



Étude de faisabilité technique du tramway de Québec et de Lévis

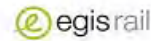


Dossier P-12-600-04

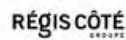
Consortium Tramway Québec-Lévis



SNC-LAVALIN



et ses partenaires



Intitulé du document
2^E SOUS LIVRABLE 1.3 NOTE TECHNIQUE MODE D'ALIMENTATION DU SYSTÈME HYPOTHÈSES POUR LE PRÉ-DIMENSIONNEMENT TRACTION

Numéro du document	Révision
610879-0300-4AEN-0006	00

PRINCIPAUX COLLABORATEURS :

Pascal CHOVIN

Guillaume LIRON

VÉRIFIÉ PAR : Pascal CHOVIN

APPROUVÉ PAR : André GENDREAU

NUMÉRO DU DOCUMENT :		610879-0300-4AEN-0006
REV.	DATE	TYPE DE RELÂCHE
PA	23/05/2013	Émission préliminaire pour commentaire interne
PB	11/06/2013	Émission préliminaire au RTC
00	29/08/2013	Émission finale intégrant les commentaires RTC

SOMMAIRE

OBJET	5
GLOSSAIRE ET DÉFINITIONS	6
Glossaire	6
Définitions	6
1. PRÉAMBULE	7
1.1 Critères de conception	7
1.2 Horizons d'études	7
1.3 Avertissements	7
2. TRACÉ	8
2.1 Tracé de référence	8
2.2 Tracé - Variantes	9
2.3 Tracé - Synthèse	9
2.4 Limitations de vitesse liées au tracé	10
3. MATÉRIEL ROULANT	11
4. EXPLOITATION	13
4.1 Stations	13
4.2 Intersections avec la circulation routière	13
4.3 Limitation de vitesse	14
4.4 intervalles	14
4.4.1 Mode nominale d'exploitation	14
4.4.2 Modes particuliers d'exploitation	15
5. ROBUSTESSE	17
6. PARAMÈTRES ÉLECTRIQUES DES INSTALLATIONS TRAMWAY	18

NOTE AU LECTEUR

Il est fort possible que le nombre de stations sur le territoire de la Ville de Lévis augmente suite aux résultats d'études en cours sur l'achalandage et la révision du réseau d'autobus de la STLévis lorsque le tramway sera mis en service. Par conséquent, de nouvelles simulations devront être faites dans les études post étude de faisabilité.

OBJET

L'objet de cette note est de présenter les intrants et hypothèses qui seront utilisés pour le pré-dimensionnement des installations de traction du tramway.

L'objectif du pré-dimensionnement est de déterminer l'ordre de grandeur pour :

- le nombre de sous stations, et le principe de répartition le long de la ligne de tramway;
- les caractéristiques principales de sous stations (puissance nominale des groupes redresseurs);
- les sections des fils de contact de la ligne aérienne de contact;
- les sections des feeders éventuels.

GLOSSAIRE ET DÉFINITIONS

GLOSSAIRE

Abréviations	Définitions
A	Ampère
ac ou ~	Courant alternatif
BT	Basse tension
cc ou =	Courant continu
CEE	Centre d'exploitation et d'entretien
GLO	Gabarit Limite d'Obstacle
HQ	Hydro Québec
LAC LATE	Ligne aérienne de contact Ligne aérienne de traction électrique Même signification pour les 2 abréviations
MALT	Mise à la terre
MT	Moyenne tension
RTC	Réseau de transport de la Capitale
SST	Sous Station Traction
V	Volt

DÉFINITIONS

Centre d'échanges : Point de convergence et d'échanges des usagers du tramway avec le réseau d'autobus ou avec tout autre mode de transport; le centre d'échanges peut être un terminus d'autobus, un stationnement incitatif pour automobiles, un stationnement pour un système d'auto-partage, un stationnement pour vélos ou un regroupement total ou partiel de toutes ces fonctions.

Station : Point d'embarquement ou de débarquement des usagers du tramway le long du tracé.

Sous-station : Local ou bâtiment regroupant les équipements électriques d'acquisition MT, production/distribution traction, commande/contrôle, basse tension.

Section électrique : Portion de ligne située entre 2 sous stations de traction.

Sous-section électrique : Sous découpage d'une section électrique de ligne.

1. PRÉAMBULE

1.1 CRITÈRES DE CONCEPTION

Les critères de conception (référentiel technique, environnement climatique, performances) sont définis dans la note technique « Mode d'alimentation du système – Critères de conception » référencée 610879-0010-4AEN-0002.

1.2 HORIZONS D'ÉTUDES

L'étude de pré-dimensionnement des installations de traction du tramway est faite pour un horizon long terme. En effet, l'investissement pour la construction d'un réseau de tramway étant très important, il doit être effectué en prenant en compte les évolutions d'achalandage sur le long terme.

À partir de cet horizon long terme, il est possible de compléter l'analyse par une approche court/moyen terme, afin d'identifier les investissements qui peuvent être différés dans le temps, et réaliser en suivant l'évolution de l'achalandage.

Les hypothèses principales prises pour l'horizon long terme sont les suivantes :

- matériel roulant allongé à 43 m, avec un taux de motorisation de 75 %;
- intervalle d'exploitation entre rames de 2 minutes sur la branche Sud (Charest – Grand Théâtre) et de 3 minutes sur toutes les autres branches du réseau.

Pour l'horizon moyen terme, les hypothèses principales sont :

- matériel roulant de 33 m, avec un taux de motorisation de 100 %;
- intervalle d'exploitation entre rames de 2 minutes sur la branche Sud (Charest – Grand Théâtre) et de 3 minutes sur toutes les autres branches du réseau.

1.3 AVERTISSEMENTS

Tous les intrants et hypothèses mentionnés dans ce document ont une influence sur le pré-dimensionnement des installations de traction du tramway. Des évolutions de ces paramètres auront une incidence sur les résultats du pré-dimensionnement. Il convient donc que les informations mentionnées dans ce document soient validées, afin de réaliser les études.

Les hypothèses doivent être calées avec le bon dosage :

- une hypothèse forte/contraignante, entraînera une augmentation des installations de traction, d'où un accroissement du coût d'investissement;
- une hypothèse calée à un niveau trop bas, pourra avoir des impacts en exploitation.

2. TRACÉ

Pour le tracé, les informations les plus importantes/influentes pour le pré-dimensionnement traction sont :

- le linéaire;
- le profil en long;
- toutes les courbes de faible rayon (implique de réduire à la vitesse avant la courbe et de ré-accélérer après la courbe).

Le réseau de tramway est constitué de 2 tracés en croix : un tracé appelé Nord-Sud et un tracé appelé Est-Ouest.

Dans la suite de ce document, par simplification de désignation, le tracé sera décrit par les branches suivantes :

- branche nord;
- branche sud;
- branche est;
- branche ouest avant le pont de Québec;
- branche ouest pont de Québec;
- branche ouest Lévis.

Ce principe permet de dissocier le descriptif du tracé (infrastructures) de celui qui pourra être mis en œuvre pour l'exploitation du réseau tramway (exploitation en plusieurs lignes).

2.1 TRACÉ DE RÉFÉRENCE

Le tracé de référence pris en compte pour le pré-dimensionnement traction est celui défini dans les documents suivants :

- tracé en plan
 - branche nord : 6^e sous livrable 1.2 – Technologie et insertion – Insertion séquences tracé Nord-Sud – Québec – Préliminaire, référence 610879-0200-4UEN-1001, révision PB du 05/03/2013;
 - branche sud : 6^e sous livrable 1.2 – Technologie et insertion – Insertion séquences tracé Nord-Sud – Québec – Préliminaire, référence 610879-0200-4UEN-1001, révision PB du 05/03/2013;
 - branche est : 5^e sous livrable 1.2 – Technologie et insertion – Insertion séquences tracé Est-Ouest – Québec – Préliminaire, référence 610879-0200-4UEN-2001, révision 00 du 01/02/2013;
 - branche ouest avant le pont de Québec : 5^e sous livrable 1.2 – Technologie et insertion – Insertion séquences tracé Est-Ouest – Québec – Préliminaire, référence 610879-0200-4UEN-2001, révision 00 du 01/02/2013;
 - branche ouest pont de Québec : 7^e sous livrable 1.2 – Technologie et insertion – Insertion séquences axe Pont de Québec – Préliminaire, référence 610879-0200-4UEN-3001, de mars 2013;

- branche ouest Lévis : utilisation du tracé défini dans le rapport d'étape livrable 1.1 (8^e livrable 1.2 non disponible à ce jour).

Nota : d'éventuels déplacements de stations de quelques dizaines de mètres sont peu significatifs sur un pré-dimensionnement traction.

- profil en long :
 - branche nord : profil en long de mars 2013
 - branche sud : 7^e sous livrable 1.2 – Technologie et insertion – Cahier de plans tronçon 1 – option verticale 2, référence 610879-0200-4IDP-1001 PA;
 - branche est : profil en long de mars 2013;
 - branche ouest avant le pont de Québec : profil en long de l'analyse du tracé de base sur Nérée-Tremblay, référence 610879-0200-4IEN-0001;
 - branche ouest Lévis : rapport d'étape livrable 1.1.

2.2 TRACÉ - VARIANTES

Les études d'insertion du tramway en cours intègrent également les variantes de tracé listées ci-après.

- branche nord. Cette branche comporte une variante de tracé, passant par :
 - la rue Boisclerc.
- branche sud. Cette branche comporte une variante de tracé, passant par :
 - la rue Dorchester en double sens;
- branche est. Cette branche comporte une variante de tracé, passant par la rue Saint-Roch, la rue du Prince-Edouard, la rue du Pont et la 3^e Avenue.
- branche ouest avant le pont de Québec. Cette branche comporte plusieurs variantes de tracé dans le secteur Nérée-Tremblay (secteur comportant des dénivellées importantes), passant par :
 - le stationnement de la Pyramide;
 - la rue Nicolas-Pinel, et la rue Jean-Durand;
 - une liaison directe pour rejoindre la rue Frank-Carrel.
- branche ouest Pont de Québec : plusieurs variantes d'insertion sur ou aux abords du pont.
- branche ouest Lévis : pas de variante.

2.3 TRACÉ - SYNTHÈSE

Compte tenu de l'objectif de l'étude (Estimation des coûts avec une tolérance de 30 %), nous proposons de réaliser les simulations de pré-dimensionnement traction sur un seul tracé.

Dans les zones comportant des variantes d'insertions, nous proposons de prendre le tracé le plus probable du point de vue insertion.

Il en résulte les propositions suivantes :

- branche nord : Les linéaires des tracés des variantes sont inférieurs ou équivalents au tracé de référence. Les pentes sont limitées. Nous proposons de faire la simulation sur le tracé variante A avec les voies insérées rue de Dorchester et le tracé de référence dans le secteur de l'avenue Eugène-Lamontagne.
- branche sud : Les linéaires des tracés des variantes sont inférieurs ou équivalents au tracé de référence. Idem en termes de dénivelées et pentes maximales à franchir. Nous proposons donc de faire les simulations sur le tracé passant par la Place d'Youville (station souterraine ou semi enterrée).
- branche est : La variante augmente le linéaire de la ligne d'environ 400 m par rapport au tracé de base. Elle intègre également une station supplémentaire. Peu d'écart en termes de profil en long entre le tracé de référence et la variante. Nous proposons de faire la simulation sur le tracé de référence.
- branche ouest avant le pont de Québec : Les linéaires des tracés des variantes sont inférieurs ou équivalents au tracé de référence. Idem en termes de dénivelées et pentes maximales à franchir. Nous proposons de faire la simulation sur le tracé variante Pyramide/Rue Nicolas-Pinel/Rue Jean-Durand.
- branche ouest Pont de Québec : les variantes sont similaires au tracé de référence en termes de longueur et profil en long. Nous proposons de faire la simulation sur le tracé de référence.
- branche ouest Lévis : pas de variante. La simulation sera faite sur le tracé de référence incluant le projet d'extension entre la 4^e Avenue et le boulevard Alphonse-Desjardins.

2.4 LIMITATIONS DE VITESSE LIÉES AU TRACÉ

Les limitations de vitesses liées au tracé concernent :

- celles dues aux courbes en tracé en plan;
- celles dues aux rayons paraboliques en profil en long.

Les règles pour le calcul de ces limitations sont celles mentionnées dans la note « Hypothèses générales d'insertion générale », référence 610879-0010-4REN-0001.

3. MATÉRIEL ROULANT

Les hypothèses principales prises pour le matériel roulant sont les suivantes :

- rames de 33 mètres de long;
- prise en compte de la possibilité d'allongement des rames à 43 mètres;
- motorisation pour franchir des pentes de 8 % en alignement droit.

De ces hypothèses principales, il est proposé les hypothèses détaillées suivantes.

	Rame de 33 mètres de long	Rame de 43 mètres de long
Motorisation	3 bogies motorisés	3 bogies motorisés
Courant maximal de traction (au pantographe)	1 700 A	1 700 A
Puissance énergie auxiliaire (pour le fonctionnement de la rame et le confort des voyageurs)	110 kW	140 kW
Vitesse maximale de circulation en exploitation	70 km/h	70 km/h
Masse à vide	40 tonnes	55 tonnes
Masse en charge EL4 (4 personnes/m ²)	60 tonnes	80 tonnes
Masse en charge EL6 (6 personnes/m ²)	65 tonnes	85 tonnes
Tension nominale traction	750 V =	750 V=
Tension de régulation traction (seuil en-deçà duquel la baisse de performance devient significative)	600 V=	600 V=
Tension minimale traction	500 V=	500 V=
Tension permanente la plus élevée	900 V=	900 V=
Tension non permanente la plus élevée	1000 V=	1000 V=
Accélération maximale	1,2 m/s ²	1,2 m/s ²
Décélération de service	1,2 m/s ²	1,2 m/s ²
Rendement global de la chaîne de traction embarquée	90%	90%
Stockage d'énergie embarquée	Hypothèse : pas de stockage embarqué	Hypothèse : pas de stockage embarqué

Pour les études de consommation, le freinage par récupération (réinjection sur la LAC) sera pris en compte.

Pour le pré-dimensionnement des installations traction (groupes redresseurs, LAC), nous préconisons de ne pas prendre en compte le freinage par récupération (car la réinjection n'est pas garantie).

4. EXPLOITATION

4.1 STATIONS

Le nombre et le positionnement des stations ont une influence importante dans le dimensionnement traction.

Les informations sur les localisations et le nombre de stations sont issues des documents de tracé et d'insertion listés au paragraphe 4 de la présente note.

Il en résulte les informations principales suivantes :

Branches	Longueur	Nb station	Longueur moyenne inter-stations	Longueur maximale inter-stations	Longueur minimale inter-stations
Nord	4,7 km	9	580 m	820	360
Sud	2,4 km	3	460 m	540	380
Est	4,8 km	8	610 m	1000	450
Ouest avant pont Québec	10,5 km	15	700 m	1300	400
Ouest pont Québec	1 km	aucune			
Ouest Lévis	13,2 km	8	1600 m	2500 m	620 m
Global réseau tramway	36,6 km	43	810 m		

Les hypothèses prises pour les temps d'arrêt en station sont les suivantes :

- 20 secondes pour un tiers des stations (stations simples);
- 30 secondes pour la moitié de stations (stations avec correspondances);
- 50 secondes pour le reste des stations (stations avec échanges importants).

4.2 INTERSECTIONS AVEC LA CIRCULATION ROUTIÈRE

Les hypothèses prises pour les franchissements des intersections sont les suivantes :

- vitesse maximale du tramway de 30 km/h, pour le franchissement des intersections, (Nota : ces vitesses sont les limites maximales. Il est probable que sur certaines intersections, la vitesse réelle de franchissement soit plus faible)

Nota : réduction de vitesse par rapport à la vitesse normale de circulation en ligne pour des raisons de sécurité.

- priorité du tramway

La signalisation lumineuse donne la priorité aux rames de tramway (priorité absolue = permet le passage des rames de tramway sans s'arrêter. Sauf quelques exceptions). Pour obtenir une vitesse commerciale attractive, il est préconisé une priorité absolue pour le tramway. Néanmoins, cette configuration est minorante pour le dimensionnement des installations de traction.

Pour le pré-dimensionnement traction, nous prenons en compte l'arrêt du tramway à quelques intersections (L'arrêt à toutes les intersections sera par contre très majorant).

4.3 LIMITATION DE VITESSE

Les limitations de vitesse liées à l'exploitation, pour la circulation des rames de tramway sont les suivantes :

- en zone piétonne, vitesse maximale de 20 km/h;
- franchissement des intersections, vitesse maximale de 30 km/h;
- en zone urbaine très dense (faible distance entre intersections, présence de nombreux piétons, visibilité réduite pour le conducteur du tramway, etc.), vitesse maximale de 40 km/h;
- en zone urbaine dense, vitesse maximale de 50 km/h;
- en zone « péri urbaine », vitesse maximale de 70 km/h (Sur le boulevard Charest ouest et sur le territoire de Lévis)
- sur le pont de Québec : 70 km/h dans la configuration 2 voies (routières), et 50 km/h dans la configuration 3 voies (routières).

4.4 INTERVALLES

4.4.1 Mode nominale d'exploitation

Les hypothèses posées pour l'intervalle d'exploitation en mode nominale d'exploitation sont mentionnées dans le tableau suivant donnant l'intervalle entre 2 rames.

Branches	Long terme (avec MR de 43 m)		Moyen terme (avec MR 33 m)	
	Intervalle	Charge MR	Intervalle	Charge MR
Nord	3 minutes	EL 6	3 minutes	EL 6
Sud	2 minutes	EL 6	2 minutes	EL 8
Est	3 minutes	EL 6	3 minutes	EL 6
Ouest Québec et pont de Québec	3 minutes	EL 6	3 minutes	EL 6
Ouest Lévis	3 minutes	EL 4	3 minutes	EL 4

Nota : charge MR « EL xx » = charge MR avec xx personnes par m².

Nous préconisons de faire l'étude de pré-dimensionnement sur le long terme afin de définir la configuration enveloppe. L'analyse avec les paramètres « moyen terme » permettra d'identifier, les équipements et installations dont la réalisation pourra être différée.

Lors des étapes ultérieures des études de l'opération (AVP, etc.), une optimisation pourra être faite (identification d'équipements pouvant être différée) si l'objectif « moyen terme » mentionné dans le tableau est revu à la baisse.

Cette approche permet :

- dans le cadre des présentes études préliminaires, de donner au RTC une estimation du coût enveloppe d'investissement);
- d'éviter les coûts d'investissements frustratoires.

Dans le cas d'une exploitation multi lignes, l'hypothèse est prise que l'exploitant disposera d'un Système d'Aide à l'Exploitation (SAE) permettant de conserver un terme d'exploitation homogène sur toutes les branches (pas de convois de plusieurs rames à faibles intervalles provenant de lignes différentes).

La simulation est effectuée pour une marche tendue (accélération maximum, décélération, etc.).

4.4.2 Modes particuliers d'exploitation

Exploitation partielle d'une ligne : mêmes intervalles que pour l'exploitation nominale.

Injection des rames en ligne en début d'exploitation : injection progressive des rames en respectant l'intervalle nominal d'exploitation.

Retrait des rames en fin d'exploitation : retrait progressif des rames.

Centre d'Exploitation et d'Entretien :

- le remisage des rames est fait dans un bâtiment couvert et fermé permettant la mise hors gel des rames (pour réduire les temps de pré-conditionnement du compartiment voyageurs);
- la préparation des rames (avant l'injection en ligne) est faite progressivement : 20 rames maximum en préparation en simultané).

5. ROBUSTESSE

Critère de robustesse « production traction » pris en compte :

1. une perte d'une sous-station de traction est sans impact sur l'exploitation du tramway;
2. défaillances multiples :
 - i) séquence 1 SST « hors service », 3 SST « en service », 1 SST « hors service », 2 SST « en service » : sans impact sur la circulation des rames de tramway,
 - ii) la défaillance de sous-stations plus rapprochées aura un fort impact sur l'exploitation (voir l'arrêt d'exploitation du tramway sur une portion de la ligne).

Critère de robustesse « alimentation Moyenne Tension » pris en compte :

- une défaillance MT (perte d'une alimentation Hydro-Québec, ou incident interne MT tramway) : sans impact sur la circulation des rames de tramway;
 - L'architecture MT doit donc être définie pour qu'une défaillance MT aboutisse à la configuration « 1. » ou au maximum « 2.i »), mentionnée au-dessus pour la robustesse traction.
- défaillances multiples MT :
 - aboutissant à la configuration « 2.i » : sans impact sur la circulation des rames de tramway;
 - aboutissant à une configuration plus défavorable : fort impact sur l'exploitation (voir l'arrêt d'exploitation du tramway sur une portion de la ligne).

6. PARAMÈTRES ÉLECTRIQUES DES INSTALLATIONS TRAMWAY

Les paramètres électriques pris en compte sont les suivants :

- tension nominale traction : 750V=;
- retour du courant de traction par les rails de roulement avec :
 - rails de type 50 kg / mètre linéaire (valeur standard minimale pour un tramway à forte circulation);
 - liaisons équipotentielle transversales entre les 4 files de rails.
- ligne aérienne de contact : les LAC des 2 voies sont connectées en parallèle.

Nota : ce principe reste compatible même dans les zones où les 2 voies sont espacées (exemple insertion bilatérale) ; les liaisons entre les 2 LAC seront réalisées par câbles isolés.



Étude de faisabilité technique du tramway de Québec et de Lévis



Dossier P-12-600-04

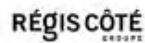
Consortium Tramway Québec-Lévis



SNC-LAVALIN



et ses partenaires



Intitulé du document

2^E LIVRABLE 1.3 – ANNEXE

NOTE TECHNIQUE

RÉSULTATS SIMULATIONS TRACTION

TABLE DES MATIÈRES

GLOSSAIRE	7
DÉFINITIONS	8
NOTE AU LECTEUR	9
OBJET	10
 1 PRÉSENTATION DES PRINCIPES ET OUTILS DE SIMULATION TRACTION	 11
1.1 LES INTRANTS	11
1.2 PRÉSENTATION DE L'OUTIL DE SIMULATION.....	11
1.2.1 Principe de fonctionnement	11
1.2.2 Données d'entrées.....	12
1.2.3 Données de sortie.....	12
1.3 APERÇU DE LA MODÉLISATION DU RÉSEAU	12
 2 PRÉSENTATION DES RESULTATS.....	 14
2.1 GRAPHIQUES DE CIRCULATION	14
2.2 ENERGIE NÉCESSAIRE POUR LE MATÉRIEL ROULANT.....	18
2.3 RÉSULTATS TRACTION LONG TERME EN MODE NOMINAL	21
2.3.1 Chutes de tension et courants appelés par les rames	21
2.3.2 Courants débités par les sous-stations	28
2.4 INFLUENCE DU FREINAGE PAR RÉINJECTION SUR LA LAC.....	32
2.5 RÉSULTATS TRACTION LONG TERME EN MODES DEGRADÉS	33
2.5.1 Chutes de tension.....	33
2.5.2 Courants des sous-stations	43
2.6 RÉSULTATS TRACTION MOYEN TERME EN MODE NOMINAL	47
2.6.1 Mode nominal	47
2.6.2 Analyse de différer des feeders.....	51
2.6.3 Analyse de différer des sous-stations.....	55
 3 RECAPITULATIF	 59
3.1 HORIZON LONG TERME	59
3.2 OPTIMISATION MOYEN TERME	60

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Synoptique schématique réseau traction simulé	13
Figure 2 :	Graphique de circulation sur la branche Sud	15
Figure 3 :	Graphique de circulation sur la branche Nord	16
Figure 4 :	Graphique de circulation sur l'axe Est-Ouest	17
Figure 5 :	Branche Sud.....	19
Figure 6 :	Branche Nord	19
Figure 7 :	Tracé OUEST - EST	20
Figure 8 :	Mode nominal - Tracé Sud/Nord – Tension rames 43 m	22
Figure 9 :	Mode nominal - Tracé Sud/Nord – Courant d'une rame de 43 m.....	24
Figure 10 :	Mode nominal - Tracé Ouest/Est – Tension rames 43 m.....	26
Figure 11 :	Mode nominal - Tracé Ouest/Est – Courant d'une rame de 43 m.....	27
Figure 12 :	Mode nominal – Courants sous-stations - Rames de 43 m	28
Figure 13 :	Mode nominal – Courbe courant sous-station au Sud du Pont de Québec - Rames de 43 m	30
Figure 14 :	Mode nominal – Courbe courant sous-station Dorchester - Rames de 43 m	31
Figure 15 :	Mode nominal - Gain par sous-station avec la réinjection MR - Rames de 43 m..	32
Figure 16 :	Tableau de définition des modes dégradés simulés	33
Figure 17 :	Mode dégradé 1 – Tracé OUEST-EST – Tension pantographe avec rames 43 m	35
Figure 18 :	Mode dégradé 2 – Tracé OUEST-EST – Tension pantographe avec rames 43 m	36
Figure 19 :	Mode dégradé 3 – Tracé OUEST-EST – Tension pantographe avec rames 43 m	37

Figure 20 : Mode dégradé 4 – Tracé OUEST-EST – Tension pantographe avec rames 43 m	38
Figure 21 : Mode dégradé 1 – Tracé SUD-NORD – Tension pantographe avec rames 43 m	39
Figure 22 : Mode dégradé 2 – Tracé SUD-NORD – Tension pantographe avec rames 43 m	40
Figure 23 : Mode dégradé 3 – Tracé SUD-NORD – Tension pantographe avec rames 43 m	41
Figure 24 : Mode dégradé 4 – Tracé SUD-NORD – Tension pantographe avec rames 43 m	42
Figure 25 : Modes dégradés – Courants moyenne simple sous-stations avec rames 43 m ...	43
Figure 26 : Modes dégradés – Courants moyenne quadratique sous-stations avec rames 43 m	44
Figure 27 : Mode dégradé 2 – Courant sous-station SUD du Pont de Québec avec rames 43 m	45
Figure 28 : Mode dégradé 2 – Courant sous-station Dorchester avec rames 43 m	46
Figure 29 : Mode nominal – Comparaison courants sous-station moyen/long terme.....	47
Figure 30 : Mode nominal – Tension tracé OUEST-EST avec des rames de 33 m	49
Figure 31 : Mode nominal – Tension tracé SUD-NORD avec des rames de 33 m	50
Figure 32 : Courants sous-stations avec des rames de 33 m, et sans feeder	51
Figure 33 : Mode dégradé 3 – Tracé OUEST/EST – Tension avec des rames de 33 m, et sans feeder.....	53
Figure 34 : Mode dégradé 3 – Tracé SUD/NORD – Tension avec des rames de 33 m, et sans feeder	54
Figure 35 : Mode dégradé 5 – Tracé OUEST/EST – Tension avec des rames de 33 m, et sans feeder.....	56
Figure 36 : Mode dégradé 6 – Tracé OUEST/EST – Tension avec des rames de 33 m, et sans feeder.....	57
Figure 37 : Courants moyenne simple sous-stations avec des rames de 33 m, sans feeder, et SST Sud pont de Québec différée	58

Figure 38 : Courants moyenne quadratique sous-stations avec des rames de 33 m, sans feeder, et SST Sud pont de Québec différée	58
Figure 39 : Tableau sous-stations long terme	59
Figure 40 : Tableau sous-stations moyen terme	61

Glossaire et définitions

GLOSSAIRE

Abréviations	Définitions
ac	Courant alternatif
API	Automate Programmable Industriel
BT	Basse tension
cc	Courant continu
CEE	Centre d'exploitation et d'entretien
GLO	Gabarit Limite d'Obstacle
GTC	Gestion Technique Centralisée
HQ	Hydro-Québec
IHM	Interface Homme Machine
LAC	Ligne aérienne de contact
MALT	Mise à la terre
MT	Moyenne tension
PAC	Profil aérien de contact
PCC Tramway	Poste de commande centralisée du tramway
RTC	Réseau de transport de la Capitale
SAEIV	Système d'Aide à l'Exploitation et à l'Information Voyageurs
SST	Sous-station traction
TBT	Très basse tension
V	Volt

DÉFINITIONS

Centre d'échange :	Point de convergence et d'échange des usagers du tramway avec le réseau d'autobus ou avec tout autre mode de transport; le centre d'échange peut être un terminus d'autobus, un stationnement incitatif pour automobiles, un stationnement pour un système d'auto-partage, un stationnement pour vélo ou un regroupement total ou partiel de toutes ces fonctions.
Ligne de tramway :	axe opérationnel (défini avec un horaire d'opération) utilisant une partie, un ou plusieurs tracé(s) (infrastructures) spécifiquement aménagé(s) pour le tramway
Corridor :	Délimitation géographique d'une largeur totale de 1 km environ et dont les extrémités sont fixées.
Site propre :	Les voies du tramway sont exclusivement utilisées par le tramway.
Site mixte :	Une des deux voies du tramway est utilisée par les véhicules particuliers (VP, PL, BUS).
Site banal :	Les deux voies du tramway sont utilisées par les véhicules particuliers.
Tracé :	Infrastructures spécifiques et nécessaires pour l'opération du tramway.
Station :	Point d'embarquement ou de débarquement des usagers du tramway le long du tracé.

NOTE AU LECTEUR

Il est fort possible que le nombre de stations sur le territoire de la Ville de Lévis augmente suite aux résultats d'études en cours sur l'achalandage et la révision du réseau d'autobus de la STLévis lorsque le tramway sera mis en service. Par conséquent, de nouvelles simulations devront être faites dans les études post étude de faisabilité.

OBJET

Le présent document présente les résultats des simulations de traction électrique établies pour le pré-dimensionnement des installations de traction du tramway des villes de Québec et de Lévis.

L'objectif du pré-dimensionnement traction est de déterminer les ordres de grandeurs des équipements principaux afin de pouvoir réaliser l'estimation financière des coûts d'immobilisations et d'utilisation.

Ces simulations traction ont permis d'identifier :

- le nombre de sous-stations traction, et le principe de répartition le long du tracé tramway;
- les caractéristiques principales des sous-stations (nombre et puissance nominale des groupes redresseurs);
- les sections des conducteurs de la ligne aérienne de contact;
- les sections des feeders éventuellement nécessaires.

Les paramètres principaux analysés avec les simulations tractions sont :

- la charge débitée par les postes redresseurs;
- la tension au niveau des rames de tramway (tension pantographe / rail);
- les courants transitant dans les conducteurs de la LAC et feeder éventuels.

Ces paramètres sont vérifiés dans la configuration nominale, mais également dans les configurations dégradées suite à la défaillance d'un équipement (perte d'une sous-station).

Point important : les résultats présentés sont dans l'objectif du pré-dimensionnement traction. Ils donnent les ordres des équipements principaux afin de réaliser l'estimation financière. Ces résultats ne doivent pas être utilisés à des fins de construction, d'achat de terrains pour les sous-stations, etc.

1 PRÉSENTATION DES PRINCIPES ET OUTILS DE SIMULATION TRACTION

1.1 LES INTRANTS

Les intrants utilisés pour les simulations traction sont définis dans le 2^e sous-livrable 1.3 « Hypothèses pour le pré-dimensionnement traction, référence 610879-0300-4AEN-0006.

Ce document mentionne également les hypothèses complémentaires prises lorsqu'un intrant n'était pas disponible.

Comme mentionné dans le document, les simulations ont été effectuées dans la configuration « rames de 33 mètres de long » et dans la configuration « rames de 43 mètres de long ».

1.2 PRÉSENTATION DE L'OUTIL DE SIMULATION

Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel SIMALIM DC.

SIMALIM est un logiciel de simulation électrique traction conçu et utilisé par Egis Rail. Ce logiciel permet de modéliser les équipements fixes de traction électrique (en courant continu pour SIMALIM DC, et en courant alternatif pour SIMALIM AC) sur différents types de réseaux :

- réseaux urbains : tramway, métro, trolleybus;
- réseaux péri-urbains : tram-train, train, etc.;
- réseaux ferroviaires : trains.

Le logiciel modélise pour cela le réseau, le tracé, les équipements électriques, les véhicules, selon l'exploitation définie, en situation normale ou dégradée. Les grandeurs utiles peuvent ainsi être analysées : tension, courant, vitesse, puissance, etc., sur une courte durée et des durées plus importantes (de quelques heures à la journée d'exploitation).

Cet outil est utilisé par les ingénieurs d'Egis Rail lors des études de dimensionnement (création de ligne), ou lors d'expertises sur des réseaux électriques existants (études de prolongement de ligne, modification des horaires, mise en service de nouveau matériel roulant, renouvellement d'installations fixes, recherche d'économie d'énergie, etc.).

Le développement en interne de l'outil, nous permet de le faire évoluer pour répondre à la variété et la complexité des études qui sont demandées.

1.2.1 Principe de fonctionnement

À partir de données fournies en entrées, SIMALIM calcule, à pas de temps fixes, l'état du réseau de transport :

- calculs de la position et du comportement de chaque rame;
- calculs des paramètres sous-stations;
- calculs des grandeurs électriques du réseau correspondant.

Ainsi, on reproduit en simulation, le comportement des différents équipements.

1.2.2 Données d'entrées

Plusieurs degrés de précision des données d'entrées sont possibles, en fonction :

- du niveau souhaité de précision des résultats;
- de l'état d'avancement de l'étude proposée (informations disponibles).

La précision des résultats obtenus dépend directement de la précision des données d'entrées disponibles lors de l'étude.

Pour les phases préliminaires de nouvelles lignes, l'expérience montre qu'il est possible d'obtenir des résultats satisfaisants à partir des informations principales de l'opération.

Pour du diagnostic précis, il est par contre nécessaire d'avoir en entrée des données précises.

Les données d'entrées peuvent être classées en quatre catégories :

- le tracé : pk, courbes, déclivités, nombres de voies, positions des stations, positions des embranchements, etc.;
- le matériel roulant : accélération, décélération, masses, résistance à l'avancement, courbe effort/vitesse, tension maximale, tension minimale, courant maximal, etc.;
- les équipements de traction : sous-stations, LAC, feeders, etc.;
- les consignes d'exploitation : horaires et/ou intervalles, limitations de vitesse, etc.

1.2.3 Données de sortie

Les calculs réalisés par SIMALIM permettent d'obtenir en sortie les grandeurs mécaniques et électriques nécessaires au dimensionnement ou à l'expertise des réseaux :

- position des rames en fonction du temps;
- tension au pantographe des rames;
- courant appelé par les rames;
- puissances délivrées par les sous-stations.

1.3 APERÇU DE LA MODÉLISATION DU RÉSEAU

La figure suivante montre le synoptique schématique, la structure du réseau de traction simulé.

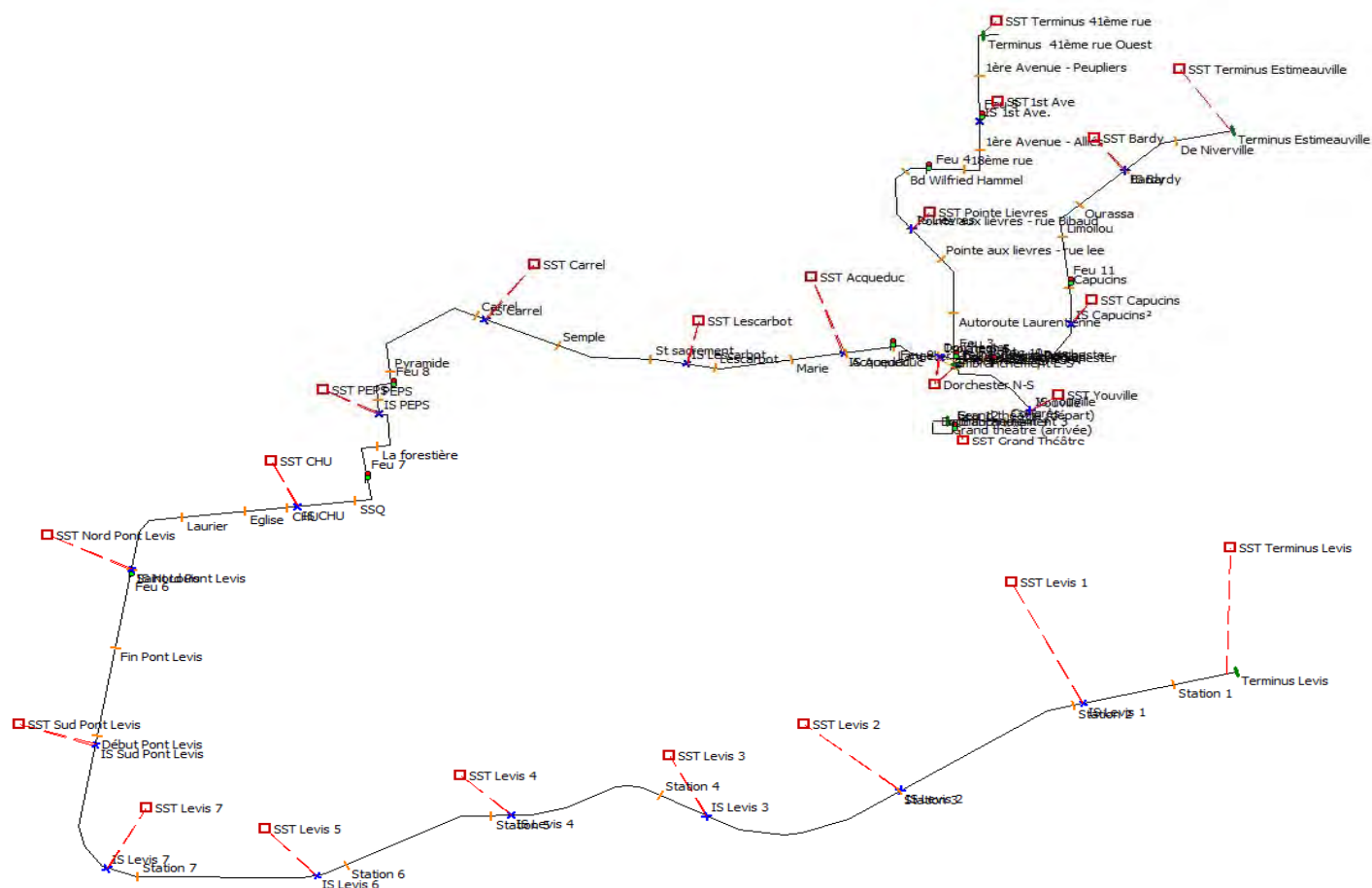


Figure 1 : Synoptique schématique réseau traction simulé

2 PRÉSENTATION DES RESULTATS

2.1 GRAPHIQUES DE CIRCULATION

Les graphiques de circulation des rames obtenus en horaire de pointe, sont représentés sur les figures ci-dessous.

Sur ces figures :

- l'axe des abscisses représente le temps;
- les positions des rames (pk) sont représentées en ordonnées.

Pour l'axe Nord-Sud, compte tenu de l'intervalle d'exploitation entre rames différents entre la branche Nord et la branche Sud, les simulations ont été effectuées en déclarant des circulations :

- Dorchester – Terminus Branche Sud;
- Dorchester – Terminus Branche Nord.

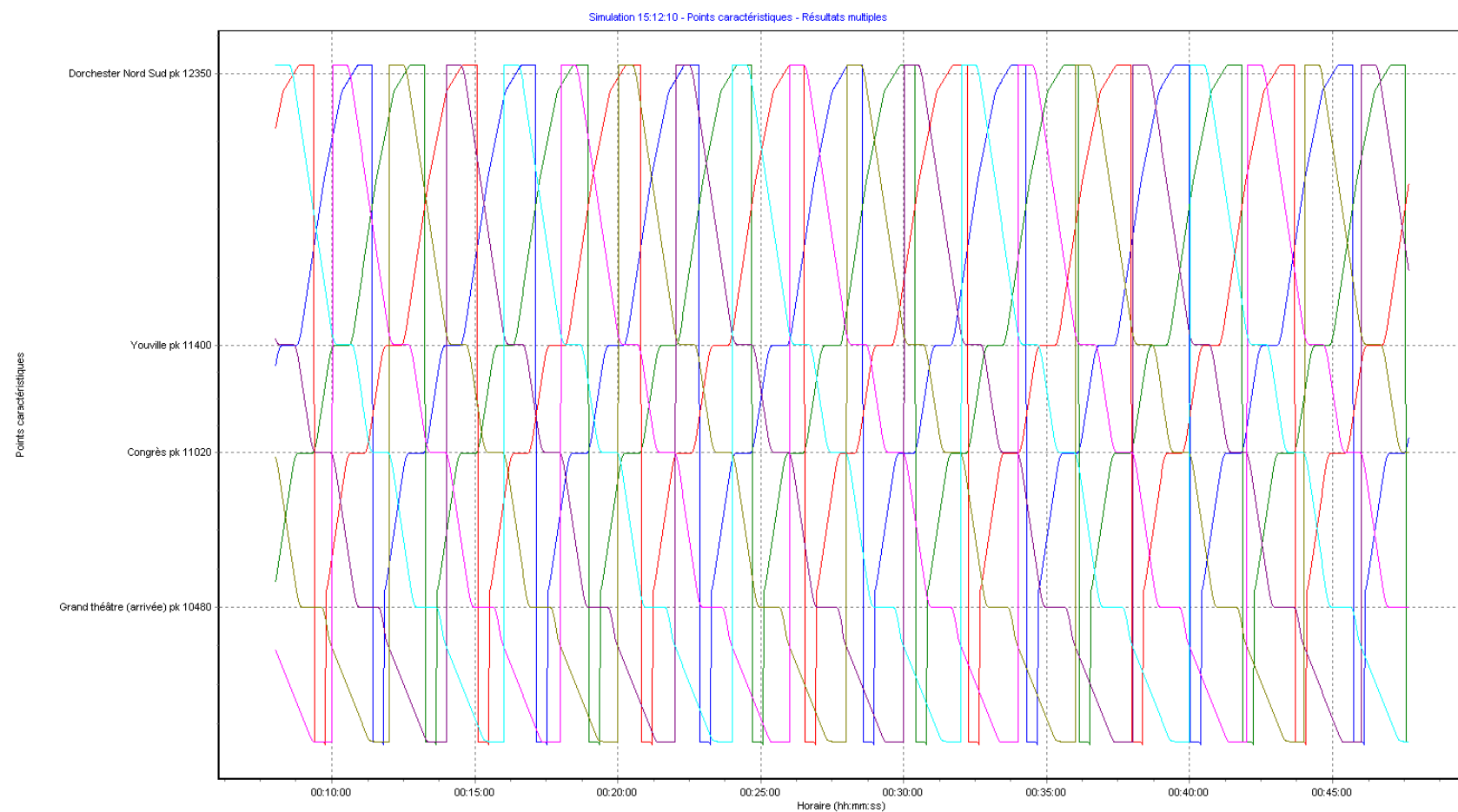


Figure 2 : Graphique de circulation sur la branche Sud

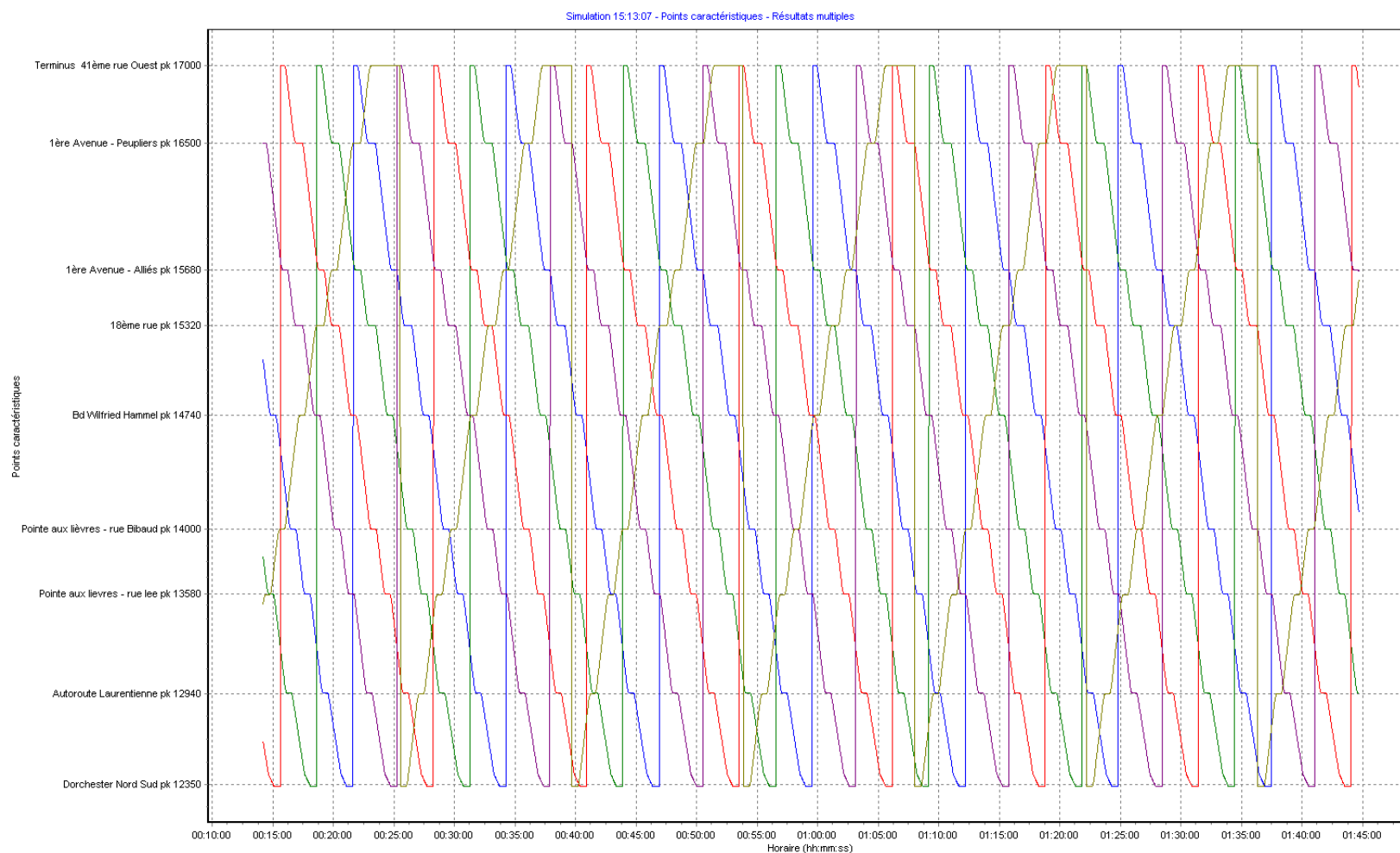


Figure 3 : Graphique de circulation sur la branche Nord

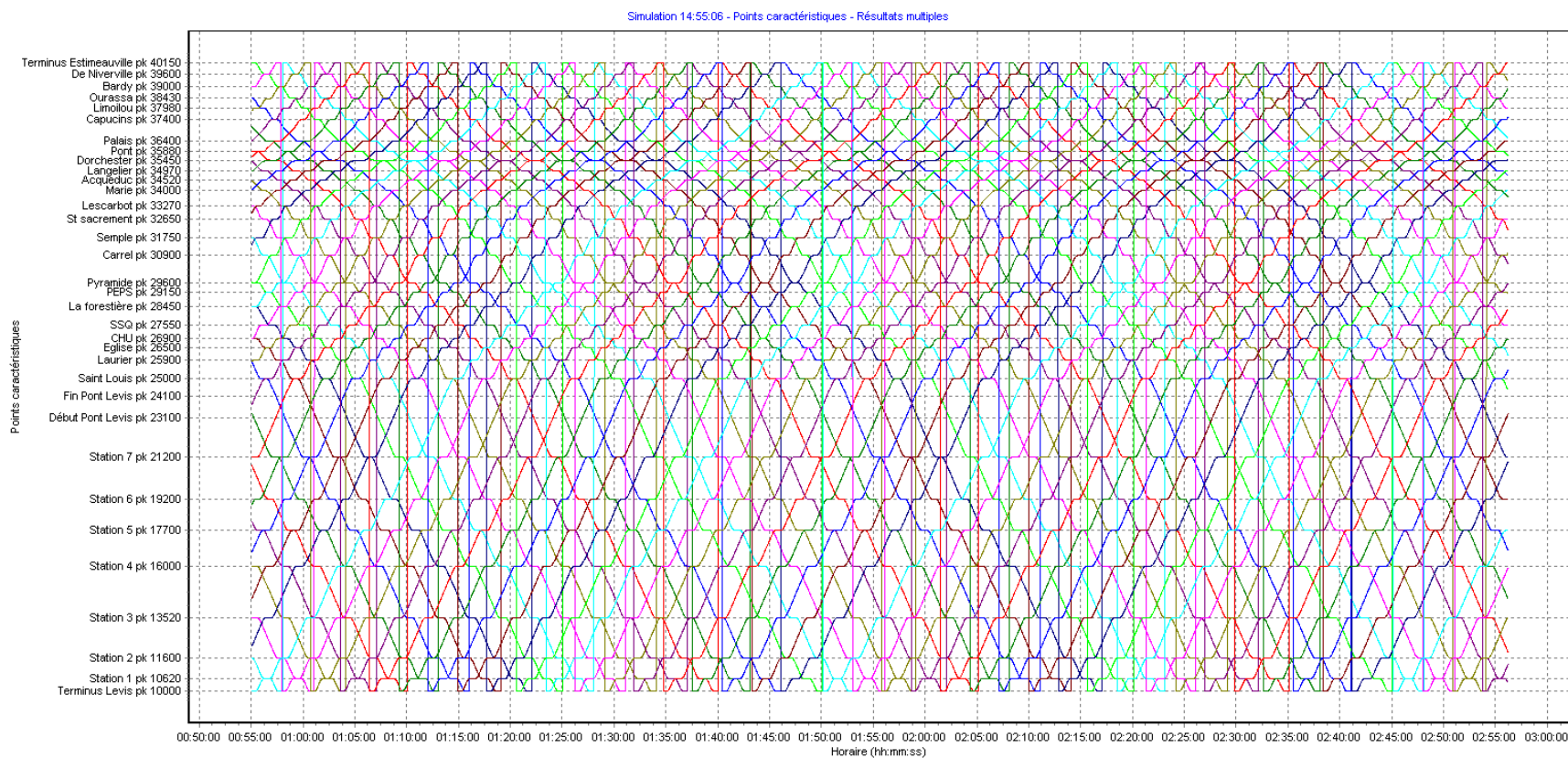


Figure 4 : Graphique de circulation sur l'axe Est-Ouest

Sur le dernier graphique correspondant à l'axe Est-Ouest, on observe des vitesses moyennes de circulation des rames sur la partie Lévis, puis une réduction significative de la vitesse moyenne en se rapprochant de Dorchester.

Le nombre de rames obtenu en circulation simultanée est de 53 avec la répartition suivante :

- branche Sud : 7 rames;
- branche Nord : 9 rames;
- axe Est-Ouest : 37 rames.

Nota 1 : Ce nombre de rames résulte des informations et hypothèses mentionnées dans la note des intrants. Des modifications de paramètres, notamment les temps d'arrêt en station augmenteront le nombre de rames nécessaires, le taux de priorité tramways aux intersections.

Nota 2 : Ces nombres de rames sont en circulations en simultanées, et ne prennent donc pas en compte les rames à l'arrêt :

- les rames en attentes/battement en terminus;
- les rames en réserves d'exploitation;
- les rames en entretien.

2.2 ENERGIE NÉCESSAIRE POUR LE MATÉRIEL ROULANT

Les graphiques suivants présentent l'énergie absorbée (en kWh) par une rame de 43 m de long, pour parcourir chaque interstation, en circulant en marche tendue, avec les équipements auxiliaires à pleine puissance. Cela correspond typiquement à la circulation d'une rame à la période de pointe en hiver avec le chauffage à pleine puissance.

Sur chaque graphique, les barres en bleu correspondent au sens de circulation aller, et les barres en rouge au sens de circulation retour.

Nota : les noms de station mentionnés correspondent aux noms provisoires utilisés au démarrage des études d'insertion. Ils seront mis à jour dans la version finale du présent document avec les noms retenus à l'issue des études d'insertion (livrable 1.2).

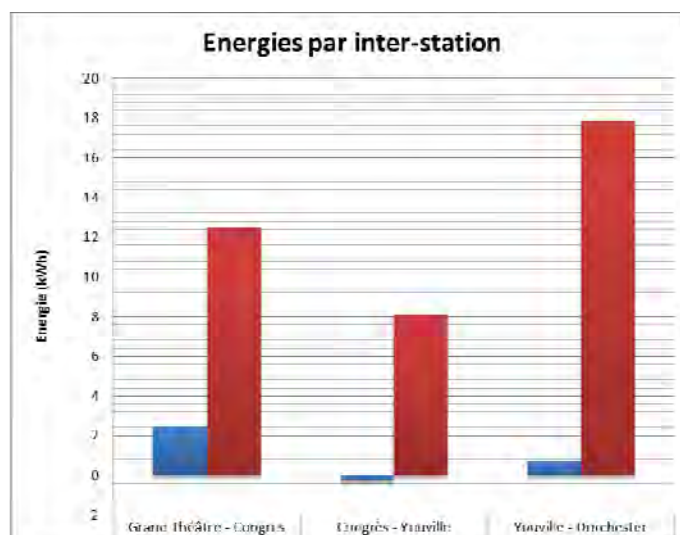


Figure 5 : Branche Sud

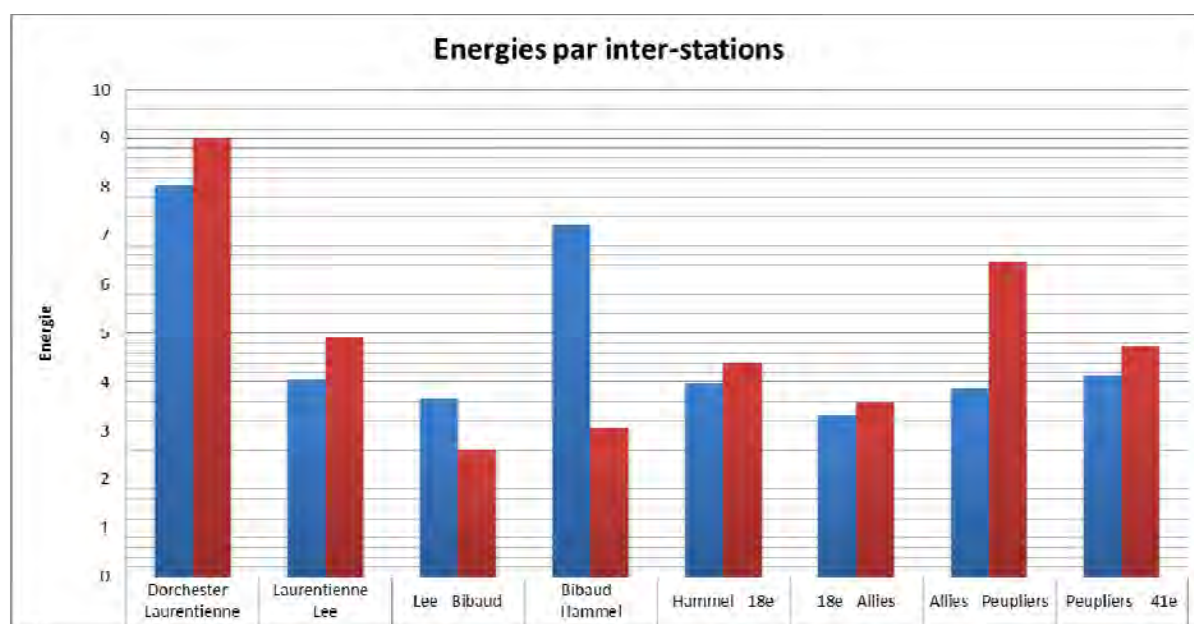


Figure 6 : Branche Nord

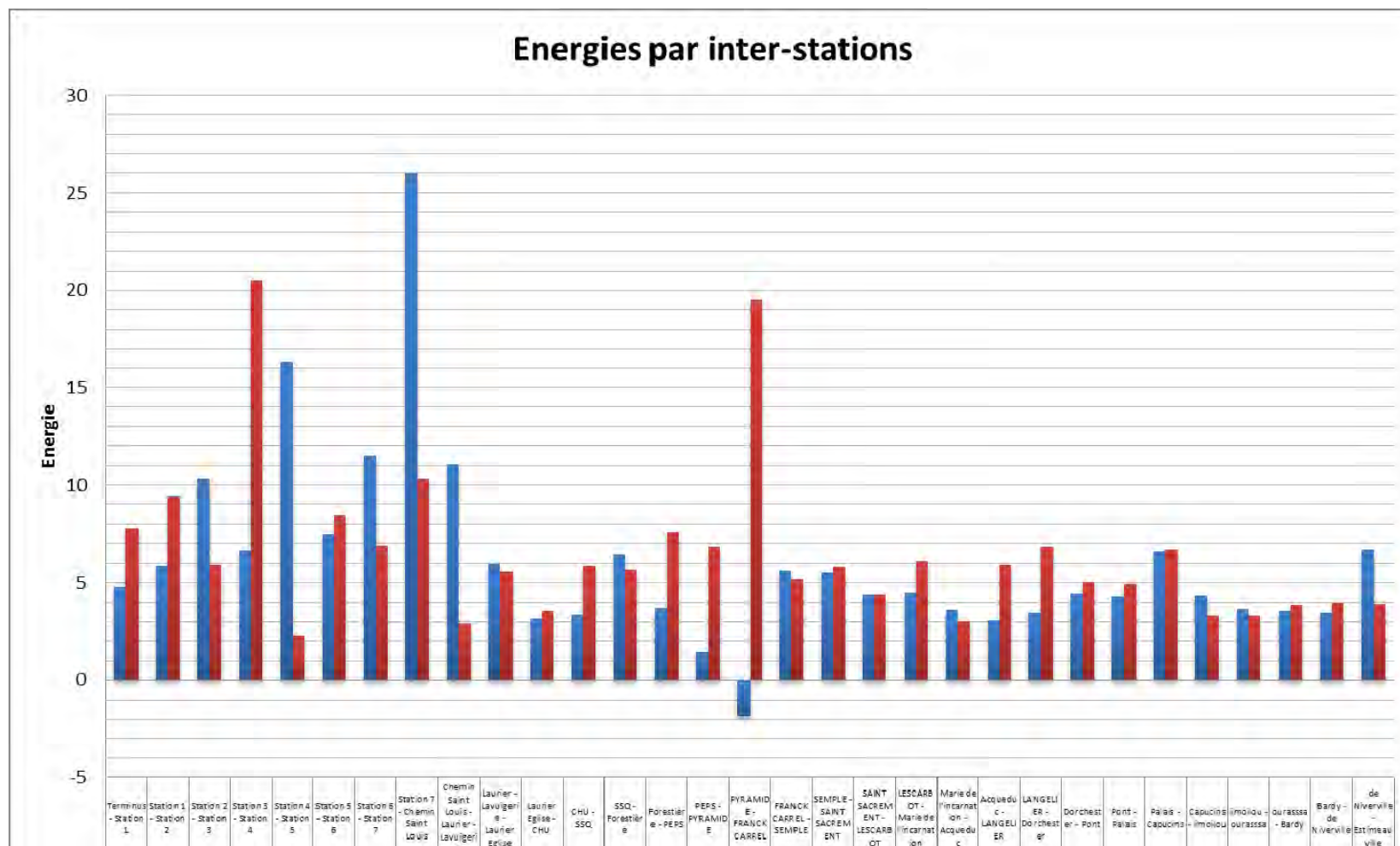


Figure 7 : Tracé OUEST - EST

Sur certaines interstations, l'énergie absorbée est très importante (> 10 kWh). Ceci est dû au cumul de plusieurs phénomènes :

- interstation avec une forte dénivellée, d'où un besoin en énergie de traction élevé;
- temps de parcours de l'interstation élevé d'où une part importante due à l'énergie absorbée par les auxiliaires de la rame (chauffage, etc.).

L'effet des pentes est également très visible par l'écart de l'énergie absorbée entre les 2 sens de circulation. La réinjection de l'énergie de freinage du matériel roulant sur la LAC aboutit sur quelques interstations dans le sens de circulation à la descente que l'énergie réinjectée (freinage) est supérieure à l'énergie absorbée (traction + auxiliaire).

Ces graphiques font apparaître également que la solution d'alimentation des rames de tramway par ligne aérienne de contact sur tout le linéaire est la plus adaptée à ce jour compte tenu des énergies nécessaires pour parcourir chaque interstation.

2.3 RÉSULTATS TRACTION LONG TERME EN MODE NOMINAL

La réinjection de l'énergie de freinage du matériel roulant a été désactivée pour cette étude de dimensionnement des sous-stations afin d'assurer la robustesse du réseau traction, même lors de l'inhibition de la réinjection. Une étude de l'influence de l'activation de la réinjection sur les courants moyens délivrés par les postes redresseurs est présentée dans un paragraphe spécifique de la présente note.

2.3.1 Chutes de tension et courants appelés par les rames

Tension sur le tracé Sud - Nord

La courbe suivante représente les tensions (axe des ordonnées) au pantographe des différentes rames en fonction de leur position sur la ligne (axe des abscisses).

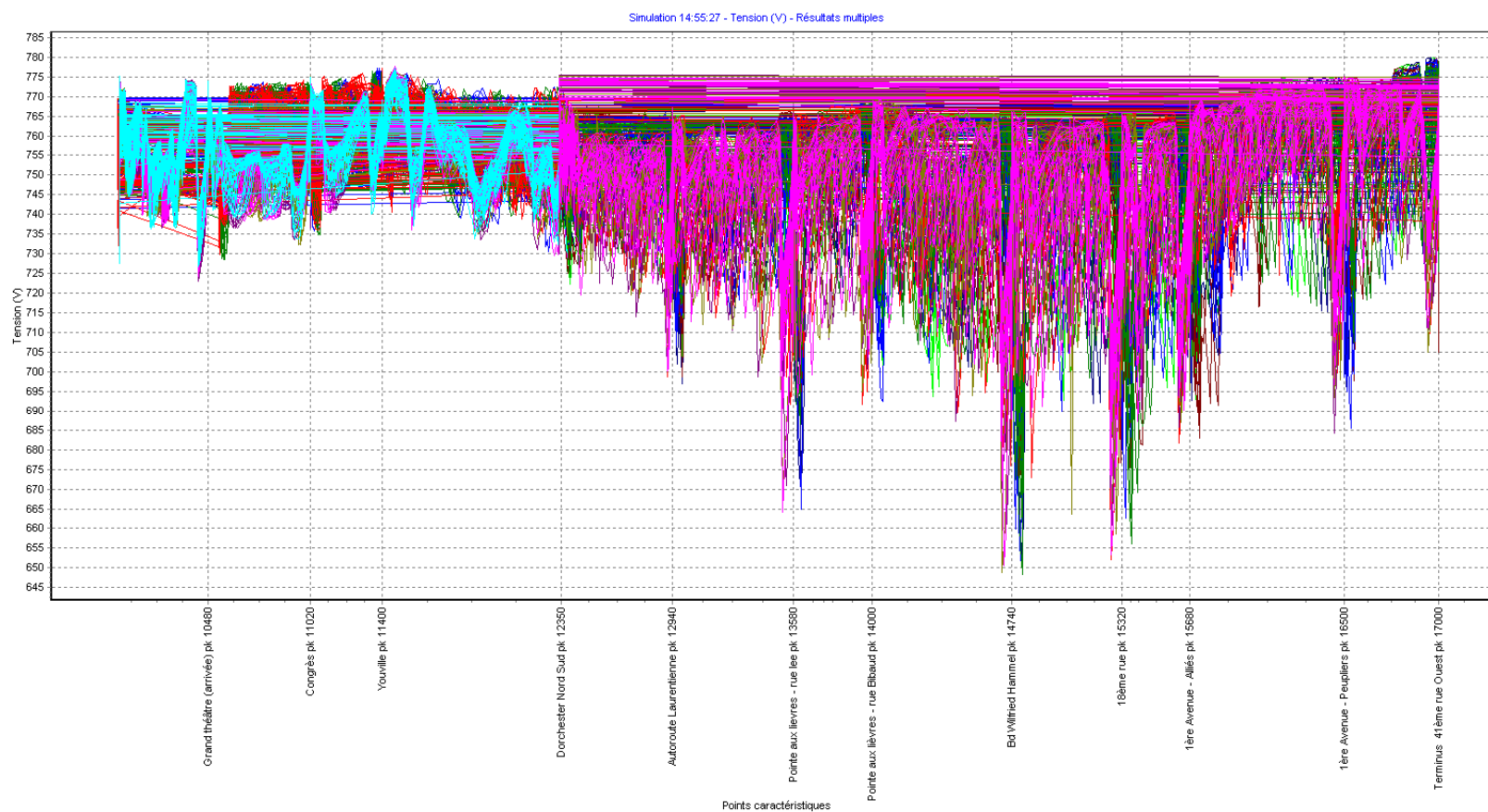


Figure 8 : Mode nominal - Tracé Sud/Nord – Tension rames 43 m

Sur la branche SUD, la tension au pantographe reste supérieure à 700V en tout point. Les bonnes performances électriques de la PAC (Profil aérien de contact) en tunnel expliquent les faibles chutes de tension obtenues, malgré l'appel de puissance très important des rames en traction à la montée.

Sur la branche NORD, les tensions les plus basses observées sont de l'ordre de 650V. Les chutes de tension les plus conséquentes sont localisées vers les stations Amphithéâtre, Eugène-Lamontagne et Lee, lors des démarrages des rames des stations.

Courants sur le tracé Sud - Nord

La courbe suivante représente le courant absorbé (axe des ordonnées) au pantographe d'une rame en fonction de sa position sur la ligne (axe des abscisses).

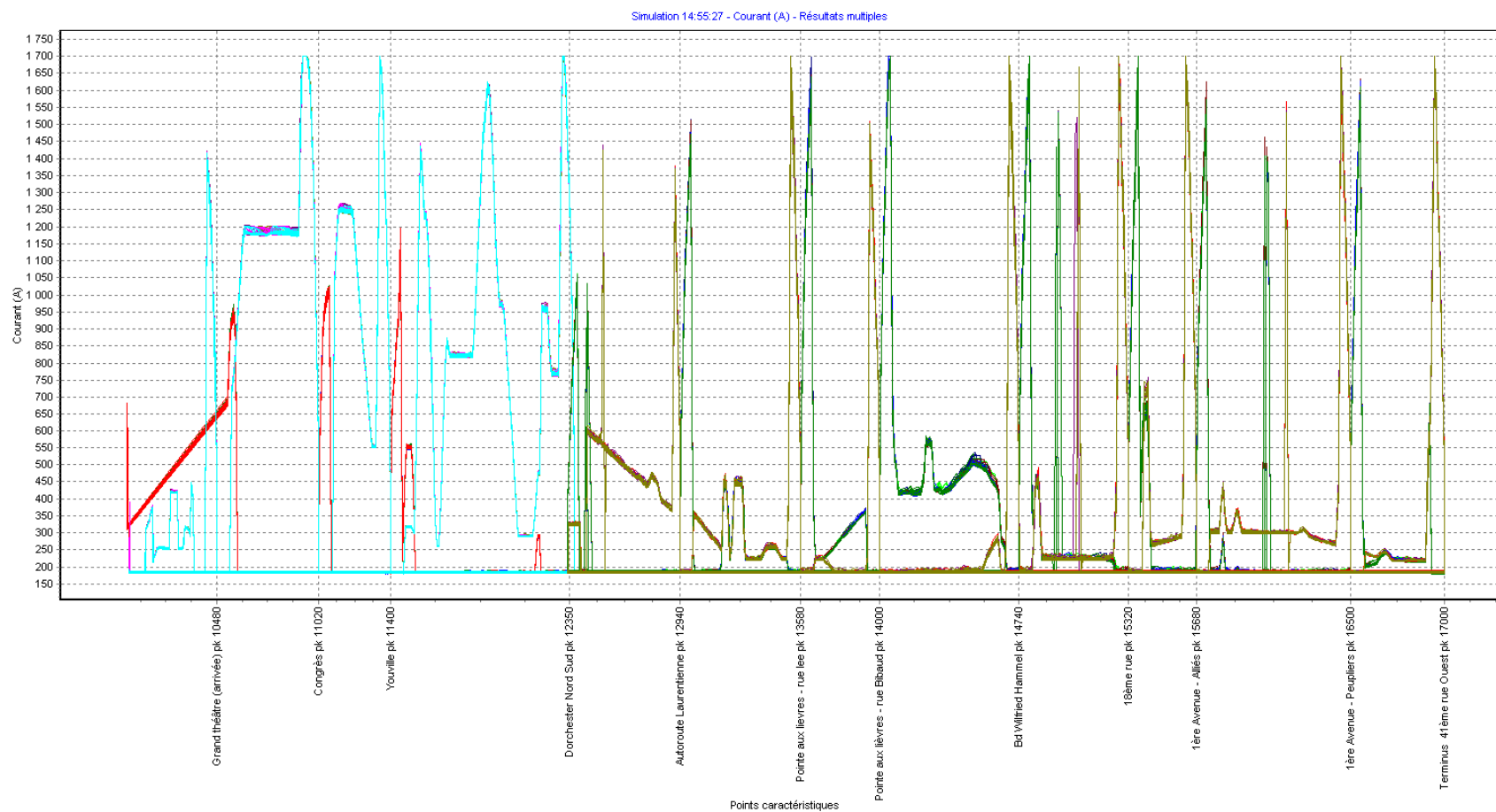


Figure 9 : Mode nominal - Tracé Sud/Nord – Courant d'une rame de 43 m

Le courant absorbé atteint plusieurs fois le courant maximal du matériel roulant. Au démarrage de la station Congrès en direction du Grand Théâtre, la rame est en limitation de courant maximal pendant une dizaine de 10 secondes.

Tracé OUEST - EST

Les courbes suivantes représentent respectivement les tensions (1^{re} courbe) et les courants (2^e courbe) au pantographe des différentes rames en fonction de leur position sur la ligne (axe des abscisses).

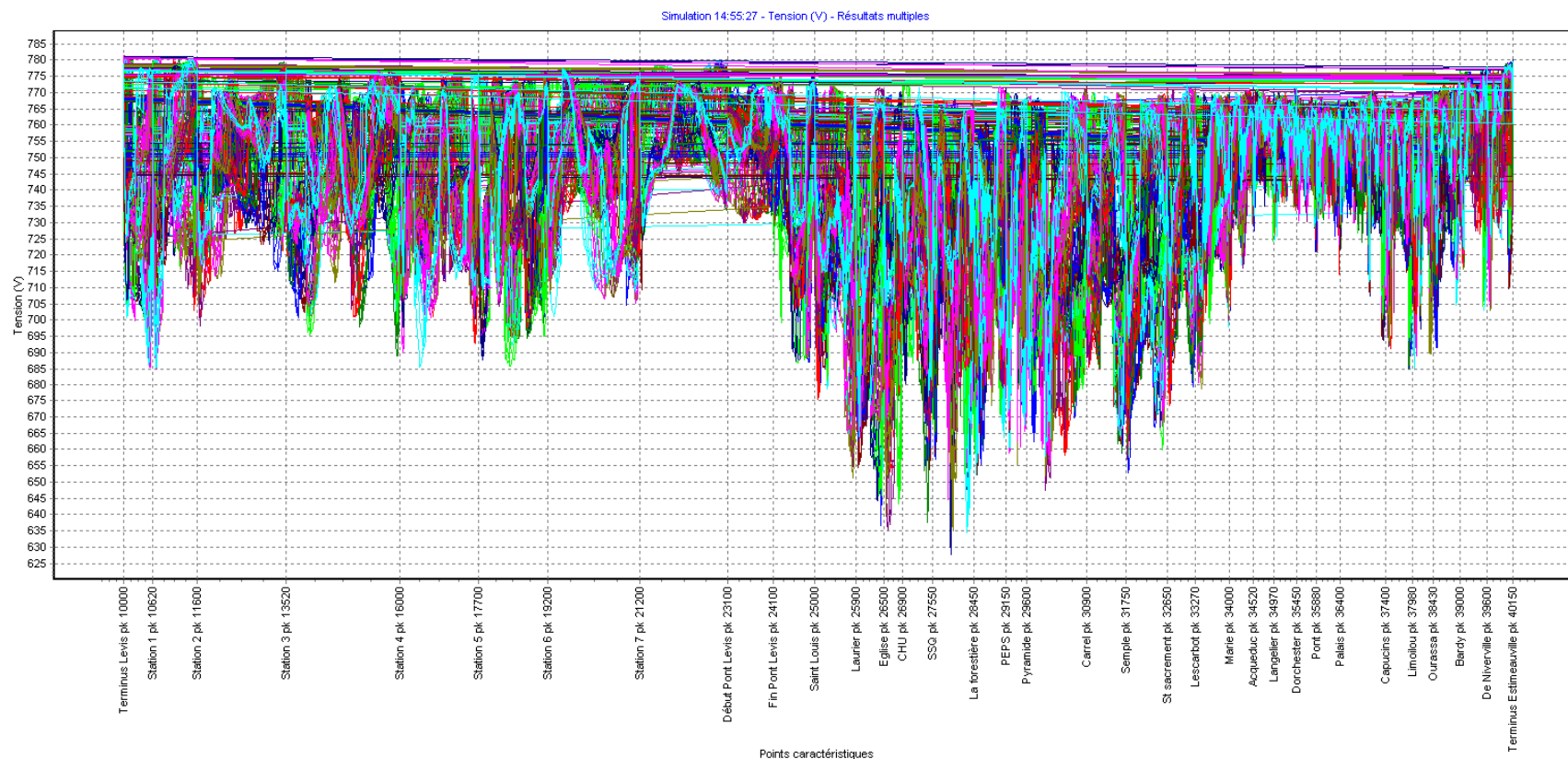


Figure 10 : Mode nominal - Tracé Ouest/Est – Tension rames 43 m

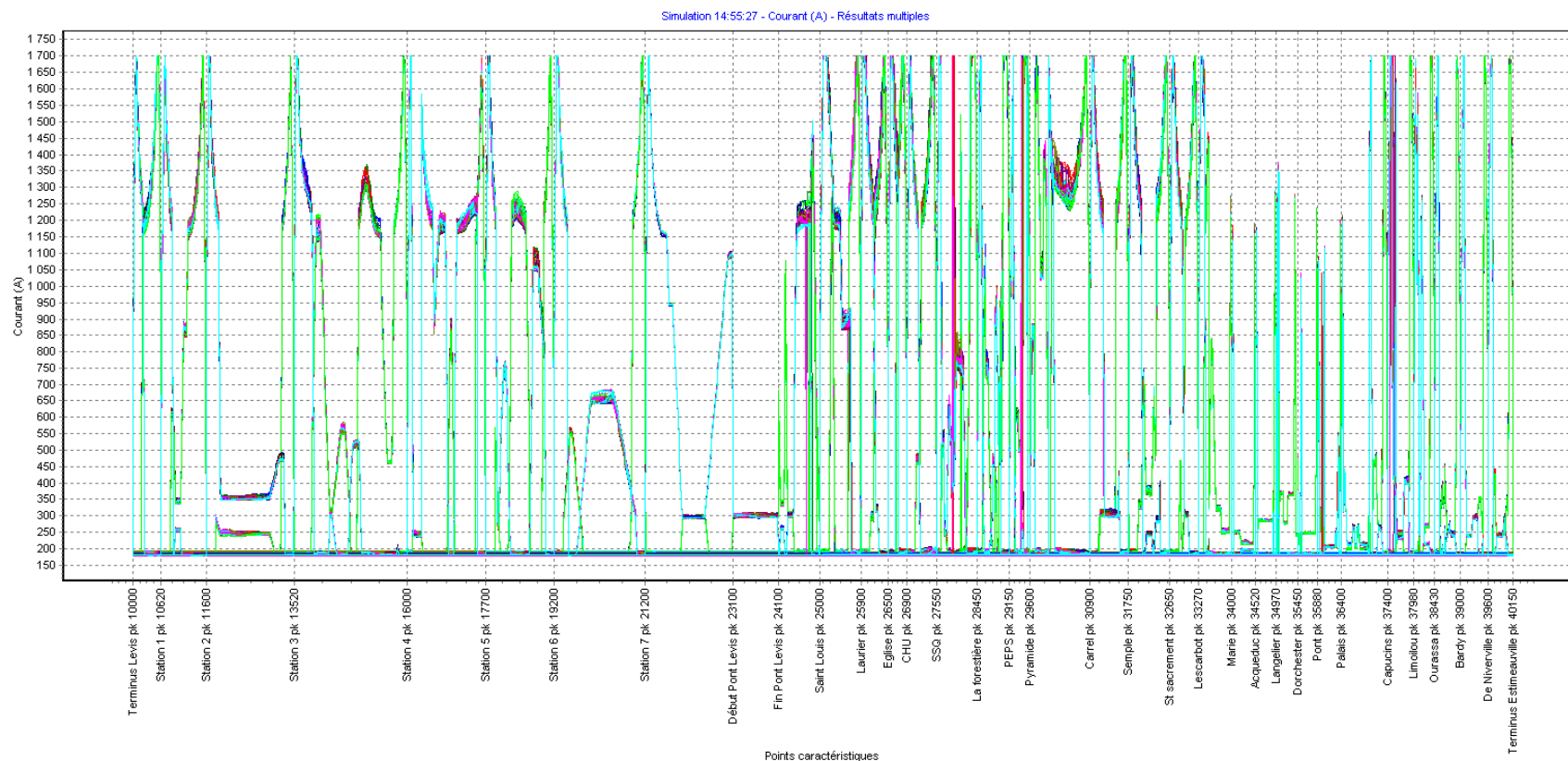


Figure 11 : Mode nominal - Tracé Ouest/Est – Courant d'une rame de 43 m

Sur la courbe des tensions, la valeur minimale reste au-dessus de 600V en tout point de la ligne. Les tensions les plus faibles sont observées dans le secteur allant de la station Laurier à la station La Forestière.

Sur la courbe de courant, le courant maximal est atteint de nombreuses fois sur toute la ligne.

2.3.2 Courants débités par les sous-stations

Le tableau suivant récapitule les courants débités par les sous-stations. Les colonnes correspondent aux valeurs moyennes calculées suivant plusieurs formules :

- 1^{re} colonne : moyenne simple (calcul linéaire);
- 2^e colonne : moyenne quadratique, reflétant l'échauffement longue durée;
- 3^e colonne : moyenne faite sur une période glissante de 1 minute, pour identifier les phénomènes de courte durée;
- 4^e colonne : moyenne faite sur une période glissante de 10 minutes, pour identifier les charges en moyenne tension.

Le code couleur est établi sur la base de sous-station avec un groupe redresseur de 900kW.

	Moyennes			
	Simple	Quad.	1mn	10mn
SST Terminus Estimeauville	500	600	800	600
SST Bardy	800	800	1000	800
SST Capucins	900	900	1000	900
SST Acqueduc	900	900	1000	900
SST Lescarbot	1000	1100	1300	1100
SST PEPS	1300	1400	1800	1400
SST Carrel	1200	1300	1700	1300
SST CHU	1300	1400	1600	1400
SST Nord Pont Levis	1100	1200	1400	1100
SST Sud Pont Levis	600	700	900	600
SST Levis 7	700	800	1000	700
SST Levis 5	800	900	1200	900
SST Levis 4	900	1000	1300	1000
SST Levis 3	800	900	1300	900
SST Levis 2	800	900	1200	900
SST Levis 1	800	800	1200	800
SST Terminus Levis	600	700	1000	700
SST Terminus 41 ^{ème} rue	500	600	800	600
SST 1 st Ave	700	800	900	700
SST Pointe Lievres	900	1000	1100	900
Dorchester N-S	1700	1700	2000	1800
SST Youville	1600	1600	1800	1600
SST Grand Théâtre	800	800	900	800
Légende :	1200	Supérieur à In		
	800	Supérieur à 2 / 3 In		
	400	Inférieur à In		

Figure 12 : Mode nominal – Courants sous-stations - Rames de 43 m

Il résulte de ces résultats que pour les sous-stations PEPS, Carrel, CHU, Dorchester et Youville, il sera nécessaire d'installer 2 groupes redresseurs dans chacune de ces sous stations.

Les graphiques suivants présentent l'allure du courant débité par une sous-station mono groupe et par une sous station bi-groupe en fonction du temps.

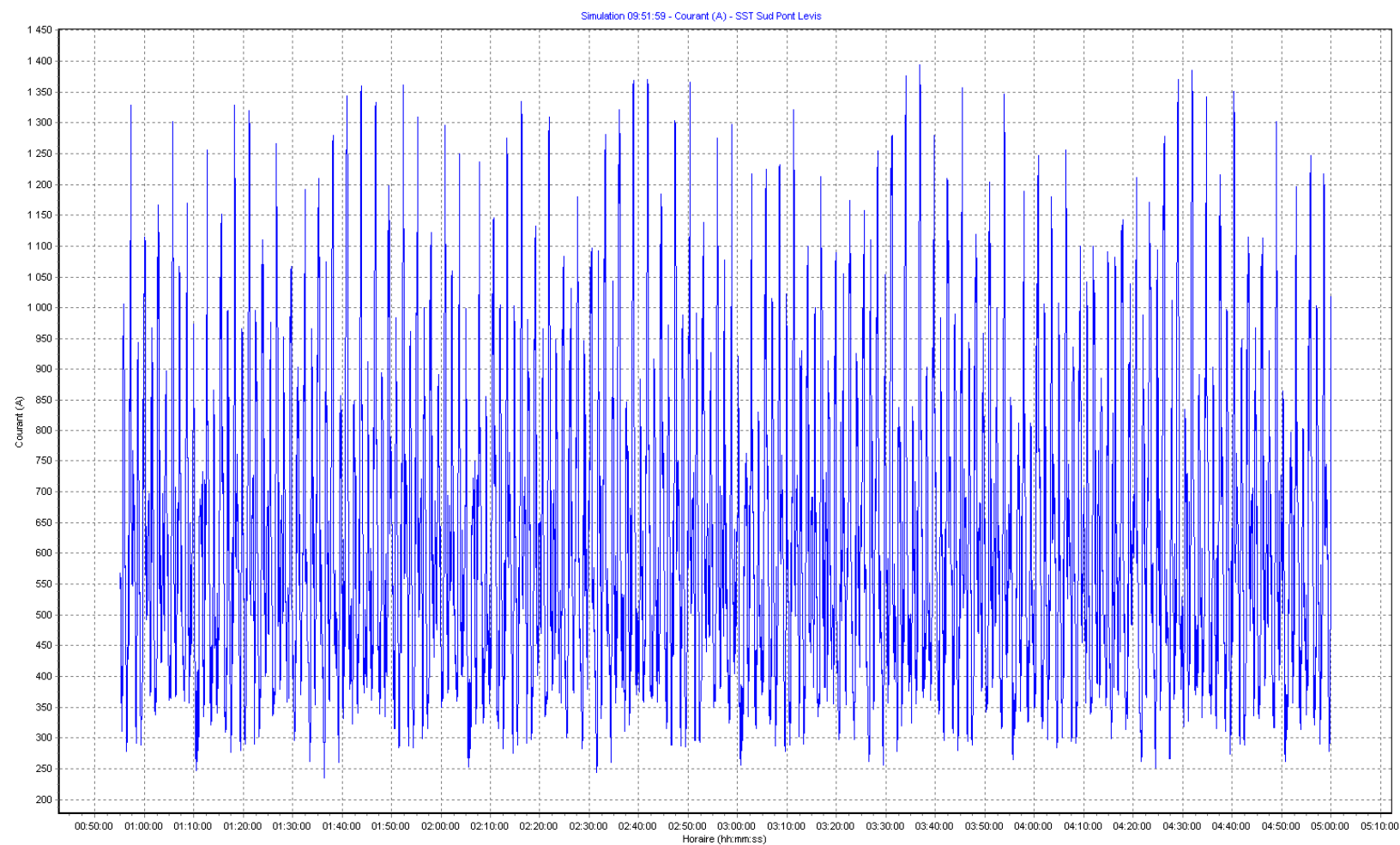


Figure 13 : Mode nominal – Courbe courant sous-station au Sud du Pont de Québec - Rames de 43 m

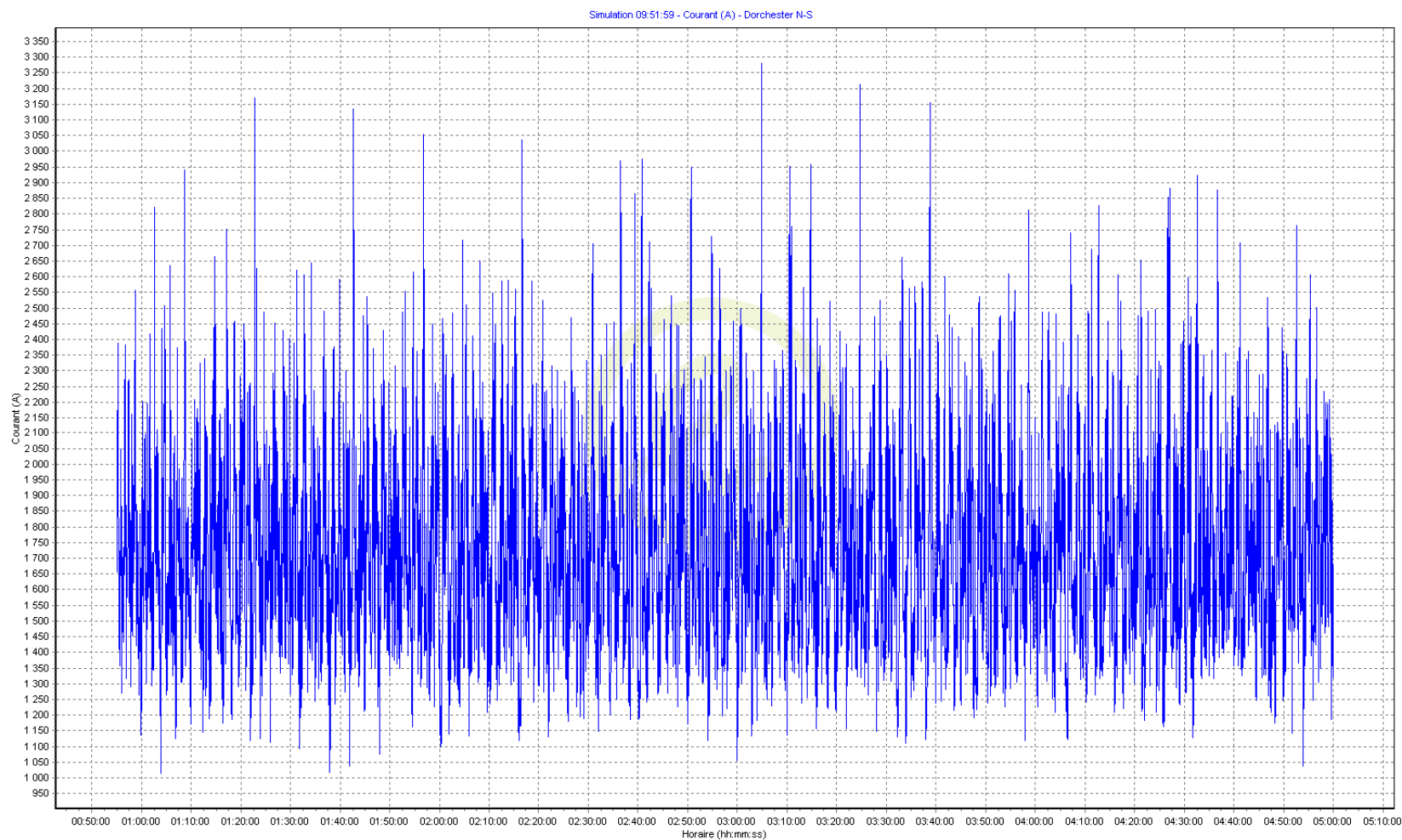


Figure 14 : Mode nominal – Courbe courant sous-station Dorchester - Rames de 43 m

2.4 INFLUENCE DU FREINAGE PAR RÉINJECTION SUR LA LAC

En activant sur le matériel roulant le freinage par réinjection sur la ligne aérienne de contact, on observe une nette réduction de la consommation des sous-stations. Ce phénomène est particulièrement intéressant dans les zones à fortes déclivités. En effet, l'activation de la réinjection permet à un matériel roulant de réinjecter une partie variable de sa puissance de freinage à des rames voisines en phase de traction, l'énergie est ainsi échangée entre les rames et ne sera pas consommée sur le réseau Moyenne Tension. Ce phénomène est très efficace en période de pointes avec un nombre élevé de rames en ligne.

En période de pointe, le gain le plus important est obtenu pour la sous-station Youville qui débite 30 % de moins depuis l'artère MT en activant la réinjection en ligne.

Le tableau suivant présente le gain obtenu pour chacune des sous-stations.

Sous-station	Gain (%kW)
SST Terminus Estimeauville	10%
SST Bardy	20%
SST Capucins	20%
SST Acqueduc	20%
SST Lescarbot	10%
SST PEPS	20%
SST Carrel	20%
SST CHU	20%
SST Nord Pont Levis	10%
SST Sud Pont Levis	20%
SST Levis 7	10%
SST Levis 5	20%
SST Levis 4	20%
SST Levis 3	20%
SST Levis 2	10%
SST Levis 1	10%
SST Terminus Levis	0%
SST Terminus 41ème rue	0%
SST 1st Ave	10%
SST Pointe Lievres	10%
Dorchester N-S	20%
SST Youville	30%
SST Grand Théâtre	20%

Figure 15 : Mode nominal - Gain par sous-station avec la réinjection MR - Rames de 43 m

2.5 RÉSULTATS TRACTION LONG TERME EN MODES DEGRADÉS

Les différents modes dégradés d'alimentation traction ont été simulés. Ceci permet d'observer les effets de ces modes dégradés.

Les modes dégradés simulés ont été faits avec glissement de sous-stations hors service respectant le principe de 3 sous-stations en service et 1 sous-station hors service. Dans la suite de ce paragraphe, les configurations simulées sont définies dans le tableau ci-dessous.

		Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Axe Est - Ouest	SST Terminus Estmeauville	1	0	1	1
	SST Bardy	1	1	0	1
	SST Capudns	1	1	1	0
	Dorchester N - S	0	1	1	1
	SST Aqueduc	1	0	1	1
	SST Lescarbot	1	1	0	1
	SST PEPS	1	1	1	0
	SST Carrel	0	1	1	1
	SST CHU	1	0	1	1
	SST Nord Pont Levis	1	1	0	1
	SST Sud Pont Levis	1	1	1	0
	SST Levis 7	0	1	1	1
	SST Levis 5	1	0	1	1
	SST Levis 4	1	1	0	1
	SST Levis 3	1	1	1	0
	SST Levis 2	0	1	1	1
	SST Levis 1	1	0	1	1
	SST Terminus Levis	1	1	0	1
Axe Nord - Sud	SST Terminus 41ème rue	1	1	0	1
	SST 1st Ave	1	0	1	1
	SST Pointe Lievres	1	1	1	0
	Dorchester N-S	0	1	1	1
	SST Youville	1	1	0	1
	SST Grand Théâtre	1	0	1	1

Figure 16 : Tableau de définition des modes dégradés simulés

2.5.1 Chutes de tension

En mode dégradé d'alimentation, les tensions minimales au pantographe des rames descendent à 500V sur le tracé OUEST-EST. Sur le tracé SUD-NORD, les tensions minimales restent à un niveau un peu plus haut, de l'ordre de 540V.

Les préconisations prises pour la constitution de la ligne aérienne de contact et pour les sections de feeder sont donc cohérentes.

Les localisations de ces tensions minimales sont fonctions des sous-stations hors service.

Les courbes suivantes présentent les graphiques des tensions au pantographe des rames dans différents modes dégradés :

- 1^{re} série pour le tracé OUEST-EST;
- 2^e série pour le tracé SUD-NORD.

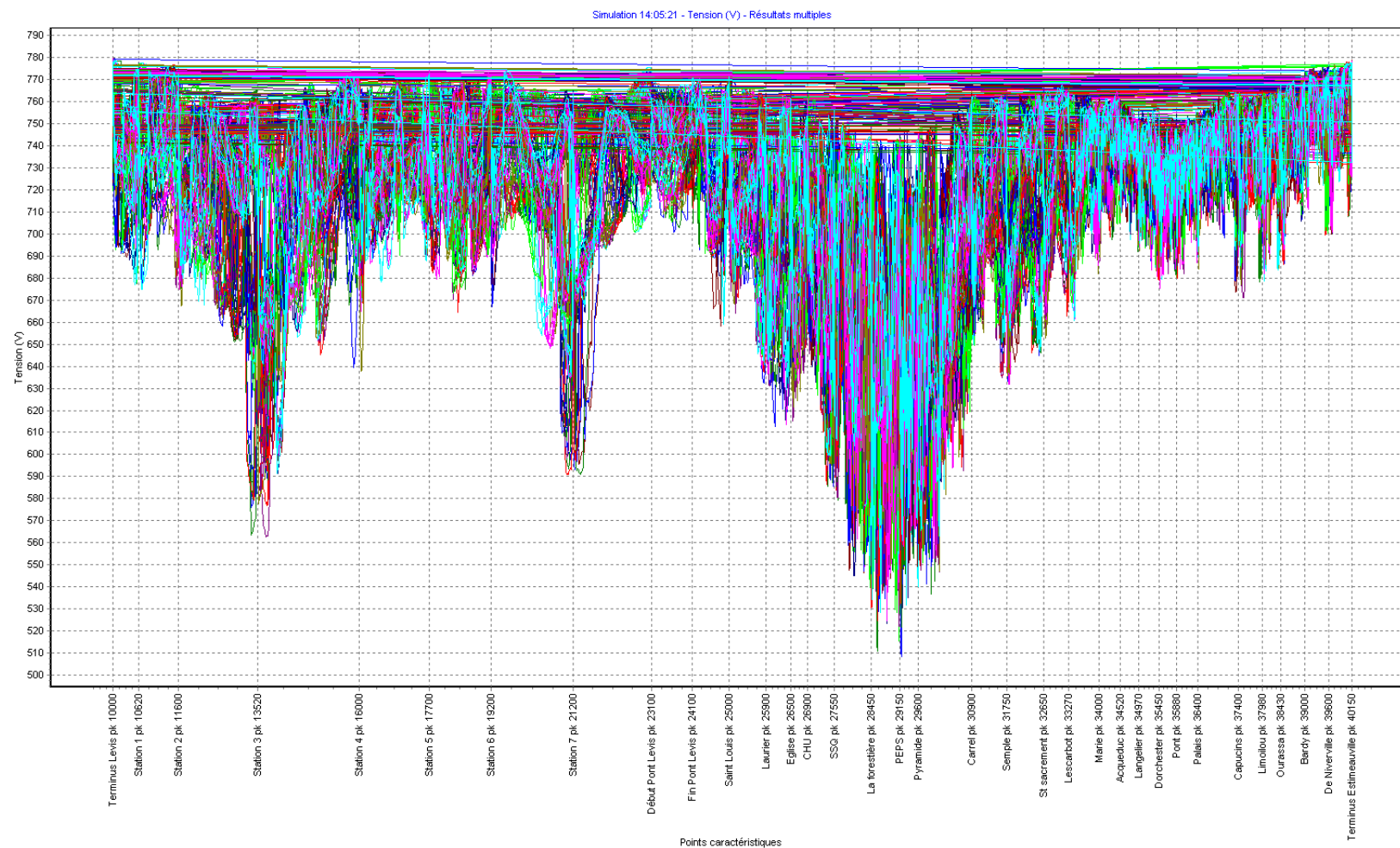


Figure 17 : Mode dégradé 1 – Tracé OUEST-EST – Tension pantographe avec rames 43 m

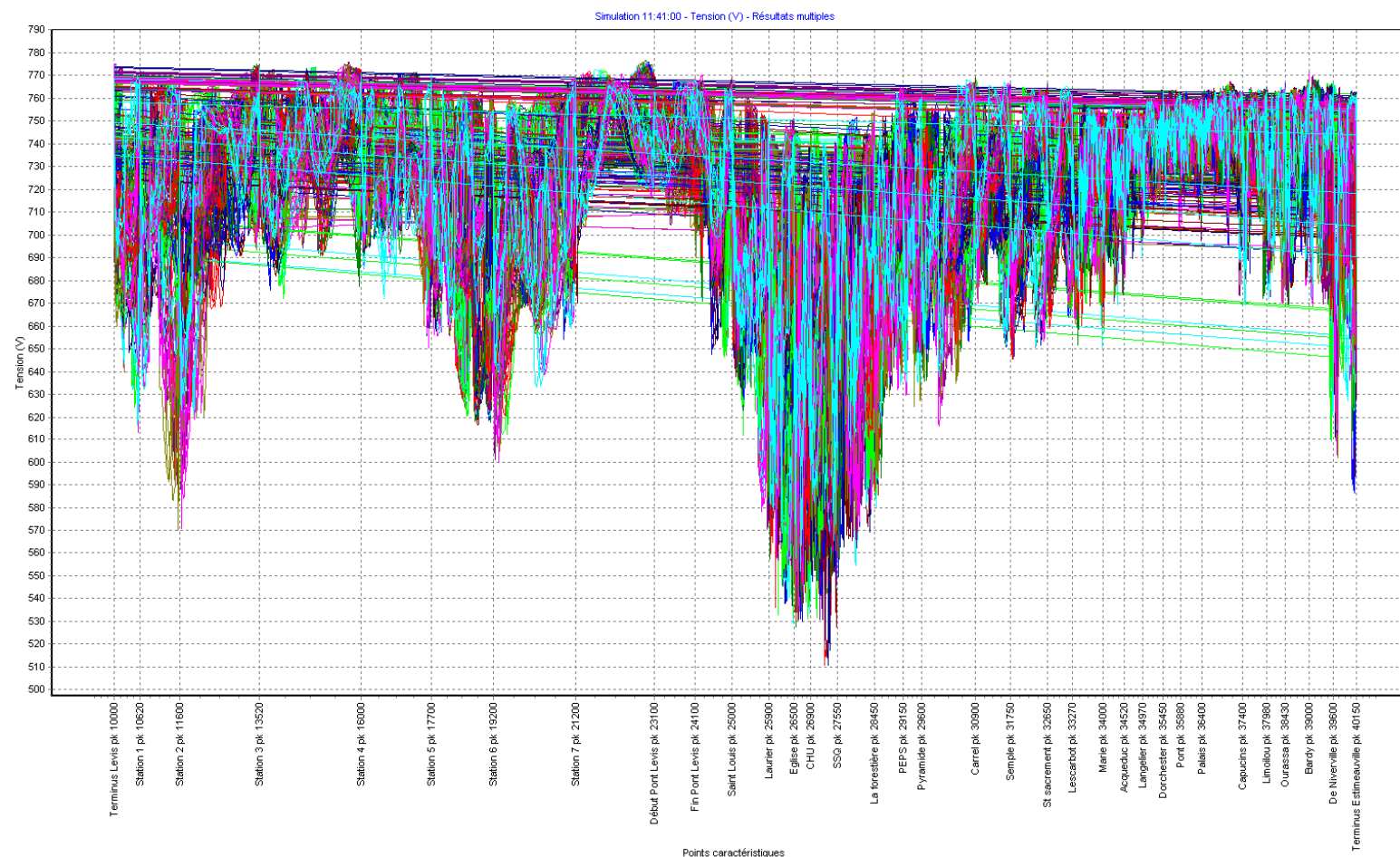


Figure 18 : Mode dégradé 2 – Tracé OUEST-EST – Tension pantographe avec rames 43 m

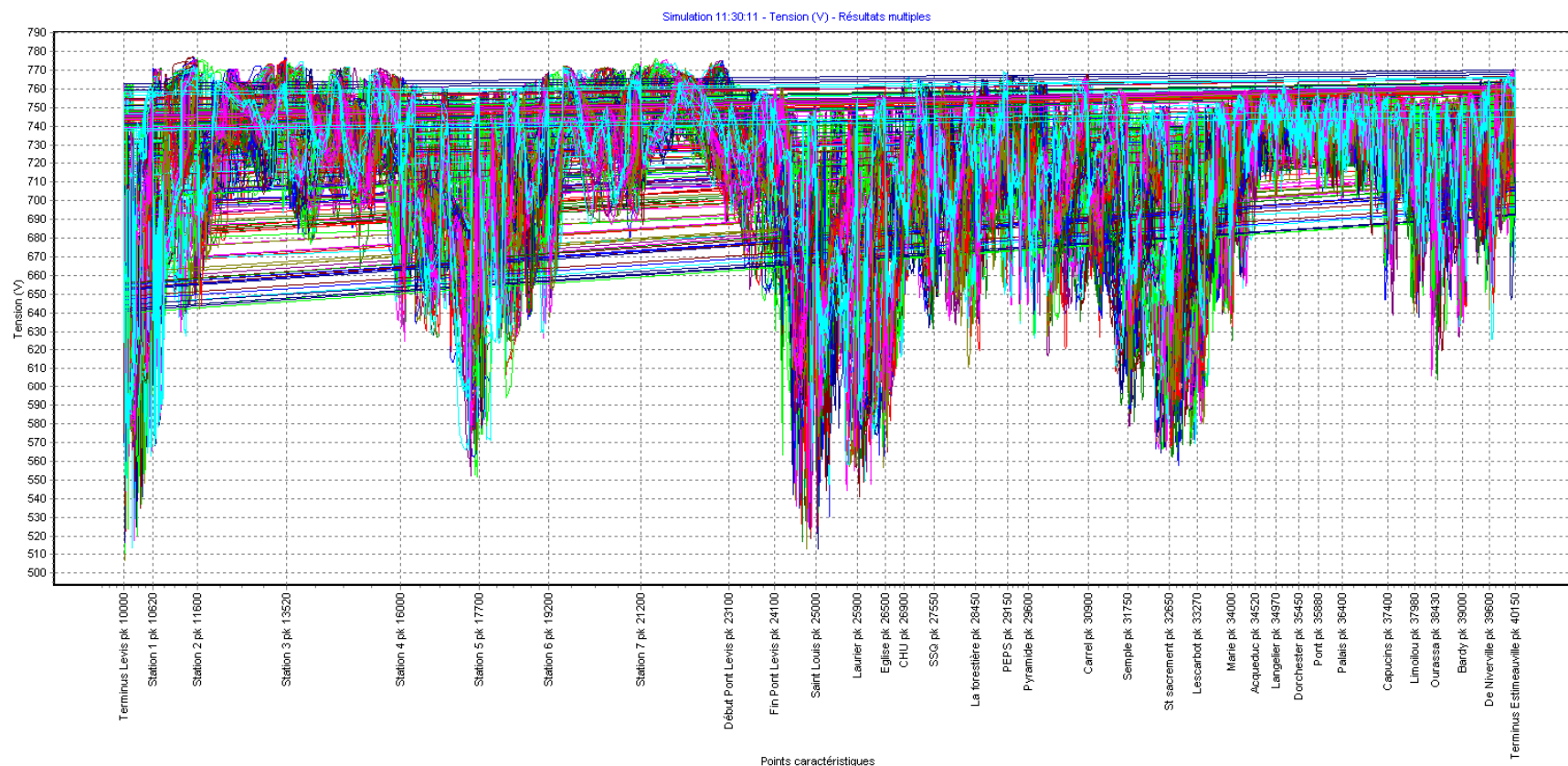


Figure 19 : Mode dégradé 3 – Tracé OUEST-EST – Tension pantographe avec rames 43 m

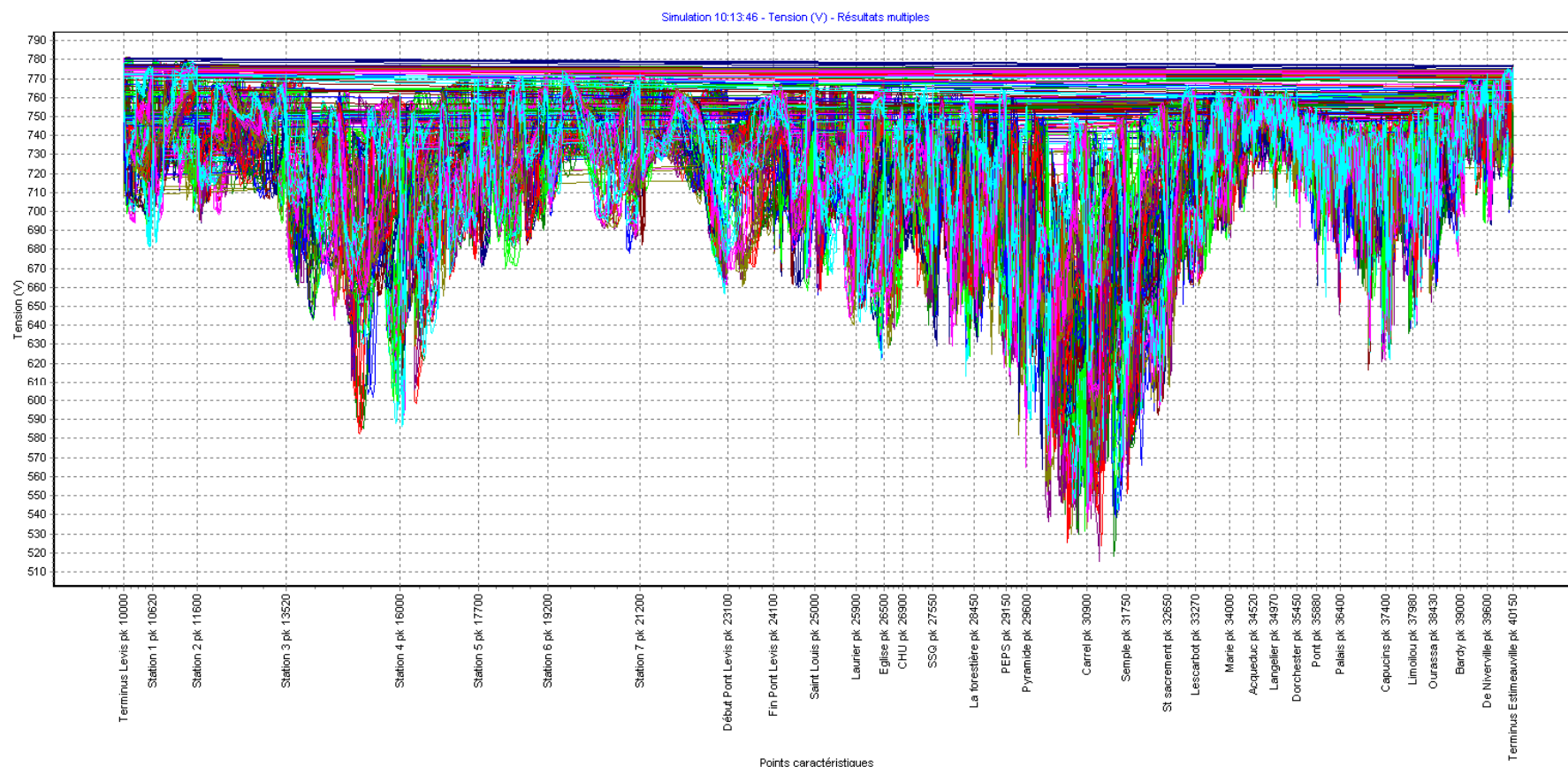


Figure 20 : Mode dégradé 4 – Tracé OUEST-EST – Tension pantographe avec rames 43 m

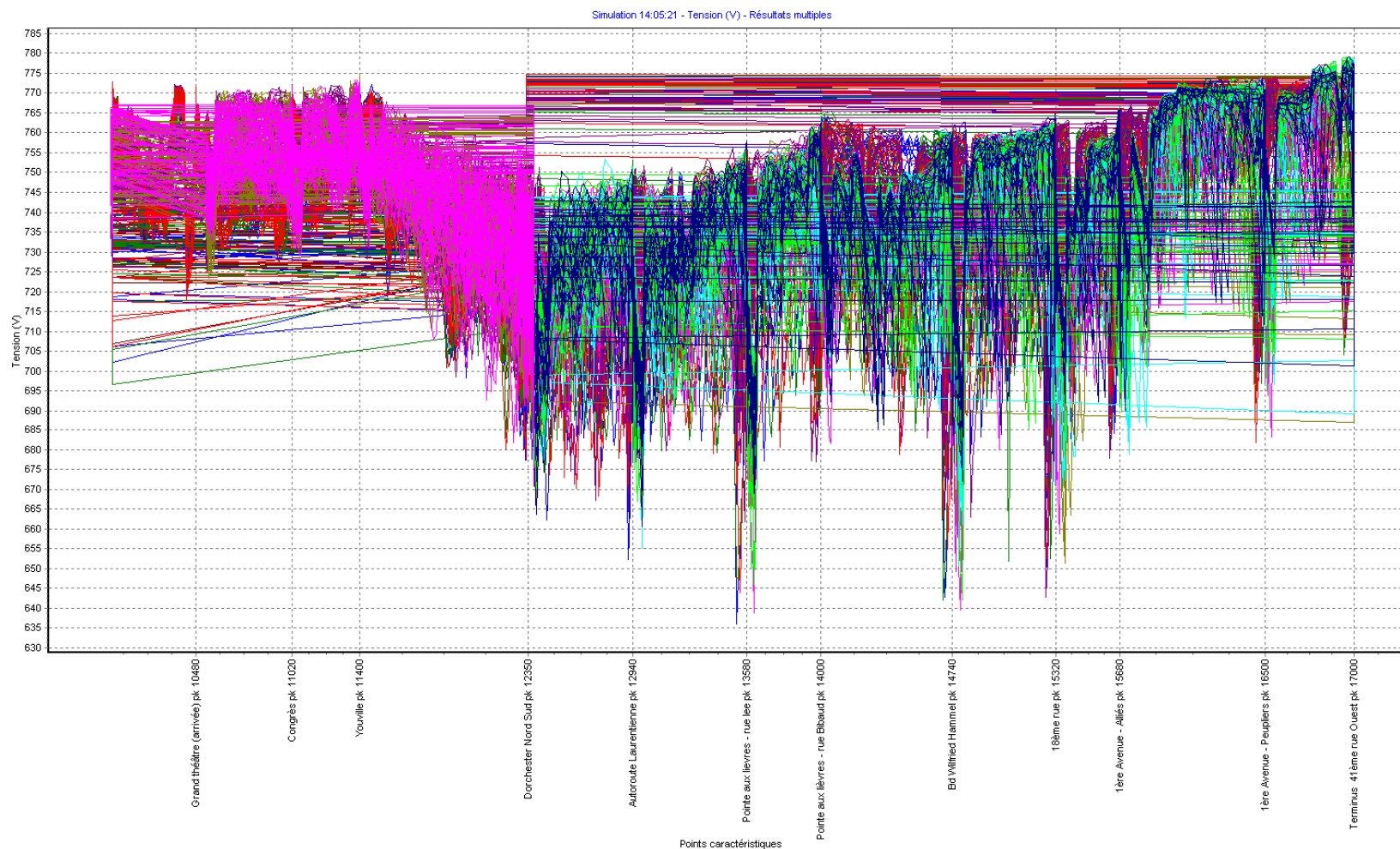


Figure 21 : Mode dégradé 1 – Tracé SUD-NORD – Tension pantographe avec rames 43 m

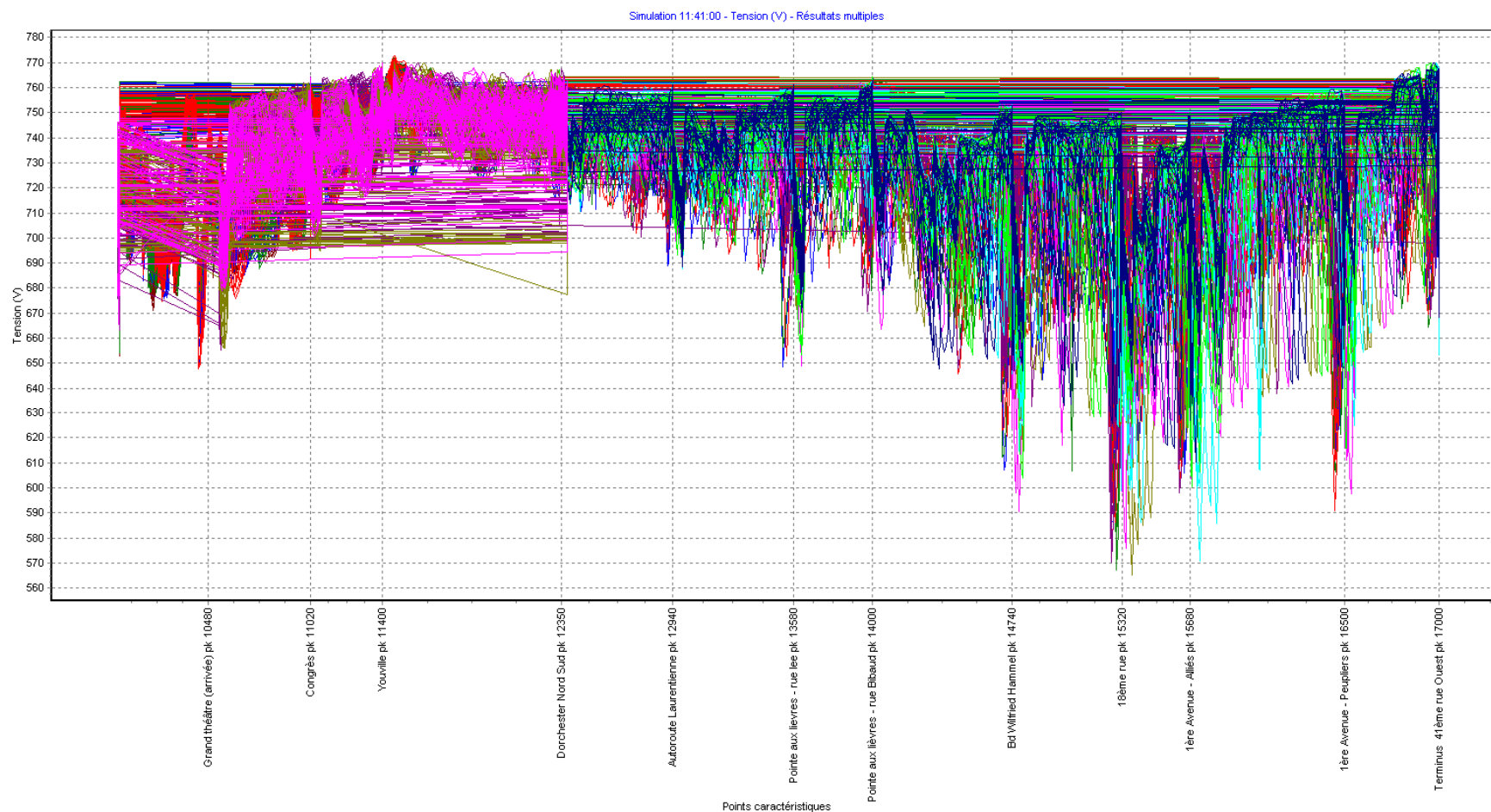


Figure 22 : Mode dégradé 2 – Tracé SUD-NORD – Tension pantographe avec rames 43 m

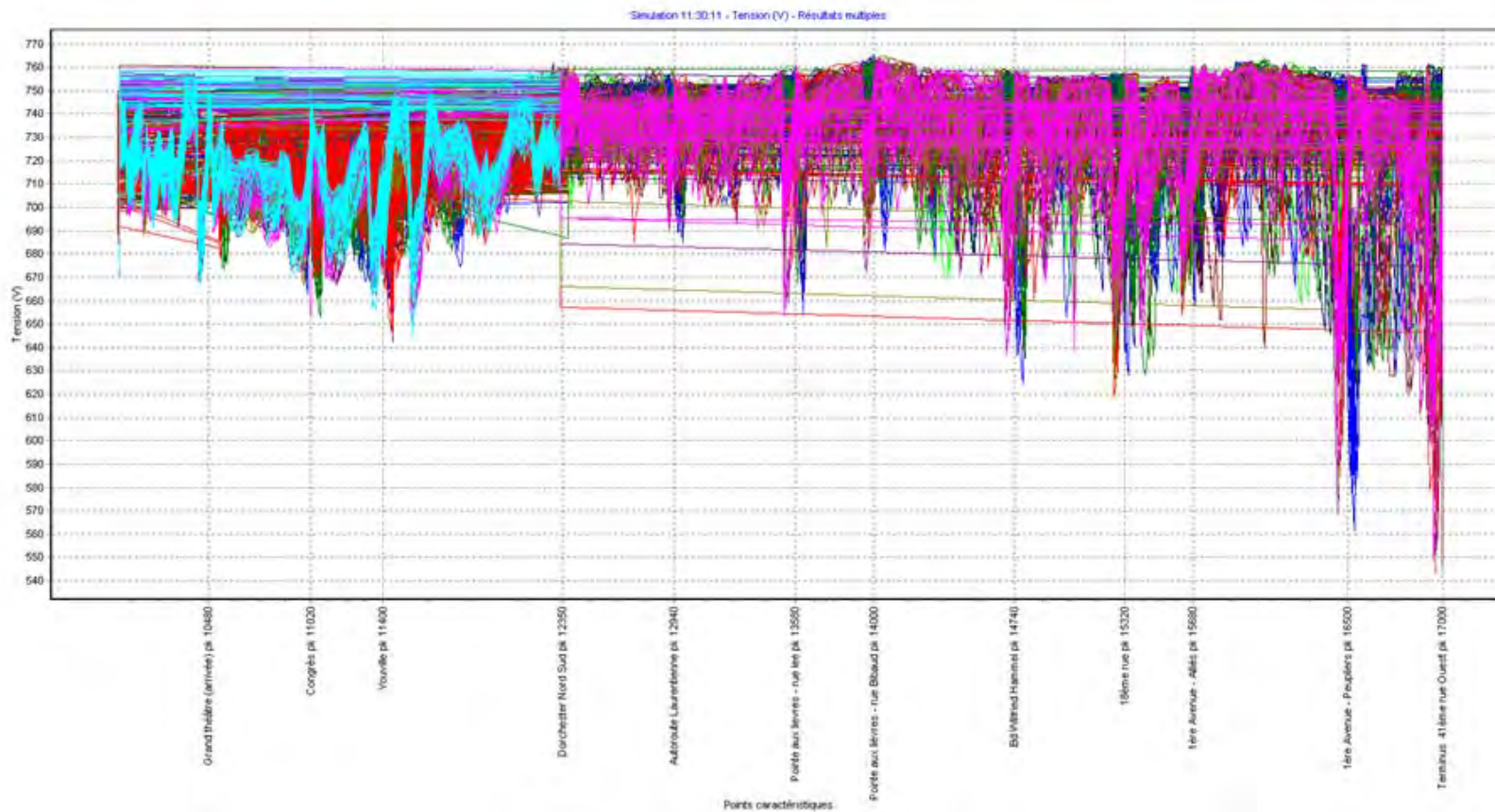


Figure 23 : Mode dégradé 3 – Tracé SUD-NORD – Tension pantographe avec rames 43 m

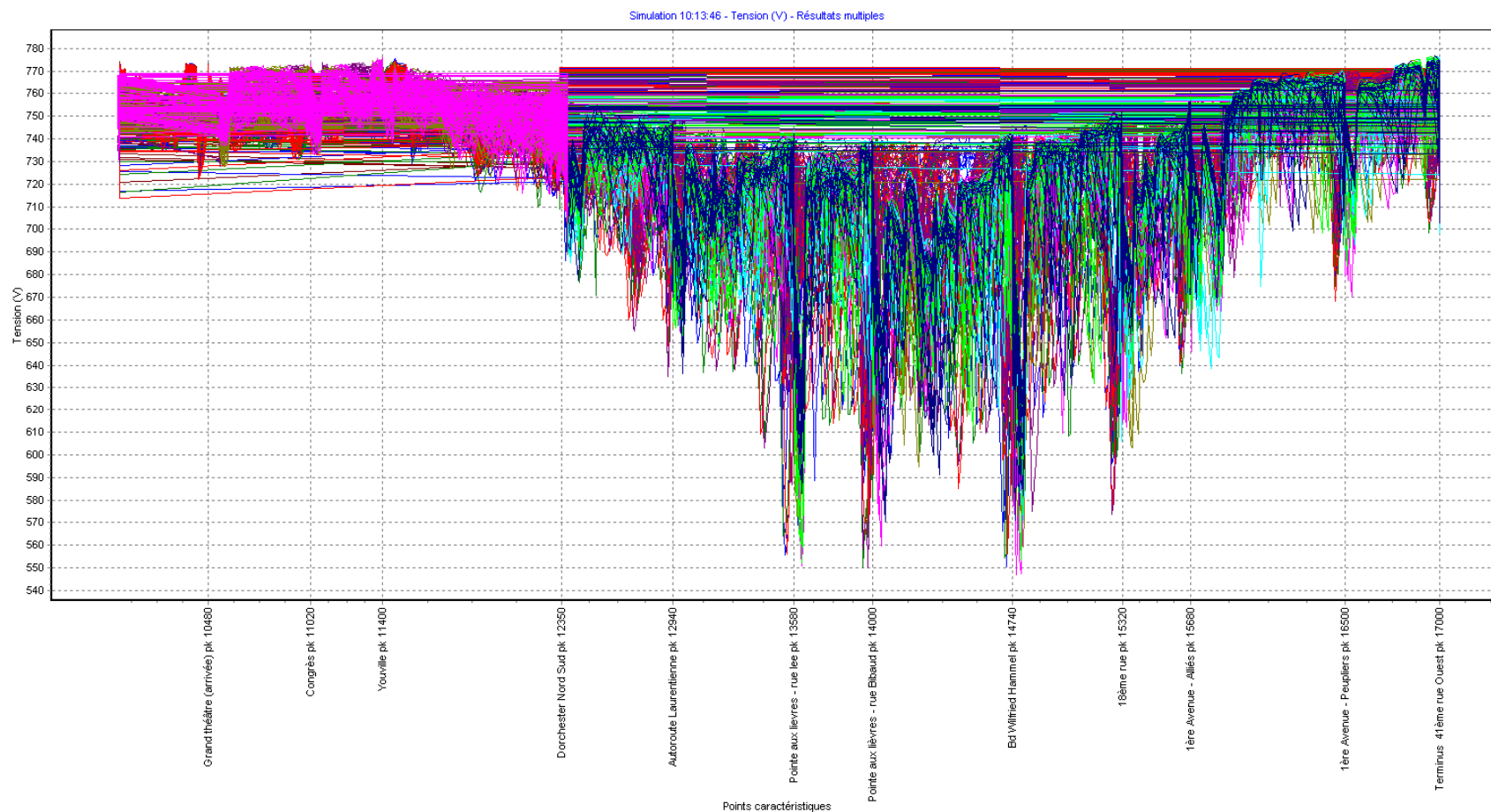


Figure 24 : Mode dégradé 4 – Tracé SUD-NORD – Tension pantographe avec rames 43 m

2.5.2 Courants des sous-stations

Les tableaux suivants présentent les résultats des courants débités par les sous-stations en fonction des différents modes dégradés simulés. Les cases vides correspondent à une sous-station hors service dans le mode dégradé considéré. La 1^{re} colonne est un rappel du mode nominal.

Les résultats sont exprimés en Ampères (A).

MOYENNES SIMPLES						
Sous-Station	Nominal	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	
SST Terminus Estimeauville	500	600	0	1000	700	
SST Bardy	800	900	1200		1100	
SST Capucins	900	1200	1100	1300		
SST Acqueduc	900	1300		1400	1100	
SST Lescarbot	1000	1300	1400		1600	
SST PEPS	1300		2000	1500	1900	
SST Carrel	1200	1900	1400	1700		
SST CHU	1300	2000		1900	1500	
SST Nord Pont Levis	1100	1300	1700		1300	
SST Sud Pont Levis	600	1000	900	1100		
SST Levis 7	700		1100	900	1000	
SST Levis 5	800	1100		1300	1000	
SST Levis 4	900	1100	1300		1300	
SST Levis 3	800	1200	1000	1300		
SST Levis 2	800		1100	1000	1200	
SST Levis 1	800	1100		1300	800	
SST Terminus Levis	600	800	1100		700	
SST Terminus 41 ^{ème} rue	500	600	1000		700	
SST 1 st Ave	700	800		1200	1100	
SST Pointe Lievres	900	1200	1200	1100		
Dorchester N-S	1700		2300	2600	2500	
SST Youville	1600	2000	2400		1700	
SST Grand Théâtre	800	800		1600	800	

Figure 25 : Modes dégradés – Courants moyenne simple sous-stations avec rames 43 m

MOYENNES QUADRATIQUES					
Sous-Station	Nominal	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
SST Terminus Estimeauville	600	600		1100	700
SST Bardy	800	900	1300		1200
SST Capucins	900	1200	1100	1300	
SST Aqueduc	900	1300		1500	1200
SST Lescarbot	1100	1400	1400		1700
SST PEPS	1400		2100	1600	2000
SST Carrel	1300	2000	1500	1800	
SST CHU	1400	2100		2000	1600
SST Nord Pont Levis	1200	1400	1800		1400
SST Sud Pont Levis	700	1000	900	1200	
SST Levis 7	800		1200	1000	1100
SST Levis 5	900	1200		1400	1100
SST Levis 4	1000	1100	1400		1400
SST Levis 3	900	1300	1100	1400	
SST Levis 2	900		1200	1100	1300
SST Levis 1	800	1200		1500	900
SST Terminus Levis	700	900	1200		800
SST Terminus 41^{ème} rue	600	600	1100		700
SST 1 st Ave	800	800		1300	1100
SST Pointe Leves	1000	1200	1300	1200	
Dorchester N-S	1700		2300	2600	2500
SST Youville	1600	2100	2400		1800
SST Grand Théâtre	800	900		1600	800

Figure 26 : Modes dégradés – Courants moyenne quadratique sous-stations avec rames 43 m

Les courants obtenus sur quelques sous-stations sont très importants. Les résultats obtenus conduisent à préconiser des alimentations MT fiabilisées pour les sous-stations bi-groupe.

Les courbes suivantes présentent les courbes de courants en fonction du temps pour 2 sous-stations (les mêmes SST que pour le mode nominal).

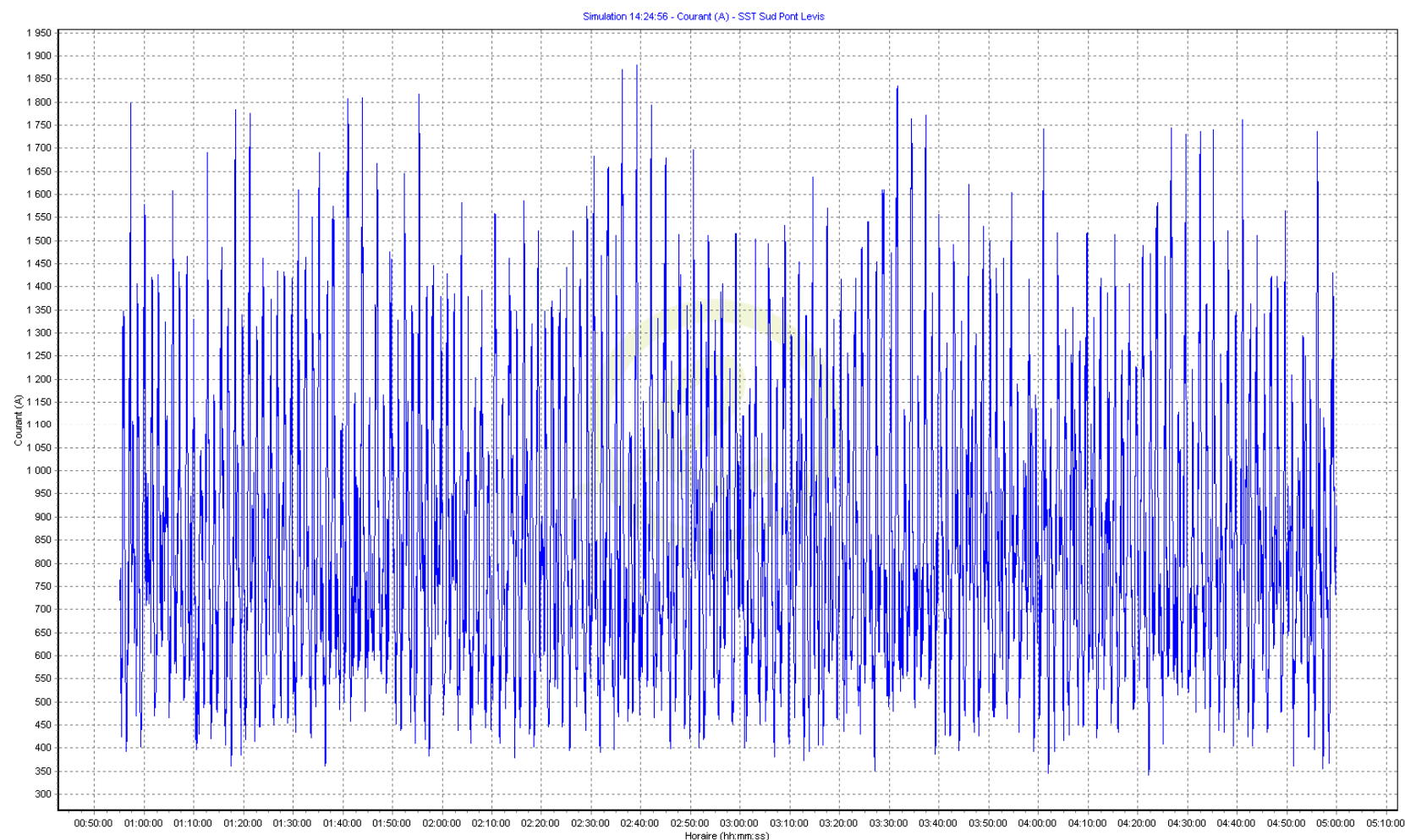


Figure 27 : Mode dégradé 2 – Courant sous-station SUD du Pont de Québec avec rames 43 m

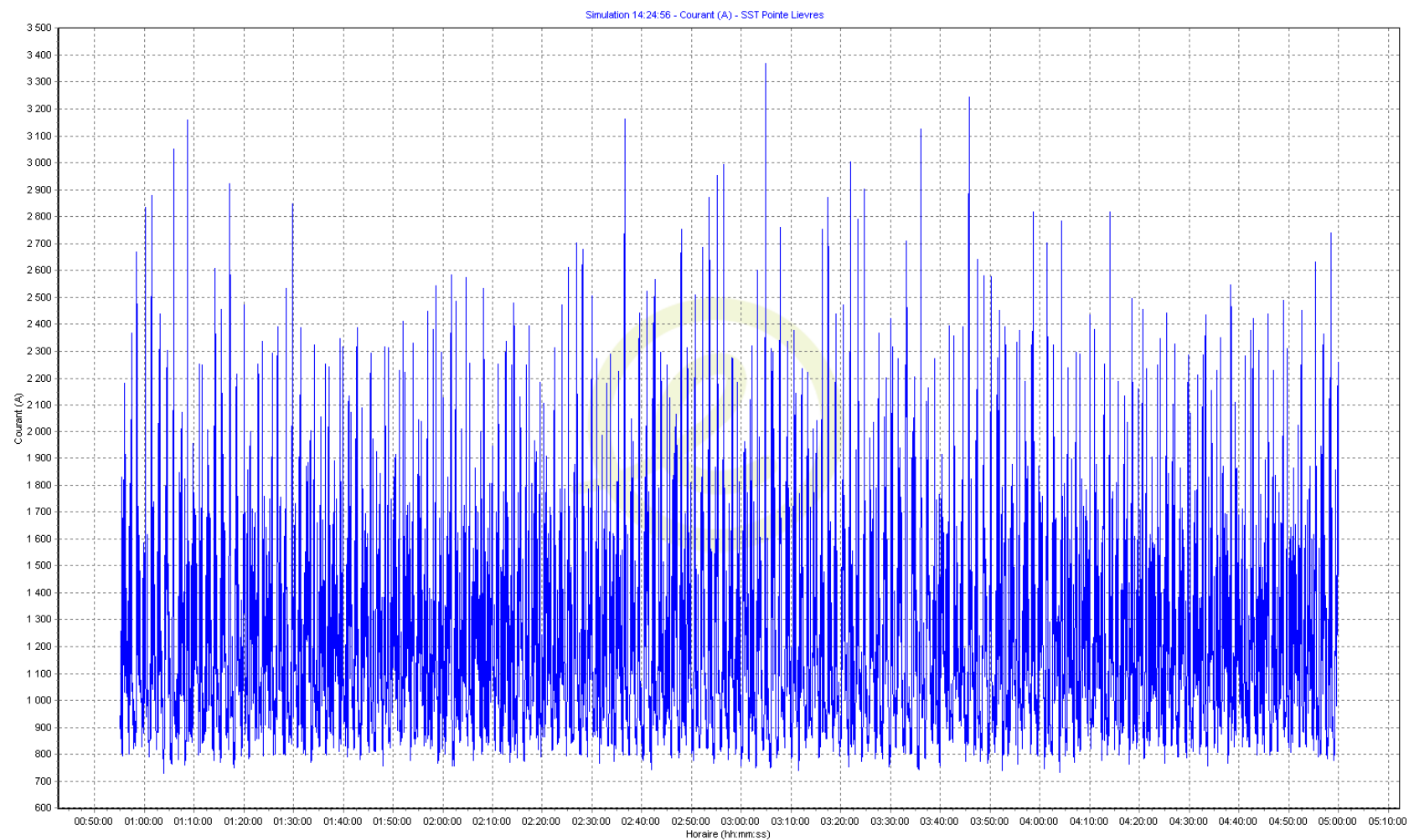


Figure 28 : Mode dégradé 2 – Courant sous-station Dorchester avec rames 43 m

2.6 RÉSULTATS TRACTION MOYEN TERME EN MODE NOMINAL

L'objectif de ces simulations est de déterminer les pistes d'optimisation envisageables pour l'horizon à moyen terme avec des rames de 33 m de longueur, moins contraignant que l'horizon long terme avec des rames de 43 m.

Comme pour l'étude à long terme, le mode nominal et les modes dégradés d'alimentation ont été étudiés en désactivant la réinjection sur la LAC du matériel roulant lors des freinages.

2.6.1 Mode nominal

Le tableau suivant présente une comparaison des courants débités par les sous-stations en mode nominal, à architecture équivalente, en fonction de l'horizon. On observe que la configuration avec des rames de 33 m, décharge les sous-stations d'environ 20 % en moyenne.

	Moyen terme (rames 30m)		Long terme (rames 40m)		Gain (%)
	Moyenne	Quad.	Simple	Quad.	
Simulation 10:35:30					
SST Terminus Estimeauville	400	500	500	600	-15%
SST Bardy	600	600	800	800	-25%
SST Capucins	700	700	900	900	-20%
SST Acqueduc	700	700	900	900	-20%
SST Lescarbot	800	900	1000	1100	-20%
SST PEPS	1000	1100	1300	1400	-20%
SST Carrel	900	1000	1200	1300	-25%
SST CHU	1000	1100	1300	1400	-20%
SST Nord Pont Levis	800	900	1100	1200	-25%
SST Sud Pont Levis	500	500	600	700	-30%
SST Levis 7	500	600	700	800	-25%
SST Levis 5	600	700	800	900	-20%
SST Levis 4	700	800	900	1000	-20%
SST Levis 3	600	700	800	900	-20%
SST Levis 2	600	700	800	900	-20%
SST Levis 1	600	600	800	800	-25%
SST Terminus Levis	500	600	600	700	-15%
SST Terminus 41 ^{ème} rue	400	500	500	600	-15%
SST 1 st Ave	600	600	700	800	-25%
SST Pointe Lievres	700	700	900	1000	-30%
Dorchester N-S	1300	1400	1700	1700	-20%
SST Youville	1200	1300	1600	1600	-20%
SST Grand Théâtre	600	600	800	800	-25%
				Gain moyen :	-22%
Légende :	1200	Supérieur à In			
	800	Supérieur à 2 / 3 In			
	400	Inférieur à In			

Figure 29 : Mode nominal – Comparaison courants sous-station moyen/long terme

L'allure des chutes de tension reflète elle aussi une situation moins contraignante pour le réseau traction.

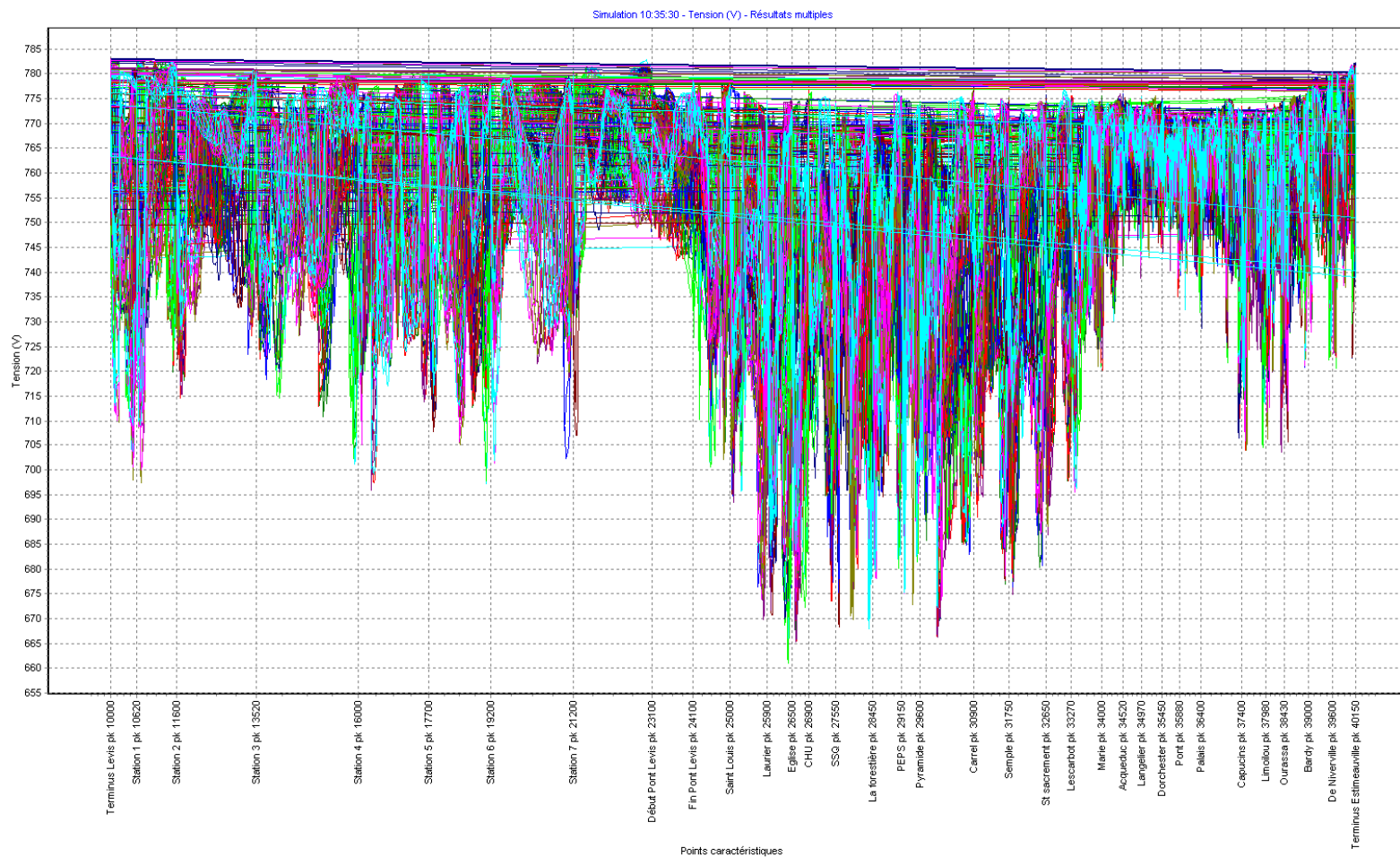


Figure 30 : Mode nominal – Tension tracé OUEST-EST avec des rames de 33 m

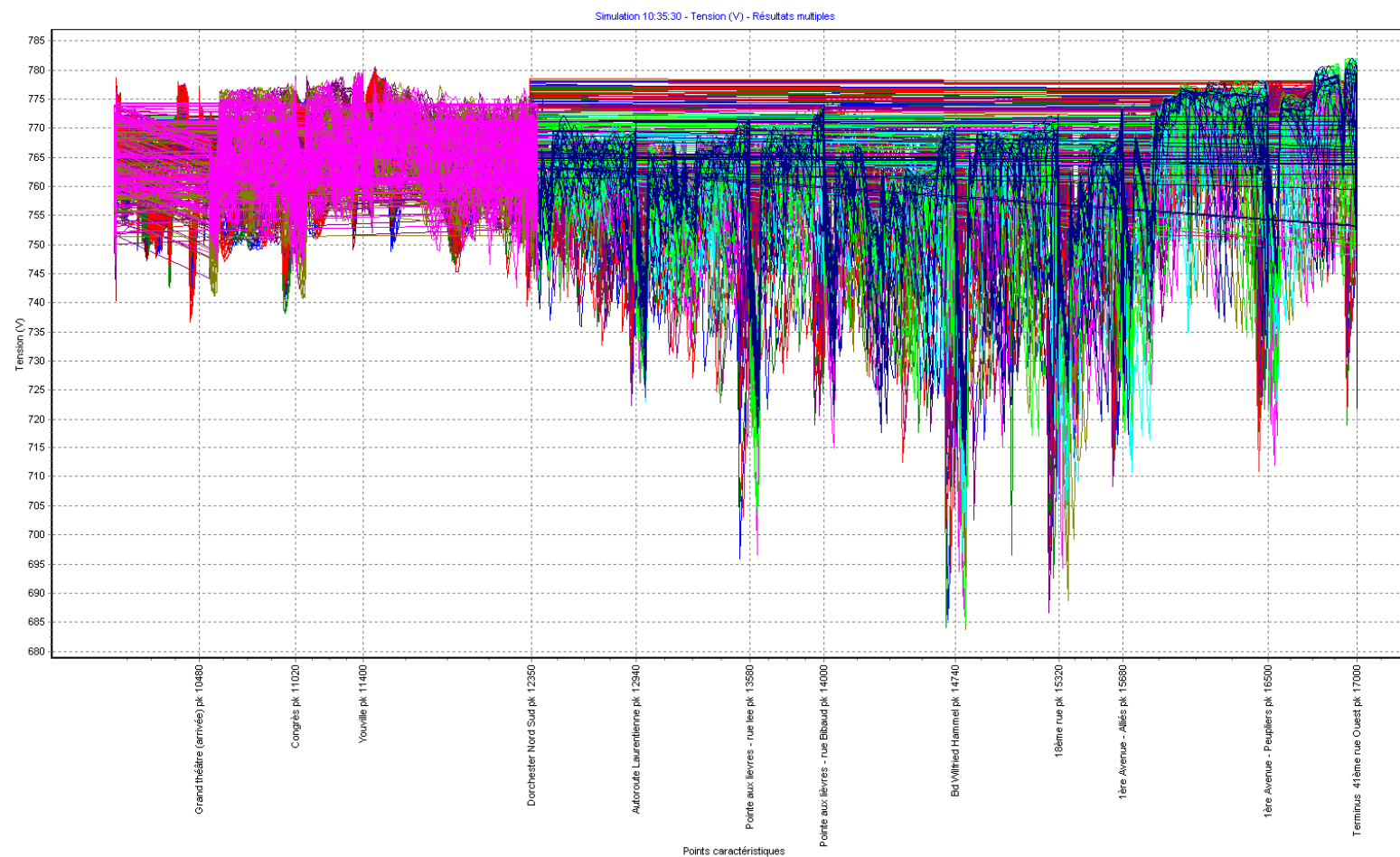


Figure 31 : Mode nominal – Tension tracé SUD-NORD avec des rames de 33 m

Ces résultats permettent donc d'envisager des optimisations pour l'horizon moyen terme. L'objectif est d'identifier les équipements dont l'installation pourrait être différée. Plusieurs pistes ont été explorées :

- différer l'installation de feeder;
- différer la réalisation de sous-stations ou de groupe redresseur pour les SST bi-groupe.

2.6.2 Analyse de différer des feeders

Des simulations ont été effectuées en supprimant tous les feeders enterrés.

La simulation du mode nominal offre des résultats corrects pour les charges des sous-stations (les courants SST ne dépassent pas In). Les niveaux de tension sont satisfaisants.

Les résultats en mode dégradés sont eux aussi satisfaisants sur les aspects courants et tension. Les tensions chutent mais restent supérieures à 500V.

Le tableau suivant présente les courants débités par les sous-stations avec des rames de 33 m de long, et sans feeder enterré.

MOYENNES SIMPLES					
Sous-Station	Nominal	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
SST Terminus Estimeauville	400	500	0	800	500
SST Bardy	600	700	900	0	900
SST Capucins	700	1000	800	1000	0
SST Acqueduc	700	1100	0	1100	900
SST Lescarbot	800	1000	1000	0	1100
SST PEPS	1000	0	1500	1200	1500
SST Carrel	900	1400	1100	1300	0
SST CHU	1000	1500	0	1400	1300
SST Nord Pont Levis	800	1000	1300	0	900
SST Sud Pont Levis	500	700	600	800	0
SST Levis 7	500	0	800	700	700
SST Levis 5	600	800	0	900	700
SST Levis 4	700	800	1000	0	1000
SST Levis 3	600	900	700	900	0
SST Levis 2	600	0	800	800	900
SST Levis 1	600	800	0	1000	600
SST Terminus Levis	500	500	800	0	500
SST Terminus 41 ^{ème} rue	400	400	800	0	500
SST 1 st Ave	600	600	0	900	900
SST Pointe Lievres	700	900	1000	800	0
Dorchester N-S	1400	0	1800	2000	2000
SST Youville	1200	1500	1800	0	1200
SST Grand Théâtre	600	600	0	1300	700

Figure 32 : Courants sous-stations avec des rames de 33 m, et sans feeder

La courbe suivante donne la tension au pantographe des rames dans le mode dégradé le plus pénalisation en terme de chute de tension (mode dégradé 3).

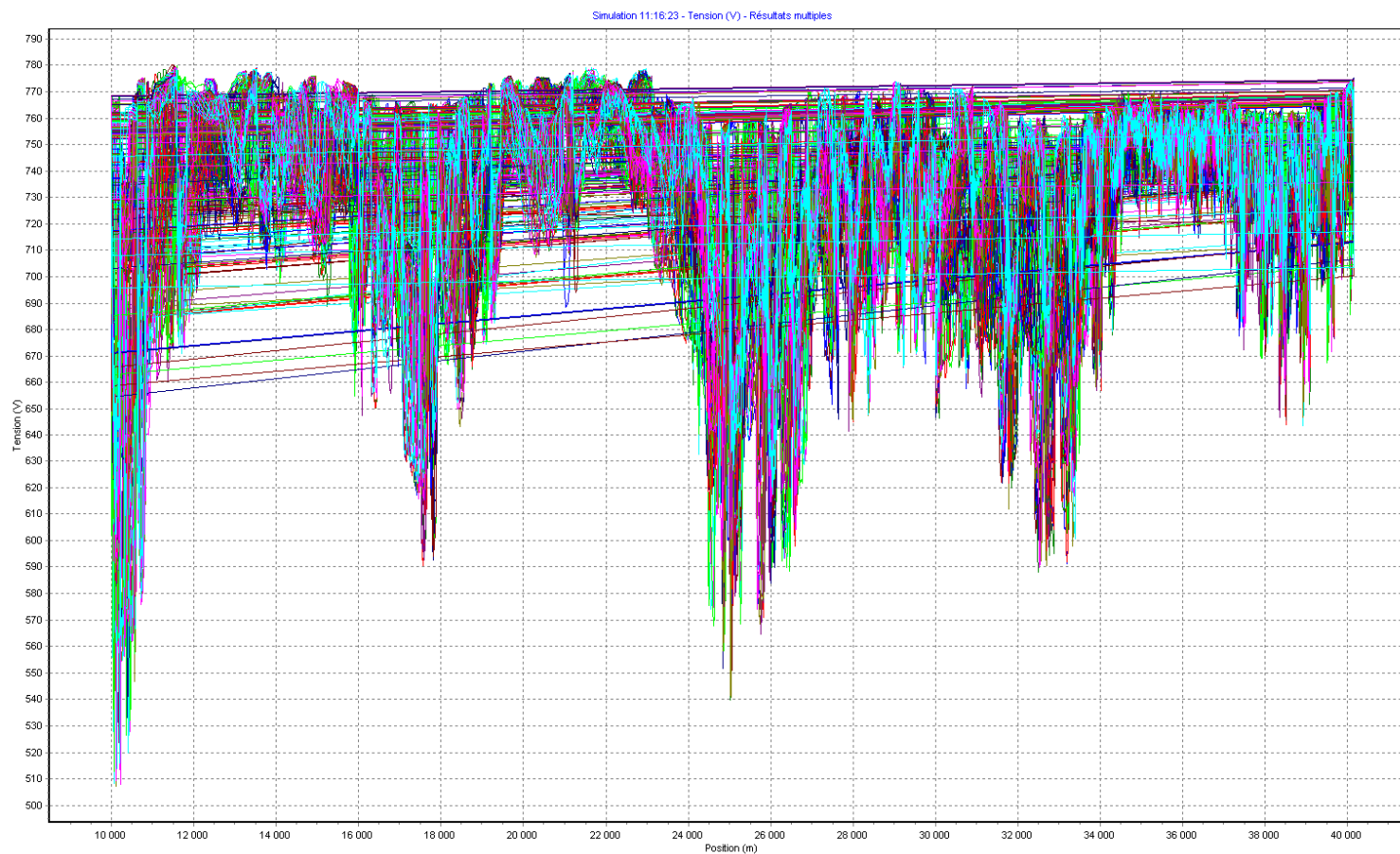


Figure 33 : Mode dégradé 3 – Tracé OUEST/EST – Tension avec des rames de 33 m, et sans feeder

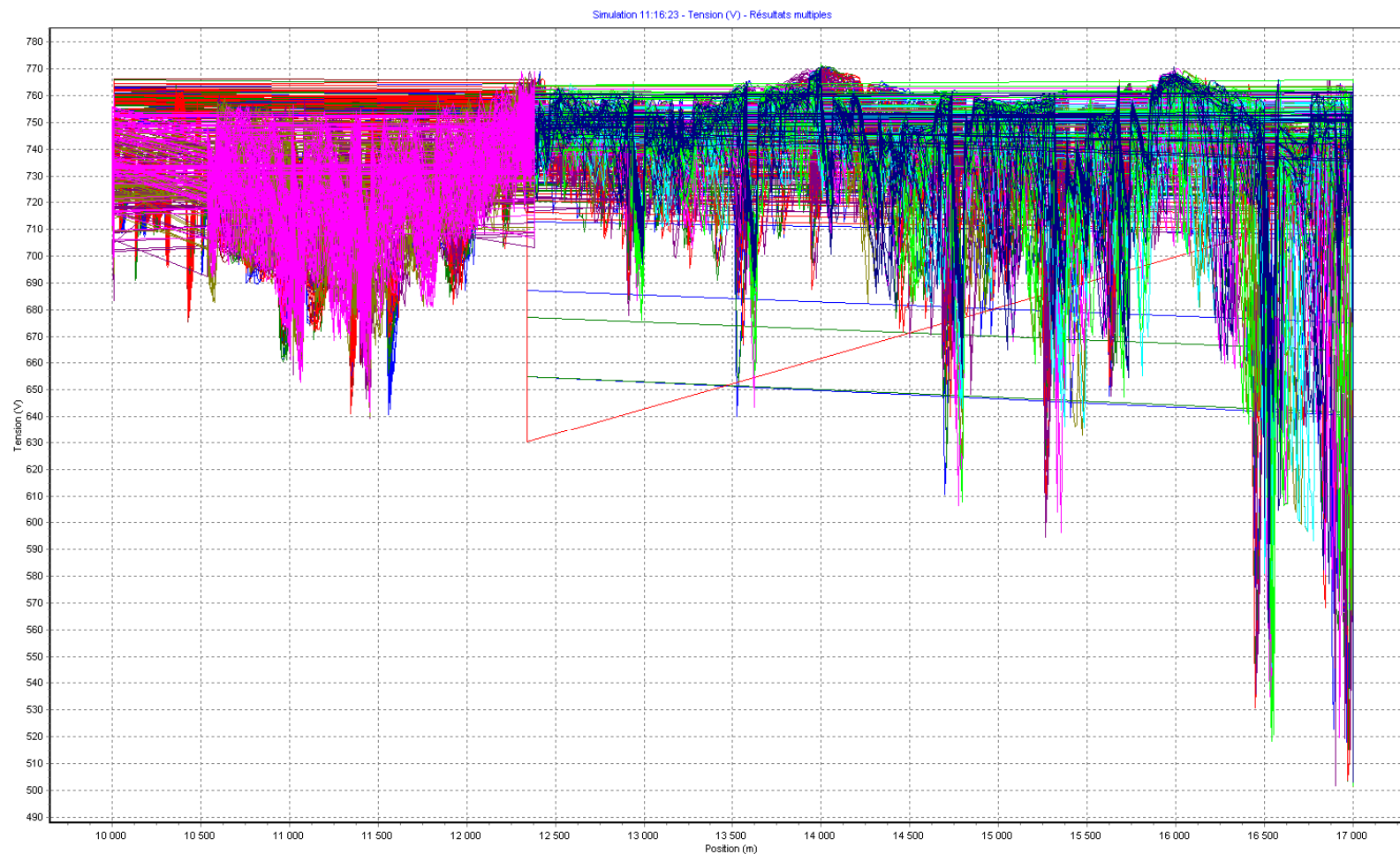


Figure 34 : Mode dégradé 3 – Tracé SUD/NORD – Tension avec des rames de 33 m, et sans feeder

En synthèse, il est donc envisageable pour l'horizon moyen terme avec des rames de 33 m de long de différer l'installation des feeders enterrés. Ces feeders devront être installés lors de l'opération d'allongement des rames pour les passer à 43 m de long.

Nota : les réservations pour permettre l'installation ultérieure des feeders sont à réaliser lors de la construction de la ligne afin d'éviter les reprises sur les infrastructures (multitubulaires) et superstructures (emplacements pour les coffrets de connexion, réservations dans les poteaux LAC, etc.). Les coûts de ces réservations sont faibles lorsqu'elles sont traitées à la construction initiale.

2.6.3 Analyse de différer des sous-stations

En complément de l'optimisation « feeder différé », la recherche d'optimisation a été poursuivie en essayant de différer la réalisation de sous-stations.

Différentes simulations ont été effectuées. Il en résulte qu'il est envisageable de différer la réalisation de la sous-station Sud du Pont de Québec pour l'horizon moyen terme avec des rames de 33 m.

Pour s'assurer que cette configuration était correcte, 2 modes dégradés supplémentaires ont été simulés :

- mode dégradé 5 : sous-station Nord du Pont de Québec hors service (et sous-station Sud Pont de Québec différée);
- mode dégradé 6 : sous-station Lévis 7 hors service (et sous-station Sud Pont de Québec différée).

Les courbes suivantes présentent les tensions obtenues en mode dégradé.

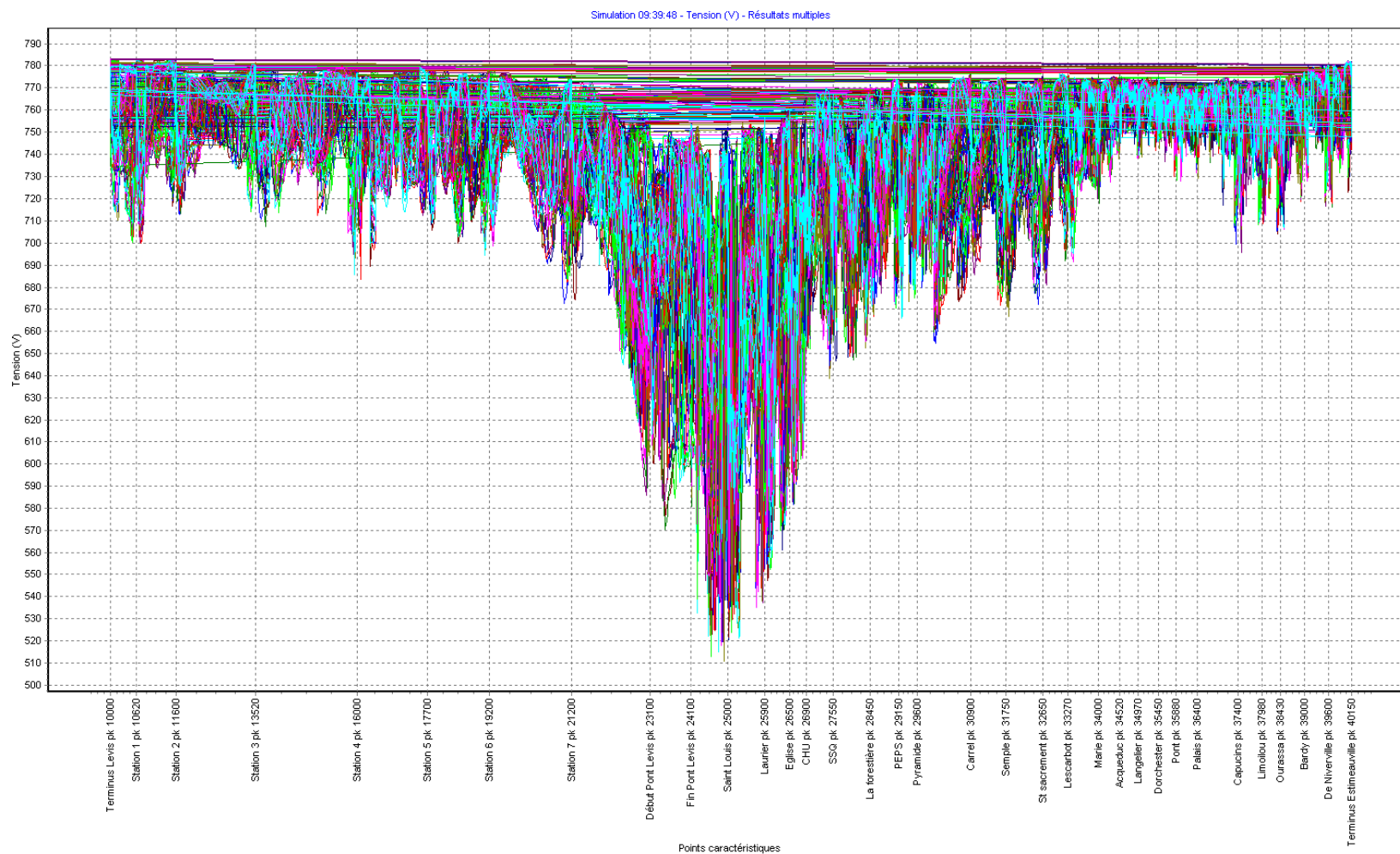


Figure 35 : Mode dégradé 5 – Tracé OUEST/EST – Tension avec des rames de 33 m, et sans feeder

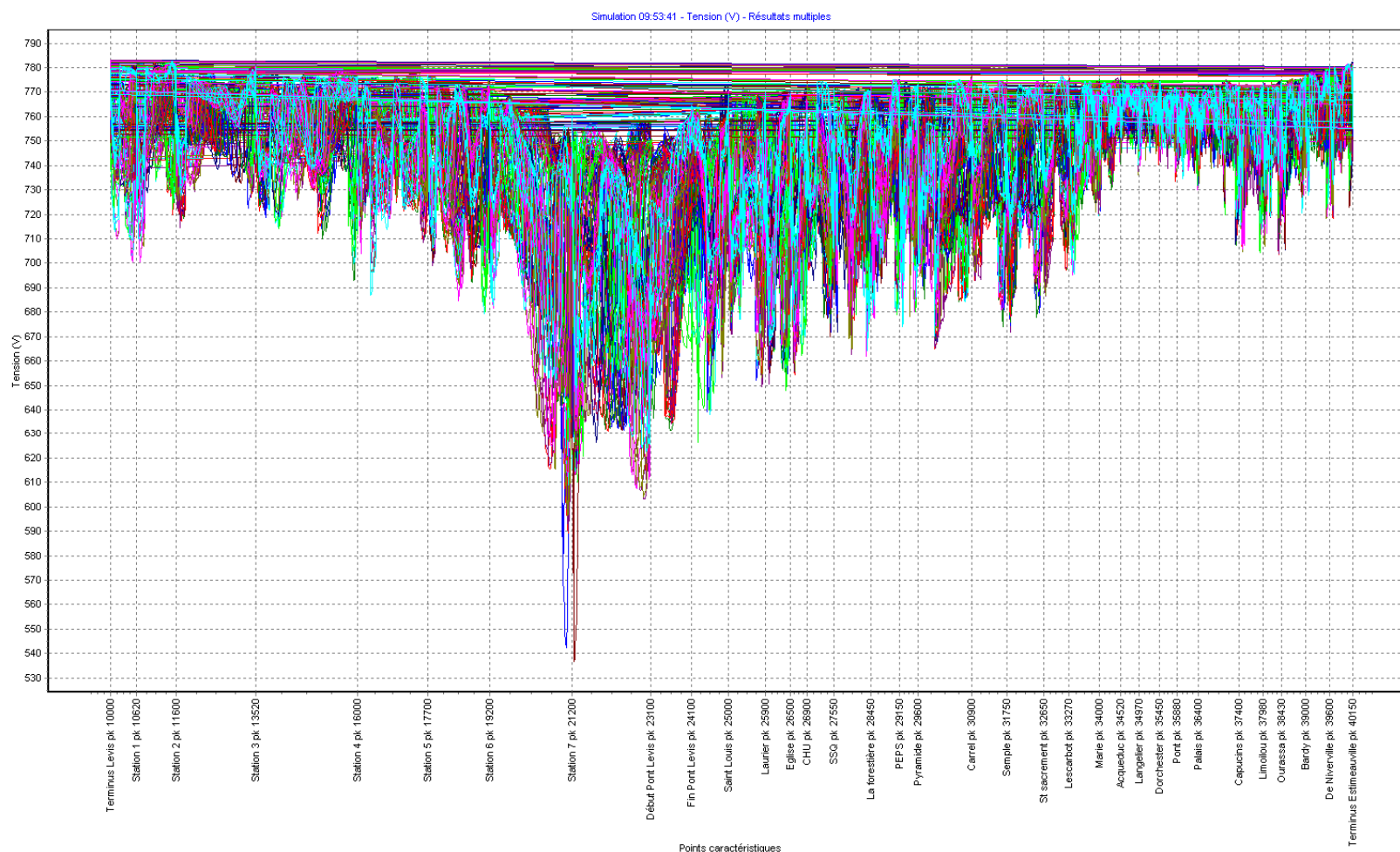


Figure 36 : Mode dégradé 6 – Tracé OUEST/EST – Tension avec des rames de 33 m, et sans feeder

Les tableaux suivants présentent les courants délivrés par les sous-stations avec la sous-station Sud Pont de Québec différée, en mode nominal et en modes dégradés 5 et 6.

MOYENNES SIMPLES			
Sous-Station E-O	Nominal	Mode 5	Mode 6
Dorchester N-S	1400	1400	1400
SST Terminus Estimeauville	400	400	400
SST Bardy	600	600	600
SST Capucins	700	700	700
SST Acqueduc	700	700	700
SST Lescarbot	800	800	800
SST PEPS	1000	1100	1000
SST Carrel	900	1000	900
SST CHU	1100	1600	1100
SST Nord Pont Lévis	1000	0	1200
SST Sud Pont Lévis	0	0	0
SST Lévis 7	700	1100	0
SST Lévis 5	700	800	1100
SST Lévis 4	700	700	800
SST Lévis 3	600	600	600
SST Lévis 2	600	600	600
SST Lévis 1	600	600	600
SST Terminus Lévis	500	500	500

Figure 37 : Courants moyenne simple sous-stations avec des rames de 33 m, sans feeder, et SST Sud pont de Québec différée

MOYENNES QUADRATIQUES			
Sous-Station E-O	Nominal	Mode 5	Mode 6
Dorchester N-S	1400	1400	1400
SST Terminus Estimeauville	500	500	500
SST Bardy	600	600	600
SST Capucins	700	700	700
SST Acqueduc	700	700	700
SST Lescarbot	900	900	900
SST PEPS	1100	1200	1100
SST Carrel	1000	1100	1000
SST CHU	1200	1700	1200
SST Nord Pont Lévis	1100	0	1400
SST Sud Pont Lévis	0	0	0
SST Lévis 7	800	1200	0
SST Lévis 5	700	800	1100
SST Lévis 4	800	800	900
SST Lévis 3	700	700	700
SST Lévis 2	700	700	700
SST Lévis 1	600	600	600
SST Terminus Lévis	600	600	600

Figure 38 : Courants moyenne quadratique sous-stations avec des rames de 33 m, sans feeder, et SST Sud pont de Québec différée

3 RECAPITULATIF

3.1 HORIZON LONG TERME

L'horizon long terme correspond à l'exploitation du réseau tramway avec du matériel roulant de 43 m de longueur.

Les sous-stations implantées dans les secteurs avec de fortes déclivités sont les plus sollicitées. Il sera nécessaire de mettre en œuvre 5 sous-stations de traction bi-groupe afin de supporter les modes dégradés sans pénaliser l'exploitation. Aussi, pour ces sous-stations bi-groupe, il est conseillé de prévoir des alimentations MT fiabilisées pour limiter l'occurrence d'impact sur l'exploitation (Fiabilisation = alimentation MT normale + alimentation MT secours).

Les puissances des groupes redresseurs à installer dans les sous-stations ainsi que la fiabilisation MT conseillée sont renseignées dans le tableau suivant.

SST	Puissance redresseurs	Fiabilisation HT
SST Terminus Estimeauville	900 kW	✗
SST Bardy	900 kW	✗
SST Capucins	900 kW	✗
SST Acqueduc	900 kW	✗
SST Lescarbot	900 kW	✗
SST PEPS	2*900 kW	✓
SST Carrel	2*900 kW	✓
SST CHU	2*900 kW	✓
SST Nord Pont de Québec	900 kW	✓
SST Sud Pont de Québec	900 kW	✓
SST Levis 7	900 kW	✗
SST Levis 5	900 kW	✗
SST Levis 4	900 kW	✗
SST Levis 3	900 kW	✗
SST Levis 2	900 kW	✗
SST Levis 1	900 kW	✗
SST Terminus Levis	900 kW	✗
SST Terminus 41ème rue	900 kW	✗
SST 1st Ave	900 kW	✗
SST Pointe Lievres	900 kW	✗
Dorchester N-S	2*900 kW	✓
SST Youville	2*900 kW	✓
SST Grand Théâtre	900 kW	✗

Figure 39 : Tableau sous-stations long terme

Les configurations de ligne aérienne associées avec les configurations sous-stations mentionnées ci-dessus sont les suivantes :

- tracé Est-Ouest :
 - LAC de type caténaire légère sur le tracé Est-Ouest du terminus Ouest Lévis à la station Aqueduc, (zones avec vitesse de circulation élevée des rames de tramway et insertion sur des grandes avenues);
 - configuration de la caténaire légère = 1 fil de contact cuivre 150 mm² + 1 câble porteur cuivre 150 mm²;
 - LAC de type unifilaire (1 fil de contact cuivre 150 mm²) + câble feeder enterré (base 2*400 mm² alu) sur le reste tracé Est-Ouest, de la station Aqueduc au terminus Est Estimaerville.
- tracé Nord-Sud :
 - LAC de type Profil aérien de contact (profilé aluminium + 1 fil de contact cuivre 150 mm²) pour la partie en tunnel de la branche Sud;
 - LAC de type unifilaire (1 fil de contact cuivre 150 mm² + câble feeder enterré (base 2*400 mm² alu) sur le reste du tracé Nord-Sud hors tunnel.

Dans les zones avec de la LAC de type unifilaire, la mise en œuvre d'un feeder se révèle indispensable afin d'assurer des niveaux de tension corrects pour le matériel roulant. En effet la suppression du feeder ne permettrait pas de maintenir des niveaux de tension assez élevés pour couvrir les modes dégradés d'alimentation (perte d'une sous-station notamment).

3.2 OPTIMISATION MOYEN TERME

Une analyse a été réalisée afin d'identifier les optimisations possibles pour l'exploitation à moyen terme avec du matériel roulant de 33 m de longueur. Moins pénalisante que la situation à long terme avec du matériel roulant de 43 m de longueur, nous avons réalisé plusieurs simulations afin d'identifier les éléments dont la mise en œuvre pouvait être différée dans le temps.

Les puissances des groupes redresseurs à installer dans les sous-stations ainsi que la fiabilisation MT conseillée sont renseignées dans le tableau suivant.

SST	Puissance redresseurs	Fiabilisation HT
SST Terminus Estimeauville	900 kW	✗
SST Bardy	900 kW	✗
SST Capucins	900 kW	✗
SST Acqueduc	900 kW	✗
SST Lescarbot	900 kW	✗
SST PEPS	2*900 kW	✓
SST Carrel	2*900 kW	✓
SST CHU	2*900 kW	✓
SST Nord Pont de Québec	900 kW	✓
SST Sud Pont de Québec	REALISATION DIFFEREE	
SST Levis 7	900 kW	✗
SST Levis 5	900 kW	✗
SST Levis 4	900 kW	✗
SST Levis 3	900 kW	✗
SST Levis 2	900 kW	✗
SST Levis 1	900 kW	✗
SST Terminus Levis	900 kW	✗
SST Terminus 41ème rue	900 kW	✗
SST 1st Ave	900 kW	✗
SST Pointe Lievres	900 kW	✗
Dorchester N-S	2*900 kW	✓
SST Youville	2*900 kW	✓
SST Grand Théâtre	900 kW	✗

Figure 40 : Tableau sous-stations moyen terme

Pour les sous-stations identifiées en bi-groupe dans la configuration long terme, il est conseillé d'installer les 2 groupes redresseurs dès la construction initiale de la sous-station pour :

- faciliter la couverture des modes dégradés dans la configuration moyen terme. Cela permet d'avoir une sous-station fiabilisée et donc de gagner sur les feeders (voir ci-dessous);
- éviter de devoir réaliser des travaux de modification de la sous-station sous exploitation.

À cet horizon, dans les zones d'insertion urbaine LAC de type unifilaire, l'utilisation d'un feeder ne se révèle pas indispensable. Sans feeder, les niveaux de tension restent à des niveaux corrects, même en mode dégradé.

Le fait de différer l'installation du feeder facilitera de surcroît les opérations de dégivrage de la LAC (simplifie le dégivrage des fils de contact par circulation de courant de traction). Cette configuration court-moyen terme permettra d'identifier si les conditions météorologiques locales nécessitent l'utilisation de ce système de dégivrage en complément des mesures de prévention classiques (poursuite de la circulation des rames mêmes en dehors des horaires d'exploitation).

Si lors des années d'exploitation court-moyen terme, le dégivrage électrique s'avère nécessaire, lors du rajout du feeder pour la passer à la configuration long terme, les connexions feeder / fils de contact devront être effectuées au travers de coffret de sectionnement commandable à distance depuis le PCE.

En synthèse, les éléments pouvant être différés lors d'une exploitation avec des rames de 33 m de longueurs sont :

- la sous-station Sud Pont de Québec;
- les câbles feeders enterrés.