

# Optimisation énergétique des tables horaires

*« They didn't know it was impossible so they did it. »*

---

Mark Twain

## Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>1.2</b>	<b>Contexte des travaux de thèse</b>	<b>4</b>
1.2.1	Contexte historique	4
1.2.2	Contexte sociétal et environnemental	5
1.2.2.1	Augmentation de l'urbanisation	5
1.2.2.2	Épuisement des ressources fossiles et contraintes environnementales	6
1.2.2.3	Évolution des transports urbains	7
1.2.2.4	Solutions envisagées	8
<b>1.3</b>	<b>Planification ferroviaire</b>	<b>9</b>
1.3.1	Planification stratégique et Planification opérationnelle	9
1.3.2	Évaluation de la capacité	9
1.3.3	Problème de planification des trains	10
1.3.3.1	Utilisation de la Recherche Opérationnelle	10
1.3.3.2	Exemples de résolution du train timetabling problem	11
<b>1.4</b>	<b>Optimisation énergétique en milieu ferroviaire</b>	<b>11</b>
1.4.1	Réduction des pics de puissance électrique consommée	12
1.4.2	Diminution de la consommation électrique	12
1.4.3	Modélisation des flux de puissance	13
<b>1.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>13</b>

---

## 1.1 Introduction

Ce premier chapitre est composé de trois parties. Tout d'abord, le contexte social et environnemental est présenté afin de situer les enjeux de l'étude. Cette partie introduit les problématiques liées à l'urbanisation croissante et à la raréfaction des ressources qui induisent le besoin de faire évoluer la gestion des transports ferroviaires urbains en augmentant leur efficacité énergétique.

Ensuite, le concept de la planification ferroviaire est défini afin d'explicitier la complexité de concevoir des tables horaires pour l'exploitant. Un état de l'art est réalisé pour décrire les différentes méthodes qui ont été utilisées au fil des décennies pour résoudre le problème de planification ferroviaire.

Enfin, quelques travaux proposant des solutions pour traiter le problème de l'optimisation énergétique de lignes ferroviaires sont analysés. Deux grands axes d'études sont décrits : la réduction des pics de puissance appelée et la réduction de la consommation énergétique globale des lignes ferroviaires.

Cette étude permet alors de souligner la nécessité de disposer d'un modèle énergétique précis permettant de calculer les flux de puissance qui se produisent lors des phases d'exploitation afin de prendre en compte le caractère non linéaire du freinage récupératif.

## 1.2 Contexte des travaux de thèse

### 1.2.1 Contexte historique

En 1662, sous l'impulsion de Blaise Pascal, la ville de Paris met en place le premier service de transport en commun du monde. Ce service composé initialement de 5 lignes, dont une permettait d'effectuer le tour de la périphérie de Paris, était assuré par des carrosses tractés par des chevaux.

Il faut ensuite attendre 1832 pour voir la première ligne de transport urbain à traction thermique être mise en service à New York. Dans les 50 années qui suivirent, la plupart des capitales européennes se sont dotées d'au moins une ligne de tramway similaire à celle de New-York.

Par la suite, l'urbanisation qui eut lieu au XXème siècle a vu une densification des réseaux de transports urbains, ainsi que l'abandon de la traction hippomobile au profit de la traction vapeur puis de la traction électrique.

C'est ainsi qu'en 1879, Werner Von Siemens fait la démonstration à Berlin de la première locomotive électrique sur un circuit circulaire, puis commercialise ce principe dès 1881 dans la périphérie de Berlin avec une ligne de tramway de 2,4km de long.

L'histoire des métros est quant à elle relativement récente : la première ligne de métro électrique voit le jour à Londres en 1890 et ce n'est qu'en 1983 que la première ligne de métro automatisée est ouverte à l'exploitation à Lille.

## 1.2.2 Contexte sociétal et environnemental

Ce sujet de thèse se trouve à l'intersection des trois piliers du développement durable, à savoir l'économie, l'écologie et le social. Il s'agit de faire évoluer les modes d'exploitation de lignes ferroviaires pour assurer à la fois une amélioration de leur efficacité énergétique, une réduction des coûts d'exploitation (ou tout du moins une stabilisation) et une maximisation de la satisfaction client.

### 1.2.2.1 Augmentation de l'urbanisation

Le XXème siècle a vu l'avènement de l'urbanisation, la population urbaine est passée de 15% à 45% au cours du siècle dernier. [1] et [2] estiment ainsi qu'en 2050, 70% de la population mondiale sera concentrée dans des villes. Cette urbanisation croissante s'accompagne également d'une augmentation des flux de mobilités urbains et périurbains.

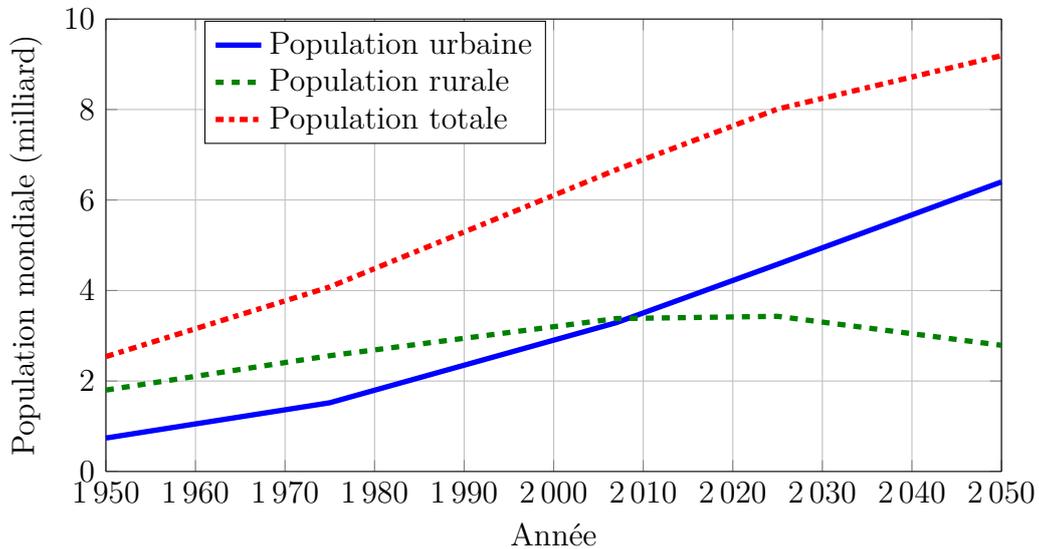


FIGURE 1.1 – Evolution de la population mondiale en valeur absolue.

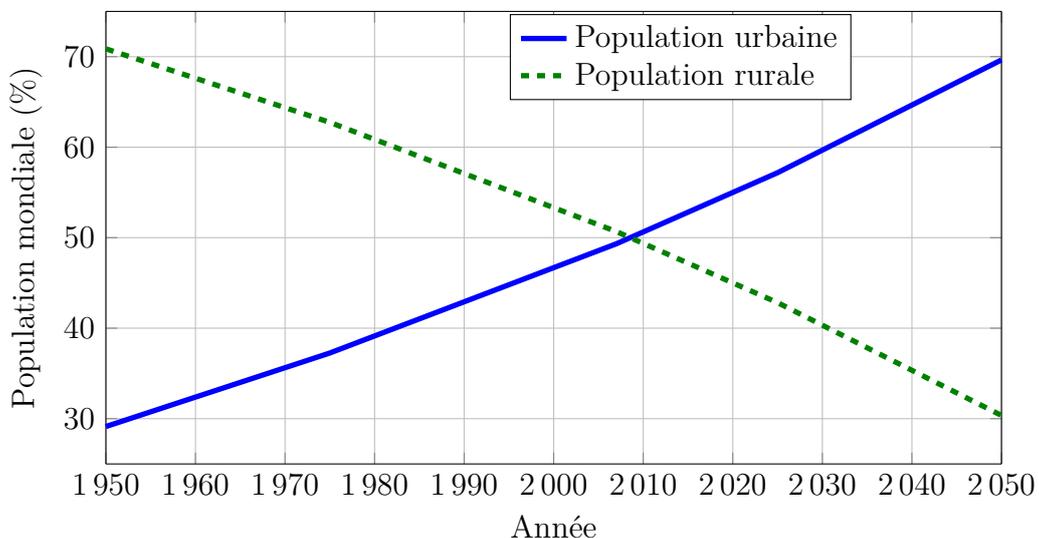


FIGURE 1.2 – Evolution de la population mondiale en valeur relative.

Les figures 1.1 et 1.2 sont issues des données fournies par l'ONU dans [3]. En 2050, les projections indiquent que la population mondiale va croître de 29% par rapport à 2010 pour s'établir à 9 milliards d'individus.

### 1.2.2.2 Épuisement des ressources fossiles et contraintes environnementales

Le développement démographique mondial s'accompagne également d'un accroissement de la consommation de ressources naturelles et notamment des énergies fossiles.

De 1973 à 2013, la consommation énergétique mondiale a ainsi plus que doublé et en 2012, 81,7% de cette énergie a été produite par la combustion d'énergies fossiles.

Ainsi, les scénarios les plus pessimistes estiment que les réserves en pétrole, gaz et matières fissiles seraient épuisées d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle [4].

Le tableau 1.1 illustre la répartition de la consommation énergétique mondiale par secteur pour les années 1990 et 2012 [5].

Secteur	1973	1990	2012
Industrie	33%	29%	28%
Transport	23%	25%	27%
Résidentiel	-	24%	23%
Tertiaire	-	7%	8%
Agriculture	-	3%	2%
Autres	-	12%	12%

TABLEAU 1.1 – Répartition de la consommation énergétique mondiale par secteur.

D'après l'IEA<sup>1</sup>, environ 40% de la consommation énergétique mondiale des transports est due aux déplacements urbains en 2012. Cependant, selon [2] la consommation des transports urbains est amenée à doubler d'ici 2050 du fait de l'augmentation des flux humains à l'intérieur des villes.

Outre la problématique de l'épuisement des ressources énergétiques fossiles, l'accroissement de la population mondiale a aussi un impact environnemental non négligeable. Depuis sa création en 1988, le GIEC<sup>2</sup> a multiplié les études et les rapports pour évaluer l'influence de l'activité humaine sur le réchauffement climatique et proposer des stratégies d'adaptation/atténuation.

Le GIEC a ainsi mis en lumière la nécessité de réduire les émissions de gaz à effets de serre afin de limiter le réchauffement climatique global [6], [7]. En 2014 les gouvernements européens ont adopté un nouveau plan d'action appelé *Plan Climat* dont l'objectif est de mettre en place une politique européenne énergétique à horizon 2030. Cette politique vise d'une part à réduire de 40% les émissions de gaz à effet de serre par rapport à celles de 1990, d'autre part à améliorer de 27% l'efficacité énergétique globale des infrastructures consommatrices et enfin de faire passer à 27% la part de la production énergétique issue de sources renouvelables.

1. International Energy Agency

2. Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat

### 1.2.2.3 Évolution des transports urbains

Dans ce contexte d'urbanisation croissante couplée au besoin accru de mobilité des hommes et des biens de consommation, l'évolution des transports urbains doit répondre à deux objectifs contradictoires.

Premièrement, la nécessité d'augmenter l'offre de transport afin de faciliter les flux humains et matériels entre les tissus urbains et péri-urbains. Deuxièmement, l'adoption d'une démarche environnementale responsable pour limiter l'impact écologique de la mondialisation.

Depuis quelques années, on assiste au niveau des villes, à un réaménagement des réseaux de transports visant à privilégier le développement des transports collectifs électriques, comme les tramways, les bus électriques ou encore les métros, au détriment des systèmes thermiques plus polluants.

Cependant comme le montre la figure 1.3, appelée *hyperbole de Newman-Kenworthy*, il existe une forte corrélation entre la densité urbaine et l'énergie dépensée pour le transport des personnes [8]. Les villes des pays développés les moins denses sont celles qui consomment le plus de pétrole pour les transports de personnes.

Bien que cette courbe se base sur des données de 1989, elle permet d'entrevoir les perspectives d'une utilisation plus massive des transports en commun et de l'installation de réseaux ferroviaires urbains électriques.

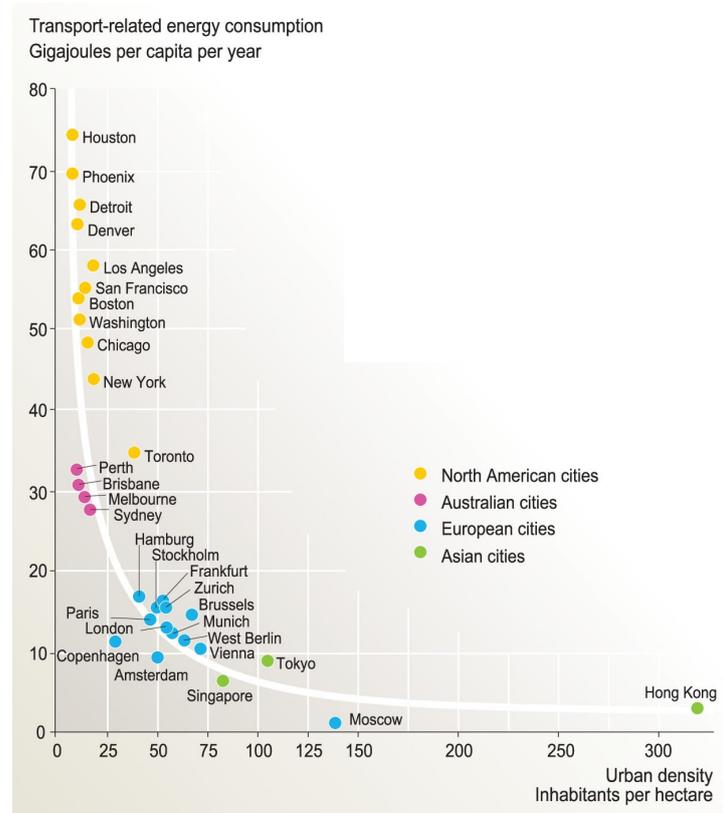


FIGURE 1.3 – Relation entre la consommation énergétique annuelle des transports par habitant et la densité urbaine.

A l'échelle d'entreprises comme Siemens, qui développent des systèmes de transports urbains électriques, les directives européennes et les prises de conscience écologique se

traduisent par le besoin de développer des systèmes toujours plus performants en terme de consommation énergétique tout en assurant la même qualité de service.

Ce dernier point est important, puisque du fait de l'augmentation démographique, l'optimisation énergétique ne doit pas entraîner de diminution des flux de passagers en transit.

#### 1.2.2.4 Solutions envisagées

Les moyens pour réduire la consommation énergétique de lignes de métro sont principalement de trois types : la réduction des performances du matériel roulant, l'utilisation de profils d'éco-conduite et la récupération de l'énergie cinétique issue du freinage.

La réduction des performances du matériel roulant n'est pas une solution envisagée dans cette étude puisque cela nécessiterait d'exploiter plus de trains pour assurer la même qualité de service.

Elle se caractérise notamment par la limitation du taux d'accélération et de la vitesse commerciale des trains pour réduire la consommation globale de la ligne.

L'établissement de profils d'éco-conduite repose sur l'exploitation de la topographie de la ligne pour réduire la consommation énergétique des trains, principalement en insérant des phases de marche sur l'erre sur certaines interstations afin de tirer avantage de la déclivité de la voie.

La marche sur l'erre (MSE) consiste à allonger le temps de parcours des trains en coupant l'alimentation de leurs moteurs sur des portions d'interstation.

Les trains utilisent l'inertie acquise lors de l'accélération pour diminuer la consommation énergétique sur le reste de l'interstation, en ne consommant pas d'énergie de traction lors de ces phases.

Cette approche a été utilisée par [9] pour déterminer l'insertion optimale de phases de marche sur l'erre.

[10] a également étudié l'impact des techniques d'éco-conduite sur la consommation en définissant des profils de vitesse caractérisés par des hautes performances d'accélération/décélération et l'utilisation de phases de marche sur l'erre.

Bien que cette démarche semble prometteuse puisque [9] et [10] ont tous les deux enregistré une diminution de la consommation d'énergie de quelques dizaines de pour cent, une dégradation des temps de parcours a été constatée dans le même temps.

Ainsi, cette approche n'est pas étudiée ici puisqu'elle engendre une diminution de la qualité de service pour un même nombre de trains en ligne.

Dans une ligne de métro classique, le matériel roulant est équipé de deux systèmes de freinage : un frein électrique et un frein mécanique.

La récupération de l'énergie cinétique d'un train se fait donc en maximisant l'utilisation du frein électrique pour transformer cette énergie cinétique en énergie électrique réutilisable par la suite.

L'énergie électrique générée peut alors soit être stockée dans un système de stockage énergétique fixe ou embarqué, soit être renvoyée sur le réseau HTA (Haute Tension niveau A :  $1kV < U_n \leq 50kV$ ) à l'aide de sous-stations réversibles ou être réutilisée par les autres trains circulant sur la ligne.

C'est cette dernière solution qui est étudiée dans ces travaux de thèse puisqu'elle permet d'effectuer l'optimisation énergétique d'une ligne déjà existante sans nécessiter de gros investissements matériels.

## 1.3 Planification ferroviaire

Avant de rentrer dans les détails de l'optimisation énergétique et de présenter les différentes études qui ont servi de point de départ à ces travaux, il convient de proposer un aperçu de la planification ferroviaire et de ses spécificités.

La planification ferroviaire s'effectue en deux étapes : une planification stratégique et une planification opérationnelle.

La planification stratégique dite planification réseau a pour but de définir l'infrastructure du réseau, tandis que la planification opérationnelle a pour objectif d'établir les horaires de passages des trains pour assurer le transit des passagers et également d'assigner un équipage à chaque train en exploitation <sup>3</sup>.

### 1.3.1 Planification stratégique et Planification opérationnelle

La planification stratégique est effectuée sur un horizon long terme pour dimensionner les infrastructures du réseau ferroviaire et, dans des cas de lignes complexes, prévoir les possibilités d'interconnexion entre les lignes pour faciliter le transit des passagers en limitant leur temps d'attente.

Pour cela, l'exploitant a besoin d'effectuer une estimation des flux de passagers sur les différentes lignes, de prévoir des routes ou des voies d'accès pour faciliter les flux humains et enfin de choisir le tracé des lignes du réseau ferroviaire.

La planification opérationnelle est effectuée sur un horizon moyen terme. Elle consiste à prévoir le plan de charge des véhicules et du personnel de sorte à minimiser les besoins matériels et humains pour assurer le service des tables horaires.

Il est à noter que certains auteurs considèrent la conception de tables horaires comme étant une étape de la planification stratégique tandis que d'autres considèrent qu'elle est une étape faisant l'interface entre la planification stratégique et la planification opérationnelle [11].

### 1.3.2 Évaluation de la capacité

La capacité d'une ligne peut se définir comme le nombre maximal de trains pouvant circuler dans un intervalle de temps donné dans des conditions d'exploitation réalistes et pour une structure de ligne, une structure d'horaire et une qualité de service données [12].

En outre, le problème de l'évaluation de la capacité permet de concevoir une offre répondant à une demande future probable sans surdimensionner les infrastructures de la ligne. Il s'agit ainsi de l'une des approches les plus simples pour concevoir des tables horaires performantes.

L'évaluation de la capacité d'une ligne fait intervenir de nombreux paramètres tels que :

- **les infrastructures de la ligne** : nombre de voies, signalisation, vitesse autorisée, maintenance, cisaillements de voies, ...

---

3. Parallèlement, au transit des passagers, cette étape permet également de gérer le transit du fret sur les lignes.

- **le plan de transport** : l’ordonnancement des trains, les contraintes horaires dues aux correspondances ou aux dessertes de voyageurs, ...
- **la qualité de service** : elle est une mesure du service fourni aux usagers de la ligne selon différents critères comme le nombre de passagers transportés par heure ou la fréquence des trains, le confort ainsi que les informations fournies aux usagers, ...

Dans ces travaux, la qualité de service fait référence à la fréquence nominale de passage des trains dans chaque station pour chaque période d’exploitation. Cette notion est à différencier du taux de service qui est assimilée à la stabilité de l’horaire vis à vis des perturbations de trafic.

Il est donc indispensable de prévoir des marges lors de l’élaboration des tables horaires, afin d’éviter l’apparition de problèmes comme les *effets boule de neige* lors de l’exploitation de la ligne.

- **les caractéristiques d’exploitation des trains** : les plages de vitesse commerciales, les taux d’accélération et de décélération, la durée des phases de freinage, la longueur des trains, ...

Le lecteur intéressé pourra se référer aux travaux de [13] et [14] qui ont effectué une étude détaillée des composantes permettant de définir la capacité d’une ligne, et à [15] qui fait une présentation assez exhaustive des travaux effectués sur l’évaluation de la capacité pour différentes lignes réelles ou fictives.

### 1.3.3 Problème de planification des trains

La résolution de l’ensemble des conflits générés par ces deux phases de planification permet de créer des tables horaires qui respectent l’ensemble des exigences d’exploitation.

Ce problème de planification ferroviaire est plus connu dans la littérature sous l’appellation *train timetabling problem* (TTP), il s’agit d’un des problèmes les plus complexes dans le domaine ferroviaire qui a fait l’objet d’un très grand nombre de publications scientifiques et de travaux de thèse.

Avant l’utilisation de l’informatique, la planification des horaires des réseaux ferroviaires était réalisée manuellement.

Les tables horaires étaient conçues par essais et erreurs et étaient alors très dépendantes de l’expérience du planificateur et de la connaissance de la ligne [16], [17],[18].

Historiquement, ce sont les méthodes mathématiques issues de la Recherche Opérationnelle (RO) qui ont été les premières à être utilisées pour résoudre le TTP [19].

#### 1.3.3.1 Utilisation de la Recherche Opérationnelle

La Recherche Opérationnelle moderne tire son origine de la seconde guerre mondiale. À cette époque, l’armée britannique souhaitait d’une part rationaliser la logistique de l’approvisionnement en ressources de ses différentes opérations et d’autre part déterminer les emplacements optimaux d’un réseau de radars sur son territoire pour se prémunir contre d’éventuelles attaques aériennes.

L’utilisation de la RO s’est ensuite étendue et généralisée à de nombreuses applications civiles comme l’économie, la médecine, la physique,...

La Recherche Opérationnelle a également eu un rôle prépondérant dans la résolution de problèmes issus de la planification ferroviaire. L'objectif initial était simple : comment augmenter la productivité d'un réseau ferroviaire en minimisant les investissements et les aménagements à effectuer ?

La *Programmation Linéaire* (PL) est l'une des premières formalisations mathématiques de la RO.

L'éthymologie du terme Programmation Linéaire est intéressante au sens qu'initialement le mot *programme* désignait les actions de planification horaires et les choix logistiques de l'armée américaine.

C'est donc assez naturellement que la PL et plus globalement la RO ont été utilisées dans le cadre de la planification ferroviaire [15].

La programmation linéaire a ensuite été déclinée en plusieurs variantes permettant par exemple de résoudre des problèmes non linéaires ou constitués de variables entières [19], [20].

### 1.3.3.2 Exemples de résolution du train timetabling problem

La première tentative de résolution du TTP a été effectuée en 1971 par [21], pour concevoir des tables horaires à l'aide de méthodes d'optimisation mathématiques.

[22] a ensuite introduit en 1989 la notion de planification d'évènement périodique (*periodic event scheduling problem* (PESP)), en considérant la planification horaire de lignes de métro comme la résolution cyclique de TTP.

De nombreuses variantes du TTP ont été étudiées avec des objectifs assez différents selon les applications. [23] a ainsi proposé une méthode dérivée du PESP pour déterminer l'intervalle d'exploitation minimal d'une table horaire tandis que [24] et [25] ont proposé des modèles de tables horaires minimisant le temps d'attente des passagers en station ainsi que l'utilisation du matériel roulant.

A partir des années 1990, l'utilisation d'heuristiques [26],[27], de la logique floue [28] de méthodes de recherche [29] ou encore de techniques de recherche évolutionnaire [30], [31], [9], ont permis de proposer des approches différentes pour résoudre les problèmes de TTP et de diversifier les objectifs de leurs études.

## 1.4 Optimisation énergétique en milieu ferroviaire

Dans la littérature ferroviaire, l'optimisation énergétique d'une ligne de métro fait référence généralement à la poursuite de deux objectifs : la réduction de la consommation électrique globale et la réduction de la puissance maximale appelée.

Sur une ligne ferroviaire électrique, les pics de puissance électrique se produisent lorsqu'un grand nombre de trains consomment de l'énergie simultanément, autrement dit, quand plusieurs trains sont en phase de traction.

Du point de vue de l'exploitant, l'occurrence de ces pics de puissance peut générer des pénalités à payer au fournisseur d'énergie, pour cause de dépassement excessif de la puissance souscrite.

De fait la réduction des pics de puissance permettrait à l'exploitant de pouvoir abaisser la puissance souscrite de la ligne et donc le coût de l'abonnement électrique [32].

Dans le cadre de cette thèse, l'éventualité d'un arrêt de l'exploitation en cas de dépassement de la puissance maximale admissible n'est pas traitée puisque de nombreuses études dimensionnantes sont réalisées en amont de la conception du réseau électrique de traction pour éviter de telles situations.

### 1.4.1 Réduction des pics de puissance électrique consommée

[33] propose de modifier l'horaire de départ aux terminus des trains à l'aide de deux méthodes de résolutions : une résolution par le logiciel commercial CPLEX et une autre par une heuristique, utilisant une formulation de programmation linéaire. L'application de ces méthodes à un modèle simplifié d'une ligne du métro de Séoul permet ainsi une réduction de la puissance maximale de traction de respectivement 32% et 27%. Cependant, ces résultats sont à contraster de par la simplicité de la modélisation et la valeur très élevée du pas de temps de simulation.

[30] évoque la possibilité de réduire les pics de consommation à l'aide d'un algorithme génétique, en allongeant le temps de parcours des trains. C'est à dire en utilisant le temps de battement pour accroître la durée de certains parcours interstation. Cette méthode appliquée à une ligne du réseau S-Bahn de Berlin permet une réduction de 17% de la puissance moyenne (valeurs moyennées sur 15 minutes). Cependant, pour notre cas d'étude, cette approche n'est pas envisageable puisque le matériel roulant utilise des profils de vitesse, que l'on ne cherchera pas à modifier.

[31] utilise également un algorithme génétique pour redéfinir la durée des temps d'arrêt en station, en considérant deux cas de figures : soit des arrêts courts de 25 secondes ou des arrêts longs de 35 secondes. Des simulations menées sur une ligne du métro de Kaohsiung ont montré une amélioration de la puissance pic d'environ 30%.

### 1.4.2 Diminution de la consommation électrique

La littérature portant sur la réduction de consommation de lignes ferroviaires est très riche :

[9] utilise un algorithme génétique pour définir le nombre et la durée des phases d'accélération, de freinage et de marche sur l'erre de parcours interstation.

[34] utilise également un algorithme génétique pour moduler la durée des temps d'arrêt en station. Ces travaux se distinguent des autres par une modélisation très précise des paramètres électriques du réseau ferroviaire. Bien que le cas d'étude choisi reste très simpliste (ligne composée de quatre stations et quatre trains), il offre une démonstration de la validité de la démarche.

[28] met en œuvre un contrôleur flou pour modifier la durée des temps d'arrêt en station afin de maximiser le taux de réceptivité de la ligne. Ce contrôleur évalue la probabilité d'occurrence des transferts d'énergie entre trains.

[35] & [36] utilisent une formulation par PL pour optimiser une table horaire de nuit pour le métro de Madrid en maximisant les périodes de synchronisation des phases de freinage et d'accélération de plusieurs trains. Afin de limiter la complexité du problème, la synchronisation est effectuée par couples de trains. Des essais sites de la méthode ont montré une diminution de 3% de la consommation électrique de la ligne.

[37] souhaite concevoir des tables horaires ayant deux objectifs : la minimisation du temps d'attente des passagers et la maximisation du temps de chevauchement entre phases d'accélération et de freinage. L'auteur prend en compte plusieurs contraintes comme l'utilisation de profils de vitesses, la régulation de trafic autour d'un intervalle

fixe ou la modification des temps d'arrêt en respectant un temps de battement minimal en terminus. La mise en œuvre de la méthode sur une ligne du métro de Pékin, a permis d'enregistrer un gain énergétique de 8% par rapport à une table horaire nominale.

Dans [38], l'auteur utilise une heuristique pour synchroniser les phases de freinage et d'accélération de deux métros consécutifs. L'une des solutions utilisée consiste à insérer des phases de marche sur l'erre. Une simulation de la méthode sur une ligne du métro de Pékin a montré une baisse de la consommation énergétique d'environ 10%.

[39] utilise un simulateur électrique pour modéliser les transferts d'énergie dans la ligne de métro. Les auteurs appliquent une modification des profils de vitesse commerciale ainsi qu'une modification des horaires de départs en station pour effectuer l'optimisation de la consommation. Cependant, l'étude étant réalisée sur une ligne composée de deux métros, son intérêt reste assez limité puisque la complexité du problème étudié est assez éloigné d'un cas réel d'exploitation.

### 1.4.3 Modélisation des flux de puissance

L'état de l'art qui a été effectué sur la problématique de l'optimisation énergétique a permis de mettre en lumière la nécessité de disposer d'un modèle précis des flux de puissances qui s'effectuent sur les lignes ferroviaires.

En effet, parmi les travaux cités précédemment, un grand nombre utilisent un modèle approché qui ne tient pas compte de la dynamique et de la non-linéarité du freinage récupératif, ce qui ne produit pas des résultats réalistes.

A l'inverse, [40], [31] ou encore [39] proposent des outils de simulation assez précis qui permettent d'avoir une assez bonne représentation de l'évolution des paramètres électriques de la ligne.

En outre, la connaissance des flux de puissance entre les différents éléments présents sur une ligne ferroviaire est particulièrement importante dans l'optique d'effectuer une optimisation en temps réel des paramètres de fonctionnement d'une ligne.

## 1.5 Conclusion

Dans ce premier chapitre, un historique des transports urbains ainsi que du contexte sociétal de l'étude a d'abord été présenté afin d'expliquer l'intérêt de faire évoluer l'exploitation des transports urbains.

La problématique de planification ferroviaire a ensuite été introduite pour définir le cadre de l'étude.

Puis un état de l'art des travaux portant sur l'optimisation énergétique en milieu ferroviaire a été dressé afin de souligner les solutions déjà explorées, mais également mettre en avant les limites de ces travaux pour réaliser une optimisation en temps réel de la consommation énergétique d'une ligne ferroviaire.

Ce chapitre a mis en évidence la nécessité d'effectuer une modélisation énergétique précise des éléments circulant sur une ligne ferroviaire afin de pouvoir calculer la consommation induite par l'exploitation et ainsi en déduire des solutions pour la minimiser.

Le chapitre suivant se focalise sur la définition d'une méthodologie permettant de mettre en œuvre un modèle énergétique d'une ligne ferroviaire puis de caractériser le

fonctionnement du freinage récupératif pour enfin en déduire une méthode de résolution permettant de calculer la quantité d'énergie qui peut réellement être renvoyée sur la ligne lors du freinage des trains en exploitation.