



Étude de faisabilité technique du tramway de Québec et de Lévis

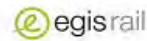


Dossier P-12-600-04

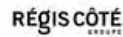
Consortium Tramway Québec-Lévis



SNC-LAVALIN



et ses partenaires



Intitulé du document

5^E SOUS-LIVRABLE 1.3 NOTE TECHNIQUE RECUPERATION DE L'ÉNERGIE DE FREINAGE

| Numéro du document | Révision |
|-----------------------|----------|
| 610879-0300-4AEN-0004 | 00 |

PRINCIPAUX COLLABORATEURS :

Pascal CHOVIN

Jérôme VENDASI

Jean François GUINET

REVU PAR : Cédrick CHATENET

VÉRIFIÉ PAR : André Gendreau

| | | |
|-----------------------------|-------------|---|
| NUMÉRO DU DOCUMENT : | | 610879-0300-4AEN-0004 |
| REV. | DATE | TYPE DE RELÂCHE |
| PA | 08/02/2013 | Émission préliminaire pour commentaire interne |
| PB | 25/02/2013 | Émission préliminaire au RTC |
| 00 | 26/03/2013 | Émission finale au RTC incluant commentaires du RTC |

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-----------|
| OBJET | 4 |
| GLOSSAIRE ET DEFINITIONS | 5 |
| Glossaire 5 | |
| Définitions..... | 6 |
| 1 PRESENTATION GENERALE | 7 |
| 2 PRESENTATION DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES..... | 8 |
| 2.1 Rhéostats embarqués | 8 |
| 2.2 Réinjection sur la ligne aérienne | 8 |
| 2.2.1 Régulation matériel roulant..... | 8 |
| 2.2.2 Réceptivité de la LAC | 9 |
| 2.3 Stockage à bord du matériel roulant | 11 |
| 2.4 Synthèse sur les technologies..... | 11 |
| 3 TRAMWAY DE QUEBEC..... | 13 |
| 3.1 1^{er} niveau d'optimisation | 13 |
| 3.2 2^e niveau d'optimisation | 13 |
| 4 RECOMMANDATIONS..... | 15 |

OBJET

L'objet de cette note est de présenter l'analyse de la récupération de l'énergie de freinage des rames du système tramway.

GLOSSAIRE ET DEFINITIONS

GLOSSAIRE

| Abréviations | Définitions |
|--------------|--|
| A | Ampère |
| BT | Basse tension |
| ca ou ~ | Courant alternatif |
| cc ou = | Courant continu |
| CEE | Centre d'exploitation et d'entretien |
| GLO | Gabarit Limite d'Obstacle |
| HQ | Hydro Québec |
| 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 |
| RTC | Réseau de transport de la Capitale |
| SST | Sous Station Traction |
| V | Volt |

DEFINITIONS

| | |
|---------------------------|--|
| 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 PRESENTATION GENERALE

Le freinage ou décélération des rames de tramway, implique des enjeux énergétiques significatifs.

Les rames de tramway sont équipées de différents systèmes de freinage :

- un système de freinage mécanique sécuritaire « conventionnel » (Généralement de type freins à disques);
- un système de freinage sécuritaire complémentaire permettant de réduire les distances d'arrêt, en cas de freinage d'urgence. Ce système est généralement basé sur la technologie des patins magnétiques embarqués;
- Un système de freinage électrique. Lors des freinages ou décélérations, les moteurs sont utilisés en générateur d'énergie électrique, ce qui exerce un effort de freinage.

Les 2 premiers systèmes de freinage sécuritaire sont obligatoires et aucune latitude n'est possible du point de vue récupération d'énergie.

La suite de cette note traite du système de freinage électrique.

2 PRESENTATION DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

Le système de freinage électrique est généralement utilisé en priorité pour le matériel roulant de conception récente. Il permet de réduire l'utilisation et donc l'usure du système de freinage mécanique conventionnel.

Pour cela tout ou partie de la chaîne de traction embarquée est réversible. Lors des freinages ou décélérations, les moteurs sont utilisés en générateur d'énergie électrique, ce qui exerce un effort de freinage.

La réversibilité de la chaîne de traction embarquée est systématiquement proposée par les constructeurs de matériel roulant. Elle permet de réduire l'usage et donc l'usure du système de freinage mécanique.

L'énergie électrique générée peut être :

- dissipée dans les rhéostats embarqués sur le matériel roulant;
- réinjectée sur la ligne aérienne de contact (afin d'être absorbée par un consommateur potentiel se trouvant à proximité);
- stockée à bord du matériel roulant, si la rame est équipée d'un tel système de stockage.

2.1 RHEOSTATS EMBARQUES

Les rhéostats embarqués permettent de limiter l'utilisation du freinage mécanique. Cette solution est proposée par de nombreux constructeurs.

2.2 REINJECTION SUR LA LIGNE AERIENNE

Lors d'un freinage de service, la rame réinjecte de l'énergie électrique sur la ligne aérienne de contact. Cette énergie est utilisée par les autres rames circulant à proximité.

Une régulation de la réinjection est faite à bord de la rame pour limiter l'élévation de tension de la ligne aérienne de contact.

Lorsque que la ligne aérienne n'est pas suffisamment « réceptive » (pas ou peu de rames à proximité) par rapport à la puissance de freinage réinjectée, le système de régulation embarquée intervient pour limiter la puissance réinjectée ou stopper la réinjection. La différence ou la totalité de puissance est alors dissipée dans les rhéostats embarqués.

Le cas où la ligne aérienne de contact n'est pas suffisamment réceptive apparaît principalement en heures creuses d'exploitation du tramway, lorsque l'intervalle entre rames est important.

2.2.1 Régulation matériel roulant

Le premier niveau d'optimisation de la récupération de l'énergie de freinage porte sur cette fonction de régulation embarquée. La mise en œuvre d'une régulation complète permet un gain significatif (injection sur la LAC jusqu'à la tension de régulation et dissipation du surplus de puissance dans les rhéostats embarqués).

Cette fonctionnalité est désormais proposée par plusieurs constructeurs de matériel roulant.

2.2.2 Réceptivité de la LAC

Pour améliorer la réceptivité de la LAC, les solutions technologiques disponibles sont :

- la réduction de la résistance linéique de la LAC;
- la récupération d'énergie dans les sous stations traction.

La réduction de la résistance linéique de la LAC est faite par augmentation de la section de cuivre équivalente. Cette réduction permet de limiter les chutes de tension et donc d'augmenter la distance d'échange de puissance entre rames.

L'expérience montre que c'est la puissance absorbée par les rames en phase de traction qui est dimensionnant pour déterminer la section de cuivre équivalente de la ligne aérienne, car les sollicitations en phase de traction sont plus importantes (en énergie, en occurrences, en nombre de rames en simultanées). Ce dimensionnement sur les phases de traction englobe de facto le cas du freinage par réinjection.

La récupération de l'énergie de freinage dans les sous stations peut être réalisée :

- par la mise en œuvre d'un groupe traction réversible.

L'énergie est alors réinjectée sur le réseau MT :

- par stockage de l'énergie avec un dispositif de régulation de tension.

Lorsque la tension en sous station augmente (freinage d'une rame), l'énergie est stockée dans un dispositif spécifique. Lorsque la tension redescend en-dessous de la tension du groupe redresseur, l'énergie est réinjectée.

Sous station réversible

Pour les groupes redresseurs (Conversion de l'énergie MT → traction), la technologie la plus robuste et offrant également le meilleur ratio coût/disponibilité de l'installation de production traction est la technologie transformateur/redresseur à diode.

Pour rendre un groupe redresseur réversible, cela peut être réalisé par :

- utilisation d'un groupe redresseur convention à diode (Conversion de l'énergie MT → traction) et rajout d'un onduleur monté en anti parallèle (Conversion de l'énergie traction → MT);
- utilisation d'un groupe réversible intégré.

Plusieurs constructeurs proposent désormais des groupes redresseurs réversibles correspondant à l'une ou l'autre des technologies mentionnées ci-dessus.

En ordre de grandeur, le coût d'investissement d'une sous station réversible est de l'ordre +10 à +15 % par rapport à une sous station classique non réversible.

Stockage d'énergie en sous station

Le principe d'accumulation électromécanique (volant d'inertie), consiste à stocker de l'énergie provenant des freinages par récupération des rames.

La charge est faite via un convertisseur fonctionnant avec une régulation de tension. Lorsque la tension à la sous station dépasse la tension à vide du redresseur, la puissance est injectée dans l'accumulateur. Ensuite, lorsque la tension à la sous station repasse en-dessous d'un seuil, l'énergie est réinjectée sur la ligne aérienne de contact.

Pour le stockage, l'énergie peut être emmagasinée dans des accumulateurs de type :

- électromécaniques (volant d'inertie);
- capacitifs (super-capacités).

Accumulateurs électromécaniques - Volant d'inertie

Le principe d'accumulation électromécanique (volant d'inertie), consiste à stocker de l'énergie mécanique dans une masse tournante. Le volant d'inertie est entraîné par une machine électrique réversible (moteur/alternateur). Il tourne à haute vitesse.

En phase de stockage, l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique. En phase de déstockage, l'énergie mécanique est reconvertie en énergie électrique.

L'encombrement de ce dispositif reste raisonnable par rapport à la superficie habituelle d'une sous station de traction.

Les fabricants annoncent une durée de vie de l'ordre de 20 à 30 ans.

Des précautions sont à prendre lors de la maintenance de ce système puisqu'il met en œuvre des masses importantes à des vitesses élevées. Les volants d'inertie requièrent une maintenance importante due notamment à la masse et la vitesse élevées des pièces en rotation.

Des progrès ont été réalisés ces dernières années en termes de :

- gain de volume;
- réduction des pertes par rotation dans le vide;
- moteur/générateur intégré;
- paliers magnétiques.

Cependant des problèmes liés à la vitesse de rotation importante subsistent.

Accumulateurs capacitifs (super-capacités)

Les super-capacités (ou super-condensateurs) sont des réservoirs capacitifs pouvant assurer des échanges denses de courant. Ils autorisent des charges et décharges très rapides (quelques secondes), complètes ou partielles.

Les principaux inconvénients de super-capacités résident dans les fuites, qui limitent la durée de stockage et augmentent les pertes joules, ainsi que dans l'emploi de composants chimiques qui limitent leur durée de vie.

Cependant ces composants ont une durée de vie 50 à 100 fois supérieure aux accumulateurs électrochimiques (batterie).

La durée de vie d'un système à base de super-condensateurs est estimée à environ 15 ans.

Compte tenu des dispositifs à mettre en place pour assurer un refroidissement efficace des super-capacités (souvent à base de ventilateurs), une attention particulière devra être apportée sur l'augmentation éventuelle du niveau de bruit.

Le fonctionnement du système étant entièrement électrique, la super-capacité nécessite moins de maintenance qu'un système mécanique, comme le volant d'inertie. La maintenance porte principalement sur les ventilateurs et des contrôles.

Les études technico-économiques réalisées sur plusieurs projets montrent que la durée d'amortissement de l'investissement pour l'installation de super-capacité correspond approximativement à la durée de vie des super-capacités. Il n'y a donc pas de retour sur investissement.

Les études et développement en cours sur les super-capacités dans le domaine de l'automobile, peuvent faire évoluer cette technologie dans les prochaines années, et notamment le coût de fabrication.

2.3 STOCKAGE A BORD DU MATERIEL ROULANT

Pour le stockage d'énergie à bord du matériel roulant, les technologies sont les mêmes que celles décrites précédemment pour les sous stations.

Néanmoins, l'installation en embarqué, implique des contraintes supplémentaires, tel que la masse et le volume.

Pour plus d'information, le lecteur est invité à consulter la note technique « systèmes d'alimentation traction » référence 610879-0010-4REN-0002, jointe en annexe au rapport d'étape 1.1; document qui décrit en détail le stockage d'énergie à bord du matériel roulant.

2.4 SYNTHÈSE SUR LES TECHNOLOGIES

Chacune des technologies présentées porte en elle ses propres risques pour le maître de l'ouvrage. Ceux-ci peuvent être de nature :

- **technique**, liés à la nature intrinsèque de la technologie et au niveau de développement du produit, par rapport aux conditions spécifiques qu'il rencontrera sur le réseau de Québec;
- **industriel**, en fonction du nombre des industriels impliqués dans ces développements ou industrialisation (possibilité d'organiser une concurrence ou systèmes « exclusifs »);
- **temporel**, en fonction de compatibilité des programmes de développement avec le planning de mise en service des lignes de Québec et de Lévis;
- **contractuel**, liés à la difficulté d'organiser une réelle concurrence dans le cadre d'un appel d'offres;
- **administratif**, en relation avec les procédures d'homologation de chaque système;
- **financier**, en fonction, pour certains de ces systèmes, de la difficulté d'appréciation des coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance.

Il est à noter que ces risques sont étroitement liés et que chacun est la cause, la conséquence ou même la combinaison d'un certain nombre d'autres risques.

Le tableau ci-dessous présente une synthèse des risques pour les différentes technologies.

Tableau 1 : Synthèse des risques pour les différentes technologies

| | Technique | Industriel | Temporel | Contractuel | Administratif (homologation) | Financier |
|--|-----------|------------|----------|-------------|------------------------------|-----------|
| MR : Rhéostats embarqués | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| MR : Réinjection sur LAC | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| MR : Réinjection optimisée sur LAC | * | * | 0 | 0 | 0 | * |
| SST réversible (redresseur + onduleur) | -- | -- | -- | -- | -- | * |
| SST réversible (intégrée) | * | * | -- | -- | -- | * |
| SST avec volant d'inertie | ** | ** | ** | -- | * | * |
| SST avec super-capacité | * | * | * | -- | -- | * |
| MR avec volant d'inertie | ** | ** | ** | -- | * | ** |
| MR avec super-capacités | ** | -- | * | -- | -- | * |
| MR avec batteries électrochimiques | *** | -- | * | -- | -- | * |

*** Risques importants ** Risques moyens * Risques faibles -- Neutre
 0 Solution de référence

3 TRAMWAY DE QUEBEC

Les enjeux en termes énergétiques du freinage par récupération dépendent de la configuration de la ligne, de l'exploitation ainsi que de la marche type de circulation des rames.

3.1 1^{ER} NIVEAU D'OPTIMISATION

Le 1^{er} niveau d'optimisation énergétique pour le freinage par récupération concerne le matériel roulant; et plus particulièrement la gestion du freinage.

Le système de régulation de freinage doit donner la priorité à la réinjection sur la LAC. En cas d'atteinte de la tension maximale, la réinjection dans la LAC doit être régulée, et seul le surplus d'énergie doit être dissipé dans les rhéostats de freinage embarqués. Pour les freinages de service, le freinage mécanique ne devra intervenir qu'en dernier lieu.

3.2 2^E NIVEAU D'OPTIMISATION

Le tracé retenu pour le tramway comporte plusieurs zones avec de forte pente et des dénivelées importantes. Les plus significatives sont localisées :

- branche Sud;
- zone de Nérée-Tremblay.

L'énergie de freinage sur ces zones va être très importante. Pour être efficace, les dispositifs de récupération de l'énergie de freinage doivent donc pouvoir recevoir une quantité d'énergie très importante.

Cette particularité, rend les solutions technologiques avec stockage de l'énergie à bord du matériel roulant peu compétitives. En embarqué, il est en effet difficile d'obtenir des capacités de stockage élevées compte tenu des problématiques d'encombrement et de masse. Lesquelles masses requièrent un surcoût d'énergie pour être transportées !

Pour ces zones en forte pente/dénivelée, les solutions technologiques les plus efficaces sont les sous-stations réversibles par onduleur relié au réseau haute tension amont. Ces solutions sont basées sur le principe d'échange de puissance instantané (critère dimensionnant des installations). La notion d'énergie (intégrant la durée) intervient très peu dans le dimensionnement, hormis en cas de surcharge exceptionnelle.

Ce système est donc opérationnel quel que soit la configuration d'exploitation, même dans le cas de plusieurs circulations de rames consécutives à la descente (cas quotidien des débuts et fin de service d'exploitation par exemple).

La solution onduleur est maîtrisée, peu risquée, infiniment récupératrice, demandant peu de maintenance, contrairement à d'autres solutions fixes comme les super-capacités ou les volants d'inertie. Elle est mise en œuvre depuis plus de 10 années sur des réseaux tramway et métro (en France : Strasbourg, Lyon notamment).

Sa mise en œuvre sur le projet de tramway des villes de Québec et Lévis ne sera envisageable qu'avec un changement du cadre réglementaire et tarifaire d'Hydro Québec. Selon le cadre réglementaire et tarifaire actuel, la réinjection dans le réseau n'est pas permise pour le type de raccordement nécessaire pour une sous-station réversible (La réinjection n'est envisageable que pour les clients résidentiels).

4 RECOMMANDATIONS

Afin d'obtenir une très bonne efficacité énergétique pour la récupération de l'énergie de freinage des rames, nous recommandons de mettre en œuvre la solution technologique suivante :

- la réinjection sur la Ligne Aérienne de Contact.

Nous recommandons également que le matériel roulant soit équipé de rhéostat de freinage embarqué pour assurer une très bonne disponibilité du freinage électrique.