ldots,n_V$$

$$\text{Proba}(i) = \frac{\text{Valeur}^j(i)}{\text{sum}(\text{Valeur}^j)}$$

$$\text{Proba}(i) = \frac{\frac{1}{d^j_{min}(i)^2}}{\text{sum}(\frac{1}{d^j_{min}(i)^2})} \qquad \text{(IV-4)}$$

Ainsi, en considérant l'inverse de la distance au carré pour calculer la probabilité, on insiste sur le fait que l'on privilégie les points les plus proches. En effet, plus un point sera proche de l'artère qui doit le recevoir, plus il est intéressant de le prendre pour minimiser la longueur de conducteur. On construit la roue biaisée telle que :

$$\text{Roue_biaisée}(i) = \sum_{k=1}^{i} \text{Proba}(k) \qquad \text{(IV-5)}$$

Les résultats sont schématisés sous forme de diagrammes circulaires. Un exemple de roue biaisée est donné dans la Figure IV-21. On peut alors tirer aléatoirement un chiffre selon une loi uniforme sur l'intervalle [0,1]. Le chiffre tiré donne le point que l'artère donneuse cédera à l'artère receveuse. Par exemple, si le chiffre tiré est 0.23 alors le point sélectionné sera le point numéro 5.

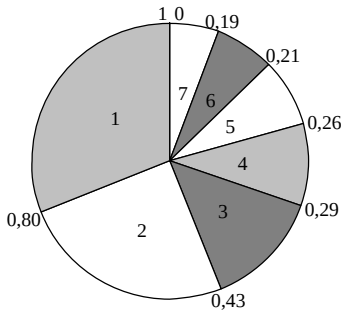


Figure IV-21 : Exemple d'une roue biaisée

On construit ainsi autant de roues biaisées qu'il y a de couples artère donneuse – artère receveuse.

Etape 4 : Reconstruction des artères et vérification de non intersection

Le point final sélectionné est alors cédé à l'artère receveuse. L'algorithme du voyageur de commerce décrit au chapitre III est alors appliqué sur les deux artères modifiées (celle qui a donné et celle a reçu) de façon à garantir une longueur minimale pour chaque artère reconstruite. On vérifie alors que les artères reconstruites ne se croisent pas. Pour cela, on tient compte du fait que les artères sont constituées de segments. Un segment correspond à un conducteur qui relie deux clients ou un poste source et un client. On vérifie alors que chaque segment d'artère ne croise pas de segments d'autres artères. Si il y a croisement, alors le point sélectionné est rejeté et un autre point est alors choisi. La Figure IV-22 illustre les cas d'intersections possibles.

Cas d'intersection possibles

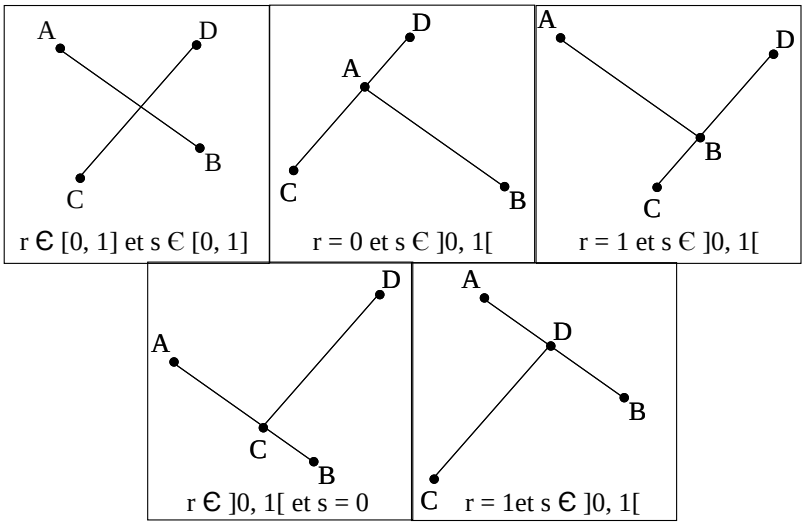


Figure IV-22 : Intersections possibles

Soient deux segments [AB] et [CD]. Soient M un point appartenant au segment [AB] et M' un point appartenant au segment [CD]. Alors les coordonnées de M et M' peuvent s'écrire :

$$M = \begin{vmatrix} X_A + r \times (X_B - X_A) \\ Y_A + r \times (Y_B - Y_A) \end{vmatrix} \text{ et } M' = \begin{vmatrix} X_C + s \times (X_D - X_C) \\ Y_C + s \times (Y_D - Y_C) \end{vmatrix} \text{ pour r, s } \in [0,1] \qquad \text{(IV-6)}$$

Soit M_i le point d'intersection de [AB] et [CD]. M_i existe si les vecteur $\overrightarrow{AB}$ et $\overrightarrow{CD}$ ne sont pas parallèles c'est-à-dire si $\overrightarrow{AB}.\overrightarrow{CD} \neq 0$ ce qui donne :

$$(Y_D - Y_C) \times (X_B - X_C) - (Y_B - Y_A) \times (X_D - Y_C) \neq 0 \qquad \text{(IV-7)}$$

Dans ce cas,

$$s = \frac{(Y_A - Y_C)\times(X_B - X_A) - (X_A - X_C)\times(Y_B - Y_A)}{(Y_D - Y_C)\times(X_B - X_C) - (Y_B - Y_A)\times(X_D - X_C)}$$
$$r = \frac{(Y_A - Y_C)\times(X_D - X_C) - (X_A - X_C)\times(Y_D - Y_C)}{(Y_D - Y_C)\times(X_B - X_A) - (Y_B - Y_A)\times(X_D - X_C)} \qquad \text{(IV-8)}$$

En cas d'intersection, le point sélectionné précédemment ne peut pas être donné donc il est mis dans une liste de nœuds interdits. On reprend alors l'étape 3 en supprimant le point sélectionné. Si l'échange ne provoque pas d'intersections alors les paramètres E et EC sont recalculés. Tant que EC, l'écart type des produits PL, est supérieur à une certaine valeur choisie par le planificateur, on continue les échanges de points.

Application sur un exemple simple

Pour mieux comprendre chaque étape, nous prendrons un exemple constitué de trois artères. La Figure IV-23 présente le réseau étudié. A partir du réseau décrit dans la Figure IV-2, on ne considère que les deux postes sources et 29 charges. La puissance totale est de 5,1 MW.

L'étape 1 conduit à sélectionner $A_S = A_3$. C'est une artère qui doit recevoir un point car son PL est inférieur au PL moyen.

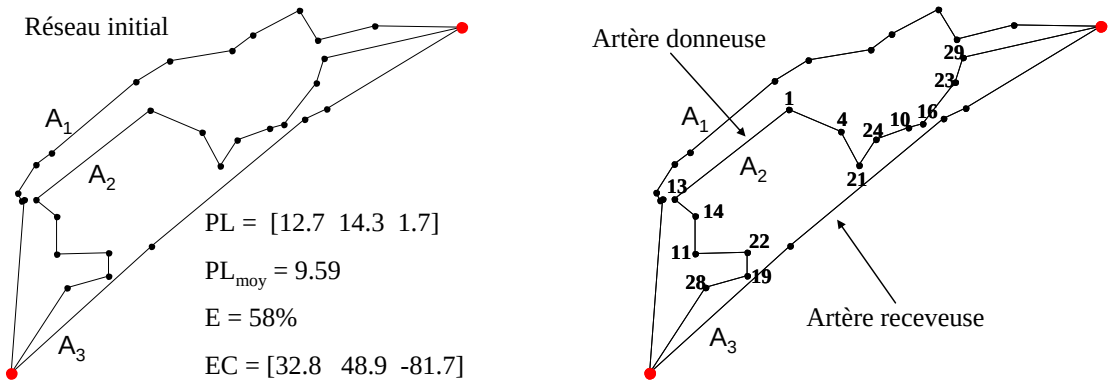


Figure IV-23 : Réseau initial

L'étape 2 permet de choisir les artères voisines A_V. Dans cet exemple, il s'agit d'une artère extrémale. Elle ne peut donc recevoir des points que de l'artère numéro 2. Le problème consiste désormais à savoir quels points de l'artère 2 peuvent être donnés à l'artère 3 ce qui conduit à l'étape 3. Ici, l'artère sélectionnée n'a qu'une artère voisine. Si elle avait eu deux artères voisines, il y aurait eu deux roues baisées correspondant chacune à une artère voisine. Les première et deuxième colonnes du Tableau IV-2 montrent la matrice Valeur[1] obtenue. La troisième colonne montre le calcul du vecteur probabilité et la quatrième colonne, les zones de

la roue biaisée associées à chaque point. La Figure IV-24 présente la roue biaisée construite à partir de la matrice Valeur[1] et la Figure IV-25, le point sélectionné en tirant un chiffre selon une loi uniforme entre 0 et 1.

Valeur$_1$			
1/(d_{min}^2)	**Points**	**Probabilité**	**Roue baisée**
2,6E-06	28	0,02	0,02
7,76E-06	19	0,06	0,07
1,37E-05	22	0,10	0,17
2,81E-06	11	0,02	0,19
2,49E-06	14	0,02	0,21
1,52E-06	1	0,01	0,22
1,09E-06	13	0,01	0,23
2,39E-06	4	0,02	0,24
2,47E-06	21	0,02	0,26
4,92E-06	24	0,03	0,30
1,99E-05	10	0,14	0,44
5,21E-05	16	0,37	0,81
2,07E-05	23	0,15	0,96
6,09E-06	29	0,04	1,00

Tableau IV-2 : Paramètres calculés pour construire la roue biaisée

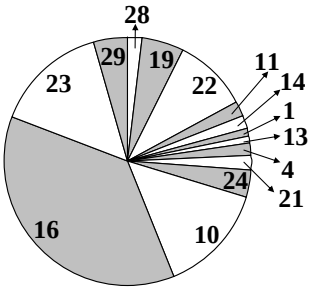


Figure IV-24 : Roue biaisée

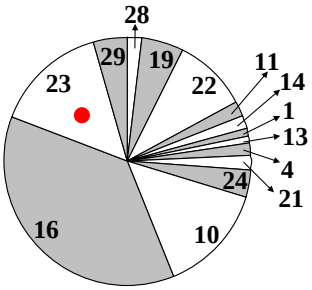
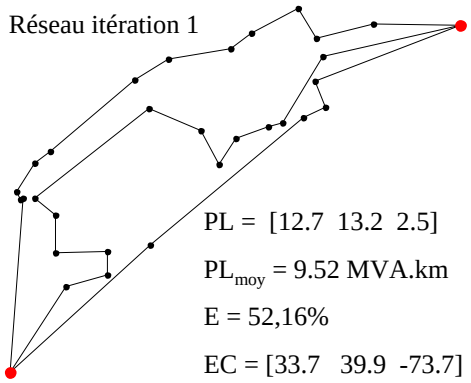


Figure IV-25 : Sélection du point

Dans le cas de l'exemple traité, le point sélectionné est le point 23. Il ne provoque pas d'intersection d'artère. L'artère 2 donne donc le point 23 à l'artère 3. Le réseau obtenu est celui de la Figure IV-26, à gauche. Après plusieurs itérations, on obtient le réseau de droite, sur la Figure IV-26.



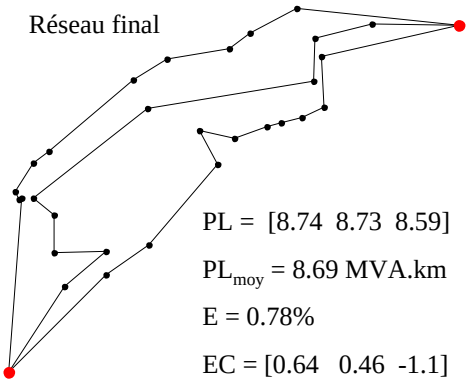


Figure IV-26 : Réseaux intermédiaire et final obtenu

IV.3.2. **Exploitation des résultats**

Sur la base du réseau décrit à la Figure IV-2, le programme de construction de la coupure d'artère a été effectué en faisant varier le nombre d'artères principales. Le nombre maximal d'artères possibles est celui obtenu par la construction géométrique initiale sans fusionner les artères. Le nombre total d'artères obtenu est de 86. La puissance maximale d'une artère est

alors de 4,75 MW. Les structures obtenues en utilisant l'algorithme d'amélioration ont un écart type des PL par rapport à la moyenne inférieur à 1%.

A titre d'exemple, la Figure IV-27 montre le réseau en coupure d'artère obtenu pour 15 artères principales. Les postes sources sont représentés par les nœuds rouges et l'emplacement des organes de coupure normalement ouvert par les nœuds verts (voir chapitre 1). La méthode pour placer les organes de coupure dans un réseau en coupure d'artère a été expliquée au chapitre I dans la partie I.3. On rappelle que les organes de coupure normalement ouverts doivent être placés sur chaque artère de façon à créer deux zones de produit PL équivalent.

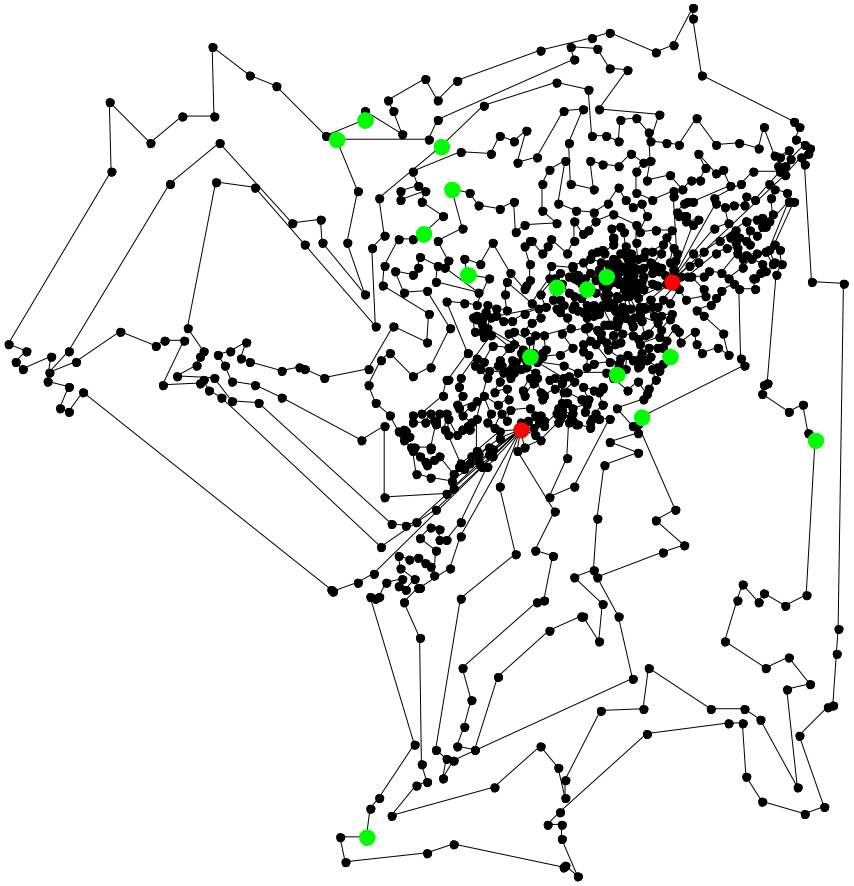


Figure IV-27 : Exemple du réseau en coupure d'artère obtenu pour 15 artères principales

Les conducteurs doivent alors être dimensionnés pour permettre le fonctionnement en mode secours. En fonctionnement normal, un organe de coupure normalement ouvert fait que chaque poste source alimente son départ. Le pire des cas de défaut qui puisse arriver est une occurrence juste en aval d'un poste source (voir Figure IV-28). Dans le cas du défaut N°2 par exemple, le poste source 1 (PS1) doit alimenter toutes les charges (et inversement pour le défaut N°1). Les conducteurs doivent donc être surdimensionnés pour pouvoir fonctionner en mode secours.

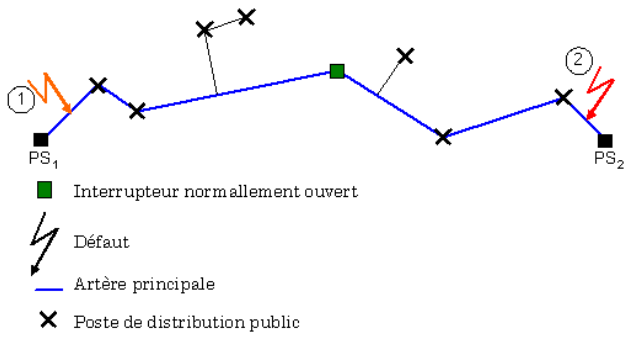


Figure IV-28 : Pire cas de défaut sur une artère principale

Les conducteurs choisis sont des câbles souterrains choisis parmi les possibilités suivantes : 95² Alu (pour câble souterrain de section 95 mm² avec conducteur en aluminium), 150² Alu, 240² Alu et 240² Cu (pour câble souterrain de 240 mm² en cuivre).

Impact du nombre d'artères

Impact du nombre d'artères sur la longueur totale du réseau, sur la longueur des départs et sur le produit PL moyen par artère

Sur notre réseau d'étude, plus le nombre d'artères augmente, plus la longueur totale du réseau augmente mais plus la longueur des artères diminue (Figure IV-29 et Figure IV-30). De plus, si le nombre d'artères augmente alors, la puissance du réseau étant constante, la puissance de chaque artère va diminuer. Ainsi le produit PL moyen par artère va globalement diminuer. Par conséquent, même si le réseau a une longueur totale plus grande, les indices de fiabilité devraient être meilleurs si le nombre d'artères augmente.

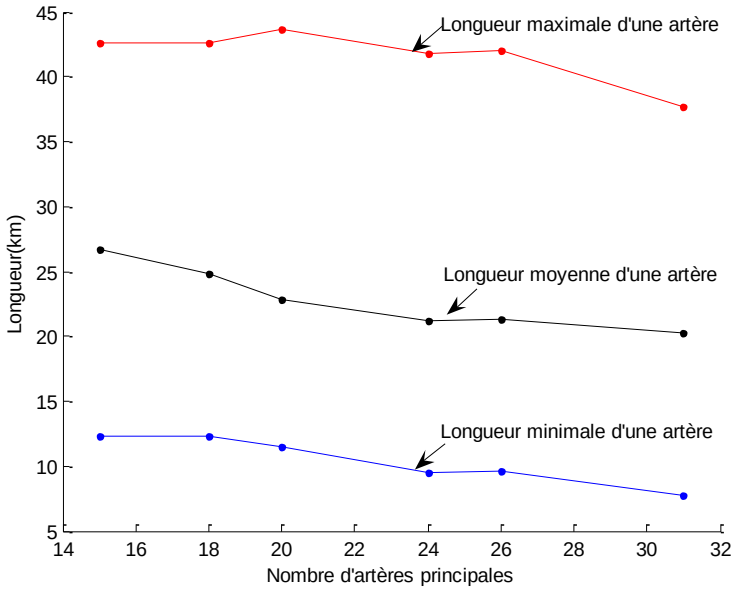


Figure IV-29 : Variation des longueurs en fonction du nombre d'artères

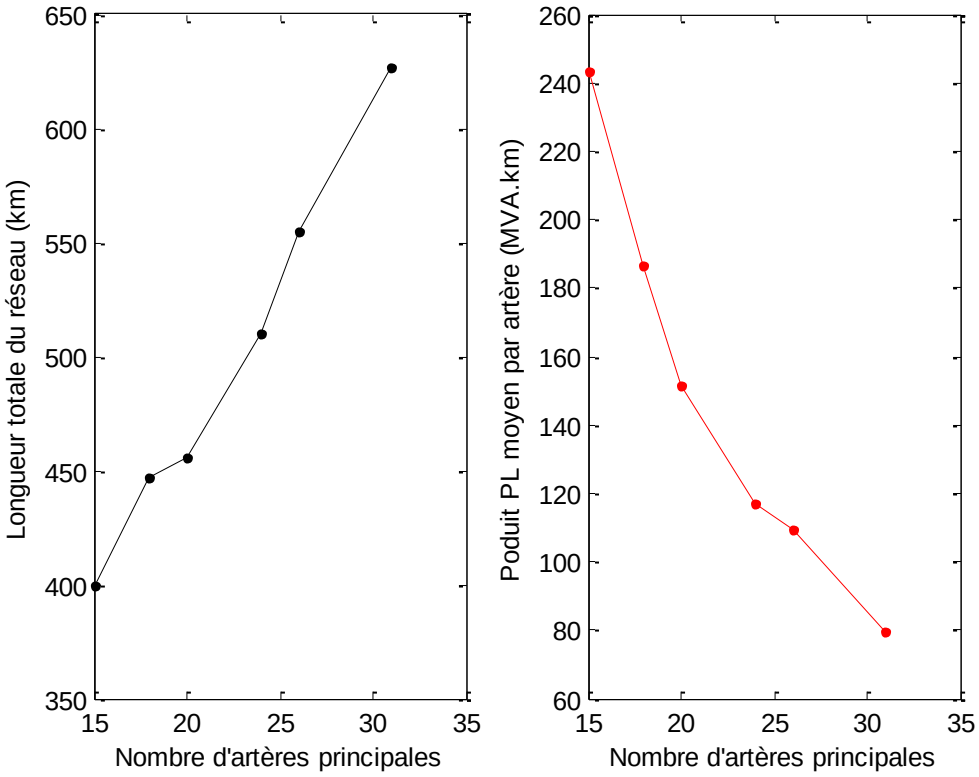


Figure IV-30 : Longueur totale du réseau et produit PL moyen en fonction du nombre d'artères principales

Impact du nombre d'artères sur les différents coûts du réseau

La Figure IV-31 montre les différents coûts obtenus en fonction du nombre d'artères. L'annexe 3 donne le détail des calculs de coûts. Le premier coût tracé est l'investissement initial regroupant le coût des conducteurs et de leur pose et le coût des organes de manœuvre télécommandés. Le second coût est celui du coût actualisé des pertes sur 30 ans. Le troisième coût est celui de l'énergie non distribuée actualisée sur 30 ans et le dernier, la somme de tous les coûts. Le coût actualisé est défini dans le chapitre I, section I.3.2.

La courbe représentant le coût global actualisé du réseau présente un minimum pour 20 artères. En effet, l'augmentation du nombre d'artère diminue l'énergie non distribuée car le nombre de secours est augmenté mais augmente la longueur totale de conducteurs et donc le taux de défaillance. Par ailleurs, le coût des pertes diminue également. En effet, étant données les sections normalisées utilisées, plus il y a d'artères et moins la puissance totale par artère est grande donc moins le courant est important. Enfin, l'investissement augmente avec le nombre d'artères. La présence d'un minimum résulte donc du choix discret de la section des conducteurs.

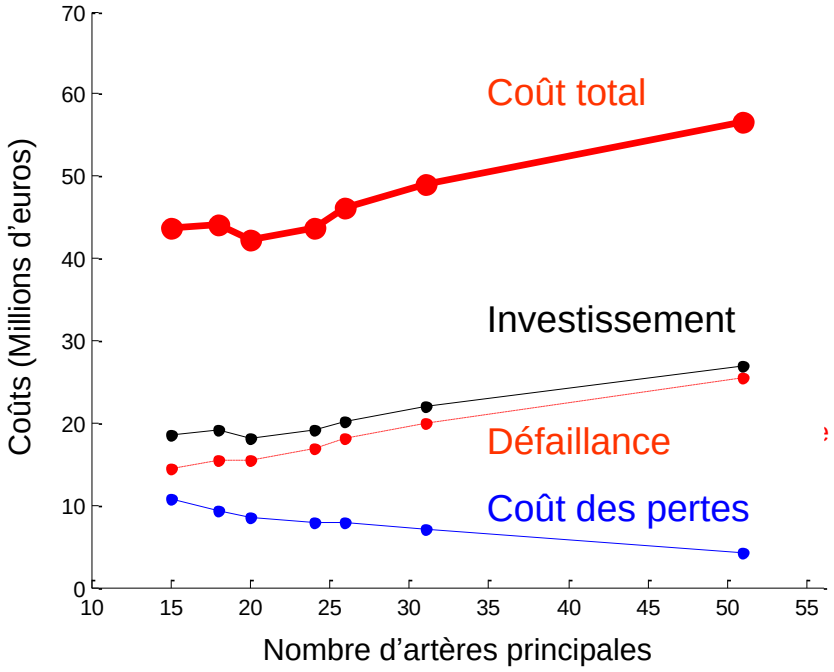


Figure IV-31 : Différents coûts du réseau en fonction du nombre d'artères principales

Impact du nombre d'artères sur la fiabilité du réseau

La Figure IV-32 présente le SAIDI et le SAIFI moyen par départ pour les différentes structures en coupure d'artère. On constate effectivement que l'augmentation du nombre d'artères principales permet d'améliorer les indices de fiabilité. En effet, dans le calcul de ces indices, deux temps ont été considérés : le temps associé aux organes de manœuvre télécommandés pour isoler le défaut, OMT, (5 min) et celui associé aux organes de manœuvre manuels pour isoler le défaut (60 min). Le nombre de postes HTA/BT est fixé donc le nombre d'organes de coupure est fixé. Or, le nombre d'organes de coupure télécommandés a été fixé à 5 par artère, le reste des organes de coupure étant manuels. Ainsi, si le nombre d'artères augmente, le nombre d'organes de coupure télécommandés augmente aussi et il y a donc moins d'organes manuels ce qui permet d'améliorer la fiabilité.

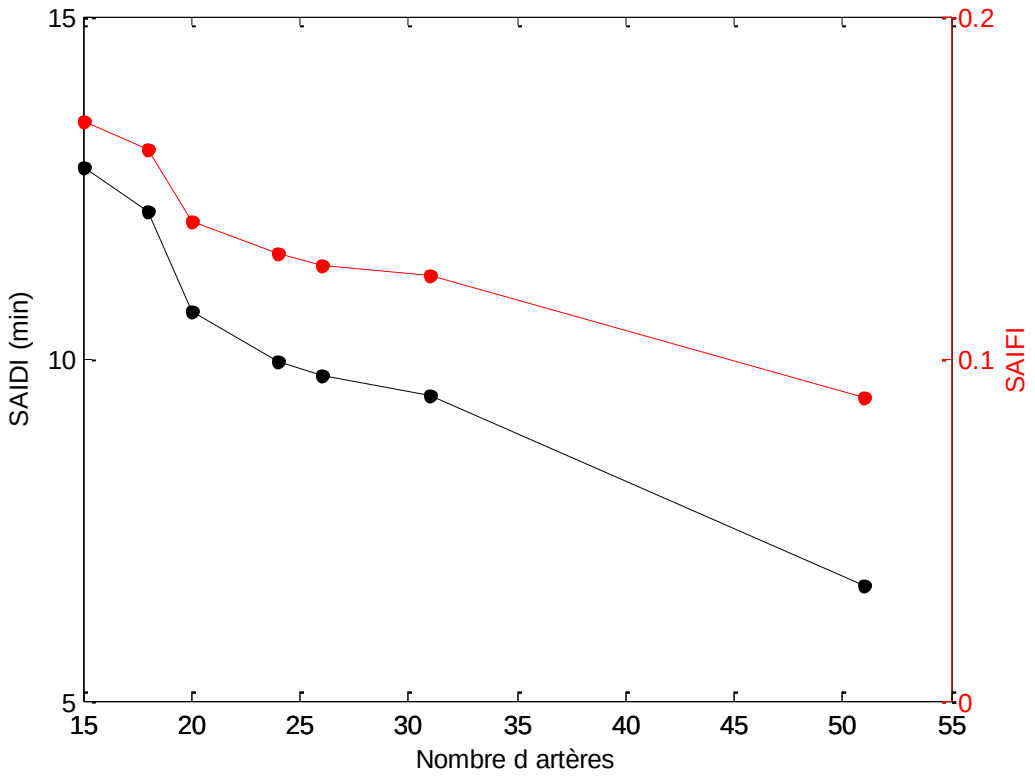


Figure IV-32 : Indices de fiabilité des structures en fonction du nombre d'artères principales

Impact du nombre d'artères sur le taux d'insertion maximal de GED

L'un des objectifs de nos structures cibles est d'augmenter le taux d'insertion de productions décentralisées dans le réseau. Dans le chapitre II, un algorithme reposant sur la méthode de Monte Carlo a été présenté. Cet algorithme permet d'évaluer le taux maximal d'insertion de GED c'est-à-dire la quantité maximale d'énergie qui peut être apportée par les GED tout en respectant les contraintes techniques (profil de tension correct et courants admissibles dans les conducteurs). Le reste de l'énergie provient alors du réseau de transport.

La Figure IV-33 montre l'évolution de ce taux d'insertion maximal en fonction du nombre d'artères. On peut constater qu'il diminue avec le nombre d'artères. On a vu au chapitre I que la contrainte principale dans les réseaux urbains est la contrainte de courant admissible. Ainsi, un nombre d'artères important conduit à des conducteurs de section moins importante et donc à un courant admissible plus petit. Or lorsque la proportion de GED augmente, l'excédent de production doit être exportée et les câbles doivent pouvoir tenir l'export de puissance. Par ailleurs, les conducteurs sont encore plus surdimensionnés si le nombre d'artères est petit car la puissance qu'ils doivent faire transiter en mode secours est alors beaucoup plus importante.

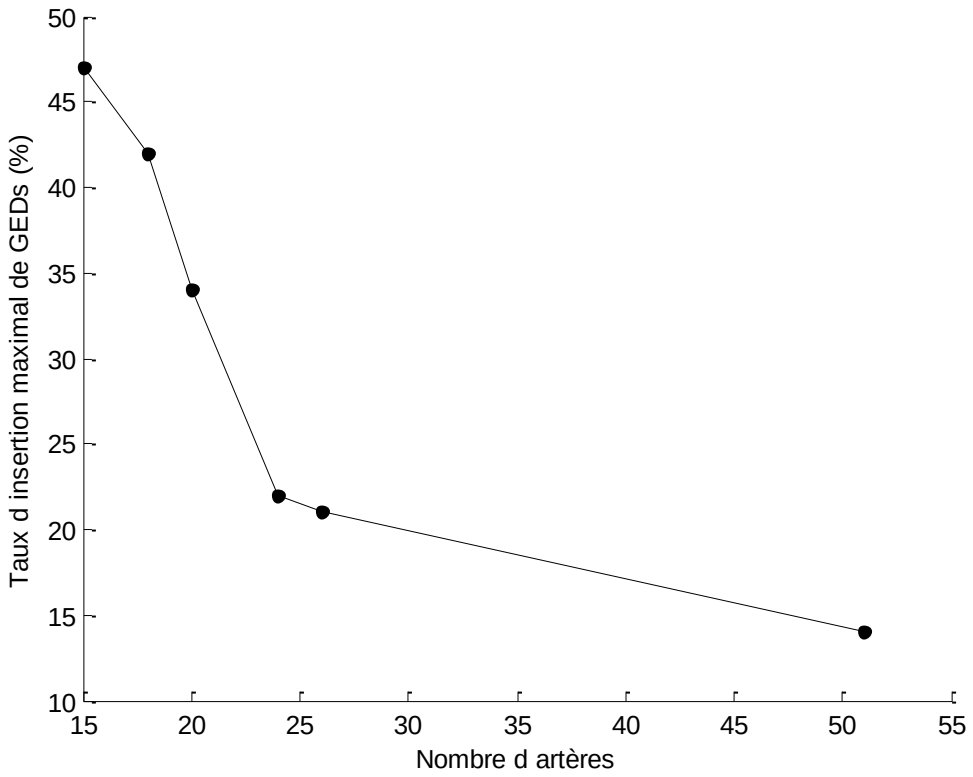


Figure IV-33 : Taux maximal d'insertion de GED en fonction du nombre d'artères principales

Il est donc nécessaire de faire un compromis entre le coût et la fiabilité qui suivent la même loi d'évolution et le pourcentage d'insertion de GED souhaité.

Comparaison entre les structures initiales et finales

Dans tous les cas envisagés, les structures initiales (longueurs minimales) sont meilleures en termes de fiabilité et de coût. Le SAIDI est meilleur d'environ 2 min. En effet, l'équilibrage des PL provoque une augmentation de la longueur des conducteurs. Or les coûts et les indices de fiabilité sont directement reliés à la longueur de conducteur utilisé. Cependant, l'un des objectifs de nos structures cibles est de garantir l'égalité des clients par rapport à la fourniture d'énergie. Cette égalité peut se vérifier en regardant l'énergie non distribuée de chaque départ et non l'énergie distribuée moyenne. La Figure IV-34 montre l'énergie distribuée obtenue pour chaque départ pour le réseau à 26 artères dans le cas initial et final. On constate que l'énergie moyenne non distribuée est plus élevée dans le cas final (traits horizontaux rouges). Cependant, elle est nettement plus équilibrée pour chaque départ. Si on calcule l'écart type de l'énergie non distribuée par rapport à la moyenne, on obtient 11% dans le cas final contre 80% dans le cas initial.

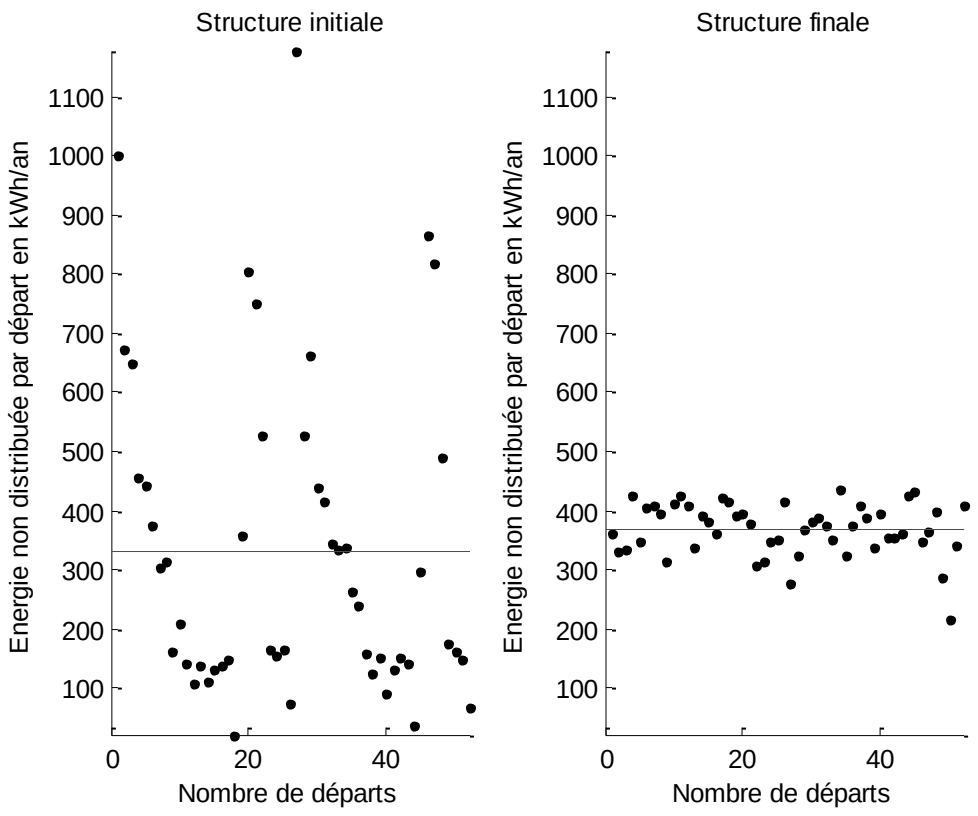


Figure IV-34 : Energie non distribuée par départ en fonction du nombre de départs

Compromis entre PL et L

Dans l'algorithme de construction de la coupure d'artère, l'objectif était d'équilibrer en PL en pénalisant le moins possible la longueur de conducteurs. Le paramètre longueur n'a donc pas été rentré explicitement dans la fonction objectif. Ainsi un compromis est à faire entre le niveau d'équilibre de PL souhaité et la longueur totale de conducteurs. En d'autres termes, quelle est la structure qui garantit un niveau d'équilibrage suffisant pour une longueur totale de conducteur la plus petite possible ? Nous avons considéré arbitrairement qu'à partir d'un écart type de PL par rapport à la moyenne de 10%, la solution obtenue pouvait être considérée comme acceptable. Ainsi, dès que l'écart type atteint 10%, nous choisirons la structure dont la longueur est la plus petite.

IV.3.3. **Synthèse**

Le paramètre de la fonction objectif de construction de la coupure d'artère est l'équilibrage des PL tout en minimisant le plus possible la longueur de conducteur utilisée car le critère équilibrage des produits PL et minimisation de la longueur L sont deux critères antagonistes. Le nombre d'artères principales a un impact sur le coût global, la fiabilité et le

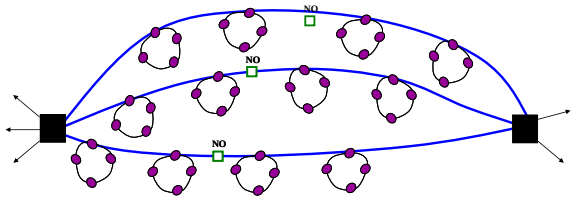
taux de GED que l'on peut insérer dans le réseau tout en respectant les contraintes techniques. Un compromis doit donc être fait entre le coût, la fiabilité et l'insertion de GED souhaitée. Si le coût et la fiabilité sont meilleurs avec l'augmentation du nombre d'artères, ce n'est pas le cas pour le taux d'insertion de GED. Le taux est divisé par deux lorsque l'on passe de 18 à 26 artères. En revanche, le coût est 1,2 fois plus grand avec 26 artères et la fiabilité est moins bonne de 2 min et 20s.

IV.4. Outil automatique de construction de boucles hybrides

IV.4.1. **Algorithme proposé**

Rappel des objectifs

L'architecture des boucles hybrides ainsi que son exploitation sont décrites dans le chapitre II. Pour mémoire, la Figure IV-35 rappelle le schéma des boucles ainsi que les objectifs et contraintes. Les artères principales sont exploitées en radial et les boucles en maillées. Chaque boucle possède une protection. Ainsi, si un défaut apparaît dans une boucle, les autres boucles ne seront pas touchées. Par ailleurs, chaque boucle étant reliée à l'artère principale par des organes de manœuvres télécommandés, si un défaut apparaît sur l'artère principale, les clients seront rapidement réalimentés.



Objectifs

- Equilibrer le produit PL des artères
- Minimiser la longueur totale de conducteur

Figure IV-35 : Rappel de l'architecture en boucles hybrides

Description générale de l'algorithme

L'algorithme proposé pour construire cette architecture est une méthode heuristique (cf chapitre III) comme celui utilisé pour la coupure d'artère car il n'existe pas d'algorithme capable de trouver la solution optimale en un temps polynomial. Dans un premier temps, une solution initiale est mise en place. Le but est de construire des boucles qui seront, par la suite, reliées entre elles par des artères reliant elles-mêmes les postes sources. De façon à limiter la longueur des conducteurs, un partitionnement en damier incliné selon la direction des deux postes sources nous a semblé adapté. Par ailleurs, cette solution permet d'éviter, de manière sûre, les croisements entre boucles.

Mise en place de la solution initiale

L'algorithme de construction de la solution initiale est synthétisé dans le Diagramme IV-4. Dans un premier temps, l'utilisateur choisit le nombre de boucles à construire puis les étapes suivantes créent automatiquement un partitionnement en damier incliné en fonction du nombre de boucles choisies. La droite reliant les deux postes sources donne l'inclinaison du damier. Ainsi, si les deux postes sources n'ont pas la même ordonnée, le damier sera incliné selon la direction de cette droite. Enfin, les boucles sont construites grâce à l'algorithme du voyageur de commerce expliqué dans le chapitre III.

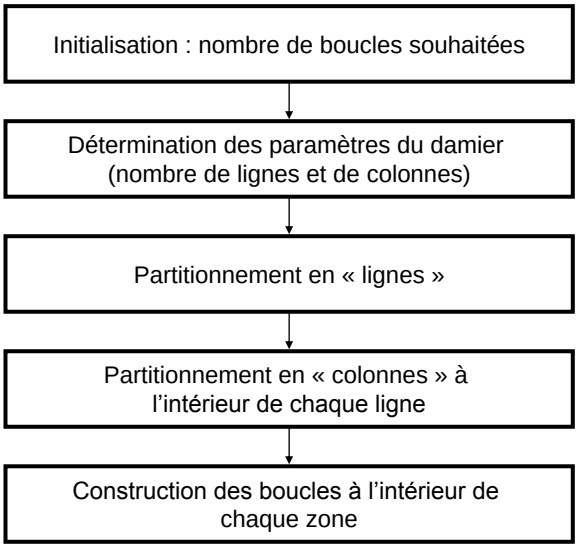


Diagramme IV-4 : Algorithme de construction de la solution initiale

Etape 0 : Données

Soit un réseau composé de 2 postes sources PS_1 et PS_2 et de n_c consommateurs. On veut construire n boucles dans ce réseau. Cela correspond à $\frac{n_c}{n}$ points par boucle en moyenne. Si $\frac{n_c}{n}$ n'est pas entier, alors on prendra la valeur arrondie à l'entier le plus proche. On note $arr(\frac{n_c}{n})$ cet entier.

Etape 1 : Détermination des paramètres du damier (nombre de lignes et nombre de colonnes)

Si n est un carré parfait, c'est-à-dire, s'il existe un entier m tel que n = m², alors le nombre de « lignes » du damier à construire est m. Si m n'est pas un entier alors on arrondira $\sqrt{n}$ à l'entier le plus proche. On note m = arr($\sqrt{n}$).

Soit N_i le nombre de colonnes de la ligne i du damier.

Soit C_i le nombre de consommateurs de la ligne i.

La dernière ligne du damier aura plus ou moins de points que les autres lignes en fonction des arrondis effectués. D'où :

Pour i = 1, …, m-1,

$$N_i = \mathrm{arr}(\frac{n}{m})$$

$$C_i = N_i \times \frac{n_c}{n}$$

Pour m

$$N_m = n - [(m-1) \times \mathrm{arr}(\frac{n}{m})]$$

$$C_m = n - \frac{n_c}{n} \times (m-1)$$

Etape 2 : Partitionnement en lignes du damier

Pour construire les lignes du damier, on considère le consommateur P_{ext} du demi plan inférieur délimité par la droite (PS_1 PS_2) dont la distance par rapport à la droite (PS_1 PS_2) est la plus grande. Cela donne une limite du damier. On considère alors la droite (E) parallèle à (PS_1 PS_2) et passant par P_{ext}. On translate alors cette droite vers le haut en mémorisant les points dépassés. Dès que le nombre de points cumulés est égal à C_1, la ligne numéro 1 du damier est construite et ainsi de suite.

Etape 3 : Partitionnement en colonnes du damier

Pour construire les colonnes d'une ligne donnée, on trace la droite perpendiculaire à (PS_1 PS_2). Cette droite est alors translatée et les colonnes sont construites sur le même principe que la création des lignes. Dans chaque zone créée, il y a $\mathrm{arr}(\frac{n_c}{n})$ sauf dans la dernière colonne de la dernière ligne en raison des différents arrondis effectués.

Pour comprendre la méthode de construction du damier, prenons l'exemple simple de la Figure IV-36 constitué de 31 nœuds consommateurs. On souhaite tracer 5 boucles. Il doit donc y avoir environ $\mathrm{arr}(\frac{31}{5}) = 6$ consommateurs par boucle.

5 boucles ne peuvent être inscrites dans un carré parfait (subdivisé parfaitement) donc le nombre de lignes du damier est $\text{arr}(\sqrt{5}) = 2$. Le nombre de colonnes de la première ligne sera donc $N_1 = \text{arr}(\frac{5}{2}) = 3$ et celui de la deuxième ligne $N_2 = 5 - [(2-1) \times \text{arr}(\frac{5}{2})] = 2$. La première ligne du damier aura donc 6 x 3 = 18 points et la deuxième les points restants c'est-à-dire 15.

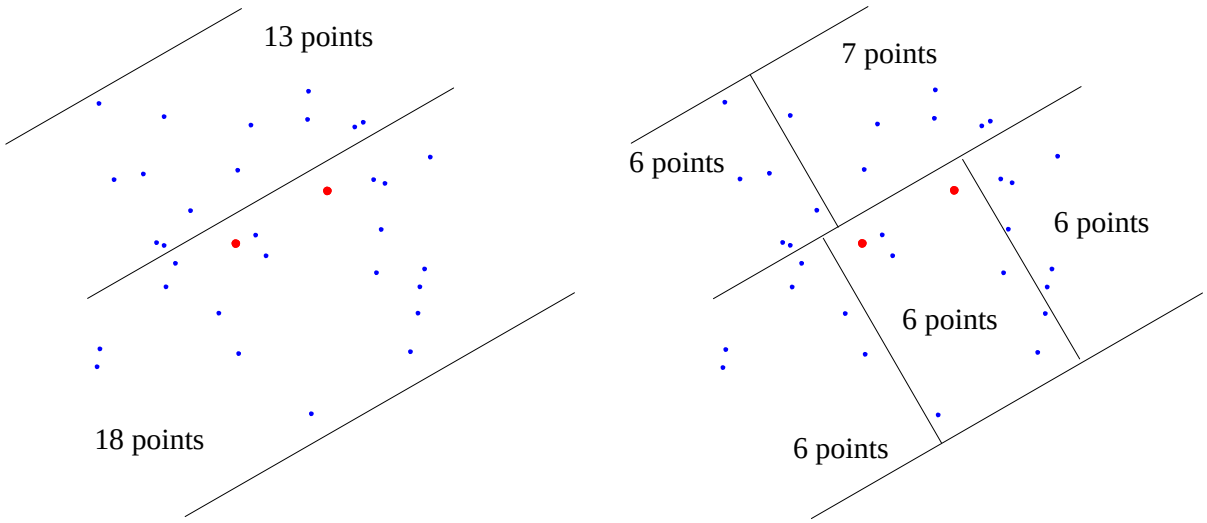
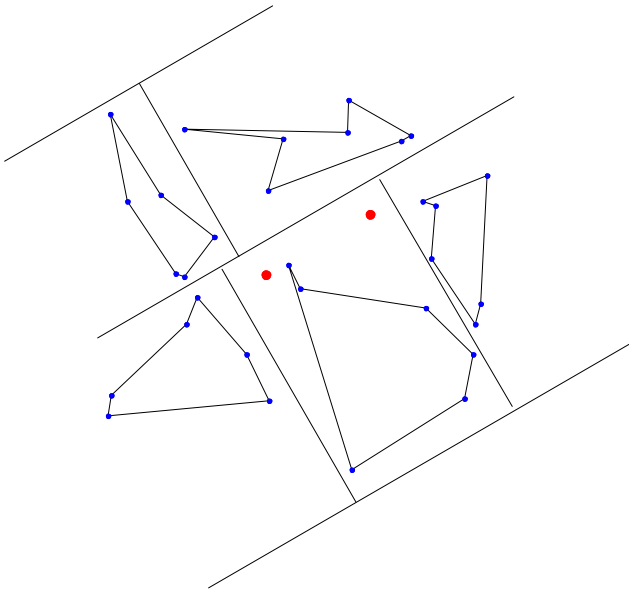


Figure IV-36 : Mise en place du damier de la solution initiale sur un exemple simple

Algorithme d'amélioration

L'algorithme d'amélioration utilisé est le même que celui de la coupure d'artère. La seule différence est que dans le cas de la coupure d'artère on connaissait les artères voisines. Dans le cas des boucles, il serait trop long de chercher les boucles voisines donc à chaque itération, on calcule les roues biaisées pour toutes les boucles ce qui de plus permet d'éviter de se faire piéger dans un minimum local. Une fois le point choisi et inséré dans la boucle receveuse, on vérifie qu'il n'y a pas d'intersection entre les boucles. Nous allons illustrer l'algorithme d'amélioration sur l'exemple simple de la Figure IV-36. La Figure IV-37 présente le réseau initial obtenu et le réseau final où le produit PL de chaque boucle est équilibré.



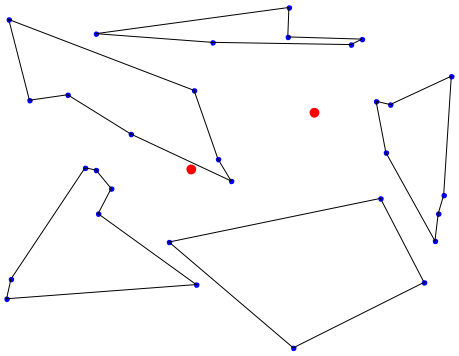
PL = [10,4 13,2 7,0 5,5 13,8] MVA.km

PLmoy = 10 MVA.km

E = 73,83%

EC = [3,8 32,6 -29,9 -44,8 38,25]

L = 59,23 km



PL = [10,7 10,7 10,9 10,8 10,5] MVA.km

PLmoy = 10,77 MVA.km

E = 2,73%

EC = [-0,4 -0,3 2,0 0,4 -1,6] (%)

L = 65,76 km

Figure IV-37 : Solution initiale et finale obtenues sur un exemple simple

Raccordement des boucles

Une fois les boucles construites, il est nécessaire de les raccorder aux postes sources par des artères principales. On rappelle que le PL de chaque artère doit également être équilibré. Il s'agit donc finalement de construire un réseau en coupure d'artère mais au lieu de charges en coupure d'artère, on a des boucles en coupure d'artère. L'algorithme utilisé sera donc le même que celui utilisé pour construire la coupure d'artère. Cependant chaque consommateur représentera une boucle dont la puissance sera la puissance totale de la boucle. Les coordonnées du point représentant une boucle seront celles du point dont la distance à un poste source est minimale.

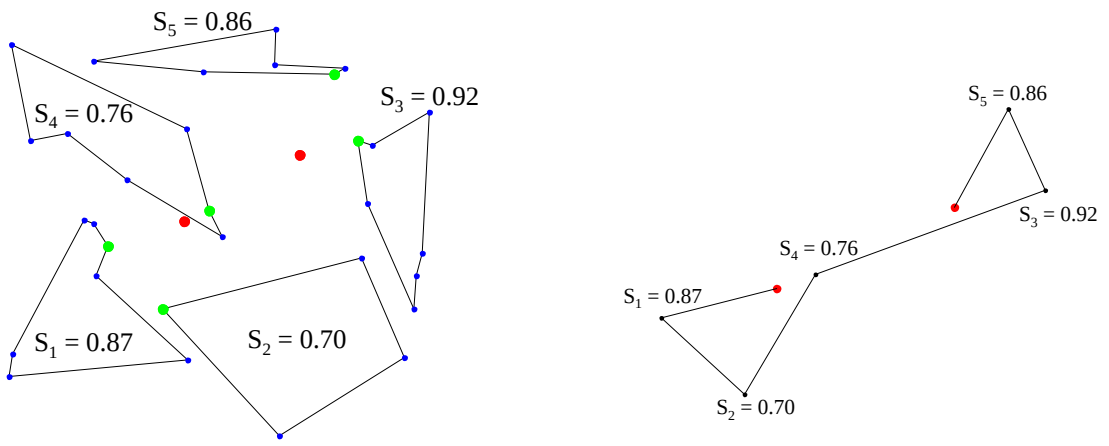


Figure IV-38 : Agglomération des boucles en noeuds

IV.4.2. **Exploitation des résultats**

Le programme de construction des boucles hybrides a été effectué en faisant varier le nombre de boucles. L'écart type des PL par rapport à la moyenne est un paramètre libre. Nous avons choisi de vous présenter les résultats obtenus pour un écart type de 10%.

A titre d'exemple, la Figure IV-39 montre le réseau en boucles hybrides obtenu pour 10 boucles. Les postes sources sont représentés par les nœuds rouges et l'emplacement des organes de coupure normalement ouvert par les nœuds verts. Le lecteur trouvera ce réseau en taille plus grande dans l'annexe 4.

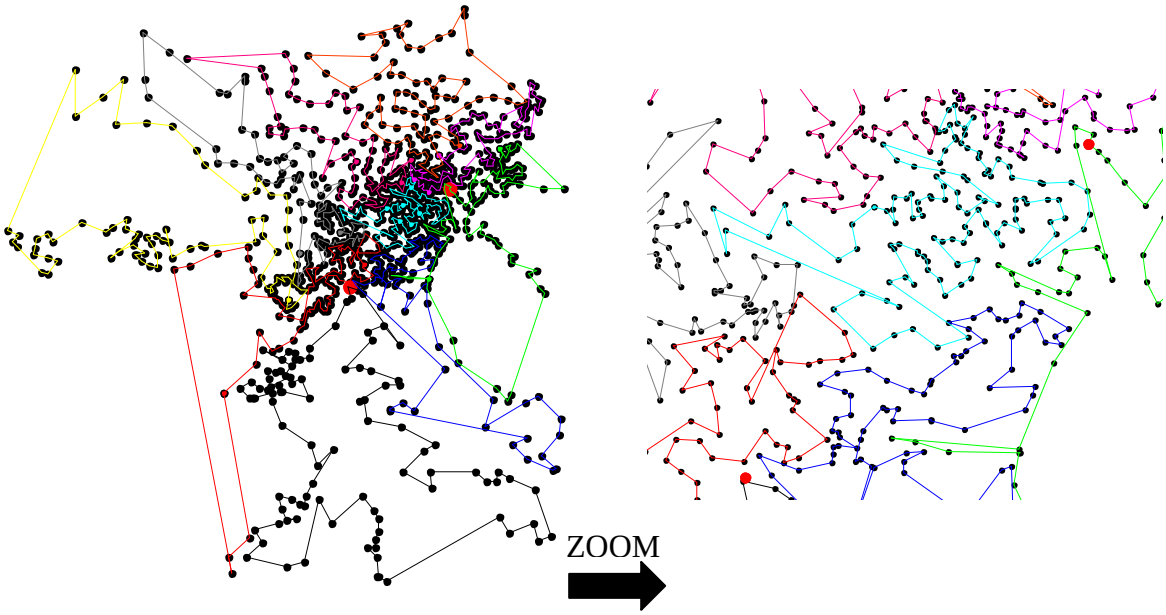


Figure IV-39 : Réseau en boucles hybrides obtenus pour 10 boucles

- Impact du nombre de boucles

De la même façon que nous avons vu que le nombre d'artères d'un réseau en coupure d'artères a un impact sur les différents coûts, les indices de fiabilité et le taux d'insertion de GED, nous allons voir quel est l'impact du nombre de boucles d'une architecture en boucles hybrides sur ces différents paramètres.

Impact sur les différents coûts du réseau

Le nombre de boucles minimal est déterminé par la faisabilité de les lier. En effet, s'il y a peu de boucles, il y aura nécessairement peu d'artères pour les lier et donc de très fortes puissances appelées. Nous nous sommes fixés des conducteurs normalisés et pour un nombre de boucles trop faible, il faudrait utiliser des conducteurs de section beaucoup plus importante. C'est le cas par exemple de la structure à 10 boucles.

Deux structures à 20 boucles et à 33 boucles ont été comparées. La Figure IV-40 montre les différents coûts obtenus. La conclusion est identique à celle pour le réseau en coupure d'artère. L'investissement initial plus élevé pour une structure à 33 boucles est rentabilisé sur 30 ans et devient plus économique qu'une structure à 20 boucles.

Si on compare ce graphique de coût avec celui obtenu pour la coupure d'artère, on constate que les coûts d'investissement et des pertes sont du même ordre de grandeur. En revanche le coût de l'énergie non distribuée est nettement moins important dans le cas des boucles hybrides. Ceci est lié au fait que cette structure autorise simplement le déploiement de protections en réseau (au raccordement de chaque boucle) et une reprise de service automatique par boucle avec des interrupteurs qui se réenclenchent sur défaut, ceci améliore les indices de fiabilité. Il faut cependant noter que nous n'avons pas pris en compte tous les coûts réels liés à l'achat du matériel. Les coûts des protections et des automatismes des boucles a été approximée en utilisant le coût d'un organe de coupure télécommandé.

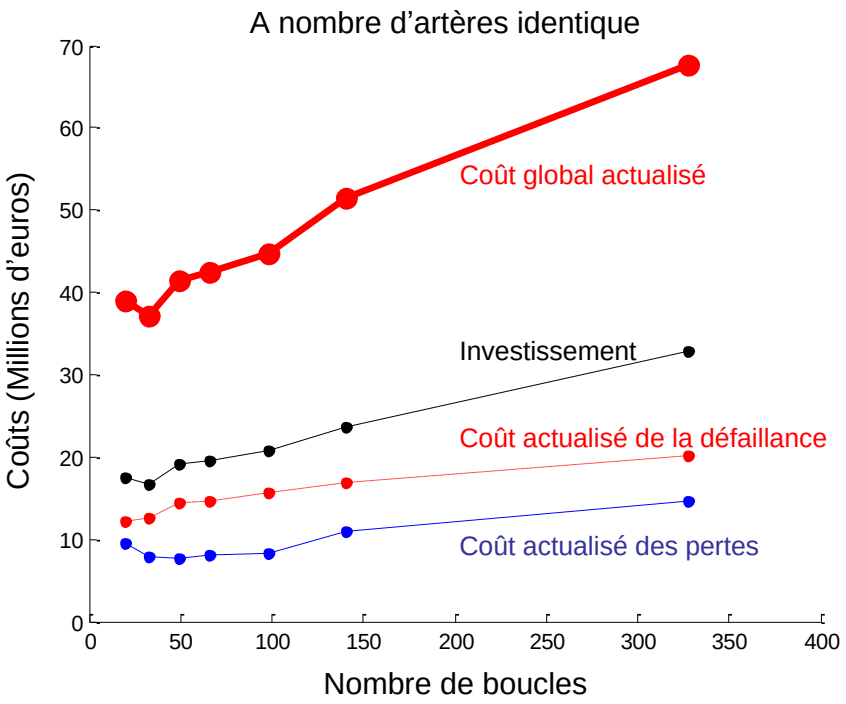


Figure IV-40 : Différents coûts de la structure en fonction du nombre de boucles

Impact sur la fiabilité

La Figure IV-41 montre le SAIDI et SAIFI obtenus avec les boucles hybrides. Le SAIDI est divisé par 2 voire par 3 par rapport aux structures en coupure d'artère ou le meilleur SAIDI obtenu était de 9 min.

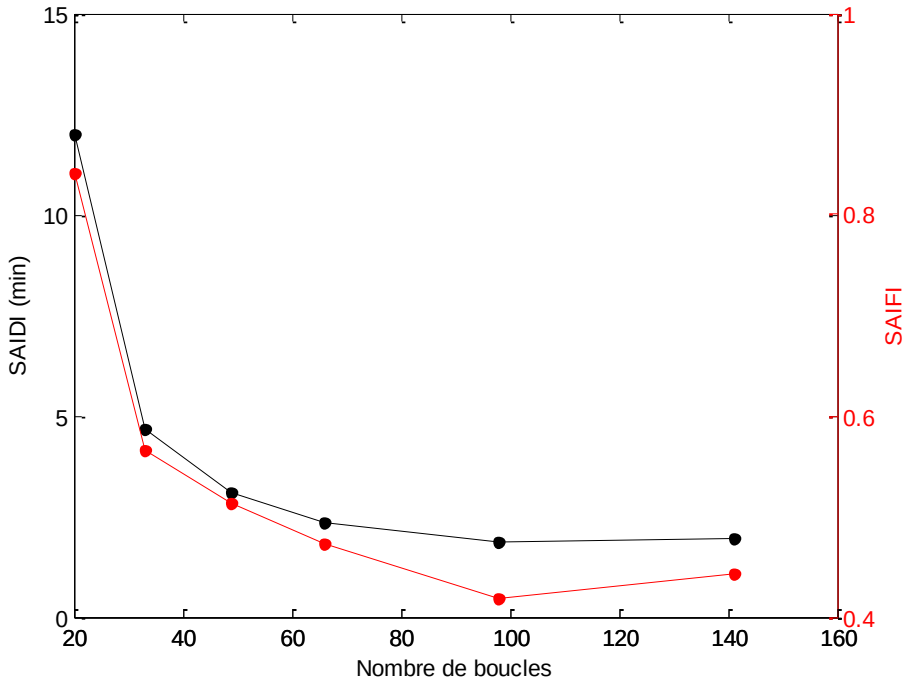


Figure IV-41 : Indices de fiabilité

- Taux d'insertion de GED

La Figure IV-42 donne le taux d'insertion maximal de GED en fonction du nombre de boucles sur le réseau. On remarque que celui-ci tend à augmenter avec le nombre de boucles (même si l'on observe une faible décroissance entre 45 et 100 boucles). Ceci peut s'expliquer par une meilleure répartition des flux de puissance.

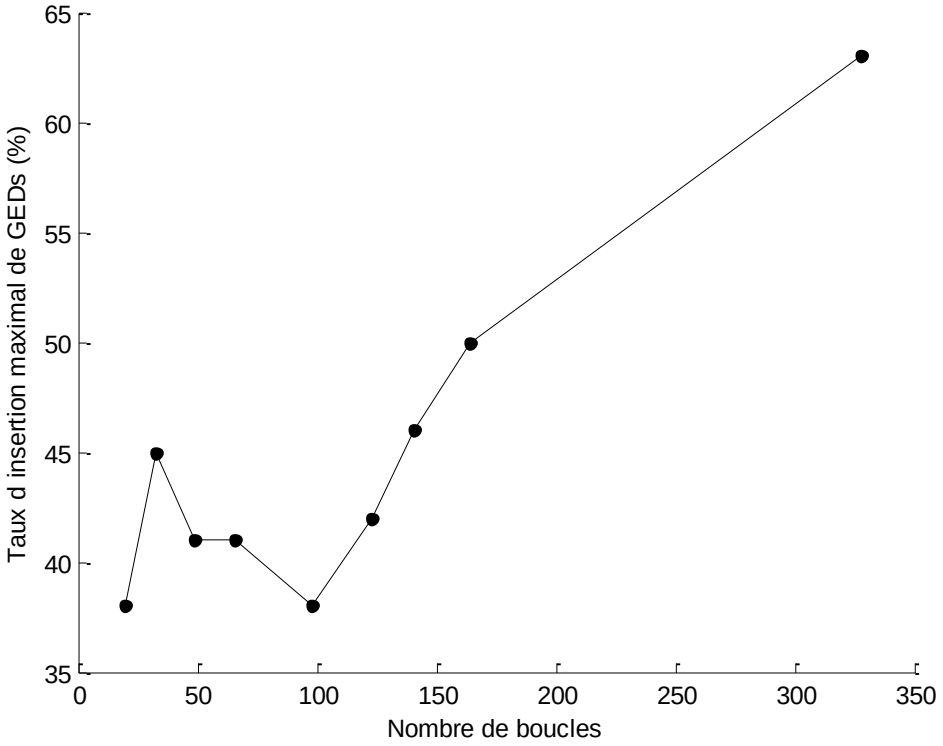


Figure IV-42 : Taux d'insertion maximal de GED en fonction du nombre de boucles

IV.4.3. **Synthèse**

Les résultats obtenus entre la coupure d'artère et les boucles hybrides sur notre réseau de test tendent à monter que les boucles hybrides permettent d'améliorer les indices de fiabilité ainsi que le taux maximal d'insertion de GED. La Tableau IV-3 résume les différents résultats obtenus.

	Coupures d'artères	**Boucles hybrides**
SAIDI (min)	[12,8 - 6,7]	[12 - 1,93]
SAIFI	[0,17 - 0,08]	[0,8 - 0,44]
END (kWh)	[846 - 111,53]	[90 - 223]
Taux maximal d'insertion de GEDs (%)	[47 - 14]	[38 - 42]
Coût global (M€)	[43,7 - 56,5]	[39 - 51,4]
Longueur de conducteur (km)	[399,6 - 839,2]	[423 - 585]
Volume de conducteur (m^3)	[102,8 - 110]	[85,4 - 98,6]

Tableau IV-3 : Comparaison des résultats obtenus pour la coupure d'artère et les boucles hybrides

Le nombre maximal de boucles et d'artères testés dans les deux cas de réseaux est dicté par la convergence de l'algorithme. En effet, en deçà d'un certain nombre de consommateurs par boucles ou par artère, l'algorithme n'arrive pas à équilibrer le produit PL. Cela est dû à la grande différence entre les puissances des charges (de quelques kW à 1 ou 2 MW) et à leur répartition non homogène dans le réseau. Ainsi, il est même possible qu'il n'existe pas de solution dans ces cas là. Nous avons donc fait des tests pour le nombre maximal d'artères possibles obtenus par la construction géométrique initiale (51 artères) et pour le nombre maximal de boucles possible (3 consommateurs par boucle ce qui correspond à 328 boucles). En effet, le produit PL n'ayant pas d'incidence sur le taux maximal de production décentralisée, cela permet de voir si un grand nombre de boucles ou d'artères permet d'augmenter le taux maximal de GED dans le réseau et quelles architectures sont les plus favorables.

IV.5. Conclusion générale

Dans ce chapitre IV, nous avons proposé deux algorithmes de construction de la coupure d'artère et des boucles hybrides. L'objectif était d'obtenir des réseaux dont le produit PL était équilibré tout en minimisant la longueur afin de garantir une égalité des clients par rapport à la continuité de fourniture, doctrine actuellement suivie en France par EDF. Par ailleurs, ces structures devaient permettre d'augmenter le taux d'insertion de GED dans le réseau et de garantir une bonne qualité de fourniture. Les réseaux obtenus répondent aux différents objectifs. Par ailleurs, le nouveau réseau proposé, la structure hybride, semble avoir de meilleures performances que la coupure d'artère.

Le critère que nous avons privilégié est celui de l'égalité des clients par rapport à la continuité de fourniture de l'énergie. D'autres paramètres peuvent également être pris en compte. Si le planificateur préfère privilégier uniquement la longueur alors il existe des méthodes d'optimisation pour résoudre ce problème. Celles-ci ont été abordées dans les chapitres III et IV. On peut également envisager des fonctions multi objectif afin de prendre en compte plusieurs critères à la fois.

Dans tous les cas, les travaux de ce chapitre ont montré qu'il était possible d'augmenter le taux d'insertion de productions décentralisées en travaillant sur les architectures que ce soient des architecture traditionnelles ou nouvelles.

Chapitre V

« J'aime la force, et de la force que j'aime, une fourmi peut en montrer autant qu'un éléphant. »

Stendhal

Chapitre V

Recherche de solutions complémentaires

Dans le chapitre I, nous avons présenté les principes temporels de la planification à travers la notion de schémas directeurs. Dans le chapitre IV, nous avons construit des architectures cibles à atteindre à l'horizon de 30 ans et nous avons estimé leur coût. La phase suivante de la planification est de définir la succession des travaux années après années pour atteindre la cible. En effet, ces réseaux cibles peuvent être assez différents des réseaux existants et donc une mutation directe du réseau serait trop coûteuse et risquée car les résultats obtenus par la planification long terme sont susceptibles de changer si les données et hypothèses sont modifiées.

Le but de cette partie est donc de mettre en place un algorithme donnant l'ensemble des lignes à construire et à déconstruire pour chaque année jusqu'à atteindre la cible tout en suivant la trajectoire qui minimise le coût d'exploitation du réseau durant toute cette mutation.

V.1. Transition vers les architectures cibles

Les réseaux cibles sont mis en place à l'horizon de 30 ans. Ces réseaux peuvent être très différents des réseaux existants. On peut considérer qu'il existe toujours une solution pour

muter le réseau actuel vers le réseau cible mais cette solution peut ne pas respecter forcément les contraintes de transitions. Ces contraintes de transition regroupent le respect d'un budget annuel fixé et le respect des contraintes techniques (plan de tension, courant dans les conducteurs). Par ailleurs, le coût actualisé total au bout de 30 ans varie selon la solution adoptée. En effet, ce coût total regroupe les investissements à date donnée, les coûts d'exploitation et le coût de l'énergie non distribuée annuels. A la fin de la période, les investissements sont inchangés mais le coût d'exploitation et de l'énergie non distribuée dépend de chaque architecture intermédiaire.

Ainsi, l'objectif de cette partie consiste à trouver la succession de travaux à effectuer chaque année pour muter le réseau initial vers le réseau cible en minimisant le coût total tout en respectant les contraintes de transition et d'exploitation.

V.2. Problème combinatoire

Le problème de planification des investissements est un problème combinatoire. Nous allons pouvoir le constater sur un exemple simple.

Soient les réseaux de la Figure V-1 constitués d'un poste source (nœud N°1), de 15 consommateurs (nœud N°2 au nœud N°16) et de 15 lignes. Toutes les lignes sont en aluminium et ont une section de 95mm². Tous les consommateurs consomment individuellement 400 kW. La différence entre les deux réseaux provient donc seulement de la configuration des lignes. La Figure V-1 présente le réseau initial et celui vers lequel on veut arriver en une durée de 5 ans car c'est une configuration où il y a moins de pertes. Le nœud 1 représente l'emplacement du poste source.

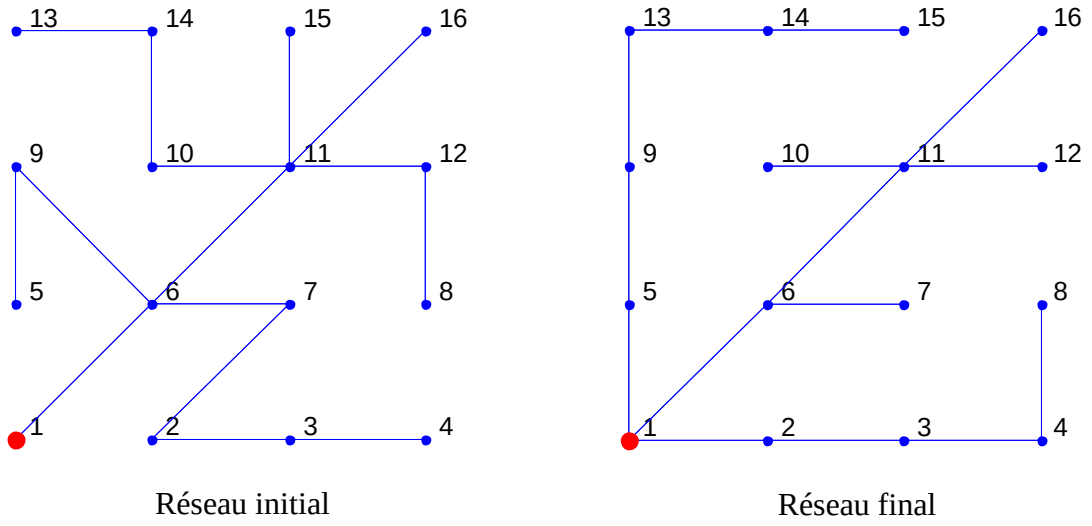


Figure V-1 : Cas d'étude

La liste des lignes à construire et à déconstruire est alors donnée le Tableau V-1.

N° de la ligne	Extrémité 1	Extrémité 2
1	1	2
2	4	8
3	5	1
4	9	13
5	14	15

Lignes à construire

N° de la ligne	Extrémité 1	Extrémité 2
1	2	7
2	8	12
3	9	6
4	10	14
5	15	11

Lignes à déconstruire

Tableau V-1 : Listes des lignes à construire et à déconstruire

Avec ces paramètres, il est donc possible de lister toutes les combinaisons possibles et donc de trouver la solution optimale. Avec cette méthode, on trouve 9275 combinaisons possibles. En effet, pour l'année 1, il est possible de construire 0, 1, 2, 3, 4 ou 5 lignes. Pour chaque solution de construction, il peut y avoir plusieurs possibilités de déconstructions. Ainsi pour l'année 1, il y a 32 choix possibles de constructions (Le choix de ne rien construire, 5 combinaisons pour 1 ligne à construire, 10 combinaisons de 2 lignes à construire, 10 combinaisons de 3 lignes à construire, 5 combinaisons de 4 lignes à construire et 1 combinaison pour 5 lignes à construire ce qui donne 1+5+10+10+5+1 = 32). Sur le dessin de la Figure V-1, on voit que si on construit la ligne (4-8) alors on peut déconstruire soit la ligne (2-7) soit la ligne (8-12). Ainsi, on a donc 65 solutions possibles à l'année 1 de combinaison de construction/déconstruction.

Si on envisage les travaux sur 6 ans au lieu de 5 alors le nombre de combinaisons monte à 24021 possibilités. Sachant que les réseaux électriques réels ont plusieurs centaines de nœuds et que l'horizon des études de planification est de 30 ans, nous constatons bien que la combinatoire du problème peut vite exploser et s'avérer rédhibitoire pour une énumération exhaustive de toutes les solutions possibles.

De nombreux articles de la littérature ont exploré cette classe de problèmes [IPP 2005], [PAU 2006]. Une méthode qui semble la mieux adaptée pour résoudre ce type de problème est l'algorithme évolutionnaire des colonies de fourmis [DRE 2005]. Le parallèle entre cette méthode métaheuristique et notre problème est frappant. En effet, cet algorithme repose sur le comportement réel des fourmis qui sont capables de trouver une trajectoire optimale en partant de la fourmilière pour aller vers la source de nourriture. Ce comportement ressemble à

notre problème qui consiste à chercher une trajectoire pour aller du réseau initial vers le réseau final.

V.2.1. Algorithme des colonies de fourmis pour la recherche de chemins d'investissements optimaux

Principes de base de l'algorithme

L'algorithme des colonies de fourmis appartient aux algorithmes métaheuristiques. Il repose sur le comportement réel des fourmis qui communiquent entre elles par le biais de substances volatiles appelées phéromones. Lorsque les fourmis partent chercher de la nourriture, elles déposent des phéromones (qui ont une évaporation donnée) sur le chemin dans le but d'attirer leurs congénères vers la nourriture. Ainsi, rapidement, toutes les fourmis empruntent le chemin le plus court, chemin où la quantité de phéromones sera plus grande.
La Figure V-2 illustre le comportement des fourmis dans l'exemple d'un obstacle à contourner. Le schéma 1 montre un obstacle situé entre la fourmilière d'où partent les fourmis et la nourriture. Dans le schéma 2, une fourmi part de la fourmilière. Elle dépose des phéromones sur le chemin (schéma 3). Lorsqu'elle arrive devant l'obstacle, il y a 50% de chance qu'elle le contourne par la gauche et 50% de chance qu'elle le contourne par la droite (schéma 4). Selon la décision prise, la fourmi va arriver plus ou moins vite jusqu'à la nourriture (schéma 5). La fourmi qui aura pris le chemin le plus court va déposer des phéromones au retour aussi (schéma 6). Ainsi, au bout d'un certain temps, le chemin le plus court aura une quantité plus importante de phéromones que l'autre chemin (schéma 7). Toutes les fourmis prendront alors le même chemin pour aller chercher la nourriture et ce sera le chemin le plus court (schéma 8).

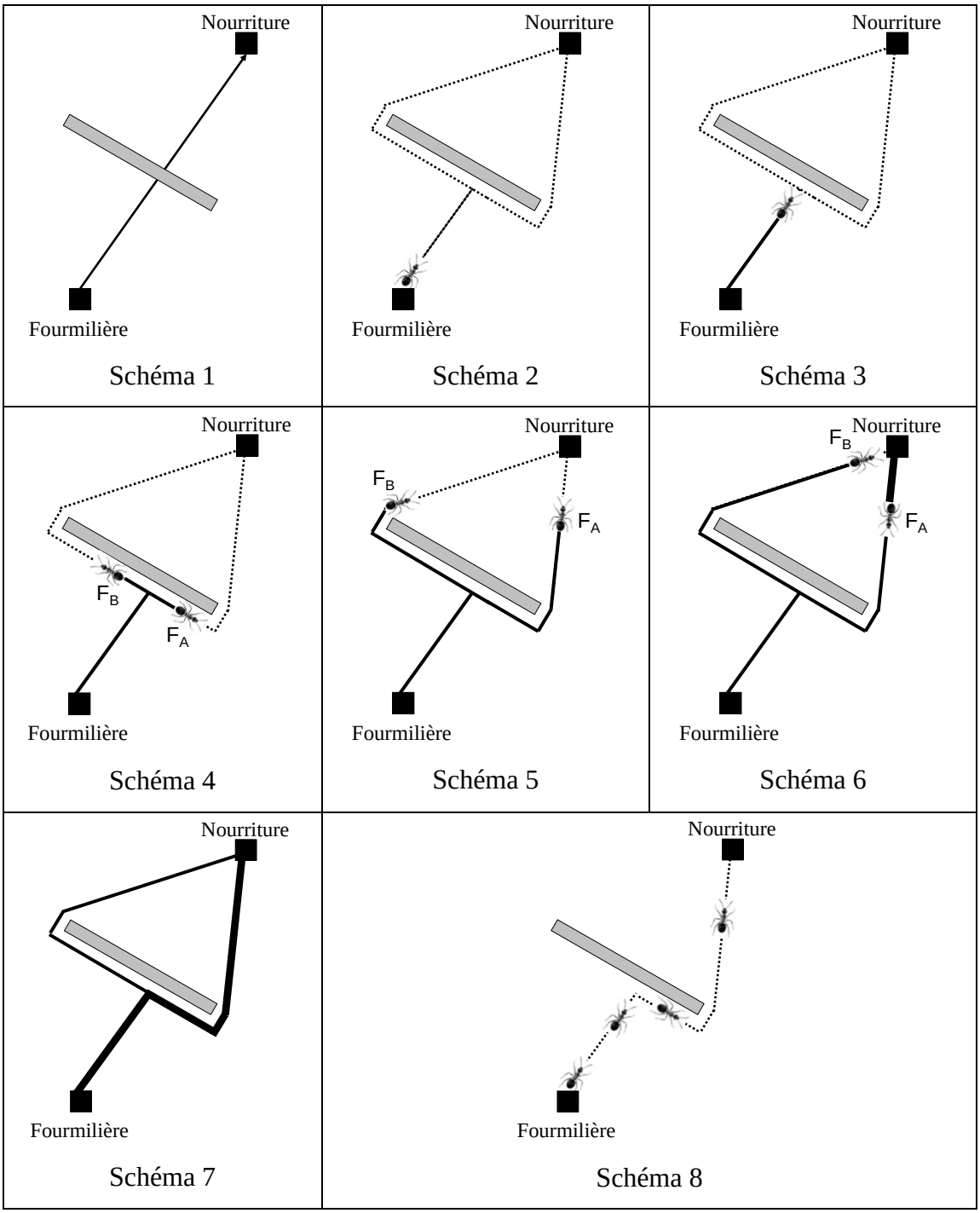


Figure V-2 : Illustration du comportement des fourmis dans l'exemple d'un obstacle à contourner

Le premier algorithme des colonies de fourmis nommé « Ant System » (AS) a été conçu pour résoudre le problème du voyageur de commerce [DRE 2005] décrit dans le chapitre III. C'est pourquoi nous exposerons son principe à l'aide de cet exemple.

Algorithme des colonies de fourmis pour la résolution du problème de voyageur de commerce « Ant System »

Le problème du voyageur de commerce consiste à trouver une tournée de coût minimal reliant n villes données. Le voyageur de commerce ne doit passer qu'une seule fois par chaque ville et revenir à son point de départ à la fin. Le coût de la tournée est la longueur totale.

Les différentes étapes de l'algorithme sont les suivantes :

- Initialisation : le nombre d'itération iter et le nombre de fourmis k sont fixés.

- Construction d'une tournée : Chaque fourmi k construit une tournée. La première ville i est sélectionnée selon une loi uniforme : il s'agit de la ville de départ. Puis la ville suivante j est sélectionnée selon la probabilité $p_{ij}^{k}(iter)$ définie par la formule (V-1). Deux paramètres α et β permettent de privilégier l'indicateur de phéromone ou la visibilité. Un compromis entre ces deux paramètres est nécessaire. En effet, si on prend α = 0, alors les villes ne sont choisies qu'en fonction de la distance des unes par rapport aux autres. En revanche, si on prend β = 0, seule la phéromone, donc le critère aléatoire, permet de sélectionner les villes voisines.

$$p_{ij}^{k}(iter) = \frac{pheroq_{ij}^{\alpha}(iter) \times \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{l \in J_i^k} pheroq_{il}^{\alpha}(iter) \times \eta_{il}^{\beta}} \qquad \text{(V-1)}$$

Avec :

- η_{ij} = matrice visibilité = inverse de la distance entre les villes i et j,
- α = paramètre contrôlant l'importance de l'intensité de la piste de phéromone,
- β = paramètre contrôlant l'importance accordée à la visibilité.

- Lorsque la tournée est construite, chaque fourmi dépose une quantité de phéromones calculée selon la formule (V-2).

$$\Delta_{ij}^{k}(iter) = \frac{Q}{L^{k}(iter)} \qquad \text{(V-2)}$$

Avec :

- Q = paramètre d'intensification,
- L^k = Longueur de la tournée à l'itération iter,
- i, j appartienne à la tournée trouvée par la fourmi k.

- Enfin une partie des phéromones sont évaporées de façon à empêcher l'algorithme d'être piégé dans un minimum local. Cette évaporation consiste à diminuer la quantité de phéromone du chemin grâce à un coefficient d'évaporation.

A la fin de l'itération t, la piste de phéromones est donc mise à jour selon la formule (V-3).

Mise à jour locale des phéromones

$$\text{phero}_{ij}(\text{iter}+1) = (1-\rho)\times \text{phero}_{ij}(\text{iter}) + \rho \times \sum_{k=1}^{m} \Delta_{ij}^{k}(\text{iter}) \qquad \text{(V-3)}$$

Avec :

- $\text{phero}_{ij}(t)$ = matrice phéromone à l'itération t,
- ρ = coefficient d'évaporation,
- $\text{phero}_{\text{initiale}}$ = matrice phéromone initiale.

Variantes de l'algorithme de colonies de fourmis

Il existe de nombreuses variantes de l'algorithme AS. Nous allons en citer quelques unes qui sont les plus connues.

- Elitisme

Au cours d'une itération, la fourmi qui a obtenu la meilleure tournée dépose plus de phéromone que les autres.

- « Ant Colony System » ou encore ACS

Il s'agit du même principe que l'AS sauf que les règles de sélection des villes et de mises à jour des phéromones sont différentes. Il y a deux lois de sélection des villes. Soit la règle est la même que pour l'AS en prenant $\alpha = 1$, soit la ville j est choisie telle que $\text{phero}_{ij}(\text{iter}) \times \eta_{ij}^{\beta}$ soit maximale. Pour choisir l'une ou l'autre des méthodes de sélection un paramètre q_0 Є [0 ; 1] est introduit. A chaque itération, un nombre q est tiré aléatoirement selon une loi uniforme. Si $q \leq q_0$ alors la ville j est sélectionnée selon le deuxième critère de sélection donc l'algorithme aura tendance à sélectionner une ville selon les résultats obtenus aux autres itérations. Si $q > q_0$ alors la ville j est sélectionnée de la même façon que dans l'AS donc l'algorithme va avoir tendance à sélectionner sur un critère de distance.

La mise à jour des phéromones est effectuée à deux niveaux : local et global. La mise à jour locale est définie par la formule (V-4). A chaque itération, la quantité de phéromone diminue afin de pouvoir prendre en compte des pistes non explorées.

Mise à jour locale des phéromones

$$\text{phero}_{ij}(t+1) = (1-\rho) \text{ x } \text{phero}_{ij}(t) + \rho \text{ x } \text{phero}_{\text{initiale}} \qquad \text{(V-4)}$$

Avec :

- $\text{phero}_{ij}(t)$ = matrice phéromone à l'itération t

- ρ = coefficient d'évaporation
- $phero_{initiale}$ = matrice phéromone initiale

La mise à jour globale est définie par la formule (V-5). Seule la meilleure solution trouvée à l'itération t est renforcée de façon à renforcer les meilleures solutions à chaque itération.

Mise à jour globale des phéromones

$$phero_{ij}(t+1) = (1-\rho) \times phero_{ij}(t) + \rho \times \frac{Q}{L_{meilleure}(t)} \quad \text{(V-5)}$$

Avec :

- **Q** = paramètre d'intensification
- $L_{meilleure}$ = Coût de la meilleure solution trouvée à l'itération t

Enfin, l'algorithme utilise une liste de candidats. Pour chaque ville, les v plus proches voisins sont mémorisés (v étant un paramètre réglable). A chaque itération, les villes sont sélectionnées dans cette liste. Si toutes les villes de la liste ont déjà été sélectionnées alors la règle de sélection de l'AS avec α=1 est utilisée.

Enfin une dernière variante appelée « Max-Min Ant System » (MMAS) est également fondée sur l'AS. Les principales différences sont :

- Pour une itération donnée, seule la meilleure fourmi met à jour la piste de phéromones,
- Les valeurs des phéromones sont bornées

Enfin, une hybridation entre les colonies de fourmis et des méthodes d'amélioration sont proposées pour améliorer la solution trouvée.

V.2.2. **Application sur un exemple simple**

L'algorithme des colonies de fourmis est très efficace, surtout lorsqu'il est appliqué à des problèmes d'optimisation combinatoire, ce qui est le cas ici. En effet, chaque fourmi doit choisir un « chemin » qui est, dans notre cas, le planning d'investissements (ensemble des lignes à construire et à déconstruire chaque année). Il y a donc autant de chemins que de choix de constructions.

Prenons comme exemple celui de la Figure V-1 où on doit construire 5 lignes et donc en déconstruire 5 autres. Pour simplifier le problème, on affecte à chaque ligne à construire une ligne à déconstruire automatiquement. En effet, le réseau étant exploité en radial, lorsqu'on construit une ligne, on doit ouvrir une autre ligne. Or, actuellement, ERDF ne laisse pas une ligne sous tension inutilisée sur le réseau car elle pourrait provoquer des défauts et rentre dans les calculs de fiabilité du réseau. La matrice phéromone a donc comme nombre de colonnes la durée de l'étude et comme nombre de lignes le nombre de possibilités (pour l'exemple de 5

lignes à construire, la matrice phéromone aura 31 lignes correspondant aux différents choix possibles qui sont listés dans la première colonne du Tableau V-3).

Au départ, une quantité aléatoire de phéromones est déposée. Puis, un certain nombre de fourmis choisissent un plan d'investissement selon une probabilité dont le calcul dépend de la quantité de phéromones. On peut rajouter des contraintes sur les lignes à déconstruire. Cela se traduirait par une probabilité nulle que la ligne 1 soit sélectionnée durant les 3 premières années.

Le coût de chaque solution est alors calculé. Il comprend le coût de construction, le coût de déconstruction et le coût d'exploitation. Les solutions qui dépasseraient un budget annuel fixé par l'utilisateur peuvent être considérées comme impossibles.

Une quantité de phéromones est ensuite mise à jour afin de modifier les probabilités de choix des différentes solutions. Deux mises à jour de phéromone sont effectuées : une mise à jour locale (pour que les chemins non explorés aient une chance d'être choisis) et une mise à jour globale (la meilleure fourmi dépose des phéromones sur son chemin).

Le Tableau V-3 montre un exemple d'évolution des phéromones déposées au cours des itérations. La première colonne (Possibilités) donne toutes les combinaisons possibles de choix de lignes. Les autres colonnes donne la matrice phéromone à l'état initial, à l'itération 1 et à l'itération 5. La matrice phéromones est composée de 5 colonnes représentant les 5 années de l'étude. Durant l'étape d'initialisation, la quantité déposée est aléatoire. Ainsi, par exemple, la quantité de phéromones initiale affectée à la construction des lignes 1 et 3 à l'année 3 est de 0.32. Au cours des itérations, la quantité de phéromones de certaines lignes augmente. On peut alors voir apparaître la solution vers laquelle va converger l'algorithme. En effet, à l'itération 5, la quantité de phéromones déposées sur le trajet du Tableau V-2 est presque 200 fois plus importante que pour les autres solutions.

Année 1	**Année 2**	**Année 3**	**Année 4**	**Année 5**
[1-2-3-4]	Pas de construction	Pas de construction	Pas de construction	5

Tableau V-2 : Trajet choisi par les fourmis à l'itération 5

Possibilités	Initialisation					Itération 1					Itération 5				
	A1	A2	A3	A4	A5	A1	A2	A3	A4	A5	A1	A2	A3	A4	A5
0	0,65	0,89	0,26	0,73	0,20	0,32	0,44	21,47	21,71	21,44	0,22	186,32	186,20	186,35	0,15
1	0,22	0,74	0,30	0,13	0,23	0,11	0,37	0,15	0,07	0,11	0,07	0,25	0,10	0,04	0,08
2	0,12	0,14	0,08	0,82	0,78	0,06	0,07	0,04	0,41	0,39	0,04	0,05	0,03	0,27	0,26
3	0,44	0,42	0,51	0,20	0,13	0,22	0,21	0,25	0,10	0,06	0,15	0,14	0,17	0,07	0,04
4	0,60	0,87	0,76	1,00	0,49	0,30	0,44	0,38	0,50	0,25	0,20	0,29	0,25	0,33	0,16
5	0,68	0,09	0,44	0,40	0,82	0,34	21,39	0,22	0,20	0,41	0,23	0,11	0,15	0,13	186,30
[4-5]	0,27	0,67	0,26	0,27	0,81	0,14	0,33	0,13	0,13	0,41	0,09	0,22	0,09	0,09	0,27
[3-5]	0,44	0,29	0,94	0,63	0,87	0,22	0,15	0,47	0,32	0,44	0,15	0,10	0,31	0,21	0,29
[3-4]	0,66	0,24	0,73	0,64	0,14	0,33	0,12	0,37	0,32	0,07	0,22	0,08	0,24	0,21	0,05
[2-5]	0,95	0,95	0,44	0,55	1,00	0,47	0,48	0,22	0,28	0,50	0,32	0,32	0,15	0,19	0,33
[2-4]	0,68	0,90	0,55	0,44	0,64	0,34	0,45	0,28	0,22	0,32	0,23	0,30	0,18	0,15	0,22
[2-3]	0,62	0,45	0,63	0,69	0,43	0,31	0,23	0,31	0,34	0,21	0,21	0,15	0,21	0,23	0,14
[1-5]	0,19	0,38	0,81	0,69	0,36	0,09	0,19	0,41	0,35	0,18	0,06	0,13	0,27	0,23	0,12
[1-4]	0,31	0,36	0,84	0,64	0,96	0,16	0,18	0,42	0,32	0,48	0,10	0,12	0,28	0,21	0,32
[1-3]	0,23	0,12	0,32	0,48	0,62	0,12	0,06	0,16	0,24	0,31	0,08	0,04	0,11	0,16	0,21
[1-2]	0,08	0,84	0,42	0,84	0,70	0,04	0,42	0,21	0,42	0,35	0,03	0,28	0,14	0,28	0,23
[3-4-5]	1,00	0,56	0,82	0,33	0,60	0,50	0,28	0,41	0,16	0,30	0,33	0,19	0,27	0,11	0,20
[2-4-5]	0,12	0,82	0,95	0,51	0,32	0,06	0,41	0,48	0,26	0,16	0,04	0,27	0,32	0,17	0,11
[2-3-5]	0,43	0,61	0,32	0,88	0,01	0,21	0,31	0,16	0,44	0,01	0,14	0,20	0,11	0,29	0,00
[2-3-4]	0,05	0,78	0,36	0,64	0,86	0,03	0,39	0,18	0,32	0,43	0,02	0,26	0,12	0,21	0,29
[1-4-5]	0,40	0,62	0,49	0,95	0,03	0,20	0,31	0,25	0,48	0,01	0,13	0,21	0,16	0,32	0,01
[1-3-5]	0,06	0,17	0,92	1,00	0,23	0,03	0,09	0,46	0,50	0,11	0,02	0,06	0,31	0,33	0,08
[1-3-4]	0,36	0,46	0,30	0,50	0,54	0,18	0,23	0,15	0,25	0,27	0,12	0,15	0,10	0,17	0,18
[1-2-5]	0,55	0,88	0,62	0,84	0,27	0,28	0,44	0,31	0,42	0,14	0,18	0,30	0,21	0,28	0,09
[1-2-4]	0,84	0,29	0,41	0,07	0,12	0,42	0,15	0,21	0,03	0,06	0,28	0,10	0,14	0,02	0,04
[1-2-3]	0,72	0,31	0,04	0,24	0,44	0,36	0,16	0,02	0,12	0,22	0,24	0,11	0,01	0,08	0,15
[1-2-3-4]	0,96	0,81	0,04	0,57	0,25	21,82	0,41	0,02	0,29	0,13	186,43	0,27	0,01	0,19	0,08
[1-2-3-5]	0,44	0,47	0,94	0,75	0,30	0,22	0,24	0,47	0,37	0,15	0,15	0,16	0,31	0,25	0,10
[1-2-4-5]	0,71	0,93	0,14	0,09	0,76	0,36	0,46	0,07	0,04	0,38	0,24	0,31	0,05	0,03	0,26
[1-3-4-5]	0,77	0,43	0,97	0,24	0,87	0,38	0,21	0,48	0,12	0,44	0,26	0,14	0,32	0,08	0,29
[2-3-4-5]	0,59	0,55	0,89	0,36	0,89	0,29	0,28	0,45	0,18	0,44	0,20	0,18	0,30	0,12	0,30

Tableau V-3 : Evolution des phéromones au cours des itérations

Au bout d'un certain nombre d'itérations, les fourmis convergent toutes vers un minimum qui peut être local.

Il est évident que ces valeurs changent à chaque exécution du programme étant donné le caractère aléatoire des choix des fourmis au début de l'algorithme. Une étude statistique sur 500 itérations montre que le programme converge 90% du temps vers l'optimum.

Cet algorithme ne peut pas être utilisé tel quel sur des réseaux avec un grand nombre de nœuds. En effet, le vecteur utilisé pour coder les phéromones explose combinatoirement. Il est donc nécessaire d'introduire deux matrices de phéromones. L'une qui gère l'année et l'autre qui gère le choix des lignes à construire/déconstruire. D'autres types de codages restent à inventer pour permettre une grande efficacité de création de plans de planification moyen terme optimaux.

V.3. Conclusion

L'algorithme des colonies de fourmis permet de résoudre des problèmes combinatoires importants en un temps de calcul raisonnable. Mais il appartient à la famille des algorithmes

métaheuristiques dont la part d'aléatoire et de réglage est très importante. Le risque de ces algorithmes est que l'on n'a aucun moyen de savoir si on se trouve dans le minimum global et si on est loin de la solution optimale. De nombreux paramètres de réglages entrent en jeu et leurs valeurs changent en fonction du problème traité.

Ainsi les algorithmes de colonies de fourmis sont à améliorer pour être totalement adaptés au problème de planification moyen terme.

Chapitre VI

« L'intéressant, ce n'est pas de savoir d'où vient le monde, mais où il va. »

Quino

Chapitre VI

Conclusion générale et perspectives

Les objectifs de ces travaux de thèse étaient de quantifier l'impact de la production décentralisée sur le réseau de distribution, compte tenu des incertitudes associées, puis de proposer des solutions pour augmenter la capacité d'accueil de ces productions, via une modification des architectures et de leur mode d'exploitation.

Le chapitre II a permis de remettre en évidence les différents impacts de la production décentralisée sur le réseau de distribution grâce à des exemples simples. La principale conclusion est que l'introduction de productions décentralisées a un impact sur les grandeurs électriques (modification du plan de tension et des transits de puissances, entre autres) et sur l'exploitation et la planification du réseau de distribution [ALV 2009]. Ces impacts, qui ne sont pas toujours bénéfiques, sont actuellement maîtrisés, en France notamment, grâce au renforcement de réseau ou à la création de départs dédiés. Mais si le taux d'insertion de production décentralisée devient trop important, les méthodes traditionnelles d'ERDF pourraient s'avérer insuffisantes. Il est donc nécessaire de changer la façon de planifier les

réseaux de distribution en tenant compte du paramètre « production décentralisée ». Pour cela, une méthode stochastique a été mise en place pour quantifier l'insertion maximale de production décentralisée qu'un réseau donné est capable d'accueillir. Cette méthode repose sur des hypothèses de localisation des charges et d'architecture donnée. Une nouvelle architecture, la structure hybride, a été proposée afin de favoriser l'insertion de production décentralisée dans le réseau, de garantir une qualité, une continuité et une égalité de fourniture en minimisant le coût global du réseau. Ces travaux ont fait l'objet de diverses publications [ENA 2009, ENA 2010].

Dans le chapitre IV, des méthodes d'optimisation combinatoire ont permis de mettre en place des algorithmes permettant de construire automatiquement les architectures cibles [ALV 2008]. Les performances des boucles hybrides ont pu être constatées par comparaison avec la coupure d'artère, architecture actuellement utilisée en France. Grâce à son mode d'exploitation mixte radial/bouclée et des protections distribuées dans le réseau, la structure hybride offre une qualité de fourniture excellente. Par ailleurs, l'équilibrage des produits PL équivalent au niveau des boucles d'une part et des artères principales d'autre part permet d'assurer l'équité des clients par rapport à la continuité de fourniture. De plus, les boucles hybrides tendent à favoriser l'insertion de production décentralisée dans le réseau.

Enfin dans le chapitre V, une méthode a été proposée pour trouver une trajectoire optimale de façon à muter les réseaux existants vers ce type d'architecture. Cette méthode propose une programmation des travaux respectant des contraintes liées aux ressources matérielles (prise en compte de l'âge des conducteurs du réseau) et financières (respect d'un budget donné par année).

De nombreuses perspectives s'ouvrent alors sur le sujet des architectures. En ce qui concerne l'algorithme d'évaluation du taux d'insertion maximal de production décentralisée, des profils de consommateurs et de GED pourraient être intégrés grâce à des *loadflow* probabilistes. Dans ce cas, des méthodes d'amélioration de Monte Carlo ou d'autres approches simplifiées pourraient être exploitées pour accélérer la résolution.

Il serait intéressant de créer un outil multi-objectif qui puisse prendre en compte plusieurs critères (produit PL, longueur totale, pertes entre autres) en laissant au planificateur le choix

de décider lesquels il souhaite privilégier. Ensuite, il serait intéressant de pouvoir déterminer automatiquement le nombre de boucles du réseau boucles hybrides qui optimise tous les critères fixés. Ensuite, il serait intéressant d'étudier le cas des réseaux à densité de charge très faible. En effet, les caractéristiques de ces réseaux ainsi que les contraintes auxquelles ils sont soumis sont très différentes de celles des réseaux urbains ou semi urbains. Ainsi, la recherche de motifs élémentaires pour les réseaux de type ruraux complèterait parfaitement l'étude. Enfin, la partie planification moyen terme est à valider avec des architectures initiales et des cibles réelles. Nous avons pu montrer, comme d'autres auteurs, que les colonies de fourmis étaient des algorithmes adaptés à la recherche de trajectoires optimales et rapides comparées aux méthodes de recherche exhaustive.

Références

[ABA-1 2008] P. Abadie, « Journal officiel de la république française, arrêté du 23 avril 2008 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement à un réseau public de distribution d'électricité en basse tension ou en moyenne tension d'une installation de production d'énergie électrique », 25 avril 2008.

[ABA-2 2008] P. Abadie, « Journal officiel de la république française, arrêté du 23 avril 2008 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement à un réseau public de transport d'une installation de production d'énergie électrique », 25 avril 2008.

[AGR 2002] A. Agresti, « Categorical Data Analysis », livre, seconde édition Wiley-interscience, ISBN0-471-36093-7, 2002.

[ALV 2008] M.-C. Alvarez, Raphaël Caire, Bertrand Raison, Nouredine Hadjsaid, Bogdan Enacheanu, Olivier Devaux, Robert Jeannot, « Distribution Network Long-Term Planning Methods Comparison With Respect to DG Penetration », I-SUP 2008 (Innovation For Sustainable Production), Conférence 3 : Smart and Sustainable Electric Systems, Bruges -22-55-Avril 2008.

[ALV 2009] M.-C. Alvarez, Raphaël CAIRE, Sylvain MARTINO, Christophe ANDRIEU, Bertrand RAISON, « Caractéristiques des réseaux de distribution », Chapitre livre IDEA, Editions Hermes, à paraître fin 2009.

[BEA 1983] J. E. Beasley « Route first cluster-second methods for vehicle routing », Journal Omega Edition Elsevier, Volume 11, N°4, pages 403 à 408, janvier 1983.

[CAI 2002] R. Caire, N. Retière, N. Hadjsaid, S. Martino, C. Andrieu « Permanent Short Circuit Current Modification of Low Voltages Distributed Generation on Distribution Network », IEE 37th International Universities Power Engineering Conference UPEC 2002, 9-11 septembre 2002, Staffordshire, Royaume Uni.

[CAI 2004] R. Caire, « Gestion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble soutenue le 2 avril 2004.

[CAR 1991] P. Carrive, « Techniques de l'ingénieur N° D4 210 : Réseaux de distribution Structure et planification », décembre 1991.

[CAN 2000] J.-F. Canard, « Impact de la génération d'énergie dispersée dans les réseaux de distribution », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble soutenue le 12 décembre 2000.

[CHA] A. Charoy, « Compatibilité électromagnétique », Livre, Edition Dunod, 2005.

[CEL 2004] G. Celli, F. Pilo, G. Pisano, V. Allegranza, R. Cicoria, A. Iaria, « Meshed vs.radial MV distribution network in presence of large amount of DG », Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES, Volume 2, pages 709 à 714, ISBN: 0-7803-8718-X, octobre 2004.

[CEL_1 2005] G. Celli, F. Pilo, G. Pisano, « Meshed distribution networks to increase the maximum allowable distributed generation capacity », CIGRE 2005.

[CEL_3 2005] G. Celli, F. Pilo, G. Pisano, V. Allegranza, R. Cicoria, « Distribution network interconnection for facilitating the diffusion of distributed generation », CIRED 2005.

[CHR 1979] N. Christofides, A. Mingozzi, P. Toth, « Combinatorial optimization », Edition John Wiley & Sons Ltd, ISBN-13 : 978-0471997498, 8 août 1979.

[CLA 1964] G. Clarke, J.-V. Wright, « Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points », Operations Research, Volume 12, N°4, pages 568 à 581, juillet – août 1964.

[DEL 1979] http://www.kaddour.com/chap4/chap4.htm

[DGE 2003] DGEMP – DIDEME, « Coûts de référence de la production électrique », décembre 2003.

[DUE 1990] G. Dueck, T. Scheurer, « Threshold accepting : A general purpose optimization algorithm », Revue Journal of computational Physics, ISSN 0021-9991, Volume 90, N°1, pages 161 à 175, Edition Elsevier, Amsterdam, PAYS-BAS, 1990.

[DRE 2005] J. Dréo, A. Pétrowski, P. Siarry, E. Taillard, « Métaheuristiques pour l'optimisation difficile », Eyrolles, 2005.

[ENA 2007] B. Enacheanu, « Outils d'aide à la conduite pour les opérateurs des réseaux de distribution », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble soutenue le 26 octobre 2007.

[ENA 2009] B. Enacheanu, M.-C. Alvarez, B. Raison, R. Caire, W. Bienia, O. Devaux, N. HadjSaid, « Optimal Meshed Distribution Network Configuration », IREE (International Review of Electrical Engineering), ISSN 1827-6660, Volume 4, N°5, pages 957 à 966, Septembre – Octobre 2009.

[ENA 2010] B. Enacheanu, M.-C. Alvarez, G. Roupioz, B. Raison, R. Caire, W. Bienia, N.Hadjsaid, O. Devaux, « Reconfiguration des réseaux électriques », EJEE, soumis.

[ENT 2009] http://www.entsoe.eu, consulté le 10 décembre 2010.

[ERD 2009] www.erdfdistribution.fr, rubrique documentations techniques de référence, consulté le 10 décembre 2010.

[ETX 2003] I. Etxeberria-Otadui, « Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique – application à la qualité de l'énergie », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble soutenue le 26 septembre 2003.

[FIS 1981] M. L. Fisher, R. Jaikumar, « A generalized assignment heuristic for the vehicle routing problem », « Revue Networks An International Journal », Volume 11, pages 109 à 124, 1981.

[FUL 2001] D. Fulchiron, « Cahier Technique Schneider Electric N°203 : Choix de base des réseaux MT de distribution publique », mars 2001.

[GAI 1993] E. Gain, « Techniques de l'ingénieur N° D 4220 : Réseau de distribution Conception et dimensionnement », 1993.

[GHA 1991] H. Ghaziri, « Solving routing problems by a self-organizing map », dans T. Kohonen, K. Makisara, O. Simula, J. Kangas, « Artificial Neural Networks », Amsterdam, 1991.

[GIL 1974] B. E. Gillet, L. R. Miller, « A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem », Operations Research, Volume 22, N°2, pages 340 à 349, mars – avril 1974.

[GON 2009] M. Gondran, M. Minoux, « Graphes et algorithmes », Collection EDF R&D, Tec&Doc Lavoisier 4ème édition, ISBN-13 : 978-2743010355, 784 pages, 28 avril 2009.

[HOL 1975] J. H. Holland, « Adapatation in natural and artificial systems », Livre ISBN:0-262-58111-6, Edition MIT Press Cambridge, MA, USA, 1975.

[ICF 2003] « The Economic Cost of the Blackout: An issue paper on the Northeastern Blackout », ICF consulting, www.solarstorms.org/ICFBlackout2003.pdf, 2003.

[IEEE 1993] IEEE, « The new IEEE standard dictionary of electrical and electronics terms », ISBN:1559378336, Edition IEEE Standards Office New York, NY, USA, 1993.

[IPP 2005] M. G. Ippolito, G. Morana, E. Riva Sanseverino, F. Vuinovich, « Ant Colony Search Algorithm for Optimal Strategical Planning of Electrical Distribution Systems Expansion », Applied Intelligence, Volume 23, Pages: 139 – 152, ISSN:0924-669X, Italie, 2005.

[KAW 1998] H. Kawamura, M. Yamamoto, T. Mitamura, K. Suzuki, A. Ohuchi, « Cooperative Search on Pheromone Communication for Vehicle Routing problems », IEEE Transactions on Fundamentals E81- A, 1089-1096, 1998.

[KOI 2005] S. Koizumi, M. Okumura, T. Yanase, « Application and development of distribution automation system in TEPCO”, Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, Volume 3, Pages 2429 à 2435, juin 2005.

[KUN 1994] P. Kundur, « Power System Stability and Control », EPRI editors, ISBN-13: 978-0070359581, 1er mars 1994.

[LEP 2007] E. Le Pelleter, « Outil d'électronique de puissance pour le maillage/bouclage des réseaux de distribution : application au contrôle des flux de puissance et la limitation des courants de court-circuit », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble soutenue le 26 octobre 2007.

[OCN 2008] A. B. Ocnasu, « Evaluation de la sûreté de fonctionnement des réseaux de distribution par la simulation Monte Carlo : application à des stratégies de maintenance optimales », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble soutenue le 10 octobre 2008.

[PAU 2006] T. Paulun, « Strategic expansion planning for electrical networks considering uncertainties », European transactions on electrical power ISSN 1430-144X, vol. 16, no6, pp. 661-671, Edition Wiley InterScience, 2006.

[PER 1984] H. Persoz, « Planification des réseaux électrique », Eyrolles, 1984.

[PER 1994] H. Persoz, « Histoire générale de l'électricité en France », Volume 3 : 1947-1987», Tome 3, février 1984.

[PHA 2005] C. D. Pham, « Détection et localisation de défauts dans les réseaux de distribution HTA en présence de génération d'énergie dispersée », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble soutenue le 19 septembre 2005.

[PUR 2001] C. Puret, « Cahier Technique Schneider Electric N°155 : Les réseaux de distribution publique MT dans le monde », septembre 2001.

[RIO 1999] M. Rios, K. Bell, D. Kirschen, R. Allan, « Computation of the value of security », Manchester Centre for Electrical Energy, UMIST, EPSRC/ERCOS reference n°GR/K 80310, Octobre, 1999.

[ROB 1990] Robuste, Francesc & Daganzo, Carlos F. & Souleyrette, Reginald R., 1990. "Implementing vehicle routing models," Transportation Research Part B: Methodological, Elsevier, Volume 24, N°4, Pages 263-286, Août.

[SAK-1 1984] M. Sakarovitch, « Optimisation combinatoire, Méthodes mathématiques et algorithmes, Graphes et programmation linéaire », Hermann, ISBN 2 7056 5974 9, 1984.

[SAK-2 1984] M. Sakarovitch, « Optimisation combinatoire, Méthodes mathématiques et algorithmes, Programmation discrète », Hermann, ISBN 2 7056 5976 5, 1984.

[SCH 2002] A. Schrijver, « Combinatorial optimization Polyhedra and Efficiency », Springer, ISBN 978-3540443896, 10 décembre 2002.

[S&C 2001] http://www.sandc.com/, consulté le 10 décembre 2010.

[SOR 2008] A. Soroudi, M. Ehsan, «Multi objective distributed generation planning in liberalized electricity markets», T&D. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Pages 1 – 7, 21-24 April 2008.

[TOT 2001] P. Toth, D. Vigo, « The vehicule routing problem », Society for Industrial & Applied Mathematics, U.S, ISBN-13 : 978-0898714982, 363 pages, 30 décembre 2001.

[WIL 1989] J. A. G. Willard, « Vehicle routing using r-optimal tabu search », The managemebt School, Imperial College, Londres, 1989.

Annexes

Annexe 1 : Méthode de calcul des intervalles de confiance

La méthode utilisée dans le calcul des bornes des intervalles de confiances est une méthode par dichotomie. Rappelons les formules à prendre en compte :

$$\sum_{k=m}^{n} C_n^k p_{inf}^k (1 - p_{inf})^{n-k} \leqslant \frac{\alpha}{2} \qquad (1)$$

$$\sum_{k=0}^{m} C_n^k p_{sup}^k (1 - p_{sup})^{n-k} \leqslant \frac{\alpha}{2} \qquad (2)$$

On souhaite trouver p_{inf} et p_{sup} vérifiant ces équations, en s'approchant au mieux de $\alpha/_2$, pour être le plus précis possible, pour tous les cas possibles sur un échantillon de n tests, m étant le nombre de succès. On cherche alors toutes les solutions pour m allant de 0 à m.

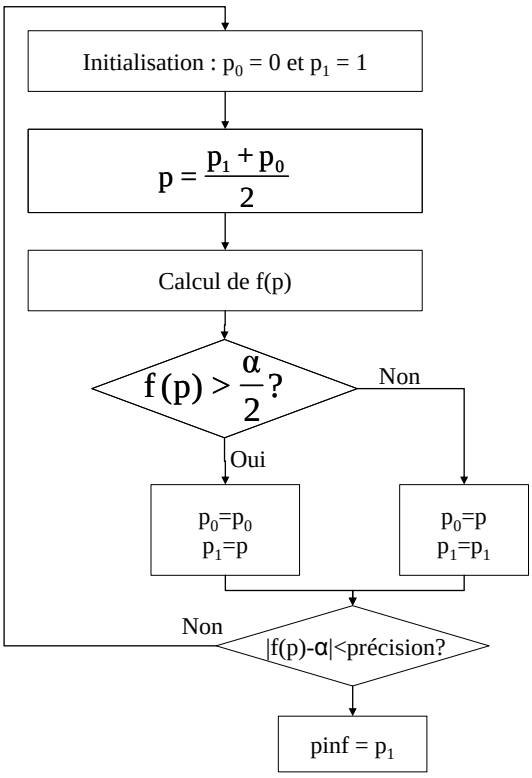
Commençons par p_{inf} :

Notons *f* la fonction définie telle que :

$$f(p) = \sum_{k=m}^{n} C_n^k p_{inf}^k (1 - p_{inf})^{n-k}$$

On cherche alors p_{inf} compris entre 0 et 1, le plus proche de $\alpha/_2$, tel qu'il soit solution de l'équation (1). On procède alors par dichotomie comme suit :

On choisit un α et une précision (par exemple α =0,01 et précision = 0,001).



On a donc obtenu p_{inf}. Pour calculer p_{sup}, on procède de la même façon en prenant *f* telle que :

$$f(p) = \sum_{k=0}^{m} C_n^k p_{sup}^k (1 - p_{sup})^{n-k}$$

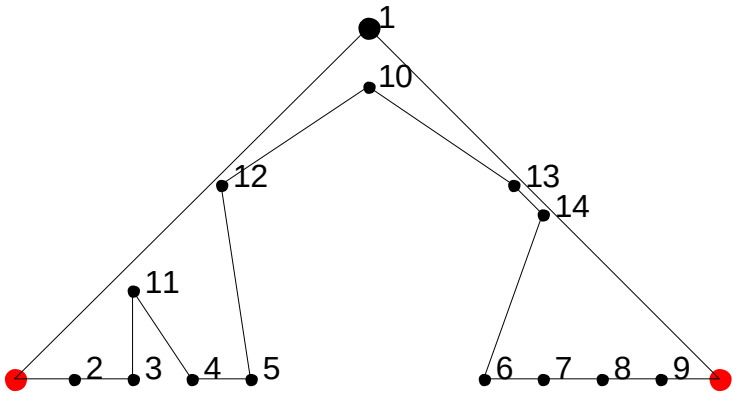
On effectue ces opérations pour toutes les valeurs entières de *m* comprises entre 0 et n.

Annexe 2 : Caractère contradictoire de PL et de L

- Soit un réseau avec deux postes sources (en rouge) et 14 charges (en noir).
- La charge 1 vaut 100 MVA.
- Toutes les autres charges valent 5.58 MVA.

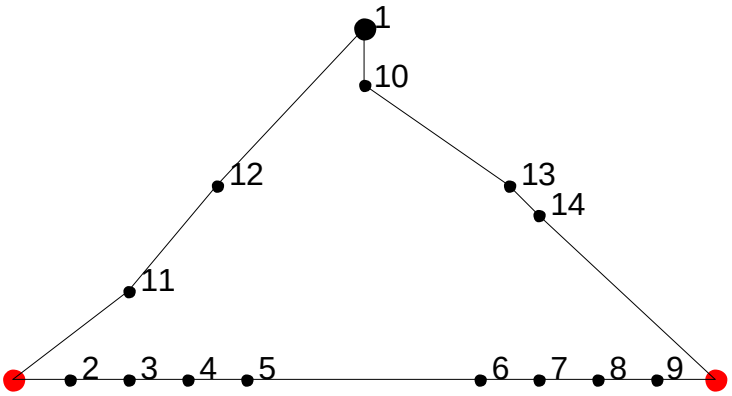
On souhaite créer un réseau en coupure d'artère constitué de 2 artères principales. Dans la méthode 1, le but est d'équilibrer les produits PL des deux artères et, dans la méthode 2, de minimiser la longueur totale conducteurs utilisés. Les résultats ci-dessous montrent que l'équilibrage des PL tend à l'augmentation des longueurs.

Méthode 1 : Equilibrage des PL



- Longueur totale = **20,1689** km
- PL = [848,5 ; 847,5] MVA.km
- Écart type des PL /moyenne = 0.05%

Méthode 2 : Minimisation de L



- Longueur totale = **14,6789** km
- PL = [1109,9645 ; 267,84] MVA.km
- Écart type des PL /moyenne = 61,12%

Annexe 3 : Différents coûts du réseau

Coût actualisé des pertes

Il est calculé selon la méthode expliquée dans le chapitre I partie I.3.3. Pour chaque type de câble, le coût actualisé des pertes est calculé. Le câble sélectionné sera celui qui a le coût actualisé et l'invessissement le plus bas.

Coût de la défaillance

Le coût de la défaillance comprend le coût de l'énergie non distribuée d'une part et le coût des coupures d'autre part.

Le coût de l'énergie non distribuée est C_{END} = 9,2 €/kWh. [Source ERDF].

Le coût des coupures est C_{coup} = 0,8 €/kW. [Source ERDF].

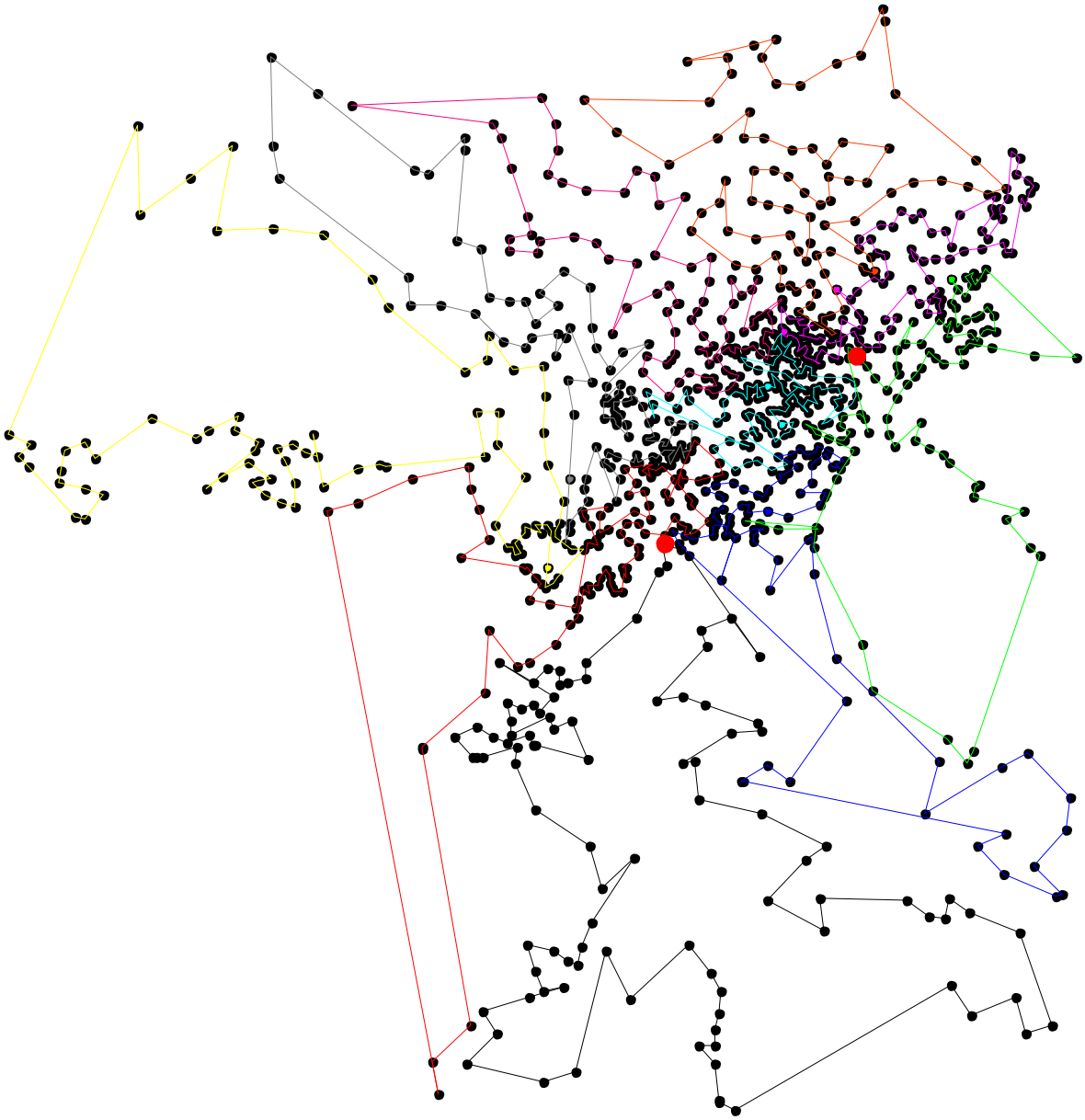
Le coût total de la défaillance est donc :

$$C_{déf} = END \times C_{END} + C_{coup} \times N \times \frac{H_{P\,max}}{8760} \times P_{max} \quad (3)$$

Avec :

- END = Energie totale du réseau non distribuée,
- N = Nombre total de coupures,
- P_{max} = Puissance maximale,
- H = Nombre d'heures d'utilisation à la puissance maximale.

Annexe 4 : Construction de 10 boucles



Titre :

Architecture des réseaux de distribution du futur en présence de productions décentralisées

Mots clefs :

Planification, réseaux électriques, productions décentralisées, méthode de Monte Carlo, optimisation combinatoire.

Résumé :

L'ouverture des marchés de l'énergie et la volonté grandissante de protéger l'environnement va conduire au développement massif de la production décentralisée. Les réseaux de transport, déjà saturés, devront être soutenus par les réseaux de distribution auxquels ces nouvelles sources seront connectées. Néanmoins, l'introduction massive de productions décentralisées pourrait modifier le fonctionnement des réseaux de distribution électrique. Cette thèse illustre un meilleur moyen d'accueillir ces productions par l'introduction de nouveaux chemins pour la circulation des flux. Une nouvelle architecture, au mode d'exploitation partiellement bouclé, est ainsi proposée et validée par des études technico-économiques et des tests stochastiques. Cette architecture permet d'augmenter l'insertion de production décentralisée dans le réseau à un coût compétitif tout en garantissant les critères de fiabilité du distributeur.

Title:

Architectures of distribution network regarding the penetration of distributed generation

Keywords:

Planning, electrical networks, distributed generations, Monte Carlo method, combinatorial optimization.

Abstract:

Deregulation of electricity and the increasing will of protecting environment will enhance the development of dispersed generation. Transport networks, already saturated, need to be enhanced by distribution networks where dispersed generation will be connected. But a massive introduction of dispersed generation could modify the behaviour of distribution networks. This thesis shows a better way to integrate those productions: finding new ways to switch electrical flows. A new architecture with a partially meshed operation is proposed and validated thanks to technical and economic studies and stochastic tests. This competitive architecture enables to increase the penetration of distributed generation in the network ensuring reliability criteria of the distributor.

G2Elab – Laboratoire de Génie Électrique de Grenoble (UMR 5269 Grenoble-INP – UJF – CNRS)

ENSE^3 – 961 rue de la Houille Blanche

BP 46 – 38402 Saint Martin d'Hères