

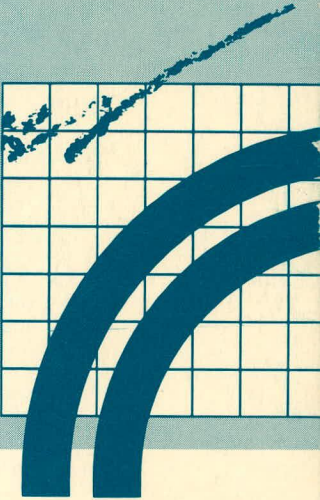
ÉTUDES ET
RECHERCHES
EN TRANSPORTS



OPTIMISATION DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DES RAMES DE MÉTRO DE LA STCUM

MICHEL ALLAIRE
LUCIEN LANTEIGNE
GILLES PAQUETTE

TECHNOLOGIE
ET INSTRUMENTATION

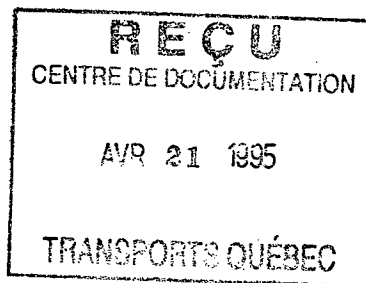


CANQ
TR
1048
334

Québec 

362577

Optimisation de la consommation énergétique des rames de métro de la STCUM



Rédigé par :

Michel Allaire, ing.
Gilles Paquette, ing., MBA
Lucien Lanteigne, ing., MScA

de la

Société de transport de la Communauté urbaine de Montréal

Juillet 1994

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
CENTRE DE DOCUMENTATION
700, BOUL. RENÉ-LÉVESQUE EST,
21^e ÉTAGE
QUÉBEC (QUÉBEC) - CANADA
G1R 5H1

DOR-CEN

CANQ
TR
1048

1997

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec
ISBN 2-550-24097-9



FICHE ANALYTIQUE
DE RAPPORT

Titre et sous-titre du rapport Optimisation de la consommation énergétique des rames de métro de la STCUM				N° du rapport Transports Québec RTQ-95-02	
				Rapport d'étape ☐ An Mois Jour Rapport final ☒ 94 07	
				N° du contrat (RRDD-AA-CCXX)	
Auteur(s) du rapport Michel Allaire, Lucien Lanteigne, Gilles Paquette				Date du début d'étude 91 08	
				Date de fin d'étude 94 07	
Chargé de projet Jean-François Guilloteau				Coût de l'étude 214 327 \$	
Etude ou recherche réalisée par (nom et adresse de l'organisme) Planification et services techniques, Direction exécutive métro et trains de banlieue - STCUM 8850, rue Henri-Julien Montréal (Québec) H2M 1M6			Etude ou recherche financée par (nom et adresse de l'organisme) Société de transport de la communauté urbaine de Montréal (STCUM) 125 454 \$ Ministère des transports du Québec 88 873 \$		
But de l'étude, recherche et renseignements supplémentaires Étude de faisabilité de la réduction de la demande d'énergie électrique afin d'augmenter la fiabilité du réseau, de réduire les coûts d'exploitation et d'entretien sans diminuer l'offre de service offert à la clientèle. Projet financé dans le cadre du programme d'aide à la recherche-développement en transport (PARDT).					
Résumé du rapport Le premier volet du rapport, portant sur la désynchronisation des départs de rames, a démontré qu'il était possible de synchroniser les charges occasionnées par les rames de sorte que les crêtes de puissance instantanée aux postes de district soient réduites de 13 % à 21 %. La réduction des crêtes de puissance permet d'une part de restreindre de nouveaux coûts pour des installations électriques devant supporter ces charges. D'autre part, elle constitue un moyen de contrer des hausses de dépenses qui pourraient découler d'une réduction de la période d'intégration utilisée dans les calculs de facturation du fournisseur d'électricité. La désynchronisation des rames ne cause que très peu de distortion de l'horaire. De fait, plus de 95 % des parcours simulés le long d'une ligne ont subi des retards cumulés inférieurs à 15 secondes. Le second volet de la recherche, concernant l'efficacité énergétique du matériel roulant, a démontré que le régulateur de vitesse, le plus susceptible d'être remplacé à moyen terme, est efficace du point de vue énergétique. Son remplacement par un régulateur à logique floue ne conduirait pas à des gains significatifs. L'étude a aussi conclu que du point de vue énergétique, les marches types actuelles des rames ne sont pas parfaitement optimales. Il appert que des économies allant jusqu'à 10 % pourraient être réalisables dans certaines interstations.					
Nbre de pages 38	Nbre de photos	Nbre de figures 9	Nbre de tableaux	Nbre de références bibliographiques 3	Langue du document ☒ Français ☐ Anglais
Mots-clés Métro, énergie, désynchronisation, logique floue, transport en commun, PARDT				Autorisation de diffusion ☒ Diffusion autorisée ☐ Diffusion interdite	
				Signature du directeur général <i>Lucien Lanteigne</i> 95-02-17 Date	

REMERCIEMENTS

La Société de transport de la Communauté urbaine de Montréal (STCUM) tient à remercier le ministère des Transports du Québec pour son aide, qui s'est révélée essentielle à la réalisation de la recherche. La Société tient également à mentionner tout particulièrement le travail efficace de M. Jean-François Guilloteau, conseiller en recherche et développement au Ministère.

Nous remercions aussi l'École polytechnique et ses chercheurs, qui ont mis leur compétence et leur créativité au service de cette recherche, particulièrement Mme Brunilde Sanso, et M. Pierre Girard, ing. jr., qui ont travaillé à l'étude sur la désynchronisation des rames. Nous tenons à souligner la contribution importante de Mme Maryam Aliakbari Khanbaghi, dont le mémoire de maîtrise, dirigé par M. Roland Malhamé, portait sur le régulateur à logique floue. Nous soulignons aussi la contribution de M. Georges-Émile April, professeur au Département de génie électrique, dont les conseils ont permis d'éviter les écueils habituellement rencontrés dans des projets aussi novateurs.

Ce n'est pas sans tristesse que nous rappelons le souvenir de M. Dinkar Mukedkar, professeur titulaire au Département de génie électrique de l'École polytechnique et inspirateur de la recherche, qui est décédé au cours du projet. Son dynamisme nous a été précieux.

Enfin, nous tenons à remercier tous les employés de la Société qui ont travaillé de près ou de loin à la réalisation des études.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
Liste des figures	IX
Listes des tableaux	XI
Introduction	1
1. Désynchronisation des départs de rames	3
1.1 Généralités	3
1.2 Configuration du réseau	4
1.3 Contrat d'électricité	7
1.4 Problématique	7
1.5 Objectifs de l'étude	8
1.6 Solution retenue	8
1.6.1 Aplatissement des crêtes	8
1.6.2 Limite de l'étude	9
1.6.3 Détermination des profils de demande	9
1.6.4 Aspects mathématiques du problème	13
1.6.4.1 Forme générale du problème	13
1.6.4.2 Méthode heuristique	14
1.7 Expérimentation	16
1.8 Résultats expérimentaux	16
1.9 Limitations dans la précision des résultats	19
1.10 Conclusions sur la désynchronisation des rames	20
2. Amélioration de la performance énergétique du pilote automatique	23
2.1 Généralités	23
2.2 Marche type	23
2.3 Choix du matériel à simuler	24
2.4 Régulateur actuel : PDI	24
2.5 Problématique	25
2.6 Objectifs de la recherche	25
2.7 Limite de la recherche	26
2.8 Processus de construction d'une commande à logique floue	26
2.9 Expérimentation	28
2.9.1 Régulateur avec marche type actuelle	28
2.9.2 Régulateur avec marche type modifiée	31
2.10 Résultats des simulations avec marches types actuelles	32
2.11 Résultats des simulations avec marches types modifiées	33
2.12 Conclusion sur la performance du pilote automatique	35
Conclusion	37
Bibliographie	38

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1 Profil de la demande énergétique d'une rame type	4
Figure 2 Schéma unifilaire du poste de district Snowdon	5
Figure 3 Regroupement géographique des postes de redressement	6
Figure 4 Contribution énergétique d'un poste de district le long d'une ligne ...	12
Figure 5 Retards cumulés pour des retenues de 0,1,2,3 et 4 secondes	18
Figure 6 Retards cumulés pour des retenues de 0,2,4,6 et 8 secondes	18
Figure 7 Retards cumulés pour des retenues de 0,4,8 et 12 secondes	19
Figure 8 Marche type d'une rame	24
Figure 9 Marche type modifiée	34

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1 Résultats des réductions des crêtes de puissance	17
Tableau 2 Ensembles univers	29
Tableau 3 Niveaux de quantification	30
Tableau 4 Base de règles	31
Tableau 5 Comparaison des deux types de régulateurs	33
Tableau 6 Comparaison des deux marches types	35

INTRODUCTION

La Société de transport de la Communauté urbaine de Montréal (STCUM) a pour mission de favoriser et d'organiser les déplacements par transport collectif sur le territoire de la Communauté urbaine de Montréal (CUM). À cette fin, la STCUM planifie, développe, implante et exploite un réseau de transport en commun intermodal qui est reconnu pour la qualité de son service à la clientèle et pour la saine gestion de ses ressources.

Le nombre de déplacements à la STCUM est de 336 millions par année. La plus grande partie des déplacements en surface est assurée par 1670 autobus, qui parcourent annuellement près de 88 millions de kilomètres répartis sur 176 lignes. Le réseau de métro, de 65 km, est entièrement souterrain. Il se déploie sur quatre lignes, totalisant 65 stations où se rabattent autobus et trains de banlieue. Près de 65 millions de kilomètres y sont parcourus annuellement par les 759 voitures formant le parc de véhicules du métro.

L'enjeu de l'heure pour la STCUM est d'augmenter l'utilisation de transport en commun, qui a décliné constamment entre 1988 et 1993. La STCUM a entrepris un virage clientèle pour relancer le transport en commun au moment où elle connaît la pire crise financière de son histoire. La contribution des municipalités de la CUM a dû être considérablement augmentée, et elle atteint aujourd'hui 42 % du budget de la Société.

Cette gestion serrée des fonds publics a entraîné une remise en question des dépenses d'exploitation, dont celles consacrées à l'utilisation de l'énergie électrique pour le fonctionnement du métro. Le budget annuel alloué à l'énergie électrique pour le métro totalise 17 millions de dollars. La direction de Métro et trains de banlieue (MTB) de la STCUM s'est donné comme mandat de revoir ses équipements et ses modes d'exploitation pour tenter d'optimiser les coûts en énergie électrique du métro.

Avant de connaître cette crise, la direction de MTB avait pris des mesures visant à réduire la consommation d'énergie électrique de ses équipements fixes d'exploitation (systèmes d'éclairage, moteurs d'escaliers, ventilateurs, etc.). Ces équipements représentent des charges relativement stables durant les périodes de pointe. La STCUM a utilisé plusieurs techniques standard, depuis la substitution de certains équipements par d'autres consommant moins d'énergie, jusqu'aux mesures de rationalisation de l'utilisation des équipements, dont le délestage de charge aux heures de pointe. Ces efforts ont conduit à des résultats probants en ce qui a trait aux dépenses pour la ventilation. Des études préliminaires récentes prévoient des résultats extrêmement positifs quant au coût de l'éclairage.

Toutefois, aucun effort important n'avait été consacré à ce jour à l'énergie de traction requise pour le fonctionnement des rames de métro. Cet usage de l'énergie représente près de 65 % du coût de l'énergie électrique du métro.

En raison des nombreux systèmes complexes, embarqués et au sol, qui se rattachent à la rame et à sa circulation sur le réseau, les efforts de rationalisation de l'énergie de traction avaient été différés. Les problèmes de consommation des rames sont fort complexes. La mobilité et la variabilité des charges (rames) sur le réseau ainsi que l'architecture complexe de distribution sont quelques-uns des facteurs qui rendent les problèmes particulièrement difficiles à résoudre.

La présente étude constitue pour la STCUM une première exploration, en deux volets, visant à trouver des mesures pour diminuer les dépenses liées à la consommation d'énergie électrique des rames.

Le premier volet consiste à évaluer, sur le plan théorique, les effets d'une désynchronisation contrôlée des départs des rames sur la réduction des crêtes de puissance instantanée observées à l'échelle du réseau électrique de la STCUM. Ces crêtes sont provoquées par la superposition aléatoire des demandes de puissance de chaque rame en déplacement sur le réseau. Les pointes de puissance ont des incidences sur le coût des installations électriques et, potentiellement, sur le coût de l'énergie utilisée. L'aplanissement des crêtes repose sur des techniques d'optimisation utilisant les retenues de rames en station pour obtenir le désynchronisme désiré des charges, et ce sans perturber le service aux usagers.

Le deuxième volet de l'étude a pour objet d'évaluer théoriquement les gains de performance sur le plan énergétique qui pourraient découler de l'utilisation des techniques de logique floue appliquées au pilotage automatique des rames. Ce module embarqué sur les rames sert au contrôle de la vitesse lors du déplacement entre deux stations. Il est construit à partir d'un régulateur de type classique (Proportionnel, Intégral et Différentiel - PID).

En 1991, la STCUM s'est associée à l'École polytechnique pour réaliser ces travaux de recherche sur la consommation des rames. Le ministère des Transports du Québec a subventionné une partie des travaux par le Programme d'aide à la recherche et au développement en transport (PARDT).

Le présent rapport résume certains points du rapport du mémoire de maîtrise [1] dirigé par M. Roland Malhamé, qui portait sur le contrôleur de vitesse utilisant la logique floue. De même, il reprend certains points du rapport de recherche de Mme Brunilde Sanso [2] sur la désynchronisation des trains.

Le rapport est divisé en trois parties. Le premier chapitre traite de la désynchronisation des rames. Le second aborde l'évaluation énergétique du régulateur de vitesse. Quant au dernier chapitre, il conclut sur les deux volets de l'étude, en précisant les améliorations prévues, les connaissances acquises et les orientations à prendre dans les recherches ultérieures.

1. DÉSYNCHRONISATION DES DÉPARTS DE RAMES

1.1 Généralités

L'électricité est l'énergie utilisée pour mettre en mouvement les rames du métro de Montréal. La STCUM consomme annuellement, pour l'exploitation de son métro, 330 millions de kWh en énergie électrique, avec une puissance souscrite de 68 MW. Près de 65 % (215 millions de kWh) de cette consommation est imputable spécifiquement à l'énergie de traction des rames.

Une rame type où le nombre d'usagers dépasse 75 % la charge permise provoque au moment du départ, pour un trajet type entre deux stations, des appels en puissance instantanée allant jusqu'à 4 MW. Cette puissance sert à vaincre l'inertie et à atteindre la vitesse maximale établie à 70 km/h. Le profil en cuvette du tunnel fait que la demande de traction s'exerce dans les 30 premières secondes du trajet en interstation, qui dure en moyenne 65 secondes. Le reste du trajet est essentiellement parcouru sur l'erre et en freinage. Il existe trois crans possibles de mise sur l'erre d'une rame, qui permettent d'augmenter ou de réduire la durée du trajet. La figure 1 montre le profil de la demande énergétique d'une rame type.

De plus, la figure 1 montre les possibilités de régénération d'énergie des moteurs de traction des rames découlant de l'application d'un freinage électrique. Dans la mesure où des rames à proximité sont en demande d'énergie, l'énergie régénérée par le freinage électrique est retournée au réseau électrique à leur profit.

Les rames quittent les stations terminales d'origine de chaque ligne selon des horaires précis. Le temps de circulation des rames dans chaque interstation est toujours le même. Le temps d'arrêt en station pour laisser monter et descendre les usagers est aussi déterminé en fonction des moments de la journée.

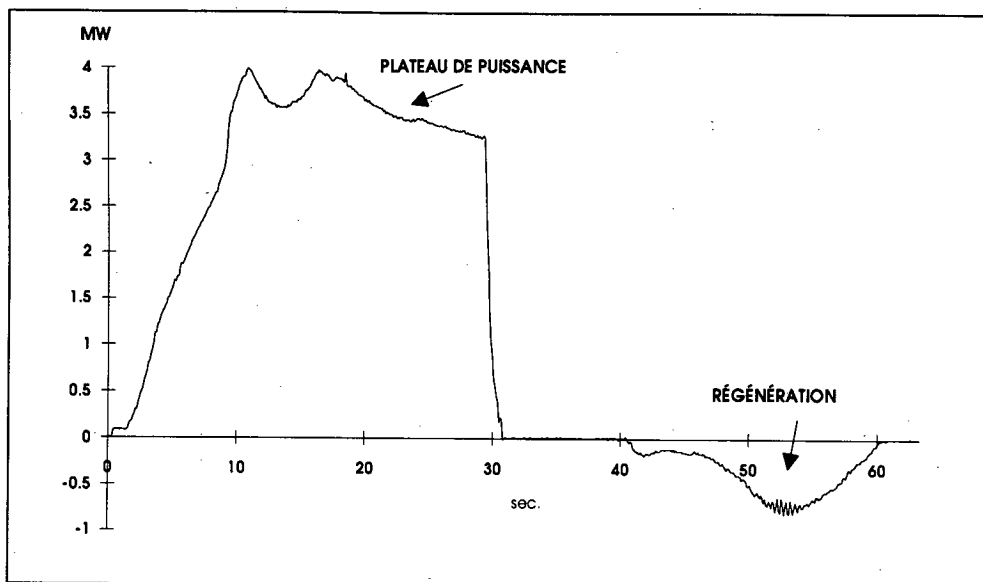


Figure 1 - Profil de la demande énergétique d'une rame type

1.2 Configuration du réseau électrique

Pour exploiter le métro, la STCUM possède son propre réseau de distribution électrique, composé de 6 postes de district, de 154 postes secondaires de distribution et de 59 postes de redressement.

Les postes de district sont alimentés directement par le fournisseur d'électricité sous des tensions de 12 kV ou de 25 kV. Pour des raisons de fiabilité et de maintenance, l'approvisionnement au poste de district est assuré par au moins deux câbles d'arrivée. Chaque poste de district alimente des postes secondaires de distribution et des postes de redressement. La figure 2 donne le schéma unifilaire d'un poste de district type (poste Snowden), avec ses postes de redressement associés et ses postes secondaires de distribution.

Les postes secondaires de distribution abaissent la tension à des valeurs utiles pour l'éclairage et pour la force motrice nécessaire au fonctionnement des équipements fixes en station.

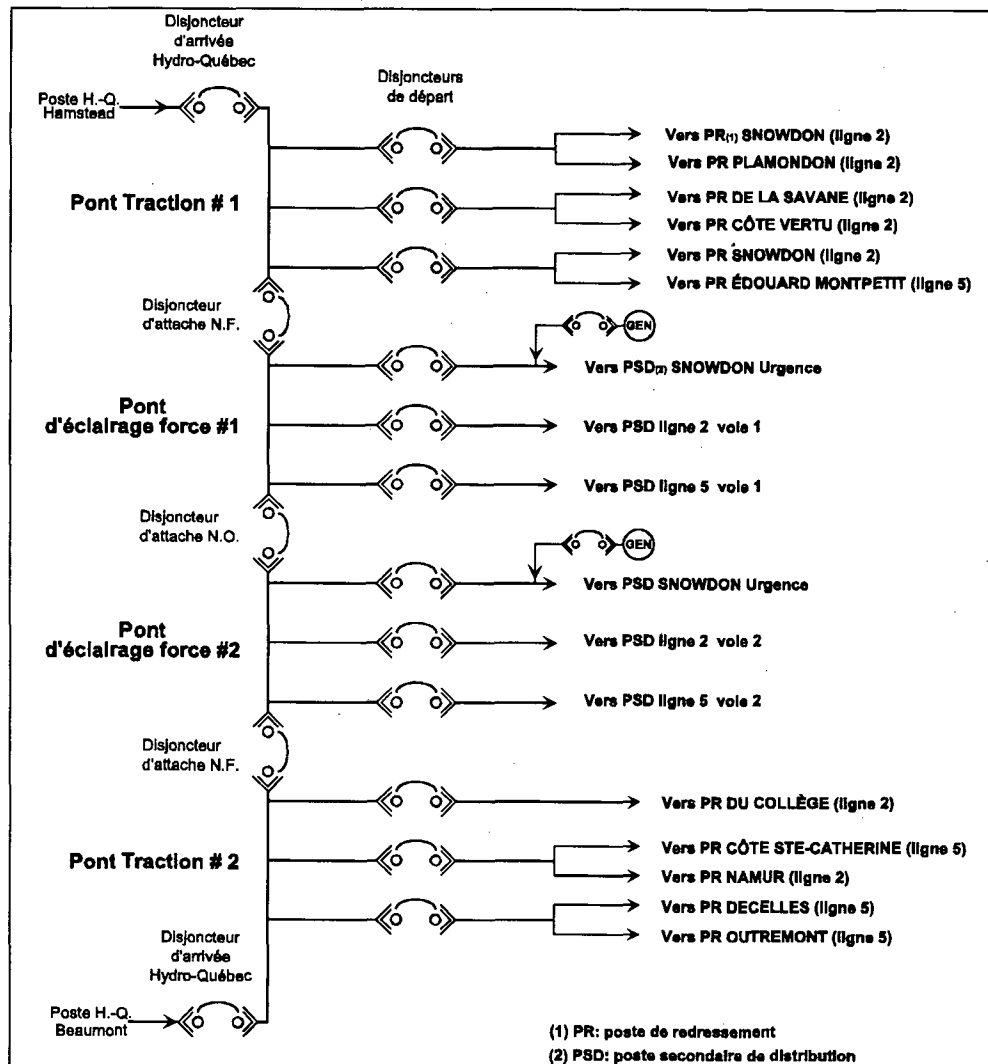


Figure 2 - Schéma unifilaire du poste de district Snowdon

Chaque poste de redressement abaisse et redresse la tension au seuil nécessaire à l'alimentation des moteurs de traction des rames, qui est de 750 V en courant continu. Les rames sont pourvues de frotteurs positifs et négatifs, en contact respectivement avec les barres de guidage et le rail. Ces frotteurs assurent la liaison électrique entre la rame et les équipements fixes d'alimentation.

Chaque poste de district distribue son énergie de traction à des postes de redressement regroupés géographiquement. Comme la figure 3 le montre, une région ne couvre que très rarement une seule et même ligne de métro. La barre de guidage qui assure la continuité électrique le long de la ligne de métro fait qu'une rame est souvent approvisionnée en énergie par plus d'un poste de district à la fois. La proximité de la rame par rapport aux postes de redressement associés à un poste de district détermine la contribution énergétique du poste en ce qui a trait à la demande de la rame.

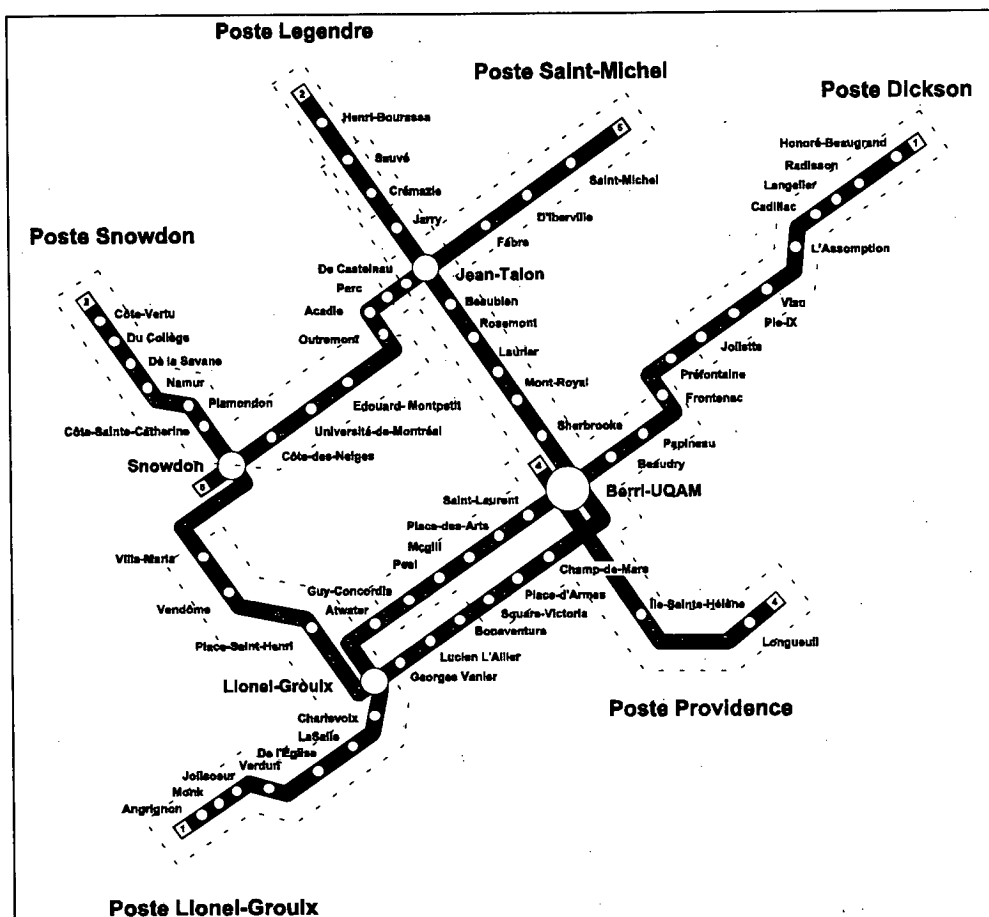


Figure 3 - Regroupement géographique des postes de redressement

1.3 Contrat d'électricité

Hydro-Québec est le fournisseur exclusif d'énergie électrique de la STCUM. L'approvisionnement de chaque poste de district fait l'objet d'un contrat d'électricité distinct. Les contrats d'électricité de la société d'État stipule que le client s'engage à consommer pour une valeur plancher appelée «puissance souscrite». Cette valeur correspond à la demande d'un poste de district sous la forme de puissance moyenne établie sur une période d'intégration de quinze minutes.

D'autre part, les contrats comportent des clauses relatives à la qualité de la charge du client. Des pénalités importantes, sous forme de surprime d'environ 170% du coût normal d'approvisionnement, sont imposées en hiver lorsque la puissance moyenne enregistrée dépasse la puissance souscrite de plus de 10%. Ces pénalités s'appliquent à chacun des postes de district.

Finalement, les contrats prévoient une valeur plafond appelée «puissance disponible», que le client s'engage à ne pas excéder dans un poste de district, sans l'autorisation préalable d'Hydro-Québec.

1.4 Problématique

Il n'existe actuellement aucun mécanisme particulier pour désynchroniser, pendant de courts laps de temps, les demandes énergétiques individuelles des rames en vue d'aplanir les crêtes de puissance. Conséquemment, la demande énergétique à un poste de district reste aléatoire. Cette situation pose problème particulièrement en période de pointe. Pendant ces périodes de grande affluence, la probabilité de superposition des demandes énergétiques individuelles augmente en raison du nombre plus élevé de rames en service. Des arrêts de service surviennent par disjonction des appareils de protection d'Hydro-Québec, lesquels sont ajustés en fonction de la puissance disponible établie par contrat.

D'autre part, Hydro-Québec envisageait, en 1990, de réduire la période d'intégration actuelle de la consommation de ses clients à une valeur inférieure à 15 minutes. Cette nouvelle contrainte obligeait la STCUM à un contrôle beaucoup plus rigoureux de son organisation et de sa consommation.

Étant donné la variabilité des charges des rames sur le réseau, une période d'intégration plus brève se traduit automatiquement par une augmentation de la puissance calculée par Hydro-Québec. Cette nouvelle règle représentait donc un risque d'augmentation des dépenses énergétiques pour la STCUM qui justifiait la présente étude. Heureusement, ce risque n'existe plus. Hydro-Québec semble en effet avoir renoncé à cette mesure, à tout le moins temporairement.

1.5 Objectifs de l'étude

L'objectif général de l'étude était de trouver, sur le plan théorique, un moyen qui permettrait de diminuer les crêtes de puissance pour minimiser les coûts énergétiques.

La solution devait répondre aux objectifs précis portant sur :

- le respect des contraintes de sécurité, de ponctualité et de régularité du service;
- l'intégration possible aux installations et systèmes en place de même qu'aux méthodes d'exploitation en vigueur.

Sur le plan de la sécurité, la solution devait respecter les contraintes de sécurité portant sur l'espacement entre les rames et sur l'interdiction d'immobiliser une rame en interstation.

La solution proposée devait également satisfaire le volet ponctualité de façon stricte aux stations terminales de départ de chaque ligne. Aucune modification des horaires de départ aux terminus n'était permise. Seuls les horaires des départs en station intermédiaire pouvaient être modifiés.

Le volet régularité imposait des délais maximums de retenue des rames en stations qui excédaient d'au plus 12 secondes les temps minimums normalisés d'arrêt en station.

Même si l'étude se voulait théorique, les solutions proposées devaient favoriser l'utilisation des moyens de contrôle choisis en fonction des installations en place en vue de restreindre les risques techniques et les coûts d'une éventuelle implantation.

1.6 Solution retenue

1.6.1 *Aplanissement des crêtes*

Le moyen choisi pour aplanir les pointes de puissance instantanée aux différents postes de district du réseau de la STCUM a été de mieux répartir les demandes individuelles, en agissant sur la retenue des rames en station.

La retenue des rames en station constitue un moyen simple de déphaser de quelques secondes (1 à 12 secondes) le profil entier de demande de la rame. La retenue en station est déjà un moyen de contrôle de la circulation des rames, qui est utilisé à des fins de régularisation du trafic. Les indicateurs visuels disposés sur les quais aux abords des loges de conduite des rames pourraient informer les conducteurs de rame du moment du départ. Ce contrôle sur les retenues en station est actuellement centralisé au niveau de chaque ligne de métro. La gestion des crêtes doit être effectuée pour chacun des postes de district, puisqu'en général chaque poste de district alimente plus d'une ligne en même temps; il importe que la centralisation du contrôle de la retenue des rames en station soit étendue,

pour couvrir l'ensemble du réseau plutôt qu'une seule ligne. Une telle centralisation de ce type de contrôle est envisageable avec les technologies informatiques dont nous disposons.

Il a été envisagé d'agir sur la course (marche type) des rames en interstation. Comme mentionné au chapitre 2, il est actuellement possible de modifier la forme du profil de demande d'une rame pour une interstation donnée, en avançant ou en retardant de deux secondes la mise sur l'erre de la rame. Des balises au sol informent la rame du moment précis où elle doit cesser ses efforts de traction pour continuer sa course sur l'erre. Ce type de contrôle est effectué par les installations actuelles et est centralisé lui aussi à l'échelle d'une ligne. Cette façon de faire n'a toutefois pas été retenue car elle était plus exigeante sur le plan du temps de calcul, de la quantité d'information à emmagasiner et à fournir pour l'étude théorique. Néanmoins, elle demeure une voie à explorer.

1.6.2 Limite de l'étude

L'étude s'est limitée à l'analyse de la puissance sur trois des six postes de district du réseau, soit les postes Snowdon, Providence et Lionel-Groulx. Cela tient notamment au fait que d'importantes ressources humaines et matérielles étaient requises pour obtenir des données permettant d'établir les profils de demande énergétique d'une rame type à un poste de district. Le profil de demande à un poste de district varie d'une interstation à l'autre et d'une voie de circulation à l'autre. Ce profil est conditionné entre autres par la forme de la cuvette, le positionnement des balises de mise sur l'erre et l'éloignement de l'interstation par rapport aux postes de redressement associés au poste de district. Pour ces trois postes de districts, plus de 200 profils de demande ont dû être fournis.

1.6.3 Détermination des profils de demande

La modélisation de la demande globale d'énergie des postes de district du réseau nécessite d'abord que l'on prévoie le profil de demande des rames, tel qu'évalué par chaque poste de district, lors de leur parcours dans chaque interstation.

Deux avenues ont été considérées pour obtenir les profils de demandes individuelles, soit la méthode théorique et la méthode empirique.

La méthode théorique repose sur la construction d'un modèle suffisamment fidèle du procédé, dans lequel la dynamique de toutes les rames dans une région du réseau doit être prise en compte. Les réactions des composantes principales des rames, dont les hacheurs de courant, les moteurs, le pilote automatique, doivent être considérées. À ceci, s'ajoute la nécessité de réaliser un exercice assez exigeant d'analyse de l'ensemble des forces (friction, résistance de l'air, gravité, etc.) s'exerçant sur une rame lors de son parcours en interstation. La méthode théorique n'a pas été retenue à cause de la grande complexité des systèmes à modéliser et des délais restreints pour vérifier les résultats.

La méthode empirique repose sur des mesures prises dans les rames et les postes de district dans des conditions particulières. Elle repose sur l'hypothèse que le profil de demande déduit des mesures empiriques est déterminant pour une interstation donnée. Cette méthode conduit donc à utiliser de manière générale des mesures obtenues de cas particuliers. Sur le plan énergétique, les contraintes de la méthode obligent à être prudent lorsqu'on prend les mesures et à considérer les pires cas (taux maximal de charge des rames), de façon à être le plus pessimiste possible dans l'évaluation des crêtes. Toutefois, la méthode empirique nécessite l'acquisition et l'installation de plusieurs équipements de mesure, ainsi qu'une étape importante de collecte de données à bord des rames et dans les postes de district. Cette méthode a été retenue pour sa simplicité et les résultats modérés qu'elle procure.

La méthode empirique se définit comme suit :

Pour chacune des interstations, il est nécessaire de déterminer la fraction de la demande énergétique d'une rame qui est assumée par chaque poste de district à étudier. Dans bien des cas, deux postes de district peuvent alimenter significativement une même interstation, étant donné qu'il y a continuité électrique d'un bout à l'autre d'une ligne. Ce facteur de contribution permet, à partir du profil de consommation d'une rame à l'interstation concernée, de définir le profil de demande de la rame pour le poste de district en question.

Dans le cas où plusieurs rames circulent dans les interstations où un poste de district est mis à contribution, la courbe de la demande totale à ce poste est obtenue en faisant la somme des courbes de demande associées aux interstations où se trouvent les rames. Ces courbes auront préalablement subi une translation sur l'axe du temps pour être en concordance avec les moments de départ de chaque rame.

Deux méthodes ont été utilisées pour obtenir empiriquement les courbes de demande recherchées.

La première consistait à faire circuler de nuit une rame de trois voitures chargée à au moins 75 % de la charge permise, puis d'enregistrer, dans chacun des postes de district visés par l'étude, la demande instantanée. Les inconvénients de cette façon de faire sont les suivants :

- la charge totalise dans les faits 27 tonnes. L'installation et la manipulation de la charge, sous forme de poches de sable ou de lingots de plomb, représentent un problème en soit et obligent à nolisier une rame pour une longue période;
- à cause de l'effet des pentes, la dynamique de la rame varie avec le nombre de voitures qui la compose. Des mesures fondées sur une rame munie de trois voitures introduisent donc des écarts de comportement par rapport aux conditions normales de fonctionnement, où les rames sont formées de six ou neuf voitures.

La deuxième méthode, celle qui a été choisie, repose sur une démarche en quatre étapes.

Étape 1 Mesures de puissance sans charge

La première étape consiste à faire cheminer sur le réseau, en dehors des heures normales de service, une seule rame de neuf voitures ou moins, sans charge. Pendant qu'elle circule, des mesures de puissance sont enregistrées en même temps à bord de la rame (puissance consommée) et dans les postes de district (puissance demandée).

Étape 2 Calcul de la contribution énergétique des postes de district

Les mesures définies à l'étape 1 permettent de calculer, sous la forme de facteur, la contribution respective de chaque poste de district à l'alimentation d'une interstation donnée. Le facteur est en fait le ratio entre la puissance demandée au poste de district par rapport à la puissance totale consommée par la rame.

Les montées et descentes rapides qui caractérisent le profil de la demande énergétique d'une rame rendent le calcul du ratio difficile à effectuer pour les raisons suivantes :

- les bandes passantes des appareils de mesure embarqués et des appareils qui sont dans les postes de district ne sont pas identiques;
- les signaux mesurés dans la rame et aux postes de district ne sont pas synchronisés.

Ces deux raisons font que le ratio ne peut être calculé durant ce type de transitions que connaît la demande. Pour résoudre le problème, deux méthodes ont été utilisées. La première consiste à établir le ratio recherché en ne considérant que les portions du profil de demande qui présentent des plateaux. En l'absence de plateau, la seconde méthode est appliquée. Cette dernière permet d'obtenir le ratio recherché en calculant le ratio des intégrales des courbes, qui est en fait le rapport des énergies. Pour ce faire, l'aire sous la courbe de demande au poste de district est divisée par l'aire sous le profil de consommation de la rame.

À titre d'exemple, la figure 4 montre comment le facteur de contribution du poste de district Providence peut varier d'une interstation à une autre le long de la ligne 2. On constate que ce poste alimente principalement la portion nord-est de la ligne 2, qui se termine à la station Henri-Bourassa. Dans cette région, et en bout de ligne seulement, deux postes de redressement sont alimentés par le poste de district Legendre; ce qui explique la courbure vers le bas tout au début de la courbe. Cependant, le poste Lionel-Groulx a un effet plus drastique sur la courbe, car il alimente cinq interstations. Enfin, le poste Snowden, qui alimente les six dernières stations de la ligne, restreint complètement la contribution du poste Providence à l'extrémité nord-ouest de la ligne.

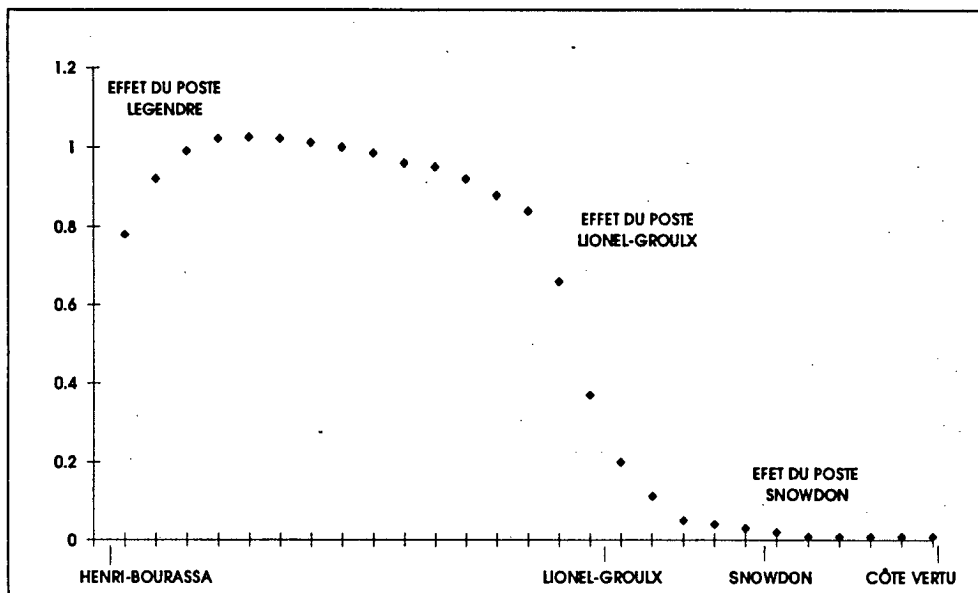


Figure 4 - Contribution énergétique d'un poste de district le long d'une ligne

Étape 3 Mesures de puissance sous charge

La troisième étape consiste à enregistrer à bord d'une rame de neuf voitures à l'heure de pointe, la puissance consommée en fonction du temps pour chaque interstation parcourue. Ceci donne une courbe qui caractérise le profil de consommation d'une rame type en pleine charge pour chaque interstation, dans chacune des directions. Il est à remarquer que la méthode permet de faire autant d'essais que nécessaire, afin de bien décrire la charge des trains dans chacune des directions et à tout moment durant l'heure de pointe.

Étape 4 Construction des profils de demande aux postes de district

La quatrième étape consiste à utiliser les données des deux étapes précédentes pour construire les profils de demande de chaque poste de district, pour une rame en pleine charge circulant dans les diverses interstations couvertes par chaque poste de district. En fait, il s'agit, pour un poste de district donné, d'appliquer un multiplicateur aux profils de consommation de chaque interstation obtenus à la troisième étape. Ce multiplicateur est le facteur de contribution obtenu à la deuxième étape.

Les mesures de puissance décrites aux étapes 1 et 3 ont été échantillonnées au dixième de seconde. Ce niveau de discrétisation constitue un juste arbitrage qui permet de saisir l'essentiel des phénomènes transitoires dans la demande énergétique des rames, tout en évitant, lors de la résolution du problème, des délais excessifs de calcul qui seraient causés par le traitement d'un volume exagéré de données.

1.6.4 Aspects mathématiques du problème

1.6.4.1 Forme générale du problème

Sous sa forme la plus générale, le problème à résoudre sur le plan mathématique se résume à minimiser les maximums de puissance instantanée sur l'ensemble des trois postes de district.

Soit x_{sj} , une variable binaire égale à 1 si la rame à la station s démarre à l'instant j et 0 sinon. Soit X , le vecteur des variables x_{sj} possibles pour une période d'étude. Soit d_{pt}^{sj} , la valeur de la puissance demandée au poste de district p , à l'instant t , si le train à la station s démarre à l'instant j . Soit Ω_t , l'ensemble des instants de temps où des pointes de puissance sont possibles. Soit Ω_p , l'ensemble des postes de district visés par le problème.

Alors le problème sous sa forme générale se formule ainsi :

$$\left(\underset{X}{Min} \underset{t}{Max} \sum_{sj} d_{pt}^{sj} x_{sj} \right)_{\forall p \in \Omega_p} \quad (1)$$

Sous les contraintes :

$$X \geq 0 \quad \text{et binaires} \quad (2)$$

$$G_E(X) \leq 0 \quad (3)$$

$$C_l(X) \leq 0 \quad (4)$$

Où

$$t \in \Omega_t \quad (5)$$

$$p \in \Omega_p \quad (6)$$

L'équation (1) représente l'objectif du problème. Il s'agit d'un problème multi-objectifs où le maximum de la puissance doit être minimisé dans chaque poste de district en même temps.

L'équation (2) force les variables de décision x_{sj} à être binaires.

Dans l'équation (3), $G_E(X)$ représente sous une forme généralisée les contraintes d'exploitation (ponctualité, régularité et sécurité).

Dans l'équation (4), $G(X)$ représente l'ensemble des contraintes liantes entre les postes de district.

L'énoncé (5) restreint le choix des périodes d'analyse à celles qui représentent des pointes à aplanir.

Finalement, l'énoncé (6) restreint le choix des postes de district à ceux concernés par le problème de minimisation.

Ce problème est un problème combinatoire extrêmement difficile à résoudre. Même une discrétisation du temps à la seconde conduirait à traiter des centaines de milliers de variables avec un nombre de contraintes tout aussi important.

La taille du problème sous sa forme générale rend impossible sa résolution de façon exacte. Une méthode heuristique de résolution a dû être envisagée.

1.6.4.2 Méthode heuristique

D'abord la période d'étude (période de pointe) a été divisée en intervalles d'observation de 59 secondes. Cette période correspond au temps de circulation d'une rame sur le plus petit trajet du réseau. Cette longueur d'intervalle garantit qu'une même rame ne peut effectuer qu'un seul démarrage pendant l'intervalle d'observation.

Un simulateur a été bâti pour reproduire le déplacement des rames sur le réseau et calculer la puissance demandée dans chaque poste de district. Ce simulateur avait comme paramètres :

- les horaires de départs des rames aux stations terminales de départ;
- les temps normalisés de déplacement en interstation;
- les temps normalisés d'arrêt en station;
- les profils types de demande énergétique pour chaque interstation;
- les retenues imposées aux rames et obtenues du module de programmation binaire décrit plus loin.

Le simulateur permet de définir la position exacte des rames pour chaque intervalle d'observation. Il recalcule l'horaire des rames après l'imposition des retenues aux stations.

Pour chaque intervalle d'observation et à chaque poste de district, le simulateur effectue une vérification pour détecter tout dépassement de la puissance seuil définie au préalable pour chacun des postes de district. Le dépassement du seuil h_p entraîne la nécessité d'effectuer, pour la période d'observation, des retenues de rame en vue de désynchroniser les demandes individuelles pour satisfaire les seuils h_p .

La fonction objective du nouveau modèle simplifié prend la forme suivante :

$$\underset{x,z}{Min} \sum_p \alpha_p Z_p \quad (7)$$

où Z_p est le seuil de puissance, forçant la retenue des rames au poste de district p et α_p est un poids donné au poste de district, permettant d'amplifier les efforts de minimisation de la puissance demandée à un poste par rapport aux autres. Si les Z_p sont posés comme des constantes, l'objectif sera alors de minimiser une constante.

Soit Ω_t , l'ensemble des instants de temps t considérés dans l'intervalle d'observation (59 sec x 10 mesures/ seconde = 590 instants de temps). Soit S_p , l'ensemble des stations où il peut y avoir le départ d'une rame pendant la période d'observation, et dont le poste de district p contribue à l'alimentation de l'interstation aval. Soit R , l'ensemble des retards admissibles qui peuvent être imposés à un départ en station. Soit Ω_p , l'ensemble des postes de district considérés dans le problème. Alors les contraintes du problème se formulent ainsi :

$$\sum_{sr} d_{pt}^{sr} x_{sr} + E_t^p \leq Z_p \quad \forall_{p,t} \quad (8)$$

$$\sum_r x_{sr} = 1 \quad \forall_s \quad (9)$$

Où:

$$x_{sr} = \begin{cases} 1 & \text{si la rame à la station } s \text{ est retenue de } r \text{ secondes} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$s \in S_p, r \in R, p \in \Omega_p, t \in \Omega_t$$

Le paramètre d_{pt}^{sr} représente la puissance demandée au poste de district p , au temps t , si une rame à la station s prend son départ avec un retard de r secondes par rapport à son temps d'arrêt normalisé. E_t^p est un paramètre représentant la puissance non modifiable à l'instant t , c'est-à-dire la puissance demandée au poste de district p , à l'instant t , par des rames déjà en mouvement au début de la période d'observation et sur lesquels aucune influence sur la puissance ne peut être exercée à l'instant t .

Puisque les variables x_{sr} sont binaires, la contrainte assure que la rame située dans la station s devra prendre son départ r secondes après son temps d'arrêt normalisé.

Cette version simplifiée du problème conduit à traiter dans les pires situations près de 150 variables et 1 800 contraintes, ce qui rend le problème résoluble. La résolution de ces problèmes de programmation binaire a été effectuée par le logiciel commercial CPLEX.

Les contraintes de sécurité et de ponctualité n'apparaissent pas dans le modèle. Elles sont traitées préalablement à l'aide du simulateur. Avant la résolution du problème par CPLEX, un traitement utilisant le simulateur vérifie l'admissibilité de chacune des retenues par rapport aux contraintes de sécurité et de ponctualité. Les retenues inadmissibles en vertu des ces contraintes sont éliminées en posant le x_{sr} associé à la valeur 0.

1.7 Expérimentation

D'abord, en appliquant des seuils h_p très élevés au poste de district, le simulateur a permis de définir des valeurs de puissance crête, sans que soit appliqué le processus de retenue de rames en station. Les valeurs obtenues ont servi de repères permettant d'évaluer l'effet des retenues des rames sur les valeurs crêtes de la puissance à chaque poste de district.

Une série d'essais ont été réalisés pour mesurer l'incidence du facteur de pondération α_p qui joue le rôle de coefficient des variables Z_p .

Finalement, les trois jeux d'essais suivants ont été réalisés.

Essai 1 les retenues possibles ont été fixées à 0, 1, 2, 3 et 4 secondes;

Essai 2 les retenues possibles ont été fixées à 0, 2, 4, 6 et 8 secondes;

Essai 3 les retenues possibles ont été fixées à 0, 4, 8 et 12 secondes.

1.8 Résultats expérimentaux

Les essais portant sur l'influence du facteur de pondération α_p ont démontré des effets peu intéressants sur les valeurs crêtes de puissance. Lors de ces essais, les Z_p étaient laissés libres. Il est très difficile de diriger habilement les efforts de minimisation sans provoquer des effets indésirables (augmentation des crêtes) dans un des trois postes. Les meilleurs résultats ont été obtenus en posant tous les coefficients α_p égaux à 1. Seulement pour ce dernier cas, il a été possible d'atteindre des réductions des crêtes de puissance de 11 % pour Providence, de 8 % pour Lionel-Groulx et de 0,3 % pour Snowdon.

Compte tenu de ces résultats, il a été décidé de considérer les Z_p non plus comme des variables dans le modèle, mais comme des constantes. Lors des essais ultérieurs, les Z_p ont été abaissés progressivement jusqu'à ce que le programme binaire ne puisse plus trouver de solution. Chaque jeu d'essais comportait neuf essais, représentant l'ensemble des façons possibles, avec trois postes de district pour abaisser leur constante Z_p jusqu'à une valeur plancher.

Les résultats portant sur la réduction des crêtes de puissance instantanée découlant des jeux d'essais 1, 2 et 3 sont présentés au tableau 1.

Essai	Retenues (secondes)	Poste de district	Réduction des crêtes	
			Relative	Absolue (MW)
1	0,1,2,3,4	Providence	14 %	5,1
		Lionel-Groulx	13 %	3,1
		Snowdon	0 %	0
2	0,2,4,6,8	Providence	19 %	7,0
		Lionel-Groulx	17 %	4,1
		Snowdon	14 %	1,8
3	0,4,8,12	Providence	21 %	7,7
		Lionel-Groulx	13 %	3,1
		Snowdon	17 %	2,1

Tableau 1 - Résultats des réductions des crêtes de puissance

Pour chacun de ces jeux d'essais, les temps globaux de retenues de chaque rame ont été compilés pour chacune de ses courses, depuis une station terminale de départ jusqu'à une station terminale d'arrivée.

Les figures 5, 6 et 7 montrent, sous la forme de distribution, pour chaque jeu d'essais, les conséquences du processus de désynchronisation des charges sur les retards cumulés de chaque rame le long de son parcours d'une station terminale de départ à une station terminale d'arrivée.

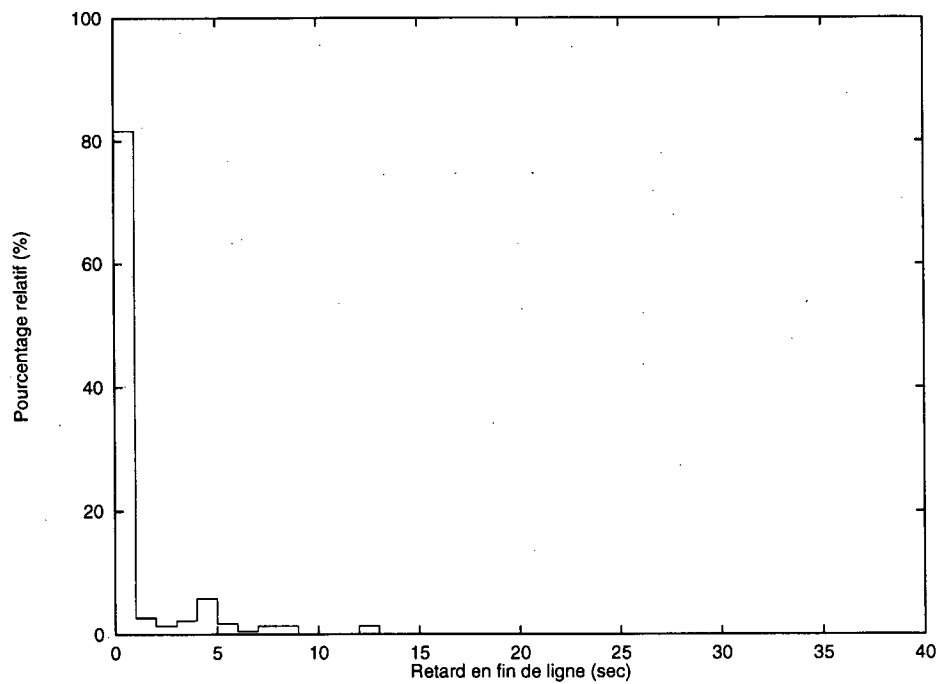


Figure 5 - Retards cumulés pour des retenues de 0,1,2,3 et 4 secondes

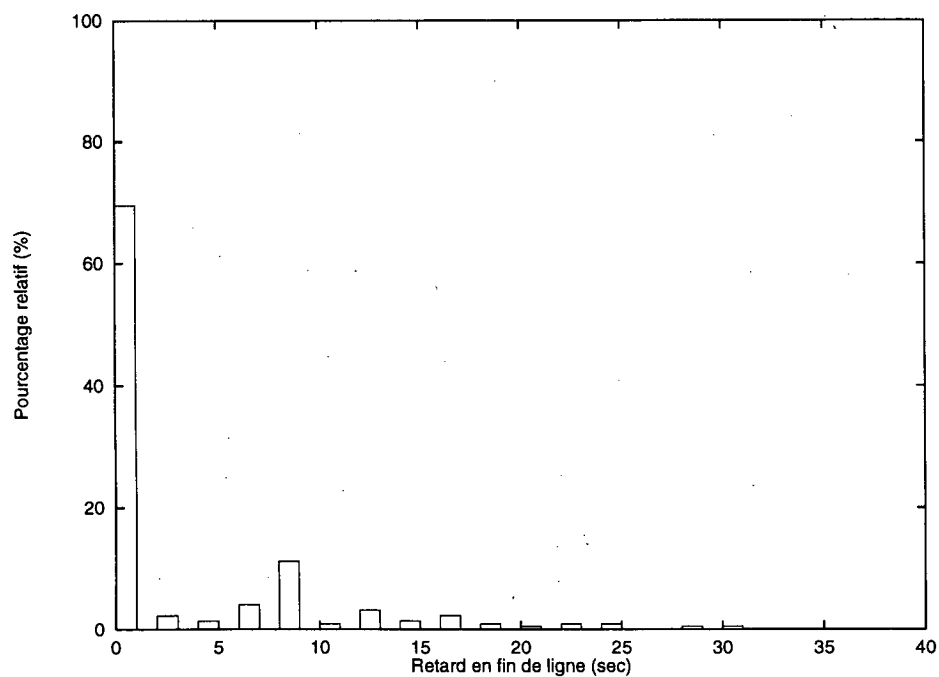


Figure 6 - Retards cumulés pour des retenues de 0,2,4,6, et 8 secondes

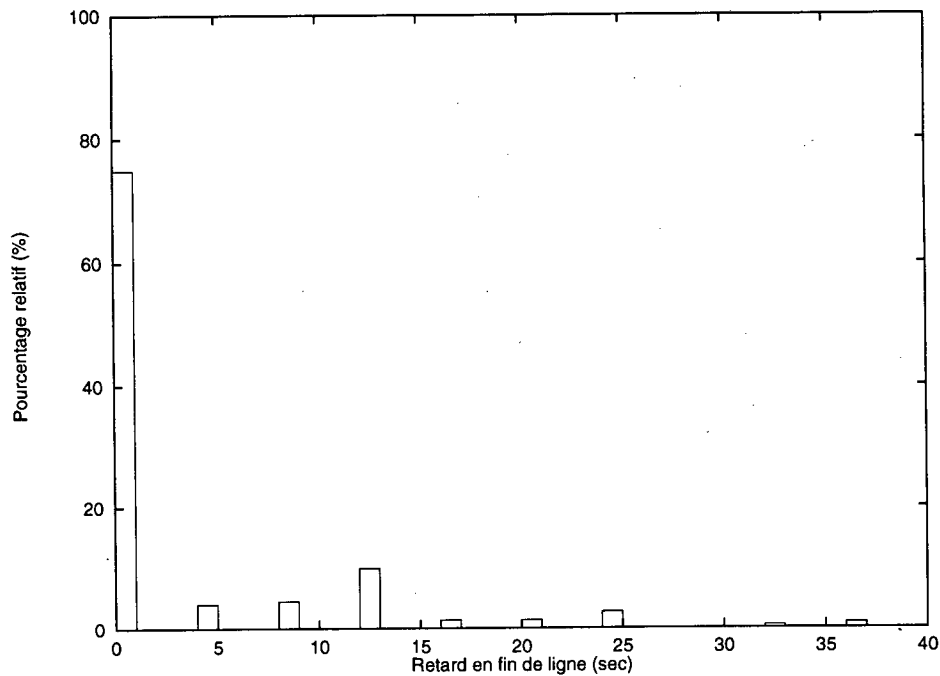


Figure 7 - Retards cumulés pour des retenues de 0,4,8 et 12 secondes

1.9 Limitations dans la précision des résultats

La méthode empirique prise pour la détermination des profils de demande aux postes de district comporte plusieurs limitations et abstractions qui affectent la précision des résultats obtenus. À ce chapitre, notons que :

- les mesures de puissance sans charge définies à l'étape 1 ne tiennent pas compte de la régénération, puisqu'il n'y a pas d'autre rame pour récupérer l'énergie produite par le freinage électrique;
- l'impédance des postes de redressement peut varier en fonction du courant (à haut courant seulement cependant);
- le réseau n'est pas chargé de la même façon le jour et la nuit;
- la charge durant le jour d'une rame qui a été utilisée à l'étape 3 est une variable statistique;
- des différences de tension variables entre les postes de district peuvent changer la distribution des puissances;
- le ratio de contribution d'un poste de district dans une interstation a été calculé comme une moyenne, alors qu'il varie avec la position de la rame dans l'interstation;

- les mesures de jour comprennent une part de freinage régénératif qui a été conservée telle quelle pour l'imputation dans les postes de districts. D'une part, une partie de l'énergie ainsi récupérée est perdue sous forme de chaleur dans les rails et les barres de guidage. D'autre part, à des moments différents, la réceptivité de la ligne change avec le nombre de trains à proximité et leur état de traction.

Nous estimons que l'ensemble de ces facteurs représentent moins de 10% d'erreur sur le calcul des puissances. La prise en compte de ces facteurs impose des vérifications additionnelles sur l'approche utilisée quant à la méthode. La STCUM entreprendra prochainement cette vérification.

1.10 Conclusions sur la désynchronisation

L'étude a permis de trouver une méthode heuristique permettant d'aplanir de 13 % à 21 % les crêtes de demande aux postes de district. La méthode repose sur l'application de retenues sélectives sur les rames en station, en vue de désynchroniser les demandes énergétiques individuelles des rames.

En plus d'être significative sur le plan de la réduction des valeurs crêtes de puissance, la méthode ne cause que très peu de distorsion dans l'horaire des rames. De fait, plus de 95 % des parcours simulés le long d'une ligne ont subi des retards cumulés inférieurs à 15 secondes.

La STCUM possède dorénavant une évaluation de la marge de manoeuvre qu'elle a pour limiter ses crêtes de puissance dans les différents postes de districts, et ce sans nuire au service. La STCUM est donc mieux en mesure de définir ses engagements contractuels avec Hydro-Québec, notamment au chapitre de la puissance disponible.

L'étude a permis à la STCUM de parfaire ses connaissances sur le comportement dynamique des charges électriques du réseau. La STCUM retire d'autres bénéfices indirects de cette étude sur la désynchronisation des charges. Les résultats des mesures empiriques sur les profils de demande des rames, les techniques de collecte et l'instrumentation acquise au cours de l'étude seront réutilisés à de nombreuses fins, dont :

- la vérification de la facturation d'Hydro-Québec;
- l'évaluation des gains énergétiques dus à la régénération;
- l'évaluation des modifications aux marches types du pilote automatique;
- l'évaluation des impacts énergétiques découlant de l'addition d'une rame à l'horaire ou d'une modification des horaires;
- la vérification des facteurs de contribution des postes de district.

Cette étude a ouvert la porte à d'autres travaux de recherche éventuels, dont :

- la minimisation de la puissance souscrite à différents intervalles d'intégration par un aménagement plus judicieux des horaires visant à réduire les coûts énergétiques;
- le développement d'un algorithme de désynchronisation des rames inspiré de la méthode exposée dans l'étude, mais applicable en temps réel.

Si la STCUM s'oriente vers la désynchronisation, elle devra apporter les modifications suivantes :

- changer l'usage des indicateurs de départ des trains (mode d'exploitation);
- ajouter un mini-ordinateur programmé pour la désynchronisation et interfacé avec les ordinateurs de chacune des lignes;
- bâtir un algorithme qui permet de faire des calculs en temps réel, sans trop s'éloigner des valeurs optimales;
- écrire le programme.

Les efforts requis représentent environ deux personnes-année et 200 000 \$.

2. AMÉLIORATION DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DU PILOTE AUTOMATIQUE

2.1 Généralités

Le pilote automatique (PA) du métro de Montréal fut mis en service en 1976. La fonction de cet équipement embarqué est de transmettre au système de traction et de freinage de la rame les commandes nécessaires pour réaliser ce qu'il est convenu d'appeler la «marche type». La marche type est la trajectoire vitesse vs position que le train doit suivre pour franchir une interstation dans un temps donné.

Il est donc tout à fait utile de scruter le fonctionnement du PA afin de voir s'il est possible de l'optimiser sur le plan énergétique.

2.2 Marche type

Comme on peut le voir à la figure 8, la marche type du métro de Montréal comprend en général quatre phases, soit :

- Une **accélération**, qui est la même jusqu'à 75 % de la charge maximale lorsque le train est équipé d'un hacheur de courant. Il est à noter que c'est un asservissement au niveau du hacheur qui détermine l'accélération.
- Une distance parcourue à **vitesse constante** et fixée par la signalisation de sécurité. En fait le PA suit une consigne de vitesse qui est inférieure de 2,4 km/h à la vitesse permise par la signalisation. Cette dernière vitesse est en général de 72,4 km/h (20 m/s), sauf à l'approche des terminus. Il est à noter que c'est le système de signalisation embarqué qui contrôle en sécurité la vitesse et non le PA lui-même, qui doit simplement se conformer à la consigne. C'est uniquement pendant cette phase que le régulateur de vitesse se met en action.
- Une **marche sur l'erre** déclenchée par des balises se trouvant en interstation. Ces balises produisent au choix des retards de une, trois ou cinq secondes sur le parcours de l'interstation;
- Un **arrêt programmé conduisant le train au tympan** de sortie de la station destination avec une précision de ± 30 cm. Le PA fait en sorte que l'arrêt programmé donne une trajectoire qui se termine de façon identique pour toutes les stations, indépendamment du profil du tunnel ou de la charge du train. Dans cette phase, le PA asservit la décélération à la position du train, de façon à arrêter au but.

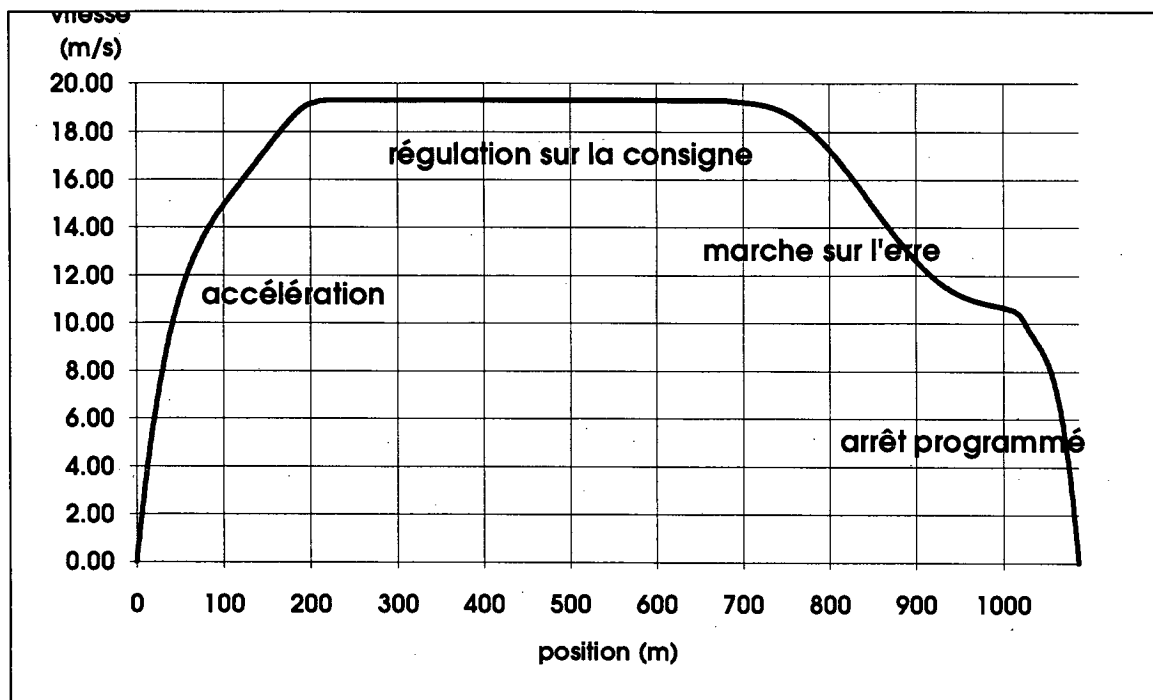


Figure 8 - Marche type d'une rame

Cette marche type a l'avantage d'être facile à implanter à bord, car les méthodes utilisées se prêtent bien à l'utilisation de l'électronique de type analogique qui fut employée pour la réalisation du système. Il faut de plus mentionner que les trajets sont très confortables, sauf pour les entrées en terminus où le passage à une consigne de vitesse plus restrictive entraîne un freinage important.

2.3 Choix du matériel à simuler

La STCUM dispose de deux types de voitures : les MR-63, mises en service en 1966, et les MR-73, mises en service en 1976. Pour la présente recherche, la distinction entre ces deux types de voitures réside dans les circuits de traction et de freinage. Les voitures MR-63 possèdent un combinateur de démarrage résistif pour la traction et un système de freinage rhéostatique, le tout commandé par crans. Les voitures MR-73 sont équipées d'un hacheur de courant à commande continue pour la traction et d'un système de freinage par récupération.

Comme le hacheur de courant est commandé de façon continue, il est plus facile à simuler que le combinateur de démarrage par cran du MR-63. Donc, seules les voitures MR-73 seront simulées dans le cadre cette étude.

2.4 Régulateur actuel : PDI

Le régulateur est l'organe qui a pour fonction d'asservir la vitesse du train à une consigne. C'est le coeur du pilote automatique.

Le métro de Montréal utilise un régulateur classique de type PDI (proportionnel - différentiel - intégral).

Sommairement, ce régulateur utilise trois fonctions pour traiter l'erreur (différence entre la vitesse du train et la vitesse de consigne) :

- 1) un gain très grand en basse fréquence, de telle sorte que l'erreur en régime permanent est très minime;
- 2) un intégrateur pour adapter le temps de réponse du régulateur à celui du système qu'il commande;
- 3) un dérivateur qui utilise la tendance de l'erreur pour prévoir la réponse à produire.

Ces trois fonctions se conjuguent afin d'éliminer les oscillations parasites et produire le meilleur compromis entre un temps de réponse minimal et un dépassement minimal de la vitesse de consigne.

2.5 Problématique

La problématique se présente comme suit :

- Les marches types ont été conçues pour un temps de parcours minimum, en tenant compte des possibilités du matériel et du service à fournir, sans nécessairement optimiser la variable énergétique. Celle-ci n'avait pas, au moment de la conception, l'importance qu'elle a aujourd'hui. Cependant, les interstations des prolongements (40 interstations sur un total de 66) ont été conçues dans la mesure du possible en cuvette, de façon à tirer partie de la force de gravité.
- Le régulateur actuel du PA (Pilote Automatique) n' a jamais été comparé à d'autres types de régulateur, par exemple à celui à logique floue, quant aux performances énergétiques.

2.6 Objectifs de la recherche

La partie la plus flexible de notre système de traction est le pilotage automatique, qui est justement le système qui force le train à suivre une marche type. Cette marche étant pour le moment rigidement conçue à partir des concepts définis plus haut.

L'objectif est premièrement de déterminer si un régulateur à logique floue peut économiser de l'énergie tout en conservant la marche type actuelle. Ce qui implique de conserver les temps de parcours tel quel, de façon à continuer à donner le service avec le même nombre de trains.

En fait, il s'agit de vérifier si, pour une marche type donnée, un régulateur à logique floue suit la consigne de vitesse plus fidèlement qu'un régulateur linéaire de type PDI, sachant que si la vitesse du train oscille autour de la consigne, il y a gaspillage d'énergie.

Le deuxième volet de la recherche consiste à vérifier s'il existe des marches types plus économiques du point de vue énergétique, pour un temps de parcours approximativement inchangé.

2.7 Limite de la recherche

Cette étude s'est limitée à l'analyse de sept interstations de la ligne 2 :

Interstation	Numéro
Sauvé_Crémazie	277
Mont-Royal_Sherbrooke	263
Lionel-Groulx_Georges-Vanier	247
Snowdon_Villa-Maria	237
Namur_Plamondon	231
De la Savane_Namur	229
Du Collège_De la Savane	225

Ces interstations ont été choisies afin de fournir un échantillonnage représentatif des différents profils du réseau et de limiter le nombre de simulations.

Comme mentionné plus haut, seul le matériel MR-73 fut simulé.

2.8 Processus de construction d'une commande à logique floue

Le but ici est de décrire les étapes requises pour la conception d'un contrôleur à logique floue. Ces étapes sont conformes à la théorie énoncée par Zadeh (3). Une bibliographie plus étendue est fournie dans le mémoire de maîtrise de Maryam Aliakbari-Khanbaghi (1). Cette description des étapes du processus est utile puisque nous les utilisons ultérieurement. Voici les cinq étapes requises pour construire un contrôleur à logique floue :

- la détermination des variables de décision (entrée) et de commande (sortie);
- la quantification de l'ensemble univers de chacune de ces variables;

- le choix des fonctions d'appartenance;
- la création d'une base de règles;
- le choix d'une méthode de défuzzification.

Les variables de décision ou d'entrée sont celles qu'il faut mesurer ou comparer, et en fonction desquelles une décision sera prise.

Les variables de commande ou de sortie sont celles sur lesquelles il faut agir pour que la décision soit exécutée.

L'ensemble univers définit la gamme de valeurs (valeurs limites) que peut prendre une variable. La quantification consiste à diviser l'ensemble univers en plusieurs bandes, appelées «niveaux de quantification». Ces niveaux peuvent être de différentes longueurs et se chevaucher. Ils sont généralement définis par des termes linguistiques : positif petit (PP), positif moyen (PM), zéro (ZÉ), négatif moyen (NM), négatif grand (NG), etc. La quantification est un processus principalement basé sur l'expérience et le sens commun.

Une règle permet d'établir une relation entre l'état d'une ou de plusieurs variables d'entrée et une variable de sortie. Le nombre de règles est fonction du nombre de niveaux et du nombre de variables. L'ensemble de ces règles forme la base de règles.

Une fonction d'appartenance permet d'octroyer, à un niveau de quantification donné, une relation d'appartenance située entre 0 et 1. Cette fonction prend généralement la forme d'un triangle dont la hauteur est 1 (degré d'appartenance maximum) et dont la largeur de la base correspond au niveau de quantification.

La méthode de défuzzification permet d'attribuer aux variables de sortie une valeur numérique exacte (et non floue). Plusieurs méthodes existent, mais la plus employée est celle du «centroïde des maxima». Cette méthode permet, lorsque plus d'une règle est mise en cause lors d'une décision (impliquant par conséquent plus d'une possibilité de valeur pour une même variable de sortie), de mettre à contribution chacune des règles en fonction des valeurs mesurées et de leurs différents degrés d'appartenance, et de fournir une seule valeur exacte pour une variable de sortie donnée.

L'avantage de la commande réalisée par logique floue est qu'au lieu de définir entièrement la dynamique du système en termes d'équations différentielles (fonctions de transfert), parfois difficiles et même souvent impossibles à déterminer dans des systèmes complexes, il suffit de définir des règles linguistiques basées sur les connaissances d'un expert. Par exemple, pour le régulateur d'un train, ces règles peuvent être l'ensemble des méthodes instinctives que l'opérateur emploie dans la conduite d'une rame de métro.

2.9 Expérimentation

Afin de pouvoir comparer le régulateur à logique floue à celui utilisé actuellement par le métro de Montréal (PDI), il a fallu simuler les deux types de régulateurs. De plus, les systèmes suivants furent aussi simulés :

- la dynamique du train;
- le couple hacheur-moteur;
- la phase d'accélération;
- la phase de mise sur l'erre;
- la phase de freinage.

Deux régulateurs à logique floue furent simulés; un pour la marche type actuelle et un autre pour la marche type modifiée.

2.9.1 Régulateur avec marche type actuelle

Dans le cas où la marche type actuelle est conservée, les cinq étapes décrites à la section intitulée «Processus de construction d'une commande à logique floue» se concrétisent comme suit :

Étape 1 Choix des variables

Les variables d'entrée sont :

erreur = vitesse de consigne - vitesse du train
variation de l'erreur = erreur au temps T - erreur au temps T- ΔT .

La variable de sortie est la tension de commande du hacheur.

Étape 2 Quantification des ensembles univers

Choix des ensembles univers

Variable	Ensemble univers	Niveaux de quantification
Erreur	$[- 2, 2]$ m/s	7
Variation de l'erreur	$[-.5, .5]$ m/s	7
Tension de sortie	$[- 8, 8]$ volts	9

Tableau 2 - Ensembles univers

Niveaux de quantification

Quantification	Termes linguistiques	Abréviations
erreur		
- 2,00 à - 0,80	Négative-Grande	NG
- 0,95 à - 0,05	Négative-Moyenne	NM
- 0,10 à 0	Négative-Petite	NP
- 0,01 à 0,01	Zéro	ZE
0 à 0,10	Positive-Petite	PP
0,05 à 0,95	Positive-Moyenne	PM
0,80 à 2,00	Positive-Grande	PG
var. de l'erreur		
- 0,5 à - 0,80	Négative-Grande	NG
- 0,095 à - 0,005	Négative-Moyenne	NM
- 0,010 à 0	Négative-Petite	NP
0,001 à 0,001	Zéro	ZE
0 à 0,01	Positive-Petite	PP
0,005 à 0,095	Positive-Moyenne	PM
0,08 à 0,5	Positive-Grande	PG
tension		
- 8 à - 6	Négative-Grande	NG
- 7 à - 5	Négative-Moyenne-Grande	NMG
- 6 à - 4	Négative-Moyenne-Petite	NMP
- 5 à - 3	Négative-Petite	NP
- 4 à 4	Zéro	ZE
3 à 5	Positive-Petite	PP
4 à 6	Positive-Moyenne-Petite	PMP
5 à 7	Positive-Moyenne-Grande	PMG
6 à 8	Positive-Grande	PG

Tableau 3 - Niveaux de quantification

Étape 3 Choix des fonctions d'appartenance

Les fonctions d'appartenance associées à chacune des quantifications sont de type triangulaire, à cause de leur facilité d'implantation.

Étape 4 La base de règles

La base de règles est une matrice de 7 X 7 dont les éléments (termes linguistiques) réfèrent à la variable de sortie. Ceux-ci sont fonction de l'erreur et de la variation de l'erreur :

		erreur						
		NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
variation de l'erreur	NG	PG	PG	PMG	PMP	ZE	NP	NMP
	NM	PG	PMG	PMP	PP	NP	NMP	NMP
	NP	PMG	PMG	PMP	ZE	NMP	NMG	NMP
	ZE	PMG	PMG	PMP	ZE	NMP	NMG	NG
	PP	PMP	PMP	PMP	ZE	NMP	NMG	NG
	PM	PP	PMP	PP	NP	NMP	NMG	NG
	PG	ZE	ZE	ZE	NP	NMG	NG	NG

Tableau 4 - Base de règles

Étape 5 La méthode de défuzzification

La méthode de défuzzification choisie est celle des centroïdes.

2.9.2 Régulateur avec marche type modifiée

Les étapes sont sensiblement les mêmes que pour le régulateur avec marche type actuelle sauf qu'il faut tenir compte de la pente. Une variable d'entrée «pente» est donc ajoutée, avec un ensemble univers de (- 6,3, 6,3) pour cent et une quantification en 4 niveaux. La quantification de la variable «erreur» est passée de 7 à 9 niveaux. Le nombre de règles augmente considérablement : il est passé de 49 à 252.

Comme il devient difficile de les présenter sous forme de tableaux, nous donnons ici en résumé les quatre grandes règles de base.

Règle 1 contrainte temps de parcours

*Si la vitesse du train est inférieure à la vitesse de consigne, alors il faut accélérer .
(Prise en compte du démarrage de la rame.)*

Règle 2 contrainte sécurité

*Si la vitesse est supérieure à la vitesse de consigne, alors il faut freiner très fort .
(Afin d'éviter d'être sanctionné par la signalisation.)*

Règle 3 contrainte confort

Si l'erreur est minime et la pente faible, alors il ne faut pas changer de commande.

Règle 4 contrainte économie d'énergie

Si l'erreur n'est pas trop grande, alors en fonction des pentes et de la variation de l'erreur, il faut accélérer ou décélérer.

Cette dernière règle implique que le régulateur peut commander une vitesse de rame inférieure à la vitesse de consigne suivie par la marche-type actuelle.

2.10 Résultats des simulations avec marches types actuelles

Le tableau ci-dessous montre les résultats obtenus avec le nouveau régulateur. Nous constatons qu'il n'y a pas de gain significatif du point de vue énergétique, et la conclusion qui s'impose est que le régulateur utilisé actuellement est de qualité équivalente à celle du régulateur à logique floue (FLC), dans le cadre des marches type actuelles.

Numéros d'interstation	Temps PID (s)	Temps FLC (s)	Économie d'énergie
277	98,9	100,7	2,2 %
263	79,1	80,3	2,6 %
247 voie 1	71,2	71,9	-0,1 %
247 voie 2	73,2	74,0	-1,8 %
237	79,2	79,3	-3,0 %
231	84,1	85,4	-1,9 %
229 voie 1	72,9	74,0	-3,0 %
229 voie 2	72,9	73,7	0,6 %
225 voie 1	99,0	102,0	2,8 %
225 voie 2	99,6	102,9	2,4 %

Tableau 5 - Comparaison des deux types de régulateurs

2.11 Résultats des simulations avec marches types modifiées

Comme mentionné à l'article intitulé «Régulateur avec marche type modifiée», le nouveau régulateur à logique floue est libéré de la contrainte de respecter les marches types actuelles. Cette libération s'est faite en maintenant des temps de parcours sensiblement égaux à ceux des marches types actuelles.

Ces nouvelles marches types sont rendues par le graphique de la figure 9.

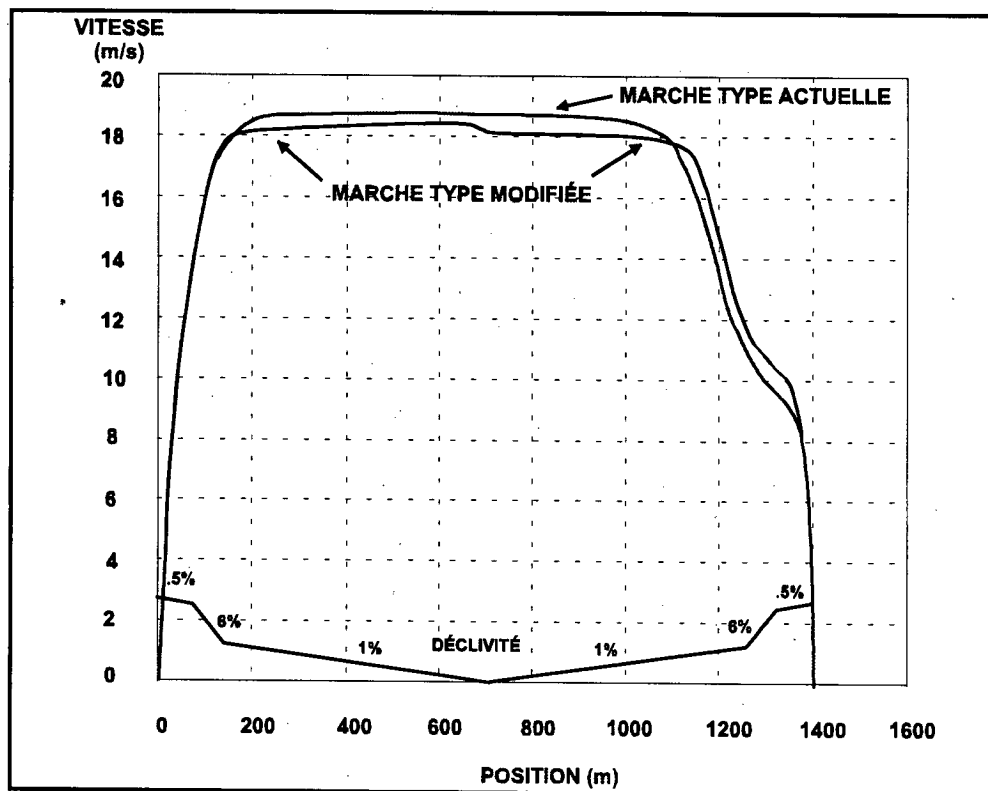


Figure 9 - Marche type modifiée

L'étude du graphique fait ressortir les points suivants, correspondant aux quatre phases de la marche type décrite précédemment :

- L'accélération initiale est conservée telle quelle, car il s'agit d'une caractéristique intrinsèque du hacheur. Nous avons intérêt à garder cette accélération à son maximum, car c'est la meilleure façon de faire du point de vue énergétique.
- Le régulateur à logique floue produit une vitesse de rame inférieure à la vitesse de consigne suivie par la marche type actuelle, diminuant ainsi les pertes d'énergie. Sachant que ces pertes dépendent du carré de la vitesse, on en conclut que l'impact sur l'énergie n'est pas négligeable. En termes relatifs, ceci signifie que la diminution d'énergie est proportionnelle à deux fois la diminution de vitesse. La brisure dans la vitesse régulée correspond au changement du sens de la pente du tunnel.
- La mise sur l'erre s'effectue plus loin dans l'interstation, compensant approximativement la perte de temps qui survient dans la phase précédente. Rappelons que la perte de temps durant la phase de régulation est proportionnelle simplement à la diminution de vitesse et non pas au double.

- Enfin, la phase de freinage en arrêt programmé n'est pas modifiée, car elle est satisfaisante du point de vue du confort.

Le tableau ci-dessous donne les résultats numériques obtenus pour les mêmes interstations que précédemment.

Numéros d'interstation	Temps PID (s)	Temps PLC (s)	Économie d'énergie
277	98,9	99,7	5,8 %
263	79,1	82,3	11,8 %
247 voie 1	71,2	69,3	0,1 %
247 voie 2	73,2	72,5	9,0 %
237	79,2	78,4	11,2 %
231	84,1	81,5	3,7 %
229 voie 1	72,9	69,7	0,3 %
229 voie 2	72,9	73,8	5,5 %
225 voie 1	99,0	99,2	9,9 %
225 voie 2	99,6	100,7	10,4 %

Tableau 6 - Comparaison des deux marches types

2.12 Conclusion sur la performance du pilote automatique

Les résultats ci-dessus semblent prometteurs, en particulier parce que l'ordre de grandeur des économies est intéressant et qu'il est en pratique mesurable par les instruments usuels. L'intérêt est d'autant plus grand que les marches types modifiées n'ont pas fait l'objet d'une recherche d'optimisation lors de ces simulations. Rappelons de plus que chaque point de pourcentage d'énergie de traction économisée rapporte environ 120 000 \$ annuellement.

Si nous décidons de poursuivre l'étude, les étapes suivantes devront être franchies :

Étape 1 : production d'un simulateur de marche type. Ce logiciel aurait pour objet de faire les calculs d'énergie pour une marche type quelconque, sans inclure un modèle de l'asservissement comme dans le projet présent, ce qui simplifie et allège la tâche.

- Étape 2 :** vérification du simulateur à l'aide de mesure expérimentale; il s'agit en particulier de mesurer le plus précisément possible la résistance à l'avancement et les pertes dans le système de traction.
- Étape 3 :** vérification expérimentale d'une marche type plus optimale afin de vérifier le principe. Il s'agit ici de modifier légèrement notre PA actuel de la façon suivante : pour une interstation donnée, remplacer à l'intérieur du PA, la vitesse de consigne actuelle par une vitesse plus petite, à l'aide d'une cellule photoélectrique ou d'un autre dispositif, simuler la présence d'une balise de mise sur l'erre à l'endroit voulu.
- Étape 4 :** formulation du problème d'optimisation sous forme mathématique et recherche de la solution optimale pour le parcours de chacune des interstations.
- Étape 5 :** détermination des temps de parcours optimaux pour chacune des interstations, tout en respectant le temps de parcours total de la ligne. Pour certaines interstations, il est possible de raccourcir le temps de parcours, pour une perte minimale en énergie (accélérer dans une pente descendante), alors que pour une autre interstation l'inverse peut être plus efficace sur le plan énergétique.
- Étape 6 :** faire le bilan des économies et prendre une décision quant à un éventuel investissement.

Il est à remarquer que le choix d'une méthode d'asservissement (PDI ou logique floue) n'est pas une condition a priori pour économiser de l'énergie. C'est une décision réservée au concepteur qui aura pour tâche d'implanter d'éventuelles nouvelles marches types de la façon la plus économique.

Enfin, une marche type optimale implique d'une façon ou d'une autre l'implantation à bord de la rame d'une base de données décrivant la marche à suivre et d'un dispositif qui indique au train sa position dans le réseau. L'implantation de ces éléments est techniquement tout à fait faisable de nos jours grâce aux microprocesseurs.

Les coûts d'études et d'implantation pour un nouveau PA représentent environ 4 à 5 personnes-année et de 3 à 5 millions de dollars.

CONCLUSION

À l'heure où Hydro-Québec met en oeuvre un programme de réduction de la consommation d'une ampleur sans précédent et où la STCUM vit une crise de financement aiguë, les recherches axées sur les économies d'énergie sont devenues essentielles. La plus grande part de l'énergie utilisée pour le fonctionnement du métro étant imputable à la circulation des rames, il était tout à fait normal de consacrer des efforts particuliers à la diminution des dépenses qui y sont liées.

La présente recherche a permis de progresser dans deux domaines touchant l'exploitation du réseau de métro. Le premier volet de la recherche a démontré qu'il était possible de désynchroniser les charges occasionnées par les rames de sorte que les crêtes de puissance instantanée aux postes de district soient réduites de 13 % à 21 %. La réduction des crêtes de puissance permet d'une part d'éviter de nouveaux coûts pour des installations électriques devant supporter ces charges. D'autre part, elle constitue un moyen d'empêcher les hausses de dépenses qui pourraient découler d'une réduction de la période d'intégration utilisée dans les calculs de facturation du fournisseur d'électricité.

Il a été démontré que la désynchronisation des rames ne cause que très peu de distorsion à l'horaire. De fait, plus de 95 % des parcours simulés le long d'une ligne ont subi des retards cumulés inférieurs à 15 secondes, alors que les retenues admissibles en station étaient de 0,4,8 et 12 secondes.

Le second volet de la recherche portait sur l'efficacité énergétique du matériel roulant. L'étude a été axée sur le système embarqué le plus susceptible d'être remplacé à moyen terme, étant donné les progrès technologiques apparus depuis sa conception. Il s'agit du régulateur de vitesse du système de pilotage automatique. L'étude a démontré que tel qu'il est utilisé actuellement, le régulateur de vitesse est efficace du point de vue énergétique et que son remplacement par un régulateur à logique floue n'entraînerait pas de gains significatifs.

L'étude a aussi conclu que du point de vue énergétique, les marches types actuelles des rames ne sont pas optimales. Il appert que des économies allant jusqu'à 10 % seraient réalisables dans certaines interstations. Sachant que 1 % de la facture totale pour la traction électrique équivaut à près de 116 000 \$, il apparaît très intéressant de poursuivre l'étude amorcée afin de déterminer les marches types les plus efficaces et d'évaluer leur impact global sur les coûts en énergie.

Étant donné les coûts impliqués, il apparaît souhaitable que l'on associe ces recherches à la nécessité d'introduire de nouvelles technologies à la STCUM au cours de la prochaine décennie. En effet la Société devra changer ses ordinateurs de procédé d'ici à cinq ans et tout son contrôle de train (PA inclus) d'ici à l'an 2003.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ALIAKBARI KHANBAGHI, Maryam, *Contribution à la réduction de la consommation électrique du métro de Montréal*, Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Département de génie électrique de l'École polytechnique de Montréal, Montréal, 1993, 120 p.
- [2] SANSO, Brunilde, *Désynchronisation des trains et optimisation de la puissance instantanée dans le métro de Montréal*, Centre de développement technologique (C.D.T.), École Polytechnique de Montréal, Montréal, 1994, 80 p.
- [3] ZADEH, L.A., *Fuzzy sets, Information and Control*, vol. 8, 1965.

