



Étude de faisabilité technique du tramway de Québec et de Lévis

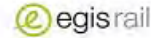


Dossier P-12-600-04

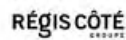
Consortium Tramway Québec-Lévis



SNC-LAVALIN



et ses partenaires



Intitulé du document

6^E SOUS LIVRABLE 1.3 NOTE TECHNIQUE ANALYSE MISE À LA TERRE ET TRAITEMENT DES PERTURBATIONS HARMONIQUES

Numéro du document	Révision
610879-0300-4AEN-0005	00

PRINCIPAUX COLLABORATEURS :

Oliss HODE

Pascal CHOVIN

VÉRIFIÉ PAR : Michel MEZDAD

APPROUVÉ PAR : André GENDREAU

NUMÉRO DU DOCUMENT :		610879-0300-4AEN-0005
REV.	DATE	TYPE DE RELÂCHE
PA	17/04/2013	Émission préliminaire pour commentaire interne
PB	28/05/2013	Émission préliminaire au RTC
00	19/06/2013	Émission finale au RTC incluant les commentaires RTC

SOMMAIRE

GLOSSAIRE ET DÉFINITIONS	4
Glossaire	4
Définitions générales	5
1 OBJET.....	6
2 RÉFÉRENTIEL.....	7
3 ENJEUX DE MISE À LA TERRE.....	8
3.1 présentation	8
3.2 Distributions électriques	8
3.3 Elements caractéristiques des distributions Electriques	10
3.4 Protection des personnes	11
3.5 Prises de terre.....	11
3.6 Liaisons equipotentielles	13
3.7 Schémas de principE	14
4 TRAITEMENT DES PERTURBATIONS HARMONIQUES	17
4.1 Définitions des termes techniques.....	17
4.2 Présentation.....	17
4.3 Extraits normes	18
4.4 REtour d'expérience France.....	21
4.5 Proposition.....	22
5 TRAITEMENT DES COURANTS VAGABONDS.....	23
5.1 Phénomène des courants vagabonds	23
5.2 Présentation.....	24
5.3 effets des courants vagabonds	24
5.4 Methodologie préconisée pour le traitement des courants vagabonds.....	25

GLOSSAIRE ET DÉFINITIONS

GLOSSAIRE

Abréviations	Définitions
A	Ampère
ac ou ~	Courant alternatif
AWG	American Wire Gage
BT	Basse tension (tension nominale entre phases n'excédant pas 750 V)
cc ou =	Courant continu
CEE	Centre d'exploitation et d'entretien
CL	Coffre de Ligne (énergie de traction)
CV	Courants vagabonds
GLO	Gabarit Limite d'Obstacle
HQ	Hydro-Québec
HT	Haute Tension (tension nominale entre phases de 44 000 V et plus)
kcmil	millier de mils circulaires (1 kcmil = 0,5067 mm ²)
LAC	Ligne aérienne de contact
LATE	Ligne aérienne de traction électrique Même signification pour les 2 abréviations
MALT	Mise à la terre
MT	Moyenne tension (tension nominale entre phases de plus de 750 V et de moins de 44 000 V)
PR	Poste de Redressement
RTC	Réseau de transport de la Capitale
SST	Sous-Station Traction
V	Volt

DÉFINITIONS GÉNÉRALES

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 Traction : 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 OBJET

L'objet de cette note est de présenter pour le système tramway :

- l'identification des enjeux de mise à la terre;
- les actions préventives et les équipements associés pour traiter les perturbations harmoniques générées par le système tramway;
- le processus pour le traitement des courants vagabonds générés par le système tramway.

2 RÉFÉRENTIEL

Le référentiel technique principal est décrit dans le 1^{er} sous-livrable 1.3 « Mode d'alimentation du système – Critères de conception » référence 610879-0010-4AEN-0002.

En complément, le référentiel technique plus détaillé intègre :

- documents Hydro-Québec : Normes de la série Qxxxx – Mise à la terre;
- norme EN 50162 (2005-07-01) : Protection contre la corrosion due aux courants vagabonds des systèmes à courant continu;
- norme EN 12954 (2001-04-01) : Protection cathodique des structures métalliques enterrées ou immergées – Principes généraux et application pour les canalisations;
- norme EN 50327 – Applications ferroviaires – Installations fixes – Harmonisation des valeurs assignées et des essais des groupes convertisseurs – Version 01/07/2005;
- norme EN 50327/A1 – Applications ferroviaires – Installations fixes – Harmonisation des valeurs assignées et des essais des groupes convertisseurs – Version 01/08/2005;
- norme EN 61000-2-12 : Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 2-12 : Environnement – Niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites à basse fréquence et la transmission des signaux sur les réseaux publics d'alimentation moyenne tension – Version février 2004. (Correspond au texte CEI 61000-2-12 version 2003);
- norme EN 61000-2-4 : Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 2-4 : Environnement – Niveaux de compatibilité dans les installations industrielles pour les perturbations conduites à basse fréquence – Version 01/01/2003. (Correspond au texte CEI 61000-2-4 version 2002).

3 ENJEUX DE MISE À LA TERRE

Les règles et enjeux essentiels de la mise à la terre sont :

- d'assurer la sécurité des personnes vis-à-vis des risques électriques;
- de protéger les installations.

Ce paragraphe présente :

- les principes à mettre en œuvre (prises de terre, réseaux de terre, régime de neutre, les liaisons équipotentielles, etc.);
- les caractéristiques principales associées.

3.1 PRÉSENTATION

Pour fonctionner, un système tramway doit être alimenté en électricité. Les différentes tensions mises en jeu sur le système tramway sont :

- la moyenne tension alternative;
- la traction en courant continu;
- la basse tension alternative;
- la basse tension/très basse tension en courant continu;
- la très basse tension alternative.

3.2 DISTRIBUTIONS ÉLECTRIQUES

Ce paragraphe présente les principes de distribution et régime de neutre pour chaque niveau de tension mis en œuvre sur le système tramway.

3.2.1 Moyenne Tension alternative

La Moyenne Tension alternative regroupe 2 catégories d'installations :

Les réseaux Moyenne Tension Hydro-Québec (alimentant le système tramway)

Triphasés :

- phases : toutes les parties actives sont mises hors de portée et isolées par rapport à la terre;
- Neutre : directement mis à la terre;

Monophasé (pour information car non utilisé pour l'alimentation des installations tramway).

Les installations Moyenne Tension interne au système tramway

Les installations Moyenne Tension interne au système tramway sont uniquement en triphasés.

Ces installations MT étant alimentées par le réseau MT Hydro-Québec, les principes à mettre en œuvre sont donc ceux imposés par le réseau MT Hydro-Québec (application des normes CSA + le code de Québec de l'électricité + les normes Hydro-Québec).

3.2.2 Traction en courant continu

Les principes pour la production et la distribution de la traction à courant continu sont les suivants :

- courant continu produit par les groupes redresseurs (transformateurs/redresseurs) installés dans les Sous-Stations Traction;
- tension nominale retenue pour le tramway des villes de Québec et de Lévis : 750Vcc;
- polarité positive traction :
 - la polarité positive correspond à la ligne aérienne de contact à laquelle est couplé si nécessaire un ou des feeders;
 - toutes les parties actives sont mises hors de portées et isolées par rapport à la terre.

Le lecteur est invité à consulter le 3^e sous-livrable 1.3 pour plus de détail sur les installations de la ligne aérienne de contact.

- polarité négative traction :
 - la polarité négative correspond au retour traction assuré par les rails de roulement de la voie ferrée tramway;
 - l'isolement de cette polarité négative par rapport à la terre est donc relatif (notamment lié aux conditions climatiques).

L'objectif recherché est néanmoins d'avoir un bon isolement des rails par rapport à la terre, pour éviter de générer des courants vagabonds.

De ce fait, des exigences de sécurité relatives à la tension rails/sol doivent être satisfaites.

3.2.3 Basse Tension alternative

La Basse Tension alternative regroupe 2 catégories d'installations :

Les réseaux Basse Tension Hydro-Québec (alimentant le système tramway) :

Triphasés (tensions disponibles 347/600V en étoile) :

- phases : toutes les parties actives sont mises hors de portées et isolées par rapport à la terre;
- neutre : mis à la terre.

Monophasé (tensions disponibles 120/240V) :

- phases : toutes les parties actives sont mises hors de portées et isolées par rapport à la terre;
- neutre : mis à la terre. Neutre distribué.

Les installations Basse Tension interne au système tramway

Les installations Basse Tension interne au système tramway peuvent être alimentées soient par :

- des raccordements sur les réseaux Basse Tension Hydro-Québec. Dans ce cas, les principes à mettre en œuvre sont donc ceux imposés par les réseaux BT Hydro-Québec (régime de neutre notamment).
- des transformateurs abaisseurs MT/BT propre au système tramway. Dans ce cas, les principes à mettre en œuvre peuvent être spécifiques aux installations du tramway. Néanmoins, pour faciliter l'exploitation et la maintenance des installations BT du système tramway, il peut être pertinent d'uniformiser le régime de neutre en appliquant les mêmes principes que les réseaux BT Hydro-Québec.

3.2.4 Basse Tension/Très Basse Tension courant continu

Ces tensions sont utilisées pour les systèmes de commande/contrôle du système tramway.

Les niveaux de tensions mis en jeu sont généralement :

- 24 ou 48 V= pour les usages localisés (interne à une sous-station, au CEE, liaison d'asservissement entre 2 sous stations, etc.);
- 100 à 120V= pour les usages impliquant une distribution sur des linéaires importants (boucles de coupure d'urgence par exemple).

Les 2 polarités (positif et négatif) sont isolées.

3.2.5 Très Basse Tension alternative

Ces tensions sont utilisées pour les systèmes de commande/contrôle du système tramway. Toutes les polarités (phases et neutre) sont isolées.

3.2.6 Localisations des installations

Les installations électriques tramway mentionnées ci-dessus sont réparties tout au long du corridor de la ligne de tramway.

Pour les installations Hydro-Québec MT et BT mentionnées, celles-ci débordent du corridor tramway.

3.3 ELEMENTS CARACTÉRISTIQUES DES DISTRIBUTIONS ELECTRIQUES

Les éléments caractéristiques des distributions électriques sont :

- les niveaux de tension (et donc la classification qui en découle TBT, BT, MT, HT);

- les puissances;
- les courants de défauts.

3.4 PROTECTION DES PERSONNES

La protection des personnes vis-à-vis des courants alternatifs du système tramway est réalisée suivant les prescriptions habituelles mise en œuvre au Québec.

La particularité du système tramway provient de la mise en œuvre de la traction en courant continu. Le retour de courant est effectué par les rails de roulement du tramway. Il peut en découler une différence de potentiel Rail / Terre. Pour assurer la protection des personnes contre le risque de tension dangereuse, des relais de protection spécifiques sont mis en œuvre.

Ces relais sont mis en œuvre :

- dans toutes les sous stations tramway;
- à l'intérieur du site du Centre d'Exploitation et d'Entretien, notamment dans l'atelier de maintenance (voies sur fosse, etc.);
- dans des coffrets intermédiaires entre les sous stations si nécessaire.

Ils sont connectés entre le Rail et une prise de terre. Ces relais assurent la surveillance du potentiel Rail / Terre. Lorsque le potentiel atteint le seuil limite du relais, celui-ci se met en court-circuit. Des contacts d'alarmes signalent l'enclenchement du relais.

3.5 PRISES DE TERRE

Pour assurer la protection des personnes et des installations, il est nécessaire de mettre en œuvre différentes prises de terre sur les installations du système tramway.

3.5.1 Sous-Station de Traction tramway

Pour les sous-stations de traction tramway, les principes définis dans les normes Hydro-Québec seront appliqués. Chaque local sous station sera équipé de sa propre prise de terre qui devra être réalisée conformément aux prescriptions des normes Hydro-Québec (Livre Rouge + Normes série Qxxx - Mise à la terre).

Constitution de la prise de terre : piquets de terre de 3 m de longueur (+ contrepoids si nécessaire) + ceintures d'équipotentialité, avec remontée à l'intérieur du local à proximité de l'emplacement de la barrette de terre.

Il conviendra lors des études détaillées de niveau EXE de vérifier que les courants de défauts traction n'impliquent pas la mise en œuvre de prescriptions complémentaires plus contraignantes.

Quelques ordres de grandeurs de valeurs généralement suffisantes vis-à-vis des contraintes traction pour un groupe de 900 kW :

- prise de terre d'une valeur inférieure à 1 ohm;
- prise de terre par câble acier galvanisé de 95 mm² ou une câblette cuivre de section ≥ 35 mm².

La prise de terre de la sous-station est également utilisée pour assurer la protection des personnes vis-à-vis des risques de différence de potentiel Rail / Terre. Pour cela, un

relais de protection spécifique est mis en œuvre dans chaque sous station. Ce relais assure la surveillance du potentiel Rail / Terre.

3.5.2 Locaux tramway en ligne

Pour les locaux techniques (de Signalisation ferroviaire par exemple) accolés à un local sous-station, un conducteur principal de protection sera mis en place dans le local technique et raccordé sur le circuit de terre de la sous station.

Pour chaque local technique indépendant (alimentations BT, locaux SIG, etc.), les principes dans les normes Hydro-Québec seront appliqués. Chaque local sous-station sera équipé de sa propre prise de terre qui devra être réalisée conformément aux prescriptions des normes Hydro-Québec.

Constitution de la prise de terre : piquets de terre de 3 m de longueur + ceintures d'équipotentialité.

Pour les autres locaux du système tramway en ligne (locaux d'exploitation, guérite gardien parc relais, etc.), il est conseillé de prévoir une prise de terre conforme aux prescriptions Hydro-Québec. Cela permet de couvrir les différents type d'alimentation BT (branchement BT Hydro-Québec ou alimentation BT issue d'une sous station).

3.5.3 Stations tramway

Pour chaque station tramway, nous préconisons la réalisation d'une prise de terre pour chaque quai.

Constitution de la prise de terre : piquets de terre de 3m de longueur + ceintures d'équipotentialité.

Pour les stations à quais latéraux (2 quais), la sortie du câble de prise de terre du quai opposé aux coffrets BT est ramenée dans la chambre de tirage situé sous les coffrets BT de station pour permettre l'interconnexion des 2 prises de terre (1 sous chaque quai).

La valeur de la prise de terre sera déterminée en fonction des caractéristiques des alimentations et des protections. À défaut d'information sur ces paramètres lors de la réalisation des prises de terre, la valeur de la prise de terre devra être inférieure à 1 ohm. Dans ce cas les protections devront être calculées en conséquence.

3.5.4 Supports de LAC

Pour les supports de LAC, nous préconisons la réalisation d'une prise de terre individuelle pour chaque massif de support LAC.

Constitution de la prise de terre : piquets de terre de 3 m de longueur.

Pour les supports de LAC sur lequel est installé un parafoudre traction (poteaux avec des remontées de câbles traction), il est préconisé de rajouter en complément une prise de terre en patte d'oie.

3.5.5 Tunnel

Des prises de terre sont à réaliser :

- à chaque extrémité du tunnel;
- aux points caractéristiques intermédiaires (station, puits etc.).

En 1^{re} approche, les contraintes (valeur de prise terre, sections), sont similaires à celles mentionnées pour les sous-stations. En phase d'études détaillées ultérieures PRO / EXE, il conviendra de définir précisément ces contraintes en fonction des alimentations mises en œuvre.

En tunnel, les cheminements principaux pour les câbles sont généralement réalisés par chemins de câbles. Des conducteurs principaux de protection sont fixés sur les chemins de câbles (Exemples de conducteur : barres cuivre nu de 20 * 2 mm, ou câble nu cuivre de 50 mm²).

3.5.6 Centre d'Exploitation et d'Entretien

Pour le CEE, il est conseillé que chaque bâtiment ait une prise de terre (Mêmes principes que pour les sous-stations, mais les valeurs peuvent être à adapter notamment dans le cas de très forte puissance BT).

Pour les bâtiments en structure métallique, des remontées du circuit de terre sont également à prévoir au niveau des piliers.

En fonction de l'architecture de la distribution électrique, il peut être nécessaire de mettre en place des liaisons équipotentielles pour relier des bâtiments.

3.5.7 Autres installations

Pour les autres installations (éclairage public, signalisation lumineuse routière, etc.), les principes existants seront reconduits (prises de terre distinctes de celles du système tramway).

3.6 LIAISONS EQUIPOTENTIELLES

Pour assurer la protection des personnes, il est également nécessaire de mettre en œuvre des liaisons équipotentielles.

La protection des personnes est correctement assurée, lorsque sont adoptées des dispositions matérielles s'opposant au contact simultané du corps avec deux masses ou éléments conducteurs pouvant se trouver à des potentiels différents.

Lorsque le risque évoqué ci-dessus existe, il faut mettre en place des liaisons équipotentielles entre ces parties conductrices, de manière que ne puissent apparaître entre elles de potentiels suffisamment différents pour être dangereux.

3.7 SCHÉMAS DE PRINCIPE

3.7.1 Schéma général de principe

Le schéma général de principe de connexions des prises de terre et conducteurs principaux de protection est le suivant.

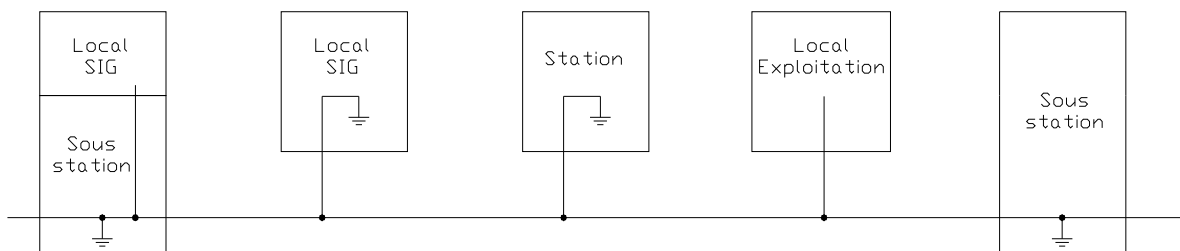


Figure 1 : Schéma général du réseau de terre

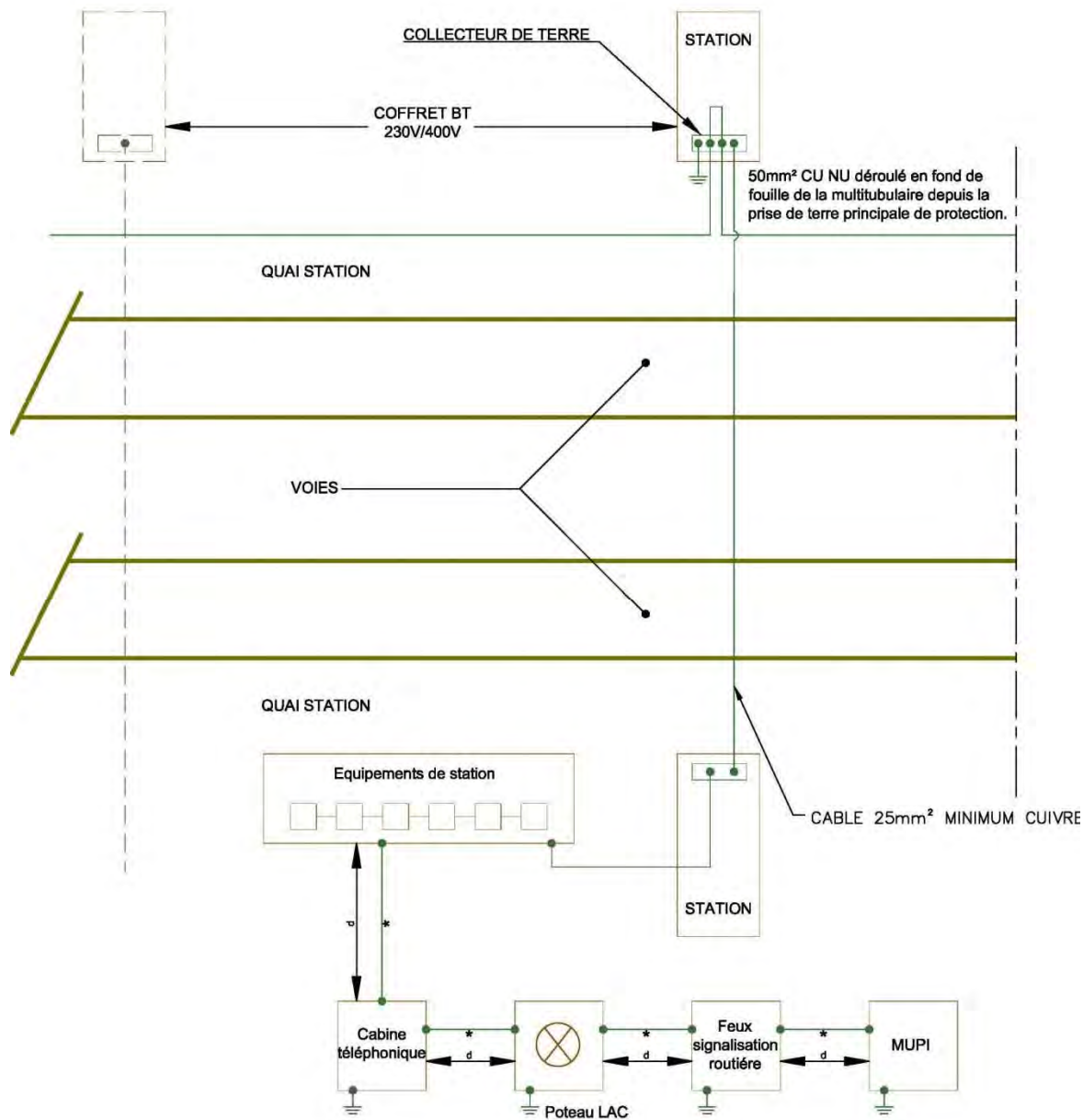
Les prises de terre des stations sont reliées entre elles, et à celles des sous-stations par un câble cuivre de section à déterminer, et cheminant dans un des fourreaux BT de la multitubulaires.

Pour les zones en tunnel, les conducteurs de protection sont fixés sur les chemins de câbles.

3.7.2 Schéma de principe pour une sous-station

Le schéma suivant présente un exemple de schéma le principe de mise à la terre pour une sous-station.

3.7.3 Schéma de principe pour une station



*Liaisons équipotentielles si masses accessibles simultanément

Figure 3 : Schéma de principe pour une station

4 TRAITEMENT DES PERTURBATIONS HARMONIQUES

4.1 DÉFINITIONS DES TERMES TECHNIQUES

Quelques définitions des termes techniques issues de la norme EN 50328 :

h rang harmonique

k facteur de couplage

Quelques définitions des termes techniques issues de la norme EN 61000-2-12

taux de distorsion harmonique total THD :

Le rapport de la valeur efficace de la somme des harmoniques à la valeur efficace du fondamental. La sommation est limitée à un rang défini (notation recommandée « H ») :

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left(\frac{Q_h}{Q_1} \right)^2} \quad \text{où}$$

Q représente soit le courant soit la tension;

Q₁ est la valeur efficace de la composante fondamentale;

h est le rang harmonique;

Q_h est la valeur efficace de la composante harmonique de rang h;

H est généralement égal à 50, mais peut être égal à 25 dans les cas où le risque de résonance sur les rangs supérieurs est faible.

Note : Le THD ne prend en compte que les harmoniques.

4.2 PRÉSENTATION

Les groupes redresseurs installés dans les sous-stations de traction du tramway convertissent la moyenne tension alternative en courant continu 750 V.

Ils génèrent des courants harmoniques sur le réseau moyen tension.

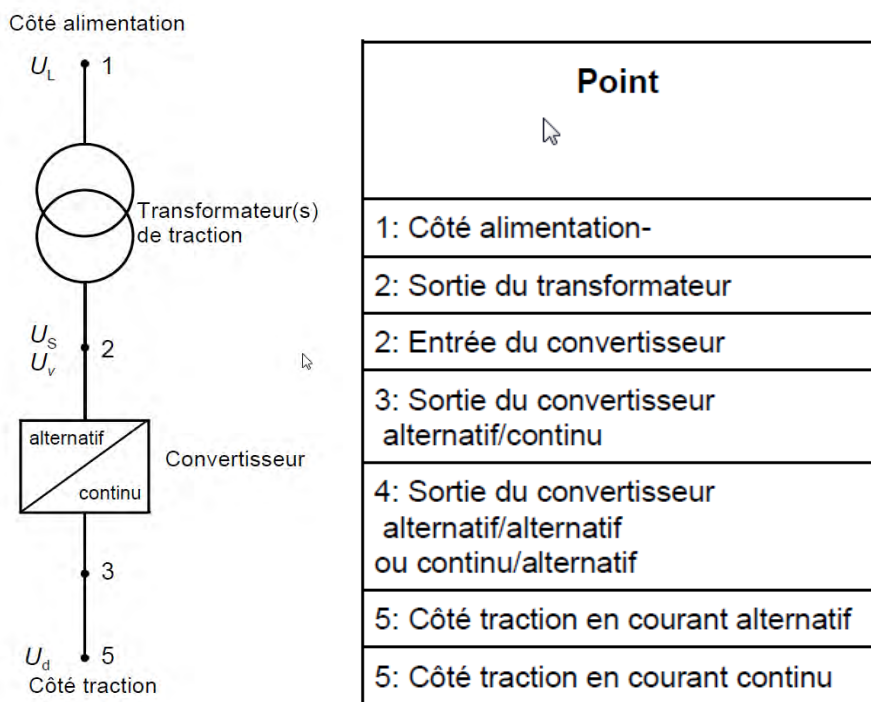


Figure 4 : Schéma de principe d'un groupe redresseur (extrait norme EN 50327)

Note : « entrée » et « sortie » se réfèrent au sens normal du courant.

4.3 EXTRAITS NORMES

Norme EN 61000-2-12 §4.3 Harmoniques

Les niveaux de compatibilité indiqués dans cette norme doivent être compris comme relatifs aux états stationnaires ou quasi stationnaires. Ils sont donnés en tant que valeurs de référence pour les effets à long terme et pour les effets à très court terme.

- les effets à long terme concernent principalement les conséquences thermiques sur les câbles, les transformateurs, les moteurs, les condensateurs, etc. Ils proviennent de niveaux harmoniques maintenus pendant 10 min ou plus.
- les effets à très court terme concernent principalement la perturbation de dispositifs électroniques qui peuvent être sensibles à des niveaux harmoniques maintenus pendant 3 s ou moins. Les régimes transitoires ne sont pas pris en compte dans ces effets.

Les niveaux de compatibilité relatifs aux tensions harmoniques individuelles pour les effets à long terme sont donnés dans le Tableau 1. Le niveau de compatibilité correspondant au taux de distorsion harmonique total est THD = 8 %.

Tableau 1 – Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles dans les réseaux moyenne tension (valeurs efficaces en pour-cent de la valeur efficace de la composante fondamentale)

Harmoniques impairs Non multiples de 3		Harmoniques impairs Multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang harmonique h	Tension harmonique %	Rang harmonique h	Tension harmonique %	Rang harmonique h	Tension harmonique %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,4	6	0,5
13	3	21	0,3	8	0,5
17 ≤ h ≤ 49	2,27 × (17/h) - 0,27	21 < h ≤ 45	0,2	10 ≤ h ≤ 50	0,25 × (10/h) + 0,25

NOTE 1 Les niveaux donnés pour les harmoniques impairs multiples de 3 s'appliquent aux harmoniques homopolaires. Ainsi, sur un réseau triphasé sans conducteur de neutre ou en l'absence de charge raccordée entre une phase et la terre, la valeur des harmoniques de rangs 3 et 9 peut être nettement inférieure aux niveaux de compatibilité, en fonction du déséquilibre du réseau.

NOTE 2 Des valeurs plus basses sont souvent appropriées – Voir 4.1

Figure 5 : Extrait « Tableau 1 » de la norme EN 6161000-2-12

En ce qui concerne les effets à très court terme, les niveaux de compatibilité relatifs aux composantes harmoniques individuelles de la tension sont égaux aux valeurs données dans le Tableau 1, multipliées par un coefficient k calculé comme indiqué ci-dessous :

$$k = 1,3 + \frac{0,7}{45} \times (h - 5)$$

Pour le taux de distorsion harmonique total, le niveau de compatibilité correspondant est THD=11 %.

Norme EN 50329 – Annexe C (normative)

En se basant sur les essais effectués sur des transformateurs couplés aux différents montages de convertisseur (voir Tableau C.1), les valeurs principales du contenu harmonique du courant exprimées en valeur réduite du courant de base, sont conventionnellement données dans le Tableau C.2

Tableau C.1 — Montages des transformateurs de convertisseur

Montage 1	Montage du transformateur côté valve 3	Montage des valves 4
7		
8	<p>1 or 1</p>	
9	<p>1 2</p>	
12	<p>1 2</p>	
18	<p>11 21 or 11 21</p>	
19	<p>1 or 1</p>	

Figure 6 : Extrait « Tableau C.1 » de la norme EN 50329

Tableau C.2 — Principaux contenus harmoniques pour divers montages de convertisseurs

Rang harmonique	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27
Fréquences Hz	16 ^{2/3}	50	83 ^{1/3}	117	150	183	217	250	283	317	350	383	417	450
	50	150	250	350	450	550	650	750	850	950	1 050	1 150	1 250	1 350
	60	180	300	420	540	660	780	900	1 020	1 140	1 260	1 380	1 500	1 620
Montage en pont (voir Tableau C.1)	Contenus harmoniques en valeur réduite de la composante fondamentale Valeurs informatives pour convertisseurs non commandés (basées sur les conditions de charges assignées)													
7	1	0,310	0,175	0,111	0,086	0,045	0,029	0,021	0,015	0,010	0,009	0,009	0,008	0,007
8 9, 12 BT 9,12 HT empilé	1		0,175	0,111		0,045	0,029		0,015	0,010		0,009	0,008	
9 ligne HT concentrique HT	1					0,045	0,029					0,009	0,008	
12 ligne HT concentrique HT	1					0,045	0,029					0,009	0,008	
Montage en pont (voir Tableau C.1)	Contenus harmoniques en valeur réduite de la composante fondamentale Valeurs théoriques pour une forme d'onde rectangulaire													
7	1	0,333	0,2	0,143	0,111	0,091	0,077	0,067	0,059	0,052	0,047	0,044	0,040	0,036
8 9, 12 BT 9,12 HT empilé	1		0,2	0,143		0,091	0,077		0,059	0,052		0,044	0,040	
9 ligne HT concentrique HT	1					0,091	0,077					0,044	0,040	
12 ligne HT concentrique HT	1					0,091	0,077					0,044	0,040	

Figure 7 : Extrait « Tableau C.2 » de la norme EN 50329

4.4 RETOUR D'EXPÉRIENCE FRANCE

Les types de redresseur majoritairement mis en œuvre dans les sous-stations de tramway en France sont :

- des redresseurs à diodes;
- avant 2000 : quasi exclusivement des redresseurs hexaphasés;
- 2000 – 2010 : des redresseurs hexaphasés et des redresseurs dodécaphasés;
- depuis 2010 : tendances vers les redresseurs dodécaphasés.

Nous n'avons pas connaissance de problème de perturbation liée aux harmoniques sur les installations du tramway, ni sur les installations des clients raccordés sur les mêmes artères HTA que les sous stations tramways. Néanmoins, cela n'exonère pas pour les nouvelles installations de la mise en place de filtre pour respecter les contraintes réglementaires et normatives.

Sur les métros en France, de nombreuses lignes sont également équipés avec des redresseurs hexaphasés (de plus forte puissance que ceux mis en œuvre dans les sous-stations tramways). À notre connaissance, le constat est le même.

Nota : pour les groupes redresseurs de très fortes puissances utilisés dans le ferroviaire (5 à 7 MW de puissance nominale unitaire) alimentés en 20 kV, la technologie double dodécaphasée commence à être mise en œuvre mais est plus onéreuse (double quasiment le prix du groupe redresseur).

4.5 PROPOSITION

Pour le projet de tramway des villes de Québec et de Lévis, nous proposons de prévoir des redresseurs dodécaphasés afin de limiter les courants harmoniques générés sur la moyenne tension.

La tendance à la généralisation des groupes redresseurs dodécaphasés a permis d'en faire baisser le coût de fabrication. Il est maintenant similaire à celui d'un groupe redresseur hexaphasés de même puissance.

La norme européenne EN 50329 « Installations fixes – Transformateurs de traction » donne les valeurs principales du contenu harmonique du courant (en se basant sur les essais effectués sur des transformateurs couplés aux différents montages de convertisseurs).

Les valeurs mentionnées pour les principaux contenus harmoniques en courant pour un redresseur dodécaphasés sont les suivants :

- rang 11 4,5 %;
- rang 13 2,9 %;
- rang 23 0,9 %;
- rang 25 0,8 %.

Ces valeurs correspondent à des valeurs réduites (pourcentage du courant harmonique rang h par rapport au courant fondamental).

Compte tenu de l'effet réducteur lié aux impédances (impédance du transformateur du groupe redresseur par rapport à l'impédance du réseau moyenne tension au point d'alimentation de la sous station), les taux d'harmonique de tension générés sur le réseau moyenne tension seront beaucoup plus faibles que les taux d'harmoniques de courant mentionnés ci-dessus.

En synthèse

Il est préconisé des groupes redresseurs dodécaphasés afin de limiter les courants harmoniques générés sur le réseau moyenne tension d'Hydro-Québec.

Les études détaillées permettront de vérifier que les limites d'émissions d'harmoniques définis dans la norme Hydro-Québec C.25-01 « Exigences techniques relatives à l'émission d'harmoniques par les installations de clients raccordées au réseau de distribution d'Hydro-Québec » sont respectées.

5 TRAITEMENT DES COURANTS VAGABONDS

Ce paragraphe présente la méthodologie proposée pour le traitement de la problématique des courants vagabonds pouvant être générés par le système tramway alimenté en courant continu.

5.1 PHÉNOMÈNE DES COURANTS VAGABONDS

Le terme « courant vagabond » désigne les courants électriques qui circulent dans le sol et proviennent soit de réseaux de traction électrique à courant continu (chemins de fer, tramway, etc.), soit d'installations électriques individuelles fixes ou mobiles (usine de raffinage électrolytique, de galvanoplastie, postes à soudure, etc.), soit des courants telluriques.

Ces courants sont la plupart du temps variables dans leur intensité, leur direction et le trajet qu'ils parcourent. C'est pour cette raison qu'on les appelle « courants vagabonds ».

L'alimentation des rames de tramways est assurée par les groupes redresseurs qui injectent un courant dans la LAC et qui revient aux postes de redressement par les rails de roulement. Ce retour des courants de traction vers les PR peut générer des courants vagabonds. La figure ci-dessous illustre le phénomène.

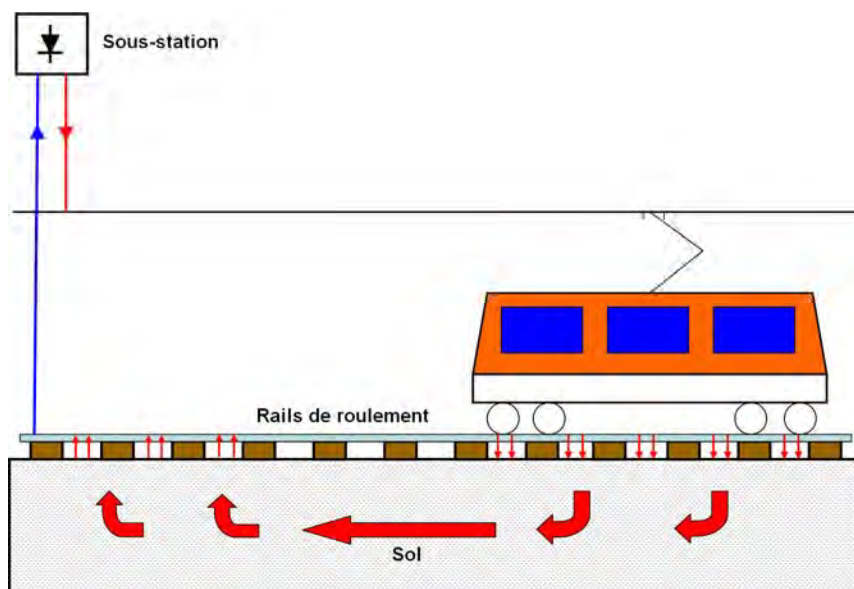


Figure 8 : Phénomène des courants vagabonds

Ce phénomène est issu du caractère non parfaitement isolé des rails de roulement. La localisation et l'intensité des courants vagabonds dépendent de plusieurs facteurs, dont :

- l'isolation entre les rails et le sol;
- la résistance longitudinale de la voie ferrée;

- l'intensité du courant de retour traction;
- la position de la rame.

Nota : la ligne aérienne de contact est installée avec un double isolement. Le courant de fuite traction du positif est donc marginal.

5.2 PRÉSENTATION

Les réseaux de traction à courant continu peuvent générer des courants vagabonds qui pourraient nuire aux installations dans ou hors de l'emprise du système de transport. Les courants vagabonds apparaissent lorsque le circuit de retour de courant n'est pas suffisamment isolé par rapport à la terre.

Les principaux effets des courants vagabonds peuvent être la corrosion et l'endommagement subséquent des structures métalliques, qu'empruntent les courants vagabonds, aux endroits où ils les quittent.

Tous les composants et tous les systèmes susceptibles d'être affectés par des courants vagabonds sont concernés, à savoir :

- les rails de roulement;
- les canalisations métalliques;
- les câbles à armure métallique et/ou à écran métallique;
- les réservoirs et cuves métalliques;
- les installations de mise à la terre en contact avec la terre;
- les constructions en béton armé;
- les structures métalliques enterrées;
- les systèmes de signalisation et de télécommunication;
- les systèmes d'alimentation à courant continu et à courant alternatif non destinés à la traction;
- les installations de protection cathodique.

5.3 EFFETS DES COURANTS VAGABONDS

En pratique, les courants vagabonds empruntent de préférence les infrastructures à caractères métalliques. L'effet des courants vagabonds sur ces structures est la corrosion électrolytique. Elle se produit aux points de sortie des courants dérivés qui sont généralement situés à proximité des PR (zones anodiques) pour les courants vagabonds issus des courants de traction tramway. La dégradation provoquée par les courants vagabonds sur les structures n'est pas sans danger pour les biens et les personnes (fuite de gaz par exemple).

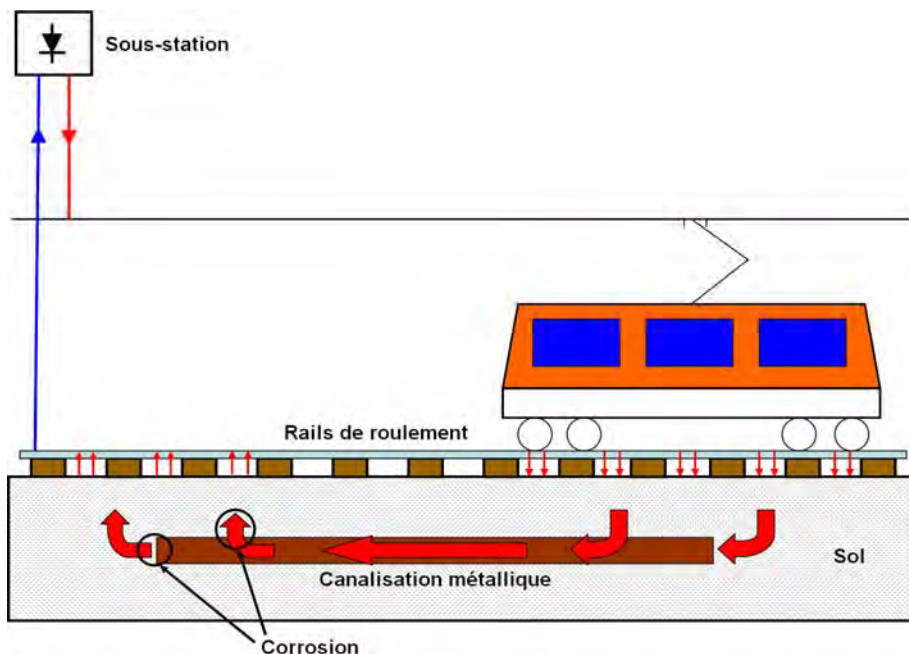


Figure 9 : Effet de corrosion sur les canalisations métalliques

5.4 METHODOLOGIE PRÉCONISÉE POUR LE TRAITEMENT DES COURANTS VAGABONDS

Lors de la construction d'une ligne de transport avec traction électrique en courant continu, Il convient donc de prendre des précautions pour limiter l'émission de courants vagabonds. Pour cela, il est préconisé de réaliser des actions préventives, complétées des actions constructives, et si nécessaire, par des actions curatives en cas de détection de courants vagabonds.

Nous préconisons pour cela que des actions soient appliquées lors des différentes phases de réalisation de l'opération du tramway :

- conception;
- réalisation des travaux;
- essais et mise en service du système tramway;
- exploitation du tramway.

Ces préconisations sont basées sur les processus habituellement mis en œuvre sur les projets de tramway alimentés en courant continu, réalisés en France. L'expérience a montré que ces préconisations permettaient d'obtenir des résultats satisfaisants pour le traitement des courants vagabonds.

5.4.1 Phase conception

En phase conception (Avant-Projet et phases suivantes), il est conseillé que chaque propriétaire de réseau établisse un état des lieux de ses installations vis-à-vis des courants vagabonds, pour ses installations à proximité du tracé du tramway.

Le terme « propriétaire de réseau » est à prendre au sens large.

Ces états des lieux permettent d'établir une liste des équipements/installations/réseaux/... voisins immédiat du tramway et de cibler les zones qui devront faire l'objet d'une attention particulière (mesure des courants vagabonds).

De même, tous les points de mesures déjà existants seront listés ainsi que les ouvrages enterrés identifiés.

Pour les installations du tramway, afin de limiter les courants vagabonds émis par le tramway et protéger les installations tramway vis-à-vis des courants vagabonds provenant d'autres sources, des exigences doivent être prises en compte dès la phase conception, dont notamment :

- voies ferrées :
 - rails soudés (réduction de la résistance linéique);
 - liaisons transversales de mise en parallèle des 4 files de rails de roulement (liaisons par câbles isolés). Mise en parallèle tous les 100 mètres.
- voies ferrées / Énergie de traction :
 - câbles isolés posés sous fourreaux pour les liaisons de retour du courant de traction aux sous stations (liaisons entre les rails de roulement et le négatif des redresseurs);
 - point de mesure « négatif rail tramway » au droit de chaque station.
- voies ferrées / plateforme tramway :
 - haut niveau d'isolation des rails de roulement;
- voies ferrées / signalisation ferroviaire :
 - isolement des installations signalisation ferroviaire en contact avec les rails de roulement;
- plateforme tramway :
 - drainage de la plateforme tramway pour évacuer l'eau;
- sous-station tramway :
 - point de mesure « négatif redresseur tramway » à chaque sous-station.
 - préservation d'un emplacement pour les concessionnaires (pour faciliter l'installation d'appareils de mesure, ou de protections).

Les études de déviations de réseaux devront prendre en compte la problématique, avec notamment :

- repositionnement des réseaux enterrés en les éloignant des rails de roulement;
- mise en œuvre de matériau isolant;
- rajout de points de mesures;
- rajout de joints isolants (trçonçonnage ou cloisonnement).

Les points de mesures sont à définir de façon judicieuse (position, section de câble, etc.), afin de permettre si nécessaire, l'installation de protection à posteriori en limitant les travaux de reprises.

Ouvrages d'arts

- nouveaux ouvrages : prise en compte du phénomène dans la conception de l'ouvrage, puis mesures et contrôles;
- ouvrages existants : mesures et contrôles.

5.4.2 Avant le démarrage des travaux

Avant le démarrage des travaux, il est conseillé d'effectuer des mesures qui servent à établir un point de référence sur les perturbations par les courants vagabonds.

Il peut s'agir de la prise en compte des mesures périodes que chaque propriétaire effectue, ou de nouvelles mesures contradictoires entre les propriétaires et le Maître d'Ouvrage du tramway, mesures effectuées par un organisme spécialisé.

5.4.3 Phase des travaux

À chaque étape des travaux, les dispositions constructives spécifiées en phase conception doivent être mises en œuvre et vérifiées.

Les contrôles et mesures doivent être réalisés à l'avancement des travaux. Sinon par la suite la localisation de défaut sur de grand linéaire devient difficile, et les reprises de travaux qui peuvent en découler importantes.

Des vérifications doivent également être faites en fin de chantier.

5.4.4 Avant le démarrage des essais traction du tramway

Avant la mise sous tension des installations traction du tramway, il est conseillé de faire une série de mesures, pour vérifier l'impact éventuel des travaux réalisés (déviations de réseaux, réalisation de la plateforme tramway ...).

Ces mesures sont à réaliser dans les conditions les plus proches possibles que celles des mesures précédentes (avant le démarrage des travaux), à savoir :

- unités de lieu;
- de temps;
- de conditions météorologiques;
- de matériel;
- etc.

5.4.5 Phase essais et mise en service du tramway

Ces mesures sont faites pour vérifier si les actions préventives sont suffisantes pour ne pas générer de perturbations supplémentaires en configuration exploitation.

Si les mesures font apparaître une augmentation des perturbations, des actions correctives devront être engagées.

Pour qu'une structure en acier enterrée soit convenablement protégée, on admet que son potentiel doit s'abaisser à une valeur négative de -0,85 V par rapport à une électrode de référence Cu/So4Cu, posée sur le sol près de la structure. Ce potentiel doit être atteint en chaque point du métal en contact avec le sol.

Si les mesures font apparaître des zones à risque, il convient de mettre en œuvre des protections pour éviter la dégradation des structures susceptibles de subir les conséquences du phénomène.

Avant d'installer des protections définitives, il convient de faire des essais avec des protections provisoires et des mesures afin de vérifier l'efficacité de protection envisagée et que cela n'entraîne pas d'augmentation de courants vagabonds sur d'autres structures.

Plusieurs types de protection peuvent être employés :

- le drainage simple qui accepte la corrosion en la reportant vers une anode sacrificielle appelée « déversoir », qui est réalisée avec une masse métallique enterrée, d'un métal plus électronégatif que la structure à protéger. Cette anode sacrificielle devra être contrôlée dans le temps et renouvelée si nécessaire. Ce mode de protection est réservé aux structures localisées.
- le drainage peut également être fait par le rajout d'une connexion entre la structure à protéger et le négatif redresseur (liaison avec une diode pour autoriser la circulation de courant que dans un sens).
- les protections actives. La protection peut être réalisée par installation de protection active (avec source d'alimentation auxiliaire) pour forcer la polarisation des structures à protéger.

5.4.6 Phase exploitation du tramway

Les protections actives/passives éventuelles, ainsi que les structures elles-mêmes doivent être surveillées régulièrement, afin de prévenir de tout changement notable des caractéristiques des courants vagabonds.

Ces mesures sont habituellement réalisées par les propriétaires en étroite collaboration avec l'exploitant du tramway.