



**ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES MÉCANIQUES, ACOUSTIQUE,
ÉLECTRONIQUE ET ROBOTIQUE DE PARIS - SMAER**

Laboratoires de recherche : GeePs et G-SCOP

THÈSE

pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE SORBONNE UNIVERSITÉ

Présentée et soutenue par :

Anass BOUKIR

Le : 21 décembre 2023

**Outils pour l'optimisation du
dimensionnement des infrastructures
d'alimentation électrique de tramway ou de
métro**

Sous la direction de :

Mme Florence OSSART – Professeur des universités, Sorbonne Université

M Jean BIGEON- Directeur CNRS, Université de Nantes

M Vincent REINBOLD- Maître de conférences- Université Paris-Saclay

Membres du jury :

M. Philippe DESSANTE – Professeur des universités CentraleSupélec, Examineur

M. Bruno SARENI – Professeur des universités, INP-Toulouse, Examineur

Mme Dominique CHAMORET – Maître de conférences, UTBM, Rapporteuse-

M. Arnaud HUBERT – Professeur des universités UTC, Rapporteur

Mme Florence OSSART – Professeur des universités, Sorbonne Université, Directrice de
thèse

M Vincent REINBOLD- Maître de conférences- Université Paris-Saclay, Co-directeur de
thèse

M Jean BIGEON- Directeur CNRS, Université de Nantes, Invité

Paul-Louis LEVY- Ingénieur, ARTELIA , Invité

Titre : Outils pour l'optimisation du dimensionnement des infrastructures d'alimentation électrique de tramway ou de métro

Mots clés : Tramway, infrastructures électriques, dimensionnement, optimisation, algorithmes génétiques.

Résumé : L'électrification des transports collectifs urbains, tels que le tramway, constitue un enjeu environnemental majeur. Les études technico-financières pour ces projets couvrent différents aspects de l'infrastructure, tels que le terrassement, les ouvrages d'art, les plateformes de voie ferrée, les bâtiments voyageurs, la technologie électrique, etc. L'objectif de ces études est de proposer des solutions techniques tout en évaluant les coûts, tant en termes d'investissement que de fonctionnement.

L'infrastructure de traction électrique est un élément primordial dans cette équation, présentant un coût significatif. Elle doit répondre aux besoins de transport tout en respectant des objectifs financiers et environnementaux. Le dimensionnement de cette infrastructure vise à garantir la disponibilité de la ligne tout en optimisant les coûts. La disponibilité caractérise la capacité de la ligne à fournir la puissance demandée par les trains

Les études techniques pour concevoir un système d'alimentation électrique impliquent le choix et le dimensionnement des composants qui permettent de transporter l'énergie du réseau public au matériel roulant, à savoir les sous-stations de traction, la ligne aérienne de contact, l'alimentation par le sol et les éléments de liaison. Ces choix s'appuient sur des études en simulation, exigeant des modèles et des outils précis pour éviter la surdimensionnement des infrastructures en raison d'incertitudes sur les résultats de la simulation. Par ailleurs, il faut faire des compromis entre les coûts d'investissement et de fonctionnement d'une part, et la capacité de l'infrastructure à faire face aux aléas de trafic d'autre part.

L'objectif de la thèse est de développer une démarche d'optimisation multi-objectifs pour améliorer le dimensionnement des infrastructures électriques, en suivant deux axes de travail : i/ développement d'un simulateur électrique ferroviaire ayant une précision et une vitesse d'exécution compatibles avec une utilisation dans une boucle d'optimisation, ii/ développement d'une méthode d'optimisation du dimensionnement prenant en compte des objectifs concurrents.

Le mémoire est structuré en six chapitres. Après un premier chapitre d'introduction générale, le deuxième chapitre détaille la problématique du dimensionnement des infrastructures électriques ferroviaires et fait un état de l'art sur le sujet. Le troisième chapitre porte sur le simulateur ferroviaire développé dans le cadre de la thèse. Les principes généraux, les modèles et les méthodes de résolution sont exposés, ainsi que le post-traitement des résultats de simulation. Le quatrième chapitre concerne la démarche d'optimisation d'infrastructure proposée. Il détaille la transformation du problème métier en un problème d'optimisation bi-objectifs, ainsi que le choix d'une résolution par algorithme génétique NSGA2. Les choix de mise en œuvre de cette méthode sont ensuite présentés. Dans le cinquième chapitre, la démarche d'optimisation proposée est appliquée à deux cas d'étude. Le premier est un cas d'école dont les résultats sont intuitifs. Cela permet de tester la démarche et d'affiner le choix des opérateurs de croisement et de mutation. Le deuxième cas d'étude correspond à un projet de ligne plus complexe, dérivé d'une véritable étude industrielle. Les résultats obtenus par optimisation sont meilleurs que ceux de la recherche par essais-erreurs faite en bureau d'étude. En particulier, l'optimiseur est capable de proposer un ensemble de solutions réalisant différents compromis entre coût et fiabilité, fournissant à l'ingénieur des critères d'aide à la décision objectifs.

Pour donner une vue d'ensemble, l'objectif ultime est de créer un outil capable d'optimiser le dimensionnement des infrastructures électriques du tramway en respectant le cahier des charges technique.

Sommaire

1.	Introduction générale	7
1.1.	CONTEXTE DU DIMENSIONNEMENT DES INFRASTRUCTURES ELECTRIQUES DE TRANSPORT FERROVIAIRE URBAIN	8
1.2.	DEMARCHE ACTUELLE ET LIMITES	9
1.3.	OBJECTIFS ET PROPOSITIONS DE LA THESE	10
2.	Problématique du dimensionnement des infrastructures électriques ferroviaires	13
2.1.	PRESENTATION DES EQUIPEMENTS D'UNE LIGNE DE TRAMWAY OU DE METRO	13
2.1.1.	LES SOUS-STATIONS DE REDRESSEMENT	14
2.1.2.	MATERIEL ROULANT	14
2.1.3.	LIGNE AERIENNE DE CONTACT	14
2.1.4.	FEEDERS	15
2.1.5.	EQUIPOTENTIELLES	15
2.1.6.	ALIMENTATION PAR LE SOL	15
2.1.7.	LE RAIL	15
2.1.8.	STOCKAGE A BORD	16
2.2.	OBJECTIFS D'UNE ETUDE DE DIMENSIONNEMENT D'INFRASTRUCTURES ELECTRIQUES	17
2.2.1.	NORMES FERROVIAIRES	17
2.2.2.	SCENARIOS DE SIMULATION	18
2.2.3.	CONTRAINTES SPECIFIQUES A CHAQUE PROJET	18
2.2.4.	COUTS FINANCIERS	18
2.2.5.	PRINCIPE DE L'ETUDE DE DIMENSIONNEMENT	18
2.3.	SIMULATION ELECTRIQUE FERROVIAIRE	18
2.3.1.	GENERALITES	19
2.3.2.	PRINCIPES DE LA SIMULATION FERROVIAIRE	19
2.3.3.	METHODE DE RESOLUTION DES EQUATIONS DE CIRCUIT	21
2.3.4.	SIMULATEURS COMMERCIAUX	22
2.3.5.	SIMULATEURS INTERNES	22
2.3.6.	CONCLUSION	23
2.4.	ETAT DE L'ART SUR LA CONCEPTION ET LE DIMENSIONNEMENT DES INFRASTRUCTURES FIXES DE TRACTION FERROVIAIRE URBAINE	23
2.4.1.	CONTEXTE	23
2.4.2.	RENFORCEMENT D'INFRASTRUCTURES EXISTANTES	24
2.4.3.	CONCEPTION DE NOUVELLES INFRASTRUCTURES	25
2.5.	CONCLUSION	27
3.	Modélisation et simulation électrique d'une ligne de tramway	29
3.1.	INTRODUCTION	29

3.2. DESCRIPTION GENERALE DU SIMULATEUR	29
3.3. MODELISATION DES COMPOSANTS ELECTRIQUES DE LA LIGNE	31
3.3.1. MODELISATION DES SOUS-STATIONS	31
3.3.2. MODELISATION DES CABLES ELECTRIQUES	33
3.3.3. MODELISATION DES RAMES	34
3.4. MODELISATION DE LA LIGNE PAR UN CIRCUIT ELECTRIQUE	37
3.5. RESOLUTION PAR LA METHODE NODALE	38
3.6. GESTION DU DEPLACEMENT DES TRAINS	39
3.6.1. DECOUPAGE DE LIGNE EVOLUTIF	39
3.6.2. DECOUPAGE DE LA LIGNE FIXE ET NŒUDS FIXES	40
3.6.3. DECOUPAGE DE LA LIGNE FIXE ET DES NŒUDS MOBILES	40
3.6.4. CHOIX DE LA METHODOLOGIE DE DECOUPAGE DE LIGNE	41
3.7. IMPLEMENTATION NUMERIQUE DU SIMULATEUR	41
3.8. RESULTATS DE SIMULATION ET POST-TRAITEMENT	42
3.8.1. GRANDEURS DE SORTIE DU SIMULATEUR	42
3.8.2. VALIDATION DE L'OUTIL DE SIMULATION	44
3.9. CONCLUSION	45
 4. Optimisation de l'infrastructure électrique d'une ligne de tramway ou de métro	 47
4.1. INTRODUCTION	47
4.1.1. DEMARCHE ACTUELLE	47
4.1.2. DEMARCHE PROPOSEE	48
4.2. FORMULATION DU PROBLEME METIER	49
4.2.1. VARIABLES DE DECISION	49
4.2.2. CONTRAINTES DU PROBLEME	50
4.2.3. FONCTIONS-OBJECTIFS	51
4.3. METHODES D'OPTIMISATION	53
4.3.1. DEFINITION D'UN PROBLEME D'OPTIMISATION MONO-OBJECTIF	53
4.3.2. OPTIMISATION MULTI-OBJECTIFS ET OPTIMALITE AU SENS DE PARETO	53
4.3.3. DIFFERENTES APPROCHES POUR L'OPTIMISATION MULTI-OBJECTIFS	55
4.3.4. LES ALGORITHMES GENETIQUES	58
4.3.5. ALGORITHME NSGA-II	60
4.4. MISE EN ŒUVRE DE L'ALGORITHME NSGA-II	61
4.4.1. PRINCIPES	61
4.4.2. IMPLEMENTATION DE L'ALGORITHME POUR NOTRE PROBLEME D'OPTIMISATION	62
4.4.3. CODAGE DU CHROMOSOME DES INDIVIDUS	62
4.4.4. FONCTION OBJECTIF	63
4.4.5. CLASSIFICATION SUIVANT LES CRITERES DE PERFORMANCE	63
4.4.6. OPERATEURS DE CROISEMENT ET DE MUTATION	64
4.4.7. HYPERPARAMETRES DE L'ALGORITHME	65
4.4.8. INITIALISATION DE LA POPULATION INITIALE	66

5.	Application de la nouvelle démarche d'optimisation	67
5.1.	INTRODUCTION	67
5.2.	RESULTATS DE L'OPTIMISATION POUR UNE LIGNE SIMPLE	67
5.2.1.	DESCRIPTION DE LA LIGNE	67
5.2.2.	RESULTATS ATTENDUS PAR LA DEMARCHE DE DIMENSIONNEMENT CLASSIQUE	70
5.2.3.	FORMULATION DU PROBLEME	70
5.2.4.	DONNEES ECONOMIQUES POUR CALCULER LE COUT D'INVESTISSEMENT	71
5.2.5.	DETAILS DES MECANISMES DE CROISEMENT/MUTATION UTILISEES	71
5.2.6.	DETERMINATION DES HYPERPARAMETRES	74
5.2.7.	PRESENTATION DES RESULTATS D'OPTIMISATION	75
5.2.8.	CONCLUSION	80
5.3.	RESULTATS D'OPTIMISATION POUR LA LIGNE REELLE	80
5.3.1.	DESCRIPTION DU CAS D'ETUDE	80
5.3.2.	RESULTATS DE LA DEMARCHE D'OPTIMISATION CLASSIQUE	83
5.3.3.	FORMULATION DU PROBLEME	85
5.3.4.	PRESENTATION DES RESULTATS D'OPTIMISATION	86
5.3.5.	CONCLUSION	90
6.	Conclusion et perspectives	93
6.1.	CONCLUSION :	93
6.2.	PERSPECTIVES :	94

1. Introduction générale

L'optimisation des coûts d'investissement et d'exploitation est un des grands enjeux de tous les types d'industrie. Elle s'applique tout particulièrement au domaine des transports où le vecteur économique a un rôle important à jouer.

En France, à partir des années 1980, après une période dorée pour l'industrie automobile mais aussi une absence de politique claire en matière d'aménagement urbain, le développement et l'électrification des transports collectifs urbains redeviennent un enjeu d'actualité : métro, tramway ou trolley bus répondent à différents compromis entre coûts, capacité de transport et réduction d'émissions de CO₂ et de polluants ...

Selon la SNCF [1], les émissions de gaz à effet de serre par passager des différents modes de transport en ile de France sont les suivantes :

- tramway : 3,4 g CO₂ eq / km,
- métro : 3,8 g CO₂ eq / km,
- réseau Transilien/RER : 6,2 g CO₂ eq / km,
- bus : 104 g CO₂ eq / km,
- voiture : 134 g CO₂ eq / km.

Le nombre de nouvelles lignes de tramways et de métro construites ces dernières années montre l'intérêt que les villes et municipalités françaises portent au développement des transports en commun pour réduire les rejets de gaz à effet de serre. Le Tableau 1 présente un bilan des réseaux de tramway les plus importants en France et témoigne du développement de ce mode de transport.

Nom du réseau de tramway	Mise en service	Longueur des lignes	Nombre de voyageurs
Réseau de tramway de la région Île-de-France	1992	156,16 km	900 000 par jour [2]
Réseau de tramway de la métropole de Lyon	2001	83,8 km	300 000 par jour [3]
Réseau de tramway de la métropole de Strasbourg	1994	49,7 km	325 000 par jour [4]
Réseau de tramway de la métropole de Bordeaux	2003	77,3 km	282 000 par jour [5]
Réseau de tramway de la métropole de Nantes	1985	41,3 km	285 150 par jour [6]

Tableau 1: Tableau récapitulatif des réseaux de tramway les plus importants en France

Face à cet intérêt grandissant, les entreprises chargées du pilotage des projets de développement de transport cherchent à améliorer leurs savoir-faire afin de réduire les coûts des différentes phases de vie d'une ligne de tramway et de métro :

- durant les phases de conception et de construction, à travers les études de conception de la ligne et les travaux qui en découlent,
- durant la phase d'exploitation, à travers les techniques de gestion quotidienne de trafic, de maintenance et de réparation de l'infrastructure et du matériel roulant,

- après la fin de vie de la ligne, à travers les processus de renouvellement des infrastructures et du matériel roulant.

Lors de la phase de conception d'un projet de ligne de tramway ou de métro, il est nécessaire de réaliser des études technico-financières des différents types d'ouvrage constituant l'infrastructure de transport : terrassement, ouvrages d'art (ponts, tunnels), plateforme de la voie ferrée et des stations, bâtiments voyageurs, locaux techniques, infrastructure électrique, etc. Ces études permettent notamment de proposer des solutions techniques et d'en évaluer les coûts d'investissement mais aussi de fonctionnement.

Les différents choix de conception d'un réseau de transport urbain ne sont pas uniquement des choix techniques mais ils sont souvent aussi influencés par de nombreux facteurs d'ordre politique, historique, économique et géographique. Dans tous les cas de figure, la fiabilité et la disponibilité du réseau de transport collectif est un élément primordial et nécessite la vérification et la maîtrise du bon fonctionnement du système à chaque instant.

Parmi tous les types d'ouvrages mentionnés ci-dessus, l'infrastructure électrique représente un coût significatif et donc un enjeu de conception important : cette infrastructure doit être en adéquation avec les besoins de transport et ce pour des coûts financiers et environnementaux acceptables. Pour cela, un effort de recherche et de développement est bienvenu afin de trouver les meilleurs choix de conception.

L'objectif de cette thèse est de répondre à ce besoin et de développer des outils pour améliorer l'efficacité des études de dimensionnement des infrastructures électriques de tramway/métro. Cela passera par le développement d'un simulateur dédié efficace et la création d'une nouvelle démarche de dimensionnement fondée sur des méthodes d'optimisation. Cette démarche sera illustrée et testée sur un cas d'école simple, puis sur un cas d'étude dérivé d'un cas industriel.

1.1. Contexte du dimensionnement des infrastructures électriques de transport ferroviaire urbain

Un réseau d'alimentation électrique ferroviaire est la connexion physique entre le réseau public et les charges que sont les trains ou les rames (terme préféré pour les métros et tramways). Les principes de fonctionnement sont similaires à ceux de tous les réseaux de distribution d'électricité, mais avec quelques caractéristiques propres : i) les trains sont des charges mobiles ; ii) les trains consomment de l'énergie en phase d'accélération, mais peuvent en produire en phase de freinage ; iii) les variations de tension admissibles aux bornes des charges sont plus grandes que dans les réseaux publics. Les réseaux électriques ferroviaires sont dimensionnés afin de permettre aux systèmes de fonctionner en régime nominal comme en régime dégradé. Les études de conception incluent donc les redondances matérielles nécessaires pour faire face à un certain nombre de défaillances du matériel.

Le but d'une étude de dimensionnement d'infrastructure électrique est de répondre au mieux aux principaux enjeux technico-économiques du projet de tramway.

- Fiabilité du système d'alimentation électrique de la ligne : La ligne de tramway ou de métro est conçue pour assurer une mission de transport public. L'infrastructure électrique doit donc être dimensionnée pour assurer l'alimentation électrique d'une flotte de véhicules, pour un trafic donné, dans toutes les situations prévues par le cahier des charges : trafic nominal, mais aussi trafic exceptionnel ou panne de matériel. La fiabilité exprime la capacité du système d'alimentation électrique à fournir la puissance demandée par les trains nécessaire à leur déplacement.
- Coûts d'investissement de l'infrastructure : La phase de dimensionnement électrique sert de préalable à l'évaluation du coût d'un projet de tramway.

L'objectif du dimensionnement est alors de garantir une forte fiabilité de la ligne à coût minimal.

Les études techniques de conception du système d'alimentation électrique portent sur le choix et le positionnement des différents organes électriques qui permettent la transformation et le transport de l'énergie depuis le réseau public vers le matériel roulant :

- sous-stations de traction, parfois également appelées sous-stations de redressement ou encore poste de redressement, positionnées entre le réseau public haute tension et le réseau électrique ferroviaire ;
- ligne aérienne de contact ;
- ligne d'alimentation par le sol si ce choix technique a été retenu ;
- autres éléments de liaisons (feeders, équipotentiels).

Ces différents équipements seront décrits par la suite, dans le chapitre 2.

Les choix techniques de conception s'appuient sur des simulations numériques. Il importe donc de disposer de modèles et d'outils de simulation précis, afin d'éviter que des doutes sur la précision des résultats de simulation se traduisent par des facteurs de sécurité excessifs et un surdimensionnement des infrastructures proposées.

1.2. Démarche actuelle et limites

Dans sa forme actuelle, le procédé de dimensionnement des infrastructures électriques suit une démarche par essais-erreurs (*try and cut* en anglais). Le cahier des charges définit le tracé de la ligne et le trafic à alimenter (flux de rames) ainsi qu'un certain nombre de contraintes techniques telles que l'espace foncier disponible pour installer les infrastructures (sous-stations par exemple) ou les points de raccordement au réseau accessibles.

Sur la base de son expérience, l'ingénieur en charge du dimensionnement propose une première configuration électrique de ligne (emplacement de sous-stations électriques, feeders et équipotentiels) et la teste en simulation pour tous les scénarios de trafic à considérer. Différentes grandeurs électriques sont calculées (tension aux bornes des rames, courant débité par les sous-stations, ...) puis l'ingénieur vérifie si les exigences normatives ferroviaires sont respectées. Dans le cas contraire, il ajuste la configuration itérativement jusqu'à obtenir satisfaction. La difficulté est d'assurer le respect des normes dans toutes les situations de trafic étudiées avec un coût d'infrastructures le plus petit possible.

Cette démarche manque d'efficacité et son déroulement repose entièrement sur le savoir-faire de l'ingénieur. En effet, le problème comporte un grand nombre de variables à fixer. Le nombre de configurations à simuler est donc potentiellement très élevé, et tous les scénarios de trafic prévus par le cahier des charges doivent être testés. Face à cette complexité, l'ingénieur limite de fait le nombre de configurations étudiées et se satisfait de la première configuration obtenue qui respecte le cahier des charges. Cela conduit généralement à des infrastructures électriques surdimensionnées.

Dans ce contexte, un simulateur électrique ferroviaire de haute qualité est un outil crucial pour prendre des décisions "éclairées". Il doit permettre de modéliser et de simuler des topologies de lignes simples (Figure 1) ou multi-lignes (Figure 2), de prendre en compte les différents scénarios de trafic prévus par le cahier des charges, d'évaluer les performances du système électrique dans des conditions normales ou dégradées (perturbations du trafic ou défaillance de matériel), de prédire les effets de changements de configuration et d'adapter les choix de matériel électrique. Un bon simulateur est indispensable pour assurer une conception sûre et fiable de la ligne électrique, ainsi qu'une utilisation optimale des ressources électriques.



Figure 1 : Exemple de ligne simple T3a

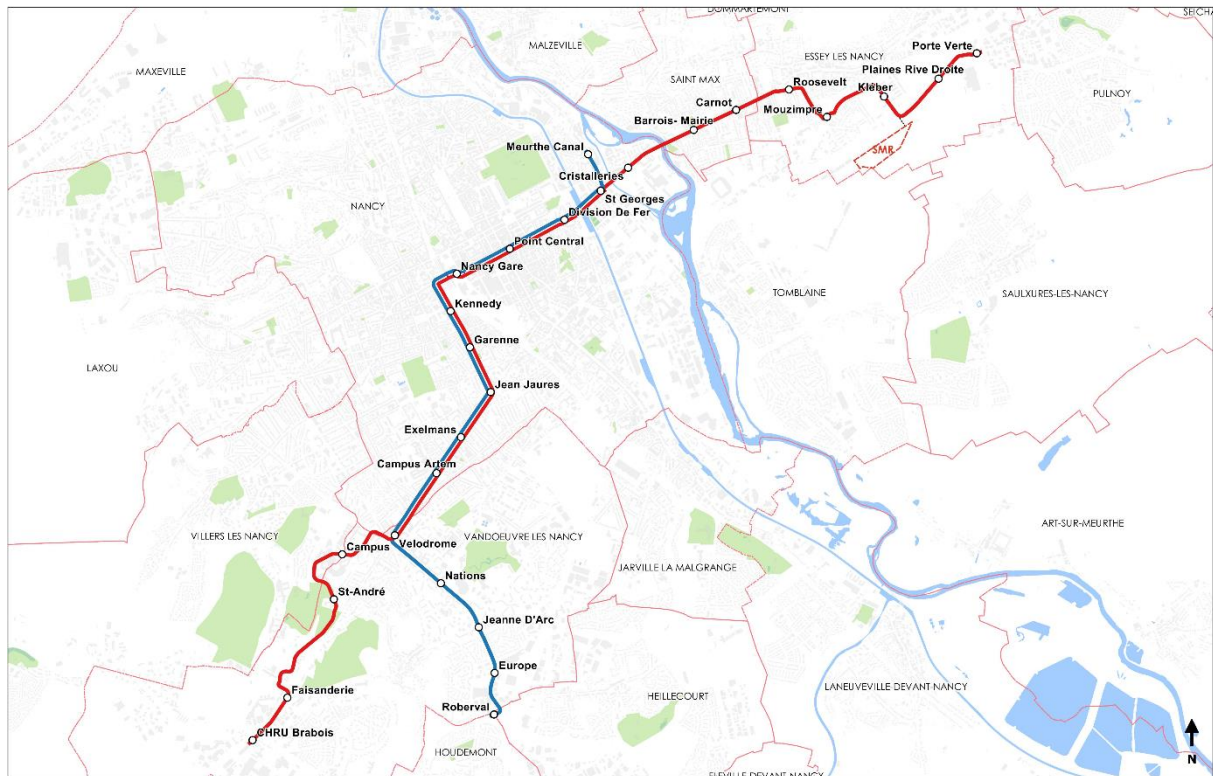


Figure 2 : Exemple de configuration multi-lignes (projet de Nancy)

La mise en œuvre d’une démarche de conception optimale accroît la nécessité de disposer d’un simulateur performant. En effet, l’optimisation vise à trouver la “meilleure” solution, c’est-à-dire celle réalisant le meilleur compromis entre coût et performance, tout en respectant les contraintes du cahier des charges et les limites physiques de l’infrastructure en cours de conception. Cela implique d’analyser un grand nombre de configurations possibles, ce qui sera d’autant plus productif que le simulateur électrique utilisé est rapide. Une infrastructure d’alimentation électrique optimisée est une infrastructure qui fonctionne à la limite de ses capacités. Il est donc très important que le simulateur soit fondé sur des modèles valides dans ces domaines de fonctionnement afin de garantir la fiabilité des résultats issus de l’optimisation.

1.3. Objectifs et propositions de la thèse

Dans ce contexte, le but de la thèse est de développer des outils pour améliorer la phase de dimensionnement des infrastructures électriques en s’appuyant sur des techniques d’optimisation. Ce projet comporte deux axes de travail.

- Le simulateur : Comme nous l’avons évoqué, le simulateur est un élément clé de la conception et du dimensionnement des infrastructures électriques. Il doit mettre en œuvre des modèles adaptés au problème traité (voir chapitre 3), être ouvert pour pouvoir être utilisé au sein d’un outil d’optimisation, être évolutif pour permettre l’intégration ultérieure de nouveaux composants ou de nouveaux modèles de composants. Il doit réaliser un bon compromis entre temps de calcul et précision des résultats. La première étape de la thèse a été de développer un tel simulateur, fondé sur la programmation objet et l’utilisation de bibliothèques et de techniques de développement de calcul de l’état de l’art.
- L’optimiseur : Il s’agit d’un nouvel outil intégrant le simulateur pour rechercher des configurations électriques optimales par rapport à différents critères et contraintes (Figure 3). Les critères les plus souvent utilisés sont le coût d’investissement et la fiabilité de l’infrastructure, mais il est envisageable de prendre en compte d’autres critères comme les coûts de fonctionnement ou des coûts environnementaux. Les contraintes sont relatives au respect du cahier des charges et au respect des normes, pour des scénarios de trafic normaux ou dégradés.

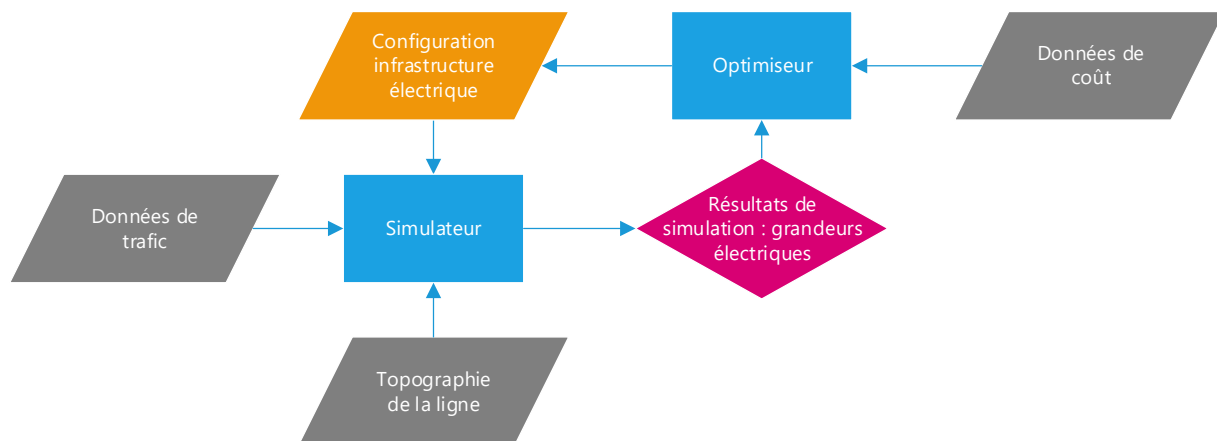


Figure 3 : Organisation de la nouvelle approche de dimensionnement

Le nouvel outil de dimensionnement doit automatiser la recherche de solutions techniques et fournir des éléments objectifs en support à la prise de décision des ingénieurs. L'optimalité de l'infrastructure est ainsi approchée, évitant des surdimensionnements et réduisant les coûts des projets.

La suite du mémoire est organisée comme suit :

Le deuxième chapitre détaille la problématique du dimensionnement des infrastructures électrique. Il décrit les infrastructures électriques ferroviaires puis présente les principes de modélisation et de simulation couramment utilisés ainsi que les logiciels existants. Il s'intéresse ensuite aux méthodes de conception des infrastructures d'alimentation des lignes de tramway et métro et fait une étude bibliographique sur ce sujet.

Le troisième chapitre porte sur l'outil de simulation développé dans le cadre de la thèse. On présentera la modélisation de la ligne métro/tramway, la mise en équation, la résolution et le post-traitement traitement des résultats de simulation.

Le quatrième chapitre concerne la démarche d'optimisation d'infrastructure développée dans le cadre de la thèse. Le passage du problème métier à la formulation mathématique d'un problème d'optimisation bi objectifs sera détaillé. Nous justifierons ensuite le choix d'une résolution par algorithme génétique NSGA2 ainsi que les choix de mise en œuvre de cette méthode.

Le cinquième chapitre présente la mise en œuvre et la validation de la démarche d'optimisation proposée. Nous commencerons par un cas d'école simple dont les résultats sont intuitifs et faciles à vérifier. Cela nous permettra en particulier de tester différentes techniques de croisement et de mutation utilisées dans NSGA2 et de choisir la plus performante. Nous traiterons ensuite un cas d'étude issu d'une véritable étude industrielle et comparerons les résultats obtenus par optimisation à ceux obtenus par une démarche de conception par essais-erreurs. Cet exemple montrera l'apport de la nouvelle démarche de dimensionnement par rapport à l'ancienne démarche.

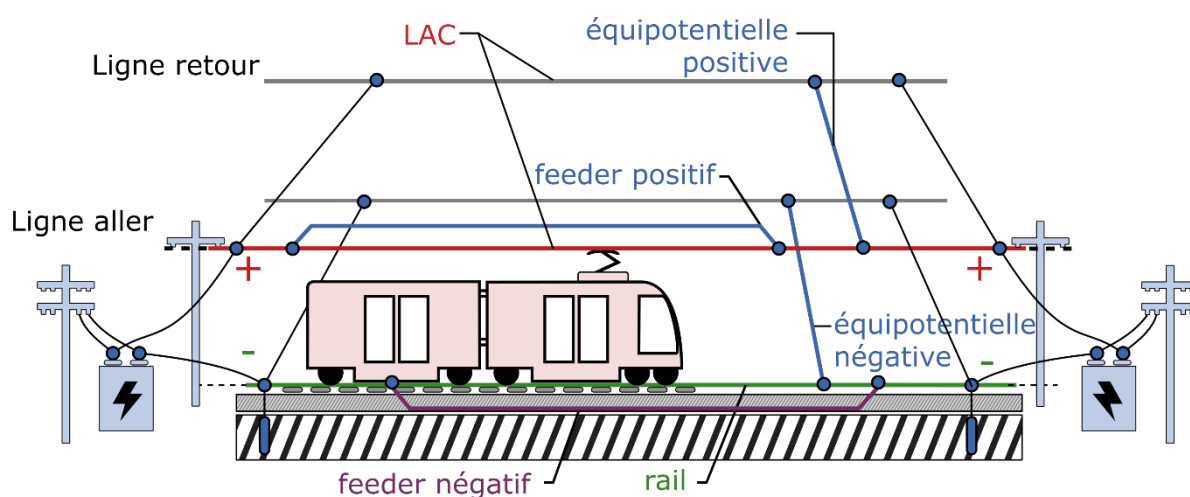
2. Problématique du dimensionnement des infrastructures électriques ferroviaires

Le but de ce chapitre est de détailler la problématique du dimensionnement des infrastructures électrique. Nous commençons par présenter les différents équipements d'une ligne de tramway ou de métro. Nous rappellerons ensuite ce en quoi consiste une étude de dimensionnement des infrastructures et nous expliciterons les contraintes qu'une installation doit satisfaire pour répondre à un cahier des charges donné. Les études de dimensionnement s'appuyant sur des modèles et des outils de simulation, nous donnerons les principes de la simulation ferroviaire, mais sans entrer dans les détails car le chapitre 3 y sera consacré. Nous ferons ensuite un état de l'art sur les démarches de dimensionnement des infrastructures ferroviaires que l'on peut trouver dans la littérature scientifique.

2.1. Présentation des équipements d'une ligne de tramway ou de métro

La Figure 4 montre le schéma de principe du système d'alimentation électrique d'une ligne de tramway ou de métro. Il s'agit de réseaux de distribution en tension continue, avec des tensions nominales égales à 600 V DC (tramway) ou 1500 V DC (métro). L'énergie est transportée depuis le réseau public moyenne tension 20 kV AC vers le matériel roulant via les principaux éléments suivants.

- Les sous-stations de redressement abaissent et redressent la tension HTA 20 kV AC du réseau public. Les sous-stations constituent des sources d'énergie réparties le long de la ligne.
- Les rames de tramway (matériel roulant) sont des charges en mouvement le long de la ligne, susceptibles de se comporter en source d'énergie lors des phases de freinage.
- Les conducteurs de courant positifs amènent l'énergie électrique depuis les sous-stations jusqu'aux matériels roulants. Ils sont constitués de la ligne aérienne de contact (LAC), d'éventuels *feeders* positifs en parallèle avec la LAC et de liaisons équipotentielle positives entre conducteurs positifs. Dans certains systèmes, tout ou partie de la LAC est remplacée par un 3ème rail pour une alimentation par le sol.
- Les conducteurs de courant négatifs referment le circuit. Ils sont constitués des rails, des *feeders* négatifs et de liaisons équipotentielle négatives.



● connexion électrique

Figure 4: Représentation schématique d'une ligne de tramway ou de métro

Les tramways et les métros sont des systèmes très proches qui, du point de vue du besoin en alimentation électrique, diffèrent essentiellement par le flux de voyageurs transportés et par le trafic : les rames de métro comportent plus de voitures que les rames de tramways et sont donc plus lourdes. Par ailleurs, elles circulent avec une plus grande fréquence, à vitesse plus élevée, avec des accélérations et décélérations également plus élevées que pour les tramways. De ce fait, les puissances en jeu sont plus élevées pour les métros que pour les tramways. Enfin, les exigences de fiabilité sont plus élevées pour les métros que pour les tramways, ce qui se traduit par une plus grande redondance de matériel.

Ces différences étant posées, nous parlerons dans la suite de cette section des équipements d'un réseau d'alimentation de tramway, étant entendu que ces équipements sont similaires pour l'alimentation d'un métro. Nous signalerons les spécificités du métro quand cela sera nécessaire.

2.1.1. Les sous-stations de redressement

Les sous-stations de redressement (SSR) sont le point d'entrée de l'énergie sur le réseau d'alimentation du tramway. Elles incluent les dispositifs de protection et de conversion de l'électricité.

Le bon fonctionnement d'un système de tramway ne se limite pas à l'alimentation du matériel roulant mais nécessite aussi l'alimentation d'autres bâtiments et équipements liées à l'exploitation et au confort voyageur. Pour répondre à ces besoins, les sous-stations de redressement installées le long de la ligne délivrent l'énergie électrique sous les différents niveaux de tension adaptés aux systèmes alimentés.

- 750 V DC pour le réseau de distribution qui alimente le matériel roulant (LAC, rames, rails). D'autres niveaux de tension existent (600 V, 1500 V), mais le 750 V est le plus courant.
- 400/230 V AC pour les parties relatives à l'exploitation (stations voyageurs, locaux pour la signalisation, centre de maintenance, ...). Certaines fonctionnalités primordiales, dont la signalisation ferroviaire, sont alimentées par un circuit secouru afin de garantir la continuité d'alimentation.
- 48V ou 24 V DC secouru pour alimenter le contrôle commande de chaque sous-station.

Ces différents niveaux de tensions sont produits par les SSR à partir du réseau 20 kV AC. Il existe deux grandes familles de SSR : la SSR en T est généralement utilisée en bout de ligne alors que la SSR en Π (pi) est généralement utilisée en ligne pour permettre la réalisation de sectionnement électrique. Les schémas électriques de ces deux types de SSR sont disponibles en annexe 1.

La puissance d'une sous-station classique est comprise entre 0.8 MW et 5 MW. Elle est connectée au réseau 20 kV AC par un transformateur abaisseur de tension. Si la sous-station dispose d'un seul transformateur avec une seule arrivée Enedis, la sous-station est dite mono-groupe. Si la sous-station dispose de deux transformateurs avec deux arrivées Enedis, la sous-station est dite bi-groupes. Ces sous-stations génèrent une pollution harmonique importante, d'autant plus difficile à maîtriser qu'elle est basse fréquence. Les normes imposent la mise en place de filtres afin de maintenir cette pollution sous un certain seuil. Des éléments passifs volumineux sont alors utilisés pour former des filtres passe bas, tout en assurant la compensation du réactif consommé par la sous-station.

2.1.2. Matériel roulant

Le matériel roulant est constitué des rames de tramway automotrices, qui cumulent les fonctions de traction, de freinage et de transport des passagers. Les machines électriques, alimentées par la LAC ou par un éventuel stockage embarqué, sont couplées aux essieux via un réducteur. Outre la traction et le freinage, l'engin alimente des charges auxiliaires nécessaires au confort des passagers (climatisation, chauffage et éclairage).

2.1.3. Ligne aérienne de contact

La ligne aérienne de contact (LAC) est le support physique de connexion entre la borne positive de la sous-station et le matériel roulant. Elle assure deux fonctions essentielles : d'abord électrique, puisqu'elle permet le

passage du courant puis mécanique en assurant un bon contact avec le pantographe quels que soient les mouvements du véhicule.

La LAC en cuivre est obtenue par tréfilage à froid et comprend deux rainures pour la prise des griffes de suspension. Sa section circulaire peut aller de 100 à 150 mm² selon le type d'électrification.

2.1.4. Feeders

Les feeders sont des câbles en cuivre placés en parallèle avec la ligne aérienne de contact (feeders positifs) ou avec les rails (feeders négatifs) le long de certaines portions de ligne. Cela permet de réduire la résistance de ligne de ces portions et donc d'y limiter le courant et la chute de tension entre les sous-stations et les trains. Les feeders sont utilisés pour renforcer des portions de ligne sans rajouter de nouvelle sous-station.

2.1.5. Equipotentiellles

Les équipotentiellles sont des liaisons transversales entre deux voies parallèles (aller et retour, par exemple). Les équipotentiellles positives sont placées entre les lignes aériennes de contact, alors que les équipotentiellles négatives sont placées entre les rails des deux voies parallèles (Figure 4). De même que les feeders, les équipotentiellles permettent de réduire la résistance globale du circuit d'alimentation des tramways et de limiter les chutes de tension le long de la ligne. Le coût est moindre, mais cette technique n'est pas applicable pour des lignes dont les voies aller et retour sont éloignées.

2.1.6. Alimentation par le sol

L'objectif de l'alimentation par le sol (APS) est de supprimer la ligne aérienne, encombrante et inesthétique, et parfois difficile à implanter sur certaines sections de ligne de tramway très étroite ou très encombrées (en centre-ville par exemple).

2.1.7. Le rail

Le rail est un profilé qui supporte la charge du tramway par contact avec la roue et permet son roulement et son guidage (Figure 5). L'acier utilisé doit résister aux sévères contraintes de fatigue, à la corrosion et à l'abrasion.



Figure 5: Les types de rail [7]

Les rails assurent la fonction de retour du courant et sont également couramment utilisés pour transmettre les signaux de communication [7]. Les rails reposent sur une plateforme dédiée, pavée et engazonnée pour les véhicules urbains.

Les rails ne sont pas parfaitement isolés du sol, de sorte qu'une partie du retour de courant se fait par le sol, constituant ce qu'on appelle des courants vagabonds (

Figure 6). Le niveau de ces courants peut atteindre 20% du courant de traction. Il dépend des paramètres électriques du sol sous les rails, mal connus et susceptibles d'évoluer dans le temps (qualité des traverses, du ballast et des conditions atmosphériques). Les courants parasites circulent de façon non maîtrisée dans les

matériaux conducteurs présents près du rail (terre, canalisation en métal, acier du béton armé des bâtiments, etc.) et peuvent provoquer de graves dégâts par corrosion. C'est pourquoi il est recommandé de les réduire en isolant au mieux les rails du sol.

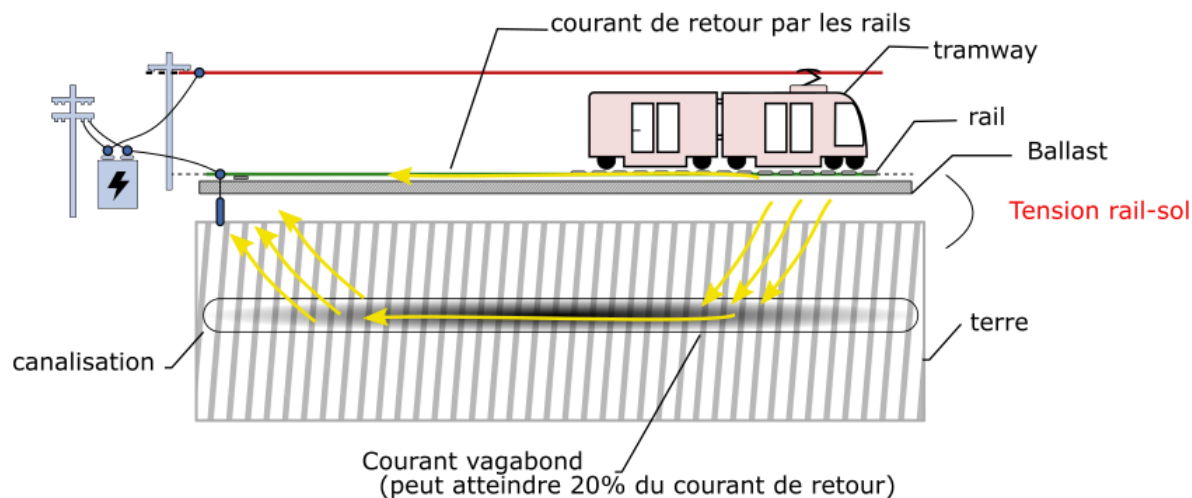


Figure 6: Cheminement des courants vagabonds

D'un autre côté, augmenter l'isolation rail/sol conduit de fait à augmenter la différence de potentiel entre rail et sol. Cette différence de potentiel peut devenir importante lors des phases de traction, quand le courant de qui circule dans les rails est grand. Les rails de tramway étant sur la voie publique et donc facilement accessibles, il en résulte un danger réel de choc électrique. Pour cette raison, la norme impose que la tension rail-sol doit toujours être inférieure à 120 V. Le respect de cette norme fait partie des contraintes de dimensionnement électrique à prendre en compte lors de la phase de conception. Dans le cadre de la simulation d'une ligne de tramway ou de métro, on fait l'hypothèse conservatrice que les rails sont parfaitement isolés et on vérifie que même sous cette condition la limite des tensions rail/sol est respectée. Ces limites seront abordées dans le paragraphe 3.8.1.4.

2.1.8. Stockage à bord

Pour des raisons généralement d'ordre esthétique, plusieurs collectivités et villes ont choisi d'utiliser les technologies de stockage et recharge d'énergie embarquée à bord des rames. Ce type de technologie permet d'éviter l'installation de la LAC tout au long de la ligne. Les batteries sont rechargées dans des points de recharges dédiés (rames à l'arrêt, en station de voyageurs, en terminus ou au dépôt) ou sur des zones équipées de LAC (rames en circulation).

L'utilisation du stockage peut se faire suivant les deux principes suivants.

- Des batteries de grande capacité à recharge lente : La capacité de la batterie est suffisante pour alimenter le tramway pendant un trajet complet. La recharge se fait alors aux terminus de la ligne ou au dépôt. L'avantage de cette technique est qu'elle permet d'avoir moins d'infrastructure puisque les zones de recharge sont uniquement concentrées dans les terminus et les dépôts. L'inconvénient est que pour de longs trajets, le poids des batteries génère une consommation supplémentaire d'énergie.
- Des batteries de petite capacité et à recharge rapide : La recharge s'effectue à chaque arrêt du tramway en station voyageur (recharge par opportunité). Il faut donc prévoir l'infrastructure de recharge à chaque arrêt potentiel du tramway. Cela engendre un surcout d'investissement par rapport à la solution de la recharge lente mais n'engendre pas de surconsommation.

Il est possible de faire un mix entre les deux types de recharge en fonction des contraintes de chaque projet et des choix des clients. L'objectif serait alors de bien choisir le pourcentage d'utilisation des batteries à recharge longue et le pourcentage d'utilisation des batteries à recharge rapide en fonction des temps d'arrêt des rames, de la facilité d'installer des points de recharge et du coût énergétique supplémentaire lié à l'ajout de batteries, ce qui permet d'optimiser le coût et la disponibilité de la ligne.

Dans certaines lignes de tramway, l'utilisation des batteries se limite à une utilisation sur de courtes portions de ligne, en centre-ville par exemple. On peut alors faire une recharge lente des batteries par la LAC au cours du trajet.

2.2. Objectifs d'une étude de dimensionnement d'infrastructures électriques

Les études techniques pour concevoir un système d'alimentation électrique ferroviaire portent sur le choix et le positionnement des composants de ce système le long de la ligne ferroviaire. Dans le cas le plus courant d'une alimentation uniquement par ligne aérienne de contact (pas d'alimentation par le sol), il faut choisir et positionner un certain nombre de sous-stations de redressement, de feeders et d'équipotentiels de façon à garantir que les demandes de puissance des trains sont satisfaites à tout instant, dans le respect des normes ferroviaires sur les tensions et les courants, pour tous les scénarios de trafic prévus par le cahier des charges, et ce au moindre coût d'investissement et de fonctionnement.

2.2.1. Normes ferroviaires

Les solutions techniques proposées doivent assurer le respect des trois normes ferroviaires suivantes :

- La norme EN 50163 définit la plage de tension autorisée aux bornes des rames de tramway/métro.
- La norme EN 50329 définit les limites des courants débités des sous-stations.
- La norme EN 50122-1 définit la valeur maximale de la tension rail-sol tolérée.

2.2.1.1. Critère de tension des rames

La norme EN 50163 « Applications ferroviaires - Tensions d'alimentation des réseaux de traction » stipule que pour un réseau de traction en courant continu de tension nominale de 750 V (1500 V pour le métro), la tension aux bornes des rames doit toujours être comprise entre 500 V et 950 V (1000 V et 1900 V pour le métro).

2.2.1.2. Critère de charge des SST

Les SST sont caractérisés par une intensité nominale I_n et des possibilités de surcharges temporaires. Ces surcharges sont cadrées par la norme EN 50329 pour une classe de service VI. Les contraintes portent sur des valeurs moyennées sur une durée plus ou moins longue.

Pour un poste de redressement :

- $I < I_n$ en régime permanent,
- $I_{rms\ 2h} < 1,5 I_n$,
- $I_{rms\ 1min} < 3 I_n$.

Par exemple, la puissance prévue pour les sous-stations de redressement est de 900 KW en régime nominal, cette puissance peut être dépassée d'un facteur 1,5 pendant 2h et d'un facteur 3 pendant 1 minute, afin de répondre à un appel de courant ponctuel, par exemple lorsque plusieurs rames démarrent simultanément.

2.2.1.3. Critère de tension rail/sol

La norme EN 50122-1 stipule que la tension rail/sol doit être toujours être comprise entre -120 V et 120 V. Ce critère porte sur les valeurs instantanées de la tension.

2.2.2. Scénarios de simulation

Les scénarios de simulation sont définis dans le cahier des charges pour prendre en compte différents contextes d'exploitation. Le trafic nominal est modélisé en utilisant une marche type et une grille horaire nominal. Néanmoins, il est important de noter que des événements exceptionnels génèrent un trafic particulier lors de grands événements.

L'étude de dimensionnement considère également les modes dégradés, qui représentent des scénarios de panne d'au moins une sous-station. En général, si la ligne de tramway ou de métro comporte n sous-stations, l'étude inclura un mode nominal et n modes dégradés, chaque mode dégradé correspondant à une sous-station hors service. La définition des modes dégradés peut varier en fonction du projet et du niveau de disponibilité souhaité par le client.

2.2.3. Contraintes spécifiques à chaque projet

Chaque projet de dimensionnement des infrastructures d'alimentation électrique ferroviaire peut comporter des contraintes spécifiques liées aux caractéristiques du site. Parmi ces contraintes figure la disponibilité du foncier pour l'implantation des sous-stations. Les emplacements des points de connexions au réseau public ainsi que les caractéristiques géographiques et urbaines du site peuvent influencer l'emplacement des sous-stations et doivent être prises en compte lors de la conception.

2.2.4. Coûts financiers

L'étude de dimensionnement inclut l'évaluation des coûts financiers associés au projet. Cela comprend les coûts d'investissement initiaux, nécessaires pour la mise en place des infrastructures électriques, ainsi que les coûts de fonctionnement, liés à l'exploitation du système. L'objectif est de déterminer une solution économiquement viable tout en garantissant la satisfaction des besoins en énergie.

2.2.5. Principe de l'étude de dimensionnement

Le principe de l'étude de dimensionnement repose sur plusieurs étapes clés. Tout d'abord, elle consiste à tester en simulation différentes solutions techniques proposées par l'ingénieur, c'est-à-dire des configurations d'équipements positionnés le long de la ligne. Ensuite, il est essentiel de vérifier que ces solutions respectent les normes ferroviaires pour tous les scénarios envisagés dans le cahier de charge. Cette étape permet de définir les solutions jugées acceptables électriquement. Enfin, l'objectif est de rechercher la solution acceptable la moins coûteuse, en minimisant les coûts d'investissement et de fonctionnement.

Si des méthodes d'optimisation multicritères adaptées sont disponibles, il est possible de prendre en compte d'autres critères que le coût financier dans le processus de dimensionnement. Cela permet de trouver des solutions qui répondent à plusieurs objectifs, tels que l'efficacité énergétique, la fiabilité, ou d'autres critères spécifiques au projet.

2.3. Simulation électrique ferroviaire

Dans le cadre d'une démarche de dimensionnement des infrastructures d'alimentation électrique ferroviaire, les outils de simulations sont au cœur de la prise de décision. Ils doivent donc être suffisamment rapides pour permettre de tester un grand nombre de configurations dans la durée impartie aux études de dimensionnement. Ils doivent également être assez précis pour que la solution obtenue en simulation soit représentative de la réalité. A défaut, l'ingénieur en charge de la conception appliquera un facteur de sécurité susceptible de conduire à des solutions techniques surdimensionnées.

Dans cette section, nous exposons les principes généraux de la simulation électrique ferroviaire sans rentrer dans les détails. Ces principes seront repris de manière plus approfondie dans le chapitre 3.

2.3.1. Généralités

L'évolution des technologies et la grande durée de vie des systèmes ferroviaires a conduit à la coexistence de différents systèmes d'alimentation, notamment en courant continu (DC) ou en courant alternatif (AC). Chaque système présente ses propres caractéristiques (fréquence, niveau de tension). L'électrification des trains a commencé en DC (1500 V DC en France) car les moteurs en courant continu se prêtent à une régulation simple de la vitesse. Les progrès de l'électronique de puissance ont permis de passer aux systèmes AC (50 Hz en France et Europe du sud ou 16,7 Hz en Allemagne et en Europe du Nord) et de monter en tension pour de meilleurs rendements. C'est ainsi que les TGV sont alimentés en 2x25 kV AC. De nos jours, les métros et les tramways restent alimentés en DC alors que les trains conventionnels sont alimentés en DC ou AC en fonction de leur date de construction. On note une évolution vers un standard de 50 Hz en Europe.

Quel que soit le système d'alimentation, les réseaux électriques ferroviaires fonctionnent suivant les mêmes principes que les réseaux de distribution conventionnels, mais avec trois particularités importantes.

- La première est que, comme nous l'avons déjà mentionné, les trains sont des charges mobiles. Les caractéristiques géométriques et la topologie du circuit évoluent au cours du temps. Les appels de puissance des trains sont liés à leur dynamique (fort appel au démarrage, faible appel à vitesse stabilisée, renvoi d'énergie vers le réseau en phase de freinage). Il faut donc gérer le couplage entre la cinématique des trains et le réseau électrique ferroviaire.
- Une autre particularité est que les variations de tension acceptables aux bornes des charges sont beaucoup plus importantes que dans les réseaux conventionnels : la norme accepte des tensions comprises entre -30% et +20% de la tension nominale des sous-stations, au lieu de $\pm 5\%$ dans les réseaux conventionnels. Le réseau est opéré plus près de ses limites physiques et dans une zone de fonctionnement non linéaire. Les appels de puissance des trains doivent être régulés si besoin pour rester dans ces limites (ralentissement du train pour consommer moins de puissance si la tension approche de la limite basse, freinage rhéostatique pour renvoyer moins d'énergie sur le réseau si la tension approche de la limite haute).
- Notons enfin que dans le cas des réseaux ferroviaires DC, les sous-stations de redressement sont généralement unidirectionnelles. De ce fait, même si les principes des méthodes de simulation des réseaux électriques ferroviaires sont identiques à ceux utilisés pour les réseaux de distribution conventionnels, des adaptations spécifiques sont nécessaires pour prendre en compte les caractéristiques particulières des réseaux électriques ferroviaires.

2.3.2. Principes de la simulation ferroviaire

Un réseau électrique ferroviaire est un système complexe, avec de nombreux composants en interaction, dont certains ont des comportements non linéaires. La simulation de ces systèmes repose sur des modèles à constantes localisées : le principe fondamental de la dynamique pour déterminer le mouvement des trains et les équations de circuit pour déterminer les grandeurs électriques. Les principes fondamentaux de la modélisation et de la simulation ferroviaire sont bien établis depuis au moins quarante ans [8], mais les progrès de l'analyse numérique et de l'informatique permettent aujourd'hui de les mettre en œuvre à l'échelle de systèmes de plus en plus étendus (réseau ferroviaire régional ou national, réseau de tramway) en évitant les hypothèses trop simplificatrices et avec des calculs plus rapides.

Les charges du réseau sont les trains. Ceux-ci se déplacent suivant des consignes de vitesse préétablies en fonction de la grille de circulation (accélération, maintien de vitesse, freinage). En phase de conception, on ne s'intéresse pas aux régimes transitoires électriques, dont les constantes de temps sont très petites par rapport aux échelles de temps des déplacements des trains. On étudie le système en régime quasi-statique électrique : la simulation consiste à échantillonner le temps, appliquer le principe fondamental de la dynamique entre deux pas de temps pour déterminer les grandeurs mécaniques, puis résoudre les équations de circuit en statique pour déterminer les grandeurs électriques.

L'algorithme suivant détaille ce principe, également schématisé sur le synoptique de la Figure 7 [9].

A chaque pas de temps :

- Connaissant le profil de la voie (courbes, pentes), la consigne de vitesse ainsi que les données mécaniques du train (masse et résistance à l'avancement), calculer la position et l'accélération des trains, puis appliquer le principe fondamental de la dynamique pour déterminer la force de traction nécessaire à l'avancement du train ainsi que la puissance appelée.
- Connaissant la position des trains et la puissance appelée, résoudre les équations de circuit en statique pour déterminer les potentiels électriques, puis les courants et les puissances électriques dans les différents composants du réseau et ce à chaque pas de temps choisi.

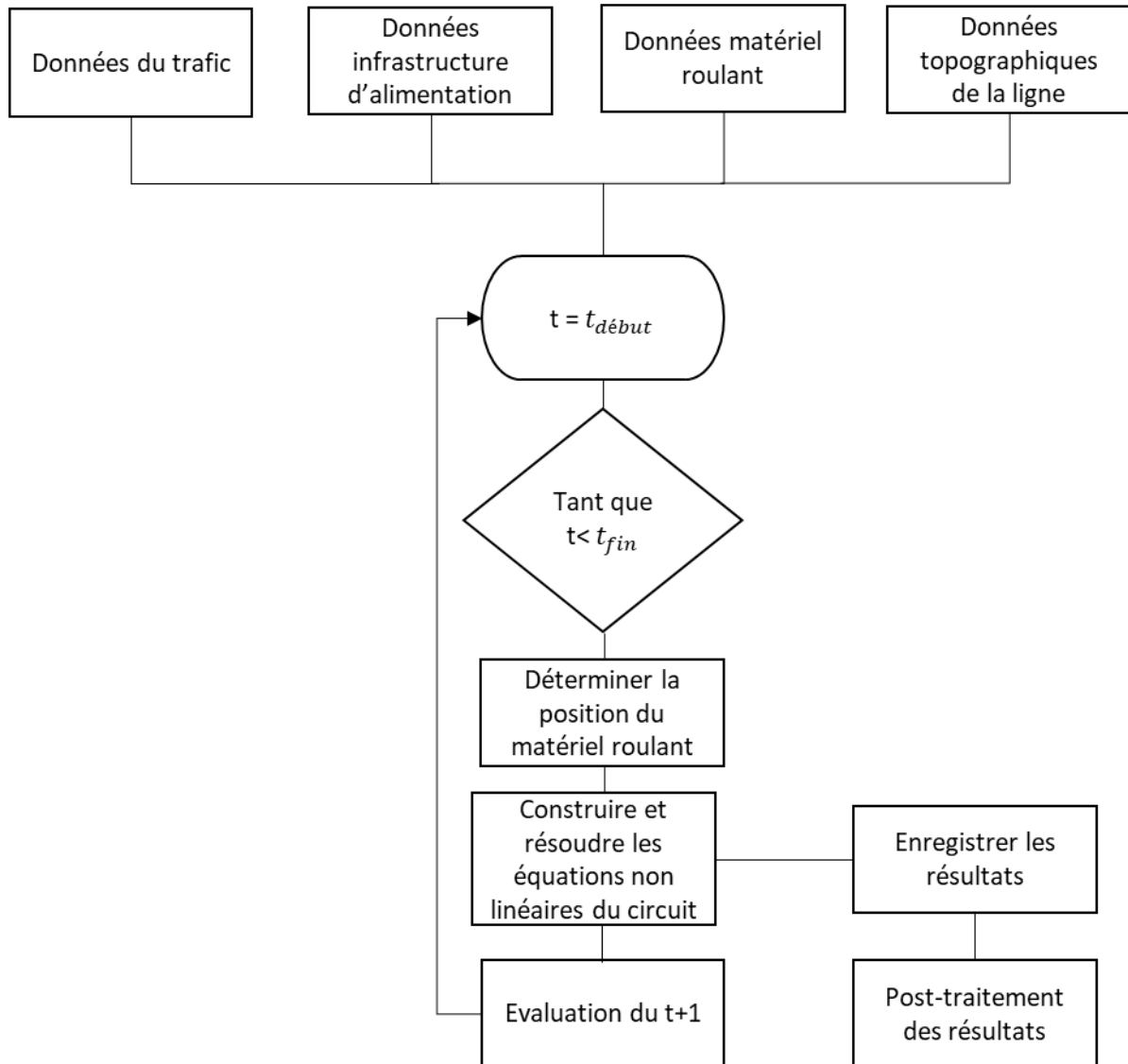


Figure 7 : Schéma synoptique d'un simulateur ferroviaire type

En général, la puissance électrique appelée par le train pour avancer peut être fournie par le réseau et le train peut avancer comme prévu : l'état électrique du circuit n'influence pas la solution du calcul mécanique. Toutefois, il se peut qu'à certains instants la puissance appelée par les trains pour faire le déplacement prévu soit supérieure à ce que le réseau peut physiquement fournir. C'est le cas si le réseau est sous-dimensionné par rapport au trafic prévu. A ces instants, les équations électriques n'admettent pas de solution et la simulation ne peut pas continuer. Les simulateurs les plus performants gèrent ces situations sans arrêter le

calcul, mais en diminuant la vitesse des trains de façon à rester dans les limites de la puissance que le réseau peut effectivement fournir. Cet ajustement est conforme au fonctionnement réel du système, avec une régulation de la puissance fournie aux trains si leur tension d'alimentation descend en dessous du seuil imposé par les normes ferroviaires.

2.3.3. Méthode de résolution des équations de circuit

Nous allons maintenant donner quelques éléments sur les techniques de résolution des équations du réseau électrique à un instant donné. Ces principes seront repris en détail dans le chapitre 3. Dans un article de revue des modèles de simulation de systèmes ferroviaires DC [8], les auteurs distinguent l'approche par flux de puissance (*load flow*) et l'approche matricielle directe. Ces deux approches ont en commun de partir de la formulation nodale des équations de circuit, de la forme $Y.V = I$, où Y est la matrice d'admittance du réseau, V est le vecteur des potentiels aux nœuds et I est le vecteur des courants injectés [10]. Les trains sont des charges dont la puissance P_{train} est une donnée d'entrée. De manière classique dans la formulation nodale, les trains sont modélisés par des sources de courant I_{train} dont l'intensité est telle que $P_{train} = I_{train} \cdot \Delta V_{train}$, ΔV_{train} étant la différence de potentiel aux bornes du train [11]. On aboutit alors à un système d'équations non linéaires de la forme $Y.V = I(V)$. Dans l'approche dite « *load flow* » [12][8][13], la solution exacte du système est obtenue par une technique itérative de type méthode de Gauss-Seidel ou méthode de Newton [14]–[16]. Dans l'approche dite « matricielle directe », une approximation linéaire de la relation $I(V)$ est construite pour une résolution directe du système [17]. Cette deuxième approche est a priori plus rapide mais moins précise.

Au vu des différents éléments cités, les points les plus importants à traiter dans le cadre d'un simulateur ferroviaire sont les suivants.

- Gestion d'un réseau évolutif dans le temps : Les trains sont des nœuds du circuit électrique. La topologie du réseau et les admittances de branche sont donc directement impactées par le déplacement des trains, ce qui affecte également la matrice d'admittance. Il est donc nécessaire de reconstruire cette matrice à chaque pas de temps. Certains auteurs ont proposé des astuces pour éviter cela : reconstruction partielle, c'est-à-dire des zones qui ont évolué entre 2 pas de temps, [18] ou topologie fixe avec des nœuds fictifs mobiles [19]. Le gain de temps permis par ces astuces est très dépendant de la finesse de maillage et de la complexité du réseau à simuler. En l'absence d'analyse comparative sur des cas d'étude similaires, il n'est pas possible de conclure sur les mérites respectifs des approches proposées.
- Conditionnement de la matrice d'admittance : Au cours du déplacement des trains, des nœuds voisins peuvent être très proches. La valeur d'admittance de la branche correspondant devient alors très petite et dégrade le conditionnement de la matrice d'admittance globale. Ces situations sont très ponctuelles et peuvent être facilement corrigées si on y fait attention.
- Non-linéarité du système : Cette non-linéarité est due aux charges en puissance, mais provient également des sous-stations irréversibles et de l'activation du freinage rhéostatique pour limiter la tension de la LAC lors de certaines phases de freinage. Ces points seront détaillés dans le chapitre 3, qui présente le simulateur développé dans le cadre de cette thèse.
- Gestion des pas de temps où il n'existe pas de solution électrique : La résolution des équations non linéaires est faite par une méthode itérative (Newton ou Gauss-Seidel). En l'absence de solution physique, la résolution ne converge pas. Le point délicat est de savoir distinguer le cas de calculs qui ne convergent pas parce qu'il n'existe pas de solution de celui de calculs qui convergent difficilement du fait de fortes non linéarités (typiquement dans le cas de sous-stations irréversibles).

Tous les simulateurs électriques ferroviaires sont construits autour de ces principes généraux. Ils se différencient les uns des autres par la modélisation des composants et par la gestion du déplacement des trains.

- Modélisation des composants : Les simulateurs peuvent proposer des modèles de composants plus ou moins détaillés. Par exemple, certains simulateurs peuvent inclure des modèles pour les sous-stations de traction réversibles ou non, les systèmes de stockage d'énergie, les convertisseurs de courant, etc.

- Gestion du déplacement des trains : Les simulateurs peuvent adopter différentes approches pour gérer le déplacement des trains. Certains reconstruisent entièrement le circuit électrique à chaque pas de temps alors que d'autres utilisent des astuces ou des approximations pour ne reconstruire qu'une partie du circuit. Un point important est la prise en compte ou non de la régulation de la puissance fournie aux trains en fonction du niveau de la tension d'alimentation (ralentissement du train si la tension atteint la limite basse). Ces questions seront développées dans le chapitre 3.

2.3.4. Simulateurs commerciaux

Différents simulateurs commerciaux existent. A l'origine, chacun a d'abord été développé pour un système d'électrification spécifique (DC, AC 50 Hz, AC 16,7 Hz), correspondant au système en usage dans le pays d'origine du simulateur. Par la suite, les simulateurs ont été modernisés et sont devenus plus polyvalents. Voici quelques exemples de simulateurs développés dans différents pays.

- Sitras Sidytrac [20], développé par Siemens en Allemagne.
- TrainOps [21], développé par LTK engineering aux Etats-Unis.
- Fabel [22], développé par ENOTRAC en Suisse.
- TracFeed [23], développé par Balfour Beatty Rail au Royaume-Uni.
- TPSS [24] développé et utilisé en Suède pour simuler le trafic des trains et son influence sur le système d'alimentation.
- OpenPowerNet [25] développé par l'Institut für Bahntechnik GmbH, BO Dresden. Les simulations opérationnels sont réalisés via OpenTrack [26].

2.3.5. Simulateurs internes

Pour des raisons principalement concurrentielles, d'adaptabilité des logiciels commerciaux et de l'envie des ingénieries de développer une expertise interne, certaines ingénieries ferroviaires préfèrent utiliser des simulateurs plus spécialisés, développés en interne pour un domaine d'application ciblé, avec des fonctionnalités adaptées et maîtrisées.

Parmi les simulateurs internes utilisés par les ingénieries françaises, on peut citer Simalim [27], un outil conçu et utilisé par Egis Rail. On peut également citer Railsim-x [28] développé par la filiale canadienne de Systra, le logiciel Symphonie [29] développé par SETEC, le logiciel Marcadet développé par la RATP et enfin la suite Esmeralda NG, développée par la SNCF. Les entreprises communiquent peu sur les fonctionnalités de leur simulateur interne et il est difficile de se rendre compte de leur domaine d'application et de leurs performances.

On peut noter l'approche originale de B. Desjouis, proposée dans le cadre de l'évolution de la suite logicielle Esmeralda de la SNCF [9] [18]. Comme nous l'avons déjà dit, il existe différents systèmes d'alimentation électrique dans le ferroviaire (DC versus AC, 50 Hz versus 16,7 Hz, 1x25 kV 50 Hz versus 2x25 kV 50Hz, ...). Les principes de simulation sont identiques mais leur mise en œuvre diffère, rendant difficile la conception d'un simulateur adapté à tous ces systèmes. L'ambition des travaux de B. Desjouis était de répondre à cette problématique. Pour cela, il a proposé un méta-modèle, c'est-à-dire un modèle général de simulateur paramétrable et il s'est appuyé sur la programmation orientée agent pour développer un outil capable de générer automatiquement un simulateur dédié à un type de système électrique donné. Il ne s'agit plus de développer un simulateur avec un code en dur, mais de développer un modèle de simulateur qui générera le code du simulateur dédié à un système particulier. Cette méthode de développement offre la possibilité d'avoir un simulateur évolutif et permet de rajouter facilement de nouveaux éléments. Ce type d'approche peut être très intéressant pour suivre l'évolution des infrastructures et rallonger la durée de vie du simulateur. Néanmoins on peut citer comme inconvénients que l'approche repose sur des concepts informatiques très abstraits et qu'il est nécessaire de parfaitement comprendre l'architecture logicielle pour être en mesure de générer un nouveau simulateur.

2.3.6. Conclusion

Les simulateurs commerciaux offrent une gamme de fonctionnalités complètes, mais ils ne permettent généralement pas d'adapter les modèles comme cela est possible avec un simulateur interne. La capacité de contrôler les données d'entrée et de sortie, ainsi que la possibilité d'adapter le modèle en cas de besoin, ne sont réalisables qu'avec un simulateur interne, car l'ingénieur a la maîtrise du code du simulateur. Cela peut inclure l'intégration de contraintes spécifiques et la recherche de solutions optimales dans des délais prédéterminés.

Les simulateurs mentionnés jusqu'à présent sont des logiciels commerciaux ou des solutions propriétaires développées en interne par quelques bureaux d'études. Cela signifie qu'ils sont performants, mais que le code n'est pas accessible. Les algorithmes utilisés ne sont pas connus, pas modifiables et il est donc impossible de les adapter pour des opérations d'optimisation de dimensionnement.

Dans une perspective d'optimisation, il sera donc difficile d'utiliser un simulateur dont le développement n'est pas maîtrisé. Par conséquent, nous utiliserons les travaux cités précédemment comme base pour créer notre propre simulateur interne, afin de maîtriser pleinement le cœur de notre système d'optimisation. Le simulateur développé sera présenté dans le chapitre 3.

2.4. Etat de l'art sur la conception et le dimensionnement des infrastructures fixes de traction ferroviaire urbaine

2.4.1. Contexte

La conception et le dimensionnement des infrastructures électrique de traction ferroviaire consistent à choisir et définir les caractéristiques et le nombre des différents équipements de l'infrastructure : sous-stations, ligne aérienne de contact, feeders, etc. Le cahier des charges spécifie le tracé de la ligne, le trafic (cadence de départ des trains, vitesse, ...) ainsi que différentes contraintes (espace disponible pour installer les infrastructures, points de raccordement au réseau accessibles, modes de fonctionnement dégradés, etc.). Le principe fondamental de la dynamique est utilisé pour déterminer la puissance à fournir à chaque train (voir chapitre 3) et il est facile d'estimer la puissance totale consommée par le trafic sous la forme d'une fonction du temps et de l'espace. L'enjeu technico-économique est alors de choisir et positionner les équipements électriques (sous-stations, feeders, équipotentielle) afin de réaliser le meilleur compromis entre les coûts d'investissement et la qualité de l'alimentation électrique (puissance demandée fournie à un niveau de tension correct), tout en respectant les contraintes du cahier des charges et en particulier les modes de fonctionnement dégradés. Cette problématique a été posée dès le début de l'électrification massive des transports ferroviaires [30], à une époque où les moyens de calcul étaient limités. Les études reposaient alors sur des modèles analytiques établis à partir de simplifications du système (sous-stations uniformément réparties le long de la ligne, relation tension/puissance linéaire) et d'hypothèses conservatrices (surestimation de la charge) afin d'établir des recommandations pour choisir l'espacement et la position des sous-stations en fonction du système d'électrification et du trafic [31] [32].

Par la suite, le progrès des méthodes numériques a conduit au développement de simulateurs de type circuit qui évitent les hypothèses simplificatrices et représentent mieux les différents systèmes d'électrification (DC, AC 50 Hz, AC 16,7 Hz). La conception s'est alors appuyée sur la simulation afin d'évaluer un grand nombre de configurations dans une démarche par essais-erreurs [33] [34] [35]. Des documents tels que les normes EN 50388 donnent des recommandations pour la distance entre les sous-stations. Sur la base de ces recommandations et de leur expérience, les ingénieurs proposent une première configuration. Ensuite, ils testent en simulation un certain nombre de scénarios de trafic et vérifient si les normes sur les tensions et les courants sont respectées dans l'ensemble du système à chaque instant de la simulation pour chacun des scénarios. Dans le cas contraire, la configuration est ajustée itérativement jusqu'à obtenir satisfaction. Cette approche empirique repose sur l'expertise du concepteur, peut être longue et ne permet pas en général d'obtenir une solution optimale. Différents travaux ont donc été faits pour améliorer le processus de conception grâce à des méthodes d'optimisation.

L'approche par optimisation n'a rien d'évident car la conception des infrastructures électriques est un problème fondamentalement non linéaire multicritères (coût d'investissement / coût de fonctionnement), contraint (limites physiques et normes ferroviaires), qui s'appuie sur l'évaluation d'un certain nombre de scénarios (différents modes de fonctionnement) grâce à un simulateur numérique coûteux en temps de calcul (quelques secondes pour l'évaluation d'un scénario de fonctionnement). Dans la suite de cette section, nous présentons quelques exemples de travaux réalisés sur le sujet. Les premiers portent sur des problèmes de renforcement de réseaux existants alors que les plus récents concernent des réseaux totalement nouveaux. Le problème d'optimisation posé et le cas d'étude sont spécifiques à chaque étude.

2.4.2. Renforcement d'infrastructures existantes

T. Capuderde et ses coauteurs [36] s'intéressent au renforcement du système d'alimentation 660 V DC du réseau ferroviaire de Zagreb. Il est démontré que les sous-stations d'alimentation existantes suffisent à faire face à l'augmentation du trafic, à condition que les lignes d'alimentation soient renforcées. Un modèle en flux de puissance linéarisé et une optimisation linéaire sont mis en œuvre pour redimensionner ces lignes et placer leurs points de connexion. Le critère utilisé est la minimisation des chutes de tension et des courants de fonctionnement afin d'assurer une continuité de service optimale. Les différentes solutions ont été testées dans le modèle statique développé par le logiciel NEPLAN 5 [37] puis testées dans le modèle dynamique de la ligne sur Railsim [28]. Des résultats intéressants sont obtenus, mais l'utilisation d'un modèle de flux de puissance linéaire limite le domaine de validité de l'étude et ne permet pas de prendre en compte l'effondrement de la tension dans les situations où la puissance appelée par les trains approche la puissance maximale transmissible par le réseau (mode dégradé, par exemple).

Dans [38], Chuang et ses coauteurs travaillent sur l'amélioration de l'efficacité énergétique d'un métro grâce à la récupération d'énergie au freinage et le renvoi d'énergie vers le réseau amont. Pour cela, il est nécessaire de modifier certaines sous-stations de redressement et de les rendre bidirectionnelles en les équipant d'onduleurs. Ce coût d'équipement doit être minimisé et compensé par les économies d'énergie réalisées. Les auteurs posent un problème d'optimisation dont les variables de décision sont les sous-stations à équiper et la capacité des onduleurs à y placer. Le critère à minimiser est un coût agrégé qui intègre le coût d'investissement des onduleurs, le coût de l'énergie consommée par le trafic et un coût équivalent de la fiabilité de service. L'alternance entre heures pleines et heures creuses est prise en compte, ainsi que le caractère aléatoire du trafic. Le modèle du système intègre la commande des convertisseurs et le contrôle de la tension d'alimentation des trains. Un algorithme génétique est utilisé pour tester différentes combinaisons de capacités et de positions des onduleurs. Le cas d'étude est une ligne du métro de Taipei (Chine) équipée de 12 sous-stations de redressement. L'optimisation par algorithme génétique montre que l'équipement de 4 sous-stations permet de réaliser le meilleur compromis entre récupération d'énergie et coût d'investissement : équiper davantage de sous-stations ne permet pas de gain énergétique significatif mais augmente le coût d'investissement.

Dans [39], Pilo et ses coauteurs s'intéressent également à l'amélioration de l'efficacité énergétique d'un système d'alimentation ferroviaire AC 1x25 kV grâce à la gestion des flux de puissance le long de la ligne. Les réseaux électriques ferroviaires AC sont monophasés et alimentés par des sous-stations dont les phases ne sont pas synchronisées entre elles. Chaque sous-station alimente un tronçon de ligne et les tronçons sont séparés par des zones dites « neutres » qui assurent l'isolation électrique entre tronçons. L'article propose et décrit un système pour permettre des transferts de puissance entre zones alimentées par les différentes SST. Des convertisseurs de puissance sont placés de part et d'autre des zones de neutre afin de permettre les transferts de puissance d'un tronçon à l'autre. Le système est contrôlé pour équilibrer les courants entre sections et ainsi minimiser les pertes Joule. Les auteurs réalisent une optimisation conjointe de la commande et du dimensionnement pour démontrer la faisabilité et l'intérêt du système proposé. Les pertes sont linéarisées par morceaux et le problème d'optimisation est résolu par un solveur MIP (mixed-integer programming). Le cas d'étude est construit à partir des données de la ligne TGV Barcelone-Madrid et les résultats conduisent à une conclusion optimiste sur les gains possibles avec ce type de système.

Les trois exemples précédents concernent le renforcement de structures existant, en particulier en introduisant de nouveaux dispositifs fondés sur des convertisseurs de puissance pour optimiser les flux d'énergie et réduire les pertes. Nous allons maintenant présenter des études qui s'intéressent à la conception de nouveaux systèmes et au positionnement des sous-stations.

2.4.3. Conception de nouvelles infrastructures

Les travaux présentés dans [40] portent sur le placement des sous-stations de redressement dans un système de transport rapide individuel par rail. Ce type de système est envisagé pour les déplacements dans des aéroports ou de grands centres commerciaux. Il s'agit d'un mini-réseau de transport par rail automatisé, alimenté en DC, sur lequel des véhicules légers circulent à la demande des utilisateurs d'un point à un autre du réseau. Les véhicules sont contrôlés de façon à respecter une distance de 12 m à 40 km/h. Ce système se caractérise par un grand nombre de véhicules de faible puissance proches les uns des autres et les auteurs modélisent ce trafic par une densité linéique de puissance constante au cours du temps plutôt que par des charges ponctuelles. Ils proposent ensuite de positionner les sous-stations de manière à constituer des cellules artificiellement isolées, c'est-à-dire de placer les sous-stations de façon qu'elles n'alimentent que le trafic adjacent. A partir de ce principe, un algorithme itératif combine la résolution des équations électriques et le positionnement des sous-stations. Le cas d'étude est une ligne longue de 5 km alimentée en 600 V DC, avec une puissance linéique de charge évoluant entre 1,4 et 1,7 kW/m. Les résultats obtenus ne sont pas intuitifs et les auteurs ne donnent aucune piste de validation. En première lecture, la démarche décrite dans l'article paraît intéressante, mais il s'agit d'une heuristique peu argumentée et des détails d'implémentation importants ne sont pas décrits (prise en compte des extrémités de la ligne, convergence de l'algorithme). L'étude est finalement peu convaincante.

L'étude présentée dans [41] se rapproche de notre problématique puisqu'elle concerne le positionnement de sous-stations de redressement d'une ligne de métro double voie. Les auteurs souhaitent ajuster la distance entre sous-stations de façon à uniformiser leur charge. Deux critères sont définis : le premier rend compte des différences de pics de puissance entre sous-stations, alors que le second rend compte des différences de consommation entre sous-stations sur un cycle de fonctionnement. Ces deux critères sont agrégés en un critère unique à minimiser (minimisation multiobjectif "scalarisée") : ce critère unique sera nul si toutes les sous-stations ont le même pic de puissance et la même consommation sur un cycle de fonctionnement. L'évaluation du critère nécessite la simulation du trafic, ce qui est fait de manière classique par un calcul de *load flow* à chaque pas de temps du cycle de fonctionnement simulée. Afin de simplifier le modèle, le freinage récupératif n'est pas pris en compte. Le pic de consommation et l'énergie fournie par chaque sous-station sont calculés pour le cycle de fonctionnement simulé. Les variables de décision sont les positions des sous-stations, le nombre de sous-stations étant connu. Le critère agrégé est minimisé par rapport à ces variables, sous contrainte de tension respectant les normes ferroviaires. Le problème est traité par un algorithme génétique disponible dans la bibliothèque C++ GAlib, avec un codage binaire des positions des sous-stations. Le cas d'étude est dérivé de la ligne 4 du métro de Sao Paulo (Brésil), alimentée en DC 1500 V par 7 sous-stations de puissance nominale 8 MW. La ligne est longue de 13.4 km et comporte 11 arrêts. La vitesse maximale des rames est de 80 km/h et l'intervalle entre rames est de 90 s, soit un total de 26 trains sur la ligne. La durée de fonctionnement simulée correspond à une période du trafic, soit 90 s. L'algorithme génétique est opéré avec une population de 200 individus et 400 générations, avec les paramètres de mutation et de mutation de l'état de l'art et 10 runs. La minimisation du critère choisi conduit à une solution où les sous-stations sont groupées, avec un groupe de 4 sous-stations à 5 km d'une extrémité de la ligne et un autre groupe de 3 sous-stations à 2 km de l'autre extrémité. Ce résultat a priori surprenant s'explique par le critère, fondé sur les différences de puissance et d'énergie entre sous-stations. Une manière de réduire ces différences est de positionner toutes les SST au même endroit (sous contrainte de tension acceptable) ! Pour contourner ce problème et obtenir des sous-stations réparties sur l'ensemble de la ligne, les auteurs introduisent une contrainte d'intervalle pour chaque position de sous-station. Les résultats sont plus satisfaisants et montrent que les objectifs d'uniformiser la consommation des sous-stations d'une part et d'uniformiser leur pic de puissance sont des objectifs antagonistes. On note toutefois que parmi les 7 sous-stations, 3 sont en butée de leur contrainte d'intervalle et 2 seulement semblent sensibles au critère d'optimisation. On peut donc s'interroger sur l'efficacité du critère proposé, fondé uniquement sur des différences de consommation.

Dans [42], Soler et ses coauteurs s'intéressent au positionnement des sous-stations et des zones neutres et au choix des caténaires pour une ligne de TGV alimentée en 25 kV AC, en prenant en compte des modes dégradés (sous-station partiellement ou totalement hors service). Deux critères sont pris en compte : le premier correspond aux coûts d'installation, en incluant des pénalités pour les zones d'implantation à éviter (difficulté de connexion au réseau principal, impact environnemental fort, faible disponibilité du foncier) ; le deuxième critère correspond aux coûts opérationnels (consommation énergétique, maintenance). La minimisation de ces critères se fait sous contrainte de faisabilité de chaque configuration (respect des normes sur les tensions et

les courants, y compris en mode dégradé, respect d'un budget maximal). L'évaluation des critères est faite grâce à un simulateur développé en interne, Hamlet, basé sur l'approche nodale [43]. Pour traiter ce problème d'optimisation, les auteurs proposent la démarche suivante : 1/ simulation d'une configuration initiale avec un nombre donné de sous-stations uniformément réparties, 2/ détermination d'un certain nombre d'instantanés critiques correspondant à des pointes d'appel de puissance pour chacune des sous-stations, y compris en incluant les configurations dégradées (une sous-station partiellement ou totalement hors service), 3/ utilisation de l'algorithme génétique bi-critères NSGA2 pour améliorer le positionnement des différents composants en limitant les simulations aux instantanés critiques déterminés à la phase 2. L'exploration des solutions inclut en particulier la possibilité de désactiver une sous-station, 4/ Vérification a posteriori que les normes sur la tension sont respectées. Le cas d'étude est une ligne de TGV de 60 km initialisée avec 4 sous-stations uniformément réparties. Le trafic de trains s'opère entre les points kilométriques 10 et 50 de la ligne, avec un arrêt au milieu. Entre 3 et 5 trains roulent simultanément, selon les instantanés. Ce trafic doit pouvoir être alimenté par 3 sous-stations au lieu de 4 et les auteurs testent la capacité de l'algorithme à générer des configurations à 3 sous-stations robustes par rapport à la perte d'1 sous-station. Les résultats sont présentés sous la forme d'un ensemble de solutions positionnées dans l'espace des objectifs investissement/exploitation. La position relative des points fait apparaître les solutions de meilleur compromis, dites non dominées, c'est-à-dire pour lesquelles on ne peut pas améliorer un critère sans dégrader l'autre. C'est alors à l'ingénieur de choisir parmi ces solutions celle qui correspond au compromis investissement/exploitation qui lui paraît le plus pertinent. Les auteurs font quelques essais pour montrer l'influence des hyperparamètres de l'algorithme (taille de population, nombre de générations, probabilités de croisement et de mutation), mais l'analyse n'est pas très poussée. L'ensemble des résultats est très intéressant car les auteurs intègrent deux facteurs importants pour la conception du système électrique : le fait que certaines positions sont moins favorables que d'autres pour l'installation d'une sous-station, et la prise en compte des modes de fonctionnement dégradés. En revanche, un point paraît discutable : la définition des instantanés critiques n'est pas claire, or c'est un point crucial pour limiter le volume de calcul sans pour autant manquer d'instantanés critiques. Par ailleurs, les instantanés critiques sont choisis pour la configuration initiale des sous-stations, alors qu'ils dépendent en partie de la position des sous-stations. Il paraît donc délicat de les définir a priori sans arguments précis. Par ailleurs, la sensibilité au trafic n'est pas abordée (aléas de trafic, retard, dé-synchronisme). Enfin, notons que l'exemple test est simple. Il reste donc à généraliser la démarche à des cas plus représentatifs de la réalité.

Soler et ses co-auteurs ont également appliqué leur méthode de conception à un système d'électrification DC [44]. Les principes sont ceux décrits dans l'article précédent [42], mais les modes dégradés ne sont pas intégrés dans la recherche de solutions. Le cas d'étude est une ligne de métro alimentée en 1500 V DC, longue de 15 km, avec un dénivelé de 100 m entre les points kilométriques 8 et 15. La ligne comporte 13 arrêts et les rames de métro se succèdent toutes les 90 s, ce qui correspond à un total de 80 trains simultanément en circulation. L'exemple est dérivé d'un cas d'usage réel comportant 7 sous-stations d'alimentation. L'analyse des chutes de tension indique que certaines portions de la ligne sont peu sollicitées et les auteurs souhaitent montrer qu'il est possible de trouver une configuration opérationnelle qui comporte moins de sous-stations. Les variables d'optimisation sont les positions des 7 sous-stations et le type de caténaire. Rappelons que l'algorithme peut neutraliser des sous-stations. Après exécution, l'algorithme NSGA2 génère un ensemble de points positionnés dans l'espace des critères coûts d'investissement / coûts d'exploitation et fait apparaître un ensemble de solutions non dominées. Parmi ces points, la solution correspondant au coût d'installation le plus bas ne comporte que 4 sous-stations et celle correspondant au coût d'exploitation le plus bas en comporte 5. Dans les deux cas, la section choisie par l'algorithme pour la ligne aérienne de contact est plus grande que pour la configuration initiale. Les modes dégradés n'ayant pas été pris en compte dans l'optimisation, il n'est pas sûr que ces solutions soient viables, mais les auteurs ont néanmoins montré la capacité de l'algorithme à choisir le nombre de sous-stations et à les positionner.

Une approche répondant à un besoin un peu différent a été proposée par Abrahamsson [45] [46] [47]. Dans le contexte du développement du transport ferroviaire en Suède, il s'intéresse à la planification amont de nouvelles lignes et à l'évaluation des coûts et besoins associés, et plus particulièrement celui des infrastructures électriques. La planification amont consiste à étudier différentes hypothèses de développement du trafic afin d'estimer leurs coûts, alors que les travaux que nous avons présentés jusqu'alors portaient sur un scénario de trafic précis en vue d'une réalisation effective. Le modèle de simulation répond donc à des besoins différents : il doit être plus rapide car il faut pouvoir analyser un grand nombre de scénarios de trafic possibles pour se projeter dans l'avenir et intégrer les incertitudes de développement, mais il n'a pas besoin d'être aussi précis puisqu'il s'agit d'estimation de coûts et non de réalisations physiques. Les auteurs proposent donc de

remplacer le modèle de simulation traditionnel basé sur les équations de circuit par un modèle approximatif basé sur un réseau de neurones entraîné à partir de résultats du simulateur traditionnel [45] [46]. Ce « simulateur rapide approximatif », tel qu'il est dénommé par ses auteurs, utilise une description simplifiée du système par le biais de données agrégées tant pour les infrastructures électriques que pour le trafic. Il s'agit d'un simulateur un peu particulier : il ne donne pas accès aux grandeurs physiques locales dont nous avons parlé jusqu'à présent, mais détermine la capacité d'une infrastructure parcourue par un trafic donné à alimenter un train supplémentaire. Dans l'exemple décrit, la ligne est supposée unidirectionnelle et parcourue par des trains identiques uniformément répartis. Elle est découpée en sections entre deux sous-stations et les entrées du simulateur sont des données macroscopiques qui caractérisent chacune de ces sections : longueur, valeur moyenne et écart-type de la pente, nombre de trains et vitesse moyenne de ces trains sur la section. La sortie du réseau est la vitesse maximale que pourrait atteindre un train ajouté au trafic initial, compte tenu des limites en tension de l'alimentation. En effet, comme cela se passe dans la réalité, les trains ralentissent si leur tension d'alimentation tend à descendre en dessous de la valeur limite définie par la norme. Si un train supplémentaire ne peut être ajouté au trafic existant sans provoquer de ralentissement, c'est que les infrastructures électriques sont en limite de charge. Le réseau de neurones est entraîné à partir d'une centaine de simulations correspondant à différentes combinaisons des données d'entrée, suivant les principes détaillés dans [45] et [46]. Dans [47], les auteurs utilisent ce simulateur approximatif pour optimiser le placement de sous-stations le long d'une ligne. Les variables de décision sont les positions des sous-stations et le critère à minimiser combine le coût d'investissement, proportionnel au nombre de sous-stations, et un coût opérationnel qui traduit l'impact d'un train supplémentaire sur le trafic. Cet impact est évalué à partir de la vitesse maximale que pourrait atteindre ce train, déterminée par le réseau de neurones. L'optimisation est faite à nombre de sous-stations fixe, et ce pour différents nombres de sous-stations. Le problème est résolu par un solveur de l'état de l'art [48], [49]. Le cas d'étude est une ligne AC 16,7 Hz en Suède, longue de 900 km, avec 10 stations voyageurs et un trafic plus chargé dans la partie centrale de la ligne qu'aux extrémités. Le relief n'est pas pris en compte. Selon le poids donné à la robustesse de l'alimentation face à une augmentation de trafic, le nombre optimal de sous-stations varie entre 8 (configuration peu chère mais peu robuste) et 16 (configuration robuste mais chère), avec des stations plus proches dans la zone où le trafic est plus dense. Il serait intéressant d'évaluer les solutions obtenues avec le modèle approximatif avec ce que donnerait un simulateur plus précis afin de vérifier l'impact de la simplification du modèle sur le résultat de l'optimisation.

2.5. Conclusion

Ce tour d'horizon a souligné différentes problématiques liées à la conception des infrastructures électriques ferroviaires. Il en résulte trois axes de travail importants pour mener à bien nos travaux d'optimisation.

Tout d'abord, il est impératif de développer un simulateur efficace, spécifiquement adapté au problème de conception des infrastructures électriques ferroviaires tel que nous l'entendons. Ce simulateur doit être facilement intégrable dans une boucle d'optimisation, en prenant en considération les non-linéarités, la non différentiabilité des fonctions de coût à optimiser et la lenteur de calcul inhérente à ces fonctions. Cette exigence peut nécessiter des simplifications du modèle ou une limitation du nombre de points évalués lors de la simulation.

Parallèlement, Il est nécessaire de poser la problématique de conception des infrastructures électriques ferroviaires en tant que problème d'optimisation. Il s'agit d'identifier précisément les contraintes à respecter, ainsi que les critères d'évaluation multiples à prendre en compte. Il s'agit ensuite de définir les méthodes d'optimisation appropriées au problème étudié.

Enfin, une méthodologie de validation doit être envisagée pour évaluer l'efficacité et l'applicabilité de notre approche. Dans cette étude, la validation de la méthode et méthodologie s'est appuyée sur un cas d'étude issu d'une réalisation d'un projet de tramway passé, nous permettant ainsi de comparer notre solution à la solution technique adoptée via la démarche classique.

Ces trois axes de travail sont développés dans les chapitres qui suivent.

3. Modélisation et simulation électrique d'une ligne de tramway

3.1. Introduction

La création d'une nouvelle ligne de tramway ou de métro répond à un besoin de transport de passagers par une gestion efficace du flux le long de cette ligne. Ce processus d'étude se divise en deux phases distinctes, chacune avec des objectifs spécifiques.

La première phase d'étude se concentre sur la simulation du trafic ferroviaire. Elle vise initialement à calculer le profil de vitesse d'une rame sur l'ensemble de son trajet, de la station de départ à la station d'arrivée. Ce profil de vitesse, appelé "marche-type," sert de base pour déterminer les temps de trajet aller-retour sur la ligne. À partir de là, on peut calculer divers paramètres, tels que le nombre de rames requis pour transporter une population donnée sur la ligne, ainsi que les horaires de départ des rames. La simulation de trafic vise à recréer des conditions d'utilisation opérationnelle de la ligne, ce qui est essentiel pour prendre des décisions techniques et financières cruciales, comme le nombre de rames à acquérir, la capacité de remisage nécessaire (garage), et les installations de maintenance requises.

La deuxième phase d'étude a pour objectif le dimensionnement des infrastructures d'alimentation électrique fixes nécessaires pour alimenter le trafic. Elle passe par la modélisation et la simulation de leur comportement électrique en tenant compte du trafic afin de guider et valider les décisions de dimensionnement prises par les concepteurs. La simulation permet de tester la capacité de ces infrastructures à fonctionner correctement dans toutes les conditions de trafic. Les scénarios de simulation sont définis en fonction des besoins du client et des normes ferroviaires. Ils prennent en compte les conditions de fonctionnement les plus critiques. L'objectif est d'éviter tout sous-dimensionnement de la ligne de tramway ou de métro, garantissant ainsi une fiabilité et une disponibilité optimales du réseau de transport.

Il convient de noter que cette thèse porte exclusivement sur la deuxième phase, c'est-à-dire le dimensionnement des infrastructures d'alimentation fixes, en supposant que le trafic a déjà été défini par ailleurs. Nous avons choisi de développer notre propre simulateur, moins puissant qu'un simulateur commercial mais adapté à nos besoins, en particulier pour l'optimisation que nous allons mettre en place. Dans les prochaines sections, nous commencerons par présenter la structure générale du simulateur développé. Nous exposerons ensuite les modèles des différents équipements de la ligne (sous-stations, trains, etc.), la modélisation de la ligne de tramway par un circuit électrique et sa mise en équations, puis sa résolution par la méthode nodale, et enfin la gestion du déplacement des trains. Le dernier point sera le post-traitement des résultats de simulation afin de fournir au concepteur les données nécessaires pour évaluer les performances de l'infrastructure analysée.

3.2. Description générale du simulateur

Le principe et les objectifs de la simulation électrique ferroviaire ont été introduits dans le chapitre 2 (section 2.2.2). Le système constitué de l'infrastructure électrique et des trains est modélisé par un circuit électrique équivalent qui évolue au cours du temps en fonction de la position des trains suivant une approche de simulation quasi-statique. A chaque pas de temps, la résolution des équations de circuit donne le potentiel aux nœuds du circuit. On en déduit les tensions aux bornes des rames ainsi que les courants dans les lignes et les sous-stations. Sur cette base, il appartient à l'ingénieur de comparer les résultats par rapport aux critères d'acceptation de l'infrastructure électrique testée

La figure 9 représente le schéma synoptique du simulateur du point de vue utilisateur. Le simulateur se présente comme une boîte noire dont les données d'entrées portent sur la topographie de la ligne, les infrastructures électriques, le matériel roulant et le trafic. Les données de sortie sont les grandeurs électriques dans le système.

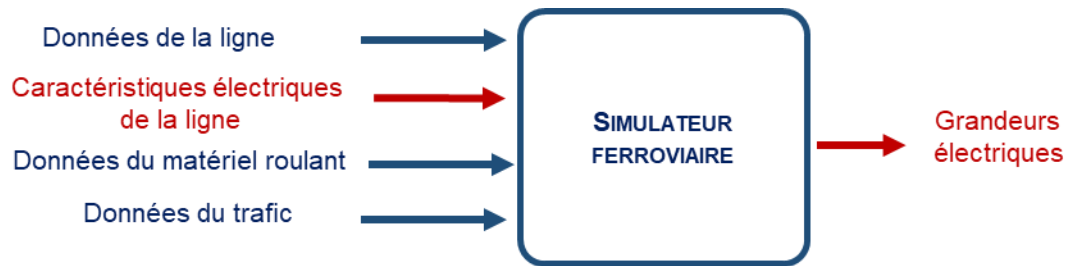


Figure 8 : Fiche synoptique du simulateur ferroviaire

Plus précisément :

- Les données topographiques de ligne contiennent les informations sur le tracé de la ligne, la position de ses extrémités, les pentes et les rayons de courbure.
- Les caractéristiques électriques de la ligne définissent les positions et les caractéristiques de chaque élément de l'infrastructure d'alimentation électrique de la ligne, à savoir les sous-stations, les *feeders* et les équipotentielles.
- Les données de matériel roulant contiennent les informations sur la masse, la longueur et les caractéristiques électro-mécaniques de la motorisation de la rame.
- Les données du trafic comprennent ce qu'on appelle la marche type d'un train et la périodicité du trafic. La marche type décrit le profil de vitesse et d'accélération d'un seul train pendant toute la durée de son parcours (aller et retour). La périodicité du trafic décrit les intervalles de départ entre les trains sur chaque tronçon de la ligne, sur les voies aller et retour. Ces données sont utilisées pour reconstituer le flux de rames sur la ligne. La Figure 9.a représente la marche type d'un train (aller et retour). L'axe des abscisses correspond au temps et l'axe des ordonnées à la position de la rame le long de la ligne. La Figure 9.b montre la grille de circulation de l'ensemble du trafic, obtenue en dupliquant la marche type d'un train. Chaque courbe correspond à un train et indique sa position à chaque instant.
- Les données de sortie du simulateur sont les grandeurs électriques d'intérêt pour le concepteur: différences de potentiel aux bornes des rames, courants débités par les sous-stations, courant dans la ligne aérienne de contact (LAC) et différences de potentiel entre les rails et le sol. Le calcul de ces données de sortie sera détaillé dans la section 3.8

Les données sur la topographie de la ligne, le matériel roulant et le trafic sont issues du cahier des charges du projet. Les données sur les infrastructures électriques correspondent à la configuration que le concepteur veut tester en simulation. Les données de sortie sont les grandeurs électriques nécessaires pour analyser la performance de la configuration testée et faire évoluer la conception vers une solution technique qui respecte le cahier des charges et les normes ferroviaires.

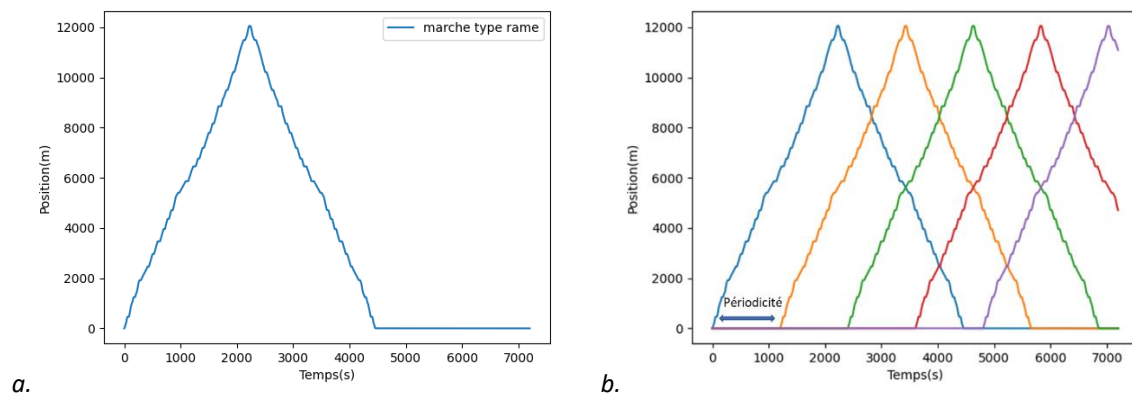


Figure 9 : a. Marche type d'un train – b. Grille de circulation de l'ensemble des trains

La simulation consiste à résoudre les équations de la dynamique des trains couplées aux équations de circuit électrique. A cette étape du dimensionnement, on ne s'intéresse pas aux régimes électriques transitoires et une résolution en quasi-statique est suffisante. La simulation est faite en pas à pas sur le temps, avec un intervalle de temps $\Delta t = 1 \text{ s}$, conformément à l'algorithme général de résolution suivant.

A chaque pas de temps :

- Pour chaque train, connaissant sa position au pas courant et aux précédents, calcul de sa vitesse et de son accélération ainsi que des forces de résistance à l'avancement (contact roue/rail et trainée aérodynamique). Le principe de la dynamique permet d'en déduire la force de traction et donc la puissance nécessaire à l'avancement du train. Le modèle de calcul est détaillé dans la section 3.3.3
- Connaissant la position des différents trains, construction du circuit électrique équivalent au système au pas de temps courant. Comme représenté sur la Figure 10, le circuit est un assemblage de dipôles (sous-stations, trains, portions de LAC ou de rail) représenté sous la forme d'un graphe : les arêtes sont les branches du circuit (dipôles) et les nœuds du graphe sont les nœuds électriques (points de connexion entre dipôles). Chaque dipôle est modélisé par sa caractéristique courant-tension et les modèles sont présentés dans la section 3.3
- Résolution des équations de circuit par la méthode nodale pour déterminer le potentiel aux nœuds du circuit (voir section 3.5)
- Stockage de toutes les informations et résultats du pas de temps courant.

Après le calcul des potentiels aux nœuds à chaque instant, le simulateur procède au post-traitement des résultats bruts de calcul pour déterminer toutes les grandeurs utiles à l'analyse de la configuration simulée : différence de potentiel aux bornes de chaque train tout au long de leur trajet, courants débités par les sous-stations et tensions rail-sol sur toute la durée de l'étude. Ces grandeurs seront comparées aux normes ferroviaires pour valider ou modifier le dimensionnement.

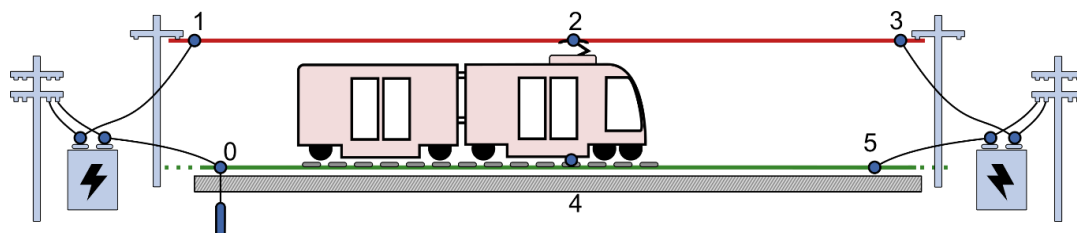


Figure 10 : Modélisation de la ligne par un circuit électrique équivalent.
Les deux rails sont agrégés en un seul et le contact train/rails est réduit à un seul point

3.3. Modélisation des composants électriques de la ligne

Dans cette section, nous présentons les modèles de chacun des composants de la ligne : sous-stations, trains, LAC, rail, feeders, équipotentielles. La modélisation du circuit est faite suivant l'approche nodale, c'est-à-dire que les équations de circuit sont formulées en fonction des potentiels aux nœuds du circuit. Dans cette approche, les branches du circuit sont modélisées par l'expression du courant qui les traverse en fonction de la différence de potentiel entre leurs bornes.

3.3.1. Modélisation des sous-stations

Les sous-stations redressent et adaptent la tension 20 kV AC du réseau public alimenter le réseau de tramway en 750 V DC (1500 V pour le métro). Pour chaque sous-station, on dispose des données techniques suivantes :

- Type de sous-station : Mono-groupe ou bi-groupe
- Puissance nominale : 900 kW par exemple pour une sous-station mono-groupe.

- Tension nominale : $U_n = 750 \text{ V}$
- Tension à vide : $U_0 = 790 \text{ V}$
- Courant nominal : $I_n = 1200 \text{ A}$
- Résistance d'injection $R_{Injection}$. Cette résistance correspondant à la résistance des câbles reliant la SST au point d'injection sur la LAC et le rail.

Les données disponibles pour les sous-stations correspondent à la tension à vide du secondaire redressé en série avec la résistance interne et la résistance d'injection. Nous utilisons le modèle équivalent de Norton, constitué d'une source de courant et d'une résistance en parallèle, comme schématisé par la Figure 11 (gauche). Les paramètres de ce modèle sont calculés par les relations suivantes :

- U_0 = tension à vide
- $R_s = \frac{U_0 - U_n}{I_n} + R_{Injection}$
- $I_{ssr} = \frac{U_0}{R_s}$

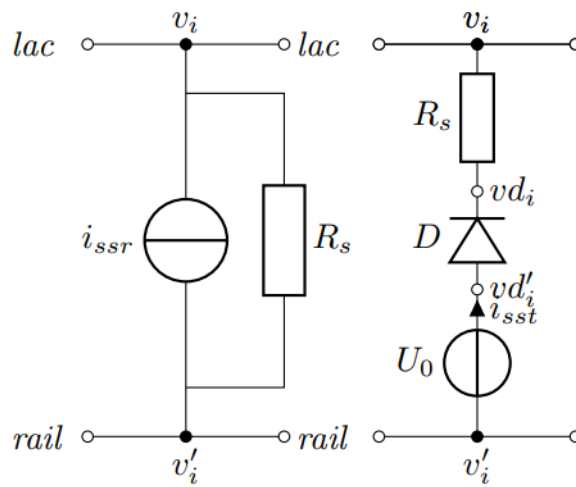


Figure 11 : Modélisation d'une sous-station réversible (à gauche) et irréversible (à droite)

Le modèle équivalent de Norton est réversible, alors que les sous-stations sont en général irréversibles. Cette irréversibilité est prise en compte a posteriori, en ne considérant que les valeurs positives du courant de la sous-station. Cette modélisation a l'avantage de la simplicité, mais elle représente imparfaitement le comportement de la sous-station pendant les phases de renvoi de puissance par les trains, au freinage.

Nous avons donc mis en place un autre modèle, dans lequel une diode est placée en série avec le modèle de Thévenin, comme représenté sur la Figure 11 (droite). Ce modèle nécessite de rajouter un nœud interne à la sous-station, où le potentiel est noté vd_i . Le courant fourni par la sous-station irréversible est imposé par la caractéristique de la diode et donné par l'équation :

$$I_{sst} = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{\Delta V}{K}\right) - 1 \right]$$

où $\Delta V = vd_i - vd'_i = vd_i - v'_i - U_0$ est la différence de potentiel aux bornes de la diode.

Les paramètres I_0 et K sont des coefficients empiriques qui caractérisent le comportement irréversible de la sous-station. La Figure 12 montre la caractéristique courant-tension de la sous-station irréversible pour quelques couples de paramètres (I_0, K) . La sous-station débite du courant quand la tension est inférieure à 790 V et bloque le retour du courant dès que la tension dépasse 790 V. Idéalement, nous souhaitons avoir une caractéristique avec un coude très marqué, mais cela introduit une très forte non linéarité des équations de circuit difficile à gérer numériquement. Ce point sera détaillé dans la section xxx. Nous sommes donc confrontés à un problème délicat : d'un côté, nous recherchons une caractéristique raide pour modéliser de manière la plus réaliste possible l'irréversibilité des sous-stations, mais de l'autre, une caractéristique trop raide

génère des problèmes de convergence numérique lors de la résolution des équations de circuit. Afin de trouver un bon compromis, nous avons entrepris des essais avec les différentes combinaisons de paramètres (K, I_0) de la Figure 12 pour simuler une ligne similaire à une ligne de tramway réelle. Ces tests nous ont permis d'identifier la configuration la plus adaptée ($K = 0,5$ et $I_0 = 0,5$). Cette configuration nous offre le meilleur compromis entre une réponse raide, d'une part, et la difficulté de résolution des équations électriques, d'autre part.

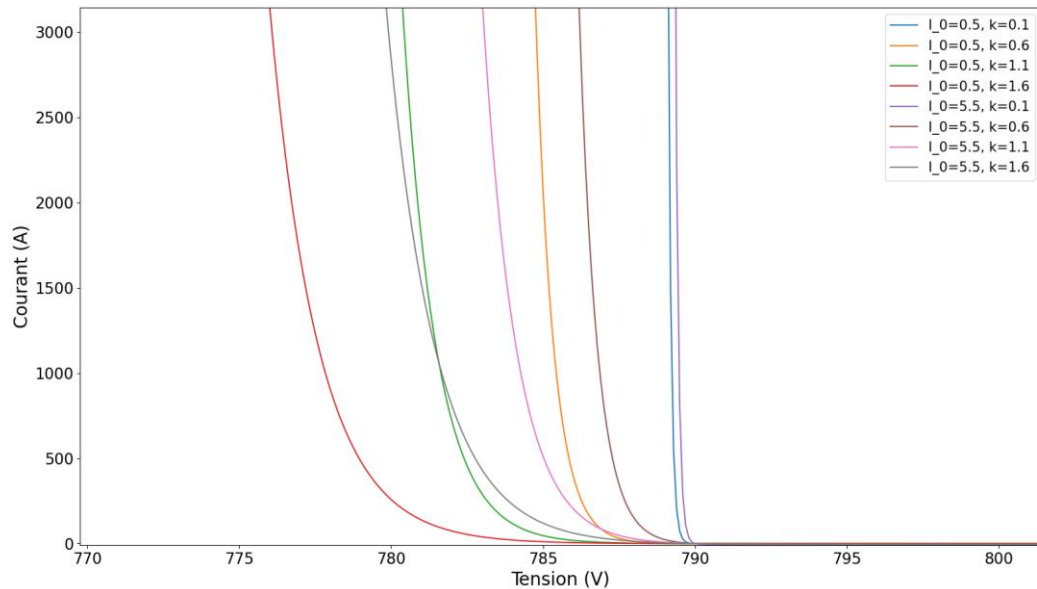
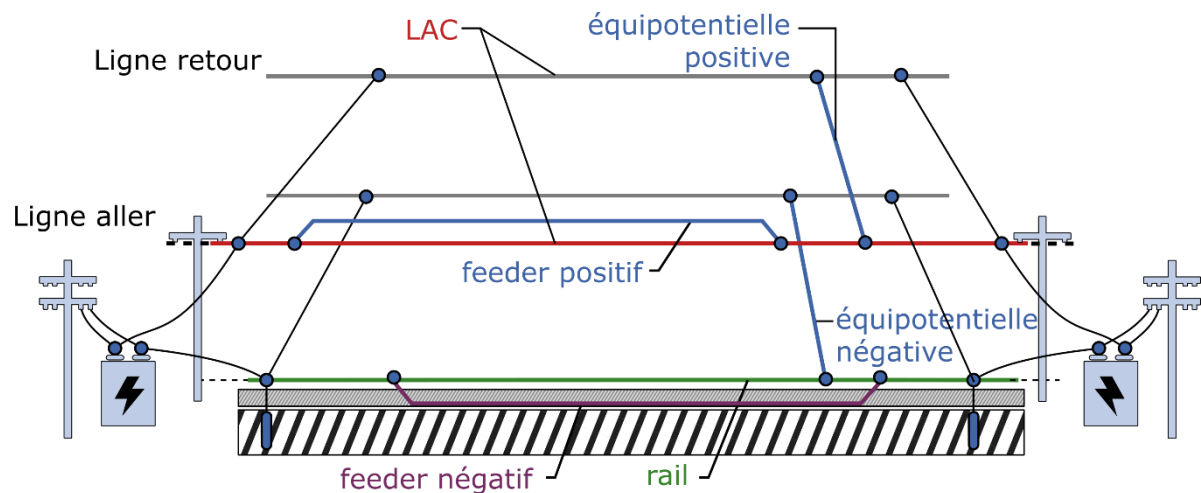


Figure 12: Caractéristiques courant-tension de la sous-station irréversible pour différents couples (K, I_0)

3.3.2. Modélisation des câbles électriques

Le terme « câbles » fait référence aux différents conducteurs qui relient les trains et les sous-stations. La Figure 13 illustre la position des différents types de câbles. On distingue les câbles de polarité positive (ligne aérienne de contact, feeders positifs et équipotentielles positives) et les câbles de polarité négative (rail, feeders négatifs et équipotentielles négatives).

Chaque câble est modélisé par sa résistance linéique et chaque portion de câble comprise entre deux connexions électriques est modélisée par sa résistance, produit de la longueur de la portion de câble et de la résistance linéique de celui-ci.



● connexion électrique

Figure 13: Exemple d'infrastructure d'alimentation d'une ligne de tramway avec les câbles positifs et négatifs

La résistance linéique des câbles dépend de leurs sections et de la matière qui les composent.

$$R_{linéique} = \rho / S$$

La résistance linéique des câbles dépend également de la température. La température à prendre en compte dans le cadre des simulations est indiquée dans le cahier de charge des projets.

Le processus de dimensionnement des infrastructures d'alimentation nous impose de simuler les conditions les plus défavorables. On diminue donc de 20% la section de la LAC pour prendre en compte l'impact de l'usure de la ligne aérienne de contact dans le temps du fait du frottement du pantographe et de s'assurer que l'alimentation électrique fonctionne correctement même sous cette condition d'usure.

Les résistances du pantographe et de contact ne sont pas prises en compte.

Les caractéristiques des différents types de câble sont répertoriées dans le Tableau 2.

Type de conducteur	Section à l'état neuf	Résistance linéique à l'état usé
Ligne aérienne de contact	150 mm ²	131 mΩ/km
Feeder positif ou négatif	A partir de 240 mm ²	80 m Ω/km pour 240 mm ²
Equipotentielle positives ou négatives	240 mm ²	80 m Ω/km

Tableau 2: Résistance linéique des conducteurs d'une ligne de tramway ou de métro

3.3.3. Modélisation des rames

Les rames sont des charges électriques en puissance. Cette puissance est la puissance fournie à la motrice pour faire avancer le train conformément à la marche type. Elle est positive durant les phases de traction et peut être négative pendant les phases de freinage.

A chaque pas de temps, la puissance appelée par un train est calculée à partir des données suivantes :

- Vitesse et accélération instantanée, contenues dans le fichier de la marche type
- Caractéristiques électromécaniques du train, contenues dans le fichier descriptif du matériel roulant fourni par le constructeur (Tableau 3). Ces données nous permettent de calculer :
 - La masse totale de la rame
 - La résistance à l'avancement de la rame,
 - La consommation électrique des auxiliaires et le rendement moteur.
- Pente et rayon de courbure de la voie, contenus dans le fichier qui décrit la ligne.

3.3.3.1. Calcul de puissance de la rame

A chaque pas de temps de la simulation on applique le premier principe de la dynamique pour calculer la force de traction nécessaire à l'avancement du train, notée F (Figure 14).

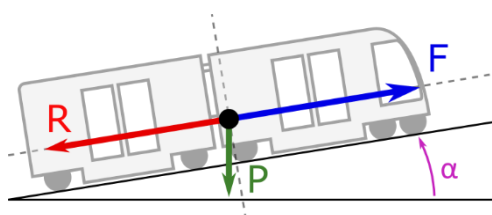


Figure 14 : Exemple de bilan de force d'une rame

La force de traction se calcule en appliquant le principe fondamental de la dynamique dans le sens de déplacement.

$$F(t) = m \cdot a_g + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) + R(t)$$

où a_g est l'accélération de la rame à l'instant simulé, m est la masse totale de la rame, α est la pente à la position de la rame à l'instant simulé et R est la force de la résistance à l'avancement, donnée par la formule ci-dessous.

$$R(t) = (A_0 + A_1 \cdot M) + (B_0 + B_1 \cdot M)V(t) + (C_0 + C_1 \cdot M)V^2(t)$$

A_0, A_1, B_1, B_2, C_1 et C_2 sont des coefficients relatifs aux caractéristiques du matériel roulant (Tableau 3) et V est la vitesse de la rame.

La puissance mécanique est calculée ensuite en fonction de la vitesse de la rame à l'instant simulé.

$$P_m(t) = F(t) \cdot V(t)$$

La puissance électrique est calculée en fonction du rendement de la chaîne de traction et de la puissance électrique des auxiliaires.

$$\text{Si } P_m > 0, P_e(t) = \frac{P_m(t)}{\eta} + P_{aux}$$

$$\text{Si } P_m < 0, P_e(t) = P_m(t) \cdot \eta + P_{aux}$$

3.3.3.2. Modèle équivalent de la rame

La modélisation de la rame est faite sous forme d'une source de puissance. Cette puissance peut être positive durant les phases d'accélération et négative en phase de freinage.

Dans le cas d'une ligne avec au moins une sous-station réversible, la ligne peut renvoyer de la puissance vers le réseau amont pendant les phases de freinage (freinage récupératif). La rame est modélisée comme une source de courant dont la valeur est calculée en fonction de la puissance demandée et de la tension aux bornes de la rame (Figure 15 - gauche).

$$I_{tr} = \frac{P_{mot}}{\Delta V}$$

Dans le cas d'une ligne avec des sous-stations irréversibles, il n'y a pas de renvoi possible sur le réseau pendant la phase du freinage et c'est la raison pour laquelle les trains sont équipés d'un rhéostat qui permet de dissiper la puissance de freinage quand c'est nécessaire. Le freinage rhéostatique correspond à une résistance variable et est activé dès que la tension aux bornes de la rame dépasse une certaine valeur seuil. Dans le cas des tramways, le freinage rhéostatique est activé dès que la tension de rame dépasse 820 V et la rame est déconnectée de la ligne si la tension dépasse 900 V.

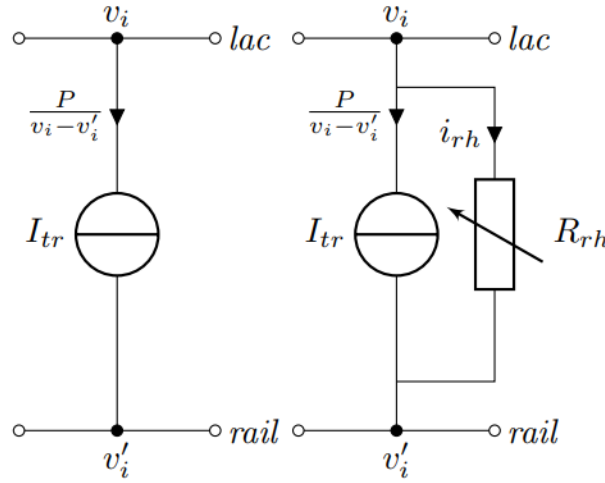


Figure 15: Modélisation de la rame dans le cas d'une ligne de SST réversible (à gauche) ou dans le cas d'une sous-station irréversible (à droite)

Nous proposons de modéliser la rame avec freinage rhéostatique en mettant en parallèle avec la motrice une autre source de courant pilotée par la tension aux bornes de la rame (Figure 15 - droite). Le modèle est donné par les équations ci-dessous.

$$I_{rame} = I_{tr} + I_{Rh}$$

$$\text{Courant moteur : } I_{tr} = \frac{P_{mot}}{\Delta V}$$

$$\text{Courant rhéostat : } I_{Rh} = I_{Rh0} \cdot \exp\left(\frac{\Delta V - \Delta V_{max}}{K_{Rh}}\right)$$

où ΔV est la tension aux bornes de la rame, ΔV_{max} est la tension maximale autorisée sans dissipation (820 V pour un tramway).

Les constantes K_{Rh} et I_{Rh0} sont calculées en fonctions d'hypothèses faites sur les seuils de contrôle du rhéostat. On prend l'hypothèse que le rhéostat dissipe une puissance $P_{min} = 100 \text{ W}$ à 820 V et la puissance maximale que la rame peut renvoyer P_{max} (qui dépend du type de matériel roulant), à 900 V. En imposant ces deux points, on obtient I_{Rh0} et K_{Rh} :

$$\rightarrow I_{Rh0} = \frac{P_{min}}{\Delta V}$$

$$\rightarrow K_{Rh} = \frac{900 - 820}{\ln\left(\frac{P_{max}}{900 \cdot I_{Rh0}}\right)}$$

La fonction qui donne le courant rhéostat en fonction de ΔV peut être vue comme une loi de commande du rhéostat. N'ayant pas de donnée constructeur sur le fonctionnement réel du freinage rhéostatique (hormis les deux points utilisés), nous avons choisi une expression arbitraire. L'essentiel est d'avoir un seuil d'activation du rhéostat et un modèle qui empêche de dépasser la tension seuil de 900 V (imposée par la norme). Le modèle sera facile à faire évoluer si des données complémentaires deviennent accessibles.

Autres Paramètres du Matériel Roulant	
Coef A0 (N)	780
Coef A1 (N/tonne)	6.4
Coef B0 (N)/(km/h)	0
Coef B1 (N)/tonne/(km/h)	0.14
Coef C0 (N/(km/h)²)	0.3634
Coef C1 (N/tonne/(km/h)²)	0
Trainée en courbe (m/s²)	8
Jerk (m/s³)	0.4
freinage maximal (m/s²)	1
accélération maximale (m/s²)	1
croissance de freinage (m/s²)/(m/s)	0.008
accélération centripète (m/s²)	1
retard pur traction/freinage (s)	1.5
adhérence limite roue/rail	0.2
décollage (daN/tonne)	2
Vitesse maximale (km/h)	70
masse motrice (kg)	24188
masse remorque (kg)	17192
masse tournante motrice (kg)	1750
masse tournante remorque (kg)	1050
masse passagers par voiture (kg)	9905
nombre de motrices	1
nombre de remorque	1
nombre voitures	2
nombre d'essieux	6
longueur 1 voiture (m)	16.5
puissance auxiliaire par voiture (W)	35000

Tableau 3 : Exemple de données fournies par le constructeur de matériel roulant

3.4. Modélisation de la ligne par un circuit électrique

La Figure 16 reprend l'exemple déjà montré d'un train qui se déplace entre deux sous-stations et remplace chaque dipôle du circuit par son modèle. Chaque sous-station est modélisée par une résistance R_s en parallèle avec une source de courant I_n . Le train est modélisé par une source de courant I_{rame} où I_{rame} est fonction de la puissance P appelée par la rame et de la différence de potentiel à ses bornes.

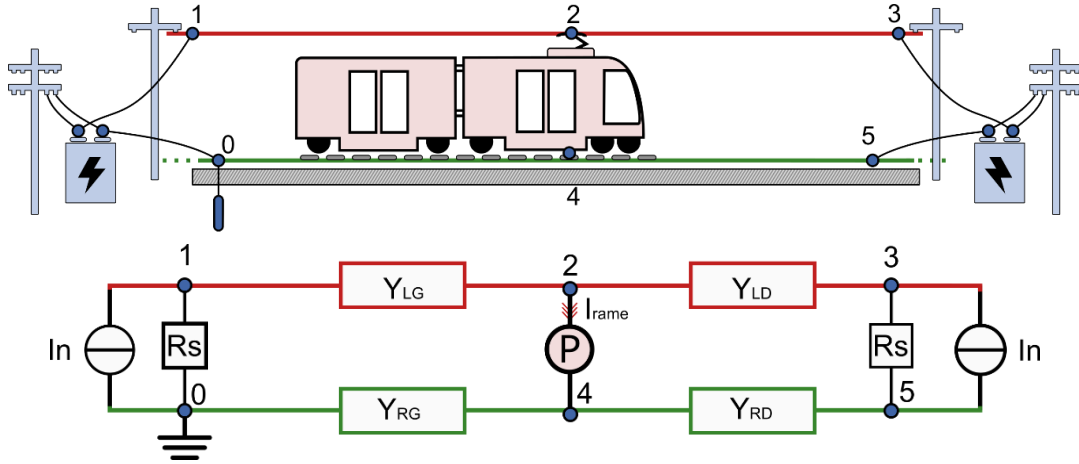


Figure 16 : Circuit équivalent de la ligne tramway

La résolution des équations de circuit soulève la question du solveur à utiliser. L'utilisation d'un des solveurs de circuit déjà disponibles nous permettrait de gagner en temps de développement. Néanmoins ces types de solveurs ne sont pas toujours ouverts et ils peuvent poser des problèmes de compatibilité et d'adaptabilité à notre modèle. On peut ajouter à cela notre volonté d'avoir la maîtrise complète de l'intégralité du processus de simulation pour avoir plus de perspectives d'évolution de l'outil. Ces points nous ont poussé à développer nous-même un solveur d'équations sous python qui sera détaillé dans la suite de cette section.

Les différentes grandeurs électriques du circuit, tension aux nœuds et courants dans les branches, sont reliées entre elle par trois types de relation : les relations courant/tension de chaque dipôle et les lois de Kirchhoff (loi des nœuds et loi des mailles). La loi des nœuds de Kirchhoff stipule que la somme des courants entrants dans un nœud est égale à la somme des courants sortants de ce nœud. Cette loi permet de déduire des équations reliant les courants inconnus des branches d'un circuit électrique. La loi des mailles de Kirchhoff stipule que la somme des tensions dans une boucle fermée est égale à zéro. Cette loi permet de déduire des équations reliant les tensions inconnues des composants d'un circuit électrique.

3.5. Résolution par la méthode nodale

Pour les applications ferroviaires, la méthode nodale est la plus utilisée [10]. Cette méthode consiste à formuler le système d'équations en fonction des potentiels aux nœuds. Dans notre problématique, il s'agit de poser un système d'équations où les inconnues seront les potentiels aux nœuds. La création du circuit est effectuée en remplaçant chaque élément de la ligne par son équivalent électrique. Chaque branche est caractérisée par la relation entre le courant qui la traverse et la différence de potentiels à ses bornes. En appliquant la loi des nœuds pour chaque nœud du circuit, on construit un système d'équations que l'on peut mettre sous la forme matricielle $Y \cdot V = I$, où Y est la matrice d'admittance du circuit, V est le vecteur des potentiels à déterminer et I est le vecteur des courants injectés à chaque nœud.

La loi des nœuds est écrite en chaque nœud du circuit, sauf le nœud 0 qui est à la terre et où le potentiel est nul ($v_0 = 0$). Les lignes ci-dessous montrent les équations obtenues aux nœuds 1 et 2.

$$\text{Au nœud 1 : } Y_{LG} \cdot (v_1 - v_2) + Y_{RS} \cdot (v_1 - v_0) = I_N$$

$$\text{Au nœud 2 : } Y_{LG} \cdot (v_2 - v_1) + Y_{LD} \cdot (v_2 - v_3) = I_{Rame} = \frac{P}{v_2 - v_4}$$

où I_{Rame} est le courant demandé par la rame dans la convention récepteur¹. Ce courant dépend de la puissance demandée et de la différence de potentiel à ses bornes. Si on applique le même processus pour tous les nœuds,

¹ Dans un récepteur, puisque le courant le traverse dans le sens des potentiels décroissants, v et i auront des sens opposés.

on aura un nombre d'équations égale au nombre de nœuds. Le système d'équation peut alors s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$Y.V = I(V)$$

On remarque que le vecteur second membre I dépend du vecteur des inconnues V à cause de la charge en puissance. Les modèles de sous-stations irréversibles provoquent également une non linéarité puisque le courant traversant la diode dépend de la différence de potentiel à ses bornes.

La résolution du problème consiste à annuler le vecteur résidu défini par $R(V) = Y.V - I(V)$.

La résolution de ce système d'équations non-linéaires se fait à l'aide du solveur `root` de la bibliothèque `scipy.optimize` disponible sous python [50]. Les méthodes utilisées par la fonction `root` sont :

- **Hyb** : La méthode hybride [51] est une méthode de résolution d'équations non linéaires qui combine la méthode de la sécante et la méthode de la bisection avec une méthode de minimisation du gradient pour améliorer la convergence. Plus précisément, la méthode `hybr` de `scipy.root` commence par trouver une approximation initiale de la racine à l'aide de la méthode de la sécante. Si cette méthode échoue à fournir une approximation, la méthode bascule vers la méthode de la bisection pour trouver une nouvelle région contenant une racine. La méthode de la bisection est ensuite utilisée pour réduire la taille de cette région jusqu'à ce qu'une solution soit trouvée.
- D'autres méthodes sont également disponibles, comme `lm` [52], `broyden1` [53], `broyden2` [54], `anderson` [55], `linearmixing`, `diagbroyden` [56], `excitantmixing`, `krylov` [57].

Toutes ces méthodes nécessitent de partir d'une solution initiale. Au vu des faibles changements de circuits entre deux instants successifs, on choisit d'initialiser le vecteur de tension V à l'instant N avec la valeur V_{solution} trouvée à l'instant $N-1$. Ce choix permet de converger rapidement vers la solution à l'instant N .

La résolution à un instant N donne le vecteur V des potentiels électriques à chaque nœud du graphe à cet instant. La sortie du simulateur est alors un tableau contenant les résultats de tous les pas de temps simulés. Chaque instant est lié à un graphe avec l'information sur le potentiel électrique à chaque nœud.

3.6. Gestion du déplacement des trains

Comme indiqué précédemment, la simulation consiste à calculer les grandeurs électriques à différents instants (Figure 16). Si la position des infrastructures d'alimentation est fixe dans le temps, la position des trains change à chaque pas de temps. La position des nœuds correspondants évolue au cours de temps. A certains pas de temps, quand un train passe d'un côté d'une SST à l'autre par exemple, cela entraîne un changement de topologie du circuit et donc de la matrice d'admittance. A d'autres moments, il n'y a pas de changement de topologie, mais les longueurs et donc les résistances des câbles de part et d'autre des trains changent. Cela affecte la valeur de certains coefficients de la matrice d'admittance. Le déplacement des trains pose donc la question sur les techniques de reconstruction du circuit à chaque instant.

Il existe plusieurs approches pour gérer le déplacement des trains. La plus simple consiste à ne pas se poser de question et à reconstruire intégralement le circuit à chaque pas de temps. A l'inverse, on peut essayer de limiter au maximum les reconstructions. Nous présentons ci-dessous différentes techniques que l'on trouve dans la littérature.

3.6.1. Découpage de ligne évolutif

Prenons l'exemple de la Figure 16 pour illustrer cette technique. Chaque déplacement de la rame entraîne un changement de résistance de la LAC droite/gauche (en rouge) et de la résistance du rail droite/gauche (en vert), mais cela ne produit pas de changement de topologie dans le circuit. Un changement de topologie se produit uniquement lors de l'ajout ou de la suppression d'un ou plusieurs nœuds ou branches. Il n'est donc pas nécessaire de refaire le découpage et la mise en circuit à chaque déplacement de train. Il suffit alors de modifier directement les valeurs correspondantes aux LAC et au rail dans la matrice d'admittance.

Cependant, lorsqu'une rame dépasse la sous-station, cela entraîne un changement de topologie. Le format de la matrice d'admittance change alors et il est obligatoire de refaire la mise en circuit à chaque changement de topologie.

L'avantage de cette technique est de limiter le nombre de reconstructions de la matrice et de n'utiliser que le nombre de nœuds strictement nécessaire, contrairement aux autres méthodes présentées ci-dessous. Cependant, l'utilité de cette méthode peut être moindre dans le cas d'une ligne réelle très maillée avec plusieurs rames en circulation, car les changements de topologie sont très fréquents. Il est donc nécessaire de souvent reconstruire le circuit.

3.6.2. Découpage de la ligne fixe et nœuds fixes

Cette technique construit un circuit électrique unique, valable tout au long des déplacements des trains. Les nœuds, les branches et donc le format de la matrice d'admittance restent les mêmes tout au long de la simulation. La construction du système n'est faite qu'une fois est donc plus simple car une fois que le modèle est mis en place, il peut être utilisé pour chaque pas de temps. Pour cela, la ligne est découpée en tronçons de petite taille (maillage) et comporte des trains fictifs régulièrement répartis le long de la ligne. A chaque instant, une rame est située entre deux trains et sa demande de puissance est répartie entre ces deux trains au prorata de la distance entre la rame et les trains fictifs.

Prenons l'exemple de la Figure 17. Elle représente un modèle de la ligne fixe divisé en plusieurs tronçons, sur chaque tronçon on retrouve le modèle électrique équivalent d'un train. Si on veut simuler le train qui se trouve à la position du point bleu, la puissance du train à simuler sera partagée de façon proportionnelle entre les deux trains les plus proches de sa position et présents sur le modèle équivalent. Dans notre exemple le train T1 et le train T2 se partageront la puissance du train à simuler. Le train T3 aura une puissance nulle puisqu'il n'existe pas en réalité.

L'avantage de cette méthode c'est qu'elle permet de réutiliser le même modèle pour chaque pas de temps malgré des changements de topologie. Cependant, cette méthode présente également certains inconvénients. Tout d'abord, les matrices associées aux calculs peuvent devenir très grandes pour les lignes de grande longueur, ce qui peut augmenter considérablement le temps de calcul nécessaire pour résoudre les équations. De plus, les matrices peuvent être mal conditionnées, ce qui peut affecter la précision des résultats. En outre, les chutes de tension ne sont pas toujours calculées de manière exacte avec cette méthode. Cela est dû en partie aux approximations de positionnement des rames dans le modèle.

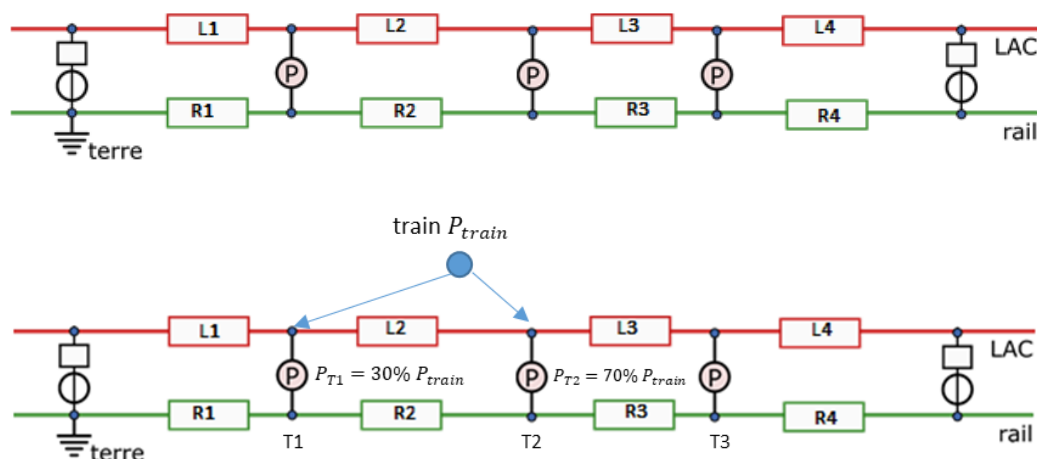


Figure 17 Exemple de découpage de la ligne avec des nœuds fixes pour l'infrastructure et pour les rames

3.6.3. Découpage de la ligne fixe et des nœuds mobiles

Une méthode pour obtenir un modèle électrique à topologie fixe sans trop augmenter le nombre de nœuds consiste à déterminer avant la simulation le nombre maximum de trains susceptibles d'être présents en même

temps entre deux nœuds fixes. On crée alors entre les nœuds fixes autant de nœuds mobiles qu'il peut y avoir de trains simultanément. Les nœuds de connexion des trains et les longueurs des sous-sections sont ensuite modulés en fonction de la position des trains. Cette méthode permet d'avoir un modèle de taille raisonnable tout en simplifiant la modélisation du réseau électrique. Pour éviter les changements de topologie lors des changements de nœuds des trains, un "train virtuel" est modélisé en permanence à chaque nœud où un train peut être connecté. Si un train est connecté à un nœud, les grandeurs correspondantes sont utilisées par le train virtuel du nœud. Sinon, les grandeurs et équations du modèle sont paramétrées pour que le train virtuel soit transparent vis-à-vis du réseau

On prend l'exemple de la ligne de la Figure 16, on suppose que la marche-type nous indique que la ligne aura au maximum trois rames entre les deux sous-stations. On crée alors trois nœuds mobiles (ou trains fictifs) sur notre modèle circuit électrique fixe. Dès qu'un train réel rentre dans cette partie de la ligne, le train fictif le plus proche lui est attribué. Ce train fictif (T1) suivra les déplacements du train réel jusqu'à ce que ce dernier se rapproche du train fictif (T2) (voir Figure 18).

L'avantage de cette méthode c'est le fait d'avoir une matrice d'admittance avec une dimension fixe mais aussi les positions des trains sont modélisées très précisément grâce aux nœuds mobiles qui suivent le mouvement des trains entre deux nœuds fixes. Cependant la méthode présente l'inconvénient des nœuds mobiles non affectés à un train qui créent des matrices plus grandes que nécessaire et qui peuvent parfois être mal conditionnées.

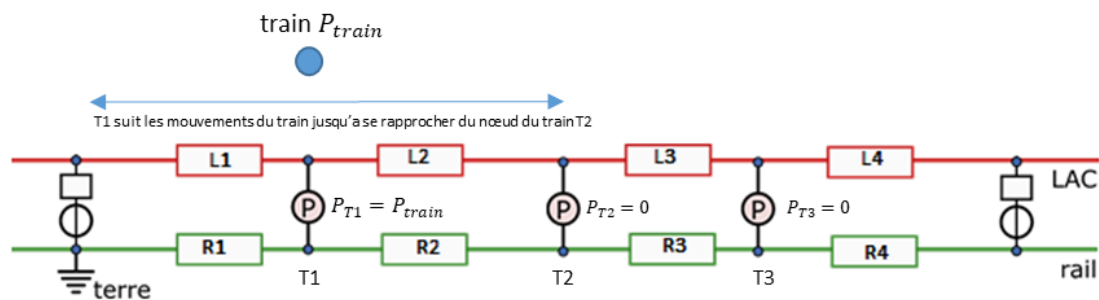


Figure 18 : Exemple de découpage de la ligne avec des nœuds fixes pour l'infrastructure et des nœuds mobiles pour les rames

3.6.4. Choix de la méthodologie de découpage de ligne

Le but principal des deux dernières méthodes est d'économiser du temps d'exécution pendant la phase de la mise en circuit en utilisant un modèle avec le même nombre de nœuds tout au long de la simulation. Ces méthodes donnent des gains de temps assez important pour certaines applications ferroviaires de grande ligne. Cependant ces méthodes touchent à leurs limites pour des lignes fortement maillées comme le cas des lignes de tramways ou de métro. Le nombre de nœuds pour des trains fictifs du modèle est important ce qui fait augmenter le nombre d'équations électriques à résoudre. Nous avons donc fait le choix de la première méthode qui nous permet de construire la ligne à chaque instant. Ce choix s'explique par la simplicité de la mise en place du code et la précision des résultats de la méthode.

3.7. Implémentation numérique du simulateur

La création du modèle de ligne utilise deux types de données :

- Les données des infrastructures fixes : positions et caractéristiques des sous-stations, équipotentielles et feeders.
- Les données de la marche type afin de savoir la position et la puissance demandée par chaque train à chaque instant.

La construction du modèle équivalent de la ligne se fait à l'aide des graphes en utilisant la bibliothèque *networkx* de Python. La mise en place du modèle de la ligne avec la position des rames se fait à chaque instant, chaque modélisation de la ligne est donc liée à un instant précis.

A l'aide du fichier de description d'infrastructure, deux premières branches représentant une LAC et un rail correspondant la longueur totale de la ligne sont créés ; les branches des sous-stations, *feeders* et équipotentielles sont alors rajoutés à ce graphe. A ce stade, Le graphe représente l'infrastructure d'alimentation électrique fixe sans trains. Ce graphe sera stocké et réutilisé à chaque pas de temps. Ce stockage permet d'éviter la recréation de ce graphe dans les pas de temps suivants.

A chaque pas de temps et grâce aux informations de la marche-type, on rajoute les branches correspondant aux trains sur le graphe des infrastructures d'alimentation créé à l'étape précédente. A ce stade on s'intéresse à une seule information : la position de chaque rame sur la ligne.

Une fois les branches de trains rajoutées dans les positions indiquées par le trafic, le modèle de ligne est complet et caractérise la situation de la ligne à l'instant simulé.

3.8. Résultats de simulation et post-traitement

A la fin de la simulation, on dispose uniquement du potentiel électrique de chaque nœud du circuit équivalent à la ligne simulée (Figure 16). Il s'agit de calculer, à partir de ces potentiels électriques d'autres grandeurs physiques qui intéressent le concepteur et lui permettent de donner un avis sur le dimensionnement proposé des infrastructures d'alimentation.

Pour chaque pas de temps, le module de post-traitement traite le circuit électrique équivalent pour calculer les différentes grandeurs physiques : tensions et courants.

Un premier post-traitement consiste à faire une synthèse sous forme de courbes qui représentent l'évolution des valeurs extrêmes et moyennes de chaque grandeur physique pendant toute la simulation.

Les grandeurs électriques permettant de juger la pertinence du dimensionnement proposé sont les tensions aux bornes des rames, les courants débités par les sous-stations, les courants dans la LAC et les tensions rail-sol.

Le module de post-traitement analyse un tableau de plusieurs graphes, où chaque graphe est associé à un instant de temps de la simulation.

3.8.1. Grandeurs de sortie du simulateur

3.8.1.1. Tensions aux bornes des rames

La tension de la rame est la différence de potentiel entre ses nœuds. Dans notre exemple de la Figure 19, la tension de la rame est égale à $V_2 - V_4$.

Pour chaque pas de temps, on calcule les tensions des rames présentes sur la ligne. Le concepteur s'intéresse à la tension minimale des rames en ligne. Sous forme d'une courbe (Figure 19), on affiche l'évolution de la valeur minimale des trains en ligne pour chaque pas de temps. Cette courbe permet au concepteur de vérifier si la tension au niveau de la caténaire ne descend jamais en dessous des limites autorisées. Ces limites sont définies dans les normes ferroviaires.

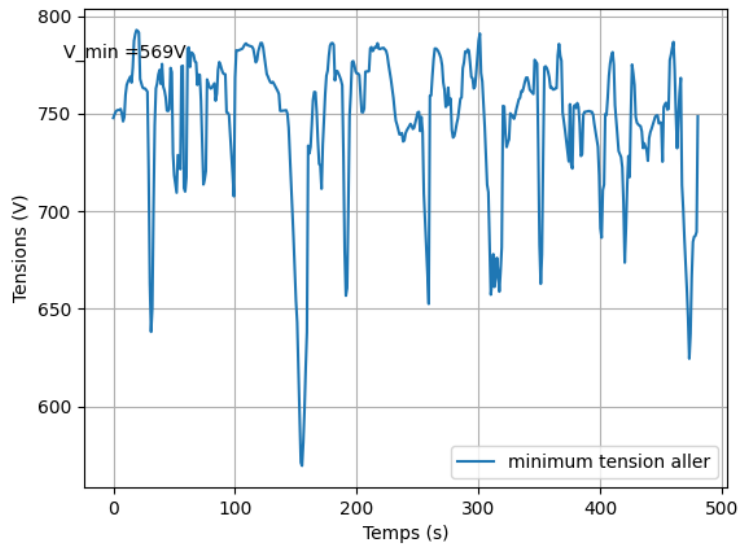


Figure 19 : exemple de courbe d'évolution du minimum de la tension

3.8.1.2. Courants dans la LAC

En appliquant la loi d'Ohm, la mesure de la différence de potentiel entre les extrémités d'un segment de LAC et sa résistance correspondante permet d'obtenir le courant électrique instantané de cette branche. Cette grandeur nous permet ensuite de déterminer la valeur moyenne quadratique du courant sur l'ensemble de la durée de la simulation.

Le courant admissible dans la LAC est déterminé en fonction de divers facteurs tels que la section de la ligne, la matière utilisée, la température, les normes de sécurité et les exigences du projet. Si le courant dépasse cette limite, cela peut entraîner des dommages à la LAC et au pantographe, ainsi qu'une perturbation de la circulation ferroviaire.

3.8.1.3. Courants débités par les SST

D'après la modélisation des sous-stations, le courant des SST est déterminée par l'équation :

$$I_{sst1} = \frac{U_0 - V_1}{R_s}$$

Cette donnée de sortie nous intéresse en valeur instantané, en valeur moyenne sur 1 min, en valeur moyenne sur 2h et en valeur moyenne sur toute la journée.

Dans notre exemple de la Figure 20 : on affiche l'évolution de la valeur instantanée du courant de la sous-station pour chaque pas de temps. Cette courbe permet au concepteur de vérifier si le courant ne dépasse pas les valeurs autorisées par la norme.

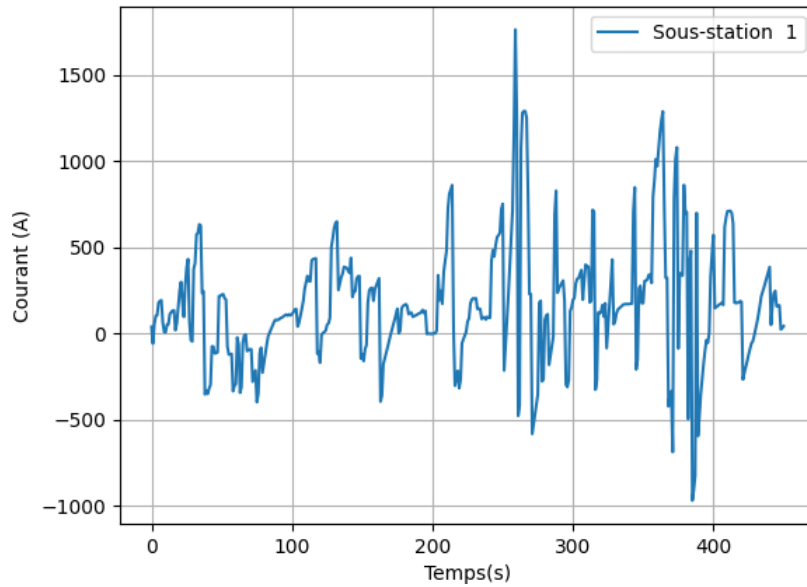


Figure 20 : exemple de courbe d'évolution de courant d'une sous-station

3.8.1.4. Tensions rail-sol

Si en reprend la Figure 16, on appelle chute de tension la différence de tension entre la rame et la sous-station ($V_4 - V_0$). Cette chute de tension enregistré au niveau de la rame est causée par la résistance de la LAC et la résistance du rail. La tension rail-sol est la partie de la chute de tension liée à la résistance du rail.

$$U_{R/S} = \frac{\max(\text{chutes de tension}) \cdot R_{\text{rail}}}{R_{\text{rail}} + R_{\text{LAC}}}$$

La tension rail/sol doit être vérifiée en moyenne quadratique sur les différentes durées indiquées dans le Tableau 4. Ces valeurs sont spécifiées par les normes ferroviaires.

Usuellement, on vérifie la tension pour l'instant de la simulation qui enregistre la plus grande chute de tension. Si cette valeur est inférieure à 120 V, il n'est plus utile de vérifier la valeur moyenne enregistrée sur les autres durées.

Durée (s)	U (V)
>300	120
300	150
1	160
0.9	165
0.8	170
0.7	175

Tableau 4 : Tableau des valeurs limites de la tension rail/sol

3.8.2. Validation de l'outil de simulation

Afin de valider notre nouvel outil de simulation, nous nous sommes basés sur l'outil DLTA1 déjà présent chez ARTELIA. La comparaison entre les deux outils a été réalisée sur une ligne simple. Sur la Figure 21, sont représentés les minimums des tensions des rames en fonction du temps pour les deux outils de simulation. Les résultats de cette comparaison sont très satisfaisants, avec une erreur quadratique de 0.02 V.

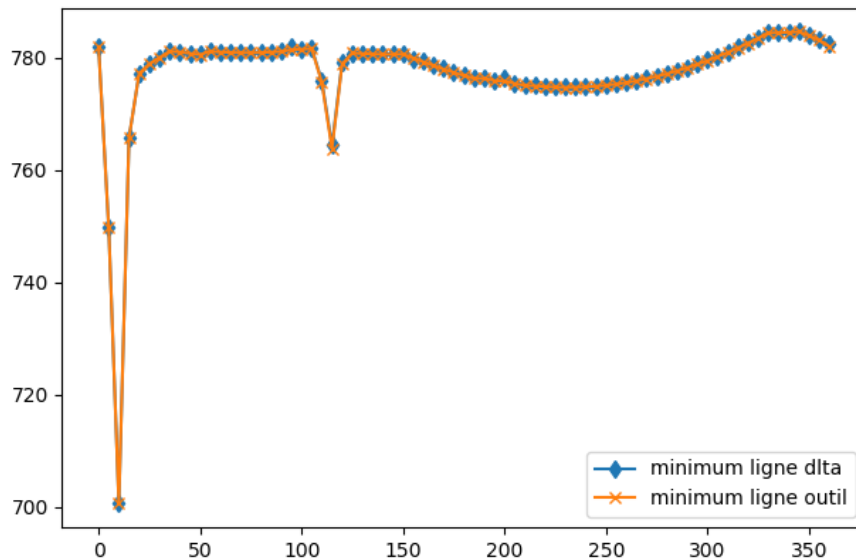


Figure 21: Comparaison des minimums de tensions des rames en fonctions du temps entre deux outils de simulation

Le temps de calcul de notre nouvel outil sur l'exemple simple est de 13 secondes contre 35 minutes pour DLTA1 l'ancien outil d'ARTELIA.

3.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les différentes étapes d'une simulation d'une ligne de tramway ou de métro. La modélisation consiste à remplacer chaque élément de ligne avec son équivalent en circuit électrique. La mise en équation permet de créer un système d'équation à partir du circuit électrique en utilisant la loi des nœuds.

La phase de résolution et du post-traitement permet au simulateur de calculer les différentes grandeurs électriques de l'infrastructure de la ligne de tramway ou de métro.

Grace à ce travail sur la partie simulation, nous avons la possibilité de calculer les performances et les contraintes d'une ligne de tramway ou de métro à partir de l'infrastructure proposée. A noter que la simulation est effectuée à la fois pour le mode nominal et les modes dégradés.

Dans le chapitre suivant nous allons inverser la problématique en recherchant cette fois l'infrastructure qui permet de passer les contraintes et de maximiser les performances demandées par les clients.

4. Optimisation de l'infrastructure électrique d'une ligne de tramway ou de métro

4.1. Introduction

De manière générale, la recherche de l'optimalité d'un système électrique ferroviaire consiste à minimiser les coûts d'investissement (construction de l'infrastructure électrique) et d'exploitation (maintenance et consommation électrique) tout en maximisant la disponibilité et la capacité de la ligne à fournir la puissance demandée par les trains. Il existe deux approches pour atteindre ces objectifs.

La première approche consiste à optimiser le trafic ferroviaire à infrastructure fixée : il s'agit de faire varier des paramètres liés à l'exploitation ferroviaire (vitesse des rames, horaires des départs, etc.) afin d'optimiser des critères tels que la consommation énergétique ou la disponibilité de la ligne. Les coûts de l'infrastructure n'interviennent pas. Cette approche s'applique typiquement à des lignes ferroviaires existantes sur lesquelles on souhaite augmenter le trafic. Il faut alors adapter le trafic à l'infrastructure en place. L'adaptation du trafic peut également être envisagée pour des situations d'infrastructure dégradée ou d'incident sur la ligne [58].

A l'inverse, la seconde approche consiste à optimiser les choix d'infrastructure, à trafic fixé : il s'agit de faire varier des choix de conception d'infrastructure de l'alimentation électrique afin d'optimiser les coûts d'infrastructure et d'exploitation ainsi que la disponibilité de la ligne. Cette approche est utilisée pour les projets de construction de nouvelle ligne ferroviaire pour lesquels, généralement, les choix de conception d'infrastructures sont de la responsabilité d'un maître d'œuvre (concepteur). Les paramètres liés au trafic sont contraints par le cahier des charges du projet et le maître d'œuvre n'a pas la possibilité de les modifier.

Comme indiqué dans le chapitre d'introduction générale, l'objectif principal de cette thèse est de développer au sein d'ARTELIA une nouvelle démarche de dimensionnement des infrastructures électriques de tramway, fondée sur un optimiseur capable de fournir aux ingénieurs des éléments objectifs de prise de décision. Nos travaux concernent alors la deuxième approche, où il s'agit de concevoir et dimensionner une infrastructure électrique qui permet d'alimenter le trafic défini par le cahier des charges du projet, dans le respect des normes électriques ferroviaires en vigueur.

Dans la suite de ce chapitre, nous utiliserons deux notions différentes.

- Une solution acceptable est une solution qui répond au cahier des charges, sans considération de performance (coût d'infrastructure, coût énergétique, disponibilité de la ligne).
- Une solution optimisée est une solution acceptable qui présente un compromis entre les coûts et la disponibilité de la ligne² tel que l'on ne peut pas améliorer un des critères sans détériorer l'autre.

4.1.1. Démarche actuelle

Lors de la phase de dimensionnement, l'ingénieur responsable de la conception utilise son expérience pour proposer une solution, puis il la teste grâce à un simulateur de traction électrique pour vérifier si elle est acceptable. Quand une solution acceptable est obtenue par essais-erreurs, l'ingénieur peut essayer de l'améliorer. Cela consiste à tester en simulation des solutions proches de la solution acceptable initiale avec pour objectif d'obtenir une solution qui présente un meilleur coût ou un meilleur niveau de disponibilité. La méthode utilisée consiste à faire varier une à une les variables de dimensionnement. Le concepteur est aidé

² La disponibilité de la ligne est caractérisé par la marge de tension, c'est-à-dire la différence entre la tension minimale d'alimentation des rames observée dans les simulations et la tension minimale imposée par la norme ferroviaire

dans une partie de ses choix par des préconisations de positionnement d'infrastructure [59] qui donnent des indications pour commencer la recherche de solutions. Par exemple, la norme NF EN 50388 préconise une distance d'environ 2 km entre sous-stations voisines, mais cette recommandation doit être adaptée en fonction des espaces effectivement disponibles pour installer des sous-stations. La décision de poursuivre ou non la recherche de solutions résulte essentiellement de la comparaison entre elles des solutions testées et du ressenti de l'ingénieur.

Ces recherches d'amélioration de solution par essai-erreur (Figure 22) reposent sur une connaissance empirique et peuvent être longues, sans garantie d'aboutir à une solution acceptable. De plus, la qualité de la solution retenue dépend principalement des connaissances de l'ingénieur et une grande incertitude demeure quant à l'optimalité de la solution choisie par l'ingénieur.

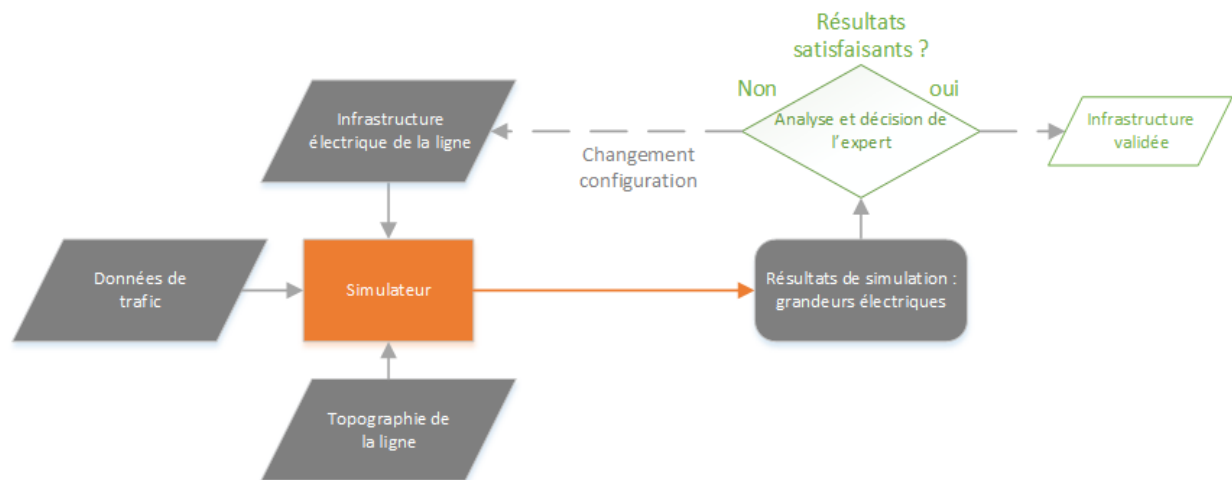


Figure 22 : Démarche classique de dimensionnement d'infrastructure d'alimentation électrique

4.1.2. Démarche proposée

La démarche que nous proposons (Figure 23) vise à automatiser la recherche de la solution et à produire des solutions optimales. Pour cela, le problème métier est formalisé et traduit en un problème d'optimisation bi-critère (maximisation de la disponibilité de la ligne et minimisations des coûts). Ce problème est résolu afin d'obtenir les meilleurs résultats au sens de Pareto, c'est-à-dire qu'on ne peut pas améliorer l'un des critères sans dégrader l'autre.

La formalisation de la démarche de dimensionnement passe par la définition des variables de décision et des critères d'évaluation des solutions ainsi que la prise en compte des contraintes issues du cahier de charges. Les variables de conception sont des grandeurs continues ou discrètes qui caractérisent les composants que l'on souhaite positionner et/ou dimensionner (exemple : positions des sous-stations). Les critères d'évaluation sont des valeurs numériques qui caractérisent les performances de l'infrastructure à optimiser (coût d'infrastructure, marge de tension). Les contraintes sont les conditions à remplir pour que la solution soit acceptable (respect des normes ferroviaires).

Dans notre cas, le problème traité est un problème bi-critère dont l'objectif est à la fois de minimiser les coûts (investissement et exploitation cumulée sur 30 ans) et de maximiser la marge de tension qui caractérise la robustesse de l'alimentation de la ligne face aux incertitudes de trafic. Ces critères étant contradictoires, la méthode mise en œuvre doit permettre à l'ingénieur d'étudier différents compromis entre ces objectifs.

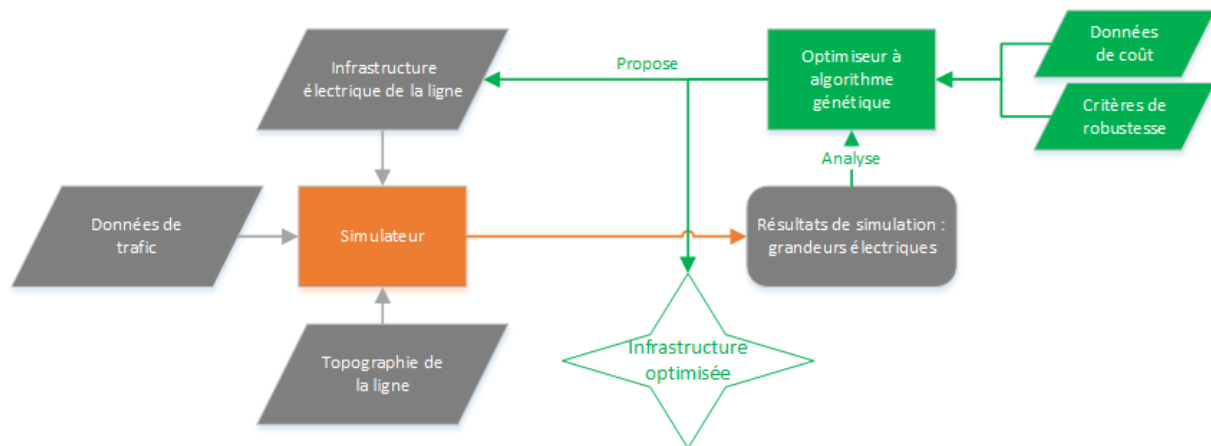


Figure 23: La nouvelle démarche de dimensionnement proposée

4.2. Formulation du problème métier

Le problème métier consiste à choisir et positionner les équipements qui constituent le réseau d'alimentation électrique de la ligne de tramway de façon à ce que cette infrastructure puisse faire fonctionner la ligne dans les conditions de trafic et de fonctionnement définies dans le cahier des charges, et ce au moindre coût et avec le maximum de fiabilité. Pour être résolu par des méthodes d'optimisation, ce problème métier doit être traduit en des termes mathématiques. C'est ce qu'on appelle la formulation du problème, qui consiste à répertorier les variables de décision, les fonctions-objectifs et les contraintes du problème à partir du cahier des charges.

4.2.1. Variables de décision

Dans le cadre de ces travaux, les équipements³ du réseau à choisir sont les sous-stations, les *feeders* et les équipotentielles qui doivent permettre à la ligne de fonctionner dans le respect des normes pour alimenter un trafic défini. En pratique, les caractéristiques techniques des équipements sont connues (paramètres internes des sous-stations, résistances linéiques des *feeders* et des équipotentielles) et il s'agit de déterminer le nombre de chaque type d'équipement et de placer ces équipements le long de la ligne.

Les variables de décision sont donc :

- le nombre de sous-stations et leurs positions,
- le nombre de *feeders* et les positions de leurs extrémités,
- le nombre d'équipotentielles et leurs positions.

Notons que cette représentation permet que deux *feeders* ou plus soient en parallèle sur toute ou une partie de leur longueur.

Il s'agit d'un problème d'optimisation dont on ne connaît a priori pas le nombre de variables car on ne sait pas à l'avance combien il faudra de sous-stations, de *feeders* et d'équipotentielles, et donc combien de positions d'équipement il faudra déterminer pour obtenir une solution acceptable. Pour contourner cette difficulté, nous avons choisi de borner le nombre de chaque type d'équipement et d'introduire N_{sst}^{max} , N_{feed}^{max} et N_{equ}^{max} , les nombres maximaux de sous-stations, de *feeders* et d'équipotentielles. Ces nombres sont choisis par l'ingénieur lors de la formulation du problème, grâce à son expertise.

Une fois ces bornes fixées, les variables de décision deviennent :

- $\{X_{sst\ i}\}_{i=1, N_{sst}^{max}}$: les positions des sous-stations,

³ NB : les équipements sont aussi appelés éléments dans ce mémoire

- $\{X_{feeder\ i\ debut}, X_{feeder\ i\ fin}\}_{i=1, N_{feed}^{max}}$, les positions des extrémités des feeders
- $\{X_{equ\ i}\}_{i=1, N_{equ}^{max}}$, les positions des équipotentiels.

et chaque variable de décision contient soit une valeur numérique qui correspond à la position de l'équipement, soit une valeur particulière (NaN) qui indique que l'élément n'existe pas sur la ligne. Ce choix de représentation des variables de décision permet de travailler avec un nombre de variables de décision fixe, indépendamment du nombre effectif de sous-stations, *feeders* et équipotentiels des différentes configurations testées.

Les nombres N_{sst}^{max} , N_{feed}^{max} et N_{equ}^{max} sont des paramètres de l'optimisation fixés par l'utilisateur lors de la formulation du problème. Ces paramètres sont très importants pour la rapidité de convergence de l'optimisation car ils définissent la taille de l'espace dans lequel la solution est recherchée. Par exemple, si l'optimiseur est autorisé à générer des configurations comportant un trop grand nombre de sous-stations, ces solutions seront très probablement acceptables mais ne seront pas retenues puisqu'elles seront trop chères et largement surdimensionnées. Cela conduit donc à des calculs inutiles. À l'inverse, si l'optimiseur est limité à un trop petit nombre de sous-stations, l'exploration de l'espace de recherche sera plus rapide, mais au risque de ne jamais trouver de solution acceptable.

Ces bornes doivent être choisies par l'utilisateur à partir de ses connaissances métier afin de lancer l'optimiseur sur un espace de recherche adapté. Par exemple, la norme Afnor [59] peut guider le choix du nombre maximum de sous-stations. Cette norme indique que la distance préconisée entre deux sous-stations est de 2 km. Nous proposons alors de calculer le nombre maximum de sous-stations sur la base d'une sous-station tous les kilomètres, selon la formule ci-dessous où L est la longueur de la ligne exprimée en kilomètres.

$$N_{SST}^{max} = \frac{L}{1}$$

Notons qu'il est également pertinent de définir un nombre minimum de sous-stations, N_{SST}^{min} , sur la base d'une station tous les 3 km, par exemple. Ce nombre minimum interviendra dans les contraintes du problème. Cela évite de tester des solutions dont on peut savoir a priori qu'elles ne seront pas acceptables.

$$N_{SST}^{min} = \frac{L}{3}$$

Les extrémités des *feeders* sont généralement reliées aux sous-stations. Nous proposons donc d'exprimer le nombre maximum de *feeders* en fonction du nombre de sous-stations.

$$N_F^{max} = N_{SST}^{max} - 1$$

Ce calcul permet de définir un nombre cohérent de *feeders*. Le nombre minimum est nul puisqu'une solution sans *feeders* est envisageable. L'algorithme détermine ensuite les positions des extrémités de chaque *feeder*, et donc indirectement leur longueur. Il peut aussi en placer plusieurs en parallèle. Le choix du nombre maximum de *feeders* reste uniquement une recommandation.

Le nombre maximum d'équipotentiels est calculé en prenant comme critère une distance minimale entre équipotentiels. Généralement, la distance minimale utilisée est de 300 m.

$$N_{equ}^{max} = \frac{L}{0.3}$$

4.2.2. Contraintes du problème

Les solutions admissibles doivent respecter différentes contraintes. Certaines sont liées au respect des normes (2.2.1) alors que d'autres sont liées au cahier des charges de la ligne de tramway et sont spécifiques à chaque projet (disponibilité du terrain, possibilité de raccordement au réseau électrique, etc.). L'ensemble des contraintes doit être soigneusement répertorié et intégré dans la formulation du problème d'optimisation pour définir les solutions acceptables.

4.2.2.1. Contraintes liées aux normes électriques

Comme indiqué dans 2.2.1, les contraintes électriques normatives concernent les tensions aux bornes des rames, les courants des sous-stations, les courants de la LAC et la tension rail-sol. Certaines contraintes portent sur des valeurs instantanées des tensions et des courants et d'autres nécessitent de calculer une moyenne sur des fenêtres temporelles glissantes.

4.2.2.2. Contraintes de positionnement

Les contraintes de positionnement sont imposées par le cahier des charges. Il s'agit le plus souvent de contraintes sur le positionnement des sous-stations, souvent tributaire du foncier disponible le long de la ligne de tramway ou de métro. Le raccordement au réseau électrique peut également entraîner des contraintes de positionnement des sous-stations. D'autres limitations peuvent exister, comme dans le cas des lignes dont les voies aller et retour peuvent être éloignées l'une de l'autre sur certaines portions de ligne : l'utilisation d'équipotentiels n'est alors pas possible dans ces zones.

4.2.2.3. Contraintes d'exploitation

Ces contraintes peuvent également concerner des modes d'exploitation spéciaux ou des exigences de fiabilité de la ligne qui nous permettent de définir les modes dégradés.

4.2.2.4. Gestion des modes dégradés

Les modes dégradés liés à l'infrastructure sont des scénarios dans lesquels certaines contraintes peuvent être violées au prix d'un surcoût lié à la transformation de la sous-station en une sous-station double. La sous-station double est une sous-station avec deux arrivées et deux transformateurs qui vont automatiquement se suppléer en cas de panne. La sous-station double garantit un service continu en cas de panne.

4.2.3. Fonctions-objectifs

Les fonctions-objectifs ont pour but d'évaluer les solutions selon les critères à améliorer. Pour notre problème, nous souhaitons d'une part minimiser un coût total, somme du coût d'investissement et du coût de l'énergie consommée sur la durée de vie de la ligne (30 ans), et d'autre part maximiser la marge de tension, c'est-à-dire la différence entre le plus bas niveau de tension d'alimentation des rames observé au cours des simulations et la tension minimale imposée par la norme ferroviaire. Les trois sections suivantes détaillent les méthodes de calcul de chacun de ces critères.

4.2.3.1. Coût d'infrastructure

Le coût d'infrastructure est la somme des coûts de chaque élément de la ligne. Cela représente l'investissement initial pour la construction de la ligne. Les bureaux d'ingénierie disposent en interne du coût de chaque élément. Ces coûts sont actualisés de façon continue au fil des projets. On notera que les coûts de la ligne aérienne de contact et des rails ne sont pas pris en compte car ils ne dépendent que de la longueur de la ligne et sont les mêmes quels que soient le nombre et la position des équipements choisis.

$$J_{infr} = \sum_1^{N_{sst}} J_{sst} + \sum_1^{N_{feed}} J_{feed} + \sum_1^{N_{equ}} J_{equ}$$

Dans cette formule, les notations sont les suivantes :

- J_{infr} : coût total de l'infrastructure
- J_{sst} : coût unitaire d'une sous-station
- J_{feed} : coût d'un *feeder*, proportionnel à sa longueur
- J_{equ} : coût unitaire d'un équipotentiel

4.2.3.2. Coût de la consommation d'énergie

Le coût de la consommation d'énergie correspond à la dépense en électricité fournie par le réseau électrique aux sous-stations pour alimenter le trafic. Ce coût est calculé à partir de la consommation électrique de la ligne et du prix d'achat de l'électricité, nécessairement avec des hypothèses simplificatrices. Afin d'homogénéiser ce coût par rapport à celui de l'infrastructure, le coût de l'énergie est calculé sur toute la durée de vie de la ligne, c'est-à-dire 30 ans.

Pour estimer l'énergie nécessaire pour alimenter une ligne de tramway ou de métro, il faut distinguer la consommation électrique pendant les heures de pointe et pendant les heures creuses. Les heures de pointe sont celles où les trains sont les plus fréquents et les plus chargés de passagers, tandis que les heures creuses sont celles où ils sont moins fréquents et moins chargés.

Dans le cadre de l'étude de dimensionnement d'une ligne de tramway ou de métro, les hypothèses d'exploitation prises pour la simulation correspondent aux heures de pointe. La consommation électrique en heures de pointe est alors estimée en extrapolant la consommation électrique obtenue lors de cette simulation sur la durée de vie de la ligne. Pour les heures creuses, la consommation électrique est calculée en utilisant le rapport entre la fréquence de passage des rames en heures creuses et celle en heures de pointe. Cela permet d'éviter de refaire une simulation supplémentaire pour estimer l'énergie consommée pendant les heures creuses.

Il suffit ensuite de connaître le nombre de jours d'exploitation annuelle du réseau de transport ainsi que le prix de l'électricité pour estimer le coût énergétique total.

Le calcul de l'estimation globale du coût énergétique est donné par la formule suivante :

$$J_e^{totale} = C_e^{sim} \cdot J_{kwh} \cdot \frac{T_{hp} + f_{eq} \cdot T_{hc}}{T_{sim}} \cdot n_{j/an} \cdot T_{vie}$$

Dans cette formule, les notations sont les suivantes :

- C_e^{sim} : consommation électrique totale durant la période de fonctionnement simulée (donnée de sortie du simulateur, exprimée en kWh)
- J_{kwh} : prix du kWh d'électricité (aux alentours de 0.17 euro).
- $T_{hp}; T_{hc}$: nombre d'heures respectivement pleines et creuses pendant la journée.
- f_{eq} : rapport entre la fréquence de passage des rames en heures creuses et celle en heures de pointe.
- T_{sim} : durée de fonctionnement simulée en heures
- $n_{j/an}$: nombre de jours d'exploitation annuelle du réseau de transport.
- T_{vie} : durée de vie d'une ligne de tramway, généralement estimée à 30 ans.

Ces coefficients sont propres à chaque projet et sont donc des données d'entrées du problème.

4.2.3.3. Marge de tension

La marge de tension permet d'introduire un facteur de sécurité par rapport au respect de la norme ferroviaire sur la différence de potentiel aux « bornes » des tramways, c'est-à-dire la différence de potentiel entre le pantographe et les rails. Rappelons que cette tension ne doit jamais être inférieure à une certaine valeur seuil, notée $U_{min\ norme}$. La marge de tension, notée ΔU , est alors le plus petit écart observé entre la différence de potentiel aux bornes des rames tout au long de leur trajet, et la valeur seuil.

$$\Delta U = \min_{i, t} (U_{rame\ #i, t} - U_{min\ norme})$$

Dans cette formule, $U_{rame\ #i, t}$ est la différence de potentiel aux bornes de la rame #i, à l'instant t.

La marge de tension traduit la disponibilité de l'infrastructure d'alimentation électrique de la ligne et caractérise la capacité de la ligne à alimenter un trafic différent de celui utilisé lors de l'étude de dimensionnement. Plus cette marge est grande, plus la ligne est robuste électriquement face aux aléas de trafic (incidents, retards, etc.) ou aux pannes matérielles.

4.3. Méthodes d'optimisation

Le problème d'optimisation de l'infrastructure d'alimentation fixe des lignes ferroviaires est un problème avec une forte non-linéarité. Il existe différentes variables de décision à régler et des contraintes à respecter. Dans notre cas, on s'intéresse à la création d'une boucle d'optimisation des choix concernant le nombre et la position des éléments de l'infrastructure d'alimentation électrique pour minimiser le coût global de la ligne et maximiser la marge de tension en respectant les contraintes liées aux projets.

Dans cette section, un état de l'art non exhaustif des méthodes d'optimisation multi-objectifs est dressé, en se focalisant sur les méthodes les plus utilisées pour des problèmes similaires au nôtre (2.4) : ce sont notamment les algorithmes génétiques. D'autres méthodes connues seront brièvement présentées avec la référence documentaire correspondante pour plus d'informations en cas de besoin.

4.3.1. Définition d'un problème d'optimisation mono-objectif

D'une manière générale, on peut exprimer mathématiquement un problème d'optimisation mono-objectif de la façon suivante :

$$\min_{x \in C} f(x)$$

où $C = \{x \in D : c_j(x) \leq 0, j \in J\} \subset \mathbb{R}^n$ est le domaine des décisions faisables, D est un sous-domaine de \mathbb{R}^n . La fonction $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ est la fonction objectif et les fonctions $c_j : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ pour $j \in J$ définissent des contraintes inégalités. Les points qui respectent ces contraintes définissent le domaine des décisions faisables.

Les problèmes d'optimisation sont le plus souvent classés selon le domaine de définition de ses variables et suivant certaines propriétés mathématiques de la fonction-objectif et des contraintes. Cette classification permet ensuite de guider notre choix vers une méthode de résolution adaptée [60].

Les problèmes combinatoires sont ceux dont les variables sont discrètes (i.e. binaires ou entières). Les problèmes continus sont ceux dont les variables prennent leur valeur dans \mathbb{R} . Mis à part certains cas particuliers, les problèmes discrets sont souvent plus difficiles que les problèmes continus, même si le nombre de possibilité est a priori fini.

Parmi les problèmes continus, il est souvent utile de déterminer certaines propriétés mathématiques des contraintes et de l'objectif, comme la linéarité ou la convexité. Il en résulte une taxinomie assez riche des problèmes d'optimisation (programmation linéaire, quadratique, etc.). Par exemple, si les fonctions f et c_j sont convexes, on dit alors que le problème est convexe.

4.3.2. Optimisation multi-objectifs et optimalité au sens de Pareto

En réalité, les problèmes d'optimisation sont rarement mono-objectifs et il s'agit en général de satisfaire plusieurs objectifs souvent antagonistes. La fonction-objectif est définie par $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^k$ et renvoie un vecteur $f(x) = (f_1(x), \dots, f_k(x))$ dont la dimension $k \geq 2$ est égale au nombre d'objectifs à optimiser. Il n'y a pas de relation d'ordre dans \mathbb{R}^k ,

Le rôle de l'optimisation multi-objectif [61] est d'améliorer toutes les composantes de la fonction objectif et de trouver des compromis entre les différents objectifs contradictoires. Il existe alors deux approches pour gérer ces compromis dans le cadre d'une optimisation multi-objectifs.

4.3.2.1. L'approche a priori (ou la transformation en problème monoobjectif)

L'approche *a priori* suppose la création d'une fonction modélisant le compromis que l'on désire faire entre les différents objectifs. Il sera nécessaire alors de connaître *a priori* le poids de chaque objectif afin de les mélanger dans une fonction mono-objectif unique. Ceci reviendra alors à transformer un problème multi-objectif en un problème mono-objectif et le résoudre avec les méthodes d'optimisation classiques (Tableau 5). Pour notre cas de figure, les poids des objectifs peuvent varier d'une application à une autre, et on ne peut s'exprimer clairement sur le poids de chaque objectif en amont d'un projet. De plus les objectifs à optimiser ne sont pas commensurables (exprimés avec des unités différentes) et l'espace de recherche défini au début peut ne pas être représentatif du problème initial. Il n'est donc pas pertinent d'utiliser cette approche-là dans notre problématique.

4.3.2.2. L'approche a posteriori (ou constitution du front de Pareto)

L'approche *a posteriori* cherche à fournir au décideur un ensemble de bonnes solutions bien réparties. Le décideur peut ensuite, en fonction de ses préférences, choisir celle qui l'arrange le mieux. Ce mode opératoire peut être plus facile dans la mesure où il ne nécessite pas une formulation des préférences de la part de l'utilisateur ni la présence du décideur pendant le processus d'optimisation, mais il peut être beaucoup plus long puisqu'on cherche un plus grand ensemble de solutions par rapport aux méthodes *a priori* (Tableau 7).

Afin de considérer et comparer les performances des différentes solutions trouvées, il faut introduire le concept d'optimalité au sens de Pareto

Le concept de dominance Pareto est défini comme suit [62]. Soient deux vecteurs de décision y et z . On écrit :

- $y < z$ (y domine z) $\Leftrightarrow \forall i \leq k, f_i(y) \leq f_i(z)$ et $\exists i_0 \mid f_{i_0}(y) < f_{i_0}(z)$
- $y \leq z$ (y domine faiblement z) $\Leftrightarrow \forall i \leq k, f_i(y) \leq f_i(z)$
- $y \parallel z$ (y est indifférent par rapport à z) \Leftrightarrow si $\exists i \leq k, f_i(y) < f_i(z)$ et $\exists j \leq k, f_j(y) > f_j(z)$.

La Figure 24 illustre ces définitions pour un problème bi-objectif : quelques points de l'espace de décision sont positionnés dans l'espace objectif afin de comparer leurs performances. Le point A domine le point B car il réalise une meilleure performance pour chacun des deux critères : $f_1(A) \leq f_1(B)$ et $f_2(A) \leq f_2(B)$. En revanche, les points B et E sont indifférents car B réalise une meilleure performance pour le critère 1, mais E réalise une meilleure performance pour le critère 2 : $f_1(B) \leq f_1(E)$ et $f_2(E) \leq f_2(B)$.

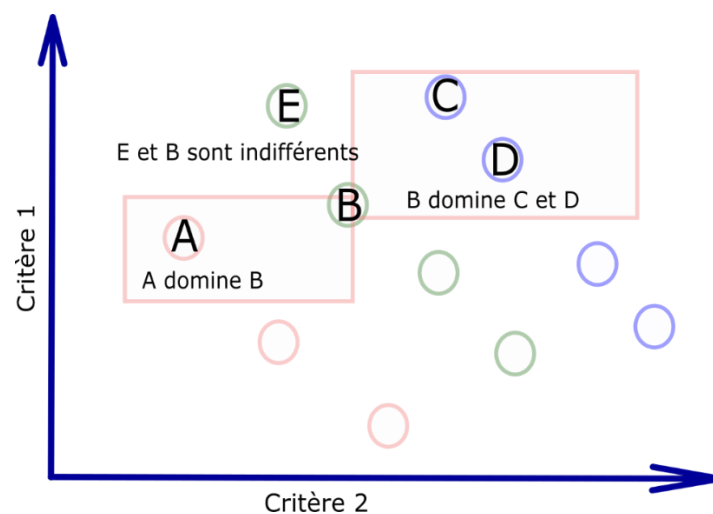


Figure 24 : Exemples des relations possible entre solutions

On dit qu'un vecteur de décision x est non-dominé par rapport à un ensemble Z de vecteurs de décision, si $\forall z \in Z, x \prec z$, autrement dit si x domine tous les points de l'ensemble Z .

En se basant sur cette définition on peut dire que l'ensemble des solutions non-dominées est l'ensemble des solutions indifférentes les unes par rapport aux autres, c'est-à-dire telles qu'il n'est pas possible d'améliorer un critère d'optimisation sans en dégrader au moins un autre.

Les points représentés en rose sur la *Figure 24* constituent l'ensemble des solutions non dominées.

4.3.2.3. Conclusion

De nombreux problèmes d'optimisation dans le monde réel sont naturellement formulés comme des problèmes multi-objectifs. Toutefois, en raison des défis liés à leur résolution, ils sont parfois simplifiés en problèmes à objectif unique. Cependant, cette transformation est souvent subjective. Les problèmes multi-objectifs génèrent généralement plusieurs solutions optimales, appelées solutions de Pareto-optimal, en raison de multiples objectifs en conflit. Idéalement, un algorithme d'optimisation multi-objectifs doit trouver plusieurs solutions de Pareto-optimal tout en préservant une diversité importante dans les valeurs des objectifs et des variables de décision.

4.3.3. Différentes approches pour l'optimisation multi-objectifs

Comme indiquée dans le paragraphe précédent, il existe deux approches suivant le traitement des objectifs du problème d'optimisation multi-objectifs. Une approche de traitement simultané des objectifs et une approche de transformation en problèmes mono-objectifs.

- Transformation en problème mono-objectif ou méthodes agrégées (Tableau 5) : Ces approches fondées sur la transformation du problème multi-objectif en un problème mono-objectif. Le processus de transformation du problème multi-objectifs à un problème mono-objectif dépend de la méthode choisie et des paramètres de conversion de cette méthode. Dans la plupart des cas, on s'attend à ce que la solution optimale du problème d'optimisation mono-objectif soit une solution de Pareto-optimal. Une telle solution dépend des paramètres utilisés dans la méthode. Pour trouver une solution Pareto-optimal différente, il est nécessaire de modifier les paramètres et de résoudre à nouveau le nouveau problème d'optimisation mono-objectif qui en résulte. Ainsi, pour trouver N solutions de Pareto-optimal différentes, au moins N problèmes d'optimisation mono-objectif distincts doivent être formulés et résolus. A condition de fixer correctement les paramètres des algorithmes, certaines de ces méthodes répétées à plusieurs reprises permette de trouver plusieurs solutions Pareto optimales différentes. A noter que le fait de trouver plusieurs solutions pareto-optimal ne garantit pas de trouver l'intégralité du front pareto.

Principe de la transformation en problème mono-objectif	Avantages	Inconvénients
Pondération [63] Donne un poids à chaque critère pour créer une fonction objectif unique	Utilisation des méthodes de résolution en mono-objectif	Il n'est pas toujours facile de fixer des paramètres de pondération pour trouver une solution Pareto optimale différente Une méthode qui ne marche pas pour les espaces objectives non convexes.
ϵ-contraintes [64] Transforme les n objectifs en $n-1$ contraintes et un objectif	Utilisation des méthodes de résolution en mono-objectif	Il peut rendre sa résolution plus difficile à mesure que les objectifs sont contraints.

	Méthode qui marche avec les espaces convexes et non convexes	La solution trouvée dépend très fortement du paramétrage choisie.
La métrique pondérée [63] Les méthodes basées sur la métrique pondérée suggèrent de minimiser une métrique construite à partir de tous les objectifs	Utilisation des méthodes de résolution en mono-objectif Garantit de trouver toutes les solutions pareto optimal	Il est nécessaire d'optimiser tous les objectifs séparément pour calculer la métrique Une solution trouvée par itération
fonction d'utilité , l'utilisateur fournit une fonction relie tous les M objectifs. La tâche consiste ensuite à maximiser la fonction[64]	Très facile à mettre en place si les informations sur la valeur de la fonction d'utilité est disponible	Les solutions dépendent entièrement de la fonction utilité
Programmation d'objectifs [65] trouve des solutions qui s'efforcent d'atteindre des objectifs prédéfinis pour une ou plusieurs fonctions objectif, même en présence de contraintes ou d'objectifs contradictoires. La méthode vise à aider à la prise de décision dans des situations d'atteindre simultanément tous les objectifs de manière optimale.	Gestion de complexité et flexibilité , hiérarchisation des objectifs	Ne garantit pas forcément les meilleures solutions. Difficile à mettre en place Sensible aux données d'entrée et la hiérarchisation des objectifs.

Tableau 5:Méthodes basées sur la transformation en problèmes mono-objectif

- Traitement simultané ou approches de Pareto : Elles utilisent directement la notion d'optimalité Pareto dans leur processus de recherche. Le processus de sélection des solutions générées est fondé sur la notion de dominance. Cette approche travaille avec une population de solutions et s'efforce de les rapprocher du front de Pareto, qui représente l'ensemble des solutions non dominées. Les individus les plus proches du front de Pareto sont considérés comme les meilleurs compromis, tandis que la diversité parmi les individus est recherchée pour garantir la prise en compte de différentes alternatives. Cette approche permet ainsi d'explorer un large éventail de compromis possibles (Tableau 6 et Tableau 7) :

Principe de la méthode	Avantages	Inconvénients
Multiple Objective Genetic Algorithm MOGA [65] Le rang d'un individu dépend du nombre d'individus qui le dominant, et sa	Implémentation facile et solutions de bonne qualité	La performance dépend du réglage de la valeur du sharing ⁴

⁴ Fonction sharing : une fonction qui permet de favoriser la diversité de la population en dégradant les solutions surreprésentées et/ou en favorisant les solutions sous-représentées.

performance est calculée en fonction de la valeur de son rang.		
Non dominate sorted genetic algorithm NSGA [66] Séparé la population en plusieurs groupe suivant le degré de dominance au sens Pareto	Solutions diverses et bien réparties sur le front de Pareto	Complexe, temps de tri et de notation important et réglage des paramètres complexes
Niched-Pareto Genetic Algorithm NPGA [67] Tournoi basé sur la dominance Pareto	Solutions de bonne qualité et cette approche est plus rapide que les approches précédentes	La qualité des solutions est entièrement dépendante du bon réglage des paramètres de l'algorithme

Tableau 6: Méthodes basées sur la notion de dominance Pareto non élitiste

Principe de la méthode	Avantages	Inconvénients
Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) [68] Utilisation d'une archive externe contenant les solutions non dominées. Fonction performance similaire à MOGA. Une technique de clustering méthode de liaison moyenne pour garantir la diversité	Implantation facile et efficace. Solutions bien réparties sur le front sans paramètres supplémentaires à régler	Équilibrer la taille de la population externe est délicat L'algorithme de regroupement utilisé dans SPEA a une complexité supérieure à d'autres méthodes, ce qui peut entraîner des contraintes de performance.
Pareto Archived Evolution Strategy (PAES) [69] Utilisation d'une population annexe de taille déterminée permettant de stocker les solutions non-dominées . Utilisation du crowding (distance d'encombrement) pour la diversité	Implantation facile et efficace. Utilisation du crowding	Deux variables de plus à régler. Les dimensions de l'hypercube de recherche deviennent très larges près du front de Pareto.
Non dominate Sorting Genetic Algorithm II (NSGAII) [70] NSGA-II intègre un opérateur de sélection, basé sur un calcul de la distance de <i>crowding distance</i> , très différent de celui de NSGA	-Obtient des meilleurs résultats par rapport à NSGA -Utilisation du crowding distance permet d'avoir de la diversité	Le tri non dominé doit être effectué sur une population de taille double . Pertes de solutions pareto optimale au profit de solutions non dominées

Tableau 7 : Méthodes basé sur la notion de dominance Pareto élitiste

Dans la suite, on s'intéressera aux méthodes utilisant la dominance Pareto et notamment les algorithmes génétiques.

4.3.4. Les algorithmes génétiques

4.3.4.1. Introduction

Le problème multi-objectif vise à trouver un ensemble de solutions optimales (non dominées) qui représentent un compromis entre plusieurs objectifs, souvent en conflit les uns avec les autres.

Les algorithmes génétiques constituent des techniques de recherche et d'optimisation basées sur la théorie de la sélection naturelle développée par Charles Darwin. Ces techniques ont été popularisées par David Goldberg [66].

Ces méthodes utilisent directement la notion de dominance dans la sélection des solutions générées. L'objectif principal de chaque méthode d'optimisation multi-objectif est d'approximer le front de Pareto, qui est l'ensemble de toutes les solutions optimales possibles dans l'espace des objectifs. Cependant, les méthodes diffèrent dans leur approche pour atteindre cet objectif

Cet algorithme travaille avec une population de solutions plutôt qu'avec une seule solution à chaque itération. En commençant par un ensemble de solutions aléatoires, un algorithme génétique modifie la population actuelle pour former une population différente à chaque itération. Cette approche permet aux algorithmes évolutionnaires de trouver plusieurs solutions optimales au cours d'une seule simulation.

Deux types d'opérateurs caractérisent les algorithmes génétiques à savoir la sélection et la recherche. Dans l'opération de sélection, les meilleures solutions de la population actuelle sont mises en avant en les dupliquant dans le sous-ensemble de la population qui est choisi pour créer de nouvelles solutions. Dans l'opération de recherche, de nouvelles solutions sont créées en échangeant des informations partielles (dans l'espace des variables de décision) entre les solutions du sous-ensemble de reproduction et en les perturbant dans leur voisinage.

4.3.4.2. Sélection

Cette étape consiste à conserver le ou les meilleurs individus et à éliminer les pires individus de la population à la génération suivante. Cette technique assure que la performance du meilleur de la génération sera croissante au fil des générations tout en gardant la taille de la population constante. Il existe plusieurs méthodes couramment utilisées pour le processus de sélection dans les algorithmes génétiques[71]. Parmi les méthodes les plus courantes, on trouve :

- **Sélection par tournoi** : Cette méthode consiste à organiser des "tournois" entre un petit groupe d'individus choisis au hasard dans la population. Les individus du tournoi concourent pour être sélectionnés en fonction de leur fitness. Le gagnant du tournoi est sélectionné pour la reproduction. Le tournoi peut être organisé de manière à privilégier la diversité ou la meilleure performance (liée à la valeur de la fonction objectif).
- **Sélection par probabilité (ou Roulette Wheel Selection)** : Cette méthode attribue des probabilités de sélection à chaque individu proportionnellement à sa performance. Les individus de meilleure qualité ont une plus grande probabilité d'être sélectionnés, mais tous les individus ont une chance d'être choisis. Cela garantit une certaine diversité dans la sélection.
- **Sélection par rang** : Au lieu de prendre en compte la valeur absolue de la performance, la méthode de sélection par classement attribue des probabilités de sélection en fonction du classement des individus en termes de performance. Cela permet de minimiser l'impact des valeurs extrêmes de performance et de favoriser une meilleure exploration de l'espace des solutions.

Ces méthodes de sélection sont des choix courants, mais il existe de nombreuses autres variantes et approches de sélection, en fonction des besoins spécifiques du problème à résoudre. Le choix de la méthode de sélection dépend souvent de la nature du problème, de la recherche d'un bon équilibre entre exploration et convergence vers un optimum.

4.3.4.3. Création d'une nouvelle génération

La création des nouveaux individus se fait par le biais des mécanismes de croisement et de diversification.

4.3.4.3.1. Croisement

L'opération du croisement nécessite la participation de deux individus parents. La dynamique de l'opérateur croisement, inspirée directement du processus de multiplication des chromosomes humains, consiste à générer deux nouveaux individus « enfants » de la façon suivante :

- Croisement à un site

Un emplacement d'un gène du chromosome est tiré aléatoirement sur l'individu, puis un échange de segments de gènes des chromosomes des deux parents sont échangés autour de cet emplacement pour créer des nouveaux individus.

- Croisement uniforme

Chaque gène du chromosome est tiré aléatoirement parmi les gènes des parents ayant le même indice. Généralement le second enfant est construit en prenant le complémentaire du premier enfant.

4.3.4.3.2. Opérateurs de diversité

Dans le processus de recherche d'optimum, il est important de garantir que la recherche couvre de manière équilibrée toutes les régions de cet ensemble, plutôt que de se concentrer sur certaines parties au détriment d'autres. Cela permet de mieux comprendre la diversité des compromis entre les différents critères et de fournir au décideur une vue globale des solutions possibles.

Dans la littérature plusieurs techniques sont disponibles pour garantir la diversité des populations [72]–[76].

4.3.4.3.2.1 Mutation

L'opération de mutation consiste à modifier de manière aléatoire la valeur d'un gène d'un individu. Techniquement, la combinaison de la sélection et du croisement est suffisante pour assurer l'évolution de la population. Le rôle premier de la mutation est une exploration aléatoire de l'espace des solutions.

4.3.4.3.2.2 Notion de distance d'encombrement des individus (crowding distance)

La distance d'encombrement ou *crowding distance* [77] est une métrique utilisée pour préserver la diversité des solutions sur le front de Pareto. Cette procédure s'applique pour recouvrir le maximum d'espace des solutions acceptables en favorisant les individus isolés. L'algorithme sélectionne les individus avec la distance d'encombrement la plus élevée, c'est-à-dire les individus les plus distants par rapport aux individus voisins.

Dans les algorithmes génétiques standard, les individus générés dans la nouvelle génération remplacent les individus de la génération des parents. Le choix des individus à remplacer est uniquement basé sur la fonction performance. Ceci favorise les dérives génétiques, c'est-à-dire la concentration des individus vers les points qui ont des performances plus grandes.

4.3.4.3.2.3 Nichage séquentiel

Le nichage séquentiel exécute de façon séquentielle un algorithme d'optimisation unimodal en utilisant les connaissances acquises à chaque itération pour éviter la ré-exploration des régions où des solutions ont déjà été trouvées [78].

Cette méthode consiste à réajuster la fonction objective à l'aide d'une fonction de pénalisation lorsque l'algorithme converge. L'algorithme est ensuite relancé en écartant l'optimum trouvé avec une nouvelle fonction objectif.

L'un des problèmes majeurs de la technique de nichage séquentiel est l'apparition de solutions locales inexistantes à la suite du réajustement de la fonction d'adaptation.

D'autres méthodes avancées ont donc été proposées pour favoriser la formation de niches dans les algorithmes génétiques. Ces méthodes de diversification sont basées sur le nichage parallèle, comme par exemple les fonctions de partage et la *crowding distance*.

4.3.4.3.2.4 Fonction de partage

Le partage ou le *sharing* [79] consiste à utiliser la notion de pénalisation d'un individu en fonction de la concentration de la population dans ce voisinage. Cette technique permet d'éviter une très grande concentration autour du même point. Plus les individus sont proches et regroupés, plus la valeur d'adaptation est faible.

De cette façon, la convergence vers une seule zone est découragée puisque que la valeur de l'adaptation y sera limitée. Par conséquent, pour les individus dans des zones surpeuplées, éventuellement une autre région de l'espace devient plus attractive.

4.3.4.4. Hyperparamètres

Les algorithmes génétiques sont guidés par un certain nombre d'hyperparamètres à fixer par l'utilisateur à l'avance et dont dépend très fortement la convergence.

- La taille de la population est un paramètre important qui peut avoir un impact sur les résultats de l'algorithme. En général, une taille de population plus grande permet à l'algorithme de parcourir un plus grand espace de recherche et de trouver des solutions plus optimales. Si la taille de la population est trop petite, l'algorithme peut ne pas avoir assez de diversité génétique pour évoluer efficacement. Si la taille de la population est trop grande, l'algorithme peut devenir trop lent et consommer trop de ressources [70].
- La probabilité de croisement P_c et la probabilité de mutation P_m sont les deux hyper-paramètres qui influencent respectivement les processus d'intensification et de diversification. Bien que définir leur valeur dépende fortement du problème, P_c est très souvent pris entre 0.5 et 0.9, et P_m est souvent faible (5% voire 10%).
- Le nombre de génération est le nombre de fois que l'algorithme va répéter le processus de sélection, croisement et mutation pour arriver à la population contenant les meilleures solutions de notre problème d'optimisation.

Le processus de sélection, de croisement et de mutation améliore la qualité des individus et est répété un certain nombre de fois à taille de population constante. Si les hyper-paramètres de l'algorithme (taille de la population, nombre de générations et taux de mutation) sont bien choisis, la génération finale contient des individus proches du front de Pareto théorique.

4.3.5. Algorithme NSGA-II

Dans le cadre de nos projets, la solution d'un problème de dimensionnement doit être donnée dans un temps raisonnable. On a choisi alors d'utiliser les méthodes méta-heuristiques qui sont des heuristiques plus poussées qui se basent à la fois sur l'idée de parcourir l'espace de recherche, et d'explorer les zones qui paraissent prometteuses sans être bloquées par un optimum local.

Le problème d'optimisation que nous traitons est caractérisé par des variables discrètes et continues, un modèle non linéaire et non dérivable avec des contraintes sur la sortie du modèle et des objectifs éventuellement antagonistes.

Le choix de l'algorithme génétique se justifie par le fait qu'il fait partie des méthodes stochastique d'ordre zéro c'est-à-dire que seule la connaissance des valeurs de la fonction aux points d'échantillonnage est nécessaire

(pas de dérivée). Cette méthode répond alors à des problèmes d'optimisation dont les fonctions sont très irrégulières, mal conditionnées ou complexes à calculer du fait du nombre de variables très important ainsi que des domaines de recherches très vaste. Malgré son coût qui peut devenir très grand, elle a été choisie puisque les autres méthodes classiques plus rapides d'un point de vue calcul ne sont pas adaptées.

D'autres algorithmes évolutionnaires pouvaient néanmoins être choisis/testés pour répondre au besoin de notre projet.

Dans le cadre de la thèse, nous nous placerons dans le cadre de l'approche *a posteriori* (ensemble de solutions Pareto-optimales en optimisation bicritères) puisque, en général, on ne connaît pas les préférences du décideur en amont du projet. Dans quelques cas très rares, les préférences peuvent être connues au début du projet, elles peuvent néanmoins évoluer par la suite. Cette approche nous offre alors un panel de choix de compromis mais nécessite des algorithmes assez performants.

Nous avons choisi d'utiliser un algorithme génétique NSGA2 contenu du nombre de bonnes références à son utilisation dans la bibliographie et nos connaissances propres concernant ce type d'algorithme.

De manière générale on peut écrire notre problème sous la forme mathématique suivante :

$$\min_{x \in C} (f(x)) = (f_c(x), f_m(x))$$

Tel que $C = \{x \in D : c_j(x) \leq 0, j \in J\} \subset \mathbb{R}^n$ est le domaine des décisions faisables, D est un sous-domaine de \mathbb{R}^n . \mathbb{R}^n et \mathbb{R}^2 sont respectivement conçus comme l'espace de décision et l'espace des objectifs.

Les fonctions $f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{+\infty\}$ pour $i = 1, 2$ et $c_j : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \cup \{+\infty\}$ pour $j \in J$ sont les sorties du simulateur.

- Minimiser la fonction $f(x)$ équivaut à minimiser chaque élément du vecteur $f(x)$.
- $f_c(x)$ est la fonction objectif liée au coût total de la ligne,
- $f_m(x)$ est la fonction objectif liée à la marge de tension de la ligne,
- $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ est le vecteur des variables de décision et D son domaine de définition,
- c_j est une contrainte d'inégalité du problème.
- x : est le vecteur représentant les n variables de décision. $f_i \in \mathbb{R}^n$

La section suivante explique comment NSGA-II est mis en œuvre pour notre problème de dimensionnement : les gènes sont définis, ainsi que les opérateurs de croisement et de mutation.

4.4. Mise en œuvre de l'algorithme NSGA-II

4.4.1. Principes

NSGA-II [70], [80] est une méthode itérative qui tend à améliorer un ensemble de solutions, nommée population. Chaque solution, ou individu, est défini par son chromosome, constitué d'un ensemble de variables appelées gènes. De génération en génération, la population s'améliore par des processus de diversification ou d'intensification inspirés de la nature.

NSGA-II étant basée sur la notion de dominance de Pareto [3], elle répond à notre besoin d'optimiser un compromis entre des objectifs antagonistes. Les approches Pareto utilisent directement la notion de dominance dans la sélection des solutions retenues d'une itération à l'autre, permettant ainsi l'optimisation simultanée d'objectifs antagonistes. Ce concept ne fournit pas une solution unique, mais un ensemble de solutions réalisant différents compromis optimisés. C'est alors au décideur de choisir le critère qu'il souhaite privilégier.

Le premier NSGA a été proposé par N. Srinivas et K. Deb [81] en 1994. L'algorithme est basé sur plusieurs couches de classification d'individus. La diversité des solutions trouvées est maintenue en classant les individus par rapport à leurs fonctions objectifs. Les individus sont regroupés en fonction des valeurs de leurs fonctions objectifs. Des individus non dominés, c'est-à-dire qui ne sont pas surpassés par d'autres individus sur toutes les fonctions objectifs, sont sélectionnés parmi le groupe classé. Ce processus est répété jusqu'à ce que tous les individus de la population aient été classés.

En 2000, Deb [4] [5] propose d'introduire la notion du classement Pareto afin d'évaluer l'importance de chaque individu dans la population. Il introduit également des procédures d'élitisme visant à conserver les meilleures solutions, de génération en génération, contribuant ainsi à accélérer la vitesse de convergence et les performances générales des algorithmes génétiques. La diversité est également garantie à l'aide de la notion de *crowding distance* ou distance d'encombrement ne nécessitant pas de paramètre supplémentaire. Ce nouvel algorithme est une version améliorée du NSGA qu'on appelle NSGA-II *Non dominated Sorting Genetic Algorithm II*.

L'algorithme NSGA-II consiste en plusieurs étapes pour résoudre un problème multi-objectif (Figure 25):

1. Génération d'une population initiale d'individus.
2. Evaluation de chaque individu en fonction des fonctions objectifs et classement des individus en fonction de leur niveau de non-domination.
3. Sélection des individus les plus aptes pour la reproduction par les mécanismes du croisement et la mutation.
4. Répéter les étapes 2-3 jusqu'à convergence ou atteinte d'un nombre d'itération spécifié.

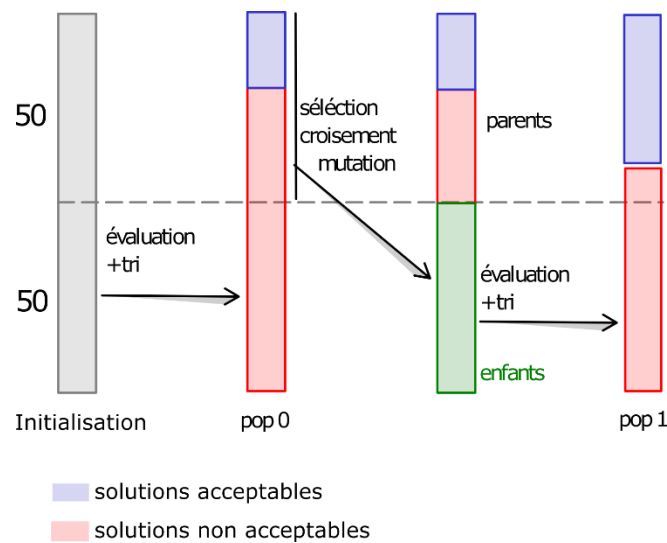


Figure 25 : schéma de principe des étapes de l'algorithme NSGA-II

4.4.2. Implémentation de l'algorithme pour notre problème d'optimisation

On s'intéressera essentiellement au choix qui concerne les réglages et l'implémentation de l'algorithme NSGA-II pour notre problème d'optimisation : (i) codage des individus appartenant à la population considérée, (ii) définition de la fonction objectif qui mesure la qualité de l'individu, (iii) opérateurs de croisement et de mutation pour modifier les individus de la génération N à la génération N+1, (iv) hyperparamètres de l'algorithme.

4.4.3. Codage du chromosome des individus

Le codage des individus est la représentation des variables de décision. Dans notre cas on recherche les positions des différents éléments de la ligne (SST, feeder et équipotentielle). Notre codage est alors le

groupement des trois vecteurs de variables de décision (paragraphe 4.2.1). La longueur de chacun de ces trois vecteurs est un paramètre fixé par l'utilisateur en amont en se basant sur ses connaissances métier.

La Figure 26 représente un exemple de codage pour un individu avec 4 SST, 3 feeders et 8 équipotentiels.

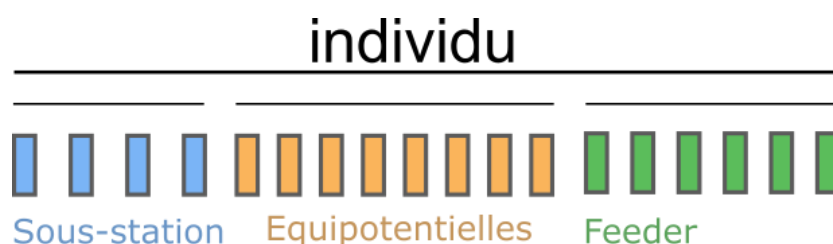


Figure 26 : Chromosome et gènes d'un individu

4.4.4. Fonction objectif

La fonction objectif nous permet d'évaluer la performance de chaque solution. Comme indiqué dans le paragraphe 4.2.3, nous avons décidé de prendre une fonction qui permet d'évaluer à la fois les coûts et la marge de tension.

$$F(x) = \begin{cases} f_c(x) = J_{inf} + J_e^{totale} \\ f_m(x) = \Delta U \end{cases}$$

où $x = (x_1, x_2 \dots \dots, x_n)$ est un vecteur à n dimensions contenant les variables de décision du problème correspondant aux positions des éléments de ligne.

Avec :

- $f_c(x)$ est la fonction objectif liée au coût total de la ligne
- $f_m(x)$ est la fonction objectif liée à la marge de tension de la ligne,
- J_{inf} le coût total de l'investissement initial en euros
- J_e^{totale} le coût d'énergie pendant la durée de vie de la ligne en euros
- ΔU la marge de tension de la ligne en volt
- $F(x)$ est une fonction bi-objectif qui concerne le coût global de la ligne ainsi que la marge de tension.

Les méthodes de calcul des trois fonctions sont précisées dans le paragraphe 4.2.3. Si la simulation ne converge pas car l'infrastructure est inadaptée au trafic, la fonction objectif prend automatiquement les valeurs les plus défavorables afin de pénaliser suffisamment l'individu pour qu'il ne passe pas à la génération suivante.

Pour la marge de tension, l'individu va prendre la valeur de -1. Pour les fonctions coûts, l'individu prend une valeur de 100 M€.

4.4.5. Classification suivant les critères de performance

La classification des individus se fait en affectant à chaque individu de la population un rang. Tous les individus non-dominés sont de rang 1.

En utilisant les fonctions-objectifs, on associe à chaque individu des scores liés à sa performance compte tenu des critères à optimiser. On recherche alors les solutions non-dominées au sens de Pareto. Ces individus constituent le groupe de solution non-dominés de rang 1. La même opération est relancée sur le reste de la population en ignorant le groupe d'individu de rang 1 pour retrouver un nouveau groupe d'individu non-

dominées qui sera de rang 2. L'opération se répète jusqu'à ce que toute la population soit classée (voir Figure 27).

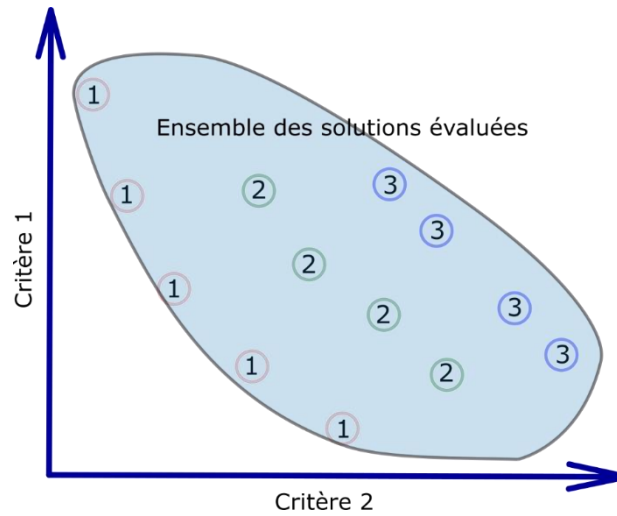


Figure 27 : classification d'individus en plusieurs catégories suivant la dominance Pareto

4.4.6. Opérateurs de croisement et de mutation

4.4.6.1. Opérateur de croisement

Le choix des parents est effectué généralement de façon aléatoire parmi les meilleurs individus de la génération courante.

La première étape consiste à copier le chromosome d'un des parents. La deuxième étape consiste à choisir aléatoirement le gène faisant objet du croisement. La dernière étape est le calcul de la nouvelle valeur du gène de l'enfant, en faisant une moyenne pondérée des valeurs du gène des parents.

Le croisement peut se faire en favorisant la position de l'individu avec le coût le moins élevée ou l'individu avec la plus grande marge de tension (Figure 28).

- Enfant issu du croisement avec une moyenne pondérée par le coût :

$$X_{cout} = \frac{X_{p1} \times J_{p2} + X_{p2} \times J_{p1}}{J_{p1} + J_{p2}}$$

X_{p1} et X_{p2} : positions des parents 1 et 2.

J_{p1} et J_{p2} : coûts totaux des parents 1 et 2.

- Enfant issu du croisement avec une moyenne pondérée par la marge de tension :

$$X_{marge} = \frac{X_{p1} \times \Delta U_{p1} + X_{p2} \times \Delta U_{p2}}{\Delta U_{p1} + \Delta U_{p2}}$$

ΔU_{p1} et ΔU_{p2} : la marge de tension des parents 1 et 2

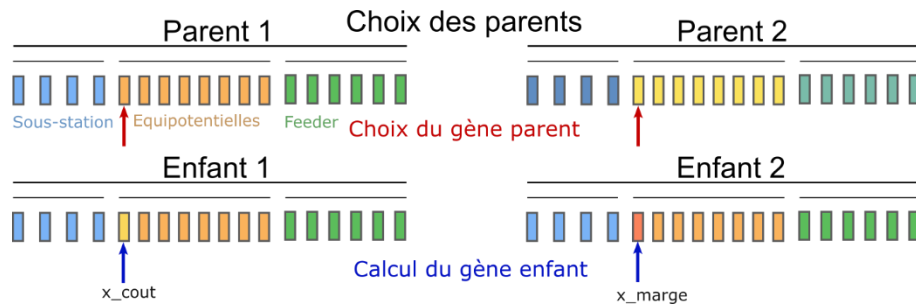


Figure 28 : les étapes de l'opération de croisement

4.4.6.2. Opérateur de mutation

L'opérateur de mutation est utilisé pour modifier un gène aléatoirement parmi le chromosome de chaque enfant créé, selon une probabilité choisie par l'utilisateur. Cet opérateur est appliqué après la création des enfants via le croisement (Figure 29). L'algorithme décide alors s'il va ou non appliquer cet opérateur, en fonction du taux de mutation. Si l'opérateur est appliqué, un gène est choisi au hasard pour la mutation. La nouvelle valeur de ce gène dépend de sa valeur initiale : si elle est définie, il peut être modifié ou transformé en valeur indéfinie, ce qui est équivalent à supprimer l'élément de ligne, et si elle est indéfinie, une valeur aléatoire de son domaine de définition est choisie ce qui est équivalent à créer un nouvel élément de ligne.

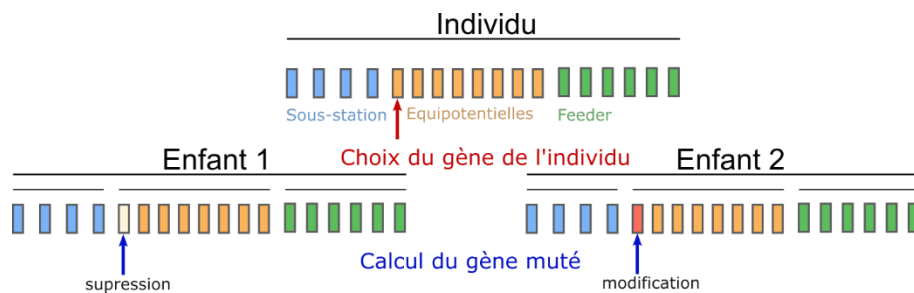


Figure 29 : les étapes de l'opération de mutation

4.4.7. Hyperparamètres de l'algorithme

4.4.7.1. Taille de la population

Le réglage de la taille de population [82] pour l'algorithme NSGA-II s'est fait par une étude paramétrique. Le principe est de faire varier la taille de la population petit à petit jusqu'à arriver à une taille de population qui garantit la reproductibilité des résultats. Grâce à des essais avec des tailles de population progressives, nous déterminons quelle est la taille minimale garantissant une reproductibilité des résultats. Pour notre problème nous avons choisi de fixer une taille de population suivant le même principe. En général, on choisit une taille de population de 100.

4.4.7.2. Nombre de générations

Le choix du nombre de générations s'est basé sur une étude paramétrique. Il existe trois types de critères d'arrêt [83]. La condition d'arrêt peut être liée : i) à un nombre de générations fixé par l'utilisateur, ii) à un nombre de générations sans amélioration d'objectifs, ou iii) à un certain nombre de générations calculé en fonction du taux de mutation, du nombre de variable de décision et de la taille de la population.

Pour notre problème, nous avons choisi de fixer un nombre de générations comme critère d'arrêt de l'algorithme. Le nombre de générations est fixé par suite d'une étude paramétrique dont le but est de garantir la reproductibilité des résultats d'optimisation.

Ce nombre varie d'un projet à un autre. Pour fixer le nombre de génération (Tableau 9), on procède à des essais empiriques. Un nombre de génération est considéré comme correctement réglé s'il nous permet d'obtenir les mêmes résultats en effectuant plusieurs essais d'optimisation en utilisant des populations initiales différentes. Dans la pratique, on lance une dizaine d'essais avec des populations initiales différentes pour valider le nombre de générations choisi.

4.4.8. Initialisation de la population initiale

Le bon choix de la population initiale permet d'améliorer la convergence. Une initialisation entièrement aléatoire peut donner une population initiale dans laquelle aucun individu n'est acceptable, car le problème est fortement contraint.

Afin d'améliorer la qualité de la population initiale, nous avons décidé d'utiliser des connaissances métier sur l'emplacement des sous-stations afin de garantir un bon nombre solutions viables. Par exemple, on peut fixer, a priori, la distance entre les sous-stations tout en laissant la flexibilité de choisir l'emplacement de la première station.

L'initialisation de la population initiale se fait à 33% en utilisant les connaissances métiers, 33% avec une initialisation totalement aléatoire et les derniers 33% se fait en plaçant les sous-stations uniformément tout au long de la ligne.

5. Application de la nouvelle démarche d'optimisation

5.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous procéderons à la validation de notre algorithme d'optimisation en utilisant deux cas d'études distincts. Le premier cas portera sur une ligne simple, tandis que le second se penchera sur une ligne réelle.

Dans le cadre du premier cas d'étude, notre objectif est de confirmer la cohérence des résultats obtenus et d'affiner nos choix en ce qui concerne les méthodes de croisement et de mutation de l'algorithme d'optimisation.

En ce qui concerne le deuxième cas d'étude, notre objectif est d'évaluer l'impact de notre nouvelle approche de dimensionnement par rapport à l'approche classique déjà en usage chez ARTELIA. Cette évaluation sera principalement axée sur des critères d'optimisation tels que le coût et la marge de tension de l'infrastructure électrique.

Ce chapitre débutera par une présentation du cas d'école de la ligne simple, suivi de l'examen des différentes techniques de croisement et de mutation que nous avons testées. Les résultats obtenus pour chaque technique seront ensuite analysés, et les solutions les plus remarquables seront détaillées.

La deuxième partie de chapitre consistera à présenter la ligne réelle sélectionnée parmi les projets menés par ARTELIA. Les résultats obtenus seront analysés et comparés avec les résultats obtenus avec l'approche classique déjà en place chez ARTELIA. Cette comparaison se concentrera principalement sur les objectifs d'optimisation, à savoir le coût et la marge de tension de l'infrastructure d'alimentation électrique

5.2. Résultats de l'optimisation pour une ligne simple

5.2.1. Description de la ligne

Nous avons sélectionné une ligne très basique pour évaluer notre algorithme d'optimisation. Cette décision a été prise afin de disposer d'un exemple dont les résultats pourront être analysés avec facilité pour vérifier leurs cohérences.

Pour faciliter cette analyse, nous avons besoin d'une ligne avec un trafic réduit pour éviter les superpositions entre les appels de puissance des différents trains. La courbe de puissance devrait être la plus simple possible pour nous permettre de comprendre le comportement de l'algorithme d'optimisation.

Comme indiqué dans la Figure 30, Nous avons choisi une ligne de 5 km avec une pente à 5% les 500 premiers mètres et une descente de 5% sur les trois derniers kilomètres avec une périodicité de départ des trains de 6 min. Pour éviter beaucoup de pics d'appel puissance, nous avons choisi de n'avoir aucun arrêt intermédiaire entre les terminus. Des courbes de puissance simples permettront de mieux analyser les résultats de l'optimisation.

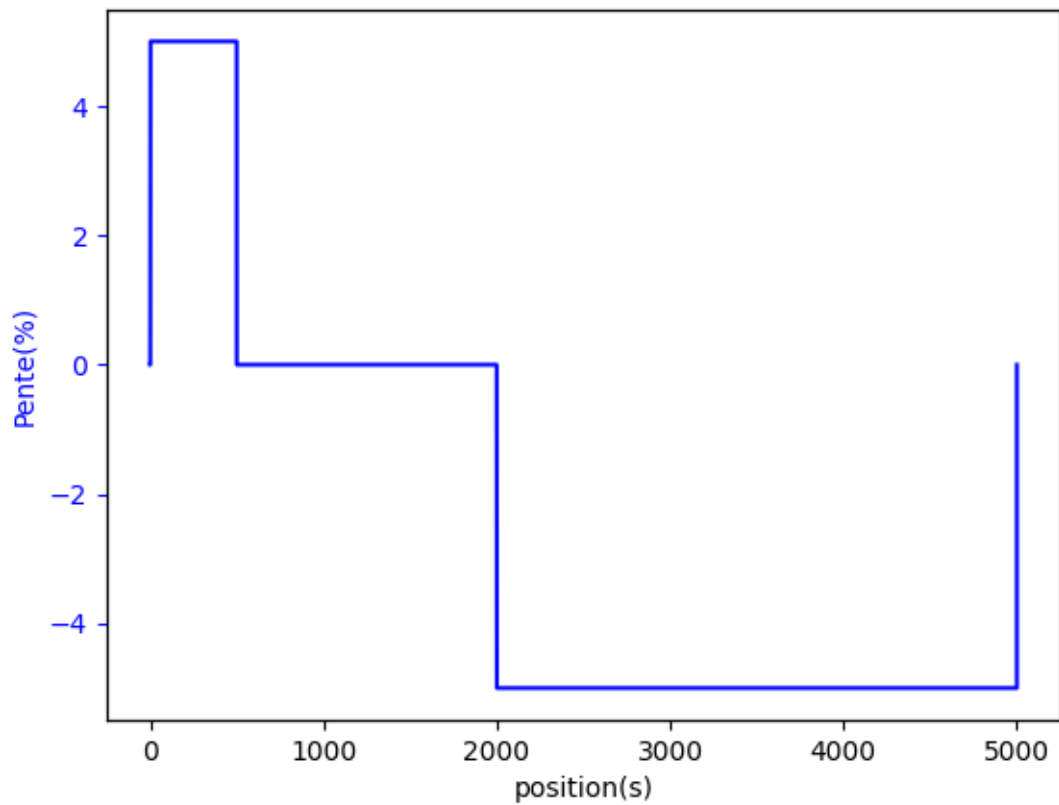


Figure 30: Profil de pente pour la ligne simple

Le profil de puissance d'un train traversant la ligne est indiqué dans la Figure 31. Les pics de puissance au départ des trains ont été intentionnellement surévalués afin de bien voir l'impact d'un appel de puissance important de la ligne dans des positions particulières sur les choix faits par l'optimiseur.

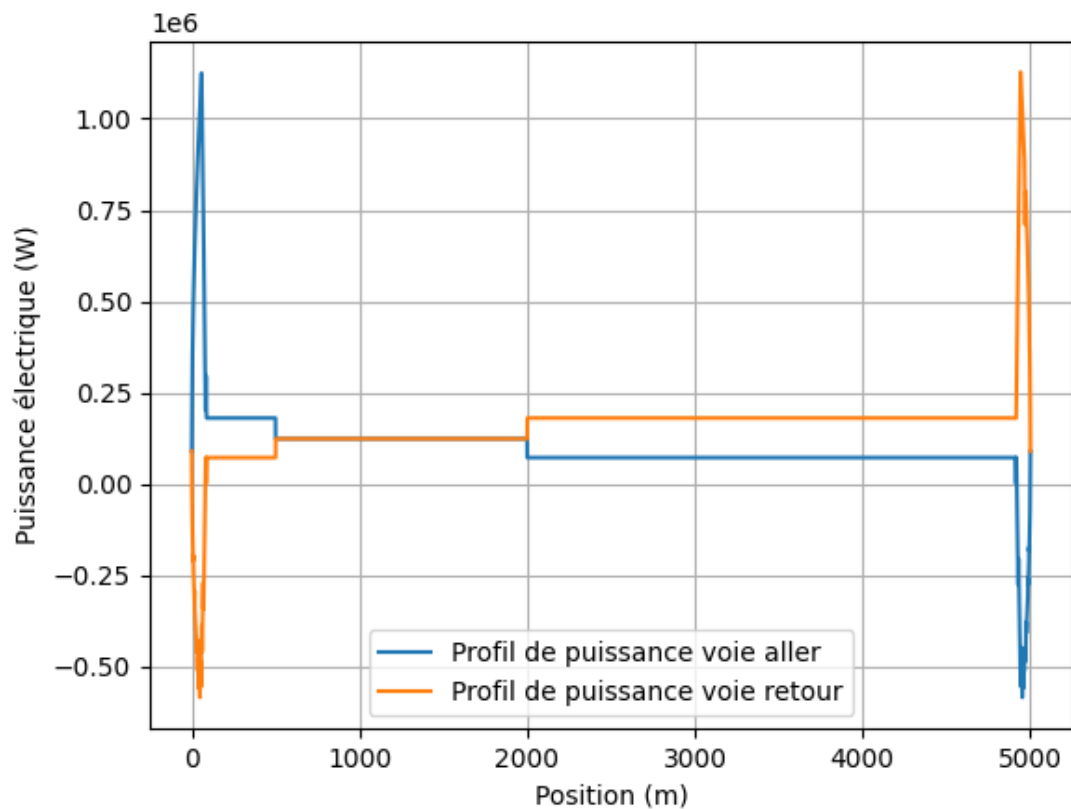


Figure 31 : Profil de puissance des trains en fonction de la position

Toutes les rames présentes sur la ligne ont le même profil de puissance décalé par la périodicité du trafic (6 min) (Figure 33 et Figure 33). Les pics de puissance au début et à la fin de la ligne sont dus aux démarrages et freinages de la rame. Les différences de puissance constatées au milieu de la ligne sont dues à la pente. Du côté de la voie aller, on a une descente, la rame a besoin de moins de puissance pour avancer par rapport à la rame sur la voie retour qui est sur une montée.

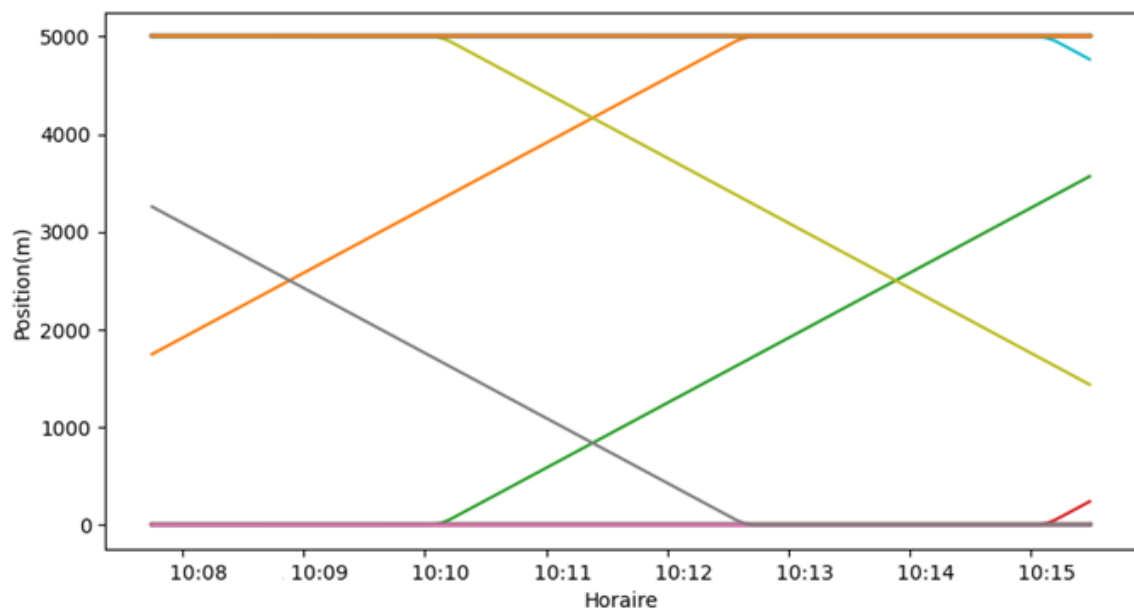


Figure 32 : Grille horaire de la ligne simple

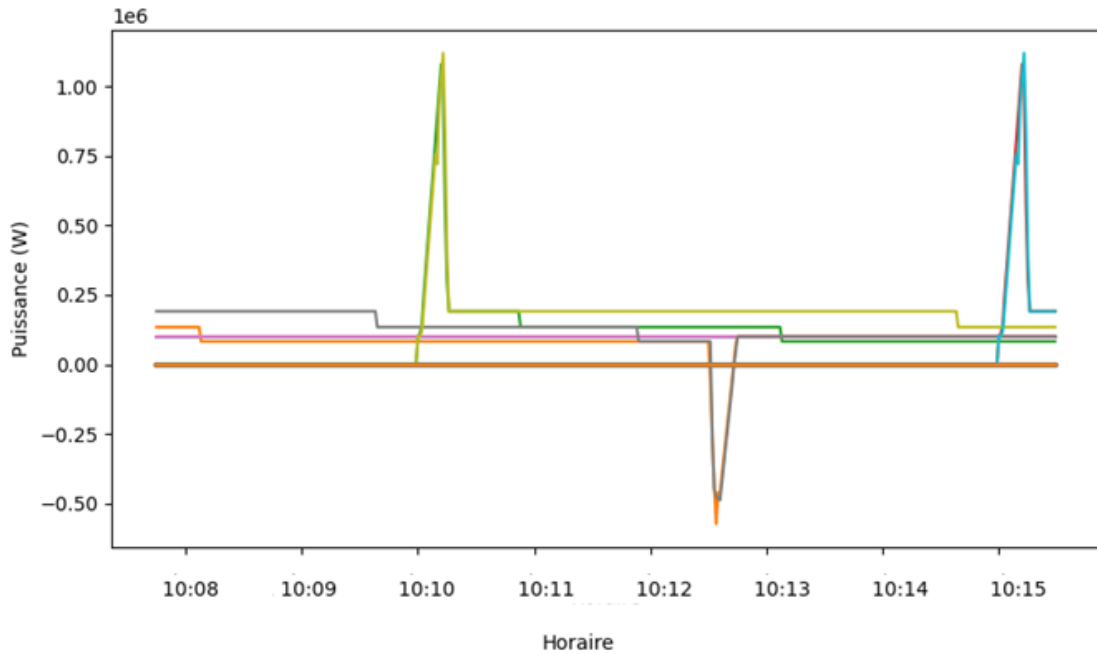


Figure 33: Profil de puissance du trafic de la ligne

La rame utilisée dans ce cas d'école est la rame CITADIS 402 dont les caractéristiques électromécaniques sont indiquées dans l'annexe 1.

5.2.2. Résultats attendus par la démarche de dimensionnement classique

Les positions optimales des éléments de la ligne dépendent de plusieurs facteurs. Le principal objectif des choix de positions est de réduire au maximum les chutes de tension. Les chutes de tension sont dues à l'inter-distance des rames et des sous-stations ainsi que les pics de puissance. Les pics de puissance sont dus généralement à des pentes importantes, des départs simultanés de rames et, parfois, à la superposition de ces deux facteurs.

Pour le cas de cette ligne simple, l'ingénieur proposera de positionner deux sous-stations au niveau des pics de puissance en début et en fin de ligne. Il pourra ensuite proposer une autre solution avec deux sous-stations aux extrémités de la ligne et une troisième sous-station au milieu afin de réduire les chutes de tension.

5.2.3. Formulation du problème

Comme indiqué dans paragraphe 4.2.1, la plage de variation du nombre minimum et maximum de chaque élément de ligne est un paramètre d'entrée d'optimisation spécifié par l'utilisateur. Le nombre précis de chaque élément est fixé par l'algorithme.

Ces choix sont orientés par nos connaissances métiers et notamment par les normes afnor NF EN 50388 [59, p. 50388]. En appliquant les préconisations des deux kilomètres en moyenne de distances entre les sous-stations, on retrouve :

En appliquant une distance de 1 km entre les sous-stations : $N_{SST}^{max} = \left\lceil \frac{L}{1} \right\rceil = 5$

En appliquant une distance de 3 km entre les sous-stations $N_{SST}^{min} = \left\lceil \frac{L}{3} \right\rceil = 2$

Avec L la longueur de la ligne. Pour notre cas d'école L = 5Km

Pour ce cas d'école, nous n'avons pas appliqué de contraintes sur le positionnement des éléments de ligne. Le domaine de définition de tous les types d'éléments de ligne est ouvert sur toute la longueur de la ligne.

Les contraintes électriques sont les mêmes que celles indiquées dans le paragraphe 4.2.2.1 à savoir

- La tension de chaque train doit rester dans la plage définie par La norme EN 50163: $500\text{ V} < U < 900\text{ V}$ (1000 V en cas de freinage par récupération).
- Le courant quadratique moyen de chaque poste doit respecter La norme EN 50329, à savoir
 - $I < I_n$ en régime permanent ;
 - $I_{mq\ 2h} < 1,5 I_n$;
 - $I_{mq\ 1min} < 3 I_n$.
- La différence de potentiel rail/sol doit rester inférieure aux limites de sécurité définies dans les normes NF F 60-100 ou NF EN 50163.

Les objectifs sont : les couts totaux regroupant les coûts d'infrastructure et de consommation d'énergie, et d'autre part la marge de tension (les détails de ces trois critères sont indiqués dans le paragraphe 4.2.3).

Le nombre d'individus dans la population est de 100 individus avec un nombre de générations de 100 itérations. Ce réglage est le fruit d'une série d'essais détaillée dans Tableau 9.

L'initialisation de la population initiale se fait en utilisant les connaissances métiers.

5.2.4. Données économiques pour calculer le coût d'investissement

Ces informations sont données à titre indicatif et ne représentent pas des coûts exacts. Cela permet de donner uniquement un ordre de grandeur. Les vraies données de coût sont actualisées de façon très régulière et sont confidentielles.

COURANTS FORTS	Puissance		Prix unitaire
Sous-station de Redressement Monogroupe	800 KVA	U	650 000 €
	1000 KVA	U	650 000 €
	1200 KVA	U	800 000 €
Sous-station de Redressement en Bi-Groupe	2 x 800 KVA	U	850 000 €
	2 x 1000 KVA	U	900 000 €
	2 x 1200 KVA	U	1 100 000 €
Arrivée supplémentaire pour sécurisation d'une sous-station		U	75 000 €
Equipement en ligne - Feeder et CMP		ml	40 €
Estimation prix LAC		km	800 000 €

Tableau 8 : les données pour le calcul du coût d'investissement

5.2.5. Détails des mécanismes de croisement/mutation utilisés

Comme expliqué dans le paragraphe 4.3.4.3, pour générer un nouvel individu à partir de deux parents sélectionnés parmi les meilleurs de la population précédente, les mécanismes de croisement et de mutation sont utilisés. Lorsque nous ciblons la position d'un élément de ligne (SST, feeder ou équipotentielle), nous opérons directement sur le gène de l'enfant en calculant une nouvelle valeur pour ce gène à partir d'une

moyenne pondérée des valeurs de gènes des parents, en utilisant soit leur coût le plus faible, soit leur marge de tension la plus élevée pour favoriser aléatoirement l'un ou l'autre des parents lors du croisement.

On a testé trois variantes de ce mécanisme de croisement :

5.2.5.1. Croisement d'un seul gène

Croisement sur un seul gène du chromosome (Figure 34) : Après le choix des deux parents, on copie un des parents qui constituera le chromosome de l'enfant. Le croisement agit sur un seul gène parmi les gènes du chromosome de l'enfant. Le choix du gène du chromosome objet du croisement se fait aléatoirement. La nouvelle valeur de position indiquée par le gène est une moyenne pondérée des positions de ce même gène chez les parents. La moyenne est pondérée par le coût ou de la marge de tension des parents. Le choix entre la pondération par le coût ou par la marge de tension est réalisé aléatoirement.

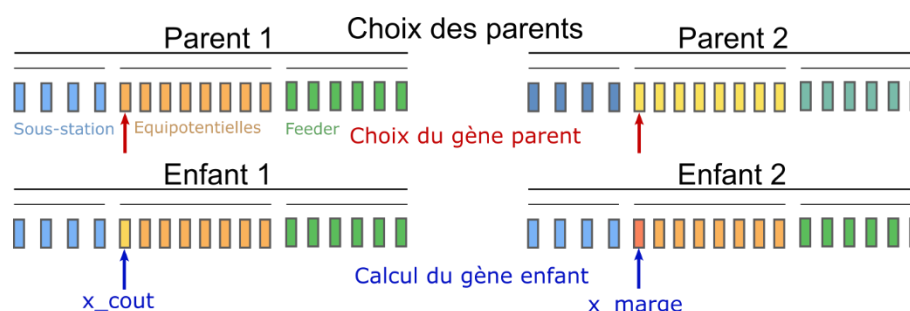


Figure 34 : Schéma synoptique du croisement sur un seul gène uniquement

5.2.5.2. Croisement de plusieurs gènes

Croisement sur plusieurs gènes du chromosome (Figure 35) : Le principe est identique par rapport au croisement sur un seul gène. Le seul changement est au niveau du nombre des gènes qui feront objet du croisement. le nombre et le choix des gènes du chromosome objet du croisement se fait aléatoirement.

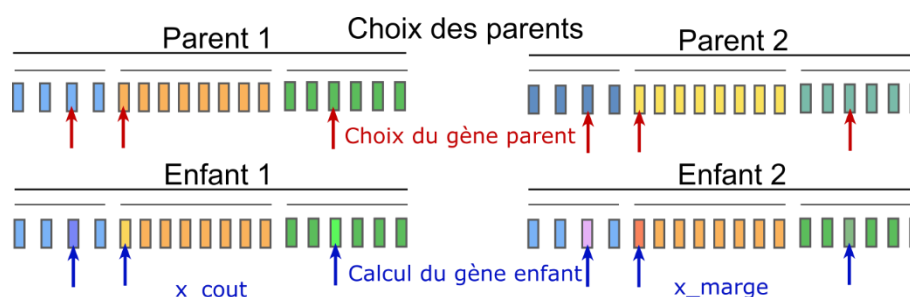


Figure 35 : Schéma synoptique du croisement sur plusieurs gènes

5.2.5.3. Croisement "intelligent"

Le principe du croisement "intelligent", présenté dans la Figure 36, est identique aux deux types de croisement précédemment cités. La différence s'opère au niveau du choix du gène. Un premier choix aléatoire est effectué afin de déterminer le type du gène (sous-station, feeder, équipotentielle). Le choix est fait entre les sous-stations, les équipotentielles et les feeders. Ce choix détermine une première pré-sélection des gènes candidats au croisement. Le choix final du gène objet du croisement se fera aléatoirement à partir du type de gène choisi par exemple si on choisit le type sous-station, on choisit ensuite la sous-station objet de du croisement parmi les sous-stations de l'individu.

Afin de maximiser l'impact du croisement sur les objectifs, l'algorithme vise à appliquer le croisement sur le gène dont la position est la plus proche du point critique de la ligne c'est-à-dire celle qui enregistre la plus importante chute de tension.

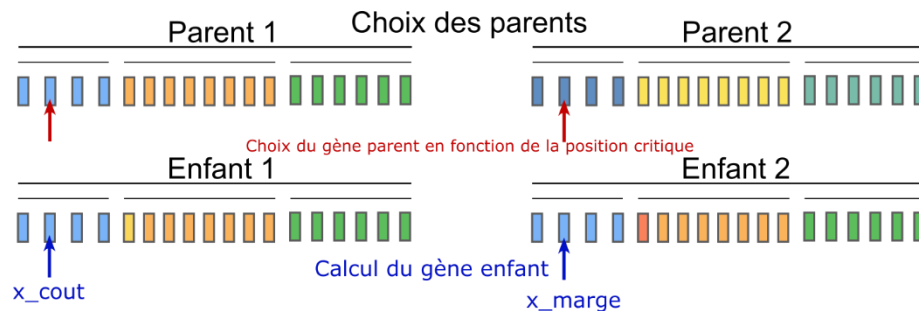


Figure 36 : Schéma synoptique du croisement sur un seul gène uniquement

On a également testé deux variantes de mutation.

5.2.5.4. Mutation sur un point

Cette technique est utilisée avec le croisement sur point unique et le croisement sur plusieurs points. Cette mutation suit la logique de la mutation décrit dans le paragraphe 4.3.4.3.2.1.

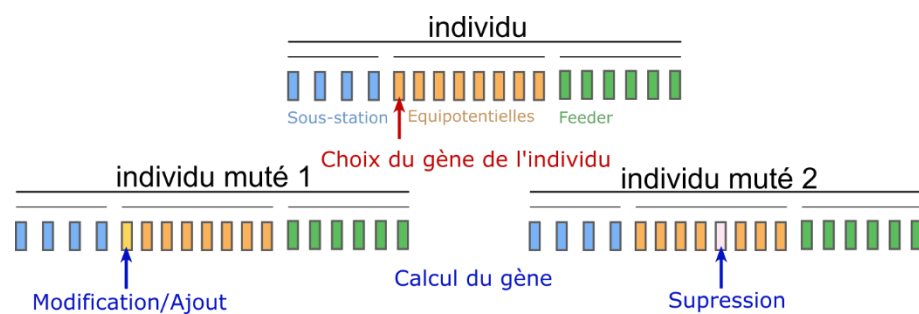


Figure 37 : Schéma synoptique de la mutation sur un seul gène uniquement

5.2.5.5. Mutation « intelligente »

Cette technique a pour but de maximiser l'impact de la mutation sur les objectifs de l'enfant (Figure 38). Un premier choix aléatoire est effectué afin de déterminer la nature de la mutation à effectuer. Ce choix est fait entre suppression, ajout ou modification d'un élément de ligne.

Si la mutation est une suppression d'élément de ligne, on choisit de supprimer l'élément de ligne proche du point de ligne qui a enregistré la chute de tension la moins importante. Ceci permettra de réduire le cout de la ligne sans dégrader la marge de tension.

Si la mutation est un ajout ou une modification de la position d'un élément de la ligne, on choisit de placer cet élément proche du point de la ligne qui a enregistré la chute de tension la plus importante. Ceci permettra d'augmenter la marge de tension.

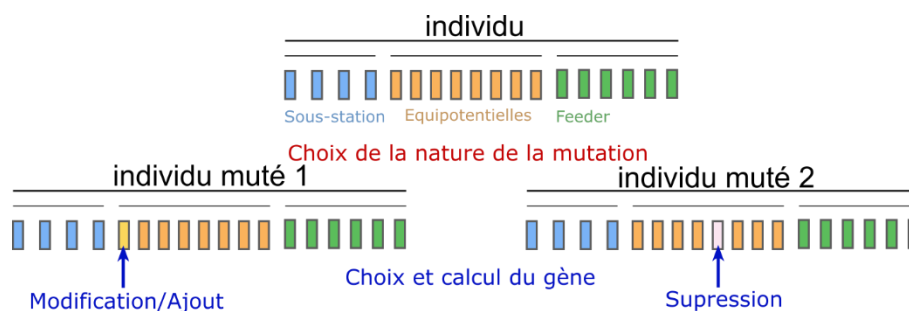


Figure 38: Schéma synoptique de la mutation intelligente

5.2.5.6. Taux de mutation

Le taux de mutation est par défaut un taux fixe choisi par l'utilisateur. Nous avons fait plusieurs tests avec des valeurs de mutation différentes. Suite à cette étude paramétrique nous avons conclu que l'utilisation d'un taux de mutation à taux variable [84] est la solution la plus efficace

5.2.6. Détermination des hyperparamètres

Nous avons mené une première série de tests pour déterminer les meilleurs réglages de l'algorithme NSGA-II pour notre problème. Nous avons commencé par ajuster la taille de la population en lançant plusieurs optimisations avec des tailles différentes et en vérifiant la reproductibilité des résultats. Le principe est de faire varier la taille de la population petit à petit jusqu'à arriver à une taille de population qui garantit la reproductibilité des résultats. Les tests ont commencé avec une taille de population de 300. On a lancé alors 10 runs de la même optimisation en fixant les autres réglages pour voir si la taille de la population choisie garantit la reproductibilité des résultats. On diminue ensuite la taille de la population à 250 et on recommence le processus jusqu'à ce que la taille de la population testée ne permette plus la reproductibilité des résultats. Suite à ces essais nous avons conclu que la taille de la population adaptée à notre problématique est de 100 individus. Ces différents essais ont été déroulés avec un taux de mutation fixe à 5%, le croisement en un point, les mêmes individus de la génération 0 et un nombre de génération égale à 100.

Une autre série d'essais avait comme objectif de déterminer les réglages restant (taux de mutation, technique d'initialisation, nombre de générations). Ces séries d'essais sont résumées dans le tableau suivant.

Taux de mutation	Initialisation de la population	Nombre de générations nécessaire pour la convergence
Taux fixe : 5%	Aléatoire	500
Taux fixe : 10%	Aléatoire	Pas de convergence
Taux dynamique : 0→100%	Aléatoire	300
Taux dynamique : 0→100%	Aléatoire et connaissance métier	100

Tableau 9 : Exemple de résultat de l'étude paramétrique faite avec une population à 100 individus

Le taux dynamique est une évolution linéaire du taux de mutation à travers les générations. Le taux de mutation est à 0% pour la première génération et à 100% pour la dernière génération.

Le choix des hyperparamètres est établi, le paragraphe 5.2.7 présentera les résultats des différentes techniques de croisement/mutation afin d'en choisir les plus adaptés pour notre problématique.

5.2.7. Présentation des résultats d'optimisation

Le but de cette partie est la présentation des résultats des optimisations effectuées pour le cas de la ligne simple. Ces résultats sont validés par une analyse de la cohérence des positions des sous-stations obtenues par rapport à ce qui est attendu (une sous-station à chaque bout de ligne et éventuellement une troisième en milieu de ligne). Une comparaison des résultats d'optimisation en utilisant les trois techniques de mutation/croisement permettra de choisir la technique la plus efficace pour l'utiliser par la suite dans le cas d'étude plus complexe présenté dans le paragraphe 5.3

Afin de garantir une comparaison la plus juste possible, nous avons lancé 3 types d'optimisations avec les différentes techniques de croisement/mutation citées. Chaque optimisation est lancée avec la même population initiale, avec un taux de mutation dynamique et une population fixe de 100 individus.

On note que pour chaque type d'optimisation, on a lancé 3 runs avec les mêmes conditions initiales.

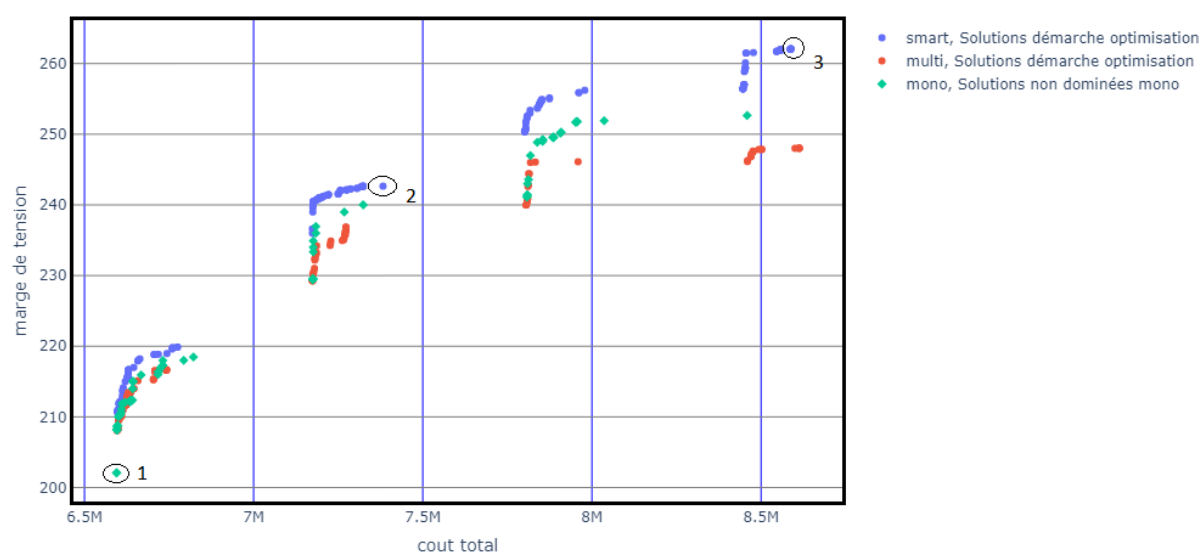
5.2.7.1. Présentation des solutions non-dominées

Les solutions non-dominées obtenues par ces 3 types d'optimisations sont représentées dans la Figure 39. On retrouve en bleu les solutions de l'optimisation utilisant les techniques de croisement/mutation intelligentes. En rouge, les solutions avec un croisement/mutation sur plusieurs gènes. En vert, les solutions avec un croisement/mutation sur un seul gène.

L'axe horizontal représente le cout total de la solution. L'axe vertical représente la marge de tension des solutions. Ces deux objectifs sont définis dans le paragraphe 4.2.3

Les solutions non-dominées forment un front (Figure 39). La discontinuité sur ce front s'explique par la différence de nombre de sous-stations entre chaque groupe de solutions. On retrouve quatre groupes de solutions qui correspondent de gauche à droite aux solutions de deux à cinq sous-stations. On remarque que le gain en marge de tension est de 14 V, entre le groupe de solution à 2 sous-stations et le groupe à 3 sous-stations. Ce gain en tension est beaucoup moins important par en rajoutant une quatrième (7 V) et une cinquième sous-station (3 V).

Cette première analyse est cohérente par rapport aux connaissances métiers. Pour une ligne de 5 km, on choisit généralement de mettre une sous-station tous les 2 km. Ce qui correspond un dimensionnement avec 2 ou 3 sous-stations.



On peut remarquer que les solutions non dominées basées sur le croisement/mutation intelligente sont plus nombreuses (surtout pour le groupe avec cinq sous-stations) et présentent de meilleures marges de tension.

5.2.7.2. Analyse des objectifs des optimisations testées

La Figure 40 présente l'évolution des objectifs au fil des générations. Cette figure représente les valeurs maximums des objectifs retrouvés à chaque itération. En analysant cette figure, on remarque que l'essai effectué en utilisant le croisement et la mutation intelligente atteint des valeurs d'objectifs supérieur aux autres essais.

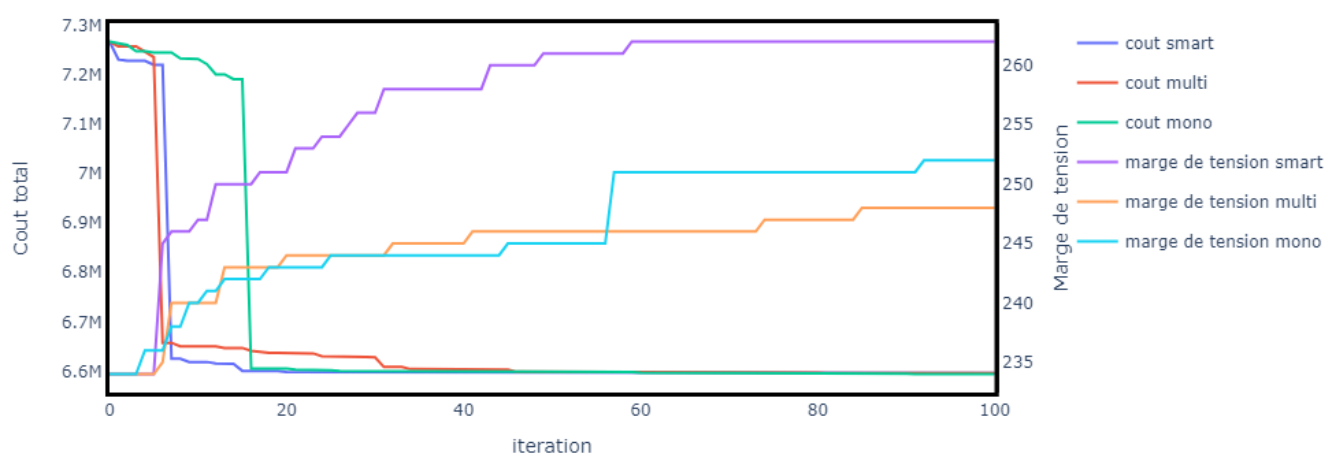


Figure 40 : Evolution des meilleures valeurs de cout/marge de tension enregistrées à chaque génération

5.2.7.3. Analyse de l'espace des variables

Les Figure 41, Figure 42 et Figure 43 sont des analyses de l'espace des variables de décision. Le but est de visualiser l'espace de variable couvert par chaque optimisation testée. Ces trois figures permettent de voir que les optimisation intelligente et multipoints permettent de couvrir plus de positions possibles des sous-stations.

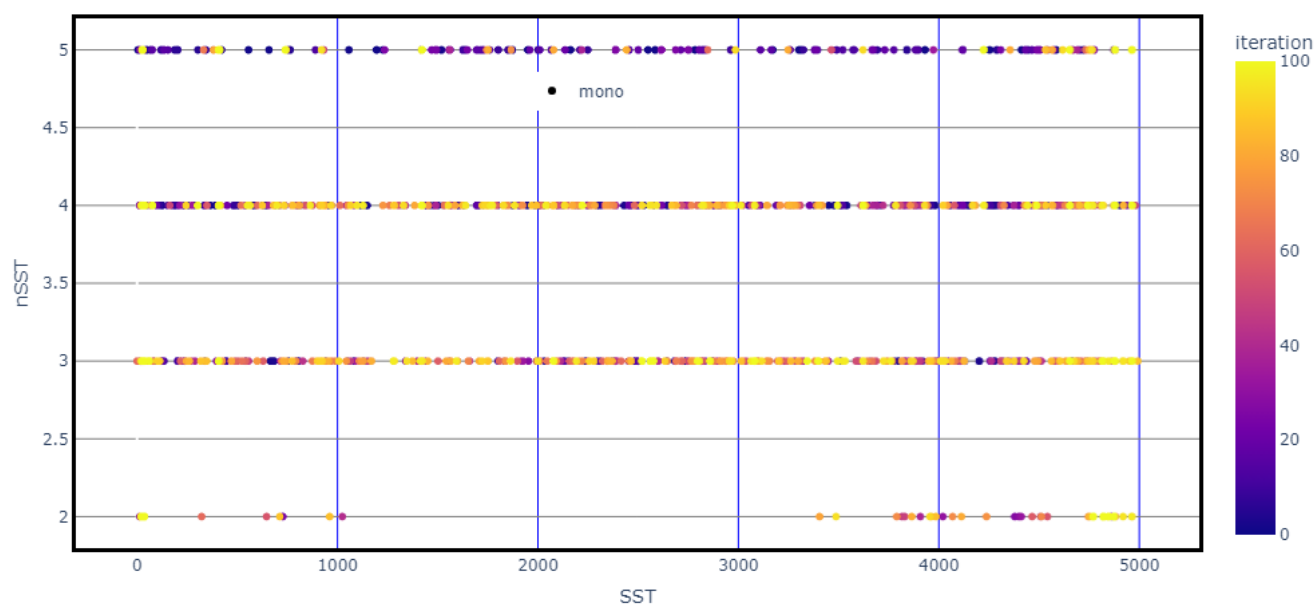


Figure 41 : Espace des positions de sous-station testées pour l'optimisation avec un croisement/mutation sur un seul gène

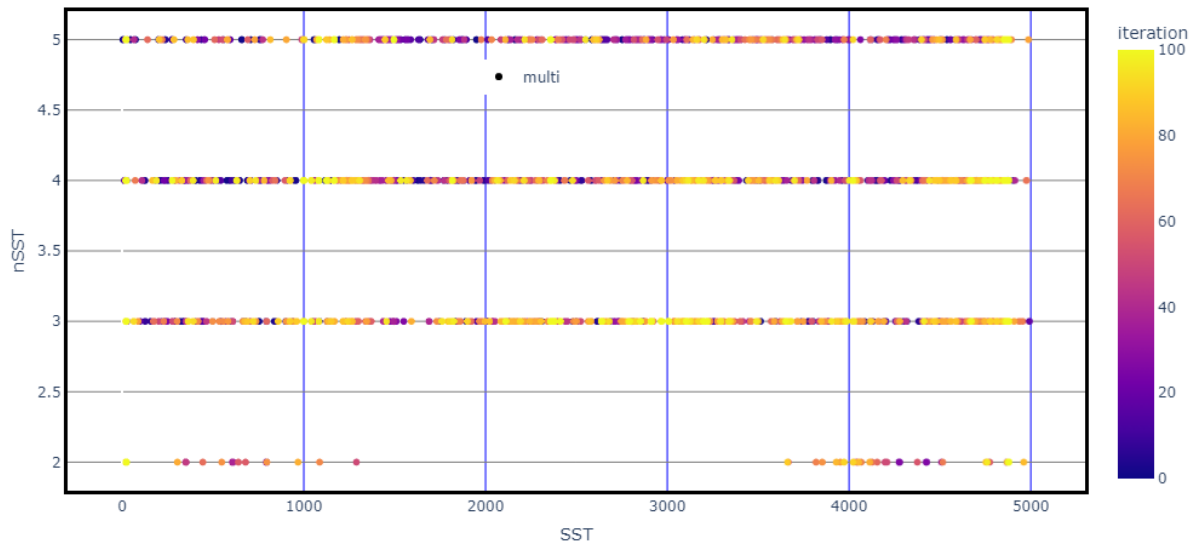


Figure 42 : Espace des positions de sous-station testées pour l'optimisation avec un croisement/mutation sur plusieurs gènes

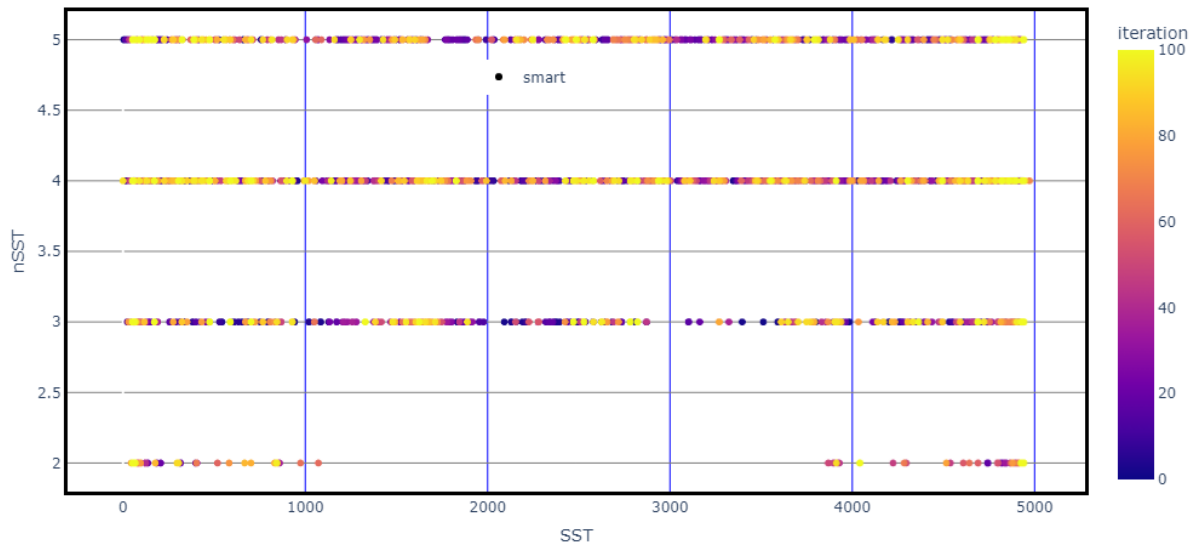


Figure 43 : Espace des positions de sous-station testées pour l'optimisation avec un croisement/mutation intelligent

Sur les 3 figures, on peut voir que l'espace des variables des positions de sous-stations est bien couvert quel que soit la technique de croisement et mutation choisie. Néanmoins, la technique de croisement et de mutation intelligente permet de trouver des combinaisons de positions de sous-stations permettant d'avoir des individus avec des meilleurs objectifs.

5.2.7.4. Présentation de 3 solutions non dominées sur le front :

Afin de vérifier la pertinence des résultats retrouvés par rapport aux choix qui pouvaient être faites par un ingénieur dans la démarche classique, il faut donc analyser les choix de position des éléments de ligne de quelques solutions. L'analyse portera principalement sur les choix de positions des sous-stations car c'est l'élément le plus facile à analyser et qui a le plus d'impact sur la qualité d'alimentation et sur les coûts.

Nous avons donc choisi 3 solutions les plus caractéristiques des individus non-dominées. Ces solutions sont entourées en noir sur la Figure 39

La solution 1 est la solution la moins chère mais également celle avec la marge de tension la moins élevée.

L'analyse de la position des sous-stations de cette solution sur la Figure 44 permet de voir que la position des sous-stations correspond bien à la position des pics de puissance de la marche-type (Figure 31).

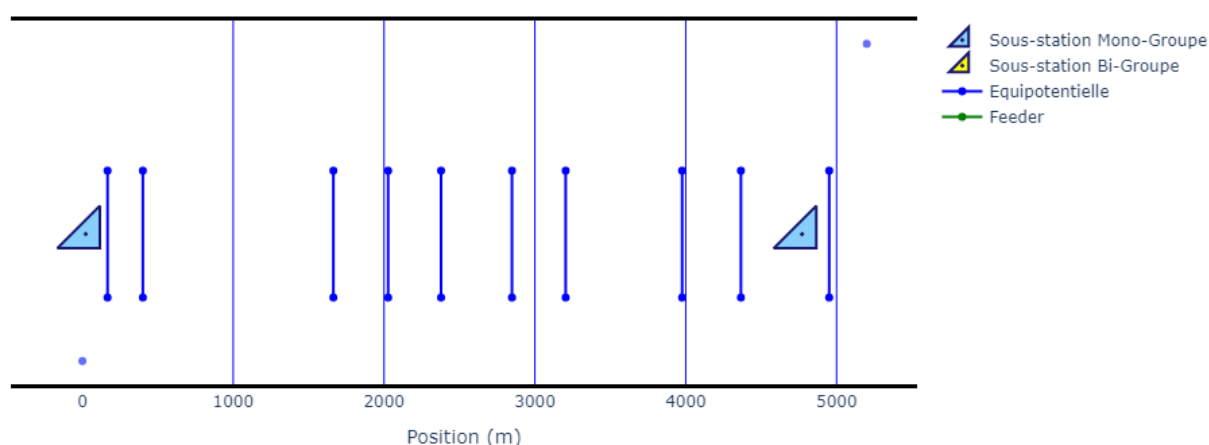


Figure 44 : Positions des éléments de ligne de la solution 1 la moins chère

La solution 3 est la solution avec la plus de marge de tension et qui est également la plus chère sur le front (Figure 39). On remarque que 4 des 5 sous-stations sont placées en extrémités (Figure 45). Les positions aux extrémités correspondent aux pics de puissances. La position de la cinquième sous-station peut être expliquée par les appels de puissance plus importants sur la deuxième partie de la ligne d'où la position un peu excentrée à droite de la cinquième sous-station, la position qui enregistre la plus grande chute de tension une fois qu'on positionne des sous-stations aux deux extrémités de la ligne.

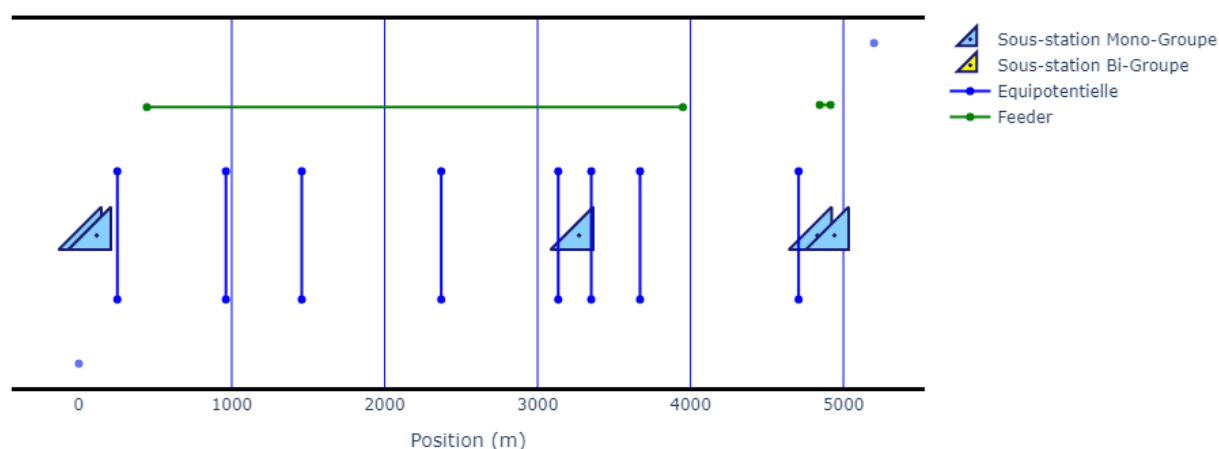


Figure 45 : Positions des éléments de ligne de la solution 3 la plus chère

La solution 2 présente un bon gain de marge de tension par rapport aux solutions à deux sous-stations. Au-delà de trois sous-stations, le gain de marge de tension n'est pas intéressant par rapport aux surcoûts engagés.

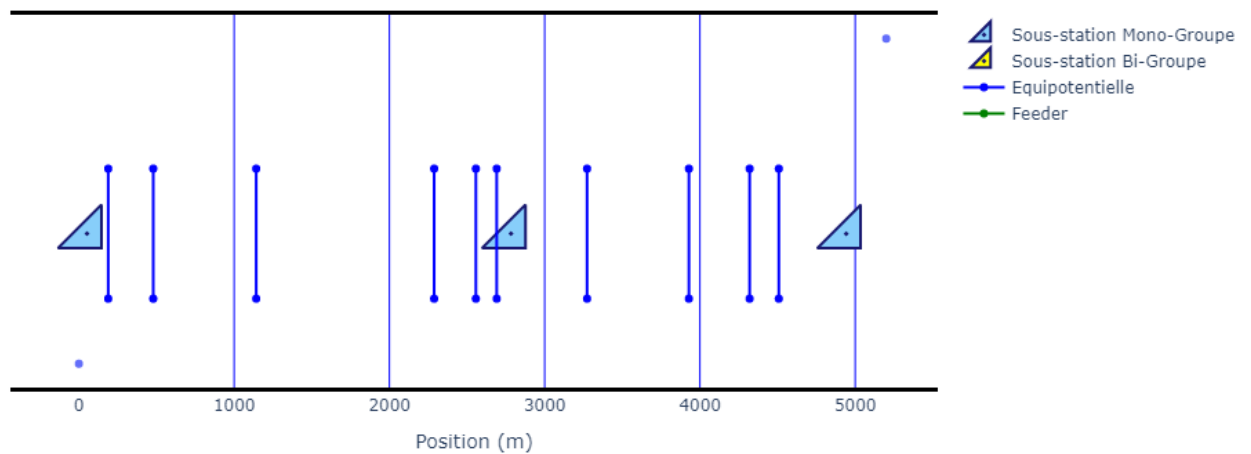


Figure 46 : Positions des éléments de ligne de la solution 4 la plus intéressante

La solution 2, avec 3 sous-stations réalise le meilleur compromis marge de tension / coût. Le choix des positions des sous-stations cohérent : une sous-station à chaque extrémité pour répondre aux pics de puissances et une sous-station au milieu pour réduire la chute de tension due à l'inter-distance entre les sous-stations des extrémités. Plusieurs solutions avec des positions de la sous-station de milieu différentes peuvent être équivalentes sur les objectifs.

Les résultats de la solution 1 à 2 sous-stations :

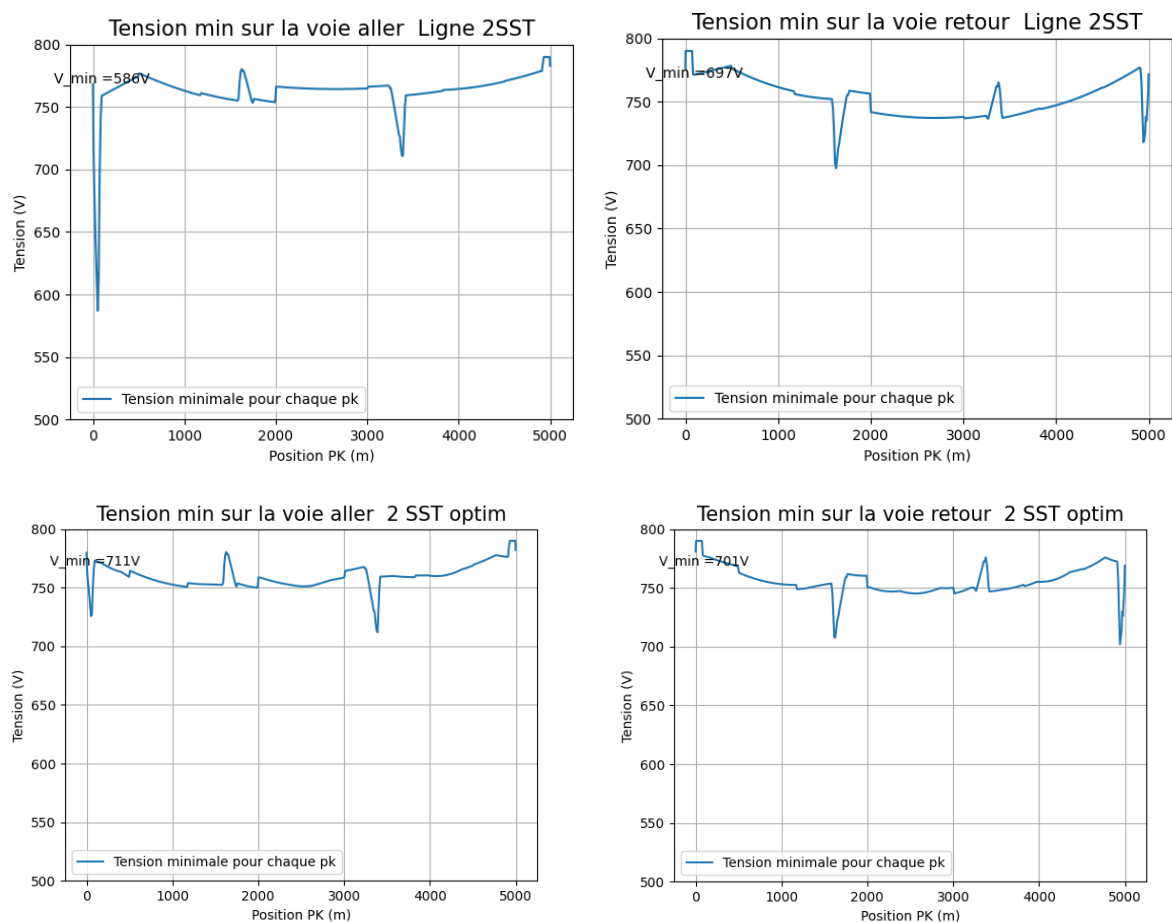


Figure 47: Chutes de tension de la ligne simple voie aller avec 2 SST (proposition de l'ingénieur en haut et proposition optimiseur en bas)

Les résultats de la solution 2 à 3 sous-stations :

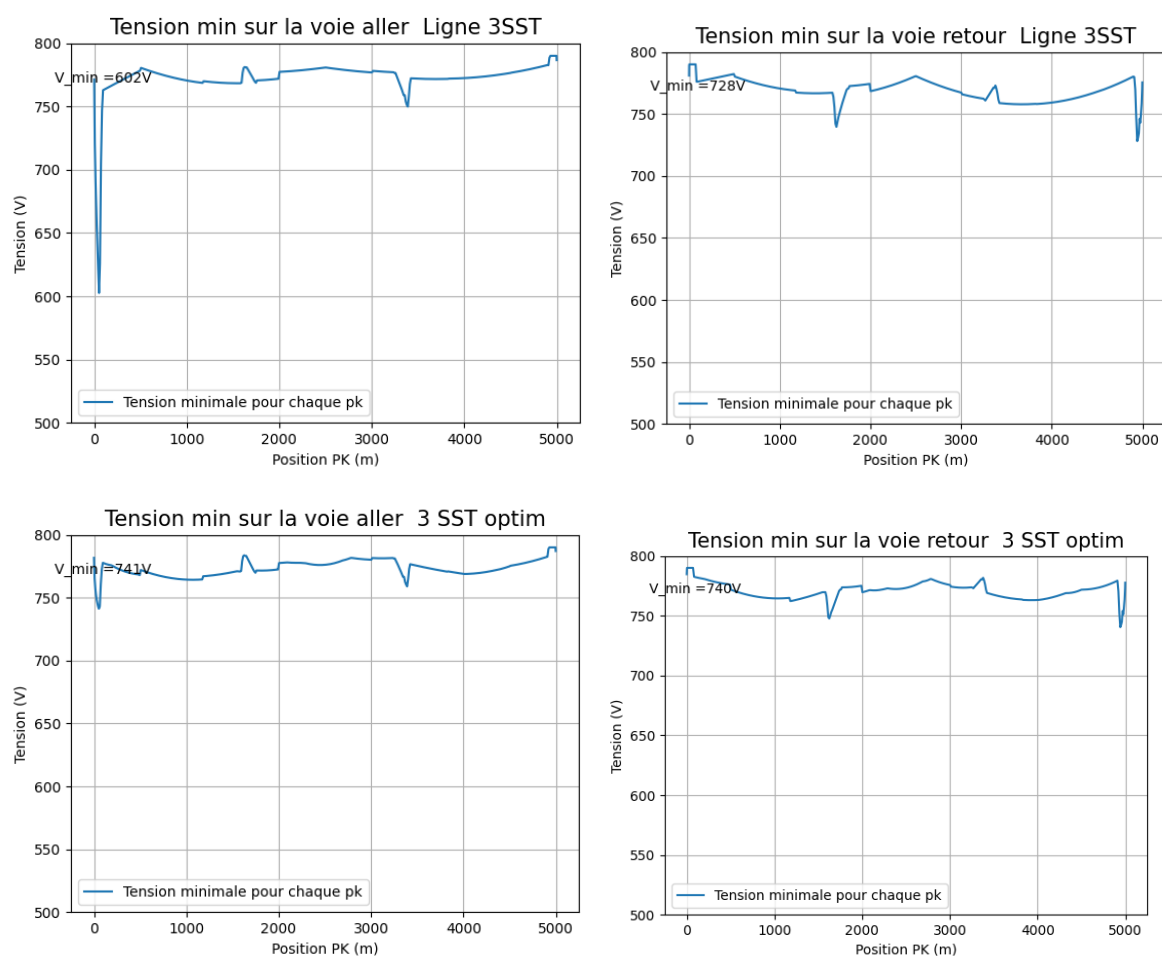


Figure 48: Chutes de tension de la ligne simple avec 3 SST (proposition de l'ingénieur en haut et proposition optimiseur en bas)

5.2.8. Conclusion

A travers cet exemple et son analyse, on peut déduire que la technique de croisement/mutation intelligent présente de meilleurs résultats par rapport aux deux objectifs marge de tension et cout totaux. On peut également valider la cohérence des résultats de cet exemple sur les valeurs des positions des sous-stations à l'extrémité. Ces positions sont en parfaites adéquations avec ce qui était attendu par rapport aux positionnements des pics de puissance. Selon la connaissance métier, on essaie de placer les sous-stations au plus près des pics de puissance.

Les prochains paragraphes auront comme objectif d'appliquer cette approche d'optimisation sur un vrai exemple de projet chez ARTELIA afin de chiffrer l'impact de cette méthode par rapport à la méthode de dimensionnement classique.

5.3. Résultats d'optimisation pour la ligne réelle

5.3.1. Description du cas d'étude

La ligne de Nancy est une ligne de tramway avec une longueur d'environ 12,4 Km comprenant 22 stations voyageurs (terminus inclus).

Station	PK	Temps d'arrêt
Porte Verte	0	1
Plaine Rive Droite	462	30
Kléber	1247	30
Mouzimpré	1921	30
Roosevelt	2460	30
Carnot	2963	30
Barrois	3466	30
Cristalleries	3956	30
St-Georges	4360	30
Division de fer	4710	30
Point central	5403	30
Nancy Gare	5865	45
Kennedy	6454	45
Garenne	6768	30
Jean Jaures	7194	30
Exelmans	7791	30
Campus Artem	8163	30
Velodrome	8853	30
Campus	9499	30
St-André	10215	30
Faisanderie	11492	30
CHU Brabois	12055	30

Tableau 10 : Positions et temps d'arrêt dans les stations voyageurs

Le profil de pente de la ligne est indiqué dans la Figure 49.

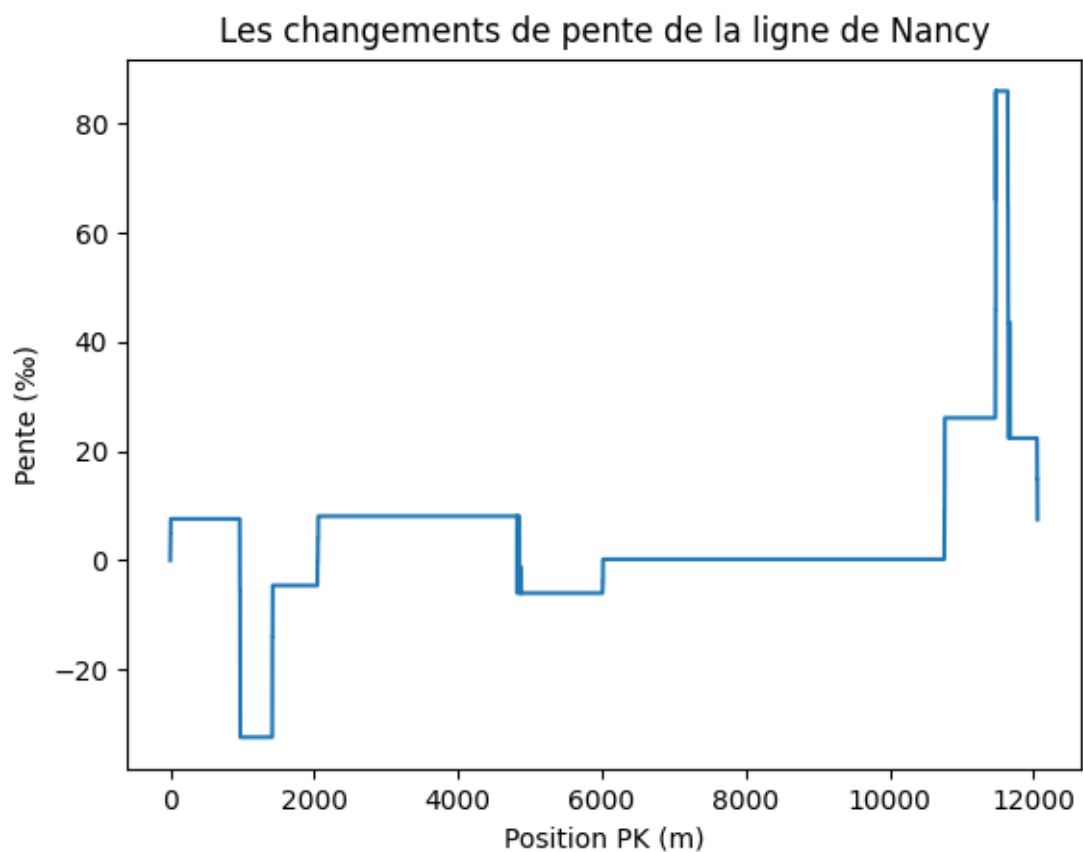


Figure 49: Profil de pente de la ligne de Nancy

Comme indiqué dans la grille horaire (Figure 50), la périodicité du trafic est de 10 minutes sur toute la ligne sauf entre St-Georges et Vélodrome où la période passe à 5 min.

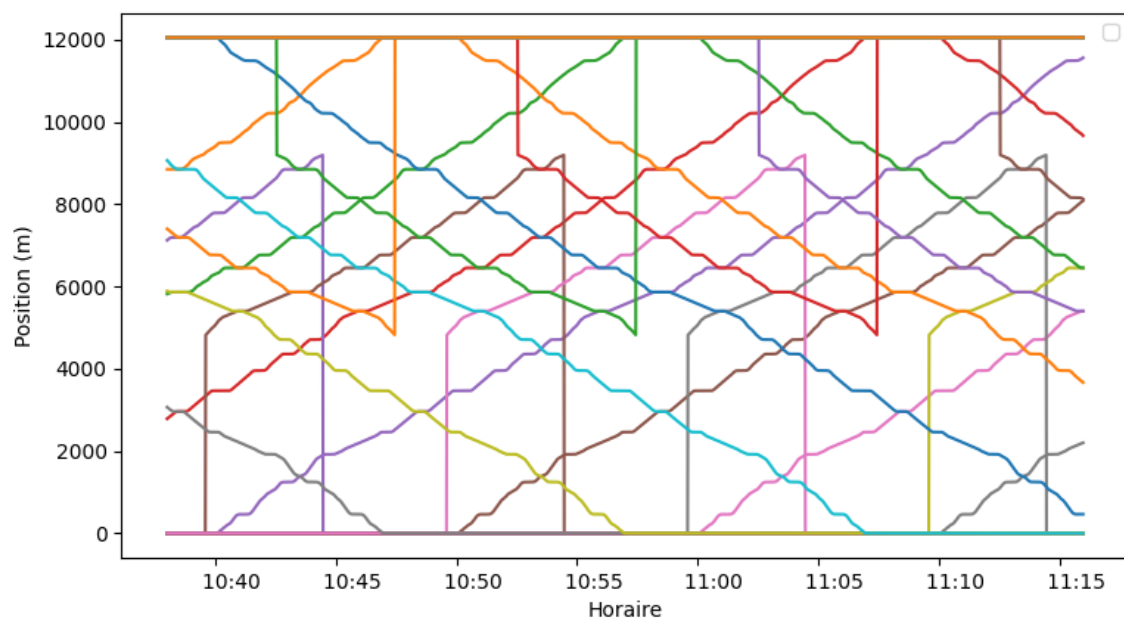


Figure 50: Grille horaire de la ligne de Nancy

Le profil de puissance d'un train traversant la ligne est indiqué dans la Figure 51.

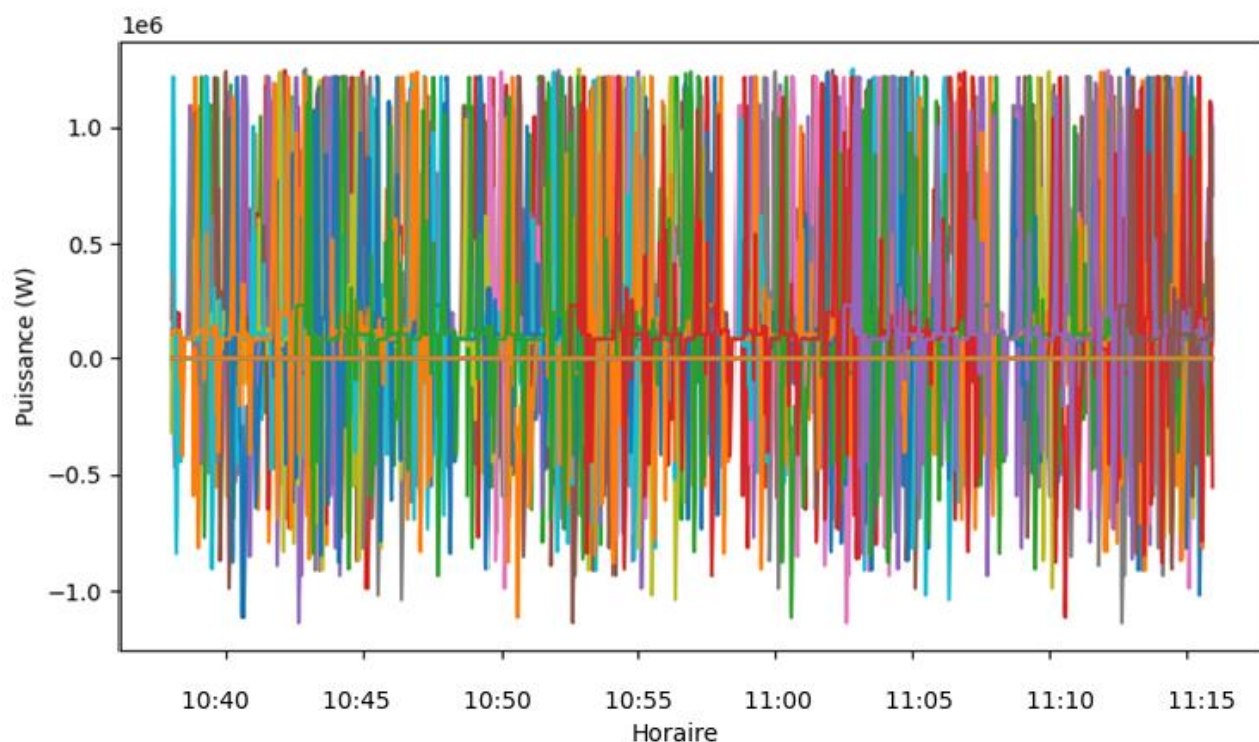


Figure 51 : Courbe d'appel de puissance du trafic de la ligne de Nancy

5.3.2. Résultats de la démarche d'optimisation classique

Dans le cadre du dimensionnement de cette ligne avec la démarche classique (essai-erreur avec un expert) nous avons décidé de choisir une configuration avec 8 sous-stations dont 3 sous-stations en Bi-groupe ; des équipotentiellles chaque 500m et aucun feeder (Figure 52)

Intitulé SST	Type	Pk
SST 1	Bi-groupe	1052
SST2	Mono-groupe	3060
SST3	Bi-groupe	4821
SST4	Mono-groupe	6132
SST5	Mono-groupe	7705
SST6	Bi-groupe	9201
SST7	Mono-groupe	11010
SST8	Bi-groupe	11733

Tableau 11 : Emplacement des sous-stations pour la solution de la démarche classique sur la ligne de Nancy

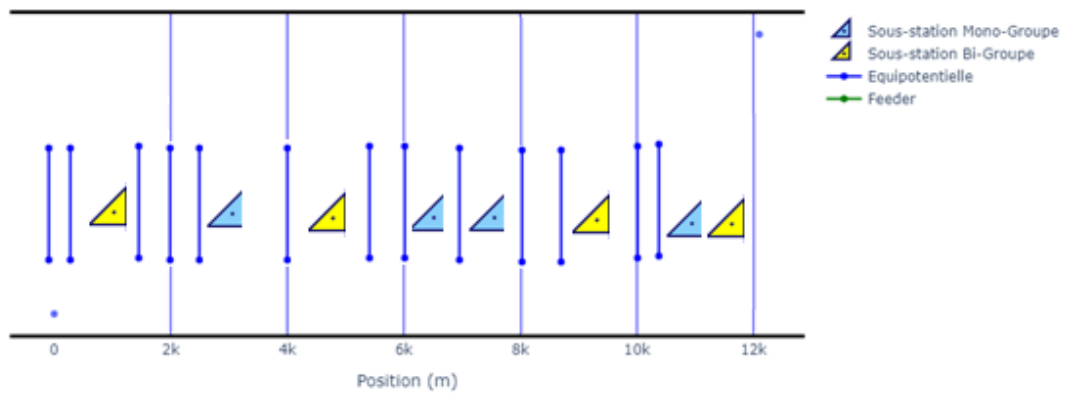


Figure 52: Solution de la démarche classique

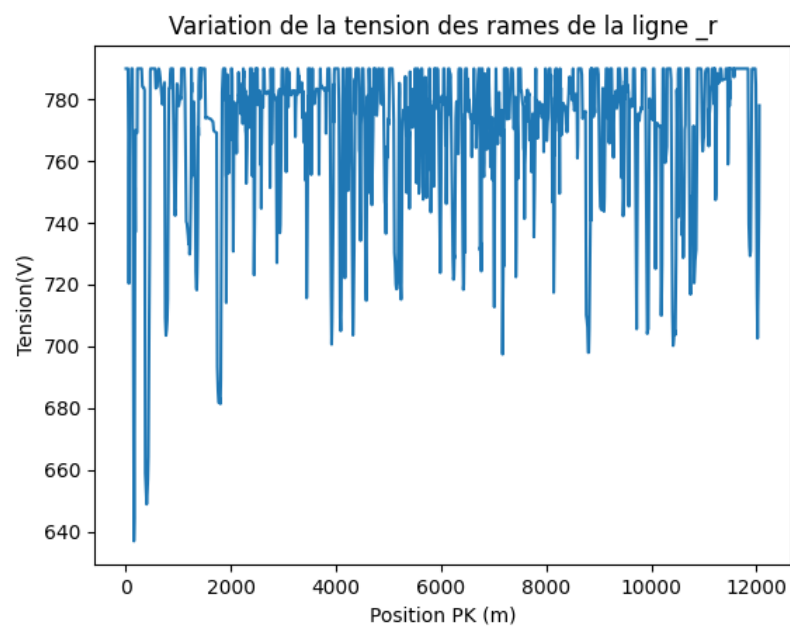
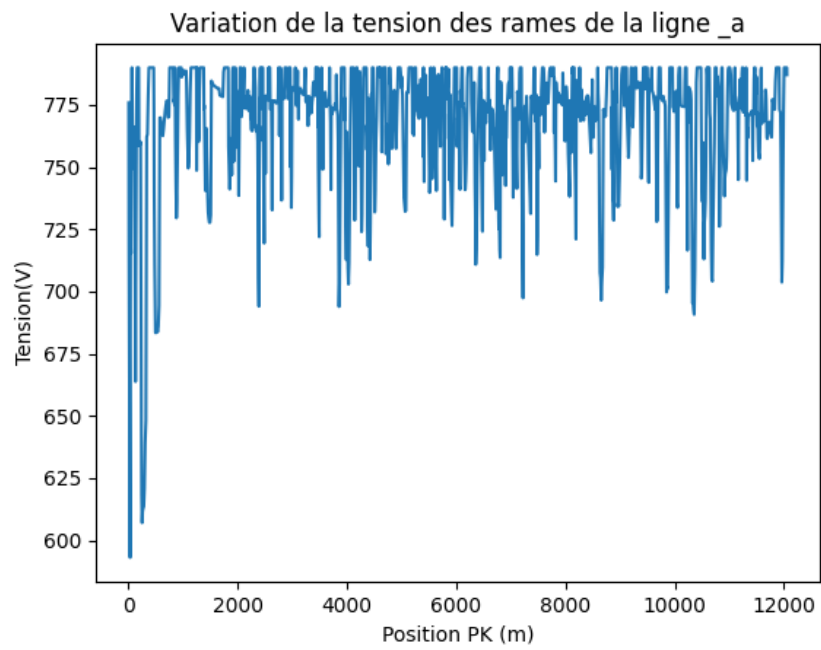


Figure 53 : Chutes de tension de la solution de la démarche classique de la ligne de Nancy

Compte tenu du résultat (Figure 53) trouvé par l'ingénieur à l'aide de la démarche classique (essai/erreur), nous avons décidé de lancer deux optimisations basées sur deux formulations différentes. Une première formulation sans feeders nous permet d'avoir une comparaison juste par rapport à la solution obtenue par la démarche classique. La deuxième formulation avec des feeders nous permettra de voir si l'optimiseur trouve des solutions meilleures avec les feeders et que la démarche classique n'a pas réussi à obtenir.

Le but de la première optimisation est d'évaluer l'impact de l'utilisation de l'algorithme d'optimisation sur la ligne de Nancy par rapport à la démarche expert (essai/erreur). L'utilisation d'une formulation sans feeder nous permet d'avoir une comparaison juste par rapport à la solution obtenue par la démarche classique.

Le but de la deuxième optimisation est d'évaluer l'impact de l'ajout des feeders dans la formulation à la fois sur les objectifs et sur la configuration des solutions proposées

5.3.3. Formulation du problème

Comme indiqué dans la section 4.2.1 la plage de variation du nombre minimum et maximum de chaque élément de ligne est un paramètre d'entrée d'optimisation spécifié par l'utilisateur. Le nombre précis de chaque élément est fixé par l'algorithme. Ces choix sont orientés par nos connaissances métiers et notamment par les normes afnor NF EN 50388[59, p. 50388]. En appliquant les préconisations des deux kilomètres en moyenne de distances entre les sous-stations, on retrouve :

En appliquant une distance de 1 km entre les sous-stations : $N_{SST}^{max} = \left\lfloor \frac{L}{1} \right\rfloor = 12$

En appliquant une distance de 3 km entre les sous-stations : $N_{SST}^{min} = \left\lceil \frac{L}{3} \right\rceil = 4$

Avec L la longueur de la ligne. Pour notre cas d'étude $L = 12,4\text{Km}$

Le nombre maximum d'équipotentiels est pris égale au nombre préconisé par les experts ARTELIA, qui correspond à une équipotentielle tous les 500 m.

$$N_{EQP}^{max} = 24$$

Aucun *feeder* n'est prévu dans cette première formulation.

Il n'y a de contraintes sur le positionnement des éléments de ligne. Dans la limite du nombre maximum et minimum spécifié par l'utilisateur. L'algorithme a la possibilité de positionner librement chaque sous-stations, *feeder* ou équipotentielle sans aucune restriction de positionnement .

La ligne devra fonctionner avec une sous-station hors service. Pour une configuration avec n sous-stations, il faut vérifier que la ligne fonctionne correctement sous tous les modes dégradés. Chaque mode dégradé correspond à une des n sous-stations hors service. Le non-respect de cette contrainte engendre un surcout de 200k euros pour chaque mode dégradé qui présente un dysfonctionnement. Ce surcout est relatif à la transformation de la sous-station en sous-station bi-groupe avec deux transformateurs (dont un de secours). Cela permet de ne plus envisager ce mode dégradé.

Pour vérifier cette contrainte durant toute l'optimisation, on estime que le temps relatif à la vérification de chaque individu augmentera proportionnellement au nombre des sous-stations qu'il contient.

Afin de ne pas rallonger considérablement les temps de calcul, on a décidé de vérifier cette contrainte uniquement lors des deux dernières générations. Au début de la recherche de l'algorithme, on ne dispose pas d'individus suffisamment performants pour qu'il soit utile de vérifier les modes dégradés. Lors des dernières générations, les individus performants. Cela devient alors plus pertinent de tester les modes dégradés.

Les contraintes électriques sont les mêmes que celles indiquées dans le paragraphe 4.2.2.1 à savoir :

- Les limitations des niveaux de tension des rames ;

- Les limitations des niveaux de courant des sous-stations ;
- Les limitations des niveaux de tension rail-sol.

Les objectifs sont :

- Le cout de l'infrastructure et le cout de la consommation électrique sur 30 ans estimé selon le prix de l'énergie à l'instant T.
- La marge de tension

Ces objectifs sont détaillés dans le paragraphe 4.2.3

L'initialisation de la population initiale se fait en utilisant les connaissances métiers, les sous-stations sont uniformément réparties tout au long de la ligne.

Pour chaque individu, le nombre de sous-station est choisi aléatoirement entre N_{SST}^{max} et N_{SST}^{min} . On divise ensuite la ligne en plusieurs tronçons équivalents au nombre de sous-station choisi. Chaque tronçon est une plage de variation pour la position de chaque sous-station. Dans chaque plage de variation relative à une sous-station, la position exacte est fixée aléatoirement.

Les positions des équipotentielles et les feeders sont fixées aléatoirement.

5.3.4. Présentation des résultats d'optimisation

La présentation des résultats de l'optimisation se fera en deux parties. La première optimisation est effectuée en utilisant la formulation définie dans le paragraphe précédent 5.3.3. Une deuxième optimisation est effectuée en autorisant l'ajout de deux feeders à la ligne.

5.3.4.1. Présentation des solutions non-dominées de la formulation sans feeder

Les résultats d'optimisation de la formulation sans feeder sont présentés dans la Figure 54 .

L'axe horizontal représente le cout total de la solution qui regroupe le cout de l'infrastructure et le cout de la consommation électrique sur 30 ans.

L'axe vertical représente la marge de tension des solutions. La marge de tension est la différence entre tension la plus basse enregistré dans la ligne et la tension autorisée par la norme.

Afin de bien visualiser les différentes solutions proposées par l'algorithme, nous avons choisi de faire apparaître les solutions non dominées (en rouge) ainsi que les solutions dominées jusqu'au rang 4 au maximum (en bleu). Le point vert correspond à la solution retenue suite au dimensionnement en suivant la démarche classique.

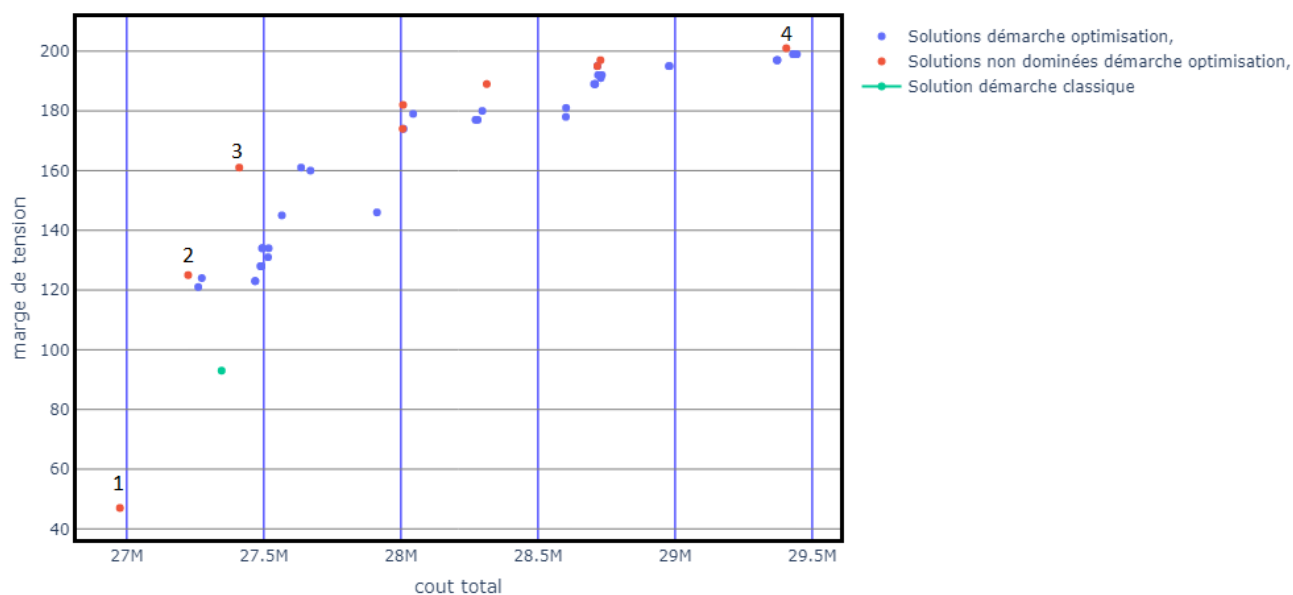


Figure 54 : Résultats de l'optimisation sans feeder après 100 générations : solutions non-dominées dans l'espace des objectifs

Nous avons choisi d'analyser 4 solutions et de les comparer avec la solution de la démarche classique (en vert). Les solutions 1,2, 3 et 4 sont classées par ordre de cout et de marge de tension sur le front de Pareto.

Par rapport à la solution retenue par la démarche classique, la solution 2 offre une marge de tension supérieure (125 V contre 93 V) avec un cout total inférieur (27,22 M€ contre 27,34 M€).

Une analyse plus profonde de ces deux solutions permet de voir que la solution retenue de la démarche classique est constituée de 4 sous-stations mono-groupe et 4 stations bi-groupes. La solution 2 (Figure 55) est constituée de 5 stations mono-groupe et 3 stations bi-groupes. C'est une différence d'environ 200 k€ sur le cout de l'infrastructure. Cette différence est rattrapée partiellement avec le cout de l'énergie sur 30 ans (-80 k€) pour atteindre 120 k€ entre les deux solutions.

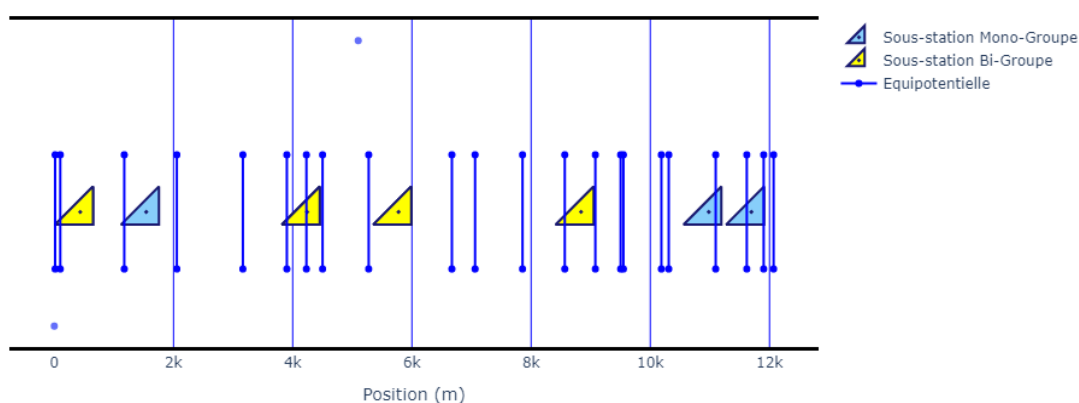


Figure 55 : Positions des éléments de la ligne de la solution 2

La solution 1 offre une alternative moins chère (26,97 M€ contre 27,34 M€) mais avec une marge de tension plus faible (47 V contre 93 V).

La solution 1 se constitue de 3 sous-stations mono-groupe et 4 sous-stations bi-groupe. C'est une différence de 650 K€ correspondant à une sous-station mono-groupe en moins. La différence sur les couts énergétique permet de rattraper une partie de cette différence (280 k€). Cela nous fait une différence totale de 370 k€

Le front des solutions non dominées est sous forme d'un coude. La solution 3 se trouve en plein centre du coude et offre le compromis le plus intéressant entre le cout total et la marge de tension. Au-delà de cette solution, le gain de marge de tension n'est pas intéressant par rapport aux surcouts engagés.

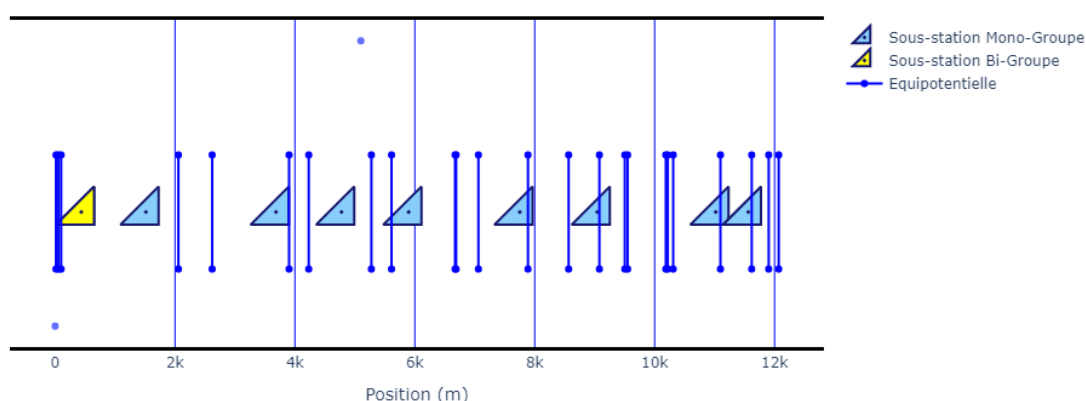


Figure 56 : positions des éléments de la ligne de la solution 3

La solution 3 offre une alternative avec une marge de tension plus importante (161 V contre 93 V) moyennant un surcout sur le cout total (27.41 M€ contre 27.34 M€).

La solution 3 est constituée de 8 sous-stations mono-groupe et 1 sous-station bi-groupe. Cela représente un surcout de 100 K€ de cout d'infrastructure par rapport à la solution retenue avec la démarche classique. Cette différence est rattrapée en partie avec les couts énergétiques sur 30 ans (-3 k€).

La solution 4 est la solution qui offre la plus grande marge de tension 201 V mais avec un cout total de 29.40 M€.

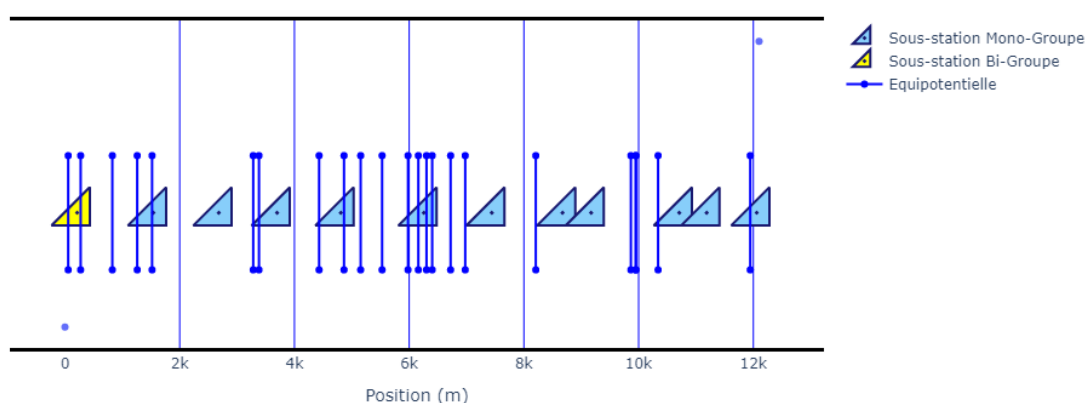


Figure 57 : positions des éléments de la ligne de la solution 4

La solution 4 se constitue de 11 sous-stations mono-groupe et 1 sous-station bi-groupes. Ce nombre de sous-station (12) est le maximum autorisé par la formulation du problème. Cela représente un surcout de 2.1 M€ de cout d'infrastructure par rapport à la solution retenue avec la démarche classique avec une augmentation de la marge de tension de 93V à 201 V.

Par rapport à la solution issue de la démarche classique, la solution 2 présente une meilleure marge de tension avec un cout total inférieur (+32V de marge de tension et -120K€ sur le cout total). Dans le cadre d'un dimensionnement de la ligne de Nancy, la solution 3 présente le compromis le plus intéressant car cette solution offre une grande marge de tension (+68V) moyennant un surcout de 70K€.

5.3.4.2. Présentation des solutions non-dominées de la formulation avec feeders

Les résultats d'optimisation de la formulation avec feeders sont présentés dans la Figure 58.

Afin de mesurer l'impact de l'ajout des feeders sur les résultats d'optimisation, nous allons mettre les résultats de l'optimisation avec et sans feeders sur la même figure.

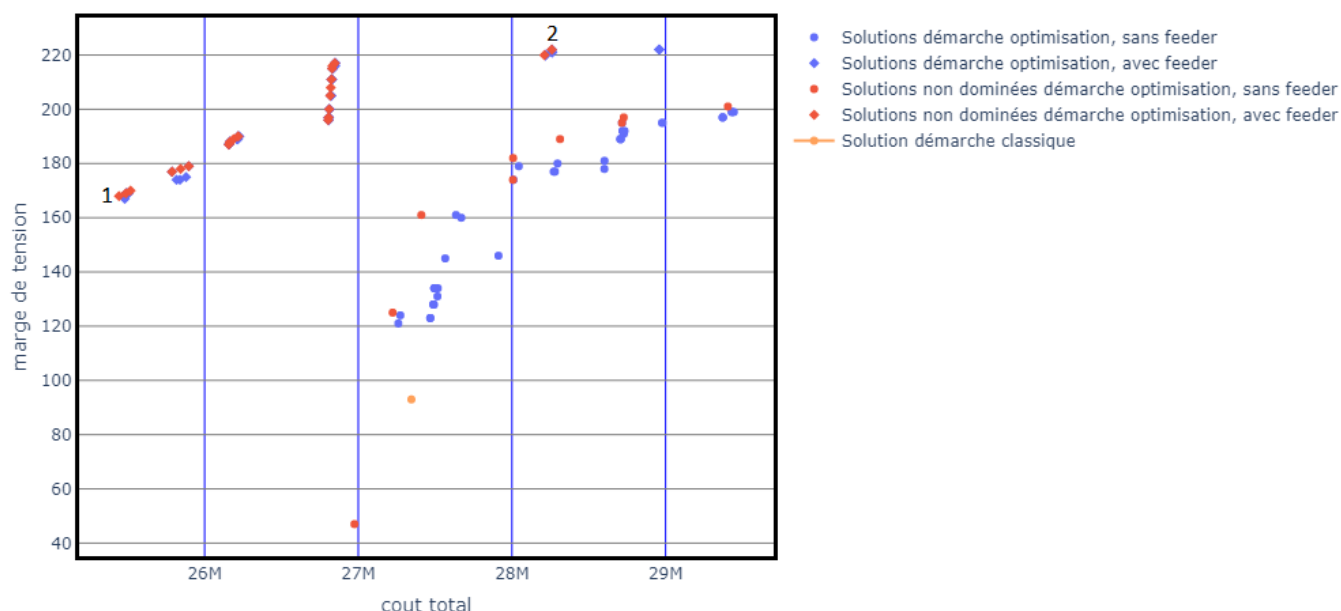


Figure 58 : Résultats de l'optimisation avec feeders après 100 générations - Solutions non-dominées dans l'espace des objectifs

On distingue alors deux fronts de solutions non dominées, le premier, à droite, concerne l'étude d'optimisation de la ligne de Nancy, déjà présentée dans le paragraphe précédent, avec une formulation sans feeder. Le deuxième, à gauche, concerne l'étude d'optimisation de la ligne de Nancy avec une formulation qui autorise l'ajout de deux feeders au maximum.

L'impact de l'ajout de feeder est plus important pour les solutions les moins coûteuses (avec moins de sous-stations). Cet impact diminue progressivement pour les solutions avec plus de sous-stations.

Par rapport à la solution retenue en suivant la démarche classique (en orange dans la figure précédente), la solution 1 offre un gain sur le cout et sur la marge de tension (-1.9 M€ et +75 V). Ce gain correspond à 2 sous-stations bi-groupe en moins. Si on se concentre sur le cout de l'infrastructure uniquement c'est un gain d'environ 27% (4.4 M€ contre 6.1 M€ pour la solution retenue suivant la démarche classique).

La solution 1 se compose de 4 sous-stations mono-groupe et 2 sous-stations bi-groupe avec deux feeders recouvrant la quasi-totalité de la ligne. Cette solution se compose de 6 sous-stations, ce qui est le nombre minimum autorisé par la formulation.

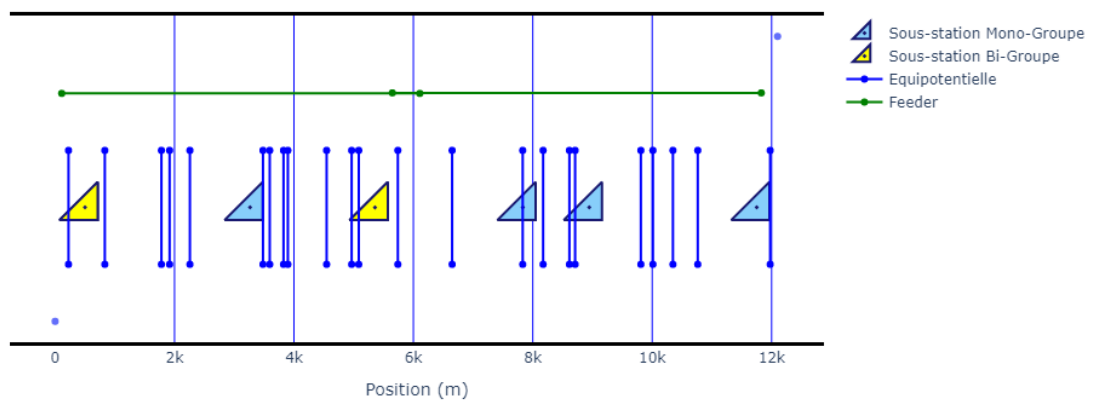


Figure 59 : positions des éléments de la ligne de la solution 1

La solution 2 est la solution la plus chère et la plus performante trouvée dans le cadre de l'optimisation de la ligne de Nancy suivant une formulation avec feeder. Par rapport à la solution retenue avec la démarche classique, cette solution offre un gain de 129 V de marge de tension au prix d'un surcout 910K€.

La solution 2 se constitue de 11 sous-stations mono-groupe avec deux feeders qui couvrent la totalité de la ligne.

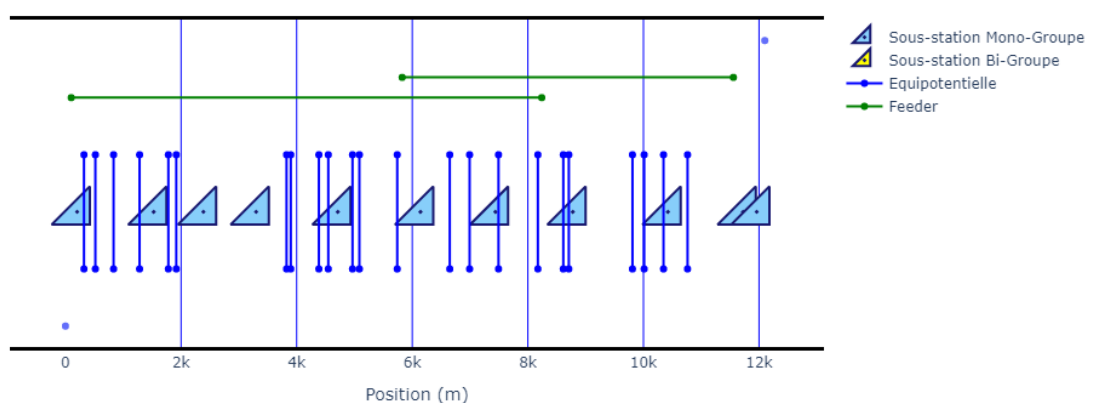


Figure 60 : positions des éléments de la ligne de la solution 2

5.3.5. Conclusion

Suivant la formulation choisie, l'utilisation de la démarche d'optimisation sur le projet de la ligne de Nancy a un impact sur le cout et la marge de tension. La solution avec la démarche classique qui est décrite dans le paragraphe 5.3.2 avec un cout total 27,34 M€ dont 6,2 M€ de cout d'infrastructures et 21,14 M€ de consommation énergétique.

Objectifs	Formulation sans feeder	Formulation avec feeder
Cout total	-120 K€	-1.9M€
Marge de tension	+32V	+75V

Bien que la démarche classique n'ait pas su trouver une solution meilleure avec les feeders. Nous avons choisi de faire une première formulation sans feeder pour mettre en avant la capacité de l'algorithme à trouver un meilleur positionnement pour les éléments de la ligne sans utiliser un feeder.

La solution 2 domine la solution de la démarche classique (moins chère avec plus de marge de tension). La solution présente un petit gain 120 K€ (27,22 M€ contre 27,34 M€) avec un gain de marge de tension de 32 V (125 V contre 92 V).

Avec la possibilité de l'ajout d'un feeder, il existe alors plusieurs solutions intéressantes qui dominent la solution de la démarche classique. La solution 1 est la plus intéressante car elle est moins chère et offre un gain conséquent sur le cout total (-1.9M€). L'utilisation de notre algorithme dans le projet de Nancy a eu un impact plus important que l'impact perçu sur l'exemple simple. L'impact de notre algorithme augmentera avec le niveau de complexité du cas d'étude choisi. Le niveau de complexité dépend de la topologie de la ligne, le nombre des variables et le domaine de définition à explorer.

Plus le niveau de complexité augmente, moins les propositions par la démarche essai/erreur sont pertinentes. Le gain en cout et en marge de tension sera donc plus intéressant en utilisant notre algorithme.

6. Conclusion et perspectives

6.1. Conclusion :

Cette thèse est une exploration approfondie du domaine du dimensionnement des infrastructures de d'alimentation électrique ferroviaire, accompagnée du développement d'outils d'optimisation qui ont le potentiel de révolutionner la manière dont nous concevons ces infrastructures. Ce travail de thèse a plongé au cœur des enjeux environnementaux et économiques des transports collectifs urbains, mettant en lumière l'importance cruciale de l'électrification des tramways et des métros. Nous avons également mis en évidence la complexité des aspects techniques et financiers que comportent de tels projets, soulignant la nécessité de trouver des solutions techniques tout en évaluant les coûts, à la fois en termes d'investissement initial et d'exploitation à long terme

Au cœur de cette recherche, l'infrastructure de traction électrique a émergé comme un élément fondamental, portant un coût important. Le dimensionnement précis de cette infrastructure s'avère essentiel pour garantir la disponibilité constante de la ligne tout en optimisant les coûts. Nous avons également exploré en détail les études techniques nécessaires à la conception d'un système d'alimentation électrique, soulignant l'importance cruciale des choix et du dimensionnement des éléments de la ligne. Cela consiste à définir le nombre et l'emplacement de tous les types d'élément de la ligne à savoir les sous-stations ; les feeders et les équipotentielles.

Ces choix délicats reposent sur des études de simulation exigeant des modèles et des outils d'une grande précision pour éviter les sous-dimensionnement ou les surdimensionnements coûteux.

L'objectif principal de cette thèse était de développer une approche d'optimisation multi-objectifs visant à améliorer le dimensionnement des infrastructures électriques. Cette démarche s'est concrétisée en deux axes de travail complémentaires : d'abord, le développement d'un simulateur électrique ferroviaire précis et rapide, puis, la mise en place d'une méthode d'optimisation du dimensionnement prenant en compte des objectifs concurrents (cout et fiabilité). Cette thèse s'est structurée en six chapitres, décomposant chaque étape de cette démarche, depuis la problématique initiale jusqu'à son application sur des cas d'étude concrets.

Une attention particulière a été portée aux choix de la démarche d'optimisation développée au cours de cette thèse. Le passage du problème métier à la formulation mathématique d'un problème d'optimisation bi-objectifs a été détaillé, avec une analyse approfondie des choix qui ont mené à l'adoption de l'algorithme génétique NSGA-II. De plus, les détails d'implémentation et de paramétrage de cette méthode ont été discutés.

L'apport principal de notre travail consiste à l'implémentation particulière des opérateurs de croisement et de mutation ainsi que l'initialisation de la population. L'objectif principal est de favoriser la convergence de la population et de maximiser leurs performances.

L'application de cette démarche d'optimisation a donné lieu à des résultats prometteurs, tant sur le cas d'école simple que sur le cas d'étude réel. Nous avons comparé en détail les résultats de notre approche d'optimisation avec la démarche de dimensionnement classique basée sur l'essai-erreur, soulignant ainsi les avantages concrets de notre méthode.

Cependant, il est important de reconnaître les questions qui restent à explorer. En particulier, les défis associés au dimensionnement des infrastructures pour les lignes comportant plusieurs technologies d'alimentation électrique, comme la recharge et la ligne aérienne de contact (LAC). Ces projets impliquent des types de variables diversifiés, nécessitant une nouvelle formulation du problème et l'adaptation de notre outil de simulation. Les choix d'implémentation de notre algorithme NSGA2 doivent être réexaminés en fonction de ces nouvelles contraintes et des nouvelles variables.

Il est également important de noter que cette thèse ne prend pas en compte l'aide à la décision pour des choix plus globaux, tels que les technologies d'alimentation électrique à utiliser, le choix entre plusieurs matériels roulants, ou encore les choix concernant le tracé de la ligne. Ces choix doivent être faits dans les phases initiales

ou indépendantes du projet, avant l'optimisation du dimensionnement. Notre algorithme est conçu pour fonctionner avec un matériel roulant fixé, un trafic bien défini et une technologie d'alimentation basée sur la ligne aérienne de contact uniquement.

En fin de compte, cette thèse a jeté les bases d'une nouvelle approche prometteuse pour le dimensionnement des infrastructures électriques, offrant des avantages significatifs en termes de réduction des coûts et d'amélioration de la fiabilité. Cette recherche n'est pas seulement limitée à l'électrification des tramways et des métros, elle a un potentiel d'application bien plus vaste dans le domaine de l'ingénierie électrique. Elle contribue ainsi de manière significative aux avancées en matière de durabilité environnementale et économique des infrastructures de transport urbain.

Avec le développement croissant du transport ferroviaire en France et dans le monde, ainsi que la multitude de projets à l'horizon, le futur de la recherche dans ce domaine s'annonce des plus prometteurs. Il offre de vastes possibilités pour explorer de nouvelles technologies, perfectionner les méthodes d'optimisation et contribuer de manière significative à la durabilité des systèmes de transports collectifs urbains. Cette thèse représente un jalon important, tout en marquant le commencement d'une recherche continue et d'une progression constante dans la conception des infrastructures électriques. Ce chemin nous conduira vers un avenir plus efficient, économique et respectueux de l'environnement.

6.2. Perspectives :

La conclusion de cette thèse marque non seulement la fin d'un parcours de recherche passionnant mais ouvre également la porte à un avenir prometteur dans le domaine du dimensionnement des infrastructures d'alimentation électrique ferroviaire. Au-delà des résultats présentés dans notre thèse, il est essentiel de mettre en lumière les nombreuses perspectives intéressantes qui s'offrent à la recherche dans ce domaine. Il existe une multitude de perspectives qui explorent les voies possibles pour poursuivre les avancées dans le dimensionnement des infrastructures électriques, ainsi que les défis à relever.

L'extension aux différentes technologies d'alimentation électrique : L'un des défis futurs majeurs dans le domaine du dimensionnement des infrastructures d'alimentation électrique ferroviaire est l'extension de la méthodologie développée dans cette thèse pour prendre en compte une variété de technologies d'alimentation. Alors que notre travail se concentrait principalement sur la ligne aérienne de contact (LAC), il est impératif d'adapter cette approche aux projets qui intègrent des technologies diverses, telles que les batteries embarquées, ou d'autres solutions émergentes. Chacune de ces technologies présente des caractéristiques et des besoins spécifiques en matière de dimensionnement, ce qui nécessitera une révision de la formulation du problème et des outils de simulation.

Pour les lignes complexes, cela implique d'étendre la capacité de notre outil de simulation pour simuler des configurations complexes dans délais courtes, ouvrant ainsi la voie à une approche d'optimisation. Cette perspective s'accompagne également de la nécessité de développer des méthodes d'optimisation pour les lignes et les réseaux de lignes complexes. Les problèmes d'optimisation multi-objectifs doivent être élargis pour intégrer des critères spécifiques à chaque technologie d'alimentation, en tenant compte des coûts associés, de la fiabilité et de l'efficacité énergétique propres à chaque segment de la ligne.

Intégration de l'aide à la décision : Bien que notre approche se concentre sur l'optimisation du dimensionnement des infrastructures électriques, il est important de reconnaître que d'autres décisions critiques influent sur la conception globale des systèmes de transport ferroviaire. Les choix concernant les technologies d'alimentation électrique, le matériel roulant, ou le tracé de la ligne sont des éléments cruciaux qui doivent être pris en compte dans les phases initiales du projet. L'intégration de ces décisions dans un cadre plus global d'aide à la décision représente une direction de recherche importante.

Durabilité et impact environnemental : Dans un contexte de préoccupations croissantes concernant la durabilité et l'impact environnemental, la recherche dans le domaine du transport ferroviaire est plus pertinente que jamais. Les infrastructures électriques jouent un rôle crucial dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre et dans la promotion de modes de transport durables. La recherche future devrait s'efforcer

de maximiser l'efficacité énergétique, de minimiser l'empreinte carbone et d'intégrer des critères de durabilité plus larges dans le dimensionnement des infrastructures

Stratégies d'Exploitation Éco-Énergétiques : L'optimisation ne se limite pas aux éléments électriques de la ligne, mais s'étend également aux stratégies d'exploitation. Il est essentiel de développer des méthodes de conduite éco-énergétiques qui minimisent la consommation d'énergie tout en maintenant un niveau et une qualité de service de transport adéquates. Cela implique l'adoption de profils de vitesse et d'accélération plus efficaces, la réduction des arrêts inutiles et l'utilisation judicieuse des phases de freinage régénératif pour récupérer de l'énergie.

Dimensionnement flexible : Une autre perspective importante consiste à explorer la flexibilité dans la conception des infrastructures électriques. Les réseaux de transport ferroviaire évoluent avec le temps, et les besoins peuvent changer en fonction des différents phasages du projet, des évolutions technologiques, des exigences environnementales et des variations de la demande. Les systèmes d'alimentation électrique doivent être conçus pour s'adapter à ces changements. La recherche future pourrait se pencher sur des approches flexibles qui permettent d'ajuster facilement le dimensionnement des infrastructures en fonction des besoins changeants. Ce type d'approche pourrait permettre d'assurer l'optimalité du système sur toutes les phases d'un projet et éviter des rénovations majeures dans le futur.

Applications élargies dans l'ingénierie électrique : Les méthodes d'optimisation et les outils de simulation développés dans cette thèse ne se limitent pas aux seules infrastructures ferroviaires. Ils ont le potentiel d'être adaptés et appliqués à d'autres domaines de l'ingénierie électrique. Par exemple, la gestion des réseaux électriques, la planification des infrastructures énergétiques, ou la conception de systèmes de stockage d'énergie pourraient tous bénéficier de ces approches d'optimisation multi-objectifs. Cette expansion des applications pourrait ouvrir de nouvelles opportunités de recherche et de développement.

En conclusion, les perspectives évoquées ici ne sont que le début, et la recherche continue dans ce domaine promet d'apporter des améliorations significatives en termes de coûts, de fiabilité et de durabilité. La poursuite de cette recherche contribuera à façonner un avenir plus efficient, économique et respectueux de l'environnement pour les systèmes de transports collectifs urbains, tout en ouvrant la voie à des avancées majeures dans l'ingénierie électrique.

Références :

- [1] « Information GES des prestations de transport », Ministères Écologie Énergie Territoires. Consulté le: 24 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ecologie.gouv.fr/information-ges-des-prestations-transport>
- [2] « « Renfort de l'offre des tramways en Ile-de-France », Document du Stif, 15 juin 2015 ». Consulté le: 3 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://archive.wikiwix.com/cache/index2.php?url=http%3A%2F%2Fwww.stif.org%2FIMG%2Fpdf%2Fstif_-_ca_1506015_-_cp_offre_tramway.pdf%2Findex.html#federation=archive.wikiwix.com&tab=url
- [3] « Les lignes de Tramway - Sytral ». Consulté le: 3 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sytral.fr/426-les-lignes-de-tramway.htm>
- [4] « Tramway : 1er réseau de France ». Consulté le: 3 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.strasbourg.eu/tramway-1er-reseau-de-france>
- [5] « Chiffres clés | La CUB ». Consulté le: 3 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://archive.wikiwix.com/cache/index2.php?url=http%3A%2F%2Fwww.lacub.fr%2Ftramway%2Fchiffres-cles-0#federation=archive.wikiwix.com&tab=url>
- [6] W. Tan, « Tan.fr - Chiffres clés ». Consulté le: 3 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://archive.wikiwix.com/cache/index2.php?url=https%3A%2F%2Fwww.tan.fr%2Fjsp%2Ffiche_pagelibre.jsp%3FCODE%3D18076193%26LANGUE%3D0%26RH%3DETLA-SEMITAN%26RF%3D1228218051028#federation=archive.wikiwix.com&tab=url
- [7] P. Chapas, « Alimentation en énergie des trains - Distribution de l'énergie électrique », *Systèmes ferroviaires*, nov. 2012, doi: 10.51257/a-v1-trp3000.
- [8] S. N. Talukdar et R. L. Koo, « The analysis of electrified ground transportation networks », *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 96, n° 1, p. 240-247, janv. 1977, doi: 10.1109/T-PAS.1977.32330.
- [9] B. Desjouis, G. Remy, F. Ossart, C. Marchand, J. Bignon, et E. Sourdille, « A new generic problem formulation dedicated to electrified railway systems », in *2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS)*, mars 2015, p. 1-6. doi: 10.1109/ESARS.2015.7101437.
- [10] C.-W. Ho, A. Ruehli, et P. Brennan, « The Modified Nodal Approach to Network Analysis », *Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, p. 504-509, juill. 1975, doi: 10.1109/TCS.1975.1084079.
- [11] A. Finlayson, C. J. Goodman, et R. D. White, « Investigation into the computational techniques of power system modelling for a DC railway », in *Computers in Railways X*, Prague, Czech Republic: WIT Press, juin 2006, p. 735-745. doi: 10.2495/CR060721.
- [12] B. Stott, « Review of load-flow calculation methods », *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, n° 7, p. 916-929, juill. 1974, doi: 10.1109/PROC.1974.9544.
- [13] C. H. Bae, « A simulation study of installation locations and capacity of regenerative absorption inverters in DC 1500V electric railways system », *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, n° 5, p. 829-838, mai 2009, doi: 10.1016/j.simpat.2009.02.003.
- [14] « Newton-Raphson-Method.pdf ». Consulté le: 1 septembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ijser.org/researchpaper/Newton-Raphson-Method.pdf>
- [15] D. A. Knoll et D. E. Keyes, « Jacobian-free Newton-Krylov methods: a survey of approaches and applications », *Journal of Computational Physics*, vol. 193, n° 2, p. 357-397, janv. 2004, doi: 10.1016/j.jcp.2003.08.010.
- [16] A. Gil, J. Segura, et N. M. Temme, *Numerical methods for special functions*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007.
- [17] C. J. Goodman et L. K. Sin, « DC railway power network solutions by diakoptics », in *Proceedings of IEEE/ASME Joint Railroad Conference*, mars 1994, p. 103-110. doi: 10.1109/RRCON.1994.289015.
- [18] B. Desjouis, F. OSSART, S. Saad, J. Bignon, et E. SOURDILLE, « Modélisation générique de réseaux électriques ferroviaires », in *Symposium de Genie Electrique*, Grenoble, France, juin 2016.
- [19] O. Bossi, « Contribution au dimensionnement et à la gestion par optimisation de systèmes de stockage d'énergie pour les réseaux électriques ferroviaires », p. 125.
- [20] « siemens-sidytrac-pi-en.pdf ». Consulté le: 31 août 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:ad3c8251-2b8b-464b-bda3-26a416368c2f/siemens-sidytrac-pi-en.pdf>

- [21] « LTK | TrainOps ». Consulté le: 24 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ltk.com/trainops>
- [22] « Logiciel de simulation FABEL », Enotrak. Consulté le: 1 septembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://enotrak.com/fr/produits/logiciel-de-simulation-fabel/>
- [23] M. Ström, M. Ekström, et F. Gauffin, « Evaluation of Weak Relations in TracFeed ».
- [24] L. Abrahamsson, « Railway Power Supply Models and Methods for Long-term Investment Analysis », 2008. Consulté le: 24 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Railway-Power-Supply-Models-and-Methods-for-Abrahamsson/ffc6a8b6b6f369cb7d98a8bc6c5d33e1f0c96bc8>
- [25] « OpenPowerNet - Simulation software for railway power supply systems ». Consulté le: 24 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.openpowernet.de/>
- [26] « OpenTrack Railway Technology - Railway Simulation ». Consulté le: 24 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack_e/opentrack_e.html
- [27] « DOSSIER DE PRESSE PDF Free Download ». Consulté le: 24 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://docplayer.fr/57169134-Dossier-de-presse-2014.html>
- [28] « SYSTRA: RAILSIM X® », SYSTRA Canada (formerly CANARAIL Consultants Inc.), certified ISO 9001:2015 and a member of the SYSTRA group, is a leading Canadian transportation engineering firm offering its services worldwide. Consulté le: 31 août 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.systracanada.com/en/services-expertise/digital-solutions/article/railsim-x-r>
- [29] « Symphonie », SETEC. Consulté le: 23 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.setec.fr/realisations/symphonie>
- [30] W. D. Johnston, *Mainline Railway Electrification : an Economic Feasibility Model*. Thesis (M.Sc.)-University of British Columbia, 1975.
- [31] L. De Koranyi, « Design of DC Power Supply for Rapid Transit Systems », *IEEE Trans. on Ind. Gen. Applicat.*, vol. IGA-1, n° 2, p. 123-130, mars 1965, doi: 10.1109/TIGA.1965.4180525.
- [32] T. A. Kneschke, « Simple Method for Determination of Substation Spacing for AC and DC Electrification Systems », *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. IA-22, n° 4, p. 763-780, juill. 1986, doi: 10.1109/TIA.1986.4504789.
- [33] S. N. Talukdar et R. L. Koo, « The analysis of electrified ground transportation networks », *IEEE Trans. on Power Apparatus and Syst.*, vol. 96, n° 1, p. 240-247, janv. 1977, doi: 10.1109/T-PAS.1977.32330.
- [34] C. J. Goodman, « A review of simulation models for railway systems », in *International Conference on Developments in Mass Transit Systems*, London, UK: IEE, 1998, p. 80-85. doi: 10.1049/cp:19980101.
- [35] C. H. Bae, « A simulation study of installation locations and capacity of regenerative absorption inverters in DC 1500V electric railways system », *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, n° 5, p. 829-838, mai 2009, doi: 10.1016/j.simpat.2009.02.003.
- [36] T. Capuder, L. Lugaric, J. Brekalo-Strbic, et S. Krajcar, « Optimizing the train power system in Zagreb », in *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, sept. 2009, p. 41-45. doi: 10.1109/VPPC.2009.5289872.
- [37] « NEPLAN ». Consulté le: 22 septembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.neplan.ch/neplanproduct/en-electricity/>
- [38] Hui-Jen Chuang, Chao-Shun Chen, Chia-Hung Lin, et Shi-Hong Chu, « Optimization of inverter placement for mass rapid transit systems using genetic algorithm », in *2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, Dalian, China: IEEE, 2005, p. 1-6. doi: 10.1109/TDC.2005.1546968.
- [39] E. Pilo, S. K. Mazumder, et I. Gonzalez-Franco, « Smart Electrical Infrastructure for AC-Fed Railways With Neutral Zones », *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, p. 1-11, 2014, doi: 10.1109/TITS.2014.2336535.
- [40] N. X. H. Viet, H.-S. Song, et K. Nam, « Locating Power Supplies on a Personal Rapid Transit System to Minimize System Losses », *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 40, n° 6, p. 1671-1677, nov. 2004, doi: 10.1109/TIA.2004.836310.
- [41] F. H. Pereira, C. L. Pires, et S. I. Nabeta, « Optimal placement of rectifier substations on DC traction systems », *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 4, n° 3, p. 62-69, sept. 2014, doi: 10.1049/iet-est.2010.0063.
- [42] M. Soler, J. Lopez, J. M. Mera Sanchez De Pedro, et J. Maroto, « Methodology for Multiobjective Optimization of the AC Railway Power Supply System », *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, vol. 16, n° 5, p. 2531-2542, oct. 2015, doi: 10.1109/TITS.2015.2412460.
- [43] J. Mera, S. Tapia, C. Vera, and J. Jaén, « "Railway lines operation simulator: GifTren," in Proc. 7th Int. Conf. COMPRAIL Aided Des. Adv. Mass ».

- [44] M. Soler Nicolau, J. López, S. Tapia, et J. M. Mera, « Expert system using multi-objective optimization of the direct current railway power supply system », *Transport*, vol. 33, n° 1, p. 131-142, nov. 2015, doi: 10.3846/16484142.2015.1108225.
- [45] L. Abrahamsson et L. Söder, « Fast Estimation of Relations Between Aggregated Train Power System Data and Traffic Performance », *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, n° 1, p. 16-29, janv. 2011, doi: 10.1109/TVT.2010.2091293.
- [46] L. Abrahamsson, *Railway power supply models and methods for long-term investment analysis*. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2008.
- [47] L. Abrahamsson and L. Soder, « "Railway power supply investment decisions considering the voltage drops—Assuming the future traffic to be known," in Proc. 15th IEEE Int. Conf. ISAP, 2009, pp. 1–6 ».
- [48] « CONOPT ». Consulté le: 28 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.gams.com/latest/docs/S_CONOPT.html
- [49] « GAMS - Cutting Edge Modeling ». Consulté le: 28 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gams.com/>
- [50] « scipy.optimize.root — SciPy v1.10.1 Manual ». Consulté le: 22 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.root.html>
- [51] « A Hybrid Method for Nonlinear Equations | BibSonomy ». Consulté le: 3 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.bibsonomy.org/bibtex/1b647d7e87ad7e4dd26f023b49122374b/tboehme>
- [52] Y.-X. Yuan et ,State Key Laboratory of Scientific/Engineering Computing, Institute of Computational Mathematics and Scientific/Engineering Computing,Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Zhong Guan Cun Donglu 55, Beijing, 100190, « Recent advances in numerical methods for nonlinear equations and nonlinear least squares », *Numerical Algebra, Control & Optimization*, vol. 1, n° 1, p. 15-34, 2011, doi: 10.3934/naco.2011.1.15.
- [53] C. G. Broyden, « A class of methods for solving nonlinear simultaneous equations », *Math. Comp.*, vol. 19, n° 92, p. 577-593, 1965, doi: 10.1090/S0025-5718-1965-0198670-6.
- [54] C. G. Broyden, « The Convergence of an Algorithm for Solving Sparse Nonlinear Systems », *Mathematics of Computation*, vol. 25, n° 114, p. 285-294, 1971, doi: 10.2307/2004922.
- [55] D. G. Anderson, « Iterative Procedures for Nonlinear Integral Equations », *J. ACM*, vol. 12, n° 4, p. 547-560, oct. 1965, doi: 10.1145/321296.321305.
- [56] M. Y. Waziri, W. J. Leong, et M. A. Hassan, « Diagonal Broyden-Like Method for Large-Scale Systems of Nonlinear Equations ».
- [57] P. N. Brown et Y. Saad, « Hybrid Krylov Methods for Nonlinear Systems of Equations », *SIAM J. Sci. and Stat. Comput.*, vol. 11, n° 3, p. 450-481, mai 1990, doi: 10.1137/0911026.
- [58] S. Saad, « Méthodologie de réorganisation du trafic ferroviaire par analyse de sensibilité régionale: application à un incident sur infrastructure électrique », p. 224.
- [59] « NF EN 50388 », Afnor EDITIONS. Consulté le: 9 août 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.boutique.afnor.org/en-gb/standard/nf-en-50388/railway-applications-power-supply-and-rolling-stock-technical-criteria-for-fa175298/39933>
- [60] M. G. Sahab, V. V. Toropov, et A. H. Gandomi, « A Review on Traditional and Modern Structural Optimization », Elsevier, 2013, p. 25-47. doi: 10.1016/B978-0-12-398364-0.00002-4.
- [61] Y. Collette et P. Siarry, *Optimisation multiobjectif*. in Algorithmes. Paris: Eyrolles, 2002.
- [62] C. Audet, J. Bignon, D. Cartier, S. Le Digabel, et L. Salomon, « Performance indicators in multiobjective optimization », *European Journal of Operational Research*, vol. 292, n° 2, p. 397-422, 2020, doi: 10.1016/j.ejor.2020.11.016.
- [63] K. Deb, *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, 1st ed. in Wiley-Interscience series in systems and optimization. Chichester ; New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [64] R. L. Keeney et H. Raiffa, *Decisions with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs*. in Decisions with multiple objectives: Preferences and value tradeoffs. New York, NY, US: Cambridge University Press, 1976, p. xix, 569.
- [65] J. P. Ignizio, « An introduction to goal programming with applications in urban systems », *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 5, n° 1-2, p. 15-33, janv. 1980, doi: 10.1016/0198-9715(80)90055-1.
- [66] D. E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Reading, Mass: Addison-Wesley Pub. Co, 1989.
- [67] J. Horn, N. Nafpliotis, et D. Goldberg, « Multiobjective Optimization Using The Niche Pareto Genetic Algorithm », mai 1994.

- [68] E. Zitzler et L. Thiele, « An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: the strength Pareto approach », ETH Zurich, Report, mai 1998. doi: 10.3929/ethz-a-004288833.
- [69] J. Knowles et D. Corne, « The Pareto archived evolution strategy: a new baseline algorithm for Pareto multiobjective optimisation », in *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, juill. 1999, p. 98-105 Vol. 1. doi: 10.1109/CEC.1999.781913.
- [70] K. Deb, S. Agrawal, A. Pratap, et T. Meyarivan, « A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II », in *Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI*, vol. 1917, M. Schoenauer, K. Deb, G. Rudolph, X. Yao, E. Lutton, J. J. Merelo, et H.-P. Schwefel, Éd., in Lecture Notes in Computer Science, vol. 1917. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000, p. 849-858. doi: 10.1007/3-540-45356-3_83.
- [71] K. Deb et S. Agrawal, « Understanding Interactions among Genetic Algorithm Parameters », présenté à Foundations of Genetic Algorithms, 1998. Consulté le: 19 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Understanding-Interactions-among-Genetic-Algorithm-Deb-Agrawal/eec6ce98424d06ee41f24f96e2eb004fe2b416f8>
- [72] M.-H. Mabed, M. Rahoual, E.-G. Talbi, et C. Dhaenens, « ALGORITHMES GÉNÉTIQUES MULTICRITÈRES », 2001.
- [73] « Adaptation in Natural and Artificial Systems », MIT Press. Consulté le: 30 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://mitpress.mit.edu/9780262581110/adaptation-in-natural-and-artificial-systems/>
- [74] M. Mauldin, « Maintaining Diversity in Genetic Search », présenté à AAAI Conference on Artificial Intelligence, août 1984. Consulté le: 30 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Maintaining-Diversity-in-Genetic-Search-Mauldin/7ed6e91c005986ee51744670d9ea79fb319cba6f>
- [75] J. E. Baker, « Adaptive Selection Methods for Genetic Algorithms », présenté à International Conference on Genetic Algorithms, juill. 1985. Consulté le: 30 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Adaptive-Selection-Methods-for-Genetic-Algorithms-Baker/58f88b69bea76b2937967acc8942442003797272>
- [76] D. E. Goldberg et J. Richardson, « Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization », in *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms on Genetic algorithms and their application*, USA: L. Erlbaum Associates Inc., oct. 1987, p. 41-49.
- [77] S. W. Mahfoud, « Crowding and Preselection Revisited », p. 15.
- [78] D. Beasley, « A Sequential Niche Technique for Multimodal Function Optimization », vol. 1, n° 2, p. 25.
- [79] N. Casas, « Genetic Algorithms for multimodal optimization: a review », *arXiv:1508.05342 [cs]*, juin 2015, Consulté le: 13 mars 2021. [En ligne]. Disponible sur: <http://arxiv.org/abs/1508.05342>
- [80] M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*. The MIT Press, 1998. doi: 10.7551/mitpress/3927.001.0001.
- [81] N. Srinivas et K. Deb, « Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms », *Evolutionary Computation*, vol. 2, n° 3, p. 221-248, sept. 1994, doi: 10.1162/evco.1994.2.3.221.
- [82] M. Hort et F. Sarro, « The Effect of Offspring Population Size on NSGA-II: A Preliminary Study », p. 2.
- [83] H. Aytug et G. J. Koehler, « New Stopping Criterion for Genetic Algorithms », in *European Journal of Operational Research*, 2000, p. 662-674.
- [84] Ahmad Hassanat, « Choosing Mutation and Crossover Ratios for Genetic Algorithms-A Review with a New Dynamic Approach ».