

THESIS / THÈSE

MASTER EN SCIENCES INFORMATIQUES

Aide à la distribution et exploitation électrique : simulation et optimisation

Braun, Christophe

Award date:
2017

Awarding institution:
Universite de Namur

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

UNIVERSITÉ DE NAMUR
Faculté d'informatique
Année académique 2016–2017

**Aide à la distribution et exploitation
électrique : simulation et optimisation**

BRAUN Christophe



Promoteur : _____ (Signature pour approbation du dépôt - REE art. 40)
Jean-Marie Jacquet

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de
Master en Sciences Informatiques.

Résumé

Tout le monde connaît la S.T.I.B. comme étant une société de transport en commun, mais, pour assurer ce service il lui faut de l'électricité qu'elle transporte aussi elle-même. En effet, la S.T.I.B. a la particularité d'être gestionnaire de son propre réseau de distribution électrique. Elle assure ainsi la fourniture d'énergie électrique à l'ensemble de ses équipements haute et basse tension. Lorsque survient un incident entraînant une perte d'alimentation sur une partie du réseau Haute Tension, les gestionnaires d'exploitation électrique doivent, le plus rapidement possible, trouver une solution afin de ne pas impacter la qualité et la continuité du service. Pour cela, ils se réfèrent à des procédures dites de "reprise". Ces dernières sont des manœuvres papier répertoriées dans des classeurs et disposées à proximité de leur pupitre. Afin d'exploiter le réseau de la manière la plus efficace et efficiente possible, l'automatisation a été l'étape clé. Nous allons voir comment aider les opérateurs à exploiter leur réseau électrique et permettre de fournir des reprises de manière automatique et optimisée. Pour finir, nous verrons comment réutiliser l'outil pour faire de la simulation.

Table des matières

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Présentation du sujet | 3 |
| 1.1 | Électricité | 4 |
| 1.1.1 | Conducteur électrique | 4 |
| 1.1.2 | Disjoncteur | 5 |
| 1.2 | Contexte étudié | 5 |
| 1.2.1 | Approche domestique | 5 |
| 1.2.2 | Exploitation et distribution électrique | 7 |
| 1.2.3 | Topologie | 12 |
| 1.3 | Problématique | 14 |
| 1.3.1 | Outils déjà en place | 15 |
| 1.3.2 | Première formulation du problème | 15 |
| 1.3.3 | Limitations | 16 |
| 1.4 | Conclusions | 16 |
| 2 | Réseau de distribution : structure et modélisation | 17 |
| 2.1 | Représentation d'un réseau électrique | 17 |
| 2.1.1 | Techniques de codage des graphes | 18 |
| 2.1.2 | Représentation des éléments du réseau | 19 |
| 2.2 | Topologie d'un réseau électrique | 20 |
| 2.2.1 | Types d'alimentation | 21 |
| 2.2.2 | Types de réseaux | 24 |
| 2.3 | Configuration de la topologie | 24 |
| 2.3.1 | Contraintes topologiques et électrotechniques | 26 |
| 2.3.2 | Mise sous tension à vide | 26 |
| 2.4 | Données existantes | 26 |
| 2.4.1 | Topologie | 26 |
| 2.4.2 | Valeurs temps réel | 27 |
| 2.4.3 | Connaissances sur les équipements | 28 |
| 2.4.4 | Fiabilité des données | 28 |
| 2.4.5 | Affichage du réseau électrique | 28 |
| 2.4.6 | Caractéristiques du graphe | 29 |
| 2.5 | Conclusion | 30 |
| 3 | Calculs dans un réseau électrique | 31 |
| 3.1 | Méthode de calcul d'écoulement de la puissance | 31 |
| 3.1.1 | Parcours du réseau électrique | 33 |
| 3.1.2 | Approche temporelle de la consommation | 34 |
| 3.1.3 | Estimation de la valeur temps réel | 35 |
| 3.1.4 | Mise en place | 35 |
| 3.2 | Affichage de la santé du réseau | 36 |
| 3.2.1 | Charges dans les câbles | 36 |
| 3.2.2 | Présence de boucles | 38 |
| 3.3 | Conclusion | 40 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4 | Aide à la décision et optimisation | 41 |
| 4.1 | Fondements théoriques | 41 |
| 4.1.1 | L'aide à la décision | 41 |
| 4.1.2 | Recherche opérationnelle | 41 |
| 4.1.3 | Optimisation | 42 |
| 4.1.4 | Typologie des problèmes d'optimisation | 42 |
| 4.1.5 | Optimisation mono/multi objectif | 43 |
| 4.2 | Optimisation mathématique | 44 |
| 4.2.1 | Optimisation linéaire | 44 |
| 4.2.2 | Optimisation non linéaire | 46 |
| 4.2.3 | Modélisation | 46 |
| 4.3 | Résolutions des modèles mathématiques | 47 |
| 4.3.1 | Système linéaire | 47 |
| 4.3.2 | Système non linéaire | 49 |
| 4.3.3 | Solveur d'équations | 49 |
| 4.4 | Conclusion | 50 |
| 5 | Optimisation d'un réseau électrique | 51 |
| 5.1 | Approches proposées dans la littérature | 51 |
| 5.1.1 | Méthodes utilisées | 51 |
| 5.1.2 | Connaissances et informations nécessaires sur le réseau | 52 |
| 5.2 | Notre approche | 52 |
| 5.3 | Modélisation | 52 |
| 5.3.1 | Arbre couvrant et graphe orienté | 52 |
| 5.3.2 | Problème du flot de cout minimum | 53 |
| 5.3.3 | Notre modélisation mathématique | 54 |
| 5.4 | Programmation par contraintes | 57 |
| 5.4.1 | Langage utilisé lors de notre étude | 58 |
| 5.4.2 | Méthodes de résolution pour les domaines finis | 60 |
| 5.4.3 | Multiobjectif | 60 |
| 5.5 | Conclusion | 60 |
| 6 | Mise en place | 63 |
| 6.1 | Architecture système complète | 63 |
| 6.2 | Aide à l'exploitation | 63 |
| 6.3 | Optimisation du réseau électrique | 64 |
| 6.3.1 | Traduction du graphe en équations | 64 |
| 6.3.2 | Expression des fonctions objectif | 66 |
| 6.3.3 | Résolution du système de contraintes | 67 |
| 6.3.4 | Exploitation des résultats | 68 |
| 6.3.5 | Interface pour la demande d'optimisation | 68 |
| 6.4 | Partie étude du réseau | 68 |
| 6.5 | Statut du développement et travaux futurs | 69 |
| 6.6 | Conclusion | 70 |
| | Annexes | 74 |
| | A Code Prolog d'un petit exemple de réseau | 76 |
| | B Variations des objectifs en fonction des solutions moins optimales | 79 |

Table des figures

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Prise d'électricité sur le troisième rail | 3 |
| 1.2 | Détail du troisième rail | 3 |
| 1.3 | Prise d'électricité à l'aide d'un pantographe sur une ligne aérienne | 3 |
| 1.4 | Détail d'un pantographe | 3 |
| 1.5 | Disjoncteur monophasé | 5 |
| 1.6 | Disjoncteur 4 pôles | 5 |
| 1.7 | Schéma multifilaire d'un tableau électrique domestique | 6 |
| 1.8 | Schéma unifilaire d'un tableau électrique domestique | 7 |
| 1.9 | Dispaching fin des années 70. On y voit les synoptiques de télécontrôle des sous-stations sur les murs (source : STIB-MIVB) | 9 |
| 1.10 | Conduite centralisée d'un réseau de distribution électrique. Les HTA/BT sont assimilables aux différentes sources électriques appelées Inter [9, p. 23] | 9 |
| 1.11 | Image de la partie HT d'une SST dans l'IHM du SCADA | 11 |
| 1.12 | Partie de la carte HT relative à la SST de la figure 1.11 | 12 |
| 1.13 | Différents types de manchons | 13 |
| 1.14 | Schéma de principe de la distribution électrique à la S.T.I.B. | 14 |
| 1.15 | Extrait d'une carte 11 kV | 15 |
| | | |
| 2.1 | Graphe composé d'un seul nœud (8) et 2 autres graphes | 18 |
| 2.2 | Graphe avec une boucle sur le nœud 1 qui n'a électriquement pas de raison d'être | 18 |
| 2.3 | Graphe et représentations associées [9, p. 56] | 18 |
| 2.4 | Graphe orienté et matrice d'adjacence associée | 19 |
| 2.5 | Schéma topologique d'un segment | 19 |
| 2.6 | Schéma topologique d'un transformateur | 20 |
| 2.7 | Schéma topologique d'une cellule inter-barres | 20 |
| 2.8 | Schéma topologique d'un groupe | 20 |
| 2.9 | Schéma d'une alimentation en simple dérivation | 21 |
| 2.10 | Graphe d'une alimentation en simple dérivation. L'artère principale est en gris | 21 |
| 2.11 | Schéma d'une alimentation en simple dérivation avec grappes | 22 |
| 2.12 | Graphe d'une alimentation en simple dérivation avec grappes, l'artère principale est en gris | 22 |
| 2.13 | Schéma d'une alimentation en coupure d'artères | 22 |
| 2.14 | Graphe d'une alimentation en coupure d'artères avec ses deux alimentations | 22 |
| 2.15 | Schéma d'une alimentation en double dérivation | 23 |
| 2.16 | Graphe d'une alimentation en double dérivation | 23 |
| 2.17 | Structure d'un réseau de distribution [9] | 23 |
| 2.18 | Graphe en vue globale du réseau de la STIB | 24 |
| 2.19 | Structure d'un réseau avec deux sources (graphe) et une configuration de la topologie possible (forêt) [9] | 25 |
| 2.20 | Extrait de la structure de la base de données du SCADA actuel | 27 |
| 2.21 | Graphe extrait de Gephi avec une petite partie du réseau avec tous les liens présents | 29 |
| 2.22 | Graphe extrait de Gephi avec une petite partie du réseau avec un filtre pour voir la configuration de la topologie | 29 |
| 2.23 | Filtre pour afficher la configuration du réseau dans Gephi | 29 |

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Un réseau radial correspondant à un arbre a) ; la distribution électrique est équivalente à un arbre orienté à partir d'un poste source PS étant sa racine vers les consommateurs [22]. | 31 |
| 3.2 | représentation graphique de la loi des nœuds sur un arbre simple | 32 |
| 3.3 | Étapes d'un parcours de graphe en Deep First Search | 34 |
| 3.4 | Variation de puissance consommée (kWh) par quart-horaire pour un jeu de barres . . . | 34 |
| 3.5 | Extrait de la fiche technique d'un câble EIAVB 3x150 mm ² | 37 |
| 3.6 | Extrait des facteurs de correction suivant NBN C33-111 | 37 |
| 3.7 | Extrait des facteurs de correction suivant NBN C33-111 | 38 |
| 3.8 | Un cycle présent dans le graphe, le lien C-E cause une boucle | 39 |
| 4.1 | Représentation générale d'un tableau pour la méthode du simplexe | 48 |
| 6.1 | Graphique de variation des fonctions objectif en s'éloignant des solutions optimales . . | 69 |

Introduction

La S.T.I.B. est l'abréviation désignant la Société des Transports Intercommunaux de Bruxelles. Il s'agit de la première entreprise belge de transport public en milieu urbain.

Elle exploite un réseau intégré de plus ou moins 650 km de long et étend ses activités aux 19 communes de la Région ainsi qu'à 12 autres communes périphériques. Elle dessert une superficie de 242 km^2 et assure, chaque jour, les déplacements de plus d'un million de Bruxellois et de navetteurs.

Le réseau est composé de 4 lignes de métro, 19 lignes de tram, 50 lignes de bus et de 11 lignes de bus de nuit. Le métro et le tram restent les deux modes de transport les plus prisés face au bus : 36 pourcent pour le tram, 36 pourcent pour le métro et 27 pourcent pour le bus.

Cela fait plus de 15 ans, qu'à Bruxelles, la fréquentation des transports publics ne cesse d'augmenter. Différentes causes peuvent être évoquées mais nous nous contenterons ici de citer l'engorgement de la ville comme une des principales raisons de cette progression. L'augmentation de la congestion de la circulation routière à Bruxelles a rendu las de nombreuses personnes qui ont opté pour les transports publics. La S.T.I.B. et la Région travaillent conjointement pour proposer une offre de transport plus importante et plus attractive.

Durant l'année 2015, la S.T.I.B. a assuré 370,2 millions de voyages, ce qui revient à 5,6 millions de voyages en plus qu'en 2014 et de 92,9 millions de voyages en plus qu'en 2007. Cela s'explique par l'extension des réseaux de métro et de tram et par l'investissement de véhicules de plus grande capacité. Cette hausse de fréquentation devrait continuer de croître dans les années à venir. Cette croissance a poussé la S.T.I.B. et la Région à prévoir de grands et ambitieux projets de développements du réseau tant dans sa gestion que dans son expansion.

Le financement de la STIB provient de ses propres recettes et de la dotation régionale. En effet, la Région attribue une dotation, aussi appelée subvention, à la société suite à la validation du contrat de gestion. Dans le cas où la S.T.I.B. ne parvient pas à atteindre un ou plusieurs des objectifs fixés par le contrat, une justification doit pouvoir être rapportée à la Région. Si la cause de l'incident affectant l'un des objectifs fixés est indépendante de la volonté de la société, aucune pénalité ne sera attribuée à la société. Par contre, si la cause dépend de la société, cette dernière se verra attribuée une pénalité. Si la S.T.I.B. remplit son contrat et va même au-delà de ce qui lui a été imposé, des bonis lui sont accordés. Par contre, dans le cas inverse, la subvention accordée lors du prochain contrat de gestion sera revue à la baisse. Parmi les objectifs à atteindre, la fourniture d'énergie continue aux matériels roulants est primordiale. Un des critères principal est de ne pas impacter par une coupure le réseau de métro plus de trois minutes et le réseau de tram plus de cinq minutes.

Nous comprenons donc l'importance de travailler sur les outils de gestion de l'énergie qui est, outre les conducteurs, une ressource critique au fonctionnement de l'entreprise

Chapitre 1

Présentation du sujet

Pour que le métro ou le tram roule, il lui faut de l'électricité. Cette électricité est fournie par un troisième rail pour le métro et par une ligne aérienne pour le tram. Pour la fiabilité d'exploitation et pour la sécurité des personnes, il est nécessaire de pouvoir maintenir l'approvisionnement d'énergie et de préférence, sans coupure.



FIGURE 1.1 – Prise d'électricité sur le troisième rail

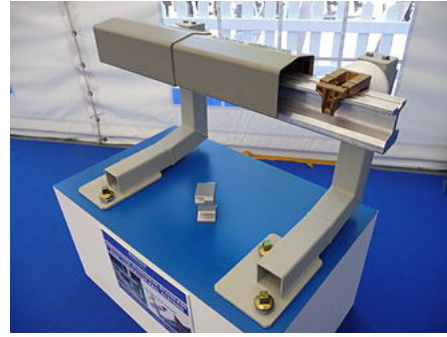


FIGURE 1.2 – Détail du troisième rail



FIGURE 1.3 – Prise d'électricité à l'aide d'un pantographe sur une ligne aérienne

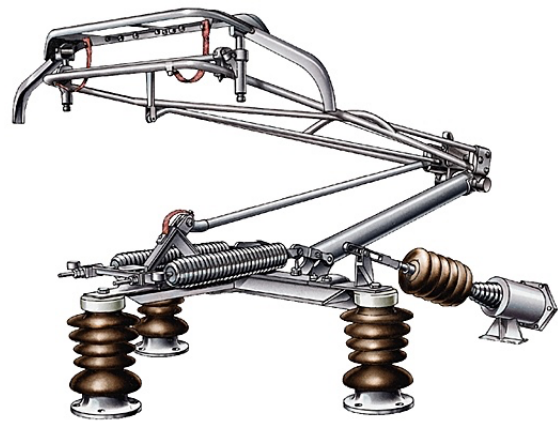


FIGURE 1.4 – Détail d'un pantographe

La S.T.I.B.¹ s'occupe elle-même de son propre réseau de distribution et de transformation électrique. De manière similaire à ce que fait le gestionnaire de distribution électrique belge ELIA, elle exploite un ensemble d'équipements lui permettant d'alimenter en énergie l'ensemble du matériel roulant à l'électricité ainsi que ses bâtiments et stations. Pour ce faire, ELIA fournit de l'énergie à partir de plusieurs points dans la ville. Ensuite, l'énergie transite par un réseau complexe d'équipements de

1. Société des Transports Intercommunaux de Bruxelles, organisme d'intérêt public

distribution et de transformation ou redressement, suivant son utilisation. Cela peut être l'alimentation du métro, du tram, d'un bâtiment ou d'une station de métro/pré-métro.

Ce réseau électrique est contrôlé en temps réel par des opérateurs. Ceux-ci doivent prendre en considération un très grand nombre de variables afin de prendre la meilleure décision possible. Par exemple, les différentes sources d'approvisionnement ne peuvent fournir qu'une quantité définie d'énergie et les câbles d'alimentation ne peuvent conduire qu'une quantité maximale d'électricité.

Dans les sections suivantes, nous aborderons les bases nécessaires à la compréhension du contexte de ce mémoire telles que l'électricité et la distribution électrique.

1.1 Électricité

L'électricité est induite par un mouvement d'électrons entre 2 charges électriques. Ce mouvement est principalement caractérisé par une quantité et une force. Afin de visualiser plus concrètement cette définition, imaginons de l'eau en mouvement. La pression de l'eau ressemble alors à sa force et la quantité d'eau est alors la quantité d'électrons. La force avec laquelle se déplacent les électrons est exprimée en volts (\mathbf{V}^2) et la quantité d'électrons en mouvement par seconde est appelée ampère (\mathbf{A}^3). À titre d'exemple, pour une installation domestique classique, la tension est de 230 V et l'intensité maximale à la sortie du compteur électrique pour une maison unifamiliale classique est de 40 A ce qui nous donne une puissance totale disponible de 9,2 kW. En comparaison, les nouveaux câbles d'alimentation pour le métro et le tram sont prévus pour un peu plus de 250 A en 11kV ce qui représente 3,3 MW (3300 kW)

Nous ne nous occuperons pas de la différence entre courant continu (\mathbf{DC}^4) et courant alternatif (\mathbf{AC}^5) car cela n'a pas d'incidence dans le contexte étudié.

1.1.1 Conducteur électrique

L'électricité se déplace en général grâce à des matériaux conducteurs. Nous nous intéresserons particulièrement à la difficulté de ce mouvement, appelé résistance et exprimé en ohms (Ω^6), ainsi qu'à l'influence de cette résistance sur l'électricité. Elle est régie par la loi d'Ohm :

$$I = \frac{U}{R} \quad (1.1)$$

où I est l'intensité en ampères, U est la tension en volts et R est la résistance en ohms.

Cette propriété n'est pas statique, le type, la longueur et la section du conducteur influent sur sa résistance totale ainsi que sa température. Il est aussi important de noter que de l'énergie se perd durant le transport à cause de l'effet de perte de tension en ligne dont l'effet Joule (1.3) est le plus important.

La perte est due à l'énergie dissipée sous forme de chaleur lors de son passage dans un conducteur. Cette propriété est largement utilisée pour un grille-pain ou un chauffage électrique, mais est malheureusement aussi présente dans un simple conducteur. Afin de pouvoir calculer cette quantité d'énergie dissipée, il faut prendre en compte la loi d'Ohm (1.1) et la loi de la puissance électrique (1.2). Voici le détail de la formule pour le calcul de la perte par effet Joule :

$$\begin{aligned} P &= U \cdot I & (1.2) \\ U &= R \cdot I & ((1.1) \text{ réécrite}) \end{aligned}$$

2. Symbole de l'unité de tension
 3. Symbole de l'unité du courant électrique
 4. Abréviation pour courant continu
 5. Abréviation pour courant alternatif
 6. Symbole officiel de l'ohm

Par remplacement de U dans la loi de la puissance électrique (1.2) par la loi d'Ohm réécrite

$$P_{\text{perte}} = R \cdot I^2 \quad (1.3)$$

Dans l'équation (1.2), on peut voir que pour une même puissance (P), nous pouvons augmenter la tension pour diminuer l'intensité. Nous remarquons aussi dans la formule (1.3) que la tension n'a aucune influence sur la quantité d'énergie perdue par effet Joule dans le conducteur et que l'intensité est un facteur bien plus important que la résistance du câble.

En pratique, ce rapport est utilisé pour le transport d'électricité entre les centrales électriques et les villes. Pour diminuer les pertes durant le transport, les distributeurs d'énergie augmentent la tension pour diminuer le courant en transit afin d'avoir une puissance équivalente en transit. La tension est ensuite diminuée à proximité des consommateurs finaux.

Pour aller plus loin, le seul choix de la tension n'est pas suffisant. Le type de conducteur et, surtout, son diamètre (*section*) et sa longueur vont influencer sa résistance totale. La loi de Pouillet (1.4) nous indique que les paramètres à prendre en compte sont la nature du conducteur (matière), la section et la longueur. Plus précisément, la résistance totale du conducteur (R) tient compte de sa longueur en mètre (l), sa résistivité en $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ (ρ) et la section en mm^2 (S) comme suit :

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (1.4)$$

1.1.2 Disjoncteur

Principal élément de sécurité dans une installation électrique, c'est lui qui assure la protection contre les courts-circuits ainsi que les surcharges. Il possède une entrée et une sortie si c'est un monophasé ou plusieurs entrées et sorties si c'est un bipolaire (2), 3 pôles ... Dans ce cas, si un déclenchement se produit sur une de ses phases, l'ensemble des phases se coupent. Sa principale caractéristique est son intensité maximum admissible au-delà de laquelle il déclenche et donc coupe l'alimentation électrique en sortie.



FIGURE 1.5 – Disjoncteur monophasé



FIGURE 1.6 – Disjoncteur 4 pôles

1.2 Contexte étudié

1.2.1 Approche domestique

Pour comprendre le domaine, nous allons faire une approche par analogie avec les installations domestiques pour, ensuite, décrire le sujet dans son contexte.

1.2.1.1 Principe de distribution

Après le compteur électrique vient un tableau électrique pour distribuer l'énergie vers les consommateurs et, surtout, pour isoler des morceaux d'installations (circuit) afin qu'une anomalie sur un circuit ou sur un consommateur dans ce circuit n'ait pas d'incidence sur les autres parties de l'installation.

Chaque circuit est donc protégé et isolé du reste par un disjoncteur dont la fonction est de couper l'alimentation si un consommateur ou le circuit lui-même a un défaut. Il coupe l'alimentation si l'intensité prévue est dépassée afin de protéger les câbles d'une surchauffe qui risque de créer un incendie.

La répartition de l'énergie entre le compteur et les disjoncteurs se fait via une barrette de distribution appelée aussi peigne.

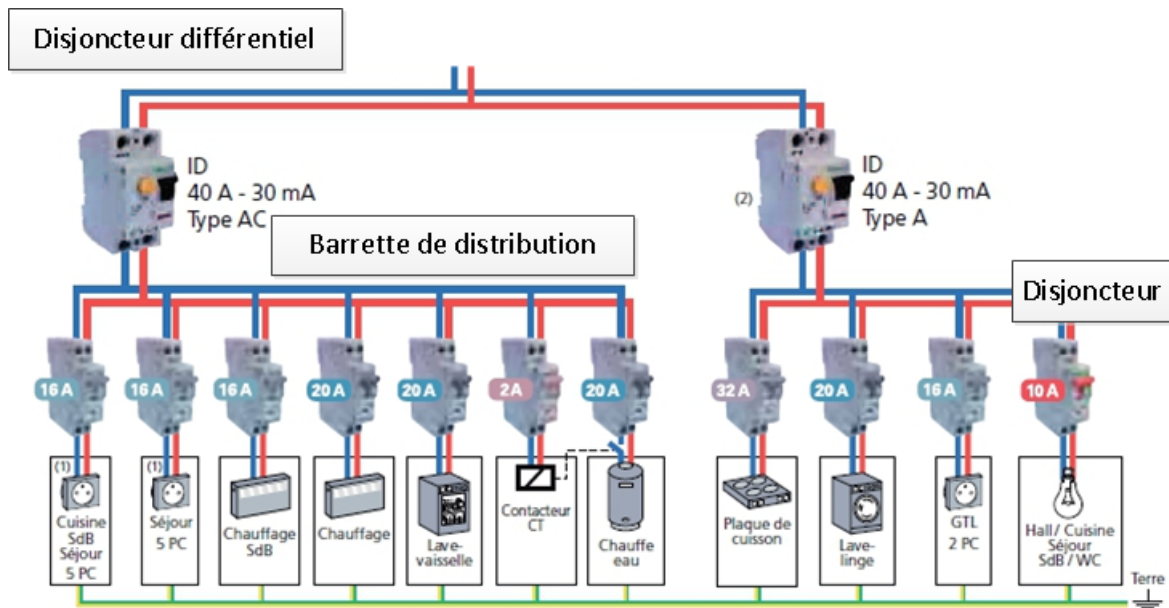


FIGURE 1.7 – Schéma multifilaire d'un tableau électrique domestique

Le schéma de la figure 1.7 représente une installation unipolaire (une phase et un neutre). Nous pouvons voir les 2 fils. Le compteur est en haut et l'électricité est distribuée depuis 2 disjoncteurs différentiels pour ensuite aller via des barrettes de distribution dans des disjoncteurs qui alimentent des consommateurs. La figure 1.7 est un schéma multifilaire (tous les fils sont dessinés) d'une installation unipolaire. Le principe du différentiel est uniquement présent pour l'électricité résidentielle et n'est pas utilisé dans l'industrie, nous n'expliquerons donc pas ce principe ici.

Dans l'industrie, on utilise des schémas unifilaires qui sont plus réduits étant donné qu'on y dessine qu'un fil à la place de plusieurs. Le nombre de fils ou le type de câble est écrit et donc, si on place un disjoncteur marqué 4P cela signifie que c'est un câble et un disjoncteur 4 pôles.

Le sens du courant est symbolisé dans la littérature de *amont* vers *aval*. Dans le cas d'un compteur puis d'un disjoncteur, nous parlerons du côté *amont* entre ce disjoncteur et le compteur, et du côté *aval* à sa sortie.

1.2.1.2 Dimensionnement des éléments

Les éléments constitutifs d'un réseau électrique sont choisis suivant les besoins des consommateurs finaux. Un câble doit être proportionnel au disjoncteur de protection pour les raisons évoquées dans la partie 1.1. En effet, si nous mettons une protection de 20 A sur un câble de $1,5 \text{ mm}^2$, le câble chauffera par effet Joule car l'intensité sera trop importante par rapport à sa section. Le câble aura donc la fonction de fusible : il conduira l'électricité jusqu'au moment où il fondra et alors ne conduira plus. Il y a aussi des risques d'incendie des éléments en plastique composant le câble dû au dégagement de chaleur.

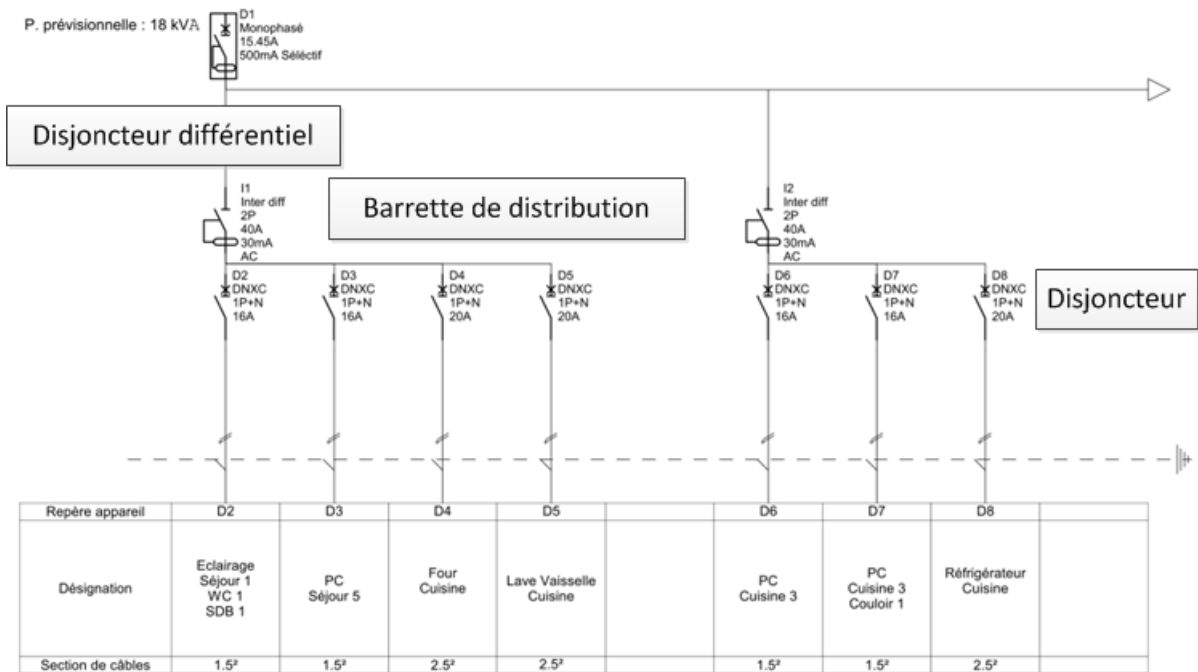


FIGURE 1.8 – Schéma unifilaire d'un tableau électrique domestique

La RGIE⁷ définit un ensemble de règles pour toute installation électrique en Belgique. Dans les articles 118.01 et 118.02, un tableau définit la relation entre la section et le courant maximal admissible (et donc le courant maximal du disjoncteur) comme suit :

| Section en mm ² | Intensité max du disjoncteur |
|----------------------------|------------------------------|
| 1,5 | 16A |
| 2,5 | 20A |
| 4 | 25A |
| 6 | 40A |
| 10 | 63A |
| 16 | 80A |
| 25 | 100A |
| 35 | 125A |

TABLE 1.1 – Rapport entre disjoncteur et section du câble

1.2.2 Exploitation et distribution électrique

Les grands principes précédemment illustrés via l'électricité domestique sont aussi présents dans la distribution d'énergie à grande échelle. Les contraintes physiques sont proportionnelles à la quantité d'énergie en transit.

Dans notre cas d'étude, nous parlerons de 11 000 Volts AC (11kV), 900 V DC, 700 V DC et de 400 V AC avec des intensités de plus de 300 ampères.

7. Général sur les Installations Électriques

Nous allons parcourir un bref historique sur la distribution électrique depuis le début de l'électrification du transport jusqu'à aujourd'hui afin de comprendre d'où nous venons et vers où nous voulons aller dans le futur. L'histoire complète est disponible depuis le site officiel de la S.T.I.B. [6].

1.2.2.1 Historique

Le 1er mai 1869, le premier tramway est en service entre la Porte de Namur et le bois de la Cambre. Les tramways étaient à traction chevaline.

Des essais de traction à vapeur ont eu lieu entre 1876 et 1878, mais une voiture à vapeur de 6 tonnes avait une autonomie de seulement 6 à 7 km. De plus, le système à vapeur était très bruyant pour les chevaux des autres attelages. Il fallait trouver une alternative.

Les premiers trams à traction électrique arrivent en 1893 à Liège suivi de Bruxelles quelques mois plus tard. En 1894, il y avait approximativement 37 km de rails.

Au début de ces trams électriques, la distribution de l'énergie et sa surveillance se faisaient par du personnel dans chaque sous-station⁸. A l'époque, chaque SST était une vraie petite maison avec une toilette, une douche, une cuisine et un lit. Les ouvriers étaient en charge du diagnostic des avaries dans l'installation sous sa responsabilité, et si un disjoncteur déclenchait, il devait le remettre en service après avoir prévenu le **Dispatching Centre**⁹. Le Centre coordonnait et enregistrait chaque événement déclaré par le personnel de surveillance via téléphone et donnait les ordres pour les actions à faire par les ouvriers dans chaque SST. Par exemple, lors d'un déclenchement, l'ouvrier en charge de la surveillance téléphonait au Centre pour signaler l'avarie. Et après vérification, ce dernier ordonnait le réenclenchement du disjoncteur.

Au début des années 70 arrivèrent les premiers systèmes de télécontrôle sous la forme d'un synoptique physique qui remplissait des murs entiers avec des lampes pour les statuts des éléments et des interrupteurs (à clé ou non) pour faire des télécommandes sur les équipements. Un système de buzzer indiquait la criticité d'une alarme et l'opérateur devait se lever pour faire des actions à distance à partir du synoptique.

1.2.2.2 Contexte actuel

Actuellement, les synoptiques physiques sont remplacés par un logiciel. L'ensemble applicatif de supervision est appelé SCADA pour *Supervisory Control And Data Acquisition*.

1.2.2.3 Conduite électrique

La conduite électrique est le métier qui assure la fourniture d'électricité à un niveau de qualité défini et assure le rétablissement de celle-ci dans le cas où elle est interrompue. Dans notre contexte, cela signifie la réalimentation des consommateurs affectés par un défaut (i.e. déclenchement par court-circuit, par surcharge ou dû à des travaux).

L'opérateur (appelé dispatcheur) surveille en temps réel la santé du réseau et effectue des actions curatives et/ou correctives par le biais du SCADA pour continuellement alimenter les consommateurs. Pour ce faire, les éléments de distribution sont pilotés via un ensemble d'automates mettant à disposition des informations et des commandes sur les différents composants du réseau électrique au SCADA pour les afficher sous forme schématique par sous-station ou général grâce à une carte de l'état de tout le réseau. Le rôle du dispatcheur¹⁰ ne s'arrête pas à la conduite électrique. Il est responsable de coordonner l'intervention des équipes de dépannage et de maintenance. Il gère aussi le registre des entrées/sorties dans chaque SST.

8. Abrégé SST dans ce mémoire

9. Nom utilisé jusque très récemment pour le centre du service électrique, actuellement nommé **dispatching énergie**

10. Nom donné à un opérateur de conduite



FIGURE 1.9 – Dispatching fin des années 70. On y voit les synoptiques de télécontrôle des sous-stations sur les murs (source : STIB-MIVB)

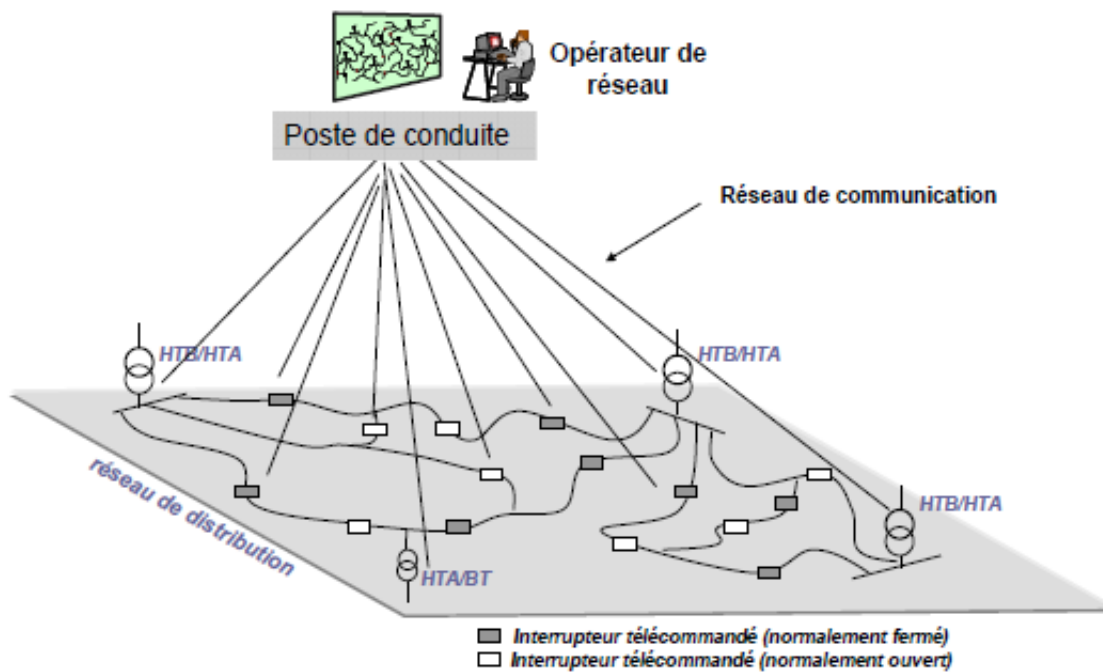


FIGURE 1.10 – Conduite centralisée d'un réseau de distribution électrique. Les HTA/BT sont assimilables aux différentes sources électriques appelées Inter [9, p. 23]

Il est à noter qu'à l'instar des gestionnaires de réseau de transport d'électricité tel que ELIA, la S.T.I.B. n'a pas, actuellement, la possibilité de modifier les tensions sur les lignes afin de limiter les pertes par effet Joule.

1.2.2.4 SCADA

Principal outil pour l'opérateur de conduite électrique, il est composé de plusieurs parties suivant les spécificités du métier. Il possède généralement une interface graphique, une gestion d'alarme et une partie acquisition. Dans notre domaine, il est composé de modules de gestion de distribution et loadflow. Plus précisément, dans notre contexte, les modules sont :

Interface homme-machine : mise à disposition pour les opérateurs des données et des commandes provenant des différents équipements sous forme schématique de chaque sous-station.

Gestion d'alarme : l'opérateur reçoit les alarmes et les traite. Certains événements ne sont pas nécessairement alarmants ; il peut y avoir de fausses alarmes dues à des travaux sur l'infrastructure ou générées par des défauts. Il faut donc masquer les alarmes qui ne sont pas pertinentes pour ne pas perdre les vraies alarmes dans le bruit.

Acquisition : pour alimenter le système en **information temps réel**, il est nécessaire d'avoir un réseau de télécommunication et des éléments communicant. Mais aussi, connaître l'état du système lui-même.

Distribution Management System (DMS) : c'est une des parties spécifiques à la fourniture. Cela peut être de l'énergie comme de l'eau ou même du gaz. Son principal intérêt se trouve dans sa capacité à résumer un ensemble d'informations pour indiquer s'il y a de l'énergie ou autre qui circule dans les conducteurs. Cet outil est utilisé pour présenter la santé du réseau sur une carte haute tension (HT).

LoadFlow : partie simulation du système, il se base sur les caractéristiques des générateurs, des conducteurs et des charges raccordées pour calculer l'écoulement de la puissance à travers un réseau électrique.

Depuis cet ensemble logiciel, l'opérateur est en liaison avec les sous-stations électriques pour la supervision et les commandes à distance sur les organes de manœuvre. Ces éléments sont des équipements manœuvrables qui permettent de manipuler l'électricité. Nous reviendrons plus tard et en détail sur leurs utilisations.

1.2.2.5 Sous-station

Suivant le type d'élément à alimenter, les tensions et types de courants diffèrent. Le métro utilise du 900 V DC et le tram du 700 V DC. Les moteurs en courant continu offrent un grand couple au démarrage, ce qui permet d'avoir une meilleure accélération afin d'être rapidement à la vitesse de croisière. Dans le cas d'une station de métro ou d'un bâtiment, c'est une tension plus connue qui est utilisée à savoir du 230 V AC. Comme vu précédemment, la tension disponible est du 11 kV AC pour sa facilité de transport sur de longues distances. Il faut donc la transformer et la redresser suivant les cas d'utilisation.

Dans le cas d'une sous-station pour le métro ou le tram, il faut abaisser la tension pour ensuite la redresser¹¹. Dans le métier cela porte le nom de **sous-station de traction** ou **poste de redressement**.

Pour l'alimentation d'une station ou d'un bâtiment, il suffit de diminuer la tension via un transformateur. Nous l'appelons une **sous-station gare** ou **poste de transformation**.

11. Il est en effet beaucoup plus simple et efficace de faire varier la tension d'un courant alternatif à la place d'un courant continu

Composants

Les composants d'une sous-station varient selon le type de sous-station.

Tous les éléments d'une sous-station ne sont pas commandables à distance, mais les états de chaque composant sont supervisés.

Jeu de barres : comme la barrette de distribution dans un tableau électrique domestique, elle distribue l'énergie aux éléments s'y connectant.

Disjoncteur : protège des courts-circuits et des surcharges. Il possède 4 états (enclenché, déclenché, embroché, débroché). La partie enclenché/déclenché est commandable mais pas l'embrochage qui est mécanique. Pour que de l'électricité passe à travers le disjoncteur, il faut qu'il soit embroché et enclenché.

Disjoncteur de couplage HT : effectue un couplage ou une isolation entre 2 jeux de barres. Pour faire passer le courant de l'une vers l'autre ou inversement. Il possède les mêmes caractéristiques qu'un disjoncteur.

Présence tension : informe la présence d'une tension sur un câble ou un jeu de barres.

Redresseur : présent dans les postes de redressement, il génère un courant continu à partir d'un courant alternatif.

Transformateur : il abaisse la tension et est placé dans toutes les sous-stations.

Au niveau d'un jeu de barres, il peut y avoir différentes connexions telles que l'arrivée de courant, des sorties vers d'autres SST, des sorties vers des redresseurs ou des transformateurs dans le cas d'une traction¹² ou d'une gare¹³. Ces connexions se répartissent en :

Omnibus : ensemble de jeux de barres et de câbles qui font le tour d'un ensemble de SST afin de pouvoir servir de liaison de secours. En temps normal, les omnibus sont gardés sous tension afin de pouvoir faire une reprise le plus rapidement possible en ouvrant le disjoncteur de couplage HT qui l'isole des autres jeux de barres.

Auxiliaire : alimente les équipements internes à la SST tels que la ventilation, l'éclairage, etc. Noté XA, XB, ...

Redresseur : sortie vers un ensemble redresseur pour alimenter le métro ou le tram. Noté RA, RB, ...

Arrivée : arrivée normale du courant. Noté A1, A2, ...

Sortie : sortie vers une SST adjacente. Noté S1, S2, ...

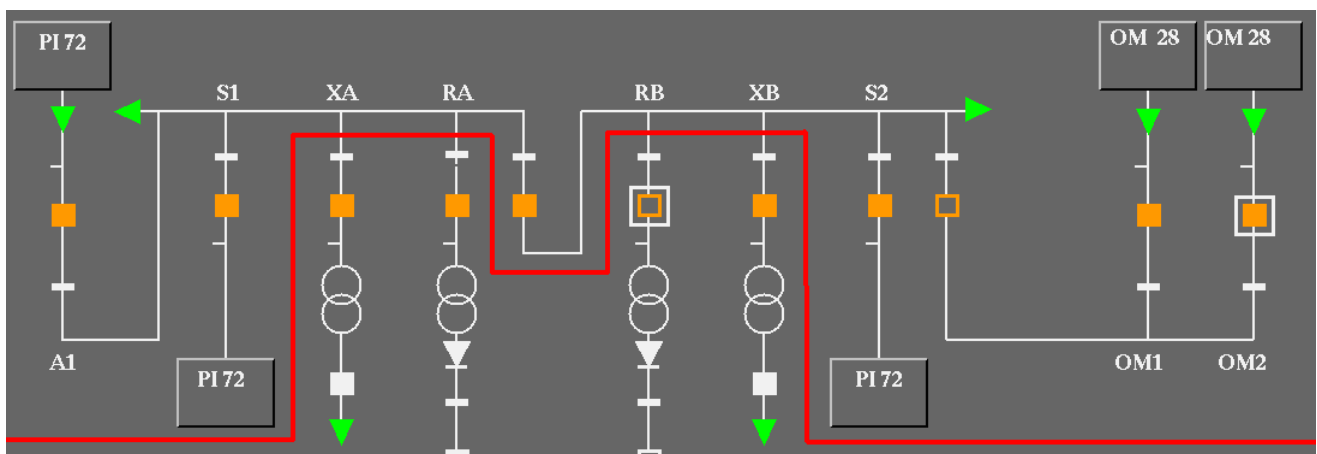


FIGURE 1.11 – Image de la partie HT d'une SST dans l'IHM du SCADA

La partie haute d'une sous-station est la partie HT, en haut du trait rouge (voir Figure 1.11). Elle est composée d'une ou plusieurs sorties et d'une ou plusieurs entrées. Dans l'exemple, l'arrivée S1

12. Abréviation pour sous-station de traction

13. Abréviation pour sous-station gare

vient depuis le câble PI.72 sur un disjoncteur puis sur un jeu de barres ; ce jeu de barres est lié à un autre via un disjoncteur de couplage HT. Les sorties S1 et S2 distribuent l'électricité depuis un jeu de barres via leurs disjoncteurs respectifs vers des câbles (PI 72) à d'autres jeux de barres dans d'autres sous-stations. Les omnibus OM1 et OM2 vont vers les câbles OM.28 qui vont chacun vers une autre SST.

1.2.3 Topologie

Afin d'alimenter en électricité l'ensemble des installations de la S.T.I.B. et de faire rouler les métros ainsi que les trams, il est nécessaire d'avoir un réseau de distribution efficace, fiable, robuste et surtout, de le monitorer en temps réel.

La disposition du réseau de distribution électrique est appelée **topologie**.

Cette structure est composée d'éléments statiques tels que des conducteurs (câbles, jeux de barres, manchons ...) et d'équipements actifs et/ou manœuvrables (sectionneurs, disjoncteurs ...) appelés **organes de manœuvre**.

Pour avoir une exploitation fiable, la topologie du réseau électrique est organisée afin que chaque SST soit alimentable par au moins 2 sources. Ces alimentations alternatives sont des jeux de barres adjacents, reliés par des câbles ou par des disjoncteurs de couplage HT. Un câble possède une section, une longueur et a toujours un disjoncteur à chaque extrémité.

L'ensemble du réseau électrique est supervisé et commandé depuis un ou plusieurs postes de conduite grâce un ensemble d'automates communiquant.

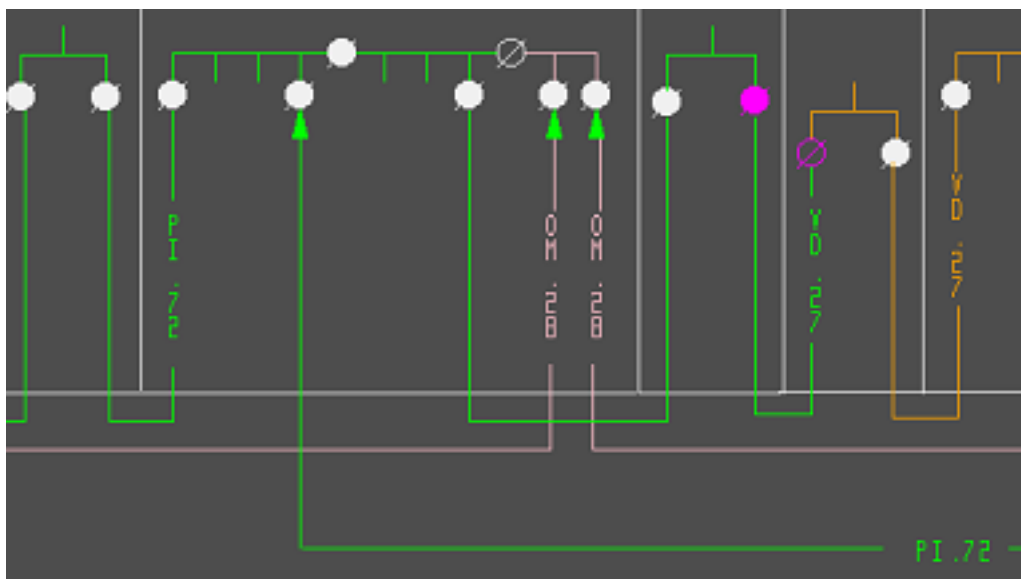


FIGURE 1.12 – Partie de la carte HT relative à la SST de la figure 1.11

La configuration normale de la topologie est définie par un bureau d'étude électrique interne à la société. Il définit la configuration normale du réseau via un document appelé instructions de lignes. Le symbole rond et plein représente un disjoncteur fermé, alors qu'un disjoncteur ouvert est symbolisé par un rond vide. Ces valeurs proviennent de la partie acquisition du SCADA, appelée aussi **valeur temps réel**. Dans la figure 1.12 les disjoncteurs en mauve ne sont pas dans leur état préférentiel, c'est-à-dire dans l'état prévu par les instructions de lignes. Pour indiquer cette différence, les instructions de lignes sont intégrées au SCADA via une valeur dans chaque disjoncteur pour indiquer son état normal ou état dit **préférentiel**.

Il arrive qu'un défaut apparaisse ou qu'une modification soit nécessaire sans devoir changer tout le câble. Dans ce cas, un **manchon** lie 2 morceaux de câble entre eux comme nous pouvons le voir sur

la figure 1.13. Les manchons sont répertoriés et localisés depuis leur distance par rapport au départ du câble. Il est important pour la suite de souligner le fait qu'un manchon reste un point un peu plus fragile du câble.



FIGURE 1.13 – Différents types de manchons

1.2.3.1 Distribution du 11 kV

La S.T.I.B. achète du 36 kV AC sur des sources Elia appelées Inter. De là, des transformateurs fournissent du 11 kV AC vers des jeux de barres pour la répartition des charges, les disjoncteurs partant de là sont appelés *départ HT*. La STIB est facturée sur les consommations des différents points d'alimentation 36 kV. Dans le contrat de fourniture, il est prévu un maximum de consommation au-delà duquel il y a une surtarification.

Ensuite, le 11 kV est distribué dans un réseau de câbles haute tension (HT) vers différents points dans la ville appelées sous-stations (SST). Dans ces SST, il y a un ou plusieurs jeux de barres qui alimentent d'autres SST adjacentes et des équipements de transformation ou de redressement suivant le type de SST comme résume la figure 1.14.

1.2.3.2 Redressement en courant de traction

Pour fiabiliser l'exploitation du métro et du tram, chaque **réseau**¹⁴ est alimenté par 2 sources différentes. De cette manière, si une sous-station est en panne, le métro/tram roule toujours et les utilisateurs ne sont pas impactés. Une parallèle est donc faite dans chaque réseau. La différence de potentiel entre les 2 points d'alimentation n'est pas présente car ces 2 points ne sont pas très éloignés, ce qui ne crée pas d'équilibrage à l'instar de ce que nous avons pu voir dans la haute tension. De plus, il y a des interrupteurs de scission et des sectionneurs entre les réseaux. Cela permet de ponter un réseau sur un autre afin de prendre de l'alimentation sur les réseaux voisins en cas de problèmes ou de travaux au niveau des alimentations normales.

1.2.3.3 Transformation pour les stations

Chaque sous-station gare est alimentable par 2 sources 11 kV sur le même jeu de barres. Vient ensuite le transformateur pour le 400 V AC. Notons qu'après cela, un réseau de sécurité passe de station en station pour les éléments importants avec un système de commutation manuel pour prendre de l'alimentation 400 V AC sur une des 2 sources disponibles. Pour les éléments critiques, un système de reprise automatique no-break avec onduleur et batteries est placé dans les tractions pour alimenter en plus les 2 ou 3 gares adjacentes.

14. Zone d'alimentation de traction, au moins une entre deux stations

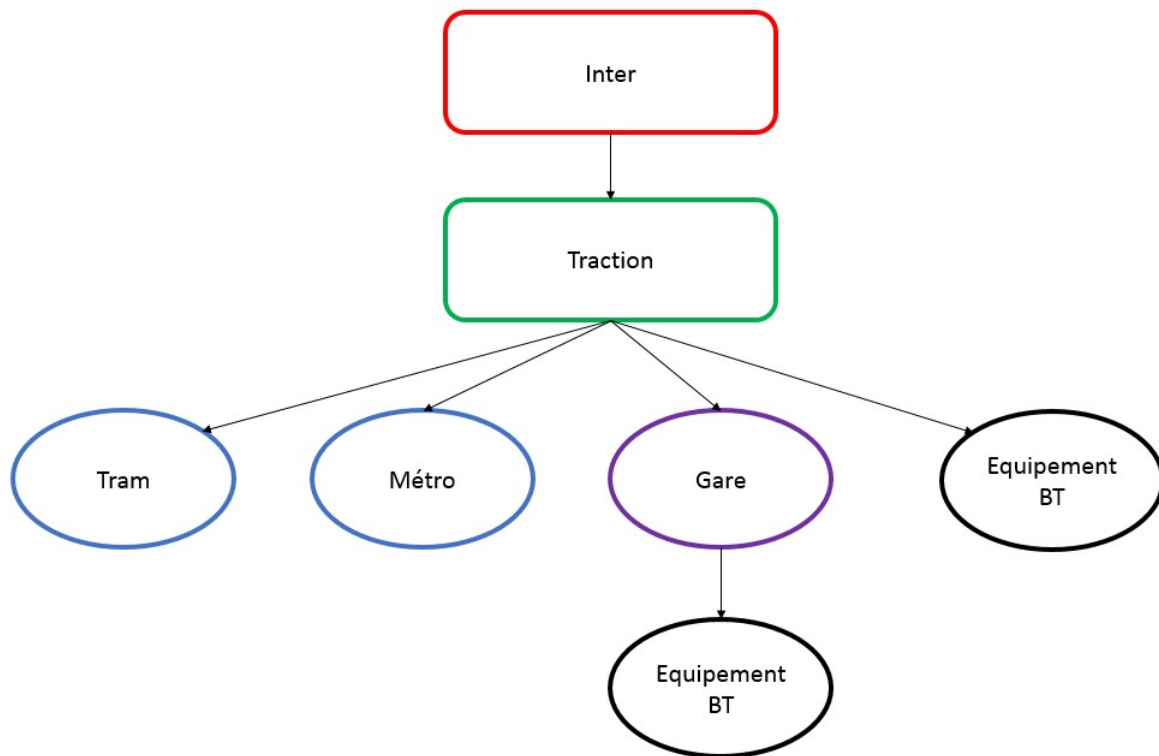


FIGURE 1.14 – Schéma de principe de la distribution électrique à la S.T.I.B.

1.3 Problématique

Lors d'une perte d'alimentation sur un jeu de barres, tout ce qui est en aval de celui-ci est hors tension. Une partie du métier de la conduite électrique est de rétablir l'alimentation du jeu de barres grâce à un ensemble d'actions appelé **manœuvres de reprise**. Les manœuvres sont sur des documents papier qu'il faut mettre à jour à chaque changement dans le réseau électrique. Cela engendre donc des problèmes de synchronisation et de rapidité de réaction.

Il existe plusieurs types de manœuvres :

Reprise avec coupure : l'action est en général curative, la plupart du temps cela est fait juste après un déclenchement pour réalimenter la partie hors tension.

Reprise sans coupure : l'action est plus correctrice, le but étant de pouvoir prendre de l'énergie depuis un autre chemin sans coupure. Pour ce faire, il est nécessaire de mettre 2 sources en parallèle pour ensuite couper la première alimentation. Si ce sont 2 Inter différents, un équilibrage de tension se produit et engendre une consommation dans l'Inter qui a le plus haut potentiel. Ceci est à faire temporairement.

En se basant sur une partie des travaux de B.Gotzig [23, p. 12] :

“Le rétablissement de l'alimentation peut s'avérer complexe car il faut tenir compte de plusieurs contraintes :

- Capacités limitées des départs sains adjacents ;
- Un nombre de manœuvres à effectuer aussi faible que possible pour une réalimentation facile et rapide ;
- Complexité pour choisir une configuration de secours à cause des nombreuses topologies possibles ;”

Nous ajoutons que certains organes de manœuvre peuvent être hors service, ce qui limite les possibilités de reprise.

Notons que la S.T.I.B. a défini une échelle de priorités pour les consommateurs de courant. Le niveau le plus haut sont les SST gare. il en va de la sécurité des personnes étant donné que les stations sont souterraines. Les tractions viennent après, les dépôts et ateliers arrivent en dernier.

1.3.1 Outils déjà en place

Le dispatching utilise déjà un outil d'aide afin de visualiser sur une carte l'ensemble du réseau. L'opérateur a à sa disposition deux écrans de 40 pouces pour l'affichage de l'état du réseau HT appelé carte haute tension. Pour visualiser la grandeur du réseau, il existe aussi une version papier prenant 2 cartes de 60 cm sur 2,2 m. Nous pouvons voir un extrait sur la figure 1.15.

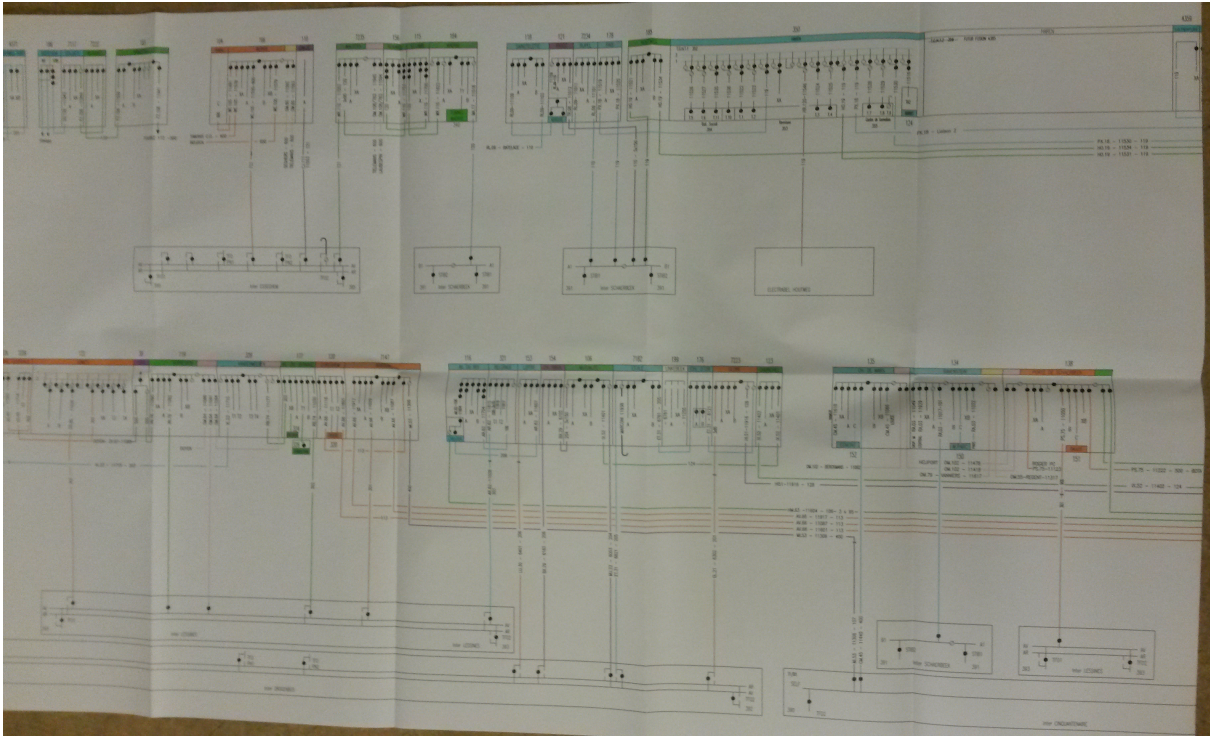


FIGURE 1.15 – Extrait d'une carte 11 kV

Cette carte est animée avec l'état des disjoncteurs en temps réel et un calcul est effectué grâce au module loadflow pour savoir si un câble est alimenté en combinant les disjoncteurs et les présences tension. Cet outil informe aussi des éventuels parallèles présentes dans le réseau.

1.3.2 Première formulation du problème

À ce stade, nous pouvons faire une première formalisation de la problématique ainsi que des besoins du client.

Actuellement, l'opérateur ne connaît pas la quantité d'énergie en transit dans les liaisons ni la puissance disponible et consommée dans le réseau. Afin de pouvoir réagir le plus rapidement et correctement possible, nous proposons donc un système d'aide à l'exploitation du réseau électrique.

Pour cela, nous voulons fournir aux opérateurs un affichage des charges sur chaque départ¹⁵ ainsi que la quantité de puissance en transit dans les liaisons avec un indicateur de réserve disponible dans un câble.

Par la suite, nous désirons fournir à un opérateur une manœuvre de reprise après coupure qui soit la plus optimisée possible pour récupérer de l'alimentation sur un jeu de barres tout en respectant les contraintes topologiques et physiques des éléments du réseau. Mais aussi, si possible, prendre de l'énergie sur une source qui possède le plus de réserve sur sa consommation prévue par le contrat de fourniture.

Un autre aspect d'un point de vue conception du réseau électrique est qu'il n'y a actuellement aucun outil de simulation afin que le service d'étude électrique puisse tester d'éventuelles modifications. Cette

15. Un départ est une source d'alimentation située dans un Inter

outils pourrait aussi permettre de projeter une nouvelle partie du réseau dans l'actuel afin de voir la réaction théorique du réseau. Si une solution existe pour répondre à des besoins opérationnels en termes de calculs et d'optimisation, cet outil pourrait sans trop de difficulté effectuer des simulations sur un réseau existant ou modifié. Cela permettrait également de faire des simulations pour voir comment se comporterait théoriquement le réseau à la suite d'une montée de la consommation ou faire des analyses de fiabilité ou de robustesse.

1.3.3 Limitations

Dans un premier temps, nous nous concentrerons sur la problématique de la distribution 11 kV. En effet, les redresseurs et les transformateurs étant alimentés par le jeu de barres à travers des disjoncteurs. Nous pouvons supposer que s'il y a de l'électricité sur un jeu de barres, ce qui se trouve en aval est aussi alimenté.

Les manœuvres sans coupure étant plus complexes, nous ne les aborderons pas dans ce travail. Les calculs de validité d'une configuration topologique reste néanmoins les mêmes après reconfiguration. La grosse difficulté se trouve dans le passage sans coupure entre deux configurations. De plus, la demande du dispatching est à la base pour les manœuvres de restauration du courant dans les zones non alimentées.

1.4 Conclusions

Nous avons présenté le domaine de la distribution électrique via des analogies avec l'électricité domestique tels que des câbles et des interrupteurs. Nous avons énuméré quelques contraintes physiques dans le domaine de l'électricité tels que le courant, la tension, la puissance et les limites de transfert de courant dans un câble.

Nous avons découvert l'organisation du réseau électrique 11kV ainsi que ses composants. Les principaux éléments sont les disjoncteurs, les câbles et les jeux de barres. Un câble relie deux jeux de barres au travers de disjoncteurs servant d'interrupteurs à distance et de protections électriques. Tout ce réseau est surveillé par un système de monitoring et des opérateurs de conduite électrique maintiennent ce réseau dans des normes de sécurité et de disponibilité définies.

Pour finir, nous avons émis une première formulation du problème en un outil d'aide à la décision et à l'exploitation comprenant une première partie de calcul en temps réel des puissances en transit dans le réseau et une autre partie d'optimisation de la configuration du réseau électrique en tenant compte de contraintes topologiques et physiques des éléments du réseau. Cette reconfiguration sera utilisée pour des manœuvres de reprise du courant des zones non alimentée. Nous ne traiterons pas des manœuvres de reprise sans coupure car ce n'est pas l'objet de la demande, mais le passage entre deux configuration via une étape de mise en parallèle de l'alimentation ne semble pas un problème à partir du moment où nous sommes capable de générer des configurations optimales.

Par la suite, ces outils pourront utiliser des réseaux et des données fictives pour faire de la simulation.

Pour traiter informatiquement ce domaine, nous devons modéliser nos besoins et les informations nécessaires pour obtenir des éléments manipulables et calculables.

Chapitre 2

Réseau de distribution : structure et modélisation

Pour pouvoir travailler sur un problème, il faut en premier lieu le modéliser avec des outils permettant de traduire des connaissances souvent informelles en informations structurées.

Pour ne pas partir de rien et afin de valider la modélisation du réseau existant, nous analyserons la structure de la base de données ainsi que son exploitation sous forme de graphe pour extraire les informations topologiques nécessaires.

2.1 Représentation d'un réseau électrique

Nous avons vu les principes d'un réseau de distribution électrique. Les liaisons entre les différents éléments de ce réseau peuvent être modélisées et exploitées à l'aide de la théorie des graphes. Cette modélisation est aussi retenue dans [9], [22] et [23]. En effet, un réseau électrique peut être traduit en un graphe où les nœuds sont des composants de distribution ou de consommation. Les arêtes correspondent aux câbles au même titre que les disjoncteurs de couplage HT liant 2 jeux de barres. Les transformateurs peuvent aussi être considérés comme des arêtes étant donné que ceux-ci prennent une source de tension en entrée, la modifient puis fournissent une tension en sortie.

Nous considérerons ainsi, dans un premier temps, l'ensemble du réseau de distribution électrique sous la forme d'un graphe G composé d'un ensemble d'arêtes V reliant des nœuds E . Pour rappel[25] :

- " Un graphe est un triplet (V, E, Ψ) tel que :
- V est un ensemble dont les éléments sont appelés sommets ou nœuds,
 - E est un ensemble dont les éléments sont appelés arêtes,
 - Ψ est une fonction, dite fonction d'incidence, qui associe à chaque arête un sommet ou une paire de sommets."

Dans son utilisation pour représenter un réseau électrique, un nœud peut exister seul sans être arraché à un lien. C'est alors très probablement un erreur d'encodage, il n'aurait pas de raison d'exister pour faire des calculs. Un lien ne peut exister qu'entre deux nœuds. En effet, cela n'a pas de sens d'avoir une liaison bouclée sur un même nœud. Les figures 2.1 et 2.2 donnent des exemples de différents graphes.

Nous allons décrire les différents types de codage de graphe puis analyser les caractéristiques de chaque élément constituant le réseau pour monter leur équivalent en graphe. Pour finir, nous allons expliquer la méthode de stockage retenue dans notre projet.

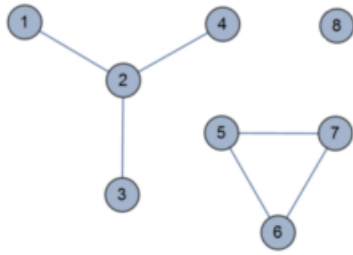


FIGURE 2.1 – Graphe composé d'un seul nœud (8) et 2 autres graphes

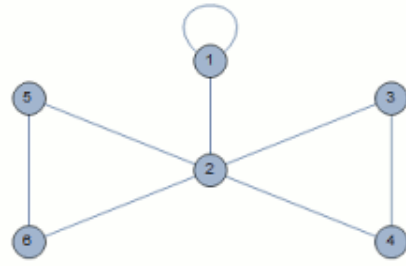


FIGURE 2.2 – Graphe avec une boucle sur le nœud 1 qui n'a électriquement pas de raison d'être

2.1.1 Techniques de codage des graphes

Le codage d'un graphe permet de le modéliser, de le matérialiser et de le stocker avec ses composants tels que les nœuds et les connexions entre eux qu'ils soient orientés ou non.

Il existe principalement deux manières de stocker un graphe ; sous forme matricielle ou vectorielle.

Plus précisément :

- Matrice d'incidence sommets - arêtes, diagonalement symétrique de haut à gauche vers en bas à droite dans le cas d'un graphe orienté ;
- Matrice d'adjacence entre sommets, si le graphe est orienté alors ils y a un chiffre négatif en sortie d'un nœud et positif en entrée. Toujours positif dans les deux sens sinon ;
- Vecteur, liste de couples de sommets adjacent.

Dans la matrice d'incidence, les lignes sont les nœuds et les arêtes sont les colonnes. Une matrice d'adjacence montre les connexions directes entre les nœuds placés en lignes et en colonnes.

La représentation vectorielle d'un graphe est une liste de doublets de nœuds directement connectés. Un des avantages de cette notation est d'être facilement extensible pour ajouter de l'information sur les liens. Autrement dit, c'est une liste de liens avec les nœuds à chaque extrémité et pour lesquels il est possible d'ajouter des données sur chaque lien.

La figure 2.3 montre la relation entre un graphe, sa représentation sous la forme d'une matrice d'incidence et sous la forme d'un vecteur.

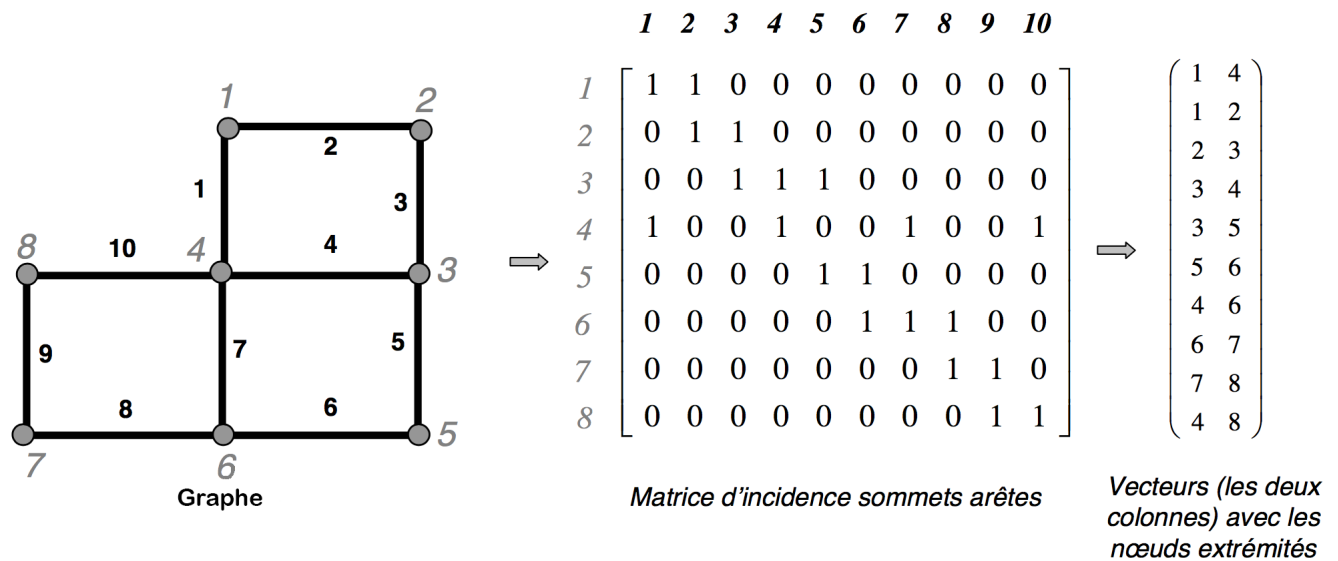


FIGURE 2.3 – Graphe et représentations associées [9, p. 56]

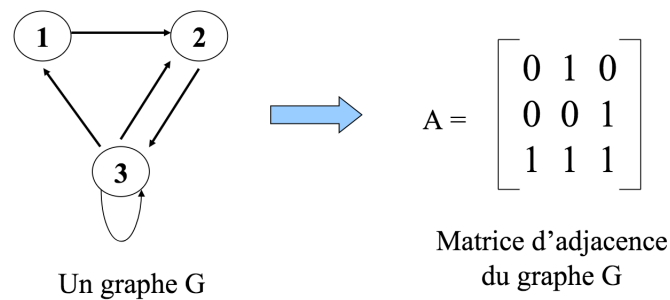


FIGURE 2.4 – Graphe orienté et matrice d'adjacence associée

Pour notre travail, nous utiliserons la représentation vectorielle du réseau électrique, nous verrons les raisons de ce choix dans la partie 2.4.1.

2.1.2 Représentation des éléments du réseau

Nous allons maintenant montrer les équivalences entre la constitution d'un réseau électrique et un graphe. Pour chaque élément du réseau, nous expliciterons son équivalence dans la théorie des graphes.

2.1.2.1 Arête

Dans un graphe, une arête relie 2 nœuds ou un seul si elle boucle sur le même. Dans notre domaine, un lien est un élément reliant électriquement 2 nœuds ; c'est soit un câble appelé **segment**, un **transformateur**, une **cellule inter-barres** ou un **groupe**. Les organes de manœuvres sont optionnels car pas toujours physiquement présents ou non commandables. Dans ce cas, nous considérerons son absence comme étant un interrupteur toujours fermé¹.

Segment : un segment est un câble reliant 2 éléments de type nœud. Il possède une section avec laquelle il est possible de calculer l'intensité maximale admissible comme vu dans la partie 1.1.1.

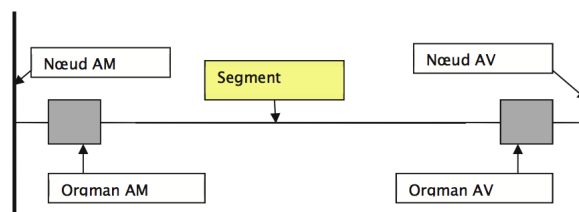


FIGURE 2.5 – Schéma topologique d'un segment

Transformateur : un transformateur relie électriquement 2 nœuds tout en modifiant la tension. Nous n'utiliserons pas ses caractéristiques physiques, nous nous contenterons de le considérer comme un conducteur d'un point de vue topologique.

Cellule inter-barres : une cellule inter-barres est un disjoncteur reliant 2 jeux de barres. Nous considérerons ce type de cellule comme étant un lien possédant un seul organe de manœuvre amont : la cellule elle-même. Nous mettons aussi à un la valeur de l'organe de manœuvre aval. De cette manière, un des côtés sera considéré comme toujours fermé. L'autre côté du lien sera commandable et permettra donc d'activer ou non cette liaison.

1. Un interrupteur fermé permet le passage d'électricité

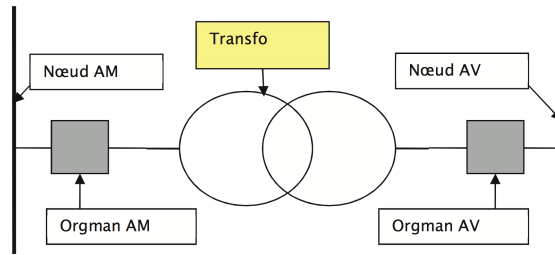


FIGURE 2.6 – Schéma topologique d'un transformateur

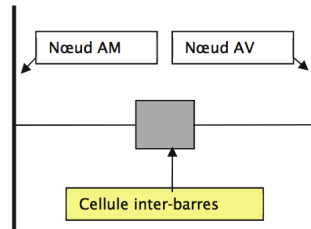


FIGURE 2.7 – Schéma topologique d'une cellule inter-barres

Groupe : un groupe est un point d'injection de tension qui ne possède qu'un lien en aval comme nous pouvons le voir dans la figure 2.8. Cet élément est un objet particulier, si nous regardons topologiquement un groupe nous pouvons remarquer qu'il est connecté à un seul jeu de barres. Un jeu de barres étant du type nœud, le groupe ne peut donc être qu'une arête. Dans ce cas, il doit être connecté à un deuxième nœud. En effet, une arête relie 2 nœuds ensemble ou un seul nœud si l'arête forme une boucle. D'un point de vue électrique, avoir une boucle sur un nœud n'a pas de sens. Nous considérerons un nœud fictif de l'autre côté du groupe pour satisfaire à la définition d'un graphe.

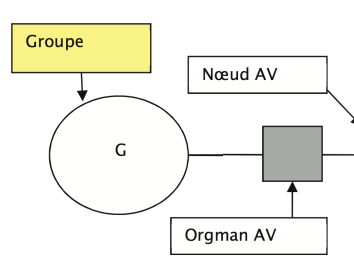


FIGURE 2.8 – Schéma topologique d'un groupe

2.1.2.2 Nœud

Les éléments topologiques correspondant à un nœud dans la théorie des graphes sont les jeux de barres.

Une barre est un élément qui achemine l'énergie vers un ou plusieurs équipements de distribution ou consommateurs. Si une barre n'est connectée à aucun consommateur, c'est une barre de *transit*. Dans ce cas, nous pouvons considérer que la charge sur cette barre est nulle. Si une barre possède des consommateurs, nous devons considérer une charge diminuant l'intensité d'entrée pour calculer le courant en sortie. C'est une barre de *charge*. Notons que pour représenter un manchon dans le système actuel nous utilisons une barre reliant les 2 segments.

2.2 Topologie d'un réseau électrique

Nous présentons ici un réseau électrique sous la forme de graphes avec toutes ses liaisons possibles sans regarder au positionnement des disjoncteurs. À ce niveau, nous considérerons tous les disjoncteurs

comme étant fermés donc toutes les liaisons seront vues comme actives. Par après, nous verrons la configuration du réseau avec l'utilisation ou non des liens grâce aux positionnements des disjoncteurs attachés aux liens.

Dans les installations d'alimentations électriques, il existe plusieurs types de topologie suivant la sécurité d'approvisionnement voulue ainsi qu'un calcul entre fiabilité et coût des installations. Nous allons voir les différents types d'alimentation au niveau des Inter ainsi que les différentes structures de réseau de distribution existant.

Pour chaque type, nous allons montrer le graphe correspondant. Les noeuds étant des jeux de barres et les liens étant un moyen de passage de l'électricité entre eux comme vu dans la partie 2.1.2. Nous devons voir ici les jeux de barres comme étant un noeud de distribution de courant. Plus tard, les noeuds distribueront le courant et en consommeront en même temps.

2.2.1 Types d'alimentation

Simple dérivation : une alimentation en simple dérivation est la plus simple et la plus sensible à une panne due à la non-redondance de l'alimentation. L'artère principale est un jeu de barres donc un noeud, elle est en gris dans le graphe correspondant. Il y a quatre éléments connectés à cette artère principale via un disjoncteur pour chaque élément. Cette liaison est activable par ce disjoncteur. Nous pouvons supposer qu'il y a un autre équipement de distribution d'électricité après chaque transformateur, mais ils ne sont pas représentés sur la figure 2.9, c'est pour cela que nous avons à l'autre bout de chacune des quatre sorties un noeud pour y attacher le lien dans l'équivalent en graphe.

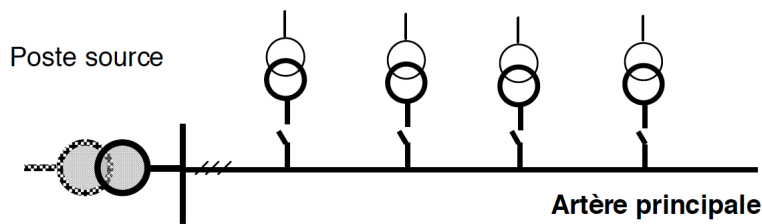


FIGURE 2.9 – Schéma d'une alimentation en simple dérivation

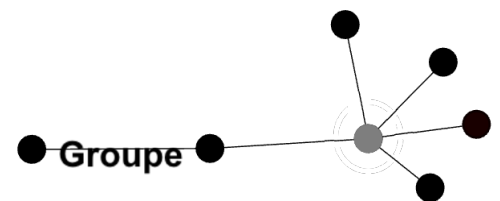


FIGURE 2.10 – Graphe d'une alimentation en simple dérivation. L'artère principale est en gris

Nous pouvons aussi avoir des grappes à la sortie de chaque dérivation. Cela permet d'avoir un point de passage du courant par la grappe en cas de problème sur l'artère principale. Si on ouvre le disjoncteur du jeu de barres, on coupe le lien de la grappe vers l'artère principale ce qui permet le passage éventuel du courant entre les éléments de la grappe. Cette grappe composée d'un autre jeu de barres reliant 3 arêtes ou plus dont minimum une sert d'alimentation électrique pour les autres noeuds. La figure 2.12 montre l'équivalent en graphe de ce type de configuration, l'artère principale est en gris afin de la reconnaître. Elle alimente plusieurs jeux de barres qui sont eux-mêmes reliés à d'autres. Les trois jeux de barres (noeuds de distribution) sont chacun reliés par un disjoncteur à l'artère principale en gris. C'est pour cela que chaque disjoncteur effectuant cette liaison est un lien. Nous avons donc trois grappes, une partant vers trois noeuds et deux vers deux noeuds.

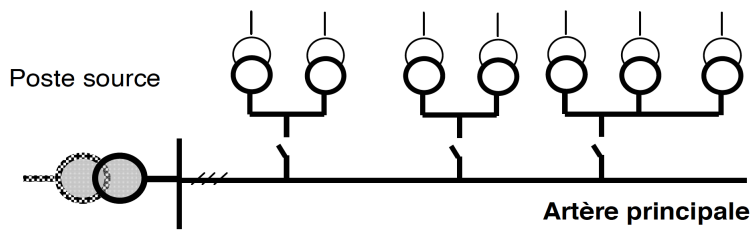


FIGURE 2.11 – Schéma d'une alimentation en simple dérivation avec grappes

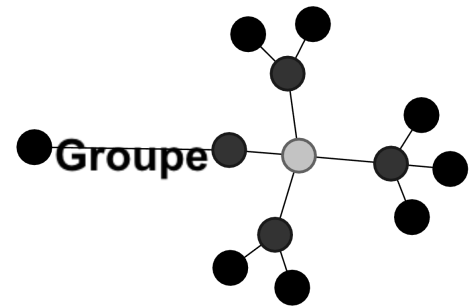


FIGURE 2.12 – Graphe d'une alimentation en simple dérivation avec grappes, l'artère principale est en gris

Dans ce type de topologie, si nous regardons les concepts de connexité en théorie des graphes, nous pouvons dire que le graphe associé est 1-arête-connexe car la coupure d'une arête déconnecte une partie du graphe. D'un point de vue électrique, un certain nombre de noeuds ne seront plus alimentés en cas de coupure d'une liaison.

Coupure d'artères : un réseau en coupure d'artères est un réseau avec une source à chaque extrémité. Nous ne voyons pas de second poste source dans la figure 2.13 mais nous considérerons qu'elle est présente à droite du schéma. Ce type est assez simple tout en augmentant un peu la fiabilité de la fourniture électrique. En effet, l'alimentation est sécurisée jusqu'à une coupure dans la ligne. Au-delà, une autre coupure risque une déconnexion totale d'un consommateur. Ce type de configuration est aussi appelée "alimentation en boucle ouverte" car, à un endroit de la ligne, il y a la coupure d'un lien pour ne pas avoir de parallèle entre les deux sources d'alimentation.

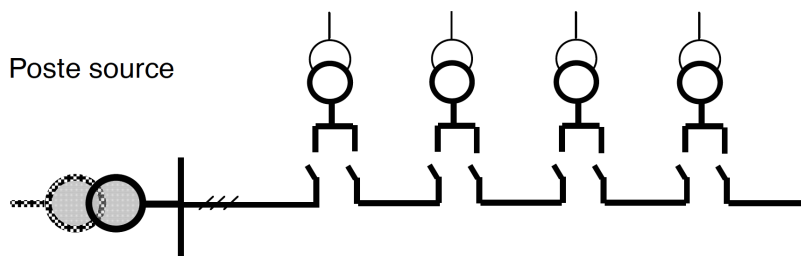


FIGURE 2.13 – Schéma d'une alimentation en coupure d'artères

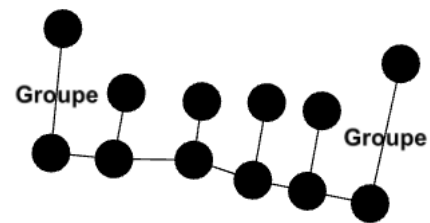


FIGURE 2.14 – Graphe d'une alimentation en coupure d'artères avec ses deux alimentations

Reprenons les concepts de connexité pour ce type d'alimentation. Nous pouvons dire que le graphe représentant ce type de configuration est 1-arête-connexe car la coupure d'un lien déconnecte le graphe. Ce n'est pas le cas électriquement grâce à la présence des deux postes sources à droite et à gauche du graphe en figure 2.14. Une coupure sépare le graphe en deux composantes connexes. Si pour chaque composante connexe il existe un poste source alors il n'y a électriquement aucune coupure d'alimentation.

Double dérivation : une configuration en double dérivation est la plus sûre et flexible au point de vue fiabilité d'alimentation : il y a deux jeux de barres. Chaque consommateur a donc la possibilité d'utiliser l'un ou l'autre jeux de barres. Cela permet de faire des interventions sur un jeu de barres sans affecter la fourniture des clients.

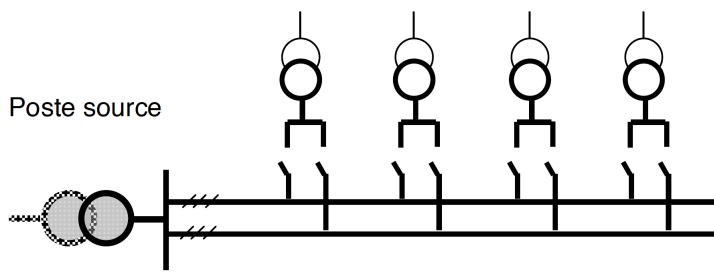


FIGURE 2.15 – Schéma d'une alimentation en double dérivation

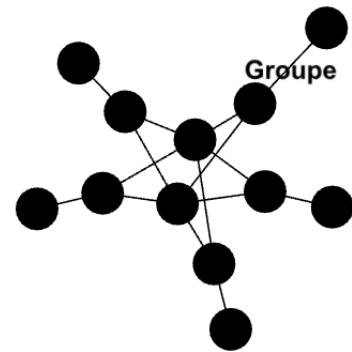


FIGURE 2.16 – Graphe d'une alimentation en double dérivation

Structure d'un réseau de distribution simple

Comme nous pouvons le voir dans la figure 2.17, les différents types d'alimentations peuvent co-exister dans un petit réseau de distribution. Cela complexifie grandement la lecture sous forme de graphe pour les opérateurs. Ceux-ci travaillent uniquement avec des schémas d'installation électrique traditionnels car ce type d'affichage est plus naturel pour eux étant donné leur formation de base qui est majoritairement l'électricité. De plus, les schémas électriques sont généralement le plus planaire possible c'est-à-dire qu'il y a un minimum de chevauchements entre les liens.

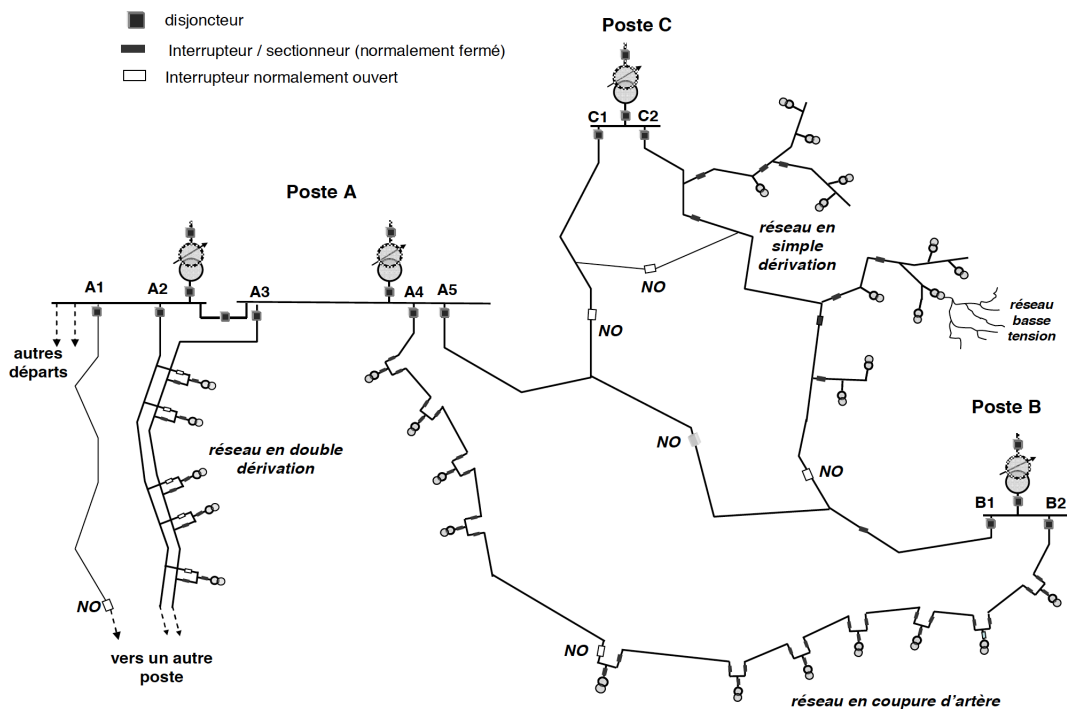


FIGURE 2.17 – Structure d'un réseau de distribution [9]

Par comparaison, nous montrons en figure 2.18 le réseau de la S.T.I.B. représenté sous la forme d'un graphe. Le graphe du réseau électrique importé depuis la base de données possède 728 liens et 496 jeux de barres. Plus précisément pour les liens, 1 groupe, 6 transformateurs, 392 liaisons inter-barres, 329 câbles. Nous verrons d'où proviennent les informations permettant de générer ce graphe dans la suite de ce chapitre.

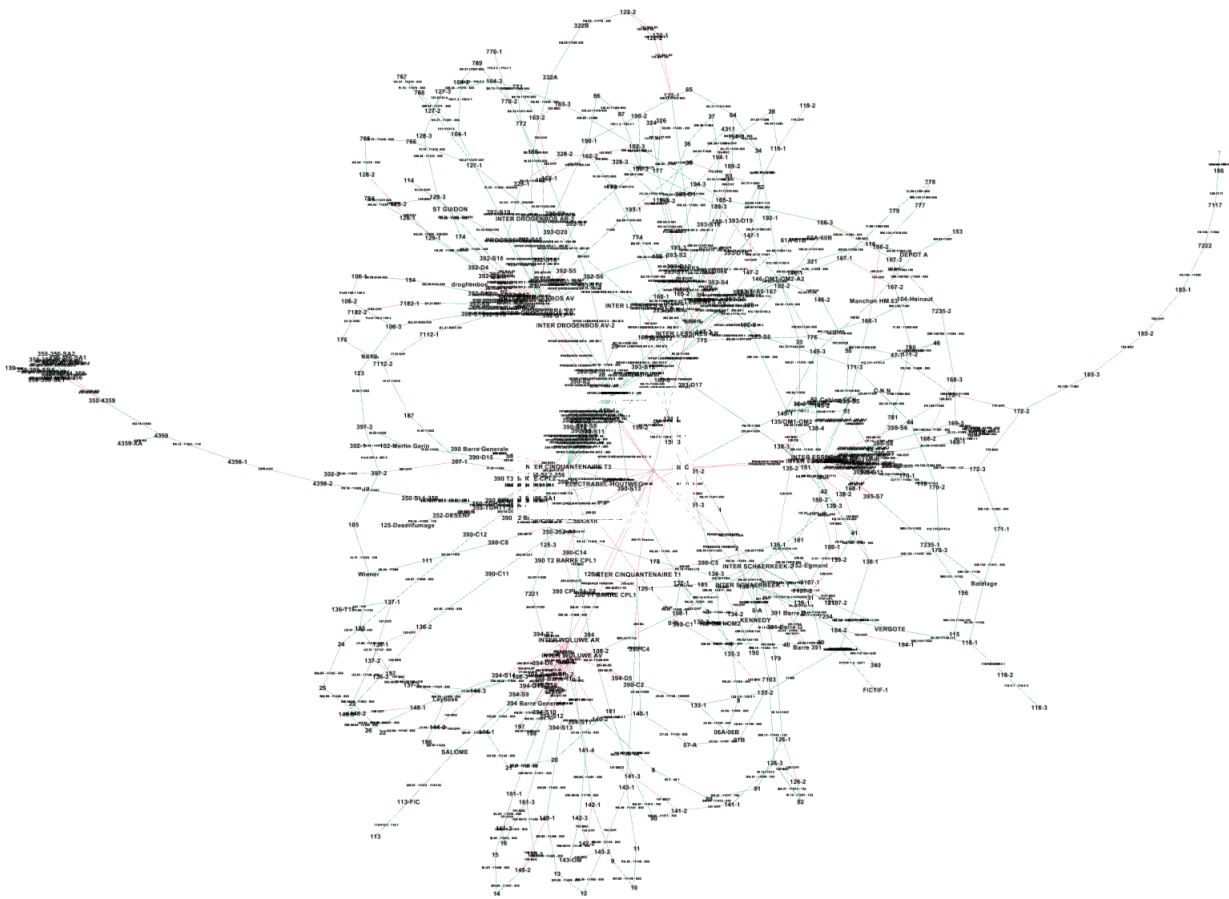


FIGURE 2.18 – Graphe en vue globale du réseau de la STIB

2.2.2 Types de réseaux

La conception d'un réseau avec le choix de la topologie à utiliser se base sur les mêmes paramètres que pour les alimentations et est très similaire. Nous ajouterons une variante supplémentaire qui se base sur la coupure d'artères appelée **structure maillée**.

Cette structure possède encore plus de liaisons qu'une structure en coupure d'artères et apporte donc une plus grande sécurité d'alimentation. Ces liaisons entre artères donnent un grand nombre de boucles potentielles.

2.3 Configuration de la topologie

La configuration de la topologie d'un réseau électrique, appelé aussi configuration d'un réseau électrique, est l'utilisation ou non des liens existants dans le réseau. Dans notre cas, le graphe représentant le réseau électrique sans configuration inclut tous les liens du graphe. Lors de la configuration du réseau, c'est seulement un sous-ensemble des liens du graphe qui est utilisé.

L'exploitation de notre réseau électrique est de type radial ou en boucle ouverte, ce qui est équivalent à la définition d'un arbre. En effet, dans un réseau radial, aucune boucle n'est présente. Cet arbre est donc composé d'un sous-ensemble du graphe représentant le réseau électrique tel qu'il n'existe qu'un seul chemin entre chaque nœud du graphe.

Nous avons donc un arbre composé de l'ensemble des nœuds du réseau ainsi qu'un sous-ensemble des arêtes de ce réseau de manière à ce que tous les nœuds soient connectés au réseau et sans cycle. Cet arbre est donc couvrant. C'est un peu le même principe que le protocole bien connu Spanning-Tree dans les réseaux informatiques.

Dans notre cas, nous avons plusieurs sources d'alimentation pour lesquelles il ne peut pas y avoir de cycle en aval. Ce qui nous donne un ensemble d'arbres couvrant, un arbre couvrant par départ d'Inter qui sera considéré comme une source d'alimentation et sa racine. L'ensemble de ces arbres forment une forêt couvrante.

Cette configuration est obtenue en utilisant ou non des arêtes. Pour cela, il sera nécessaire de faire un ensemble de manœuvres sur des disjoncteurs pour activer ou désactiver des arêtes afin d'obtenir la configuration voulue. Il est donc obligatoire d'enrichir le graphe avec de l'information supplémentaire afin d'être capable de générer des manœuvres. Pour ce faire, il faut commander les disjoncteurs des deux côtés du câble ou le disjoncteur inter-barres dans le cas d'un lien entre jeux de barres. Le même principe sera utilisé pour la désactivation d'un lien. Il faut donc, pour chaque lien, connaître le ou les organes de manœuvre qui lui sont raccordés afin de proposer à l'opérateur la liste des actions à effectuer.

Un bouclage est cependant toléré durant une manœuvre sans coupure car celle-ci est volontaire. Si aucune autre solution n'est possible, il arrive aussi que ce soit autorisé.

La reconfiguration d'un réseau revient à trouver un autre chemin d'alimentation pour un nœud dans le graphe et que cela reste une forêt tout en respectant les contraintes électriques. La représentation en graphe d'un réseau exemple et d'une configuration topologiquement correcte est donné par la figure 2.19.

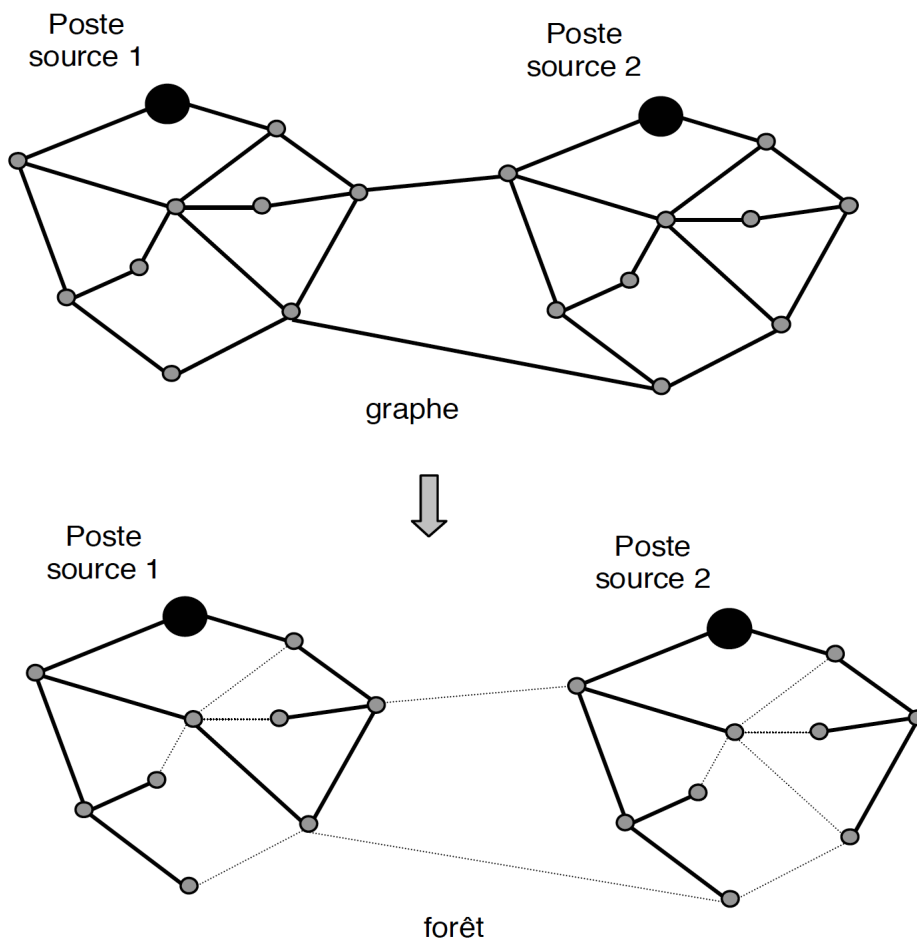


FIGURE 2.19 – Structure d'un réseau avec deux sources (graphe) et une configuration de la topologie possible (forêt) [9]

2.3.1 Contraintes topologiques et électrotechniques

Le choix d'une nouvelle configuration ne se fait pas arbitrairement, les limites physiques de l'intensité électrique dans les câbles imposent un ensemble de contraintes. Actuellement, nous n'avons pas assez de données sur les câbles ni sur les consommations des différentes charges connectées aux jeux de barres HT pour calculer leur charge totale. Depuis toujours, l'opérateur utilise un ensemble de règles et surtout une très bonne connaissance du réseau avec ses points forts et ses points faibles.

Afin de modéliser la réflexion d'un dispatcheur lors d'une reconfiguration, nous utiliserons les règles empiriques précitées en règles formelles et informatiquement transposables comme suit :

- Pas plus de 5 postes de transformation et 2 postes de redressement par départ d'Inter.
- Pas de boucle
- Minimiser le nombre de manœuvres nécessaires à la reconfiguration.

Nous avons observé que toutes les SST ne sont pas de la même taille et qu'elles ne consomment pas toutes la même quantité d'énergie. Cet indicateur est informatiquement transposable, mais le service électrique veut une meilleure prise en considération de la consommation réelle des SST lors de la reconfiguration.

Un des buts de ce mémoire est d'identifier les éléments informatifs nécessaires pour la résolution de notre problématique. Pour cela, nous avons travaillé avec le bureau d'étude électrique pour nous fournir les connaissances dans ce domaine.

2.3.2 Mise sous tension à vide

Le gestionnaire du réseau alimente chaque câble et chaque jeu de barres et ce même à vide. Le fait de fournir de la tension à un câble ou à un jeu de barres sans avoir de consommateurs s'appelle une **mise sous tension à vide**. L'intérêt est de s'assurer du fonctionnement de tous les composants du réseau. Sans cette vérification, un défaut risque d'être découvert lors de la mise sous tension d'une partie non utilisée, par exemple un défaut d'isolation.

Dans le cas d'un câble, ce maintien se fait en ouvrant un disjoncteur à une des extrémités du câble. Pour les liaisons omnibus, un ensemble de jeux de barres et de câbles sont gardés sous tension à vide sans qu'aucune charge ne soit connectée sur le chemin.

Lors de la reconfiguration, nous ne chercherons pas à remettre de l'alimentation sur les câbles à vide. Étant à vide, il n'y a pas de charge sur celui-ci. Nous ne considérerons donc pas cette partie comme étant un problème dû aux contraintes électriques. Nous pouvons simplement, après reconfiguration, prendre de l'alimentation d'un des deux côtés des dits câbles sans pour autant ajouter une consommation.

2.4 Données existantes

2.4.1 Topologie

L'agencement du réseau de distribution électrique actuel se trouve déjà dans le SCADA énergie, afin d'être synchronisé avec la topologie ainsi qu'aux contraintes d'exploitation en temps réel, il est nécessaire de directement lire les données dans le système de supervision mis en place.

Ces données sont organisées de façon à faciliter le fonctionnement du module de loadflow actuel. Une analyse de la structure de la base de données nous fournit les notions de liens, d'organes de manœuvre et de barres. Les liens peuvent être des segments, des transformateurs ou des groupes. Ils possèdent des nœuds amont et aval ainsi qu'optionnellement des organes de manœuvre entre les nœuds et lui-même. Les segments représentent les câbles. Les cellules sont un type d'organe de manœuvre qui symbolise les disjoncteurs et possèdent les identifiants des éventuels nœuds amont et aval. Les barres représentent les jeux de barres.

Nous avons donc analysé la structure de la base de données du SCADA afin de pouvoir exploiter les données. Voici un extrait de la structure avec les tables nécessaires à la génération d'un graphe.

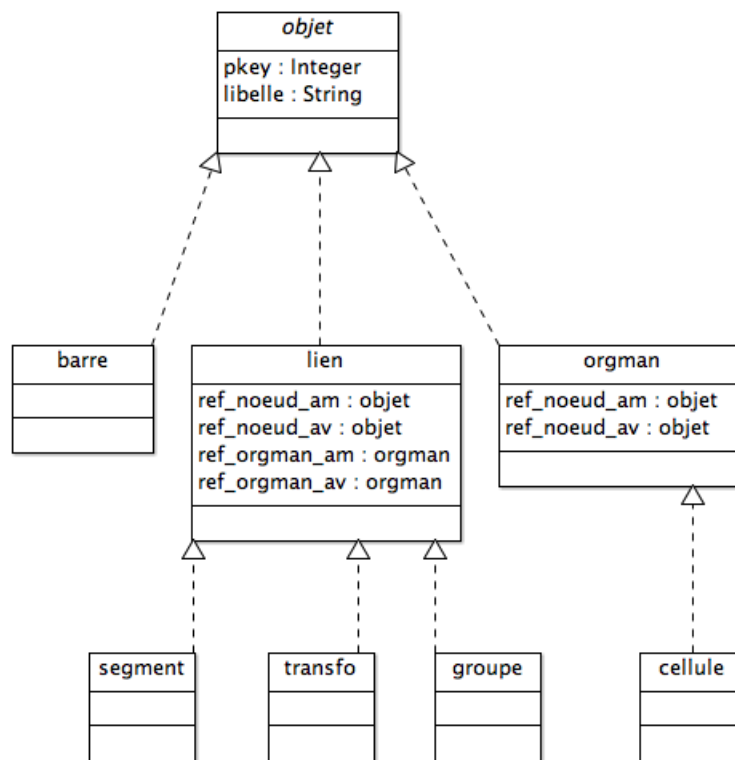


FIGURE 2.20 – Extrait de la structure de la base de données du SCADA actuel

Comme nous pouvons le voir, la représentation des adjacences sous sa forme vectorielle est stockée dans la table lien. Les éléments segments, transformateurs et groupes sont donc tous disponibles depuis cette table grâce au mécanisme d'héritage. Une cellule inter-barres ne se trouve pas en tant que lien dans la base de données. Comme nous l'avons expliqué dans la partie décrivant cet élément en tant qu'arête 2.1.2.1, nous allons tout de même le considérer comme lien car il arrive qu'un jeu de barres se trouvant dans une SST soit mis hors service alors que d'autres jeux de barres restent en service dans cette même SST. De plus, une cellule possède optionnellement des attributs topologiques de par la table orgman². Ces 2 informations ne sont présentes que si l'orgman fait partie de la topologie.

2.4.2 Valeurs temps réel

Le SCADA possède une base de données avec la configuration de l'ensemble de l'application ainsi que l'état des équipements supervisés via un ensemble de procédures stockées pour accéder aux valeurs des objets en temps réel. En plus des valeurs de chaque objet, nous avons des indicateurs d'exploitations pour chaque objet. Ces informations supplémentaires sont des états spécifiques pour la gestion des objets.

Les états disponibles sont les suivants :

Inhibition : masque l'état d'un objet pour l'opérateur. L'objet garde sa valeur d'acquisition temps réel.

Fixation : force une valeur à l'objet sans tenir compte de sa valeur réelle. La valeur récupérée par la procédure stockée sera la valeur forcée.

Consignation : bloque la commande d'un objet télécommandable.

Inconnu : l'automate qui effectue la commande ne communique plus avec le SCADA, impossible dans ce cas de faire la commande

2. abréviation pour organe de manœuvre

En test : l'automate est en test pour des essais hors exploitation. Aucune commande ni aucun état n'est accessible pour l'opérateur.

Plaquettes : une série de plaquettes sont à la disposition de l'opérateur pour représenter la présence d'une plaquette physique utilisée pour la consignation locale d'équipements par le service électrique. D'autres plaquettes signifient que l'équipement est bloqué ou qu'il y a une fausse information. Dans tous les cas, la présence de plaquette sur un disjoncteur signifie qu'il n'est pas manipulable à distance et doit donc être considéré comme bloqué ouvert.

Nous voulons être au plus proche de l'état temps réel du réseau. Pour ce faire, nous devons prendre en considération les indicateurs d'exploitation des organes de manœuvre lors du choix d'un lien. Il est évident qu'il sera impossible d'activer un lien avec des cellules consignées.

2.4.3 Connaissances sur les équipements

Actuellement, nous n'avons aucune centralisation des connaissances sur les installations électriques. Pour connaître les sections des câbles, nous utiliserons les données provenant d'un tableur et contenant les sections de câbles et les différents manchons avec leur emplacement.

Le document contient entre autres les numéros de câbles et les différents tronçons de celui-ci. Un câble démarre d'un départ d'Inter. Un tronçon de câble est une liaison entre deux sous-stations et il est composé de zéro ou plusieurs manchons, chacun à une certaine distance du départ de la liaison. Ce départ est toujours la sous-station la plus proche du départ de l'Inter. Nous espérons que notre travail permettra la mise en place d'une centralisation des connaissances sur les installations ainsi qu'un partage plus simple et efficace de ces informations vers les différents services.

2.4.4 Fiabilité des données

Nous utilisons les données extraites du système de gestion actuel mais aussi de sources disparates. Ces données peuvent être erronées ou manquantes. Nous vérifierons donc de manière abstraite et relativement simple que le graphe résultant de l'exportation du réseau est valable. Quelques indices nous permettent de voir des anomalies sur les données. Il est par exemple anormal qu'un jeu de barres ne soit pas connecté au réseau ou qu'une référence de nœuds soit égale à zéro pour un lien. Nous profitons de cette analyse pour en informer le gestionnaire des données et nous mettons en avant l'importance de maintenir des données correctes sans lesquelles il est impossible à un algorithme de prendre une décision ou de faire des calculs proches de la réalité. Par notre travail, nous voulons aussi lister les éléments organisationnels à mettre en œuvre au sein de l'entreprise pour mettre en place un système de loadflow. À la lecture de l'état de l'art, nous pouvons voir que les données nécessaires aux calculs sont les mêmes dans tous les précédents travaux.

2.4.5 Affichage du réseau électrique

Nous avons vu les équivalences topologiques des équipements électriques 11 kV avec la théorie des graphes. Sur cette base, nous allons générer un graphe depuis les informations disponibles dans la base de données du SCADA afin d'une part de valider l'extraction et la traduction en graphe et d'autre part de visualiser la topologie du réseau.

Afin de parcourir l'architecture de distribution et pour suivre visuellement les données, nous utiliserons l'application Gephi [21] en lisant les données extraites de la base de données ainsi que les valeurs temps réel au format CSV. Nous génèrerons donc une liste des nœuds et des arêtes.

Pour avoir le graphe associé à la configuration actuelle de la topologie, nous avons besoin des valeurs des organes de manœuvre liés aux liens. Dans un premier temps, nous utiliserons les filtres inclus dans Gephi pour afficher les liens ayant les valeurs à un sur le ou les organes de manœuvres. La valeur zéro représentant une cellule ouverte. Afin d'afficher la configuration lors de la capture du réseau avec Gephi, nous utilisons un filtre d'intersection avec une condition d'égalité sur la valeur de chaque organe de manœuvre des liens comme présenté dans la figure . Si les deux orgman sont tous les deux fermés (valeur = 1), le lien est actif. Sinon il est inactif.

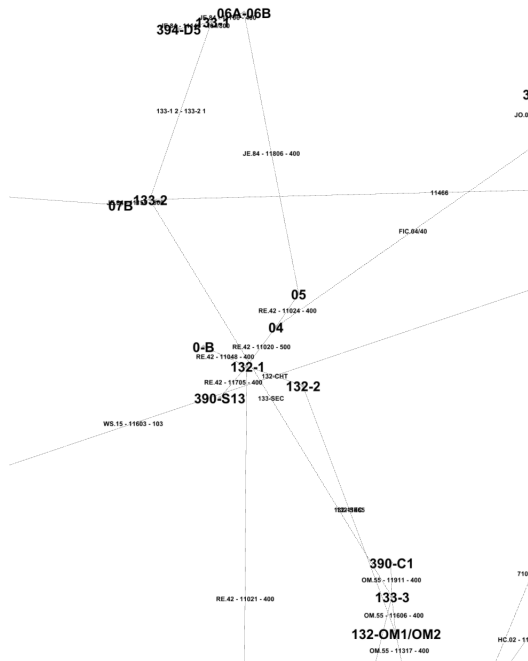


FIGURE 2.21 – Graphe extrait de Gephi avec une petite partie du réseau avec tous les liens présents

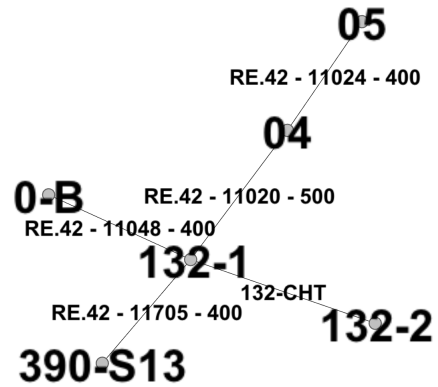


FIGURE 2.22 – Graphe extrait de Gephi avec une petite partie du réseau avec un filtre pour voir la configuration de la topologie

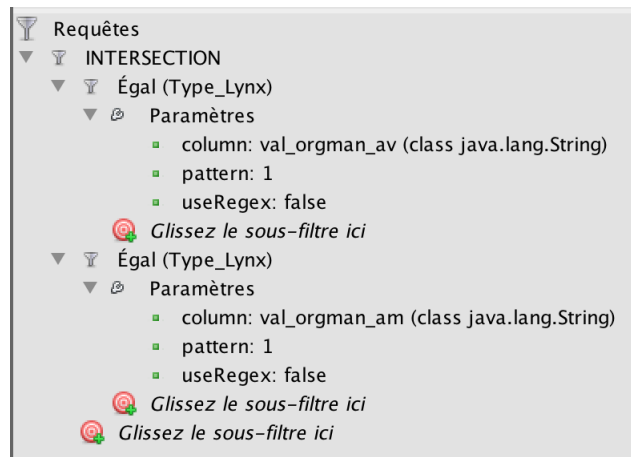


FIGURE 2.23 – Filtre pour afficher la configuration du réseau dans Gephi

Nous voyons directement dans la figure 2.22 que le graphe représentant la configuration du réseau est un arbre. La racine de celui-ci est le nœud 390–S13. Nous pouvons le savoir facilement par son nom qui possède un numéro de SST spécifique. Nous avons la liste des SST de type Inter. Nous pourrions par la suite utiliser cette information pour identifier les départs d'Inter.

Nous pourrions aussi détecter les liens sous tension à vide avec un des deux orgman fermés.

2.4.6 Caractéristiques du graphe

Suivant la configuration de la topologie, l'écoulement du courant ne se fera pas dans le même sens. Ce qui implique que le graphe représentant le réseau de distribution électrique lorsqu'il n'est pas configuré est non orienté. En effet, un lien peut être utilisé dans un sens ou dans l'autre sans restrictions autre que topologique. Une fois la configuration effectuée, il sera possible de calculer l'écoulement du courant à travers l'arbre. Nous en reparlerons dans le chapitre 3. À ce stade, les arêtes sont appelées arcs car les liaisons entre les nœuds sont unidirectionnelles.

2.5 Conclusion

Nous avons vu les techniques de représentation d'un réseau électrique à l'aide de la théorie des graphes et exprimé sous cette forme la principale contrainte topologique qui est une arborescence. Pour pouvoir travailler avec le réseau de distribution sous cette forme, nous avons montré qu'il est possible de ramener tous les composants physiques de notre réseau en un graphe composé de nœuds représentant les jeux de barres et des liens entre ces nœuds regroupant plusieurs moyens de relier électriquement deux jeux de barres. Ces liaisons sont effectuées par des câbles, des disjoncteurs inter-barres et des transformateurs.

Nous pouvons aussi visualiser le graphe résultant de cette transformation via l'utilisation d'un logiciel de traitement et de visualisation de graphes comme Gephi[21]. Grâce à ce type de logiciel, nous pouvons voir graphiquement les informations stockées dans la base de données et voir la configuration de la topologie telle qu'exploitée à un moment donné.

Ce faisant, nous avons identifié des éléments organisationnels nécessaires au bon fonctionnement de l'outil développé. En effet, nous utilisons des données émanant de plusieurs sources différentes et nous exploitons la structure du réseau provenant du SCADA. Il faut donc que toutes ses données soient correctes et consolidées en une source structurée et profiter de cet éventuel outil pour le rendre accessible à tous les services qui en dépendent.

A cet instant, nous avons tous les éléments et connaissances sur le réseau. Nous allons voir par la suite comment les utiliser pour mener à bien notre étude.

Chapitre 3

Calculs dans un réseau électrique

Nous avons vu que nous pouvions modéliser un réseau électrique à l'aide de la théorie de graphes. Nous allons maintenant nous baser sur cette structure pour effectuer des calculs électriques pour ensuite exprimer nos besoins et questions de recherche de manière mathématique en utilisant les éléments théoriques précédemment développés.

Nous verrons aussi les raisons qui nous poussent à une approximation des méthodes de calculs par rapport à la littérature.

3.1 Méthode de calcul d'écoulement de la puissance

La loi des nœuds est une des 2 lois de Kirchhoff. Elle nous apprend que la somme des intensités des courants qui entrent par un nœud est égale à la somme des intensités des courants qui en sortent. Cela nous permet de calculer l'intensité du courant dans un lien et le sens de celui-ci dans les arêtes entrantes et sortantes d'un nœud. Une intensité de sortie est toujours négative et une intensité d'entrée est positive.

Cette loi s'écrit plus formellement comme ceci :

$$\sum i_{entrant} + \sum i_{sortant} = 0 \text{ ou } \sum |i_{entrant}| = \sum |i_{sortant}| \quad (3.1)$$

À ce moment, nous exploitons un graphe orienté. La correspondance avec le sens du courant est représenté sous la forme d'une arborescence avec une racine distribuant du courant à un ensemble de points qui eux-mêmes peuvent donner du courant à d'autres nœuds. Cette distribution est unidirectionnelle ; à partir d'un jeu de barres, un courant entre dans un autre à travers un câble.

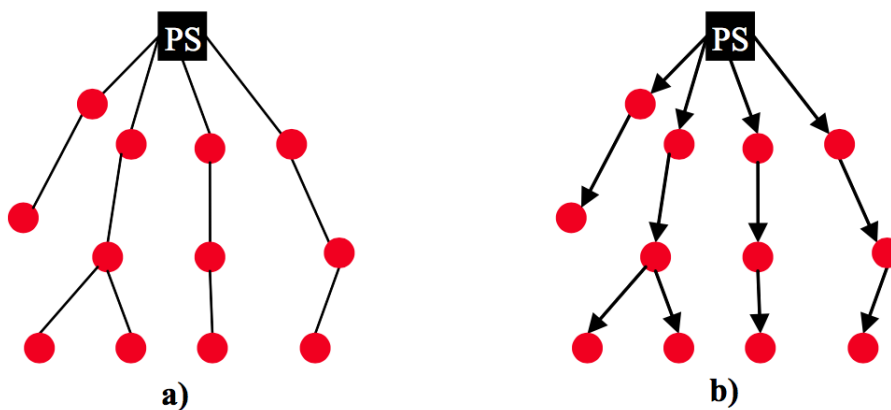


FIGURE 3.1 – Un réseau radial correspondant à un arbre a) ; la distribution électrique est équivalente à un arbre orienté à partir d'un poste source PS étant sa racine vers les consommateurs [22].

Pour connaître la quantité de courant dans une branche, il suffit de connaître la quantité de courant consommée par les nœuds aval. Dans la figure 2.20, nous avons vu que pour chaque lien nous connaissons les nœuds amont et aval d'un lien. Comme dit plus haut, le sens du courant dans les liens peut varier suivant la configuration du réseau. Ce qui impose de faire le calcul à partir d'un poste source afin de fixer le sens de parcours des liens. Il est donc possible, grâce à un parcours de graphe, de connaître l'ensemble des nœuds alimentés à partir d'un lien.

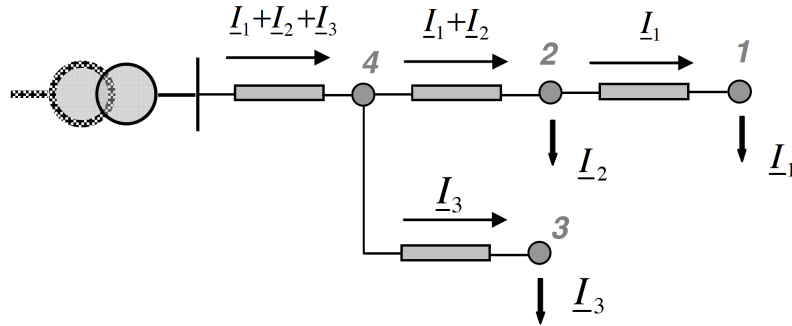


FIGURE 3.2 – représentation graphique de la loi des nœuds sur un arbre simple

Dans l'exemple à la figure 3.2, le nœud 4 est un nœud de transit et le reste des nœuds sont des nœuds de charge. Pour le nœud 2, nous pouvons connaître la consommation des charges connectées au jeu de barres (I_2) mais pour connaître le courant de sortie du nœud il faut aussi calculer la somme des intensités dans sa partie aval (I_1). Avec cette formule, nous pouvons savoir l'intensité dans la liaison 4 vers 2.

Dans le cas d'un nœud de *transit*, nous pouvons utiliser la formule telle quelle car aucune charge n'est raccordée au nœud. Pour un nœud dit de *charge*, il faut considérer une intensité de sortie supplémentaire aux liens connectés au jeu de barres afin de prendre en compte les consommateurs raccordés au nœud. Pour rappel, un jeu de barre peut être connecté à des transformateurs auxiliaires et à des redresseurs qui consomment du courant sur le jeu de barres. Depuis celui-ci, on peut aussi alimenter d'autres jeux de barres. Dans notre cas, nous ne nous occupons que de la consommation des jeux de barres et des liaisons entre ceux-ci.

Cette loi est utilisable pour toute unité de flux. Dans ses travaux, Kirchhoff appliqua le principe de conservation de l'énergie dans un circuit électrique. Différentes recherches dans le domaine de la distribution d'eau utilisent aussi cette loi [10]. Nous allons travailler sur les puissances à la place des courants à l'instar des méthodes de loadflow classique calculant les chutes de tension dans les câbles pour connaître la consommation exacte. Certaines méthodes utilisent même des calculs électriques en courant triphasé avec les composantes complexes des courants et des déphasages. Nous supposons le réseau comme étant équilibré ce qui signifie que l'on consomme la même chose au même moment sur chaque phase car les raccordements électriques au niveau des équipements sont toujours fait de façon équilibrée. Ce choix est aussi fait sur le constat que nous n'avons pas la possibilité de calculer les chutes de tension dans les conducteurs car nous ne possédons pas assez de connaissances sur les caractéristiques des équipements du réseau. Pour ce faire, nous devrions connaître la résistance de tous les composants du réseau. De plus, nous n'avons pas la capacité de modifier la tension dans chaque départ. Nous pouvons donc considérer la tension dans tout le réseau comme étant constamment à 11kV.

Cette approche de calcul est donc une méthode approximative mais dont sa résolution sera la plus exacte possible dans la suite de notre travail.

3.1.1 Parcours du réseau électrique

De par la nature radiale de notre réseau, un algorithme de parcours d'arbre nous permet de calculer la valeur des courants dans les liaisons en remontant depuis chaque feuille. Une feuille étant un nœud sans suivant, c'est à ce moment-là que nous connaissons exactement la valeur de consommation du jeu de barres car il ne possède pas de suivant. De ce fait, nous connaissons aussi la quantité de puissance dans le lien qui l'alimente. La figure 3.3 détaille les étapes d'un parcours de graphe en profondeur d'abord. Notons que le choix de stratégie de parcours en largeur ou en profondeur d'abord n'a pas d'influence sur la performance du calcul dû à leur même niveau de complexité.

Nous allons montrer comment faire le calcul d'écoulement de puissance sur base de la loi des nœuds avec un algorithme récursif de parcours de graphe en profondeur d'abord¹ avec un départ d'Inter comme nœud de démarrage du parcours. Pour connaître les nœuds adjacents, il faut aller voir dans les liens mais rappelons-nous que les nœuds amont et aval d'un lien sont affectés à la configuration et que le sens du courant varie suivant la configuration de la topologie. Pour connaître les suivants d'un nœud, il faut donc regarder dans les amonts et avals de la table lien et prendre l'autre coté du nœud dont on cherche ses voisins. Dans le cas d'un départ, celui-ci possède toujours un transformateur, ce qui nous permet d'exclure ce lien de la liste de voisinage.

Dans l'algorithme 1, le graphe étant considéré comme non orienté, lorsque nous demandons la liste des voisins d'un nœud enfant, nous obtenons aussi son propre père. Son père étant déjà visité, nous devons mettre un marqueur de visite lors de son exploration pour ne pas en tenir compte par la suite. Il sera de cette manière ignoré. Petite spécificité par rapport à la structure des informations sur les liens au niveau du SCADA est qu'il n'y a pas d'information sur le sens réel d'écoulement du courant dans chaque lien actif. Nous devons donc parcourir le graphe en découvrant les nœuds à partir d'une racine. Une racine est un départ de courant, une source d'alimentation depuis laquelle démarre l'électricité vers les nœuds avals. A la découverte d'un nœud, nous ne sommes pas encore capable de calculer le courant dans le lien menant à lui. En effet, le courant dans un lien est la sommes de tous ses nœuds enfants. Nous devons donc attendre d'arriver à une feuille pour pouvoir commencer à compter la sommes des courants.

Cet algorithme est trivial mais illustre bien la problématique du calcul de l'écoulement de puissance avec les informations disponibles et servira de base pour la suite.

Données: un graphe G acyclique et non nul, pour chaque sommet il existe une valeur de consommation non nulle

Résultat: mes liens possèdent des valeurs de puissance en respectant la loi des nœuds, retourne la consommation totale du nœud s

CONSOMMATION-totale(*graphe* G , *sommet* s)

```

1 marquer  $s$  comme étant visité;
2 valeur de consommation totale de  $s$  = valeur de consommation de  $s$ ;
3 pour tous les sommet  $t$  suivant de  $s$  faire
4   | si  $t$  n'est pas marqué comme visité alors
5   |   | valeur de puissance dans le lien  $(s,t)$  = CONSOMMATION-totale( $G,t$ );
6   |   | valeur de consommation totale de  $s$  =+ valeur de puissance dans le lien  $(s,t)$ ;
7   | fin
8 fin
9 retourner valeur de consommation totale de  $s$ ;
```

Algorithm 1: exploration d'un graphe en DFS récursif pour le calcul de la loi des nœuds

1. Appelé aussi DFS pour Deep First Search

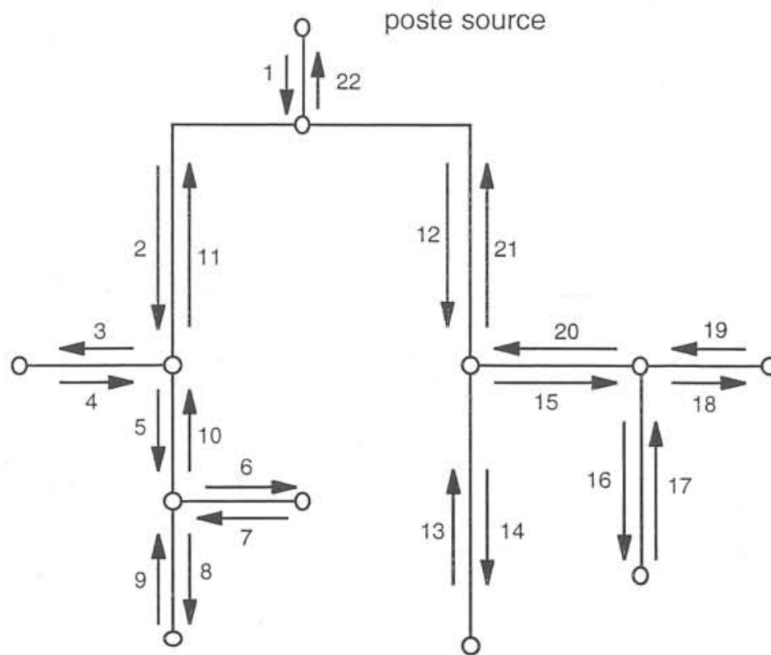


FIGURE 3.3 – Étapes d'un parcours de graphe en Deep First Search

3.1.2 Approche temporelle de la consommation

Pour calculer les puissances en transit dans le réseau, il faut connaître les valeurs de consommation des jeux de barres. Comme nous pouvons voir dans la figure 3.4 la variation de la puissance consommée par un jeu de barres suivant les périodes de la journée.



FIGURE 3.4 – Variation de puissance consommée (kWh) par quart-heure pour un jeu de barres

Ces variations sont dues à 2 facteurs : la quantité de voyageurs et la fréquence des métros car il y a plus de métros par heure durant les heures de pointe pour absorber la quantité de voyageurs. Sur ce graphique, nous pouvons voir différentes heures de pointes et plusieurs heures creuses. Nous avons généralement une pointe du matin, une stabilisation durant la journée puis une pointe au soir. Après, il y a une diminution jusqu'à l'arrêt de l'exploitation du métro entre 01h30 et 05h00. Ces variations diffèrent légèrement suivant les jours de la semaine. Nous avons le lundi, le mardi et jeudi presque identique alors que le mercredi et le week-end sont tous différents.

3.1.3 Estimation de la valeur temps réel

Lorsque nous voulons connaître la puissance consommée par un jeu de barres, nous pouvons, dans le meilleur des cas, le mesurer en temps réel grâce à un compteur. Mais dans la pratique, très peu de jeux de barres possède un compteur ou celui-ci n'est pas accessible en temps réel.

Nous avons vu que pour être au plus proche de la réalité lors des calculs de loadflow, nous devons prendre en considération l'aspect temporel de la consommation des jeux de barres. Étant donné l'absence de valeurs de consommation en temps réel, il est nécessaire d'estimer la valeur du moment.

Pour chaque jeu de barres de charge, il faudra pourtant avoir des valeurs afin de calculer les puissances dans tous les liens actifs du réseau suivant la configuration de la topologie. Nous allons donc faire une campagne de mesure afin d'obtenir des valeurs pour nos calculs. À partir de ces enregistrements, nous connaissons la variation de la puissance consommée par quart horaire pour un ensemble de jeux de barres.

Avec ces historiques, il sera possible de prendre en compte la variation au cours du temps de la consommation lors des calculs afin d'être au plus proche de la réalité.

Nous pouvons estimer la valeur de puissance d'un jeu de barres en réalisant une moyenne sur base des consommations pour une zone de la journée au cours du même jour de la semaine sur les 3 semaines précédentes.

Nous découpons une journée en 4 parties :

- Pointe du matin de 7h15 à 11h30 ;
- Creux du midi de 11h45 à 15h30 ;
- Pointe du soir de 15h45 à 20h ;
- Creux nuit entre 20h15 et 7h.

Bien entendu, il n'y a que les pointes qui sont réellement représentatives des limites du réseau car c'est à ce moment que le réseau est le plus chargé.

Par exemple, pour l'estimation d'un mardi à 19h17, nous prenons la moyenne de la somme des consommations quart-horaires de la partie de journée en cours (pointe du soir) des trois mardis précédents.

Cette méthode a été choisie et validée par un ingénieur en électricité du bureau de compétence énergie². Elle permet de prendre en compte la variation de consommation suivant les saisons. Nous avons observé suivant l'historique des Inter que la puissance utilisée par le réseau était supérieure en hiver par rapport à l'été. À titre d'exemple au niveau d'un Inter, la consommation à 8h le vendredi 22 juillet 2016 était de 7.517.400 Wh alors que le vendredi 20 janvier 2017 elle était de 13.209.720 Wh ; soit une différence de 56,9%. Suivant les calculs de fiabilité de la méthode, nous obtenons un écart de maximum 5% par rapport à la valeur réelle.

Tout en voulant une approche globale le plus générique possible, cette découpe horaire et cette méthode d'approximation est propre à la S.T.I.B. Cette partie est séparable du reste de l'approche. Nous verrons pourquoi et comment dans le chapitre 5.

3.1.4 Mise en place

Nous sommes maintenant capables de prendre en compte la variation de la puissance consommée au cours du temps, la méthode décrite impose la possession des valeurs de consommation de chaque jeu de barres sur trois semaines. Ce qui implique une mise à jour des données provenant des compteurs toutes les semaines. Ce processus n'est pas encore défini dans la société mais nous laissons la possibilité de mettre en œuvre cette approche.

2. Un département de la société

3.2 Affichage de la santé du réseau

Nous avons vu comment travailler sur le réseau électrique à l'aide de la théorie des graphes et calculer la distribution des puissances dans un réseau électrique. Nous allons maintenant voir comment exploiter les résultats et fournir des informations sur la charge dans les câbles et informer sur l'éventuelle présence de boucle en temps réel.

3.2.1 Charges dans les câbles

Comme nous l'avons vu dans la partie 1.1.1 concernant les conducteurs électriques, un câble possède une quantité d'énergie maximale admissible. Ces caractéristiques varient suivant la section, le type de câble, le type d'isolant, la température, etc. Cette quantité s'exprime en ampère (A). Nous allons décrire les deux principaux types de câbles utilisés mais ce principe est valable pour tout type de câble présent dans le réseau à partir du moment où nous avons toutes ses caractéristiques.

Sachant que nous estimons la tension comme étant constamment à 11kV, la conversion en ampère sera aisée. Prenons la formule de la puissance électrique 1.2 réécrite pour avoir le courant (I) sur base de la puissance (P) et de la tension (U) :

$$I = P/U \quad (3.2)$$

Exemple : si un câble fait transiter 351kWh alors la valeur du courant sera de 351000/11000 soit 31,9 A.

Reste à savoir combien d'ampères chaque câble peut supporter suivant les normes en vigueur afin de calculer la charge disponible. Par exemple, pour un câble de 3x150 mm² le courant admissible est de 305 A suivant sa fiche technique en figure 3.5.

Suivant la norme NBN C33-111 réglementant le type de câble EIAVB³, il y a un certain nombre de facteurs de correction à apporter sur l'intensité maximale admissible définie dans les caractéristiques physiques des câbles tels que :

- Résistivité thermique du sol
- Température du sol
- Profondeur de pose du câble
- Proximité d'autres câbles (figure 3.7)

La norme définit que le facteur de correction total (FC) est le produit des facteurs de correction se trouvant dans les figures 3.6 et 3.7. Ce résultat est à multiplier sur l'intensité nominale du câble (In)⁴.

Le bureau d'étude nous informe que tous les câbles sont enterrés avec un certain type de proximité, le reste des facteurs peut varier. Ces facteurs sont très spécifiques au domaine de l'électricité.

Pour illustrer l'impact de cette correction, nous allons voir le calcul complet pour deux câbles sans entrer dans les détails techniques de chaque coefficient.

Dans le cas d'un câble de 3x150 mm² nous avons donc le calcul suivant :

$$\begin{aligned} FC &= 0,88 * 1 * 1 * 0,77 = 0,6776 \\ I &= In * FC \\ In_{cble} &= 305A \\ I &= 305 * 0,6776 = 206,7A \end{aligned} \quad (3.3)$$

3. Acronyme pour câble énergie, armé, gaine extérieure en PVC conforme à la norme belge

4. L'intensité nominale est le courant maximal admissible, noté In

| CARACTÉRISTIQUES DE CONSTRUCTION | |
|----------------------------------|-------------------------|
| Nature de l'âme | Cuivre |
| Forme de l'âme | Câblé sectoral (SM) |
| Couleur du (des) fil (s) | écru - bleu - rouge |
| Isolation | Papier imprégné |
| Gaine interne | Plomb |
| Matière du matelas | jute |
| Armure | deux feuillards d acier |
| Gaine extérieure | PVC |
| Couleur de la gaine | Rouge |

| CARACTÉRISTIQUES DIMENSIONNELLES | |
|----------------------------------|--------------------|
| Nombre de conducteurs | 3 |
| Section du conducteur | 150mm ² |
| Epaisseur de l'armure | 1,4mm |
| Diamètre externe nominal (mm) | 62,0mm |
| Masse approximative | 11600kg/km |

| CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES | |
|---|-----------|
| Tension de service nominale U ₀ /U | 7 / 12 kV |
| Tension de service maximale admissible | 15kV |
| Intensité admissible à l'air libre | 300A |
| Intensité admissible enterré | 305A |

FIGURE 3.5 – Extrait de la fiche technique d'un câble EIAVB 3x150 mm²

| Section nominale mm ² | Valeur de la résistivité thermique en °C cm/W | | | | | | | | |
|----------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 50 | 70 | 80 | 100 | 120 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| 1,5 | 1,12 | 1,07 | 1,04 | 1,00 | 0,97 | 0,92 | 0,85 | 0,80 | 0,76 |
| 2,5 | 1,14 | 1,07 | 1,04 | 1,00 | 0,97 | 0,92 | 0,85 | 0,79 | 0,75 |
| 4 | 1,15 | 1,08 | 1,05 | 1,00 | 0,97 | 0,92 | 0,85 | 0,79 | 0,75 |
| 6 | 1,16 | 1,08 | 1,05 | 1,00 | 0,97 | 0,91 | 0,84 | 0,78 | 0,74 |
| 10 | 1,17 | 1,09 | 1,05 | 1,00 | 0,96 | 0,91 | 0,84 | 0,78 | 0,74 |
| 16 | 1,18 | 1,09 | 1,06 | 1,00 | 0,96 | 0,91 | 0,83 | 0,77 | 0,73 |
| 25 | 1,19 | 1,09 | 1,06 | 1,00 | 0,95 | 0,90 | 0,82 | 0,76 | 0,72 |
| 35 | 1,20 | 1,10 | 1,06 | 1,00 | 0,95 | 0,90 | 0,82 | 0,76 | 0,72 |
| 50 | 1,20 | 1,10 | 1,06 | 1,00 | 0,95 | 0,90 | 0,82 | 0,76 | 0,72 |
| 70 | 1,21 | 1,10 | 1,07 | 1,00 | 0,95 | 0,89 | 0,81 | 0,75 | 0,70 |
| 95 | 1,21 | 1,11 | 1,07 | 1,00 | 0,95 | 0,89 | 0,81 | 0,74 | 0,69 |
| 120 | 1,22 | 1,11 | 1,07 | 1,00 | 0,95 | 0,89 | 0,80 | 0,74 | 0,69 |
| 150 | 1,22 | 1,11 | 1,07 | 1,00 | 0,95 | 0,88 | 0,80 | 0,73 | 0,68 |
| 185 | 1,23 | 1,12 | 1,07 | 1,00 | 0,95 | 0,88 | 0,79 | 0,73 | 0,68 |
| 240 | 1,23 | 1,12 | 1,08 | 1,00 | 0,95 | 0,86 | 0,79 | 0,72 | 0,67 |
| 300 | 1,23 | 1,12 | 1,08 | 1,00 | 0,94 | 0,87 | 0,78 | 0,72 | 0,67 |
| 400 | 1,24 | 1,13 | 1,08 | 1,00 | 0,94 | 0,87 | 0,78 | 0,71 | 0,66 |

| Température ambiante en °C | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Câbles de 1 et 6 kV | 1,12 | 1,08 | 1,04 | 1,00 | 0,96 | 0,91 | 0,87 | 0,82 | 0,76 |
| Câbles de 10, 12, 15 kV | 1,15 | 1,10 | 1,05 | 1,00 | 0,94 | 0,88 | 0,82 | 0,75 | 0,67 |

| Profondeur de pose cm | U = 1000 V | | | U > 1000 V | |
|-----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| | S ≤ 50mm ² | 70 à 300 mm ² | >300 mm ² | ≤300mm ² | >300mm ² |
| 50 | 1,02 | 1,04 | 1,05 | 1,02 | 1,03 |
| 60 | 1,01 | 1,02 | 1,03 | 1,01 | 1,02 |
| 70 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 80 | 0,99 | 0,98 | 0,97 | 0,98 | 0,97 |
| 100 | 0,97 | 0,96 | 0,94 | 0,95 | 0,95 |
| 120 | 0,95 | 0,94 | 0,92 | 0,93 | 0,94 |
| 150 | 0,93 | 0,92 | 0,87 | 0,91 | 0,92 |

FIGURE 3.6 – Extrait des facteurs de correction suivant NBN C33-111

TABLEAU A.V. - Facteurs de correction relatifs à la proximité d'autres câbles
(posé dans le sol)

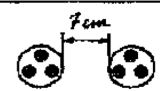

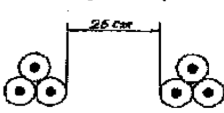
| Nombre de câbles multipolaires ou de systèmes de câbles monopolaires | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|
| Câbles multipolaires  | 0,86 | 0,77 | 0,71 | 0,67 | 0,64 | 0,60 | 0,57 |
| Systèmes de câbles monopolaires disposés en nappe  | 0,85 | 0,74 | 0,70 | 0,67 | 0,65 | 0,61 | 0,60 |
| Systèmes de câbles monopolaires disposés en table  | 0,85 | 0,77 | 0,73 | 0,69 | 0,67 | 0,64 | 0,62 |

FIGURE 3.7 – Extrait des facteurs de correction suivant NBN C33-111

Dans le cas d'un câble de même type mais de plus petite section comme un $3 \times 95 \text{ mm}^2$:

$$FC = 0,89 * 1 * 1 * 0,77 = 0,6853$$

$$I = I_n / FC$$

$$I_n = 235A$$

$$I = 235 * 0,6853 = 161,05A$$

(3.4)

Nous devons donc, pour chaque câble, utiliser l'information sur la charge maximale corrigée afin de visualiser ce qui reste réellement disponible dans chaque câble. Pour ce faire, nous utiliserons un catalogue contenant les valeurs corrigées pour chaque câble. Ces informations seront très probablement fournies par le bureau d'étude électrique de la S.T.I.B.

Notons tout de même que l'âge du câble devrait être pris en compte pour le facteur de correction mais cela n'est pas utilisé actuellement. Pour tout de même fournir un outil permettant d'utiliser ce facteur, nous mettrons à disposition un indicateur d'âge dans le chapitre 5.

3.2.2 Présence de boucles

Une des contraintes sur le réseau électrique est de ne pas avoir de boucle. Il est dès lors utile pour l'opérateur d'être informé sur l'éventuelle présence d'un circuit dans le graphe. De plus, il n'est pas possible de calculer la distribution de puissance sur un réseau possédant un cycle par la méthode précitée comme le montrent de précédents travaux [9], [23].

Pour ce faire, nous pouvons utiliser le même algorithme que pour le calcul d'écoulement de puissance de la partie 3.1. Nous utilisons alors la propriété de détection de boucle de l'algorithme DFS en ajoutant une action lors de la découverte d'un nœud déjà visité à la place d'ignorer le lien causant une boucle. Au moment de la visite d'un nœud depuis un autre, nous enregistrons une liste de liens. Au moment de l'exploration des voisins d'un nœud, nous enregistrons le nœud comme étant visité et nous construisons la liste des liens explorés que nous complétons à chaque appel récursif. Si un nœud voisin est déjà exploré, le lien l'y connectant est ajouté au chemin exploré. Cette liste contient à ce moment une boucle. Cette boucle est causée par l'ensemble des liens composant un cycle depuis ce nœud vers lui-même.

Dans la figure 3.8, le chemin en cours d'exploration est [A,B,C,D,E] et le chemin parcouru [A-B,B-C,C-D,D-E,E-C]. Lors de l'exploration en DFS au moment du passage au nœud E, nous découvrons

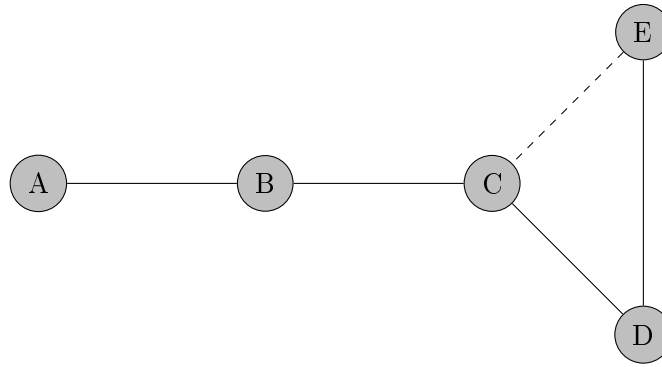


FIGURE 3.8 – Un cycle présent dans le graphe, le lien C-E cause une boucle

le lien E-C arrivant à C qui est déjà visité. L'algorithme ajoute donc le lien E-C à la liste des liens parcourus. Nous savons donc que le chemin exploré contient une boucle. Cette boucle est composée des liens [C-D,D-E,E-C]. Nous voulons savoir quels sont les liens causant la boucle. Il faut donc remonter le chemin parcouru jusqu'au nœud déjà visité c'est-à-dire C.

Reprenons l'algorithme 1 en y ajoutant la détection de boucle pour créer l'algorithme 2. À la fin de l'exploration, il y a un échec si la liste des boucles est non vide.

Données: un graphe G non nul, pour chaque sommet il existe une valeur de consommation non nulle

Résultat: si sans boucle : les liens possèdent des valeurs de puissance en respectant la loi des nœuds, retourne la consommation totale du nœud s . Si avec boucles : retourne la liste des boucles présentes dans le réseau et ne pas tenir compte des valeurs de puissance dans les liens

CONSOMMATION-totale-boucle(*graphe* G , *sommet* s , *lien* l , *chemin* c ,)

```

1 marquer  $s$  comme étant visité;
2 ajouter le lien  $l$  qui est le lien d'accès à ce nœud dans le chemin  $c$ ;
3 valeur de consommation totale de  $s$  = valeur de consommation de  $s$ ;
4 pour tous les sommet  $t$  suivant de  $s$  faire
5     si  $t$  n'est pas marqué comme visité alors
6          $l$  est le lien de  $t$  à  $s$ ;
7         valeur de puissance dans le lien  $(s,t)$  = CONSOMMATION-totale-boucle( $G,t$ );
8         valeur de consommation totale de  $s$  += valeur de puissance dans le lien  $(s,t,l,c)$ ;
9     fin
10    si  $t$  marqué comme visité alors
11        ajouter le lien  $l$  qui est le lien d'accès à ce nœud dans le chemin  $c$ ;
12         $b$  est une sous-liste de  $c$  contenant le chemin de  $t$  à  $t$ ;
13        enregistrer  $b$  dans la liste des boucles;
14    fin
15 fin
16 retourner valeur de consommation totale de  $s$ ;

```

Algorithm 2: exploration d'un graphe en DFS récursif pour le calcul de la loi des nœuds avec détection de boucle

Dans la détection de boucle, nous devons aussi ignorer le nœud aval du lien visité lors de la demande des suivants du nœud amont car celui-ci cause une boucle élémentaire due à la nature non orientée du réseau. En effet, lors de la recherche du suivant d'un nœud dans la base de données, nous utilisons la table lien en cherchant les liens possédant ce nœud en amont ou aval. Dans la figure 3.8, la recherche des suivants de B donnera aussi le lien allant vers A étant déjà dans le chemin. Pour cela, nous utilisons une fonction pour nous fournir les couples lien/nœuds valables suivants d'un nœud passé en paramètre.

Une fois en possession des liens bouclés, il suffit de faire appel à l'API du SCADA pour mettre un statut sur ceux-ci.

Cette détection est déjà présente dans le SCADA, nous utiliserons simplement cette liste pour l'afficher aux opérateurs.

3.3 Conclusion

Nous avons énuméré les méthodes d'affichage de la santé d'un réseau électrique faisant partie de l'aide à l'exploitation. Pour ce faire, nous avons dû calculer la puissance dans les câbles à l'aide de la loi de nœuds de Kirchhoff et sur base d'un parcours de graphe en profondeur d'abord. Nous ne connaissons pas en temps réel la consommation des nœuds, nous avons donc élaborer avec l'aide du service d'étude, une méthode d'approximation en prennent en compte les consommations des trois semaines précédente. Nous avons aussi travailler avec des zones de la journée pour traiter les heures de pointe.

Sur base de la puissance et d'une tension considérée comme une constante à 11kV, nous savons calculer le taux d'utilisation des câbles par rapport au courant maximal admissible. Ce courant admissible est en réalité moins grand que ce qui est inscrit sur la fiche technique du câble car il faut prendre en compte des facteurs suivant le type de pose, la proximité avec d'autres câbles et la température du sol. Cette valeur corrigée sera stockée directement dans une base de données qui sera probablement complétée par le service d'étude électrique de la société.

Nous avons aussi proposer une détection de boucle malgré sont existence au seins du SCADA en se basant sur la propriété de détection de boucle de l'algorithme de parcours de graphe *DFS*.

Chapitre 4

Aide à la décision et optimisation

Nous allons parcourir les notions d'aide à la décision et d'optimisation nécessaire à l'étude et à la mise en œuvre d'une partie des fonctionnalités de l'outil. Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur les méthodes d'optimisation en général. Nous allons pour commencer faire des rappels théoriques concernant l'aide à la décision, la recherche opérationnelle et l'optimisation. Nous allons aussi faire une petite introduction sur les méthodes des gestions dans le cas d'optimisations multiobjectif. Ensuite, nous ferons un état de l'art des méthodes d'optimisation utilisées et de leur formulation mathématique. Nous terminerons par une présentation des méthodes de résolution des problèmes d'optimisation suivant leur type.

4.1 Fondements théoriques

4.1.1 L'aide à la décision

La principale préoccupation de l'aide à la décision est la mise en place d'un dispositif simple permettant, à une personne donnée, de prendre la meilleure décision possible. Elle contient aussi l'ensemble des techniques permettant la mise en place de tels systèmes.

Dans le cas d'un gestionnaire de réseau électrique, cela revient à offrir un outil afin de l'aider à analyser et vérifier rapidement des informations afin de prendre la décision la plus adaptée possible suivant les données existantes. Dans les chapitres précédents, nous avons pu identifier la quantité d'informations à prendre en compte lors d'une reconfiguration du réseau électrique.

Dans les outils d'aide à la décision, nous utiliserons la recherche opérationnelle comme méthode d'étude de notre sujet.

4.1.2 Recherche opérationnelle

La recherche opérationnelle fait appel à plusieurs techniques scientifiques afin de comprendre, modéliser et analyser une problématique de la vie réelle à des fins d'optimisation ou de résolution. Ces problématiques sont généralement économiques ou managériales.

Dans les techniques utilisées, beaucoup proviennent des mathématiques appliquées. Voici quelques exemples :

- La probabilité
- Les statistiques
- L'optimisation
- La gestion des stocks
- La théorie des graphes
- ...

Dans notre cas, nous utiliserons la théorie des graphes et des techniques d'optimisation comme nous allons le voir par la suite.

4.1.3 Optimisation

L'optimisation est le principe de faire un choix parmi un ensemble de solutions dites satisfaisables¹ tel que la solution choisie soit optimale.

Une solution satisfaisable dans le cadre de notre réseau électrique d'étude est une configuration respectant les contraintes topologiques et électrotechniques telles que les limites de charge dans les câbles, sans boucle et ayant tous les jeux de barres alimentés, ...

Une solution optimale est une solution pour laquelle on cherche le minimum (respectivement le maximum) d'un indicateur appelé fonction objectif. Cette fonction sert à comparer deux solutions de façon à pouvoir dire que l'une des deux est plus optimale que l'autre.

Un problème d'optimisation se présente typiquement comme suit :

$$\begin{array}{lll} \textit{minimiser/maximiser} & f(\vec{x}) & \text{(fonction à optimiser)} \\ \textit{sous contrainte} & \vec{c}(\vec{x}) & \text{(m contraintes)} \end{array} \quad (4.1)$$

Avec le vecteur \vec{x} contenant les variables de décisions et le vecteur $\vec{c}(\vec{x})$ représentant les m contraintes que le vecteur \vec{x} doit respecter.

L'espace de recherche ou domaine est l'ensemble des valeurs que peuvent prendre les variables composant la solution.

La modélisation d'un problème d'optimisation est la représentation du problème réel en un ensemble de variables dont les éléments de choix sont appelés variables de décision.

4.1.4 Typologie des problèmes d'optimisation

Suivant le type de problème, il ressort quelques caractéristiques afin de classifier les types de problèmes² [14] :

1. Variables de décision :
 - Monovariable
 - Mutlivariable
2. Types des variables de décision :
 - Continu : pour les nombres réels
 - Entier ou discret dans le cas de nombres entiers
 - Permutation sur un ensemble fini de nombres
3. Types de fonction objectif :
 - Linéaire
 - Quadratique
 - Non linéaire
4. Nombres de fonction objectif :
 - Monobjectif
 - Multiobjectif

1. Solutions possibles, respectant les contraintes
 2. Les classifications diffèrent suivant les auteurs

4.1.5 Optimisation mono/multi objectif

Dans notre cas, nous voulons optimiser plusieurs éléments de notre réseau. Nous voulons la meilleure combinaison de plusieurs éléments à minimiser mais ces éléments peuvent être conflictuels.

En optimisation monobjectif, nous savons directement calculer l'optimalité d'une solution grâce à la fonction objective qui permet de positionner une solution par rapport aux autres. Lorsque nous avons plusieurs objectifs à optimiser, il faut sélectionner une solution qui est la moins pénalisante pour toutes les fonctions objectif.

Lorsque l'amélioration d'un objectif diminue un autre objectif, nous avons à faire à deux objectifs contradictoires.

Pour gérer ces différents objectifs, nous avons à notre disposition plusieurs techniques que nous allons brièvement parcourir.

4.1.5.1 Propriété d'optimalité de Pareto

Principe selon lequel on calcule des alternatives et on donne une valeur pour chaque objectif, la meilleure combinaison des objectifs est celle qui domine³ les autres par l'ensemble de ses objectifs. Si elle est la seule à dominer les autres alors elle est optimale⁴.

4.1.5.2 Optimalité lexicographique

Ce principe est basé sur Pareto. Pour son application, on place les objectifs par ordre de préférence. Si deux alternatives (A et B) sont équivalentes jusqu'à un objectif mais diffère à partir d'un autre objectif où A est moins bon que B, nous dirons que la solution B est optimale au sens lexicographique. Cette solution est alors considérée comme la meilleure suivant cette méthode de gestion multiobjectif.

Exemple :

$$\begin{aligned} A &= (1, 2, 3, 6, 1, 2) \\ B &= (1, 2, 3, 5, 9, 7) \end{aligned}$$

La solution B est meilleure pour le quatrième objectif que la solution A, la solution B domine lexicographiquement la solution A.

Cette méthode permet donc de choisir un ordre de préférence entre les différents objectifs.

4.1.5.3 Somme pondérée

C'est une méthode de type agrégative. En effet, elle transforme une fonction d'optimisation multicritère en une fonction monocritère comme suit :

$$\begin{aligned} &\sum_{j=1}^p \lambda_j g_j(a) \\ \text{avec } &\lambda_j > 0 \quad (j = 1, \dots, sp, p) \\ \text{et } &\text{sum}_{j=1}^p \lambda_j = 1 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Un des désavantages de cette méthode est qu'il est difficile de prendre en compte une somme pondérée d'éléments qui ne sont pas du même ordre de grandeur. Exemple : si une fonction objectif $f(x)$ varie de 1 à $5,46 * 10^{23}$ et une autre fonction $g(x)$ varie entre 0 et 10, le réglage du facteur de pondération est toute relative. Par contre, l'avantage de l'agrégation est qu'il est possible de faire de l'optimisation multiobjectif avec un moteur ne supportant qu'un seul objectif.

3. au sens de Pareto, on dit qu'elle Pareto-domine

4. Ou Pareto-optimale

4.2 Optimisation mathématique

Anciennement connue sous le nom de programmation mathématique, l'optimisation mathématique fait partie des techniques d'optimisation.

En effet, l'organisme promouvant la programmation mathématique appelée *Mathematical Programming Society (MPS)* a changé de nom en 2010 pour devenir *Mathematical Optimization Society (MOS)*. Cette organisation internationale s'occupe de la promotion et la maintenance de standards professionnels dans cette matière et est donc une référence dans ce domaine.

Une des principales raisons de ce changement de nom est qu'il n'est pas question de programmation informatique telle que nous la connaissons sous la forme d'algorithmes, mais plutôt de plan de résolution du problème sous la forme d'équations mathématiques. Ces équations sont ensuite résolues pour obtenir des valeurs aux variables de décision. Nous ne nous occupons donc pas de la partie algorithmique de résolution du problème, mais bien de sa modélisation mathématique. Une fois cette formalisation effectuée, il faut résoudre ces équations pour connaître les valeurs des variables de décision.

La résolution de ces équations varie suivant le type d'équation. Nous allons voir différents types d'équations et leurs techniques de résolution puis nous verrons comment modéliser un problème avec des variables et des équations.

4.2.1 Optimisation linéaire

L'optimisation linéaire est la mise en forme mathématique d'un problème d'optimisation en une fonction objectif linéaire. Une fonction linéaire est une fonction qui évolue de manière linéaire avec ses variables. Ce formalisme s'appelle la programmation linéaire en nombre entier ou PLNE si les variables de décisions sont entières. Dans le cas où les variables sont un mélange de valeurs entières et non entières, nous avons à faire à de l'optimisation linéaire mixte.

La forme générale d'une optimisation linéaire est un ensemble d'équations linéaires. C'est à dire, respectant une forme spécifique de façon à ce qu'il n'y a pas de produit entre les variables de décision. Les valeurs de variables sont proportionnelles, ce qui implique que les seules multiplications possibles sont avec des constantes étant donné que dans ce cas la variable reste proportionnelle.

La forme générale d'un problème d'optimisation linéaire se définit comme suit [26] :

$$\begin{aligned} & \text{Min ou Max } \sum c_i x_i \\ & \sum_i A_{ji} x_i \left\{ \begin{array}{l} \leq \\ = \\ \geq \end{array} \right\} b_j ; j = 1, m \\ & x_i \geq 0 ; i = 1, n \end{aligned}$$

où les x_i sont les variables de décision

m est le nombre de contraintes,

n est le nombre de variables de décision,

les c_j , b_j et A_{ij} sont des constantes connues,

les c_i sont les coûts ou gains,

les b_j sont appelés seconds membres⁵,

les A_{ij} sont les coefficients technologiques, utilisés pour donner un coefficient aux contraintes.

4.2.1.1 Forme standard et forme canonique

Dans la forme canonique, un problème de programmation linéaire peut posséder des contraintes d'infériorité, de supériorité ou d'égalité à variables négatives, nulles ou positives. Dans la forme standard, le problème linéaire doit uniquement contenir des égalités, des contraintes de supériorité et des variables positives ou nulles.

Selon le type de solveur à utiliser, il faut adapter la formulation du problème. Certains algorithmes sont prévus pour traiter uniquement des équations linéaires standard ou canonique.

Le passage d'une forme à l'autre est assez trivial. Il est en effet simple de passer d'une contrainte d'égalité en une inégalité en ajoutant une variable d'écart ou d'excédent. Dans le cas d'une inéquation de type \leq , nous pouvons ajouter une variable d'excédent restreinte à être supérieure ou égale à zéro et remplacer l'inégalité en une égalité. Nous savons convertir une inéquation du type \geq en soustrayant une variable d'excédent qui devra être inférieure ou égale à zéro et en modifiant l'inéquation en une équation. De la même manière, une contrainte d'égalité peut être traduite par deux inégalités opposées. La règle de multiplication par -1 des deux cotés de l'équation est aussi valable pour changer le sens d'une inéquation.

De plus, il est toujours possible de travailler avec des variables qui peuvent être négatives ou positives malgré l'imposition de variables positives ou nulles dans la forme standard. Il faut alors remplacer la variable par un couple de variables associées à la partie positive et négative de celle-ci. De plus, une restriction de négativité sur une variable est traduite par son opposé.

Nous pouvons aussi facilement passer d'une minimisation en une maximisation, car l'une est l'inverse de l'autre. En effet, $\min f(x) = -\max(-f(x))$ et $\max f(x) = -\min(-f(x))$

Exemples de conversion entre formes :

| Forme standard | \Leftrightarrow | Forme canonique |
|-------------------------------------|-------------------|--|
| $3x_1 + 2x_2 + e_1 = 2, e_1 \geq 0$ | \Leftrightarrow | $3x_1 + 2x_2 \leq 2$ |
| $3x_1 + 2x_2 - e_1 = 2, e_1 \geq 0$ | \Leftrightarrow | $3x_1 + 2x_2 \geq 2$ |
| $3x_1 + 2x_2 = 2$ | \Leftrightarrow | $3x_1 + 2x_2 \geq 2, 3x_1 + 2x_2 \leq 2$ |
| $\sum A_{ij}x_j \geq b_i$ | \Leftrightarrow | $-\sum A_{ij}x_j \leq -b_i$ |
| $\sum A_{ij}x_j \leq b_i$ | \Leftrightarrow | $-\sum A_{ij}x_j \geq -b_i$ |

Les variables ajoutées à la forme standard sont incluses dans les variables de décision car elles font partie du problème à résoudre.

En résumé, il est possible de transformer tout problème d'une forme à l'autre afin de prendre une de ces deux formes :

| Forme standard | Forme canonique |
|---|--|
| $Max \sum c_i x_i$ | $Max \sum c_i x_i$ |
| $A_{ij}x_j = b_j; j = 1, m$ $x_i \geq 0; i = 1, n$ | $A_{ij}x_j \leq b_j; j = 1, m$ $x_i \geq 0; i = 1, n$ |

4.2.2 Optimisation non linéaire

L'optimisation non linéaire s'occupe de résoudre les systèmes d'équations non linéaires. Dans certains cas, c'est la fonction objective qui est non linéaire. Dans d'autres, une équation est non linéaire. Dans tous les cas, à partir du moment où il existe un élément non linéaire dans l'expression mathématique d'un problème, le système est non linéaire.

Les équations non linéaires sont des problèmes plus difficiles à résoudre en raison des méthodes de recherche utilisées comme nous le verrons dans 5.4.1.2. Pour cela, nous essayerons de travailler avec des systèmes linéaires dans nos méthodes de résolution ou de modélisation.

Il existe néanmoins des méthodes pour découper un système non linéaire en morceaux linéaires et d'autres pour traiter directement les systèmes non linéaires. Nous n'utiliserons pas ces méthodes, mais nous les citerons à titre d'information dans le chapitre suivant.

4.2.3 Modélisation

Il n'existe pas de recette afin de traduire un problème de la vie réelle en équation mathématique. De plus, certaines modélisations d'un même problème peuvent rendre le domaine de recherche plus ou moins grand. Le but de ce mémoire n'est pas la formulation mathématique optimale de problème, le lecteur pourra se référer à cette référence [1] pour en apprendre davantage sur le sujet. Pour cette raison, nous nous baserons sur des modélisations existantes dans la littérature. Mais avant cela, nous apporterons des éléments théoriques pour comprendre ces modèles mathématiques.

4.2.3.1 Variable de décision

Plusieurs types de variables de décision peuvent être utilisés pour la modélisation d'un problème. Dans le cas où il faut faire un choix entre l'une ou l'autre option, nous utiliserons des variables binaires. Une variable binaire peut être vue comme variable entière restreinte à être entre 0 et 1.

4.2.3.2 Traduction de formules logiques en équation

Il est possible de transformer des conditions logiques en équation linéaire par l'utilisation de variables booléennes.

Voici un tableau reprenant les principales équivalences entre des formules logiques leur équivalence en équation linéaire ; avec b_1 et b_2 deux variables booléennes :

| Condition logique | \Leftrightarrow | Formulation en équation |
|---------------------------|-------------------|-------------------------|
| $b_1 \vee b_2$ | \Leftrightarrow | $b_1 + b_2 \geq 1$ |
| $b_1 \wedge b_2$ | \Leftrightarrow | $b_1 = b_2 = 1$ |
| $b_1 \Rightarrow b_2$ | \Leftrightarrow | $b_1 \leq b_2$ |
| $b_1 \Leftrightarrow b_2$ | \Leftrightarrow | $b_1 = b_2$ |

4.2.3.3 Branchement conditionnel

De même, il est possible de traduire des conditions de type SI ... ALORS ... présent dans les langages impératifs.

Avec β une variable binaire ainsi que a,b et x des variables mixtes⁶ et M une valeur arbitrairement grande :

6. Variables mixtes

$$\begin{aligned}
SI \ \beta \ ALORS \ \sum a_i x_i \leq b & \Leftrightarrow \sum a_i x_i + (\beta - 1) M \leq b \\
SI \ \sum a_i x_i \leq b \ ALORS \ \beta & \Leftrightarrow \sum a_i x_i - (M - 1) \beta \geq b + 1
\end{aligned}$$

4.2.3.4 Disjonctions

Si nous voulons une solution qui ne satisfait pas toutes les contraintes, mais un nombre k . On utilise une variable binaire différente pour chaque contrainte. Si la solution satisfait une contrainte alors cette variable prend la valeur 1 sinon 0. On pose donc une variable binaire v_i à chaque contrainte i de telle sorte que nous puissions travailler avec un nombre k de contraintes à satisfaire.

Soit formulé mathématiquement :

$$\sum_{i=1}^m v_i \left\{ \begin{array}{l} \leq \\ = \\ \geq \end{array} \right\} k$$

Et on intègre cette nouvelle variable dans le membre de droite de contrainte i comme ceci :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i - (1 - v_i) M$$

ou

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i + (1 - v_i) M$$

Avec une valeur M assez grande pour relâcher la contrainte i si $v_i = 0$

4.3 Résolutions des modèles mathématiques

Nous allons voir une petite partie des méthodes de résolution d'équation. Nous aborderons celle que nous utiliserons par la suite et une qui est majoritairement utilisée mais qui ne peut être appliquée ici.

4.3.1 Système linéaire

4.3.1.1 Méthode du simplexe

Méthode itérative proposée par Dantzig en 1947, la méthode du simplexe permet de résoudre des systèmes d'équations linéaires sous forme standard avec des valeurs réelles.

L'idée générale de l'algorithme est sur base d'une solution initiale x_0 , tant que x_k n'est pas une solution optimale (acceptable) on calcule x_{k+1} sur base de x_k en prenant $\lim_{k \rightarrow \infty} x_k = x^*$. À chaque itération, on cherche à augmenter une variable du système. À ces débuts, cette méthode était uniquement pour des maximisations. Pour traiter un problème de minimisation avec cette méthode, il fallait convertir le problème de minimisation en un problème de maximisation. La méthode a donc évolué pour résoudre un problème inverse au problème de base, c'est le concept de primal/dual. Une minimisation est le primal d'une maximisation et inversement.

Cette modification du problème apporte d'autres propriétés car nous savons déjà passer d'une maximisation à une minimisation grâce à des changements de signes. La principale utilité est la modification du nombre de variables et de contraintes. En effet, un problème primal à n variables et m contraintes

devient un problème à m variables et n contraintes dans sa formalisation duale. Cette transformation est d'autant plus avantageuse que la méthode du simplexe est utilisable sur des systèmes linéaires possédant un nombre n de variables supérieures au nombre m de contraintes. Dans le cas où $n = m$, le système ne possède qu'une solution et la problématique d'optimisation n'a alors plus de sens.

Comme dit plus haut, le principe d'origine se base sur une solution réalisable mais non optimale du problème comme référence à faire évoluer. Si nous n'avons pas de solution initiale, une méthode en deux phases existe afin de créer une solution possible puis de la faire augmenter en itérant sur la phase deux.

L'approche de résolution est représentée avec un tableau de contraintes. Une ligne par contrainte d'égalité et une colonne par variable du problème. Représenté de manière générale par le tableau 4.1

| | x_1 | x_2 | \dots | x_n | |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| x_{n+1} | a_{11} | a_{12} | \dots | a_{1n} | b_1 |
| x_{n+2} | a_{21} | a_{22} | \dots | a_{2n} | b_2 |
| \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots |
| x_{n+m} | a_{m1} | a_{m2} | \dots | a_{1n} | b_m |
| | c_1 | c_2 | \dots | c_n | 0 |

FIGURE 4.1 – Représentation générale d'un tableau pour la méthode du simplexe

Les b_m sont les parties droites des égalités, les x_{n+1} sont les lignes pour chaque équation, les x_n sont les variables, les c_n sont les coefficients de la fonction objectif et les a_{ij} sont les facteurs de chaque variable des différentes équations. Si une variable ne se trouve pas dans une équation alors la valeur du a_{ij} correspondant est zéro.

Exemple :

$$\max z = 20x_1 + 25x_2$$

sous les contraintes

$$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 + x_3 = 40, \\ 4x_1 + 2x_2 + x_4 = 48, \\ x_1, x_2 \geq 0. \end{cases}$$

Donne un tableau :

| B | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | |
|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| x_3 | 2 | 3 | 1 | 0 | 40 |
| x_4 | 4 | 2 | 0 | 1 | 48 |
| | 20 | 25 | 0 | 0 | 0 |

Pour le module de simplexe de SWI-Prolog par exemple, le problème s'écrit directement sous la forme d'équation.

Par la suite, il a été prouvé que dans certains cas, que si toutes les variables sont en valeurs entières, le simplexe donne une solution en valeurs entières. Un théorème [7] dit que si la matrice (le tableau représentant les facteurs de chaque variable) est totalement unimodulaire, alors le simplexe donnera une solution en nombres entiers. Les conditions suffisantes⁷ à remplir pour qu'une matrice soit totalement modulaire sont les suivantes :

7. suffisante mais non nécessaire signifie que l'un implique l'autre mais pas l'inverse

- Chaque colonne de A possède au plus 2 éléments non nuls ;
- Chaque élément de A est dans l'intervalle entier $[-1..1]$;
- Si 2 éléments d'une colonne de A ont le même signe, alors la ligne de l'un est dans B , l'autre dans C ;
- Si 2 éléments d'une colonne de A ont des signes inverses, alors les lignes des 2 éléments sont dans B ou toutes les 2 dans C ;

L'utilisation de cette méthode impose une forme bien particulière du problème à poser. En effet, il n'est pas toujours possible de formaliser un problème afin d'être traitable par cette méthode. C'est pourquoi nous allons voir d'autres alternatives.

4.3.1.2 Branch and Bound

Méthode de séparation et d'évaluation progressive. Elle cherche systématiquement toutes les valeurs des variables sous la forme d'un arbre de recherche et ensuite, utilise une heuristique pour choisir quelle branche développer. On utilise des bornes inférieures ou supérieures afin de limiter l'expansion de l'arbre dans le cas où l'on veut faire une minimisation ou une maximisation.

Le fait de trouver une valeur valide à affecter à une variable est en réalité un sous-problème à résoudre. Une fois que cet ensemble de sous-solutions possible est trouvé, une heuristique choisit quelle est la meilleure sous-solution à explorer. Sur base de cette sous-solution sélectionnée et aussi sur toutes celles sur base desquelles elle est construite, une autre partie du problème est évalué.

L'avantage de cette méthode est qu'elle est générique et peut prendre en charge des problèmes linéaires et non linéaires en nombres mixtes. Un de ses désavantages est d'être moins performant que des méthodes plus spécifiques telle que le simplex.

4.3.2 Système non linéaire

4.3.2.1 Séparabilité

Dans le cas d'une fonction objective non linéaire, il est possible de séparer les éléments de la fonction et de la traiter par morceau si un des éléments causant la non-linéarité est borné dans un intervalle contigu. Nous pouvons à ce moment traiter cet élément devenu linéaire par sa fixation à une valeur constante. En d'autres termes, on fixe une des variables pour déduire la valeur d'une autre.

Il est aussi possible d'approximer une découpe en morceaux artificiellement linéaires. Nous avons à ce moment une possibilité de traitement, mais une perte de précision.

4.3.2.2 Technique de résolution de système non linéaire

Une des méthodes les plus utilisées dans l'ingénierie électrique pour calculer des valeurs pour les fonctions non linéaires est la méthode de Newton-Raphson. Cette méthode itérative utilise le principe de plus petit point fixe sur base d'une approximation linéaire du système. Cette approximation est effectuée à l'aide d'une matrice Jacobienne qui est un moyen d'approximer de manière linéaire un comportement d'un système non linéaire au voisinage d'un point donné. Ce point dans le cas d'une optimisation est la valeur de la fonction objective. Cette valeur varie d'itération en itération jusqu'à converger vers une valeur fixe ou vers une variation inférieure à la précision demandée. Il est aussi possible de limiter le nombre d'itérations afin d'être sûr de converger à un moment donné, mais nous obtenons alors un résultat approximatif.

4.3.3 Solveur d'équations

Une fois le problème modélisé en un système d'équations, la recherche d'une solution possible de ce système peut se faire par une résolution des équations. Cette résolution nous fournit alors une valeur pour chaque inconnue du système, ces inconnues sont les variables de décision.

Suivant le type de variable du problème à résoudre, il est possible d'appliquer des techniques différentes ou de transformer le problème afin d'être applicable pour différents types de solveurs.

Un des solveurs bien connu et utilisé dans le monde académique est celui intégré à SWI-Prolog tel que le solveur de contraintes à domaine fini appelé *Constraint Programming over Finite Domains* ou *clp(fd)* pouvant traiter des variables entières et artificiellement binaires. Il existe aussi un solveur à domaine réel ou rationnel pouvant utiliser ce type de variables, mais il y a quelques limitations dans l'utilisation de contraintes non linéaires comme nous le verrons dans 5.4.1.2.

Il n'existe pas de limite réelle au niveau du traitement de contraintes non linéaires avec Prolog *clp(fd)* comme cité dans [5] où l'auteur définit la résolution de ce genre de système comme étant naïve de par l'utilisation d'une méthode de génération de valeurs et de tests de contraintes par l'algorithme de résolution intégré.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu les techniques à mettre en œuvre pour résoudre notre problème. Nous avons utilisé des techniques d'optimisation faisant partie d'outils d'aide à la décision. Dans l'optimisation, nous avons parcouru les différents types et leurs limitations tels que le simplexe qui est spécialisé pour les problèmes linéaires ou encore les solveurs d'équations qui sont assez génériques dans les types de problèmes supportés.

Nous avons parcouru les différentes formes de modélisation afin d'exprimer un problème en optimisation mathématique.

Nous avons aussi introduit la notion de multiobjectif dans le cadre de l'optimisation et quelques types de formes simples comme des fonctions agrégatives et des fonctions de préférence lexicographique afin de pouvoir définir des importances aux différents objectifs d'optimisation.

Il faut maintenant mettre toute cette théorie à profit afin de modéliser concrètement notre problème.

Chapitre 5

Optimisation d'un réseau électrique

Afin de comprendre notre positionnement par rapport à l'état de l'art en matière d'optimisation de réseau électrique, nous allons énumérer et expliquer brièvement quelques approches rencontrées lors de nos recherches. Nous allons voir les besoins en informations nécessaires aux outils de calculs de loadflow. De la même manière que nous faisons des calculs de loadflow de manière simplifiée au sens des composants électriques comme vu dans le chapitre 3, nous ferons de même pour l'optimisation. Nous allons donc formaliser notre problème sous la forme d'un modèle mathématique. Nous expliquerons les objectifs à optimiser et les contraintes à prendre en compte dans notre étude sur base de précédents travaux, mais en faisant une approximation par rapport aux tensions sur le réseau et sur les informations disponibles du celui-ci. Nous personnalisons certaines contraintes utilisées dans la littérature pour satisfaire les besoins du gestionnaire du réseau.

5.1 Approches proposées dans la littérature

5.1.1 Méthodes utilisées

Un grand nombre d'approches de résolution sont proposées dans la littérature.

Une méthode classique se base sur la programmation linéaire pour traiter le problème sous la forme d'une optimisation de flux en minimisant la longueur totale du réseau. Une variante a été proposée pour répartir la puissance avec une minimisation des pertes ; cette modélisation est non linéaire donc une approximation linéaire par morceau a été choisie. Un autre modèle de flot de cout linéaire minimum avec capacité a été lié avec l'algorithme de *Branch and Bound*. Ces méthodes sont définies pour un réseau de distribution radial. Toutes ces approches sont analysées en détail dans les travaux de E. Gladkikh sur l'organisation de l'architecture pour des réseaux de distribution de puissance [?]

D'autres approches utilisent la problématique du voyageur de commerce pour obtenir un ensemble de nœuds alimenté par un poste source donné sous la forme d'un chemin passant par ce poste et une sélection de nœuds. L'union de ces sous-structures radiales se fait avec un algorithme de couplage de poids minimum afin d'obtenir un réseau maillé.

Dans les travaux de E. Gladkikh [22], l'auteur propose une solution aux problèmes liés aux structures arborescentes dans un réseau de distribution électrique. Cette méthode utilise la programmation quadratique en nombre mixte et sa résolution a été faite à l'aide de l'outil de programmation mathématique et de programmation par contrainte IBM ILOG CPLEX puis par des heuristiques spécifiques à cette formulation. Cette proposition utilise une approche monobjectif d'un problème mutliobjectif via une formule qui combine les fonctions objectifs en un cout global d'exploitation pour l'étude de la conception optimale d'un réseau de distribution.

D'autres méthodes non linéaires sont utilisées pour la conception d'un système d'aide à la conduite pour les opérateurs des réseaux de distribution [9]. Ces méthodes sont pour des topologies radiales et maillées et utilisent comme connaissances les puissances consommées pour calculer les plans de tension en nombres complexes sur base d'une description matricielle de la topologie du réseau.

Toutes ces méthodes sont pour des gestionnaires de réseau de distribution sachant maîtriser les plans de tension dans leur réseau alors que nous avons une approche approximée de la distribution électrique basée sur un problème de distribution de puissance à tension fixée comme constante à cause des informations manquantes sur le réseau et de la non-maîtrise des tensions sur notre réseau.

5.1.2 Connaissances et informations nécessaires sur le réseau

Les données et les connaissances utilisées dans tous les ouvrages relatant des calculs sur les réseaux électriques, de loadflow et de techniques d'optimisation sont utilisées pour calculer des chutes de tension lorsqu'il n'y a pas de mesure temps réel ou pour de la simulation. Ces méthodes prennent en compte les transformateurs comme éléments actifs du système pour calculer les tensions via des matrices d'admittances représentant les comportements électriques de ces équipements ainsi que les puissances actives et réactives. Les caractéristiques physiques des câbles sont aussi utilisées pour calculer les pertes et les chutes de tension exactes dans chaque câble.

Raisons pour lesquelles nous optons pour notre propre modélisation basée sur de précédents travaux.

5.2 Notre approche

Suite à l'étude des besoins pour la fourniture l'outil demandé, à l'analyse du domaine de travail et à la lecture de la littérature à ce sujet, nous avons listé les besoins et informations disponibles sur le réseau électrique à l'aide du gestionnaire et du service d'étude électrique. Nous avons convenu d'une démarche de calcul simplifiée sur base des informations et connaissances actuelles sur le réseau tout en étant valide d'un point de vue de la théorie de la distribution électrique.

Notre problème est donc une simplification des méthodes de loadflow. En effet, la problématique peut être formulée comme une optimisation de la distribution de puissance¹ dans un réseau électrique sans se soucier du calcul exact des pertes. Pour tenter de minimiser les pertes par effet Joule dans les câbles, nous choisissons de travailler sur les facteurs causant ces pertes, en posant la tension comme une constante et en supposant le réseau électrique triphasé comme étant équilibrés.

5.3 Modélisation

La discrétisation d'un élément physique ou conceptuel est sa représentation sous la forme d'une variable ou d'un ensemble de variables. Afin de pouvoir travailler avec un graphe en optimisation mathématique, il est nécessaire d'avoir chaque composant du graphe en tant que variable. Nous allons voir les différentes formes de représentation ainsi que leurs utilisations.

5.3.1 Arbre couvrant et graphe orienté

La définition mathématique d'un arbre couvrant est un sous graphe connexe $G'(V, E')$ tel que tous les nœuds V présents dans G sont aussi dans G' et connectant les nœuds avec un ensemble V' de liens de taille $= |E| - 1$. Cette définition peut être traduite en variables binaires respectant un ensemble de contraintes tel que :

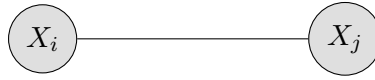
$$\sum_{i \in E'} n_i = |E| \quad (5.1)$$

$$\sum_{\{i,j\} \in V'} n_{i,j} = |E'| - 1 \quad (5.2)$$

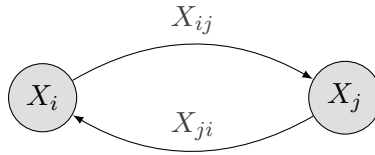
La formule (5.1) permet de s'assurer que tous les nœuds sont dans l'arbre et la formule (5.2) permet une vérification de la non-présence de cycle dans le graphe.

Comme nous l'avons vu, un lien électrique (i, j) n'est pas orienté avant son utilisation effective.

1. Exprimée en Watt



Du point de vue d'un flux, un lien peut être utilisé dans un des 2 sens possibles. Afin de connaître l'orientation d'un lien via l'expression du graphe sous la forme de variables, nous devons dupliquer chaque arc (x_i, x_j) en 2 arcs (x_j, x_i) et (x_i, x_j) et s'assurer que maximum un des deux liens sera utilisé à la fois grâce à leur variable binaire.



La contrainte d'arborescence sur les graphes orientés n'est pas la même que pour les arbres donnés en 5.3.1. En effet, un arbre couvrant est non orienté, il faut donc ajouter une contrainte sur le degré entrant de chaque nœud afin d'imposer un seul prédécesseur sauf pour la racine r qui n'en possède pas. Cette vérification s'assure aussi de la connexité du graphe car tous les nœuds sauf la racine possèdent un nœud amont, ils sont alors connectés au graphe. Nous pouvons exprimer cette contrainte sous la forme suivante :

$$\sum_{\{k\} \in V'} l_{kr} = 0 \quad (5.3)$$

$$\sum_{\{k,i\} \in V'} l_{ki} = 1 \quad \forall i \in E' \setminus r \quad (5.4)$$

$$0 \leq l_{ij} + l_{ji} \leq 1 \quad \forall i, j \in E' \setminus r \quad (5.5)$$

$$0 \leq l_{ij} \leq 1 \quad \forall i, j \in E' \quad (5.6)$$

l_{ij} représentant une variable binaire (0 ou 1) représentant la présence d'un lien comme étant entrant dans j .

La contrainte (5.4) pour l'imposition d'un seul degré entrant pour chaque nœud et le cas spécifique pour la racine aillant un degré entrant nul (5.3) assure une r-arborescence grâce à la représentation de la présence de liens dans la solution comme étant des variables binaires, c'est à dire des variables comprises entre 0 et 1 via (5.6). La formule (5.5) permet à la solution de contenir au plus un des deux sens de chaque lien à l'exception des liens vers la racine qui sont tous en sens unique.

5.3.2 Problème du flot de cout minimum

Une problématique classique se retrouvant dans la littérature se décrit comme ceci :

Dans un réseau de transport représenté par un graphe orienté $G = (V, A)$. À chaque sommet $i \in V$ est associée une demande b_i . Cette valeur est positive si le sommet génère une quantité flux, négative si elle consomme des unités de flux ou prend une valeur nulle si c'est un nœud de transit. Chaque lien $(i, j) \in A$ représente une possibilité de transport de flux entre les nœuds i et j avec un cout unitaire c_{ij} et une capacité limitée h_{ij} . Quel est le plan d'acheminement optimal qui satisfait toutes les demandes pour un cout de transport minimal ?

5.3.2.1 Formulation mathématique

Pour modéliser le problème afin d'obtenir un modèle mathématique décrivant une solution, nous devons définir quelques éléments.

Un réseau est un graphe orienté ayant :

- Des capacités sur les arcs ;
- Des sommets d'offre (ou sources) ;
- Des sommets de demande (ou puits) ;
- Des sommets de transfert.

Un flot est une quantité de matière ou de flux s'écoulant sur un arc $u = (x_i, x_j)$ se notant $\varphi(u)$. Pour tout arc u , on a une quantité de flux ou une absence flux. C'est à dire que pour chaque u , $\varphi(u) \geq 0$.

Chaque lien doit respecter la loi de conservation du flot venant de la loi des nœuds de Kirchhoff. Soit A l'ensemble des arcs du réseau et x_{ij} la quantité de flots passant par l'arc $(i, j) \in A$, nous avons alors un flot dit compatible avec l'offre ou la demande b . Cette règle est mathématique modélisée comme suit :

$$\sum_{j:(i,j) \in A^+} x_{ij} - \sum_{j:(j,i) \in A^-} x_{ji} = b_i, \quad i, j \in N \quad (5.7)$$

où

- $b_i = 0$ pour un transfert, offre (source), -demande (puits) ;
- N désigne l'ensemble des sommets ;
- A^+ est l'ensemble des arcs sortant du sommet i ;
- A^- est l'ensemble des arcs entrant dans le sommet i ;
- x_{ij} représente la quantité de flux dans le câble allant de i à j .

Si on veut ajouter une limite de capacité aux arcs, nous obtenons la contrainte suivante :

$$0 \leq x_{ij} \leq u_{ij} \quad (5.8)$$

où u_{ij} est la valeur maximale transportable par le lien allant de i à j .

Nous voulons aussi minimiser les couts de transport, nous avons donc comme fonction objective :

$$\min \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \quad (5.9)$$

avec c_{ij} le cout unitaire du lien allant de i à j .

5.3.2.2 Applicabilité à notre problématique

La fonction objective de ce problème est une minimisation des cout de transport, nous ne voulons pas uniquement travailler sur le cout mais sur un ensemble d'objectifs. Nous pouvons aisément remplacer le cout par un autre élément à optimiser. Sans cette fonction objective, l'ensemble des contraintes nous donne les conditions pour avoir un flot réalisable dans un réseau avec, si besoin, une contrainte de capacité sur les liens.

La terminologie et la formulation sont applicables à la distribution de la puissance. Les puits (ou sommets de demande) sont les jeux de barres consommatrices. Les sommets de transfert sont les jeux de barres de transit et les départs sont les sommets d'offre (ou sources).

5.3.3 Notre modélisation mathématique

Nous allons utiliser la programmation non linéaire mixte pour résoudre notre problème grâce au modèle de flot à cout minimum, qui, lui possède une formulation en programmation linéaire en nombre entier en y ajoutant des contraintes supplémentaires sur l'arbre généré. La génération d'un arbre couvrant orienté a une formulation en variables binaires. Nous allons commencer par une modélisation d'un problème de satisfaction de contraintes pour ensuite ajouter la partie optimisation des différents objectifs. Nous terminerons par la gestion de la partie multiobjectif du problème.

5.3.3.1 Formulation mathématique pour un flot r-arborescent

Nous rassemblons les contraintes de flot et les contraintes d'arborescence pour les graphes orientés de façon à ne permettre l'arrivée d'un flot entrant à un nœud b_i que depuis un seul lien. Nous obtenons donc la formule suivante :

$$\sum_{j \in A^+} x_{ij} - \sum_{j \in A^-} l_{ij} x_{ji} = b_i, \quad i, j \in N, \quad (5.10)$$

$$\sum_{\{k\} \in V'} l_{kr} = 0, \quad (5.11)$$

$$\sum_{\{k,i\} \in V'} l_{ki} = 1 \quad \forall i \in E' \setminus r \quad (5.12)$$

$$0 \leq l_{ij} + l_{ji} \leq 1 \quad \forall i, j \in E' \setminus r \quad (5.13)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq c_{ij} \quad \forall i, j \in E' \setminus r \quad (5.14)$$

- $b_i = 0$ pour un transfert, offre (sources), -demande (puits) ;
- l_{ij} représentant une variable binaire (0 ou 1), représentant la présence d'un lien comme étant entrant à i ;
- N désigne l'ensemble des sommets ;
- A^+ est l'ensemble des arcs sortant du sommet i ;
- A^- est l'ensemble des arcs entrant au sommet i ;
- x_{ij} représente la quantité de flux dans le câble allant de i à j ;
- c_{ij} représente la quantité de flux maximale admissible dans le câble allant de i à j ;
- E' est l'ensemble des liens électriques doublés pour prendre en compte le sens d'utilisation de chaque lien dans E^2 ;

La contrainte 5.13 s'assure qu'un lien est utilisé uniquement dans un seul sens. La contrainte 5.12 s'assure que chaque nœud possède un seul lien entrant et avec 5.11 on s'assure qu'il n'y ait aucun lien venant de k et entrant dans la racine. L'ensemble 5.13, 5.12 et 5.11 génère une r-arborescence sur base du graphe non orienté représentant le réseau de distribution électrique. La formule 5.10 est la loi de la conservation du flot exprimé en 5.7 avec une variable binaire permettant de lier cette contrainte à la r-arborescence trouvée avec l'ensemble des variables l_{ij} . Pour finir la contrainte 5.14 empêche un flot d'être supérieur à la capacité des câbles

Le sens d'utilisation de chaque câble représente en réalité le sens d'écoulement du courant.

Une condition d'applicabilité de cette formulation est que la somme des consommations soit égale à la somme des productions. Nous ne connaissons la consommation dans chaque source qu'une fois la configuration trouvée. Pour cela, nous ajoutons une super source fictive reprenant la somme des consommations de tous les nœuds à alimenter. Nous pouvons le savoir, car tous les nœuds sont à connecter au réseau. Les sources ne le sont plus réellement car c'est la super source qui devient la seule source du réseau. Ces départs deviennent donc des nœuds de transfert. Nous devons aussi relier chaque source à cette super source avec un âge, un nombre de manchons et une longueur de 0 de façon à ne pas impacter les fonctions objectif. La capacité des liens doit être définie pour ne pas excéder la puissance réellement disponible dans chaque source. Il est important de préciser que ces liens fictifs ne peuvent aller que de la super source vers les départs et que les liens sortants des départs vers le réseau ne peuvent exister que dans ce sens dans le graphe. Cela n'aurait pas de sens de faire arriver de l'électricité sur un départ.

On pourrait choisir de diminuer artificiellement la disponibilité de puissance d'un ou plusieurs départs pour forcer la répartition vers d'autres sources en diminuant la capacité des liens partant de la super source vers les réelles sources.

2. E étant l'ensemble des câbles du réseau.

5.3.3.2 Filtrage pour l'année de pose minimum

Nous avons vu que le gestionnaire ne tiens pas compte de ce facteur influencent la charge maximale admissible dans un câble. Pour le moment, cela ne pose pas de problème car les configurations sont choisies avec une très grosse réserve sur la charge dans les câbles. Dans le but de prévoir une prise en compte de l'âge pour la partie étude, nous fournissons déjà les contraintes.

Un câble ne pourra pas être utilisé si sont année pas pose est \leq à une constante définie par l'utilisateur.

5.3.3.3 Éléments à optimiser pour l'opérationnel

Lors de l'étude de la problématique, nous avons identifié un ensemble d'éléments à optimiser en collaboration avec le service d'étude électrique. Nous nous occuperons pour le moment de l'optimisation du réseau électrique pour son exploitation. Dans le chapitre suivant, nous verrons comment utiliser ces critères pour de la simulation.

Pour rappel, un réseau configuré de manière optimale répond à certaines caractéristiques telles que :

Longueur des câbles utilisés

Au plus un réseau est étendu, au plus il y a de pertes de tension en ligne. Nous voulons donc minimiser la longueur totale des liens utilisés donc :

$$f_{\text{objectif}_{\text{longueur}}} = \min \sum_{i,j \in E'} l_{ij} * x_{ij} \quad (5.15)$$

La puissance en transit dans les câbles

Plus un câble est chargé, plus il y a une dissipation de la puissance par effet Joule comme vu dans la partie 1.3 et donc de pertes. Nous voulons travailler sur la somme des charges en transit dans le réseau.

Cette fonction objectif est mathématiquement formulée comme suit :

$$f_{\text{objectif}_{\text{charge}}} = \min \sum_{ij} x_{ij} \quad (5.16)$$

L'âge des câbles utilisés

Le gestionnaire préfère utiliser des câbles plus jeunes. On voudrait donc faire la somme de l'âge des câbles utilisés grâce à une variable a_{ij} représentant la connaissance de l'année de pose du câble ij et le câble ij est utilisé via la variable l_{ij} . Pour cela, il faudrait passer par une variable de connaissance de l'année en cours et faire une soustraction de l'année en cours avec l'année de pose et de minimiser cette somme. Une alternative possible avec moins de calculs est de directement utiliser la somme des années de pose pour les câbles utilisés et de maximiser celle-ci.

Suivant le type de fonction objectif utilisé et surtout, suivant la méthode de gestion de l'optimisation multiobjectif, la forme de l'optimisation doit changer. Nous avons vu le passage d'une fonction de minimisation en une fonction de maximisation. Cela nous donne le choix des formulations suivantes :

$$f_{\text{objectif}_{\text{ge}}} = \min \left(- \sum_{ij} l_{ij} \cdot a_{ij} \right)$$

ou

$$f_{\text{objectif}_{\text{ge}}} = \max \sum_{ij} l_{ij} \cdot a_{ij} \quad (5.17)$$

De cette façon, nous additionnons les années de pose des câbles utilisés. Les câbles non inclus dans la solution ont leur variable $l_{ij} = 0$, donc leur année de pose n'est pas ajoutée car elle est multipliée par zéro.

On pourrait aussi faire une soustraction de l'année en cours avec l'année de pose à la place d'utiliser les a_{ij} .

Le nombre de manchons

Un manchon est un point faible donc leur nombre est à minimiser sur le réseau complet. Nous faisons le même type de somme que pour la fonction objectif pour la longueur avec une variable m_{ij} informant le nombre de manchons présents dans le câble ij . Nous formulons cette fonction objectif de cette façon :

$$f_{\text{objectif}_{\text{manchons}}} = \min \sum_{ij} l_{ij} \cdot m_{ij} \quad (5.18)$$

Le nombre de manœuvres

La minimisation du nombre de manœuvres est équivalent à la minimisation de la différence des liens actifs au moment de la demande d'une nouvelle configuration et la liste des liens proposés dans la nouvelle configuration. De cette façon, nous obtenons la fonction objectif demandée et cela a pour effet de chercher une nouvelle configuration qui est au voisinage de la configuration précédente.

Nous insistons sur le fait que nous travaillons sur la liste des câbles et non des liaisons doublées (E'). En effet, le courant peut changer de sens dans un lien sans que nous ayons fait des manœuvres dessus. Les variables l_{ij} et l_{ji} ne pouvant être toutes les deux à un, leurs sommes nous informe sur l'utilisation ou non du lien qu'elles représentent.

Nous avons donc un nombre d'éléments différents entre deux listes de variables binaires comme suit :

$$f_{\text{objectif}_{\text{manoeuvres}}} = \min \sum_{ij} |(l_{ij} + l_{ji}) - la_{ij}| \quad (5.19)$$

Les l_{ij} sont les variables binaires de la présence ou non du lien ij dans la solution et les la_{ij} sont les variables binaires représentant l'activation ou non d'un lien dans la configuration actuelle du réseau.

5.3.3.4 Typologie de notre formulation

Nous voyons que cette modélisation n'est pas linéaire. Nous devons donc utiliser un solveur d'équation pour résoudre ce problème.

Nous avons plusieurs facteurs à optimiser. Nous devons donc trouver une formulation multiobjectif qui soit assez flexible pour l'opérateur.

La plus simple à mettre en œuvre est la gestion lexicographique des objectifs. Nous devons aller voir le client pour valider ce choix. Pour nos tests nous prendrons cette solution.

5.4 Programmation par contraintes

Un des paradigmes de programmation s'approchant le plus des définitions de notre problématique modélisée dans la section 5.3 et dont l'expressivité est similaire à la définition de l'optimisation mathématique est la programmation par contraintes.

En effet, les contraintes sont un moyen mathématique de représenter des règles pour la résolution d'un problème ou d'un objectif. Une fois les contraintes connues et exprimées sous une forme mathématique, la résolution du problème se fait avec un moteur de résolution de contraintes. Le principe de la programmation par contraintes est d'ailleurs identique ou presque à la définition de l'optimisation mathématique. Les relations entre les variables de décision sont les contraintes. L'affectation de valeurs aux variables satisfaisant l'ensemble des contraintes imposées est alors un problème de satisfaction de contraintes appelé *Constraint Satisfaction Problem* ou *CSP*.

Un problème de satisfaction de contraintes est défini par un triplet $(\mathcal{X}, \mathcal{D}, \mathcal{C})$ où :

- $\mathcal{X} = \{x_1, \dots, x_n\}$ est l'ensemble de variables du problème ;
- $\mathcal{D} = \{\mathcal{D}_1, \dots, \mathcal{D}_n\}$ est l'ensemble des domaines des variables, c'est-à-dire que pour chaque variable on définit l'intervalle de valeurs qu'elle peut prendre. N'est valable que dans le cas de la satisfaction de contraintes en domaine fini
- $\mathcal{C} = \{C_1, \dots, C_m\}$ est un ensemble de contraintes. Une contrainte exprime les relations qui existe entrent des variables.

5.4.1 Langage utilisé lors de notre étude

Lors de nos recherches et travaux, nous avons utilisé SWI-Prolog en version 7.4.2, qui est un environnement Prolog gratuit et très fort utilisé dans l'enseignement et à fortiori ici à l'UNAMUR pour les cours de Techniques d'intelligence artificielle. Tout ce qui suit sera applicable à cette version. Nous avons utilisé le langage Prolog pour économiser du temps d'apprentissage

Prolog est un langage déclaratif qui, à l'instar de la programmation impérative traditionnelle, décrit le problème pour être résolu par un moteur d'inférence. Notons la différence avec les langages impératifs avec lesquels on écrit comment résoudre le problème.

Un programme déclaratif est composé d'un ensemble de connaissances composé de termes et de relations entre eux.

Un terme en Prolog peut être une variable dont le nom commence par une majuscule et est une inconnue de notre programme. Il y a aussi les termes simples et les termes composés commençant par une minuscule. Un terme simple est un objet connu de notre programme. Un terme composé est simplement un objet structuré de notre programme.

Une relation est définie sous la forme d'un terme composé et peut être vrai ou faux.

Une clause est soit un fait qui est vrai avec ou sans condition, soit une règle. Un fait est un terme simple ou composé qui doit être clos, c'est-à-dire qu'il ne doit pas être ou contenir de variable.

Exemple : `pere(toto, paul).`

Signifie que paul est le père de toto et que réciproquement toto a comme père paul.

Une règle est un fait qui est remplacé par un ou plusieurs autres faits.

Exemple : `meme_pere(X, Y) :- pere(P, X), pere(P, Y).`

Est une règle qui remplace le fait `meme_pere` par deux autres faits qui doivent être prouvé pour que `meme_pere` soit vrai.

Nous pouvons aussi écrire un programme Prolog d'une manière plus impérative en enchainant les instructions pour avoir un fonctionnement plus procédural mais nous perdons alors la puissance de la programmation déclarative.

5.4.1.1 Domaine fini

Comme son nom l'indique, les valeurs peuvent prendre un nombre fini de valeurs. Nous travaillons donc avec des variables entières. Nous pouvons aussi travaillé avec des variables mixtes si on limite certaines valeurs à prendre l'équivalent de nombres binaires via un domaine de valeurs possible réduit à 0 ou 1.

En Prolog, il faut mettre charger le module *clpfd* en début de code. Une fois fait, il faut définir les variables du problème et le domaine de valeur.

Exemple pour charger le module puis déclarer une liste de variables leurs domaines respectifs.

```
:- use_module(library(clpfd)).
Domain_Flot = [Xsa,Xsb,Xab,Xba,Xad,Xda,Xac,Xca,Xcb,Xbc,Xce,Xec,Xde,Xed,Xdc,Xcd],
Domain_Flot ins 0..90,
Domain_Arbre_0 = [Lsa,Lsb,Lab,Lba,Lad,Lda,Lac,Lca,Lbc,Lcb,Lce,Lec,Lde,Led,Ldc,Lcd],
Domain_Arbre_0 ins 0..1,
```

Ici nous déclarons deux listes de variables. Une liste est avec des variables entières et une autre des variables utilisées comme variables binaires. Le mélange de ses deux listes permet de travailler avec des problèmes en variables mixtes.

5.4.1.2 Domaine réel ou rationnel

Une des difficultés avec ce type de valeurs c'est la taille du domaine de valeurs que peuvent prendre les variables. Via le module de SWI-Prolog qui traite ce genre de problèmes, il existe des limitations dans le cas de contraintes non linéaires décrites dans le manuel de SWI-Prolog.

Les limitations sont reprises dans le tableau 5.1. Dans ce tableau, ground signifie que la variable est fixée à une valeur.

| Forme | Conditions de validité | Exemples |
|---|--|--|
| $A = B * C$ | B or C is ground A and (B or C) are ground | $A = 5 * C$ or $A = B * 4$ $20 = 5 * C$ or $20 = B * 4$ |
| $A = B / C$ | C is ground A and B are ground | $A = B / 3$ $4 = 12 / C$ |
| $X = \min(Y,Z)$ $X = \max(Y,Z)$ $X = \text{abs}(Y)$ | Y and Z are ground Y and Z are ground Y is ground | $X = \min(4,3)$ $X = \max(4,3)$ $X = \text{abs}(-7)$ |
| $X = \text{pow}(Y,Z)$ $X = \text{exp}(Y,Z)$ $X = Y ^ Z$ | X and Y are ground X and Z are ground Y and Z are ground | $8 = 2 ^ Z$ $8 = Y ^ 3$ $X = 2 ^ 3$ |
| $X = \sin(Y)$ $X = \cos(Y)$ $X = \tan(Y)$ | X is ground Y is ground Y is ground | $1 = \sin(Y)$ $X = \sin(1.5707)$ $X = \tan(3.56)$ |

TABLE 5.1 – Prolog : limitations pour les expressions non linéaires en CLP(Q,R)

5.4.1.3 Domaine binaire

Il existe des moteurs spécialisés pour traiter des problèmes en variables binaires même s'il est possible d'utiliser un solveur de contraintes à domaine fini en donnant une intervalle $[0..1]$ à toutes les variables. Ces moteurs spécifiques à ce type de problèmes sont néanmoins plus performants.

5.4.2 Méthodes de résolution pour les domaines finis

Nous détaillerons uniquement la méthode de résolution utilisée pour la résolution de notre modèle, c'est-à-dire pour des problèmes de satisfaction de contraintes à domaines finis.

Pour résoudre les équations et affecter des valeurs aux variables Prolog utilise une méthode d'énumération et de test. L'énumération des valeurs possibles des valeurs se fait avec un arbre de recherche. Lorsque l'énumération d'une valeur de variable donne un échec, l'exploration de cette branche est stoppée car cela ne sert à rien d'aller plus loin. Le mode d'exploration des valeurs de contraintes peut être guidé par ce que l'on appelle une stratégie. Le choix de la bonne stratégie est surtout lié au type de problème à résoudre. Certaines stratégies font commencer la recherche en énumérant les variables à plus petit domaine, d'autres vont en largeur d'abord pour chercher les échecs et d'autres cherchent à prendre le premier choix et explorer en profondeur d'abord.

Ces méthodes sont similaires à un générer et tester. D'autres méthodes ont un comportement guidé par un but tel que la méthode *Branch and Bound* qui évalue une fonction objectif pour énumérer les alternatives à partir d'une sous-solution qui paraît plus optimale que les autres dans l'arbre de recherche. En règle générale, nous cherchons à élaguer l'arbre le plus tôt possible afin d'améliorer les performances.

Dans le cas de Prolog, nous appelons l'instruction *labelling* avec comme option une ou plusieurs fonctions objectif, une stratégie et la liste des variables à résoudre.

5.4.3 Multiobjectif

Le moteur de labellisation de Prolog peut prendre une ou plusieurs fonctions objectif. Si on lui en donne plusieurs, il les exécutera de gauche à droite. C'est le principe de gestion multiobjectif de type lexicographique.

Nous avons donc le choix entre une optimisation lexicographique ou une fonction agrégative permettant transformer les objectifs multiple en un seul objectif comme par exemple la somme pondérée.

La somme pondérée étant difficile à calibrer, nous utiliserons la méthode lexicographique.

5.5 Conclusion

Après un parcours de la littérature sur la gestion de la distribution d'électricité et des techniques d'optimisation appliquées à ce domaine nous avons découvert que les données nécessaires pour utiliser directement ces méthodes ne sont pas toutes connues. De plus, certaines approches ne semble pas correspondre à la façon dont la S.T.I.B. exploite son réseau. En effet, le gestionnaire ne s'occupe pas du réglage des tensions dans le réseau. Il ne possède actuellement pas toutes les caractéristiques nécessaires pour travailler avec le réseau décrit de manière matricielle tel que les matrices d'admittances nodales pour pouvoir calculer les tensions en connaissant les puissances consommées.

Nous avons donc une modélisation approximative d'un problème de distribution de puissance à tension constante.

Notre modélisation combine la définition d'un arbre couvrant orienté avec la formulation d'un problème de flot valide. Notons que l'orientation des liens représente le sens d'écoulement du courant. Cette formulation est non linéaire car qui signifie que nous devons utiliser une méthode de résolution

compatible avec ce type d'équations. Nous avons choisi un outil déjà utilisé dans notre cursus pour résoudre les variables de ce système non linéaire : SWI-Prolog et son module de programmation logique par contrainte sur des domaines finis.

Pour finir, nous avons défini une gestion multiobjectif de type lexicographique dû, entre autres, à la prise en charge native de cette méthode dans le module `clp(fd)`³.

Il faut maintenant mettre le réseau en équations et résoudre ce système. Il faudra aussi mettre une couche d'organisation logiciel pour intégrer tout ces morceaux pour le dispatcheur.

3. Pour *Constraint Logic Programming over Finite Domains*

Chapitre 6

Mise en place

Nous avons vu toute la théorie, les techniques et la modélisation sous la forme mathématique de notre problème. Nous devons maintenant mettre en place toutes les briques du système que nous avons précédemment développé une à une. Nous allons voir comment passer de notre modélisation mathématique à des équations traitables par le solveur `clp(fd)` de SWI-Prolog et comment par la suite, exploiter ces données pour offrir aux opérateurs un outil d'aide à l'exploitation et distribution électrique et de l'optimisation à la demande.

Après cela, nous regarderons comment réutiliser l'outil pour faire de la simulation pour l'étude du réseau.

Nous terminerons par des pistes pour la portabilité et la compatibilité de la représentation des réseaux électriques.

6.1 Architecture système complète

Nous allons décrire comment nous voyons le système dans sa globalité en s'affranchissant des contraintes techniques dues à la maîtrise de différents langages et technologie.

Nous avons d'un côté l'API du SCADA permettant de récupérer les informations temps réel des équipements. Nous avons aussi la possibilité de parcourir la base de données. Un élément important dans les systèmes SCADA est que les données temps réel ne se trouvent jamais stockées de manière physique par souci de rapidité. Il y a donc 2 couches d'informations : une couche temps réel en RAM et une couche de configuration stockée en base de données. Le fournisseur du SCADA donne la possibilité d'avoir une passerelle depuis la base de données vers la mémoire temps réel via l'utilisation de procédures compilées accessibles depuis le moteur SQL. C'est depuis ce moyen que nous pouvons aller chercher la topologie du réseau et les différents états pertinents pour l'optimisation comme les plaquettes, les consignations, par exemple.

La partie aide à l'exploitation est assez triviale et peut être conçue à l'aide du langage TCL/Tk disponible au niveau des serveurs et depuis lequel est disponible l'API du SCADA.

Pour la partie optimisation, nous avons besoin d'un solveur de contraintes. Nous utilisons SWI-Prolog car il est facilement disponible sur les distributions Linux hébergeant le SCADA. Lors de la demande d'optimisation, un programme générera un problème à résoudre par le solveur. La résolution sera récupérée par ce programme afin d'exploiter les données reçues et de proposer des actions ainsi que des informations à l'opérateur.

6.2 Aide à l'exploitation

La partie aide à l'exploitation est composée d'un algorithme de calcul d'écoulement de courant. Cette méthode se base sur une structure correcte du réseau et sur des informations de consommation de tous les nœuds. Nous n'avons pas encore ces informations à cause de l'important travail que cela a mis en route et au manque de gestion centralisée des compteurs. Ce manque d'informations ne nous

permet pas d'utiliser la méthode basée sur l'historique malgré sa validation pour une petite partie du réseau.

6.3 Optimisation du réseau électrique

6.3.1 Traduction du graphe en équations

Comme nous l'avons vu, nous pouvons traduire le graphe en un ensemble d'équations entre variables. Nous utilisons la programmation par contraintes, nous devons donc décrire les contraintes précédemment modélisées sur base de la topologie du réseau en un système d'équations à résoudre par labellisation.

Nous pouvons automatiser la création des équations depuis un autre langage pour lire directement la base de données et créer les variables et équations correspondant au modèle de résolution mathématique. Lors de la création de ces variables, il faudrait faire un dictionnaire pour savoir quels éléments ou données du réseau sont représentés par chaque variable afin d'exploiter les données en sortie de la résolution mathématique. Il est aussi possible de lire une base de données avec SWI-Prolog mais cela demande une meilleure maîtrise technique du langage.

Reprenons le modèle mathématique complet. Pour chaque contrainte mathématique, nous allons montrer en vis-à-vis de la modélisation comment construire les équations en tant que programme Prolog avec un exemple. Rappelons-nous que chaque lien peut être pris dans un sens ou dans l'autre. Nous devons donc avoir deux variables pour chaque élément à représenter.

6.3.1.1 Loi de conservation du flot

$$\sum_{j \in A^+} x_{ij} - \sum_{j \in A^-} l_{ij} x_{ji} = b_i, \quad i, j \in N$$

Le nœud d est un puits consommant 30 unités de flux. Ce nœud a pour voisins les nœuds a, e , et c . Nous avons pour chaque lien et dans chaque sens des variables X pour la quantité de flux. Ici, la variable binaire L représentant l'activation d'un lien n'a de sens que pour les liens entrants.

```
Xda + Xde + Xdc -(Lad * Xad)-(Led * Xed)-(Lcd*Xcd) #=- 30
```

C'est à ce moment que nous remplissons les données de consommation pour prendre en compte l'aspect temporel de la puissance nécessaires aux nœuds. Cela peut être fait avec la méthode d'estimation sur base de l'historique des trois semaines précédentes.

6.3.1.2 Contrainte sur la capacité des liens

$0 \leq x_{ij} \leq c_{ij}$ Avec un lien a vers b , nous avons donc une variable X pour le sens ab et une autre pour le sens ba . Ces deux variables doivent être entre 0 et la valeur maximale du flux pour le câble ab . De par le domaine des variables de flux, la valeur est déjà contrainte à être supérieure ou égale à 0. Ce câble a une capacité de 30. On peut simplifier la contrainte car un flot ne peut passer que dans un seul sens. Les variables X_{ab} et X_{ba} ne peuvent être différentes de zéro en même temps. Nous pouvons donc résumer les deux valeurs de flot avec une somme.

```
Xab+Xba #=<30,
```

6.3.1.3 Pas de lien vers la racine

$$\sum_{\{k\} \in V'} l_{kr} = 0$$

Pas de lien vers la racine signifie que nous ne mettrons pas de lien dans l'autre sens pour les liens partant de la racine. Ce n'est pas vraiment une contrainte à résoudre, c'est simplement une absence de lien.

6.3.1.4 Le graphe doit être connexe

$$\sum_{\{k,i\} \in V'} l_{ki} = 1 \quad \forall i \in E' \setminus r$$

Pour chaque lien connecté à un nœud, on doit avoir un seul lien entrant sauf la racine. Avec un nœud a ayant comme voisin b,c et s; nous obtenons l'équation suivante :

$$L_{sa} + L_{ba} + L_{ca} + L_{da} = 1$$

Dans les solutions retournées, nous pouvons remarquer qu'il y a des liens actifs sans quantité de flux. C'est normal car nous demandons que tous les nœuds soient connectés, même ceux de transit qui n'ont pas de consommateurs en aval. C'est justement une des exigences pour la gestion de notre réseau : les jeux de barres doivent tous être alimentés de façon à détecter une anomalie. Ce n'est pas la même chose que les mises sous tension à vide des câbles pour lesquels on ouvre seulement un des deux organes de manœuvre.

6.3.1.5 Un câble ne peut être utilisé que dans un sens maximum

$$0 \leq l_{ij} + l_{ji} \leq 1 \quad \forall i, j \in E' \setminus r$$

Pour les deux sens de chaque câble physique, nous avons une équation afin de représenter cette contrainte avec les deux variables binaires représentant l'activation du lien dans chaque sens. Nous n'avons pas ce type de contraintes pour les liaisons fictives. Soit un lien ab :

$$L_{ba} + L_{ab} = 1$$

6.3.1.6 Transformation du graphe avec la super source

Pour notre super source, il n'y a pas de liens entrant mais celle-ci doit être une source avec la somme des consommations des nœuds du réseau. Pour un réseau consommant au total 90 unités de flux et ayant deux départs (a et b) nous transformons le réseau sous la forme suivante :

$$X_{sa} + X_{sb} = 90$$

N'oublions pas que les départs a et b deviennent des nœuds de transfert. Les équations correspondantes à la loi de conservation du flot pour les départs a et b deviennent par exemple :

$$X_{ab} + X_{ac} + X_{ad} - (X_{sa} * L_{sa}) - (L_{ba} * X_{ba}) - (L_{ca} * X_{ca}) - (L_{da} * X_{da}) = 0,$$

$$X_{bc} + X_{ba} - (X_{sb} * L_{sb}) - (L_{cb} * X_{cb}) - (L_{ab} * X_{ab}) = 0$$

6.3.2 Expression des fonctions objectif

6.3.2.1 Longueur des câbles

$$\sum_{i,j \in E'} l_{ij} * x_{ij}$$

Nous avons besoin de la connaissance sur la longueur de chaque câble. Pour faciliter la lecture, nous utilisons des constantes.

```
%données sur les longueurs des liens
LGab = 100,
LGac = 200,
LGad = 100,
LGbc = 400,
LGce = 300,
LGde = 250,
LGcd = 300,
%fonction objectif pour la longueur
Somme_Long #= Lab * LGab +Lac * LGac + Lad * LGad + Lbc * LGbc
+ Lce * LGce + Lde * LGde + Lcd * LGcd
```

6.3.2.2 Somme totale des puissances en transit

$$\sum_{ij} x_{ij}$$

C'est une simple somme de variables de flux précédemment définies.

```
Somme_Flux #= Xsa+Xsb+Xab+Xba+Xad+Xda+Xac+Xca+Xcb+Xbc+Xce+Xec+Xde+Xed+Xdc+Xcd
```

6.3.2.3 Âge des câbles utilisés

$$\sum_{ij} l_{ij}.a_{ij}$$

Ce calcul est le même principe que pour la longueur des câbles utilisés mais avec une autre constante représentant la connaissance sur l'année de pose du câble.

```
%données sur les années de pose
Aab = 1992,
Aac = 2017,
Aad = 2015,
Abc = 2000,
Ace = 1998,
Ade = 2011,
Acd = 2009,
%fonction objectif pour les années
Somme_Anee #= Lab * Aab +Lac * Aac + Lad * Aad
+ Lbc * Abc + Lce * Ace + Lde * Ade + Lcd * Acd
```

6.3.2.4 Nombre de manchons

$$\sum_{ij} l_{ij}.m_{ij}$$

La somme de manchons dans les câbles utilisés suit la même règle que les longueurs et les âges.

```

%données sur les manchons
Mab = 10,
Mac = 5,
Mad = 0,
Mbc = 0,
Mce = 7,
Mde = 20,
Mcd = 3,
%fonction objectif pour les manchons
Somme_Manchons #= Lab * Mab +Lac * Mac + Lad * Mad
+ Lbc * Mbc + Lce * Mce + Lde * Mde + Lcd * Mcd

```

6.3.2.5 Nombre de manœuvres

$$\sum_{ij} | (l_{ij} + l_{ji}) - la_{ij} |$$

Nous devons donner les informations sur l'utilisation actuelle des liens sous la forme de constantes. Il existe en clp(fd) un opérateur pour les valeurs absolues appelée `abs()`.

```

%données sur la configuration actuelle
LAab = 1,
LAac = 0,
LAad = 1,
LAbc = 1,
LAce = 1,
LAde = 0,
LAcD = 0,
%calculs temporaires pour abs()
MAab = Lab + Lba - LAab,
MAac = Lac + Lca - LAac,
MAad = Lad + Lda - LAad,
MAbc = Lbc + Lcb - LAbc,
MAce = Lce + Lec - LAce,
MAde = Lde + Led - LAde,
MAcd = Lcd + Ldc - LAcD,
%fonction objectif pour les manoeuvres
Nb_Manoeuvres #= abs(MAab) + abs(MAac) + abs(MAad) + abs(MAbc)
+abs(MAce) + abs(MAde) + abs(MAcD)

```

6.3.2.6 Filtrage sur l'année de pose maximale des câbles

Nous voulons mettre l'outil à disposition du bureau d'étude pour faire des simulations. Pour cela, il faut pouvoir ne pas prendre en compte les câbles d'un certain âge. Le filtrage peut se faire lors de la génération des équations par un programme impératif ou via le passage d'arguments lors de l'appel à SWI-Prolog mais cette option est plus technique. Pour le moment, nous passons l'argument directement en Prolog lors de l'appel du fait contenant notre programme.

6.3.3 Résolution du système de contraintes

L'ensemble des contraintes écrites sous la forme d'une suite d'instructions Prolog séparées par des virgules constituent le problème à résoudre. Ces virgules signifient ET en Prolog et servent aussi à chaîner les contraintes en une liste. En effet, toutes les contraintes doivent être vérifiées et donc vraies pour avoir une solution possible.

Nous pouvons, à ce moment, appeler la fonction de labellisation. C'est elle qui se chargera de fournir une solution à notre système suivant les paramètres donnés.

Dans notre cas, nous voulons résoudre les variables de décisions. Les variables utilisées pour des calculs temporaires ou les constantes ne doivent pas être dans les inconnues du système d'équations. En résumé, toute variable présente dans une équation comportant un signe # est une inconnue du système. Étant donné que la labellisation ne s'arrête que lorsque toutes les variables passées en paramètres sont closes¹, nous pouvons mettre toutes les variables indistinctement sans générer une erreur.

Dans les arguments à fournir, il y a l'ensemble des fonctions objectif et les stratégies de recherche à utiliser. Nous nous intéresserons particulièrement aux fonctions objectif. Comme nous l'avons dit dans les chapitres précédents, la gestion des priorités entre les éléments à optimiser est nativement lexicographique en SWI-Prolog. Il faut donc faire varier l'ordre des fonctions d'optimisation pour changer les priorités. La fonction la plus à gauche sera traitée en premier et ensuite, le reste de gauche à droite.

Voici un exemple d'appel à labeling :

```
labeling([min(Somme_Liens),min(Somme_Long),min(-Somme_Anee),
min(Nb_Manoeuvres),min(Somme_Mancons),up,enum],
[Lsa,Lsb,Lab,Lba,Lad,Lda,Lac,Lca,Lbc,Lcb,Lce,Lec,Lde,Led,Ldc,Lcd,
Xsa,Xsb,Xab,Xba,Xad,Xda,Xac,Xca,Xcb,Xbc,Xce,Xec,Xde,Xed,Xdc,Xcd])
```

Notons la présence de *min(-Somme_Anee)*. La somme des années est une fonction croissante si on se dirige vers l'optimale des années de pose. En effet, plus la valeur de l'année est élevée, au moins le câble est âgé. Nous devons donc inverser la fonction en minimisant l'inverse de la somme.

6.3.4 Exploitation des résultats

L'exploitation des résultats avec un programme externe à Prolog semble exister. Il existe des bibliothèques en TCL/TK pour s'interfacer avec Prolog comme CIAO² servant à dialoguer avec un programme Prolog. Toutefois, nous n'avons malheureusement pas eu l'occasion de le tester. Une solution simple et rapidement réalisable peut être implémentée en se servant de bash sous linux pour dialoguer avec Prolog.

Une fois en possession des liens proposés comme solution optimale, nous pouvons sans problème générer un graphe représentant la solution et lister les disjoncteurs à déclencher ou à enclencher pour obtenir la configuration. Nous pouvons connaître les disjoncteurs arrachés aux liens via la base de données ainsi que leurs états. Il est évident qu'il ne sert à rien de faire une commande sur un disjoncteur bien positionné par rapport à la configuration désirée.

6.3.5 Interface pour la demande d'optimisation

Nous imaginons une interface permettant de sélectionner l'ordre de priorité des éléments à optimiser. Celle-ci sera affichée à la demande de l'utilisateur.

Notre but étant de faire de l'aide à l'exploitation, nous devons donc afficher quelques solutions possibles avec la valeur des fonctions objectif associée à chaque solution pour permettre à l'opérateur de prendre une décision.

6.4 Partie étude du réseau

Si nous pouvons utiliser les valeurs temps réel et la topologie du réseau pour faire des calculs et de l'optimisation, nous pouvons facilement utiliser d'autres valeurs et données sans devoir modifier l'outil. Une des conditions est que la structure de la base de données et les appels à l'API soient les mêmes.

1. Affecté à une valeur

2. <https://ciao-lang.org/docs/ciao/tcltk.html>

Nous pouvons aussi analyser comment se comportent les fonctions objectif au fur et à mesure des demandes de nouvelles solutions s'écartant de la solution optimale.

Nous pouvons demander toutes les solutions possibles avec les valeurs des fonctions objectif à des fins d'analyse via cette instruction sur le programme Prolog en annexe :

```
findall(B,resoudre(),A).
```

La figure 6.1 montre comment les différents objectifs varient en s'écartant de la solution optimale. Ces objectifs sont traités dans l'ordre de priorité lexicographique présenté dans la légende. Le tableau de données se trouve dans les annexes.

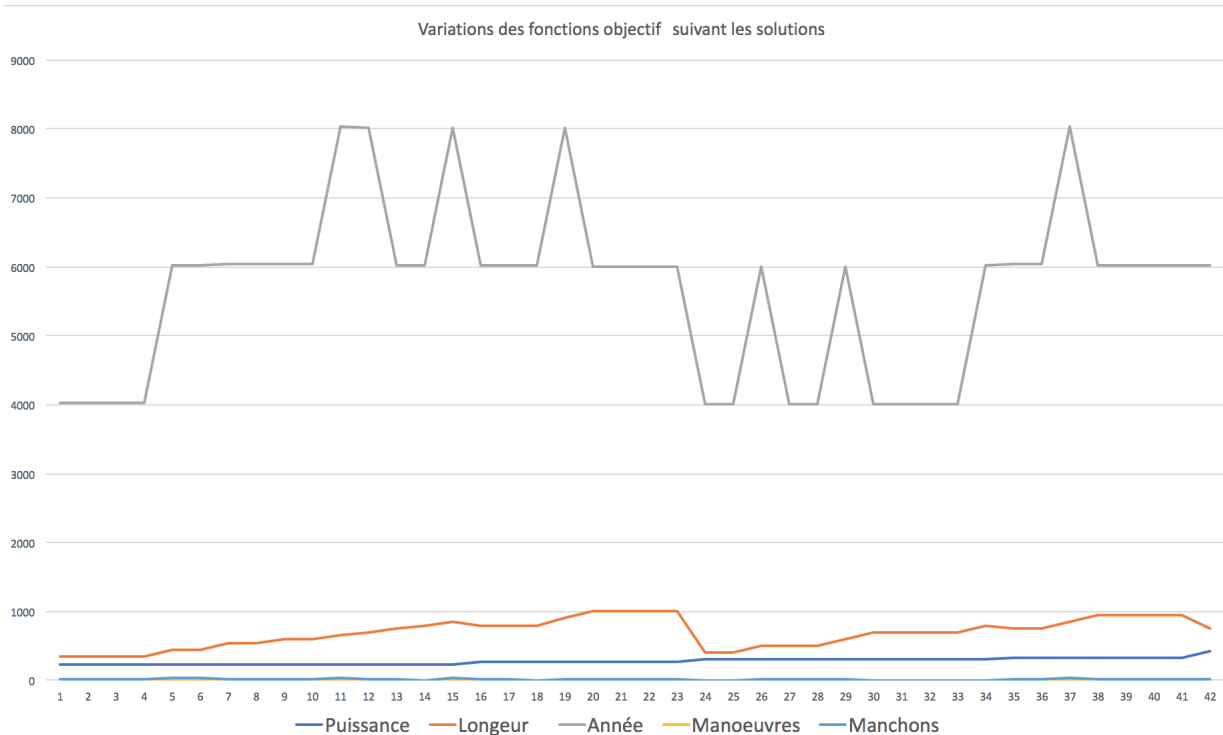


FIGURE 6.1 – Graphique de variation des fonctions objectif en s'éloignant des solutions optimales

6.5 Statut du développement et travaux futurs

Notre développement théorique est effectué et nous avons testé notre approche sur des petits réseaux. Nous devons maintenant passer au réseau réel afin de tester les résultats de l'optimisation avec le gestionnaire. Pour travailler sur le réseau de la S.T.I.B., il y aura encore un peu de travail d'implémentation de la partie génération automatique du programme Prolog et de la partie récupération de la solution en sortie. Néanmoins, toutes les bases sont fixées pour pouvoir mener à bien cette partie sans trop de difficultés. De plus, nous remarquons des irrégularités lors de l'extraction du réseau dans Gephi afin de tester la méthode. Cette partie est obligatoire pour pouvoir implémenter un module automatique de création des équations.

Nous voyons ici l'intérêt de l'utilisation de Gephi afin de visualiser les données pures de la base de données et non les données que l'on veut bien afficher dans des synoptiques. Cela permet aussi de voir les erreurs dans la topologie.

En utilisant SWI-Prolog, nous avons remarqué qu'il n'était peut-être pas le meilleur choix pour le traitement de graphes. Les récents travaux de F. Fages traitant de l'utilisation de graphe en programmation par contraintes[17] montrent qu'il est possible de directement utiliser les concepts de graphes à la place de discrétiser un graphe afin de le traiter. A cette fin, il utilise Choco, une librairie Java pour faire de la programmation par contraintes.

La problématique de l'optimisation multiobjectif a clairement été montrée. Une recherche plus approfondie sur le sujet pourrai ouvrir les portes d'une meilleure prise en considération des objectifs dans notre problématique.

6.6 Conclusion

Nous avons proposer des pistes et des fonctionnalités pour l'outil d'aide à l'exploitation afin d'afficher la santé du réseau. Malheureusement, nous n'avons pas encore assez d'informations sur la consommations de tous les points du réseau pour que ces méthodes soient exploitable.

Nous avons vu concrètement le passage d'une modélisation mathématique d'un problème à sa transposition en équations à partir de données existantes représentable sous la forme d'un graphe. Ce système d'équation non linéaire est résolvable par le module `clp(fd)` de SWI-Prolog et nous appliquons une gestion des fonctions objectifs dans l'ordre de préférence lexicographique.

Nous montrons qu'il est possible de réutiliser notre travail pour de l'étude de réseau de distribution en alimentant avec d'autres données.

Nous terminons par un statut du développement où nous sommes capable de faire des calculs sur de petit réseau mais nous n'avons pas encore les informations nécessaires pour traiter celui de la S.T.I.B.

Conclusion

Nous avons commencé par apprendre le domaine de la distribution qui est plus un domaine d'ingénierie que d'informatique. Grâce aux méthodes d'analyse et au bagage académique acquis durant ce master, nous avons étudié la problématique et modélisé celle-ci en concepts mathématiques et informatiques. Parmi les modélisations présentes dans la littérature, aucune n'était applicable directement pour notre étude. Certaines ne correspondaient pas à notre type de réseau radial, d'autres nécessitaient des informations sur le réseau et ses équipements qui ne sont pas encore connus par le gestionnaire. Il a donc été nécessaire de réaliser une approximation en fixant la tension comme une constante et nous considérerons le réseau triphasé comme étant équilibré. Les tensions dans le réseau n'étant pas actuellement modifiable. De plus, sans les matrices d'admittances décrivant le réseau électrique, il est impossible de calculer précisément les tensions sur base des puissances actives et réactives des sources génératrices d'électricité.

Nous avons donc formulé le problème sur base des formulations existantes en mélangeant des modèles de résolution de problèmes entre eux. Cette nouvelle modélisation est non linéaire. Nous l'avons formulée en français comme étant un problème de distribution de puissance dans un réseau r-arborescent.

Par après, nous avons ajouté des objectifs multiples à optimiser. Ces objectifs peuvent être conflictuels, nous avons donc utilisé une méthode de préférence lexicographique pour pouvoir gérer la priorité des objectifs à cause de la limitation du moteur de programmation par contrainte à domaines finis de SWI-Prolog. Pour cela, d'autres solveurs pouvant directement exploiter la structure du réseau sous la forme de graphe.

Nous avons effectué des tests avec notre modélisation sur de petits réseaux et donné des graphiques de variations des fonctions objectifs suivant l'optimalité de la solution au sens lexicographique. Pour finir, nous avons décrit comment utiliser notre travail pour faire des simulations sur un réseau existant ou en modifiant le réseau. Tout en voulant être général dans notre approche, nous sommes liés à la structure des bases de données décrivant les réseaux électriques. De récents travaux [20] et [13] parlent de l'utilisation des ontologies pour exploiter des données standardisées. Ce modèle de données est basé sur le CIM pour Commun Informational Model. Ce modèle a la particularité d'être général et permet une organisation formelle, structurée et portable des réseaux électriques. Une bonne pratique qu'il serait bien de garder à l'œil dans le futur.

Bibliographie

- [1] C. Artigues. LAAS-CNRS - Méthodes de décomposition pour la programmation linéaire en nombres entiers. <http://homepages.laas.fr/artigues/decomp-cours.pdf> (consulté le 27 mars 2017), 2014.
- [2] N. Berger. *Modeling and Solving Mixed Continuous/Discrete Constraint Satisfaction and Optimization Problem*. Theses, Université de Nantes, October 2010.
- [3] E.Blanco et I.Hazyuk B.Paris. Programmation linéaire pour la gestion de l'énergie électrique d'un habitat. In *IBPSA*, page C14, Moret-sur-Loing, France, November 2010.
- [4] I. Bratko. *Prolog (3rd Ed.) : Programming for Artificial Intelligence*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 2001.
- [5] A. Colmerauer. Résolution naïve de contraintes non linéaires. <http://alain.colmerauer.free.fr/alcol/ArchivesPublications/Multiplicatonnaive/bidon.pdf> (consulté le 7 mars 2017), 1992.
- [6] Société des Transports Intercommunaux de Bruxelles. Petite histoire du transport public à bruxelles. https://www.stib-mivb.be/irj/go/km/docs/STIB-MIVB/INTERNET/attachments/Petite_histoire_FR.pdf (consulté le 17 octobre 2016), 2007.
- [7] C. Dupuis. Programmation linéaire en nombres entiers : la méthode du simplexe. <http://www2.ift.ulaval.ca/~dupuis/Optimisation%20lineaire%20et%20applications/Resolution%20de%20problemes%20en%20nombres%20entiers/PLE%20Simplexe%20Acetates.pdf> (consulté le 25 juillet 2017), 2006.
- [8] D.Vanderpoorten. Aide multicritère à la décision : Optimisation multiobjectif, 2011. Journée multicritère/multiobjectif Fédération Charles Hermite Nancy, 21 septembre 2011.
- [9] F. Enacheanu. *Operating software tools for distribution network operators*. Theses, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, October 2007.
- [10] A. Bedjaoui et B. Achour. Dimensionnement des reseaux de distribution d'eau potable par la methode du modele rugueux de reference (mmr). *Courrier du Savoir*, 2014.
- [11] E.Lallet et J-L.Raffy. Techniques quantitatives de gestion, 2009.
- [12] T. Fruehwirth et J. Wielemaker et L. De Koninck et M. Triska. *SWI Prolog Reference Manual 7.2.3*. University of Amsterdam, 2015.
- [13] Risto-Matti et Keski-Keturi. Implementing the iec common information model for distribution system operators. Master's thesis, TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2011.
- [14] Y. Collette et P. Siarry. *Optimisation multiojectif*. Eyrolles, 2002.
- [15] W. Kern et P.C. Pop et G.J. Still. *The generalized minimum spanning tree problem*. Universiteit Tweeten Press, Enschede, 2002.
- [16] F. Fages. Programmation logique et contraintes. <https://pdfs.semanticscholar.org/ab1c/ad0b615f781e6f4a6c3f363d3066f78783df.pdf> (consulté le 12 décembre 2017), 2006.
- [17] J-G Fages. *On the use of graphs within constraint-programming*. Theses, Ecole des Mines de Nantes, October 2014.
- [18] J. Ferland. Cours de Techniques d'optimisation 1 , Université de Montréal. http://www-labs.iro.umontreal.ca/~ferland/ift2505/contenu_cours/7_Flot_min.pdf (consulté le 25 novembre 2017), 2015.

- [19] V. Gabrel. Sildes de modélisartion en aide á la décision, Master Informatique Deécisionnelle, LAMSADE. <http://www.poleinfo3.dauphine.fr/documents/I-01/coursModelR0.pdf> (consulté le 15 aout 2017), 2012.
- [20] Mohamed Gaha, Daniel Dubois, and Roger Nkambou. Proposition d'un traitement émotionnel pour un STI "conscient". *Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation (STICEF)*, 14 :16 pages, 2007.
- [21] Gephi. The Open Graph Viz Platform. <https://gephi.org>. Version 0.9.1 (consulté le 23 octobre 2016).
- [22] E. Gladkikh. *Optimization of architecture of power distribution networks*. Theses, Université Grenoble Alpes, June 2015.
- [23] B. Gotzig. *Recherche du Schéma Optimal d'Exploitation d'un Réseau de Distribution Electrique*. Theses, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, December 1997.
- [24] J-M Jacquet. UNAMUR - Cours de techniques d'intelligence artificielle : programmation déclarative, 2015.
- [25] R. Lambiote. UNAMUR - Théorie des graphes - notes de cours, 2014.
- [26] J-P Leclerq. F.U.N.D.P. - Cours de Recherche Opérationnelle, 2007.
- [27] A. Malapert. Optimisation Linéaire - Notes de cours, 2014.
- [28] M. Mammeri. *A multiple criteria decision aiding tool for evaluating the overall comfort on board trains*. Theses, Université Paris Dauphine - Paris IX, September 2013.
- [29] M.Rueher. Introduction à la programmation par Contraintes. <http://users.polytech.unice.fr/~rueher/Cours/intro.pdf> (consulté le 10 avril 2017), 2010.
- [30] L. Smoch. Cours de méthode d'optimisation pour la license professionnelle logistique, université du littoral, 2011.
- [31] G. Stauffer. Cours de flot et routage, Master d'Ingenierie Mathematiques, Statistique et Economique, Université de Bordeaux. https://www.math.u-bordeaux.fr/~gstauffe/cours/MSE3211A/MSE3211A_5.pdf (consuté le 25 novembre 2017), 2011.

Annexes

Annexe A

Code Prolog d'un petit exemple de réseau

```
:- use_module(library(clpfd)).

resoudre() :-
Domain_Flot = [Xsa,Xsb,Xab,Xba,Xad,Xda,Xac,Xca,Xcb,Xbc,Xce,Xec,Xde,Xed,Xdc,Xcd] ,
Domain_Flot ins 0..90,
Domain_Arbre_0 = [Lsa,Lsb,Lab,Lba,Lad,Lda,Lac,Lca,Lbc,Lcb,Lce,Lec,Lde,Led,Ldc,Lcd] ,
Domain_Arbre_0 ins 0..1,
%1 entrant pour tout les noeuds
Lsa + Lba + Lca + Lda #= 1,
Lsb + Lab + Lcb #= 1,
Lac + Lbc + Lec + Ldc #= 1,
Lad + Led + Lcd #= 1,
Lce + Lde #= 1,
% chaque lien dans un seul sens en même temps
Lba+Lab #=<1,Lad+Lda #=<1,Lac+Lca #=<1,Lbc+Lcb #=<1,Lce+Lec #=<1,Lde+Led #=<1,Lcd+Ldc #=<1,
%super source
Xsa + Xsb #= 90,
%sources A et B
Xab + Xac + Xad - (Xsa * Lsa)-( Lba * Xba)-(Lca * Xca)-(Lda * Xda) #= 0,
Xbc + Xba -(Xsb * Lsb)-(Lcb * Xcb)-(Lab * Xab) #= 0,
%transit C
Xce + Xca + Xcb +Xcd -(Lec * Xec)-(Lac * Xac)-(Lbc * Xbc)-(Ldc * Xdc) #= 0,
%puits D et E
Xda + Xde + Xdc -(Lad * Xad)-(Led * Xed)-(Lcd*Xcd) #= -30,
Xec + Xed -(Lce * Xce)-(Lde * Xde) #= -60,
%respect des limites de capacité, sur les liens super source vers source pour
%simuler la disponibilité de chaque source
Xsa #=<90,Xsb #=<90,
%des contraintes de charge sur les câbles
Xab+Xba #=<30,
%données sur les longueurs des liens
LGab = 100,
LGac = 200,
LGad = 100,
LGbc = 400,
LGce = 300,
LGde = 250,
LGcd = 300,
%données sur les années de pose
Aab = 1992,
```

```

Aac = 2017,
Aad = 2015,
Abc = 2000,
Ace = 1998,
Ade = 2011,
Acd = 2009,
%données sur les manchons
Mab = 10,
Mac = 5,
Mad = 0,
Mbc = 0,
Mce = 7,
Mde = 20,
Mcd = 3,
%données sur la configuration actuelle
LAab = 1,
LAac = 0,
LAad = 1,
LAbc = 1,
LAce = 1,
LAde = 0,
LAcd = 0,
%calculs temporaires pour abs()
MAab = Lab + Lba - LAab,
MAac = Lac + Lca - LAac,
MAad = Lad + Lda - LAad,
MAbc = Lbc + Lcb - LAbc,
MAce = Lce + Lec - LAce,
MAde = Lde + Led - LAde,
MAcd = Lcd + Ldc - LAcd,
%charges dans les liens
Somme_Liens #= Xsa+Xsb+Xab+Xba+Xad+Xda+Xac+Xca+Xcb+Xbc+Xce+Xec
+Xde+Xed+Xdc+Xcd,
Nb_Actifs #= Lsa+Lsb+Lab+Lba+Lad+Lda+Lac+Lca+Lbc+Lcb+Lce+Lec+Lde
+Led+Ldc+Lcd,
%fonction objectif pour la longueur
Somme_Long #= Lab * LGab +Lac * LGac + Lad * LGad + Lbc * LGbc + Lce * LGce
+ Lde * LGde + Lcd * LGcd,
%fonction objectif pour les années
Somme_Annee #= Lab * Aab +Lac * Aac + Lad * Aad + Lbc * Abc + Lce * Ace +
Lde * Ade + Lcd * Acd,
%fonction objectif pour les manchons
Somme_Manchons #= Lab * Mab +Lac * Mac + Lad * Mad + Lbc * Mbc
+ Lce * Mce + Lde * Mde + Lcd * Mcd,
%fonction objectif pour les manoeuvres
Nb_Manoeuvres #= abs(MAab) + abs(MAac) + abs(MAad) + abs(MAbc)
+abs(MAce) + abs(MAde) + abs(MAcd),
%Charge_Moyenne = Somme_Liens // Nb_Actifs,
%labeling([min(Somme_Liens),min(Somme_Long),up,enum],Domain_Arbre_0),
labeling([min(Somme_Liens),min(Somme_Long),min(-Somme_Annee),min(Nb_Manoeuvres),min(Somme_Manchons),
Xsa,Xsb,Xab,Xba,Xad,Xda,Xac,Xca,Xcb,Xbc,Xce,Xec,Xde,Xed,Xdc,Xcd]),
%labeling([min(Somme_Liens),up,enum],Domain_Flot),
%labeling([min,up,enum],Domain_Flot),

```

```
write(Domain_Arbre_0),write(' '),  
write(Domain_Flot),write(' '),write(Somme_Liens),write(' '),write(Somme_Long),  
write(' '),write(Somme_Annee),write(' '),write(Nb_Manoeuvres),  
write(' '),write(Somme_Manchons),nl.
```

Annexe B

Variations des objectifs en fonction des solutions moins optimales

| Puissance | Longueur | Année | Manoeuvres | Manchons |
|-----------|----------|-------|------------|----------|
| 240 | 350 | 4026 | 2 | 20 |
| 240 | 350 | 4026 | 3 | 20 |
| 240 | 350 | 4026 | 4 | 20 |
| 240 | 450 | 6018 | 2 | 30 |
| 240 | 450 | 6018 | 4 | 30 |
| 240 | 550 | 6043 | 4 | 25 |
| 240 | 550 | 6043 | 5 | 25 |
| 240 | 600 | 6030 | 2 | 12 |
| 240 | 650 | 8035 | 4 | 35 |
| 240 | 700 | 8022 | 2 | 22 |
| 240 | 750 | 6026 | 3 | 20 |
| 240 | 800 | 6013 | 1 | 7 |
| 240 | 850 | 8018 | 2 | 30 |
| 270 | 800 | 6024 | 4 | 15 |
| 270 | 800 | 6024 | 5 | 15 |
| 270 | 800 | 6013 | 3 | 7 |
| 270 | 900 | 8016 | 4 | 25 |
| 270 | 1000 | 6007 | 2 | 10 |
| 270 | 1000 | 6007 | 4 | 10 |
| 300 | 400 | 4013 | 2 | 7 |
| 300 | 400 | 4013 | 3 | 7 |
| 300 | 500 | 6005 | 2 | 17 |
| 300 | 500 | 4015 | 4 | 12 |
| 300 | 500 | 4015 | 5 | 12 |
| 300 | 600 | 6007 | 4 | 22 |
| 300 | 700 | 3998 | 2 | 7 |
| 300 | 700 | 3998 | 3 | 7 |
| 300 | 700 | 3998 | 4 | 7 |
| 300 | 800 | 6013 | 2 | 7 |
| 330 | 750 | 6037 | 6 | 28 |
| 330 | 850 | 8029 | 6 | 38 |
| 330 | 950 | 6020 | 4 | 23 |
| 330 | 950 | 6020 | 5 | 23 |
| 330 | 950 | 6020 | 6 | 23 |
| 420 | 750 | 6026 | 4 | 20 |