



Titre: Alimentation traction du métro de Montréal
Title:

Auteur: Pierre Bertin
Author:

Date: 2004

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Bertin, P. (2004). Alimentation traction du métro de Montréal [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/7342/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7342/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Guy Olivier
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

NOTE TO USERS

This reproduction is the best copy available.

UMI[®]

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ALIMENTATION TRACTION DU MÉTRO DE MONTRÉAL

PIERRE BERTIN

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES (M.Sc.A)**

(GÉNIE ÉLECTRIQUE)

NOVEMBRE 2004



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 0-494-01284-6

Our file Notre référence

ISBN: 0-494-01284-6

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ALIMENTATION TRACTION DU MÉTRO DE MONTRÉAL

Présenté par : BERTIN Pierre

En vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

A été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. Olivier Guy, Ph.D, membre et directeur de recherche

M. Gilles Roy, D.Sc.A, président

M. Georges-Émile April, M. Sc, membre

À tous ceux et celles qui évoluent de près ou de loin dans le domaine de la traction, en espérant que ce mémoire peut apporter une quelconque contribution, même modeste, à l'avancement des connaissances dans le domaine.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire de maîtrise.

Plus particulièrement, j'aimerais exprimer ma reconnaissance à mon directeur de recherche, le professeur Guy Olivier de la section électrotechnique de l'École Polytechnique de Montréal, qui a su judicieusement me diriger tout au long de ce travail.

Des remerciements aussi pour leurs conseils judicieux et leur disponibilité à mes confrères de travail, Yvon Renaud et André Sickini tous deux techniciens traction à la STM depuis plus de 25 ans.

Finalement, j'aimerais remercier ma conjointe France ainsi que mes fils Hugues et Cédric pour leur encouragement et leur soutien.

RÉSUMÉ

Le but de ce travail est de décrire les fonctions, les équipements et les particularités requises pour distribuer l'alimentation traction aux matériels roulants du métro de Montréal. Un autre aspect du travail consiste à calculer les distributions des courants et des tensions, les échauffements des redresseurs et des câbles traction installés dans les postes de redressement.

À partir des caractéristiques des équipements traction installés dans les postes de redressement existants, les équipements traction requis sont présentés par fonction. Les principes des distributions haute et basse tension sont étudiés pour comprendre leurs particularités. À partir des caractéristiques des deux modèles de trains utilisés au métro de Montréal, les appels de courants requis sont également analysés.

Suite à ce travail, les fiches techniques complètes des équipements requis sont présentées ainsi que leurs photos. Les calculs des distributions des courants, des tensions et les calculs d'échauffement pour tous les groupes transformateurs redresseurs sont présentés. Des calculs de partage de charge et des calculs d'échauffement de câbles sont également présentés. Les relais assurant les différentes protections des équipements traction sont présentés selon que le relais travail en tension ou en courant. Des mesures typiques d'appel de puissance d'un poste de redressement sont également présentées.

Finalement, des vigies technologiques réalisées auprès d'autres métros et auprès des fournisseurs du domaine traction sont présentées afin de valider les tendances des nouveaux équipements fixes pour l'alimentation traction.

ABSTRACT

The purpose of this work is to describe functions, equipments and the particularities required to supply the energy to trains of the Montreal's metro. The purpose of this work is also to get current and voltage distribution, heat rise of rectifier and traction cable installed inside existing power rectifier substation.

Based on characteristics of the equipment installed, the equipment required are presented by their function. High and low voltage distribution rule are analysis to understand their special feature. Inrush current of existing train are also analysis.

Result of this work, all equipment characteristics are shown with their picture. Current and voltage distribution are calculated. Heat run are made for transformer rectifier group. Load current and heat rise of cable are also calculated. Relay used for the protection of traction equipment are presented accordingly to their voltage or current sensing. Typical measurements of power rectifier are presented.

Survey with traction supplier and other metro are made to find out new equipment used to supply power to the train.

TABLES DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	V
RÉSUMÉ.....	VI
ABSTRACT	VII
TABLES DES MATIÈRES.....	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES	XVIII
LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES	XXII
LISTE DES ANNEXES.....	XXXII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1- CONFIGURATION DU METRO DE MONTREAL	3
CHAPITRE 2 - DESCRIPTION DES PRINCIPALES FONCTIONS.....	6
2.1 LES FONCTIONS DE BASE	7
2.1.1 Acheminer l'alimentation aux postes de redressement.	7
2.1.2 Abaisser l'alimentation dans les postes de redressement	8
2.1.3 Redresser en courant continu.....	10
2.1.4 Acheminer l'alimentation aux trains.....	11

2.2 LES FONCTIONS D'ENTRETIEN DES ÉQUIPEMENTS FIXES	13
2.2.1 Les équipements requis pour fin d'entretien.....	13
2.3 LES FONCTIONS DE PROTECTION	14
2.3.1 Les protections équipements	15
2.3.2 Les protections aux personnels - clients	20
2.4 LES FONCTIONS D'EXPLOITATION.....	22
2.4.1 Flexibilité d'exploitation augmentée.....	22
2.5 LES FONCTIONS D'ENTRETIEN DES TRAINS.....	28
CHAPITRE 3 – ANALYSES DES NORMES DU BTM.....	29
3.1 DISTANCE MAXIMALE PERMISE ENTRE DEUX POSTES DE REDRESSEMENT	30
3.2 LOCALISATION DES POSTES DE REDRESSEMENT.....	31
3.3 ALTERNANCE DES PONTS HAUTE TENSION.....	31
3.4 NOMBRE DE CÂBLES TRACTION VERS LES VOIES.....	32
3.5 CAPACITÉ DES GROUPES TRANSFORMATEURS REDRESSEURS.....	33
CHAPITRE 4 – LES TRAINS MR-63 ET MR-73.....	38
4.1 DESCRIPTION DES TRAINS	39
4.2 FROTTEURS POSITIFS, NÉGATIFS ET DE MASSE.....	41
4.2.1 Configuration des frotteurs	41
4.2.2 Distance entre deux frotteurs positifs.....	41
4.3 TYPE DE COMMUTATEUR ET COURANTS DE DÉMARRAGE	43
4.3.1 Modèle MR 63.....	43
4.3.2 Modèle MR 73.....	48

CHAPITRE 5 – PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DES XFO/RED.....	53
5.1 LE TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE	54
5.1.1 Les technologies utilisées	54
5.1.2 Particularités de construction	60
5.1.3 Impédances des transformateurs.....	66
5.2 CALCULS DES GROUPES TRANSFORMATEURS REDRESSEURS	67
5.2.1 Les impédances, chutes de tension, tensions et courants	67
5.2.2 Les échauffements des redresseurs	73
CHAPITRE 6 CALCULS LIGNE 4 ET CALCULS D’ECHAUFFEMENT	78
6.1 CALCULS SUR LA LIGNE 4	79
6.1.1 Configuration de la ligne 4	79
6.1.2 Calculs au point de mesure n°1 (ou n°8).....	82
6.2 CALCULS DES TEMPÉRATURES DES CÂBLES.....	85
6.2.1 TEMPERATURES DU CABLE HAUTE TENSION.....	85
6.2.2 TEMPERATURES DES CABLES TRACTION.....	88
6.3 CALCUL DU COURANT DE FAUTE SUITE À L’INCIDENT SHERBROOKE.....	92

CHAPITRE 7 – PROTECTIONS	93
7.1 LES PROTECTIONS EN COURANT.....	94
7.1.1 Le disjoncteur de voie	94
7.1.2 Le relais de surintensité (50/51)	96
7.1.3 Le relais basse impédance (BI).....	96
7.1.4 Le relais à accroissement de courant dans le temps (di/dt)	97
7.1.5 Le relais courant inverse (#32).....	100
7.1.6 Le fusible installé sur la diode ou sur la varistance	101
7.2 LES PROTECTIONS EN TENSION	101
7.2.1 Le relais haute impédance	101
7.2.2 Détecter à l'alimentation les fautes sur les voies	104
7.3 LES DÉCLENCHEMENTS EN SÉQUENCE.....	106
7.3.1 Séquences des déclenchements des postes du dernier prolongement.....	106
7.3.2 Séquences des déclenchements des postes du réseau initial	120
CHAPITRE 8 – MESURES OBTENUES	126

CHAPITRE 9 - VIGIES TECHNOLOGIQUES.....	131
9.1 NOUVEAUX ÉQUIPEMENTS	132
9.1.1 Les équipements d'isolation	132
9.1.2 Les transformateurs de puissance	132
9.1.3 Les redresseurs	132
9.1.4 Les disjoncteurs de voie	132
9.1.5 Les trains.....	135
9.2 PRINCIPE D'ALIMENTATION TRACTION	135
9.3 NOMBRE DE DISJONCTEUR DE VOIE	136
9.4 COUPLAGE DU GROUPE TRANSFORMATEUR REDRESSEUR	136
CHAPITRE 10 - CONCLUSIONS.....	137
BIBLIOGRAPHIE.....	139
ANNEXES.....	150

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1-Capacité de surcharge.....	8
Tableau 3.1 -Distances entre les postes de redressement selon les réseaux.....	30
Tableau 3.2 - Alternance de l'alimentation des postes de redressement.....	31
Tableau 3.3 - Classe de redresseur selon CEI 146	33
Tableau 3.4 - Classe de transformateur selon NEMA RI-9	34
Tableau 4.1 - Paramètres des deux modèles de trains.....	40
Tableau 5.1 – Dimensions et poids selon les différentes technologies	58
Tableau 5.2 – Avantages et inconvénients selon les différentes technologies	59
Tableau 5.3 – Impédances des transformateurs	66
Tableau 5.4 – Intrants des groupes XFO/RED 1985.....	67
Tableau 5.5 – Tension à pleine charge du groupe XFO/RED	71
Tableau 5.6 – Intrants des redresseurs prolongés	73
Tableau 5.7 – Pertes dans les diodes selon la charge	74
Tableau 5.8 – Température des 6 diodes	75
Tableau 5.9 – Température des 5 diodes	75
Tableau 5.10 – Intrants des redresseurs 1966	76
Tableau 5.11 – Température des 7 diodes (1966)	76

Tableau 6.1 - Ligne 4 - Résistances par voie	81
Tableau 6.2 - Ligne 4 – Courants de faute sans L.E.	83
Tableau 6.3 - Ligne 4 – Courants de faute avec L.E.....	83
Tableau 6.4 - Ligne 4 – Courants d'un train sans L.E.....	84
Tableau 6.5 - Ligne 4 – Courants d'un train avec L.E.....	84
Tableau 6.6 – Paramètres techniques de 3c #2/0 AWG 28 kV	86
Tableau 6.7 – Températures de 3c #2/0 AWG	87
Tableau 6.8 – Paramètres techniques du conducteur 500 kmils	88
Tableau 6.9 – Températures de 4c 500 kmils	89
Tableau 6.10 – Températures de 3c 500 kmils.....	90
Tableau 6.11 – Températures de 8c 500 kmils.....	91
Tableau 7.1 - Séquences du EDL	105
Tableau 7.2 – Commande de fermeture du IHTM	107
Tableau 7.3 – Commande d'ouverture du IHTM	108
Tableau 7.4 – Avaries légères et graves du transformateur.....	109
Tableau 7.5 – Avaries légères et graves du redresseur.....	110
Tableau 7.6 – Commande d'ouverture du SPM	112
Tableau 7.7 – Commande de fermeture du SPM	113

Tableau 7.8 – Avaries légères et graves terre	114
Tableau 7.9 – Protections des autres avaries graves	116
Tableau 7.10 – Protections permettant un réenclenchement	117
Tableau 7.11 – Regroupement des avaries légères	118
Tableau 7.12 – Regroupement des avaries graves	119
Tableau 7.13 – R.I. – Avaries légères et graves du transformateur.....	120
Tableau 7.14 – R.I. – Avaries sectionneur six phases	120
Tableau 7.15 – R.I. – Avaries graves du redresseur	121
Tableau 7.16 – R.I. – Avaries des auxiliaires	122
Tableau 7.17 – R.I. – Avaries grave terre	123
Tableau 7.18 – R.I. - Avaries groupe	124
Tableau 7.19 – R.I. – Avaries ligne	125
Tableau 9.1 – Comparaisons des disjoncteurs traction disponibles Secheron	133
Tableau 9.2 – Comparaisons des autres disjoncteurs traction disponibles	134
Tableau A1.1 - Caractéristiques des disjoncteurs haute tension.....	152
Tableau A1.2 - Caractéristiques des câbles haute tension.....	153
Tableau A1.3 - Caractéristiques des IHT, IHTM, SHT.....	154
Tableau A1.4 - Caractéristiques des transformateurs de puissance.....	155

Tableau A1.5 - Caractéristiques des redresseurs.....	156
Tableau A1.6 - Caractéristiques des diodes des redresseurs.....	157
Tableau A1.7 - Caractéristiques des sectionneurs traction.....	158
Tableau A1.8 - Caractéristiques des disjoncteurs de voie.....	158
Tableau A1.9 - Caractéristiques des câbles traction.....	159
Tableau A1.10 - Caractéristiques des contacteurs traction.....	159
Tableau A1.11 - Caractéristiques des protections.....	160
Tableau A1.12 - Caractéristiques des onduleurs du métro.....	162
Tableau A4.1 - Les postes de redressement sur la ligne 1.....	208
Tableau A4.2 - Les postes de redressement sur la ligne 2.....	209
Tableau A4.3 - Les postes de redressement sur la ligne 4.....	210
Tableau A4.4 - Les postes de redressement sur la ligne 5.....	210

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 CARTE DU RESEAU METRO.....	5
FIGURE 2.1 ARRANGEMENT BARRE DE GUIDAGE ET RAIL DE RETOUR.....	12
FIGURE 2.2 SELLE ISOLANTE SOUS LE RAIL NEGATIF.....	22
FIGURE 2.3 ALIMENTATION PAR VOIE ET PAR SECTION	24
FIGURE 2.4 CONFIGURATION EN T OU EN PI.....	26
FIGURE 3.1 MVA EQUIVALENTS DES TRANSFORMATEURS	36
FIGURE 3.2 MW EQUIVALENTS DES REDRESSEURS.....	37
FIGURE 4.1 COUPON NEUTRE PONTE.....	42
FIGURE 4.2 COURANT DE DEMARRAGE D'UNE MOTRICE MR-63.....	44
FIGURE 4.3 COURANT DE DEMARRAGE D'UN TRAIN MR-63.....	45
FIGURE 4.4 DI/DT D'UN TRAIN MR-63.....	47
FIGURE 4.5 COURANT DE DEMARRAGE D'UNE MOTRICE MR-73.....	49
FIGURE 4.6 COURANT DE DEMARRAGE D'UN TRAIN MR-73.....	50
FIGURE 4.7 DI/DT D'UN TRAIN MR-73.....	52
FIGURE 5.1 FAIBLE COUPLAGE $K=0.20$	61
FIGURE 5.2. COUPLAGE $K=0$	62
FIGURE 5.3 FORT COUPLAGE $K=1$	63
FIGURE 5.4 COUPLAGE CAPACITIF.....	65
FIGURE 6.1 ALIMENTATION TRACTION DE LA LIGNE 4.....	80
FIGURE 7.1 PROTECTION BASSE ET HAUTE IMPEDANCE.....	102
FIGURE 8.1 PROFIL DE CHARGE TYPIQUE DU PD SNOWDON (T=1 HRE).....	127
FIGURE 8.2 PROFIL DE CHARGE TYPIQUE DU PD SNOWDON (T=11 MIN.).....	128

FIGURE 8.3 MW DU PR CHABANEL (T=5 JOURS).....	129
FIGURE 8.4 MW DU PR CHABANEL (T=1 JOUR).....	130
FIGURE A2.1 SCHEMA UNIFILAIRE RESEAU 1982-85.....	164
FIGURE A2.2 SCHEMA UNIFILAIRE RESEAU 1976	165
FIGURE A2.3 SCHEMA UNIFILAIRE RESEAU 1966	166
FIGURE A3.1 DHT 25 KV, 630 A (ST-MICHEL ET SNOWDON 1982, 85)).....	168
FIGURE A3.2 DHT 12 KV, 1250 A (LIONEL GROULX, DICKSON 1976)	169
FIGURE A3.3 DHT 12 KV, 630 A (PD PROVIDENCE 1966)	170
FIGURE A3.4 CABLES XLPE 25 KV, 3C #2/0 AWG (1982, 85).....	171
FIGURE A3.5 CABLES XLPE 12 KV, 3C #4/0 AWG (1976).....	171
FIGURE A3.6 CABLES PILC 12 KV, 3C #4/0 AWG (1966)	172
FIGURE A3.7 LE IHTM 25 KV, 400 A (1982, 85).....	173
FIGURE A3.8 LE IHT 12 KV, 400 A (1976)	174
FIGURE A3.9 LE SHT 12 KV, 400 A (1966)	174
FIGURE A3.10 XFMR 2840 KVA HUILE (1982, 85)	175
FIGURE A3.11 XFMR 2840 KVA HUILE (1976)	176
FIGURE A3.12 XFMR 2700 KVA HUILE (1966)	176
FIGURE A3.13 XFMR 2700 KVA EPOXYDE	177
FIGURE A3.14 REDRESSEURS 72 DIODES (1976, 82, 85)	178
FIGURE A3.15 REDRESSEURS 84 DIODES (1966)	179
FIGURE A3.16 CINQ BRAS DU REDRESSEUR (1966).....	179
FIGURE A3.17 L'INDUCTANCE D'ÉQUILIBRE (IPT) RESEAU 1966.....	180
FIGURE A3.18 DIODES DSA ET 5DSA (1976, 82 ET 85).....	181
FIGURE A3.19 DIODES SSI (1966).....	181

FIGURE A3.20 SPM ET 4 DV'S (1976, 82 ET 85).....	182
FIGURE A3.21 SECTIONNEUR SIX PHASES (1966).....	182
FIGURE A3.22 SN (1976, 1982 ET 1985).....	183
FIGURE A3.23 SP ET SN (1966).....	183
FIGURE A3.24 QUATRE UR36 ET UN SPM (1976, 82 ET 85).....	184
FIGURE A3.25 UR36 (1982 ET 85).....	184
FIGURE A3.26 UR236 (1966).....	185
FIGURE A3.27 UN GBJ8 (1976).....	185
FIGURE A3.28 CABLES 500 KCMILS.....	186
FIGURE A3.29 LE CCN (1976, 82 ET 85).....	187
FIGURE A3.30 LE CS (1966).....	187
FIGURE A3.31 PSA (1976, 82 ET 85).....	188
FIGURE A3.32 LE PANNEAU DE CONTRÔLE (1966)	188
FIGURE A3.33 RELAIS 50/51 GDG54 (ST-MICHEL ET SNOWDON).....	189
FIGURE A3.34 RELAIS 50/51 IAC (DICKSON ET LIONEL GROULX).....	190
FIGURE A3.35 INDICATEUR DE TEMPERATURE D'HUILE (1976, 82 ET 85).....	191
FIGURE A3.36 RELAIS PRESSION SOUDAINE (XFMR HUILE)	192
FIGURE A3.37 INDICATEUR DE TEMPERATURE (XFMR EPOXYDE).....	193
FIGURE A3.38 FUSIBLE FERRAZ 500 A (1976, 82 ET 85).....	194
FIGURE A3.39 PERCUTEUR (1976, 82 ET 85).....	194
FIGURE A3.40 FUSIBLE FERRAZ 315 A (1966).....	195
FIGURE A3.41 RELAIS COURANT INVERSE (1976).....	196
FIGURE A3.42 VARISTANCE	197
FIGURE A3.43 RELAIS BASSE IMPEDANCE (BI) (1976, 82 ET 85).....	198

FIGURE A3.44 RELAIS BASSE IMPEDANCE (BI) (1966).....	198
FIGURE A3.45 RELAIS HAUTE IMPEDANCE (HI) (1982 ET 85).....	199
FIGURE A3.46 RELAIS HAUTE IMPEDANCE (HI) (1976).....	200
FIGURE A3.47 RELAIS DDL ACA (1982, 85).....	201
FIGURE A3.48 RELAIS PCC E67 (1976).....	201
FIGURE A3.49 SEPCOS (2000).	202
FIGURE A3.50 RUPTEUR	203
FIGURE A3.51 DMM	204
FIGURE A3.52 COUPON NEUTRE	204
FIGURE A3.53 LIMITEUR DE TENSION.....	205
FIGURE A3.54 UN TRAIN MR-73.....	206

LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES

LISTES DES SYMBOLES

A_{xfo} :	Rapport de transformation du transformateur de puissance
A :	Section du conducteur.
α_0 :	Coefficient de température d'un conducteur fait de cuivre à une température de 0 °C.
C :	Capacitance par phase de chaque conducteur haute tension.
C_{H1-h1} :	Couplage capacitif entre les enroulements «haute tension phase 1» et «basse tension phase 1» du transformateur.
C_{H1-t} :	Couplage capacitif entre l'enroulement «haute tension phase 1» et «la terre» d'un transformateur.
C_p :	Facteur de dégagement de chaleur spécifique du cuivre, égal à 383 J/(kg*K).
D :	Diamètre du conducteur exprimé en mètre.
ΔT_{sa} :	Augmentation de température entre l'échangeur d'air «heat sink», sur lequel la diode est montée et l'air ambiant.
ΔT_{js} :	Augmentation de température entre l'échangeur d'air «heat sink», sur lequel la diode est montée et la jonction de la diode.
ΔV_{diode} :	Chute de tension attribuée aux diodes.
$\Delta V_{fusible}$:	Chute de tension attribuée aux fusibles.
ΔV_{red} :	Chute de tension attribuée au jeu de barres du redresseur.

ΔV_{Rxf0} :	Chute de tension résistive dans le transformateur.
ΔV_{Xxf0} :	Chute de tension réactive dans le transformateur.
E_d :	Tension nominale à pleine charge aux bornes du redresseur du côté continu.
E_{do} :	Tension à vide, aux bornes du redresseur du côté continu.
E'_{do} :	Tension à vide, aux bornes du redresseur six phases du côté continu.
E_{prim_pp} :	Tension primaire phase - phase aux bornes du transformateur du côté alternatif.
E_{so} :	Tension secondaire phase - phase à vide, aux bornes du redresseur du côté alternatif.
E_{spp} :	Tension secondaire phase - phase aux bornes du redresseur du côté alternatif.
E_{nom} :	Tension nominale à pleine charge aux bornes du redresseur du côté continu.
f :	Fréquence nominale.
h_o :	Coefficient du transfert de température durant l'échauffement du câble exprimé en $W/m^2 \cdot ^\circ C$.
$\hat{i}_{as/diode}$:	Courant de court-circuit première crête sur une diode.
I_{bt} :	Courant au transformateur du côté basse tension.
I_{ca} :	Courant nominal du transformateur de puissance du côté basse tension.

I_{cct} :	Courant de court-circuit.
$I_{\text{cct_eff_sec}}$:	Courant de court-circuit efficace au secondaire du transformateur.
$I_{\text{cct}/2\text{s}}$:	Courant de court-circuit maximum pour une durée maximum de deux secondes.
I_{d} :	Courant nominal du redresseur du côté continu.
I_{ds} :	Courant de court-circuit soutenu au redresseur.
\hat{i}_{ds} :	Courant de court-circuit première crête au redresseur.
$I_{\text{d}150\%}$:	Courant de surcharge de 150% du courant nominale du redresseur du côté continu.
$I_{\text{d}300\%}$:	Courant de surcharge de 300% du courant nominale du redresseur du côté continu.
$I_{\text{d}450\%}$:	Courant de surcharge de 450% du courant nominale du redresseur du côté continu.
$I_{\text{eff_bras}}$:	Courant efficace sur chaque bras de chaque redresseur.
$I_{\text{eff_diode_}\% \text{des}}$:	Courant efficace par diode multiplié par le facteur de déséquilibre.
$I_{\text{eff_prim}}$:	Courant efficace du transformateur côté primaire.
$I_{\text{eff_sec}}$:	Courant efficace du transformateur côté secondaire.
I_{FAVM} :	Valeur limite du courant moyen permanent de la diode.
I_{FRMS} :	Valeur du courant efficace maximum admissible en sens direct de la diode.

I_{FSM} :	Valeur limite du courant direct non répétitif de la diode.
I_{fu} :	Courant nominal du fusible.
I.G.B.T. :	Du terme anglais «Insulated gate bipolar transistor».
I_{HT} :	Courant du transformateur du côté haute tension.
I_{MAX} :	Courant maximum du conducteur qui varie selon le calibre du conducteur.
I_{moy_bras} :	Courant moyen sur chaque bras de chaque redresseur.
$I_{moy_diode_ \%des}$:	Courant moyen par diode multiplié du facteur de déséquilibre.
I_{nom} :	Courant nominal.
I_{seuil} :	Valeur du courant de seuil (de mise au travail) d'un relais ou d'un disjoncteur.
I^2t :	Charge maximum en courant.
I_r ou I_{RRM} :	Courant de coulage inverse de la diode.
I_{th} :	Courant thermique en régime continu du disjoncteur traction.
I_{th2h} :	Courant thermique d'une durée de deux heures du disjoncteur traction.
I_{th1h} :	Courant thermique d'une durée d'une heure du disjoncteur traction.
I_{th5min} :	Courant thermique d'une durée de cinq minutes du disjoncteur traction.
I_{th1min} :	Courant thermique d'une durée d'une minute du disjoncteur traction.

I_{th10s} :	Courant thermique d'une durée de dix secondes du disjoncteur traction.
k :	Facteur de couplage entre les enroulements basse tension du transformateur.
k_p :	Facteur de décalage crête lors d'un courant de faute.
kVA_{base} :	Puissance apparente de base.
kVA_{prim} :	Puissance apparente du transformateur au primaire.
kVA_{sec} :	Puissance apparente du transformateur au secondaire.
m :	Masse du conducteur de cuivre variant selon le calibre du conducteur.
$MVA_{eq.}$:	Puissance apparente équivalente pour une période de deux heures exprimée en MVA.
$MW_{eq.}$:	Puissance équivalente pour une période de deux heures exprimée en MW.
N_d :	Nombre de diode pour un redresseur.
$N_{diode/bras}$:	Nombre de diode en parallèle sur un bras.
$N_{opé.sentre}$:	Nombre de déclenchement mécanique d'un disjoncteur sans opération.
Ph :	Phase.
pu :	Par unité (traduction de «per unit»).
$P_{diode_7diodes}$:	Pertes de puissance sur une diode lorsque les sept diodes sont utilisées.

P_{nom} :	Puissance nominale.
P_{xfo} :	Pertes de puissance du transformateur.
P_{xfo_prim} :	Pertes de puissance par phase au primaire du transformateur.
P_{xfo_sec} :	Pertes de puissance par phase au secondaire du transformateur.
R_{base} :	Résistance de base exprimée en Ω .
R_{bus} :	Résistance du jeu de barre du redresseur exprimée en $\mu\Omega$.
R_c :	Résistance d'un conducteur exprimée en Ω ou résistance linéaire d'un conducteur exprimée en Ω/km .
ρ_o :	Résistivité du cuivre à 0 °C équivalent à 15,9 n Ω *m.
R_0 :	Résistance d'un conducteur à une température de 0 °C.
R_{25} :	Résistance d'un conducteur à une température de 25 °C.
R_{com} :	Résistance fictive de commutation.
r_F :	Résistance apparente directe de la diode.
$R_{temp.}$:	Résistance d'un conducteur à la température recherchée.
R_{thsa} :	Coefficient thermique entre l'échange d'air «heat sink» et l'air ambiant.
R_{thjs} :	Coefficient thermique entre l'air ambiant et la jonction.
$R_{xfo_tot.}$:	Résistance totale du transformateur.
$R_{xfo_prim.}$:	Résistance par phase du primaire du transformateur.

$R_{xfo_sec.}$:	Résistance par phase du secondaire du transformateur.
Θ_i :	Température du conducteur dû au courant I_i .
τ_{ho} :	Constante de temps durant l'échauffement du câble.
T :	Durée de la surcharge.
T_a :	Température ambiante.
T_j :	Température de la jonction de la diode.
T_{max} :	Température maximale du conducteur de cuivre qui est de 90 °C.
T_{ref} :	Température du conducteur avant la charge calculée.
T_s :	Température sur l'échangeur d'air «heat sink».
\hat{U}_{arc} :	Surtension de manœuvre produite suite à la séparation des contacts principaux d'un disjoncteur de voie ou d'un contacteur de coupon neutre.
U_{bt} :	Tension du transformateur du côté basse tension.
U_{HT} :	Tension du transformateur du côté haute tension.
U_{isol} :	Classe d'isolation.
U_{nom} :	Tension nominale.
V_{base} :	Tension de base.
V_{Fo} :	Tension de seuil d'une diode.
V_{RRM} :	Valeur limite de la tension inverse de pointe répétitive de la diode.

V_{AVAL} :	Tension minimale d'avalanche de la diode.
$W_{\text{cons/fer}}$:	Consommation de la bobine du disjoncteur traction à la fermeture.
$W_{\text{cons/mait.}}$:	Consommation de la bobine du disjoncteur traction en maintien.
X_I :	Réactance par phase des câbles haute tension.
X_{com} :	Réactance de commutation.
$X_{\text{xfo_prim.}}$:	Réactance primaire du transformateur.
$X_{\text{xfo_sec.}}$:	Réactance secondaire du transformateur.
$X_{\text{xfo_tot.}}$:	Réactance totale du transformateur.
Z_c :	Impédance de commutation.
$Z_{\text{cct_ohms}}$:	Impédance de court-circuit exprimée en ohms.
$Z_{\text{cct_pu}}$:	Impédance de court-circuit exprimée en p.u.
Z_{moy} :	Impédance de court-circuit moyenne du transformateur.
Z_{ohm} :	Impédance de court-circuit du transformateur exprimée en ohms.
Z_{pu} :	Impédance de court-circuit du transformateur exprimée en pu.
Z_p :	Impédance du transformateur ramené au primaire exprimée en p.u.
Z_s :	Impédance du transformateur au secondaire exprimée en p.u.
$Z_{\text{xfo_prim.}}$:	Impédance du transformateur au primaire.
$Z_{\text{xfo_sec.}}$:	Impédance du transformateur au secondaire.

Z_{xfo_tot} : Impédance totale du transformateur.

ACRONYMES

ANF :	Transformateur à sec à ventilation forcée
ANN :	Transformateur à sec à ventilation par convection naturelle
BI :	Relais basse impédance
CCN :	Contacteur de coupon neutre
CI :	Connexion inductive
CN :	Coupon neutre
COZ :	Condition d'ouverture de zone
CU :	Coupure d'urgence
CUAT :	Coupure d'urgence de l'alimentation traction
CZ :	Conditions de zone
DHT :	Disjoncteur haute tension
Di/dt :	Relais à accroissement de courant dans le temps.
DMM :	Dispositif de malt motorisé
DL :	Disjoncteur de ligne
DR :	Disjoncteur de raccordement
DS :	Disjoncteur de secours
DV :	Disjoncteur de voie
HI :	Relais haute impédance
IHT :	Interrupteur sous charge haute tension
IHTM :	Interrupteur sous charge haute tension motorisé
LE :	Liaison équipotentielle (installée sur le rail négatif)
LNAN, LNP :	Transformateur à l'huile (askarel- pyralène) à ventilation par convection d'air naturelle
LT :	Limiteur de tension
MALT :	Mise à la terre
MIL :	Mesure impédance ligne.

MIU :	Amplificateur de mesure isolé
MR-63 :	Matériel roulant 1963
MR-73 :	Matériel roulant 1973
MVA :	Méga volts ampère
MW :	Mégawatt
NIB :	Niveau d'isolation de base
ONAN :	Transformateur à l'huile à ventilation par convection d'air naturelle
PCM :	Poste de commande et de mesure
PD :	Poste de district
PHT :	Pont haut tension
PR :	Poste de redressement
PSA :	Panneau des services auxiliaires
PT :	Pont traction
RED :	Redresseur
SHT :	Sectionneur haute tension
STCUM :	Société de transport de la communauté urbaine de Montréal
STM :	Société de transport de Montréal
TI :	Transformateur de courant
TKA :	Câble pour asservir entre eux deux PR ou un PR et un appareil de ligne
TKC :	Câble pour contrôler les CCN à partir du PR
TKD :	Câble pour asservir le DHT à partir du PR
TKL :	Câble pour servir à la commande des DV
TKS :	Câble pour commander et signaler les équipements de chaque PR
TKT :	Câble pour acheminer l'information de présence ou d'absence de tension traction des voies
TPM :	Tours par minute
XFMR :	Transformateur.
XFO	

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1, FICHES TECHNIQUE DES ÉQUIPEMENTS TRACTION.....	151
ANNEXE 2, SCHÉMAS UNIFILAIRES.....	163
ANNEXE 3, PHOTOS NUMÉRISÉES DES ÉQUIPEMENTS	167
ANNEXE 4, LES POSTES DE REDRESSEMENT LEUR PK ET LEUR TYPE	207

INTRODUCTION

Les paramètres de conception des équipements traction soient plus particulièrement les paramètres des transformateurs, des redresseurs et des disjoncteurs de voie sont peu connus puisque le «domaine traction» est un milieu dans lequel les fournisseurs «protègent» leur information technique (leur savoir-faire). De plus, les échanges techniques entre les métros sont limités puisque tous les métros sont spécifiques et le nombre de document technique publié traitant du «domaine traction» est faible. Combiné à ce constat, de nombreux concepteurs des derniers prolongements sont à leur retraite sans pour autant avoir écrit les règles de conception suivies.

Le présent document se veut une recherche des caractéristiques des équipements requis pour alimenter et protéger les équipements traction du métro de Montréal. Pour ce faire, de nombreuses visites des postes de redressement existants sont faites pour noter et valider les caractéristiques complètes de tous les équipements traction. Les fiches techniques et les photos des équipements existants dans tous les postes de redressement sont présentées au présent document.

Suite aux caractéristiques notées ainsi qu'aux discussions auprès des concepteurs des redresseurs, des transformateurs de type imprégné dans l'époxyde, des calculs d'échauffement et des calculs des distributions de courant et de tension sont faits. Les résultats des calculs sont comparés aux mesures obtenues des températures, des tensions et des courants sur les équipements existants.

Des calculs des partages des courants sont faits sur les postes de redressement installés sur la ligne jaune (ligne 4) et les valeurs obtenues sont par la suite comparées aux valeurs mesurées dans les trois postes de redressement. Des calculs des échauffements des câbles haute tension et des câbles traction sont également faits, puis comparés aux valeurs mesurées.

Les plans de contrôle des différents réseaux sont analysés afin de présenter les protections requises pour protéger les équipements traction. De plus, à l'aide de porte logique, les déclenchements sont analysés en séquences selon l'incident provoqué.

De nombreuses discussions techniques et des visites sont faites auprès d'autres métros (TTC, RATP...) et auprès des fournisseurs (Secheron, Trasfor, Mégatran...) afin de valider les nouvelles tendances du «domaine traction», afin de valider le choix des équipements des futurs prolongements.

CHAPITRE 1- CONFIGURATION DU METRO DE MONTREAL

Les charges du métro de Montréal sont de type «traction» ou de type «éclairage force». Les charges du groupe «traction» regroupent les trains (rame et train sont synonymes dans le présent travail) du matériel roulant de modèle 1963 (MR-63) ou du modèle MR-73 qui circulent dans le tunnel et les trains sont alimentés par des postes de redressement (PR) installés le long des tronçons.

Les charges du groupe «éclairage force» regroupent les charges d'éclairage, les escaliers mécaniques, les ascenseurs, les pompes et les ventilateurs. Ces charges sont alimentées par des postes secondaires de distribution (PSD). Seules les charges du groupe traction font l'objet du présent travail.

Pour alimenter ces PSD et ces PR, le métro de Montréal est alimenté à moyenne tension, via des artères dédiés alimentant les cinq postes de district (PD): Providence, Dickson, Lionel-Groulx, Snowdon et St-Michel. Les trois premiers sont alimentés à 12 470 V et les deux derniers à 24 940 V. Notez que l'autre PD soit Legendre est alimenté à 12 470 V et il alimente principalement le complexe Youville.

Chaque PD regroupe un ensemble de cellules haute tension, compartimentées de type «blindée» pour les PD des années 1980, dans lesquelles sont confinés des disjoncteurs haute tension (DHT), des sectionneurs haute tension (SHT) et des équipements de mesure haute tension. Les arrangements des PD sont les suivants :

Le premier PD du réseau initial est installé dans les années 60.

➤ Le PD Providence a six arrivées dédiées branchées sur trois ponts haute tension (PHT) de 20 cellules chacun, pour un total de 60 cellules. Le PD Providence alimente tous les PSD installés dans les stations et tous les PR du réseau initial (1966). Sa puissance raccordée est de 96 MVA.

Les deux PD Dickson et Lionel-Groulx sont installés dans les années 70.

- **Le PD Lionel-Groulx a trois arrivées dédiées branchées sur deux PHT. Le premier pont cumule 21 cellules et 23 cellules sur le second pont. Le PD Lionel-Groulx alimente tous les PSD et tous les PR compris entre les stations Lionel Groulx (ligne 1) et Angrignon sur la ligne 1, ainsi que tous les PSD et tous les PR compris entre les stations Lucien-L'allier et Villa Maria sur la ligne 2. Sa puissance raccordée est de 45 MVA.**
- **Le PD Dickson a deux arrivées dédiées branchées sur deux PHT de 12 cellules chacun, pour un total de 24 cellules. Le PD Dickson alimente tous les PSD et tous les PR compris entre les stations Préfontaine et Honoré-beaugrand sur la ligne 1. Sa puissance raccordée est de 30 MVA.**

Les deux PD suivants sont installés dans les années 80.

- **Le PD Snowdon installé en 1982, a trois arrivées dédiées (une est de réserve) branchées sur deux PHT de 14 cellules chacun, pour un total de 28 cellules. Le PD Snowdon alimente tous les PSD et tous les PR compris entre les stations Côte-Vertu et Snowdon (ligne 2) ainsi que toutes les PSD et tous les PR compris entre les stations Snowdon (ligne 5) et Acadie. Sa puissance raccordée est de 30 MVA.**
- **Le PD St-Michel installé en 1985, a deux arrivées branchées sur deux PHT. Le premier pont cumule 15 cellules et 16 cellules pour le second pont, pour un total de 31 cellules. Le PD St-Michel alimente tous les PSD et tous les PR compris entre les stations Parc et St-Michel. Sa puissance raccordée est de 30 MVA.**

Le réseau actuel compte 57 PR alimentant les trains sur les quatre lignes du métro de Montréal (voir la figure 1.1). La quantité de 57 PR sera augmentée à 63 après le prolongement vers Laval.

Dans le réseau existant, un seul onduleur est en fonction (l'onduleur Jarry), permettant de vérifier le fonctionnement adéquate du freinage par récupération du MR-73.

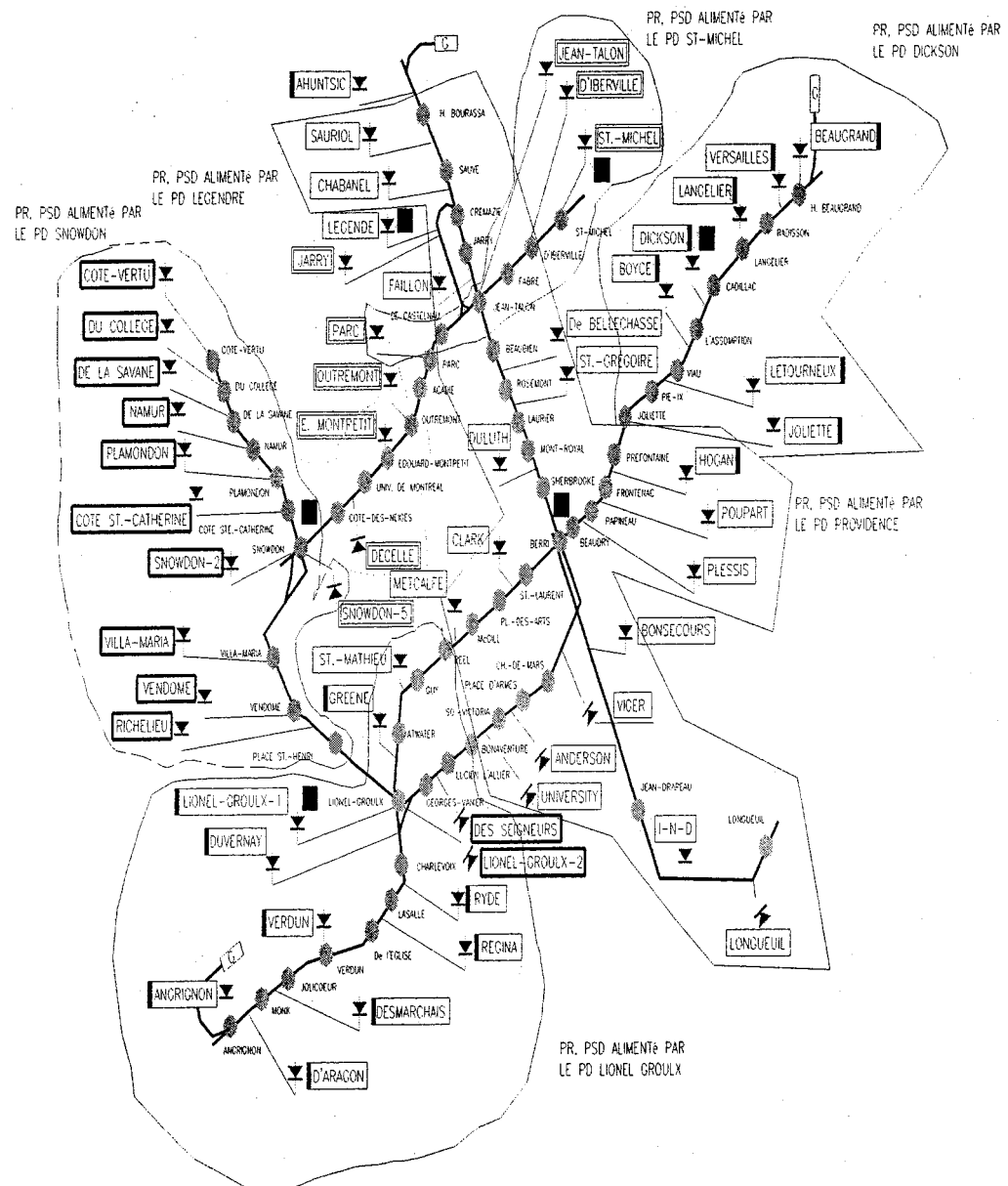


Figure 1.1 Carte du réseau métro

CHAPITRE 2 - DESCRIPTION DES PRINCIPALES FONCTIONS

Les fonctions requises pour alimenter le métro de Montréal sont présentées au chapitre 2 afin de mettre à niveau le lecteur.

Pour chacune des fonctions, l'équipement jouant cette fonction est présenté pour le réseau 1985, *suivi des descriptions des équipements des réseaux 76 et 66 qui sont présentées en caractères italiques.*

Pour faciliter la lecture du présent travail, les tensions, courants, les puissances réelles et apparentes et les points kilométriques calculés sont calculés avec six chiffres après le point, puis, les résultats sont arrondis à un chiffre après le point. Les résistances et les impédances sont calculées avec six chiffres après le point, puis, les résultats sont arrondis à quatre chiffres après le point.

Les annexes 1 à 4 présentent :

- À l'annexe 1, les fiches techniques de chaque équipement traction;
- À l'annexe 2, les schémas de principe;
- À l'annexe 3, les photos des équipements traction;
- À l'annexe 4, chaque poste de redressement, son point kilométrique, sa zone ainsi que le type du poste de redressement.

Les fonctions sont regroupées selon les cinq fonctions suivantes :

- Les fonctions de base;
- Les fonctions d'entretien des équipements fixes;
- Les fonctions de protection (équipements et personnel);
- Les fonctions d'exploitation;
- Les fonctions d'entretien des trains.

2.1 LES FONCTIONS DE BASE

L'alimentation traction vient du poste de district (PD) en haute tension d'Hydro Québec. Pour alimenter les trains, les fonctions de base sont de quatre natures : acheminer l'alimentation haute tension (alternative) des PD aux PR, abaisser cette haute tension dans chaque PR, redresser en tension continue et acheminer l'alimentation aux trains.

2.1.1 Acheminer l'alimentation aux postes de redressement.

L'alimentation est acheminée des PD aux PR à des niveaux de 12 470 V ou 24 940 V par des câbles haute tension. Ce principe d'alimentation à deux objectifs ; réduire les pertes joules lors du transport de l'énergie ainsi que d'augmenter la régularisation de tension aux trains.

Les câbles haute tension utilisés sont trois monoconducteurs de type extra propylène réticulé (XLPE) # 2/0 AWG de classe nominale 28 kV. Chaque conducteur à son propre neutre concentrique. Ces câbles cheminent dans deux massifs de conduits distincts dans le tunnel.

Pour les PR des années 1975 et 1976, trois monoconducteurs # 4/0 AWG de classe nominale 15 kV de type extra propylène réticulé (XLPE) sont utilisés pour acheminer l'énergie du PD vers chaque PR. Chaque conducteur à son propre neutre concentrique. Ces câbles cheminent également dans deux massifs de conduits distincts dans le tunnel.

Pour les PR des années 1966, un câble de puissance triphasé à isolation de papier imprégné d'huile de classe nominale 15 kV est utilisé pour acheminer l'énergie du PD vers chaque PR. Le conducteur est recouvert de plomb ('Paper insulated Lead cover power cable (PILC)') formé de trois conducteurs # 4/0 AWG. Ces câbles cheminent dans les rues à l'intérieur des conduits de la ville de Montréal. Il est à noter qu'un programme de remplacement des câbles PILC par des câbles XLPE, est en cours.

Les câbles haute tension sont montrés aux figures A3.4 à A3.6 et les caractéristiques techniques sont jointes au tableau A1.2 de l'annexe 1.

2.1.2 Abaisser l'alimentation dans les postes de redressement

Pour les PR des réseaux prolongés (1975, 1976, 1982 et 1985), la haute tension est abaissée à une tension de 600 volts par le transformateur de puissance.

Pour les PR du réseau 1966, la haute tension de 12 470 V est abaissée à une tension de 584 volts par le transformateur de puissance.

La puissance des transformateurs de puissance diffère selon le réseau initial ou les réseaux prolongés; elle était de 2 700 kVA dans les PR du réseau initial et elle est augmentée à 2 840 kVA pour les réseaux prolongés.

Les transformateurs de même que les redresseurs ont des capacités de surcharge variant selon la durée de la surcharge telle que montrée au tableau suivant :

Tableau 2.1-Capacité de surcharge

Capacité (%)	Durée (période)	Selon le réseau	
100	En continue	1976, 1982 et 1985	1966
150	2 heures		
300	5 périodes de 60 secondes à intervalles de 20 minutes		
450	15 secondes		

Les configurations des enroulements du transformateur de puissance sont différentes selon les réseaux. Pour les PR des réseaux prolongés (1975, 1976, 1982 et 1985), les deux groupes d'enroulements haute tension sont couplés en delta. Deux groupes de trois enroulements basse tension sont utilisés. Trois enroulements sont couplés en delta et les trois autres enroulements sont couplés en étoile. Cette configuration est communément appelée DD/dy1 (ou encore Dd0 / Dy1). Les transformateurs de puissance et leur couplage des réseaux prolongés sont montrés aux schémas unifilaires des figures A2.1 et A2.2 de l'annexe 2, sous l'appellation «Transformateur». Les caractéristiques techniques sont jointes au tableau A1.4 de l'annexe 1.

Pour les PR du réseau initial (1966), un seul groupe de trois enroulements haute tension est utilisé et les trois enroulements sont couplés en delta. Deux groupes de trois enroulements basse tension sont utilisés. Trois enroulements sont couplés en delta et les trois autres enroulements sont couplés en étoile. Cette configuration est communément appelée D/dy1. L'inductance d'équilibre est requise entre les deux redresseurs six phases. Les transformateurs de puissance du réseau initial et leur couplage sont montrés au schéma unifilaire de la figure A2.3 de l'annexe 2, sous l'appellation «Transformateur» et les caractéristiques techniques sont jointes au tableau A1.4 de l'annexe 1.

La figure A3.17 montre l'inductance d'équilibre et les caractéristiques techniques sont jointes au tableau A1.5 de l'annexe 1.

Deux technologies de transformateur de puissance sont utilisées. Les transformateurs utilisant l'huile comme milieu isolant sont utilisés dans tout le réseau, à l'exception des transformateurs défectueux.

Les transformateurs défectueux ont été remplacés par des transformateurs de type imprégnés dans l'époxyde communément appelé «Cast coil». En 2003, cinq

transformateurs sont déjà installés dans le réseau (le programme sera complété en 2005). Les transformateurs de puissance sont montrés aux figures A3.10 à A3.13.

Note : Au chapitre 5 sous la section «transformateur de puissance», sont présentées les deux technologies, leurs avantages et leurs inconvénients.

2.1.3 Redresser en courant continu

Une fois la haute tension abaissée, la tension est redressée afin d'alimenter les trains propulsés par des moteurs courant continu de type série.

Une description complète du redresseur incluant les distributions des courants et des tensions est présentée au chapitre 5, sous la section groupe transformateur redresseur.

Nous pouvons tout de même décrire brièvement le redresseur comme suit. Les redresseurs utilisés sont composés de deux redresseurs six phases, le premier déphasé de 30 degrés par rapport au second (à l'aide du transformateur de puissance décrit précédemment). Le redresseur équivalent est un redresseur de douze phases.

La puissance nominale de tous les redresseurs est de 2 500 kW à une tension nominale de 750 Vcc. La courbe de surcharge est identique à la courbe de surcharge du transformateur de puissance.

Les redresseurs des réseaux prolongés (1975, 1976, 1982 et 1985), sont composés de diodes faites de silicium et elles sont de type avalanche. Chaque redresseur compte un total de 72 diodes, soit six diodes par bras. Les redresseurs sont tous selon la conception «n-1». Les diodes sont refroidies par convection d'air naturelle (sans ventilateur), des côtés anode et cathode. Les redresseurs des réseaux prolongés sont montrés aux schémas unifilaires des figures A2.1 et A2.2 de l'annexe 2, sous l'appellation «Redresseur».

Les redresseurs du réseau initial (réseau 1966) sont composés de diodes faites de silicium de type régulier. Chaque redresseur compte 84 diodes, soit sept diodes par bras. Les redresseurs sont tous selon la conception «n». Les diodes sont refroidies par convection d'air naturelle (sans ventilateur), du côté anode seulement. Ils comptaient à l'origine un total de 216 diodes par redresseur, soit 18 diodes par bras. Les redresseurs ont été révisés dans les années 1990. Les redresseurs du réseau initial sont montrés au schéma unifilaire de la figure A2.3 de l'annexe 2, sous l'appellation «Redresseur».

Les deux redresseurs sont montrés aux figures A3.14 et A3.16 et les caractéristiques techniques sont jointes aux tableaux A1.5 et A1.6 de l'annexe 1.

2.1.4 Acheminer l'alimentation aux trains

Une fois redressée, l'énergie est acheminée aux trains par l'intermédiaire des sectionneurs positifs (voir section 2.2.1.2), des disjoncteurs de voie (voir section 2.3.1.4), ainsi que par l'intermédiaire des «câbles traction positifs» aux barres de guidage.

Le retour vers le négatif du poste de redressement est assuré par l'intermédiaire des sectionneurs négatifs (voir section 2.2.1.2) ainsi que par l'intermédiaire des «câbles traction négatifs» qui sont branchés sur le jeu de barres des connexions inductives (les boîtes jaunes).

Sur une voie, deux barres de guidage sont mises en parallèles pour alimenter les trains. La résistance de la barre de guidage est de $29,4 \mu\Omega$ par mètre par barre (ou encore $14,5 \mu\Omega$ par mètre par voie).

Sur cette même voie, deux rails négatifs sont mis en parallèles pour le retour du courant traction au redresseur. La résistance du rail négatif est de $43,33 \mu\Omega$ par mètre par rail (ou encore $21,5 \mu\Omega$ par mètre par voie).

Les câbles traction sont montrés à la figure A3.28 et les caractéristiques techniques sont jointes au tableau A1.9 de l'annexe 1.

2.1.4.1 Configuration barre de guidage et rail de retour

La configuration des barres de guidage et du rail de retour est montrée à la figure suivante:

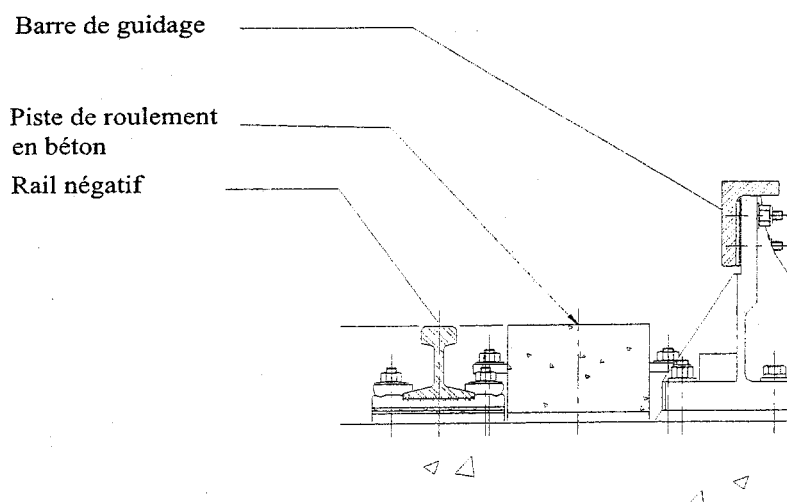


Figure 2.1 Arrangement barre de guidage et rail de retour

Cette configuration communément appelée système du troisième rail est en réalité, un système de troisième rail adapté. Pour le système du troisième rail (tel que le métro de Toronto par exemple), la barre d'alimentation joue le seul rôle d'alimenter le train. Elle est localisée habituellement à droite sur la figure.

Pour le métro de Montréal, les barres de guidage jouent deux rôles soit de guider et d'alimenter le train.

2.2 LES FONCTIONS D'ENTRETIEN DES EQUIPEMENTS FIXES

Pour assurer l'intégrité des équipements, deux types d'équipements sont requis. Les équipements requis pour fin d'entretien et les équipements requis pour assurer la protection aux équipements, aux personnels ou pour détecter des conditions de surcharge.

2.2.1 Les équipements requis pour fin d'entretien

Les équipements requis pour fin d'entretien sont les interrupteurs sous charge haute tension (IHT), les sectionneurs haute tension (SHT) et les sectionneurs traction (SP et SN).

2.2.1.1 Les IHT, IHTM et SHT

L'interrupteur sous charge haute tension (IHT) est installé pour permettre l'isolation électrique du PR de sa source d'alimentation.

Lorsque les PR sont alimentés à 24 940 V, les PR sont regroupés par deux sur un même disjoncteur haute tension (DHT), afin de réduire le nombre de DHT et donc de réduire le coût des équipements.

L'IHT doit alors être motorisé, pour isoler le PR en faute du poste sain suite à l'ouverture du DHT alimentant les deux PR.

Un sectionneur haute tension (SHT) est installé pour les réseaux 1976 et 1966. Il sert aussi à isoler électriquement la haute tension du PR.

La différence entre le sectionneur haute tension (SHT) et les interrupteurs sous charge haute tension (IHT et IHTM) provient du fait que le sectionneur ne peut pas ouvrir sous charge. Les IHT et IHTM peuvent de part leur ouverture brusque interrompre le courant de charge.

Les IHT, IHTM et SHT sont montrés aux figures A3.7 à A3.9 ainsi qu'aux schémas unifilaires des figures A2.1 à A2.3 de l'annexe 2, sous l'appellation «IHT, IHTM ou SHT» et les caractéristiques techniques sont jointes au tableau A1.3 de l'annexe 1.

2.2.1.2 Les SPM, SP ET SN

En aval du groupe transformateur redresseur (du côté 750 volts continu), un sectionneur positif motorisé (SPM) ainsi qu'un sectionneur négatif (SN) isole le redresseur des voies du tunnel. Le SPM sert également à isoler le redresseur des voies lorsqu'une faute est détectée dans le redresseur.

Dans les PR du réseau initial, un sectionneur positif (SP) ainsi qu'un sectionneur négatif (SN) permettent d'isoler électriquement le PR des voies du tunnel.

Comme le transformateur et le redresseur sont débrochables, un sectionneur, de type six phases, permet d'isoler le redresseur du transformateur de puissance avant la sortie du redresseur lorsqu'un entretien est requis.

Les sectionneurs SPM, six phases, SN (réseaux 1976, 82 et 85) et SP, SN (réseau 1966) sont montrés aux figures A3.20 à A3.23 9 ainsi qu'aux schémas unifilaires des figures A2.1 à A2.3 de l'annexe 2, sous l'appellation «SPM, SP ou SN» et les caractéristiques techniques sont jointes au tableau A1.7 de l'annexe 1.

2.3 LES FONCTIONS DE PROTECTION

Les protections sont regroupées dans deux familles de protection. La famille regroupant les protections des équipements et la famille regroupant les protections aux personnels - clients.

2.3.1 Les protections équipements

Les protections équipements doivent protéger les équipements de puissance lorsque des conditions anormales surviennent (conditions de surcharge ou des conditions de faute sur les équipements).

Les conditions de surcharge surviennent lorsque l'intervalle entre les trains est réduit ou lorsque deux PR consécutifs sont mis hors tension. Les fautes aux équipements comprennent les défauts internes sur les équipements, sur les voies ou à bord des trains. Les fonctions de protection sont regroupées selon les équipements de puissance.

2.3.1.1 Pour les transformateurs de puissance

2.3.1.1.1 Haute température des enroulements

Dans chaque transformateur de puissance sont installées des sondes de température sur les trois (ou les six) enroulements basse tension. Chaque sonde est branchée sur un thermostat intégrant deux seuils de température. Le premier seuil transmet l'alarme, le second seuil provoque le déclenchement du PR. Les thermostats sont montrés aux figures A3.35 et A3.37.

2.3.1.1.2 Haute température de l'huile

Pour le transformateur utilisant l'huile comme milieu isolant, un capteur de niveau d'huile est requis pour mesurer les niveaux «trop haut» ou «trop bas» de l'huile. Une commande de déclenchement du PR est transmise lorsque le niveau d'huile est «trop bas». Une alarme est transmise lorsque l'huile atteint le seuil «trop haut».

Une sonde de température est également installée dans l'huile pour mesurer la température de l'huile. Deux seuils existent également, soit un seuil d'alarme et un seuil de déclenchement provoquant respectivement une alarme et le déclenchement du PR.

L'indicateur de niveau d'huile et le thermostat donnant la température de l'huile sont montrés à la figure A3.35.

2.3.1.1.3 Gaz dans les transformateurs à l'huile

Pour les transformateurs utilisant l'huile comme milieu isolant, le relais de pression soudaine IEEE # 63 détecte la formation de gaz dans l'huile. Le relais de pression soudaine est montré à la figure A3.36.

2.3.1.2 Fautes sur les transformateurs ou sur les câbles haute tension

Pour détecter une faute survenant dans le transformateur de puissance ou dans le câble haute tension de chaque PR des réseaux 1982 et 1985, chaque disjoncteur haute tension (DHT) est muni d'un relais de surintensité (IEEE # 50/51) de type électromécanique.

Le DHT isole alors le PR lorsqu'une surintensité survient. Pour les PR des réseaux 1982 et 1985, puisque deux PR sont regroupés sur un DHT, Le IHTM isole le PR en faute suite à l'ouverture du DHT correspondant. Le DHT alimente par la suite le PR sain, branché au même DHT.

Chaque DHT alimentant les PR des réseaux 1966, 1975 et 1976 utilisent également les relais # 50/51 de type électromécanique. Le DHT isole le PR lorsqu'une surintensité survient.

Les relais de surintensité sont montrés aux figures A3.33 et A3.34 et les DHT sont montrés aux figures A3.1 à A3.3 et les caractéristiques techniques des relais de surintensité et des DHT sont jointes respectivement aux tableaux A1.11 et A1.1 de l'annexe 1.

2.3.1.3 Pour les redresseurs

2.3.1.3.1 Surcharge sur le redresseur

Pour tous les redresseurs, deux thermostats sont utilisés pour détecter une condition de surcharge. Deux seuils existent, une alarme est envoyée lorsque le premier seuil est atteint et le redresseur est mis hors tension lorsque le second seuil est atteint.

2.3.1.3.2 Diode en court-circuit

Pour tous les redresseurs, chaque diode est protégée d'un fusible qui l'isole du bras lorsque la diode est en court-circuit. Le percuteur de type à microcontact installé sur le fusible envoie l'alarme lorsque le fusible est «ouvert». Le PR est tout de même maintenu en service pour les redresseurs des réseaux 1975 à 1985.

Le déclenchement du PR est commandé lorsque sur le même bras, une deuxième diode est en «court-circuit». La disjonction du PR est alors provoquée signifiant le déclenchement des deux DV du PR amont, des deux DV du PR aval, ainsi que des DHT, SPM et IHTM du PR.

Puisque la conception est «n» pour les redresseurs du réseau initial (1966), le PR est mis hors tension lorsqu'un percuteur monté sur le fusible est actionné. Le PR est alors déclenché par les disjoncteurs de voie du PR, par le DHT suivis du déclenchement par asservissement de tous les disjoncteurs de voie des PR dans la zone dans laquelle la faute est survenue.

Les diodes DSA - 5DSA, SSI, fusible 500 A, le percuteur monté sur le fusible 500 A, et le fusible 315 A sont montrés respectivement aux figures A3.18, A3.19, A3.38, A3.39 et A3.40.

2.3.1.3.3 Le redresseur se comportant comme une charge

Chaque redresseur des réseaux prolongés (1975, 76, 82 et 85) est équipé d'un relais de courant inverse (IEEE # 32) monté dans le SPM. Le relais commande l'ouverture des quatre DV, ainsi que des DHT, SPM et IHTM du PR, lorsque ce relais lit un courant circulant vers le redresseur (le redresseur se comportant alors comme une charge). Le relais IEEE #32 est montré à la figure A3.41.

2.3.1.3.4 Surtension de manœuvre

Une surtension de manœuvre est produite suite à l'ouverture des disjoncteurs de voie (DV), des contacteurs de coupon neutre (CCN) ou suite à l'ouverture d'un fusible (isolant une diode en faute). La tenue à la surtension de manœuvre de tous les équipements sensibles doit être choisie supérieure aux surtensions provoquées (compte tenu de l'énergie libérée). Une étude de coordination de l'isolation est présentée dans la section 7 sous la section disjoncteur de voie.

Une ou deux varistances de type MOV écrêtent la surtension durant la durée de la surtension. Un fusible isole le circuit du MOV lorsqu'une varistance est en court-circuit, le PR est alors mis hors service. La varistance et l'ensemble fusible porte fusible sont montrés à la figure A3.42.

2.3.1.4 Surintensité en aval du groupe transformateur redresseur

Le disjoncteur de voie (DV) détecte la surintensité qui survient sur le jeu de barres dans les cellules, sur la voie, à bord des trains ou sur les «câbles traction». Le DV permet dans un premier temps de détecter cette surintensité et de commander par la suite, l'isolation de la faute. La détection d'une surintensité varie selon que le PR soit du réseau prolongé ou du réseau initial.

2.3.1.4.1 Les disjoncteurs de voie des réseaux prolongés

La configuration des disjoncteurs de voie (DV) des réseaux prolongés :

- Les PR des réseaux 82 et 85 utilisent normalement quatre DV, de courant nominal de 3 600 A (UR36);
- *Les PR des réseaux 75 et 76 utilisent normalement quatre DV, de courant nominal de 3 600 A (GBJ8).*

Pour ces DV, seule la fonction instantanée (IEEE # 50) est utilisée.

Elle est réglée à :

- 8 000 A pour les DV du réseau prolongé de la ligne n° 2;
- 8 500 A pour tous les DV de la ligne n° 1;
- 6 000 A pour tous les DV de la ligne n° 5.

La fonction instantanée est haussée à 10 000 A pour le DV alimentant le raccordement Honoré Beaugrand.

Les DV UR-36 et GBJ8 sont montrés respectivement aux figures A3.25 et A3.27 et les caractéristiques techniques sont jointes au tableau A1.8 de l'annexe 1.

2.3.1.4.2 Les disjoncteurs de voie du réseau initial

Pour les PR du réseau 1966, un DV modèle UR236, de courant nominal de 6 000 A protège les câbles traction, les barres de guidage et le rail négatif. La fonction instantanée est ajustée à 9 500A. Le UR-236 est montré à la figure A3.26 et les caractéristiques techniques sont jointes au tableau A1.8 de l'annexe 1.

2.3.1.5 Faute éloignée du groupe transformateur redresseur

Les trains ont des très forts appels de courant (environ 7 000 A) pour une durée variant de 10 secondes à près de deux minutes (durée typique de 20 secondes). Cet appel de courant est similaire à un court-circuit éloigné dans le tunnel.

Le relais à accroissement de courant dans le temps (relais di/dt) analyse le courant qui est débité par le PR. Ainsi, tous les courants débités par le redresseur sont analysés selon la durée de l'appel de courant et selon l'amplitude du courant.

Le redresseur est mis hors tension lorsque l'un des seuils est dépassé (disjonction des quatre DV et asservissement des deux DV des PR amont et aval).

Les figures A3.47, A3.48 et A3.49 montrent respectivement les relais di/dt des modèles DDL ACA, PCC e67 et SEPCOS.

2.3.1.6 Objets laissés sur la voie

Pour les réseaux prolongés (1975, 1976, 1982 et 1985), un essai de ligne (EDL) est commandé avant toute fermeture d'un DV. Cet essai de ligne est réalisé par un automate programmable sur les réseaux 1982 et 1985. L'EDL est fait par des relais regroupés sous l'appellation IWX pour le réseau 1976. Ce dispositif commande alors l'injection d'une tension du côté voie du DV correspondant. Le courant injecté sur la voie est comparé au courant de référence. Le DV peut fermer seulement lorsque le courant lu est inférieur au seuil permis. Il demeure ouvert «à l'état bloqué» lorsque le courant lu est supérieur au seuil permis.

Le dispositif EDL sera installé progressivement dans le réseau initial, suite à une alimentation maintenue sur un court-circuiteur laissé entre la barre de guidage et le rail négatif (incident Sherbrooke). Ce cas est simulé à la section 6.4 sous «Calcul du courant suite à l'incident Sherbrooke».

2.3.2 Les protections aux personnels - clients

Pour limiter la circulation des courants vagabonds, le branchement du retour du courant traction est localisé à seul endroit soit au pied du poste de redressement.

2.3.2.1 Dans les postes

Pour les réseaux prolongés (1976, 1982 et 1985), le négatif est isolé à l'aide d'un matériel diélectrique (GPO-3). De plus, les armoires de commutation sont déposées sur un tapis isolant afin d'isoler le négatif de la terre.

Ce système d'isolation est appelé un système flottant (certains ajoutent le terme sur haute impédance (HI) puisque la qualité de l'isolation est validée par un relais ayant une résistance interne supérieure à 8 k Ω). Le tapis diélectrique d'une épaisseur de ¼ pouces présente une isolation diélectrique initiale (à l'état neuf) de 10 M Ω à 4 000 V.

Pour les PR du réseau initial (1966), le transformateur et le redresseur sont montés sur des roues isolantes puisqu'ils sont débroschables. Un relais de basse impédance (BI) valide la qualité de l'isolation.

Pour valider le bon niveau d'isolation du système «flottant», un relais de haute impédance (HI) valide que l'isolation entre le négatif et la terre est adéquate. Un limiteur de tension (LT) localisé dans chaque PR mesure également le niveau de tension entre le négatif et la terre. Lorsque le rail négatif est plus positif que la terre et que la différence de tension entre le négatif et la terre dépasse le seuil permis, le LT commute le négatif à la terre.

Lorsque tous les PR sont en fonction, le différentiel de tension négatif/ terre oscille de ± 50 V. Ce différentiel de tension est augmenté à près de 120 V dans l'environnement immédiat du PR laissé «hors/service».

2.3.2.2 En tunnel

En tunnel, le rail négatif et les aiguilles sont déposés sur des selles isolantes tel que montré à la figure suivante dans le même but de maintenir le rail négatif «flottant» par rapport à la terre.

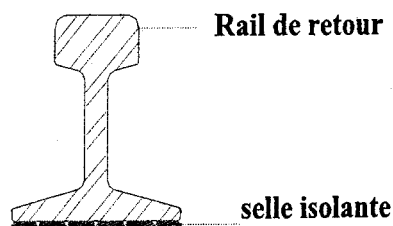


Figure 2.2 Selle isolante sous le rail négatif

Les figures A3.43, A3.44 et A3.45 montrent respectivement le relais BI des réseaux prolongés, le relais BI du réseau initial et le relais HI des réseaux prolongés et les caractéristiques techniques sont jointes au tableau A1.11 de l'annexe 1. La figure A3.53 montre le limiteur de tension.

2.4 LES FONCTIONS D'EXPLOITATION

2.4.1 Flexibilité d'exploitation augmentée

Les équipements et les configurations ajoutés pour augmenter la flexibilité de l'alimentation sont regroupés dans cette section.

2.4.1.1 Alimentation par voie

Pour augmenter la flexibilité d'opération du métro, les prolongements sont conçus par section et par voie tel que montré sur la figure 2.3. Les voies 1 et 2 sont séparées électriquement l'une de l'autre, permettant ainsi d'augmenter la sélectivité de l'alimentation. Cette configuration permet de déplacer indépendamment les trains des voies 1 et 2.

2.4.1.2 Alimentation par section

Aussi, pour augmenter la flexibilité d'opération, un découpage en plusieurs sections d'une ligne permet de réduire l'étendue d'un incident lorsqu'une faute survient sur une section de ligne. Deux sections sont isolées l'une de l'autre à l'aide d'un coupon neutre (CN). Le CN installé sur la voie au pied d'un PR, se compose d'une barre de guidage, interrompue d'un bloc éclisse isolant, suivie d'une seconde barre de guidage, d'un second bloc éclisse isolant, d'une troisième barre de guidage pour être terminée par un troisième bloc éclisse isolant.

Note : Sur un train, la distance qui sépare les deux «frotteurs positifs» impose la longueur minimale du CN (voir chapitre 4).

Le contacteur de coupon neutre (CCN) court-circuite la section du CN lorsque sur une même voie, les DV sont fermés afin d'alimenter la voiture dans la section du CN. Une absence de tension dans le CN pourrait créer des dv/dt répétés menaçant l'isolation du matériel à bord des trains (groupe moteur/alternateur...). La figure 2.3 présente les branchements requis pour réaliser le CN.

Les CN et CCN sont montrés respectivement aux figures A3.52 et A3.29 et les caractéristiques techniques des CCN sont jointes au tableau A1.10 de l'annexe 1.

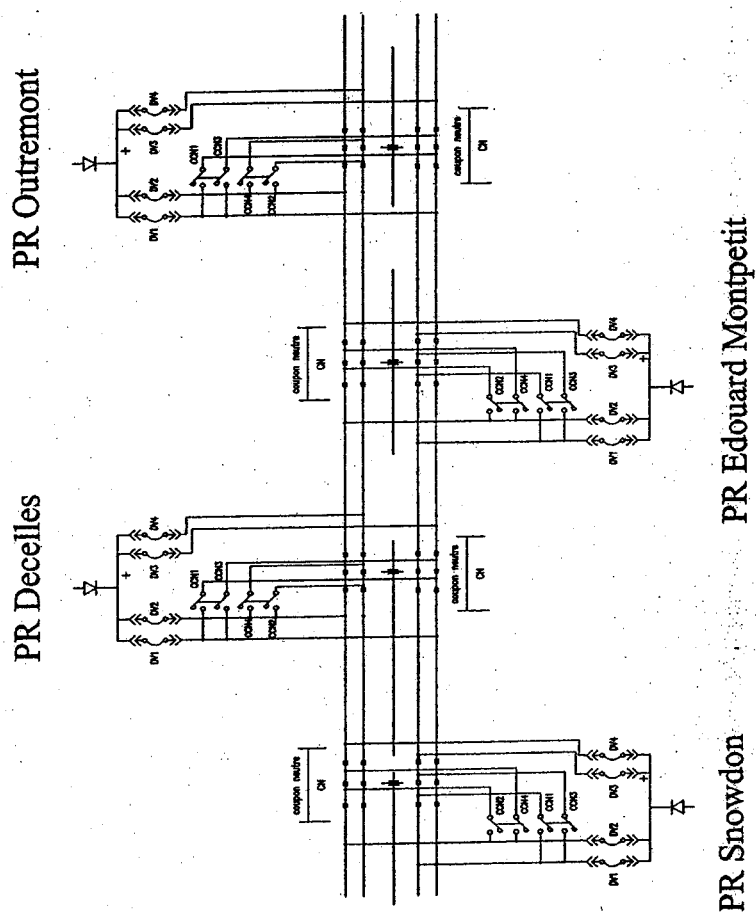


Figure 2.3 Alimentation par voie et par section

Alimentation par zone

Pour le réseau initial, l'alimentation et les coupures d'alimentation traction (CAT) se font par zone (la zone comprenant de 2 à 6 PR).

Pour le réseau initial, deux configurations sont possibles; configuration en T (ou en piquête) et configuration en Π (ou en S).

2.4.1.3.1 Configuration en T ou Π

Le nom donné à la configuration se réfère à la localisation du PR à savoir :

- *Une configuration est en T, lorsque le PR est à l'intérieur de la zone. Le PR est de type intermédiaire puisqu'il est à l'intérieur de la zone;*
- *Une configuration est en Π , lorsque le PR est en fin de zone. Il est à la croisée de deux zones. Le PR en Π requiert un contacteur de sectionnement (CS), d'un courant nominal de 6 000 A.*

La figure A3.30 montre le CS. La figure suivante montre les deux configurations soit en Π pour le PR Chabanel et en T pour le PR Sauriol.

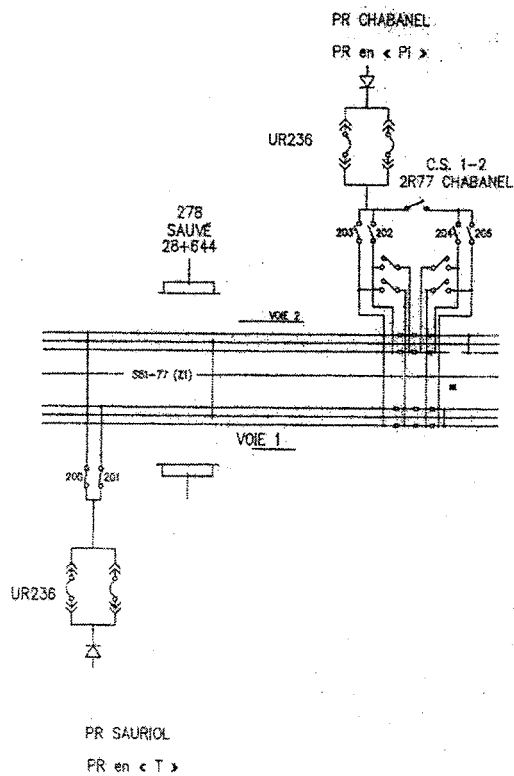


Figure 2.4 Configuration en T ou en Pi

2.4.1.4 Alimentation lorsqu'un service provisoire est requis

Un service provisoire est requis lorsque seulement une portion de ligne peut être exploitée suite à un incident survenu sur le reste de la ligne.

Des aiguilles sont placées à des endroits précis le long du tracé afin de limiter l'étendue de l'incident. Le découpage des zones est fait selon la configuration des rues importantes et selon les services provisoires possibles des autobus.

Cette gestion des zones requiert des relais de condition de zone (CZ). Chaque relais donne l'autorisation de l'alimentation traction (AAT) de cette zone si aucun rupteur (décrit sous l'article «Intervention sur la voie») n'est actionné dans la zone.

Lorsqu'un service provisoire est requis, des dispositifs de malt motorisés (DMM) sont commandés afin de ceinturer et rendre sécuritaire la zone d'intervention. Le DMM d'un courant permanent de 800 A est montré à la figure A3.51.

2.4.1.5 Équipements de contrôle à distance

Les PR sont autonomes. Un panneau des services auxiliaires (PSA) centralise toutes les commandes à recevoir, à transmettre, vers le centre de contrôle ou vers les autres PR. Dans les PR des réseaux prolongés (1976, 1982 et 1985), le PSA est installé dans une cellule auto portante. *Dans les PR du réseau 66, le panneau étant plus modeste, il est monté sur le redresseur.*

Les PSA des réseaux prolongés et du réseau initial sont montrés respectivement aux figures A3.31 et A3.32.

2.4.1.6 Intervention sur la voie

Lorsqu'une intervention est requise sur la voie, en station ou en tunnel, des rupteurs commandent la coupure d'urgence de l'alimentation traction (CUAT). L'action de retirer la barrette (la poignée rouge) du rupteur interrompt l'alimentation du relais

de sécurité installé dans le panneau de relais de sécurité (PRS). La perte d'alimentation du relais de sécurité interrompt alors l'alimentation de contrôle des DV directement sur la voie concernée par la perte des relais 848, 849, puis par asservissement sur le DV de l'autre voie).

Le rupteur est montré à la figure A3.50 et les caractéristiques techniques sont jointes au tableau A1.11 de l'annexe 1.

2.5 LES FONCTIONS D'ENTRETIEN DES TRAINS

Les réparations requises sur le matériel roulant sont faites dans deux ateliers : Youville pour les trains du matériel roulant 1973 (MR-73) et Honoré Beaugrand pour les trains du matériel roulant 1963 (MR-63). Les PR Legendre et Honoré Beaugrand sont dédiés à l'alimentation traction des deux ateliers puisque chaque atelier est relié «directement à la terre en un point». Chaque atelier est isolé du reste du réseau afin de réduire «les courants vagabonds» et l'élévation de tension négatif/terre. Les réseaux étaient tous communs avant 1976 et des tensions négatif/terre de ± 120 V étaient souvent mesurées. Depuis l'isolation des réseaux, cette tension oscille à ± 50 V. Un disjoncteur négatif (DN) est alors requis pour «mettre en commun temporairement les réseaux» autrement le courant passerait par l'attelage et la caisse du train, lors de la transition du train entre les deux réseaux.

Deux voies d'essais sont utilisées pour valider les réparations faites aux trains. La première voie d'essai est utilisée pour la validation du MR-63. Elle est localisée près de l'atelier Honoré Beaugrand. Elle est alimentée par le PR Honoré Beaugrand.

La seconde voie d'essai est utilisée pour la validation du MR-73 et elle est près de l'atelier Youville. Elle est alimentée par l'onduleur Jarry dont les caractéristiques techniques sont jointes au tableau A1.12 de l'annexe 1.

CHAPITRE 3 – ANALYSES DES NORMES DU BTM

Tous les prolongements du métro de Montréal ont été construits suivant les normes traction et haute tension [PS8] et [PS9] rédigées par le bureau des transports de Montréal (BTM).

Dans ce chapitre, les principales normes du BTM sont analysées. Les autres normes du domaine traction (CEI 76, CEI 157, CEI 146, NF F41-010 et IEEE std.C57.18.10) étant très volumineuses, les références sont identifiées lorsqu'une norme est considérée.

Les règles de distribution haute tension et traction du BTM sont :

- La distance maximale entre deux postes de redressement;
- La localisation des postes de redressement;
- L'alternance des ponts haute tension pour l'alimentation des postes de redressement;
- Le nombre de conducteur requis pour alimenter les trains du poste de redressement jusqu'aux voies;
- La capacité du groupe transformateur redresseur.

3.1 DISTANCE MAXIMALE PERMISE ENTRE DEUX POSTES DE REDRESSEMENT

Dans le tableau suivant sont présentés les distances minimales, moyennes et maximales pour les différents réseaux des quatre lignes de métro (les tableaux complets sont présentés à l'annexe 4).

Tableau 3.1 -Distances entre les postes de redressement selon les réseaux

Ligne	Distance entre deux postes de redressement		
	Minimale	Moyenne	Maximale
Ligne 1, verte			
Réseau initial	995	1 155	1 457
Réseau Prolongé	556	1 100	1 586
Ligne 2, orange			
Réseau initial	629	1 475	2 319
Réseau Prolongé	732	1 128	1 499
Ligne 4, jaune			
Réseau initial	648	1 477	2 306
Ligne 5, bleu	1 139	1 449	1 812

Pour une conception optimale, la distance maximale entre deux postes de redressement pour tenir compte des chutes de tension au train est de 1 200 mètres.

3.2 LOCALISATION DES POSTES DE REDRESSEMENT

Dans le réseau 66, tous les PR sont installés en «inter station», au point le plus bas selon le profil du tunnel. Dans les réseaux prolongés (1976, 1982 et 1985), presque tous les PR sont installés en station.

Les chutes de tension aux trains sont réduites lorsque les PR sont localisés en station là où l'effort traction est le plus grand. La localisation optimale est donc en station pour une meilleure régulation de tension au train.

3.3 ALTERNANCE DES PONTS HAUTE TENSION

L'alternance de l'alimentation haute tension des PR assure la transparence de l'alimentation traction aux trains, même lorsque survient la perte de l'alimentation haute tension sur l'une des deux arrivées du PD.

Prenons l'exemple de l'alimentation haute tension des PR de la ligne 5 (ligne bleue). Les PR de la ligne 5 sont alimentés par les deux PD Snowdon et St-Michel. L'alternance de l'alimentation des PR est telle que montrée au tableau suivant :

Tableau 3.2 - Alternance de l'alimentation des postes de redressement

	Snowdon	Decelles	Edouard-Montpetit	Outremont	Parc	Jean-Talon	Iberville	St-Michel
PHT 1	PHT 1		PHT 1		PHT 1		PHT 1	
PHT 2		PHT2		PHT2		PHT2		PHT2
	ALIMENTÉ PAR PD SNOWDON (DEUX ARRIVEES)				ALIMENTÉ PAR PD ST-MICHEL (DEUX ARRIVEES)			

L'arrivée A au poste de district Snowdon alimente les PR branchés sur le «pont haute tension 1» (PHT 1) soit les PR Snowdon et Édouard Montpetit. L'arrivée B au PD Snowdon alimente les PR branchés sur le «pont haute tension 2» (PHT 2) soit les PR Decelles et Outremont.

La perte de l'alimentation haute tension de l'arrivée A entraîne alors la mise hors tension du «pont haute tension 1» (PHT1) soit la mise hors tension des PR Snowdon et Édouard Montpetit.

Par ailleurs, l'alimentation du PHT 2 étant maintenue, les PR Decelles et Outremont vont maintenir l'alimentation aux trains. Ce principe d'alternance de l'alimentation haute tension des PR sur les «ponts haute tension» permet de maintenir la même «offre de service».

3.4 NOMBRE DE CABLES TRACTION VERS LES VOIES

Le nombre de câble traction de chaque polarité positive et négative à l'intérieur du PR est de huit. Huit entre la borne positive du redresseur et son SPM pour la polarité positive. Huit entre la borne négative du redresseur et son SN pour la polarité négative.

Vers les voies, le nombre de câbles positifs (du disjoncteur de voie vers le tunnel) est augmenté à quatre par disjoncteur pour un total de seize. Le nombre de câbles négatifs (du sectionneur négatif côté voie vers le tunnel) est augmenté à six par voie pour un total de douze.

L'augmentation du nombre de câble vers la voie réduit les chutes de tension dues à la combinaison des forts courant et de la distance importante séparant le poste de redressement de la voie.

Des calculs sont présentés au chapitre 6 sous la section «câble traction» pour estimer la température des «câbles traction» selon le nombre de câbles utilisé.

3.5 CAPACITE DES GROUPES TRANSFORMATEURS REDRESSEURS

Le tableau suivant regroupe les catégories de redresseur selon leur application.

Tableau 3.3 - Classe de redresseur selon CEI 146

	Puissance nominale 100 % plus	
Service de classe	Application	Durée
I ou A	Électrochimie	100% - 24 heures
II ou B	Électrochimie	100% - 24 heures 150% - 1 minute
III ou C	Industrie + petite traction	100% - 24 heures 150% - 2 minutes 200% - 10 secondes
IV ou D	Service industriel	100% - 24 heures 125% - 2 heures 200% - 10 secondes
V ou E	Moyenne traction	100% - 24 heures 150% - 2 heures 200% - 1 minute
VI ou F	Grande traction	100% - 24 heures 150% - 2 heures 300%- 1 minute
VII ou G	Extra Grande traction	100% - 24 heures 150% - 2 heures 300%- 1 minute 450% - 15 secondes

Les redresseurs des réseaux prolongés (1976, 1982 et 1985) sont de la classe G de la CEI 146 [N5].

Les redresseurs du réseau initial sont de la classe F de la CEI 146.

Les transformateurs des réseaux prolongés (1976, 1982 et 1985) sont selon la traction de type «extra grande traction» de la NEMA RI-9 [N20].

Les transformateurs du réseau initial sont de classe «grande traction» selon la NEMA RI-9.

Tableau 3.4 - Classe des transformateurs selon NEMA RI-9

Puissance nominale 100 % permanente plus	Type de traction/ Durée de la surcharge		
	Moyenne traction	Grande traction	Extra grande traction
2 heures	150%	150%	150%
1 minute	200%	300%	
5 périodes de 1 minute			300%
15 secondes			450%
Tmax permise			
Transformateur			
huile	50	50	45
Classe 105	60	60	55
Classe 120			
Tmax permise			
Transformateur à			
sec	75	70	65
Classe 155	140	130	120
Classe 220			

Sur les figures suivantes, sont calculées les puissances équivalentes des transformateurs, des redresseurs installés dans le réseau métro.

La puissance équivalente et la puissance apparente équivalente sont calculées selon la moyenne quadratique des puissances relatives au cycle de charge soit les équations suivantes :

Pour le transformateur :

$$MVA_{eq.} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{T(0-2hre)} (MVA)^2 dt} \quad [\text{éq. 3.1}]$$

Pour le redresseur :

$$MW_{eq.} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{T(0-2hre)} (MW)^2 dt} \quad [\text{éq. 3.2}]$$

Les figures suivantes présentent les courbes de puissance selon les cycles de surcharge.

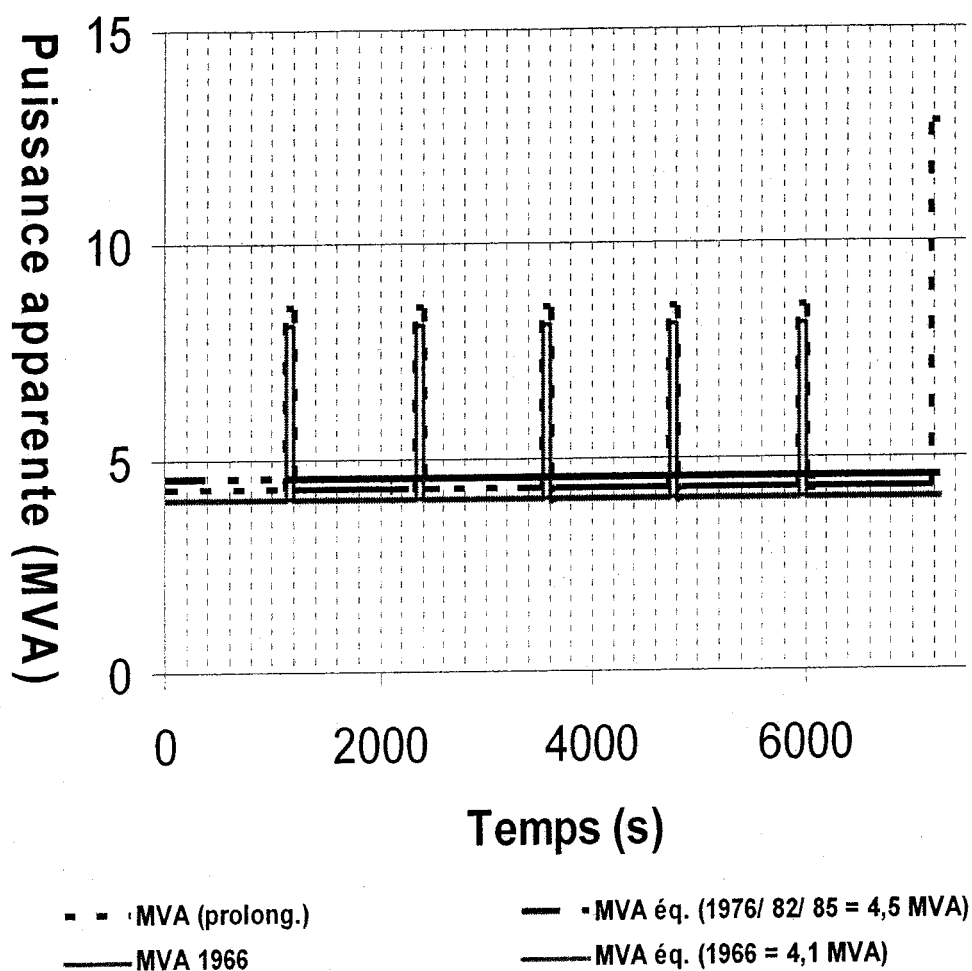


Figure 3.1 MVA équivalents des transformateurs

Le MVA équivalent pour les transformateurs de puissance des réseaux 1976, 1982 et 1985 est de 4,5 MVA (soit 1,6 p.u) et de 4.1 MVA (1,6 pu) pour le réseau 1966.

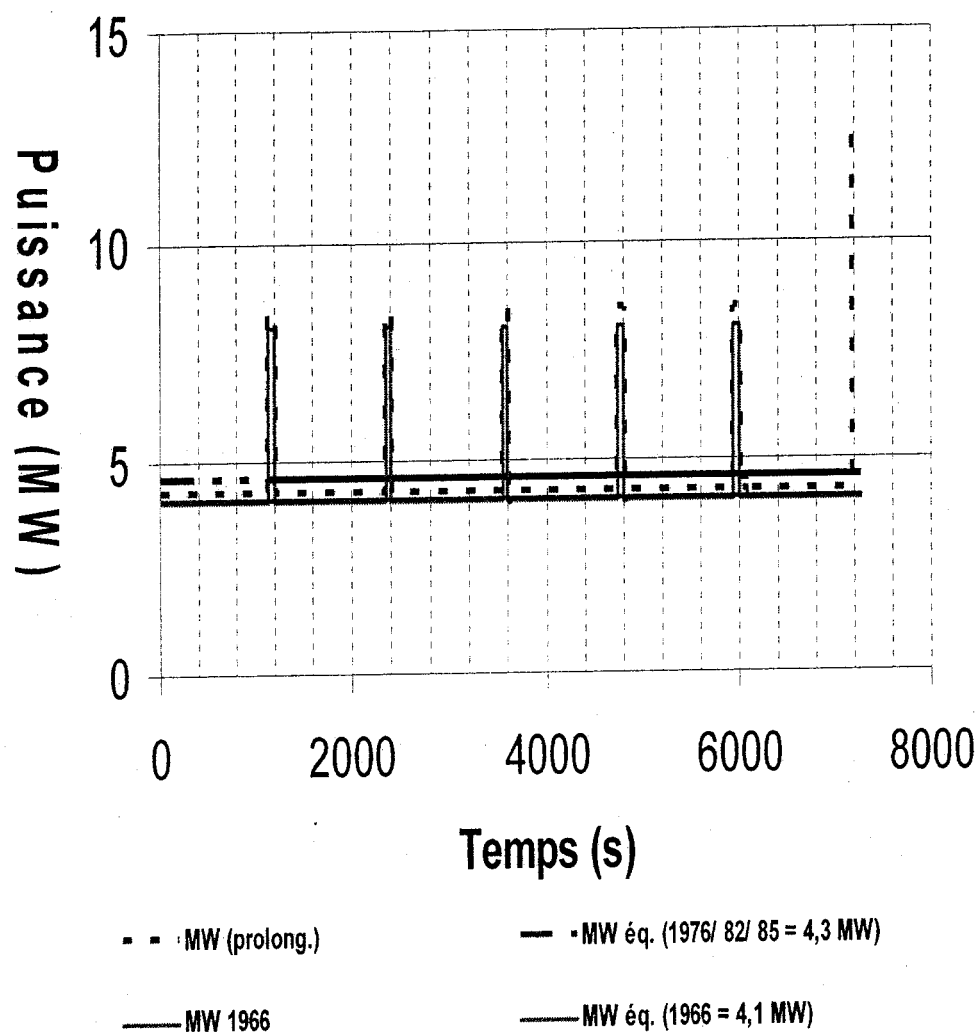


Figure 3.2 MW équivalents des redresseurs

Le MW équivalent pour les redresseurs des réseaux 1976, 1982 et 1985 est de 4,3 MW soit 1,6 p.u et de 4,1 MW soit 1,5 p.u. pour les redresseurs du réseau 1966.

CHAPITRE 4 – LES TRAINS MR-63 ET MR-73

Pour connaître les paramètres de réglages des équipements fixes, nous devons identifier les paramètres et les particularités du matériel roulant (MR).

Il est bien évident que l'analyse et les principes de fonctionnement des trains qui est une étude en soit, ne fait pas partie du présent travail.

Les paramètres analysés dans ce chapitre pour les deux modèles sont :

- **Les paramètres électriques;**
- **La configuration des frotteurs;**
- **Les types de commutateurs;**
- **Les appels de courant par voiture et par train.**

4.1 DESCRIPTION DES TRAINS

Le train peut être composé d'un, de deux ou de trois éléments. Chaque élément est composé de trois voitures soit :

- Une voiture autopropulsée nommée motrice paire;**
- Une remorque ;**
- Une voiture autopropulsée nommée motrice impaire.**

La motrice paire alimente seule les auxiliaires qui sont installés dans la remorque. Les charges auxiliaires communes pour les deux modèles de trains sont le compresseur et le système auxiliaire requis pour fournir le courant alternatif d'un élément.

Aux charges auxiliaires déjà mentionnées, la motrice paire doit alimenter le convertisseur statique installé dans les MR-63 ou le groupe moteur/alternateur installé dans le MR-73.

Les motrices paire et impaire sont constituées de deux bogies chacune soit un bogie à l'avant et un autre bogie à l'arrière. Chaque bogie intègre deux moteurs de type série.

Les paramètres des deux modèles de trains sont présentés au tableau suivant.

Tableau 4.1 - Paramètres des deux modèles de trains

	Trains de modèle	
	MR-63	MR -73
Paramètres de chaque motrice :		
Compagnie	Tamper	BBC/CEM Traction
Tension nominale (V)	360 + 360	340 + 340
Puissance (kW)	108	125
Intensité (A)	360	400
Vitesse (TPM)	3 160/4 050	3 800/4 020
Continue/maximale		
Charge des remorques		
Type de convertisseur	Convertisseur statique	Groupe moteur alternateur
Tension nominale (V)	750	750
Intensité (A)	50	50
Courant total (pleine charge)		
1 Élément	2 200	2 400
2 Éléments	4 400	4 800
3 Éléments	6 600	7 200
Tension d'opération (V)	430 - 900	450 - 900

Notez que :

1 élément = (1 motrice paire + 1 remorque + 1 motrice impaire);

2 éléments = (1 motrice paire + 1 remorque + 1 motrice impaire) +
(1 motrice paire + 1 remorque + 1 motrice impaire);

3 éléments = (1 motrice paire + 1 remorque + 1 motrice impaire) +
(1 motrice paire + 1 remorque + 1 motrice impaire) +
(1 motrice paire + 1 remorque + 1 motrice impaire).

4.2 FROTTEURS POSITIFS, NEGATIFS ET DE MASSE

4.2.1 Configuration des frotteurs

Trois types de frotteurs sont installés sur les trains :

Pour chaque motrice :

- Les frotteurs positifs installés près des guides latéraux, reçoivent l'alimentation traction captée sur la barre de guidage. Chaque motrice est équipée de quatre frotteurs positifs;
- Les frotteurs négatifs installés sous chaque motrice, retournent l'alimentation traction au rail de retour. Chaque motrice est équipée de deux frotteurs négatifs;
- Les frotteurs de masse installés sous chaque motrice, assurent le branchement du châssis de la motrice au rail de retour. Chaque motrice est équipée de deux frotteurs de masse.

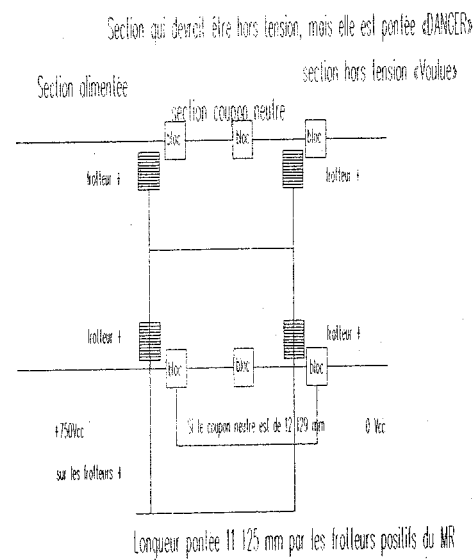
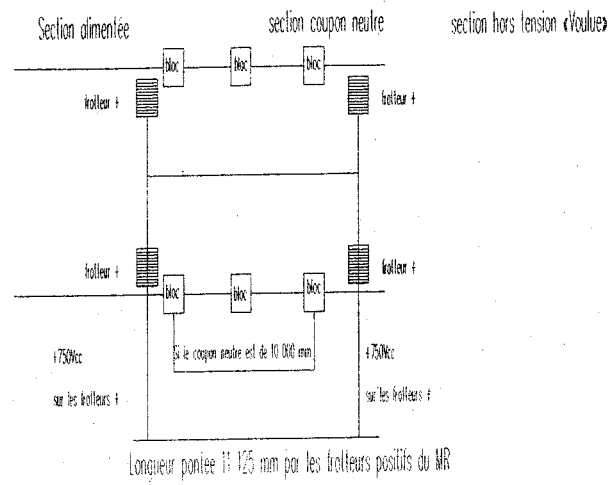
Pour chaque remorque :

- Les frotteurs de masse installés sous la remorque, assurent le branchement du châssis de la remorque au rail de retour. Toutes les remorques sont équipées de deux frotteurs de masse.

Note : Il faut noter que sur les trains MR-63, les frotteurs négatifs et les frotteurs de masses sont mis en communs. Pour les trains MR-73, les deux types de frotteurs sont isolés.

4.2.2 Distance entre deux frotteurs positifs

Les «frotteurs positifs» sont tous communs. La distance entre les deux frotteurs positifs est de 11,1 mètres (36'6"). Ainsi, la longueur du coupon neutre, doit être supérieure à la distance entre les deux frotteurs positifs, afin d'éviter le pontage du coupon neutre. La conséquence d'un coupon neutre ponté serait d'alimenter une section non alimentée par une section alimentée (voir la figure suivante). La longueur du coupon neutre est fixée à 12,2 mètres (40').



Section qui devrait être hors tension et elle est maintenue hors tension.

Figure 4.1 Coupon neutre ponté

4.3 TYPE DE COMMUTATEUR ET COURANTS DE DEMARRAGE

Compte tenu de l'avancement de la technologie dans les années 1960 et 1970, les deux modèles des trains du métro de Montréal sont propulsés par des moteurs type série.

Des résistances sont insérées en série avec les induits des «moteurs séries» pour le train du modèle MR-63 afin de réduire les appels de courant demandés durant son accélération. Ces résistances sont court-circuitées par des commutateurs de modèle «RX». Les trains MR-63 sont donc «à cames».

Les appels de courant sur les trains MR-73 sont limités par des hacheurs de courant installés à bord des trains.

4.3.1 Modèle MR 63

Accélération

Les deux figures suivantes présentent les enregistrements du courant de démarrage d'une motrice et d'un train MR-63.

Le système «RX» utilisé sur le MR-63 est composé de 26 crans. Durant les 15 premiers crans, les quatre moteurs sont couplés en série. Au seizième cran, le couplage des quatre moteurs passe à un couplage série/ parallèle pour la première motrice soit :

- Un premier groupe de deux moteurs couplés en série;
- Un second groupe de deux moteurs couplés en série;
- Les deux groupes sont mis en parallèles.

Un délai typique de 20 ms empêche la transition simultanée des six voitures auto propulsées. Une fois que le passage série parallèle de la première voiture est fait (la voiture de tête), et suite au délai, la première voiture transmet à la deuxième voiture la permission de faire la transition série/ parallèle. Sur la deuxième voiture, une fois la transition réalisée, et après le délai, la transition de la troisième se fait, ainsi de suite, jusqu'à la sixième voiture.

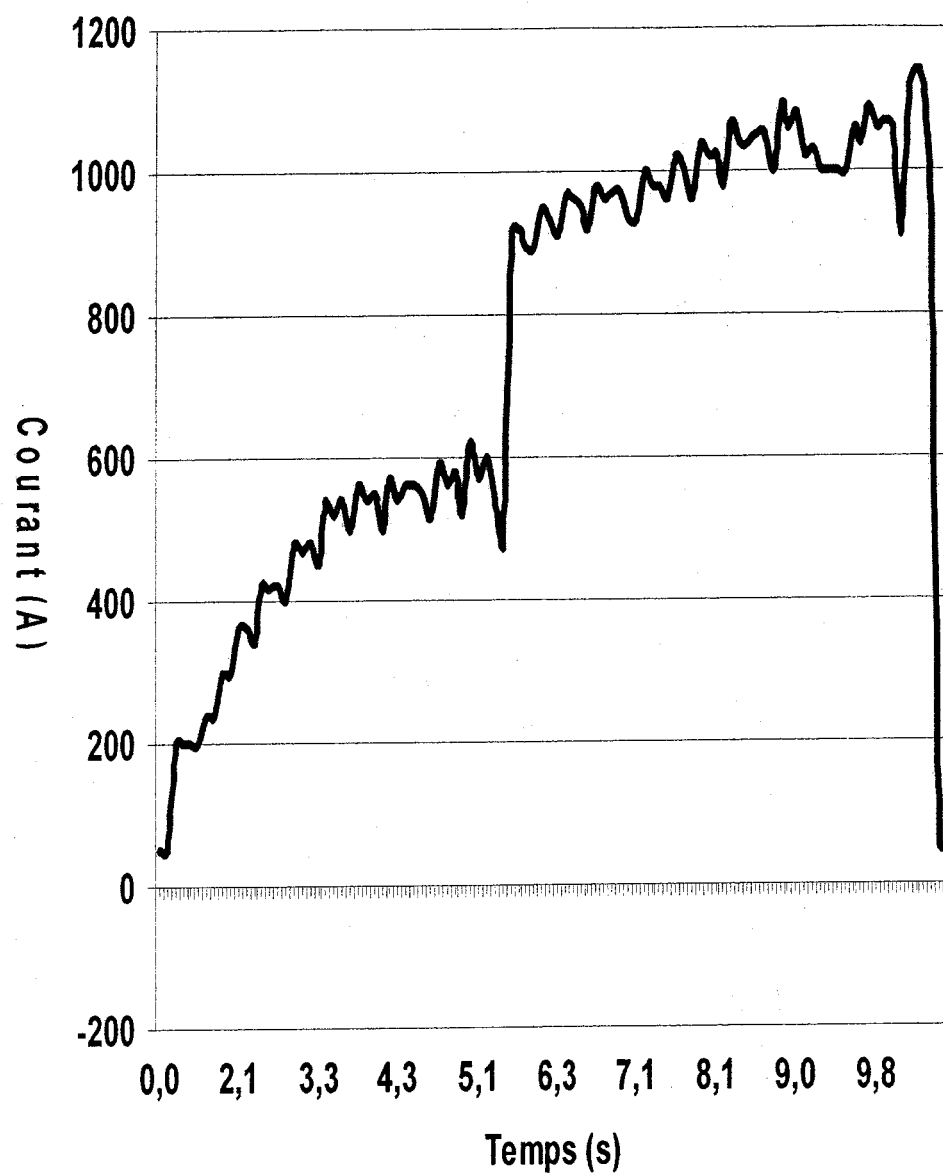


Figure 4.2 Courant de démarrage d'une motrice MR-63

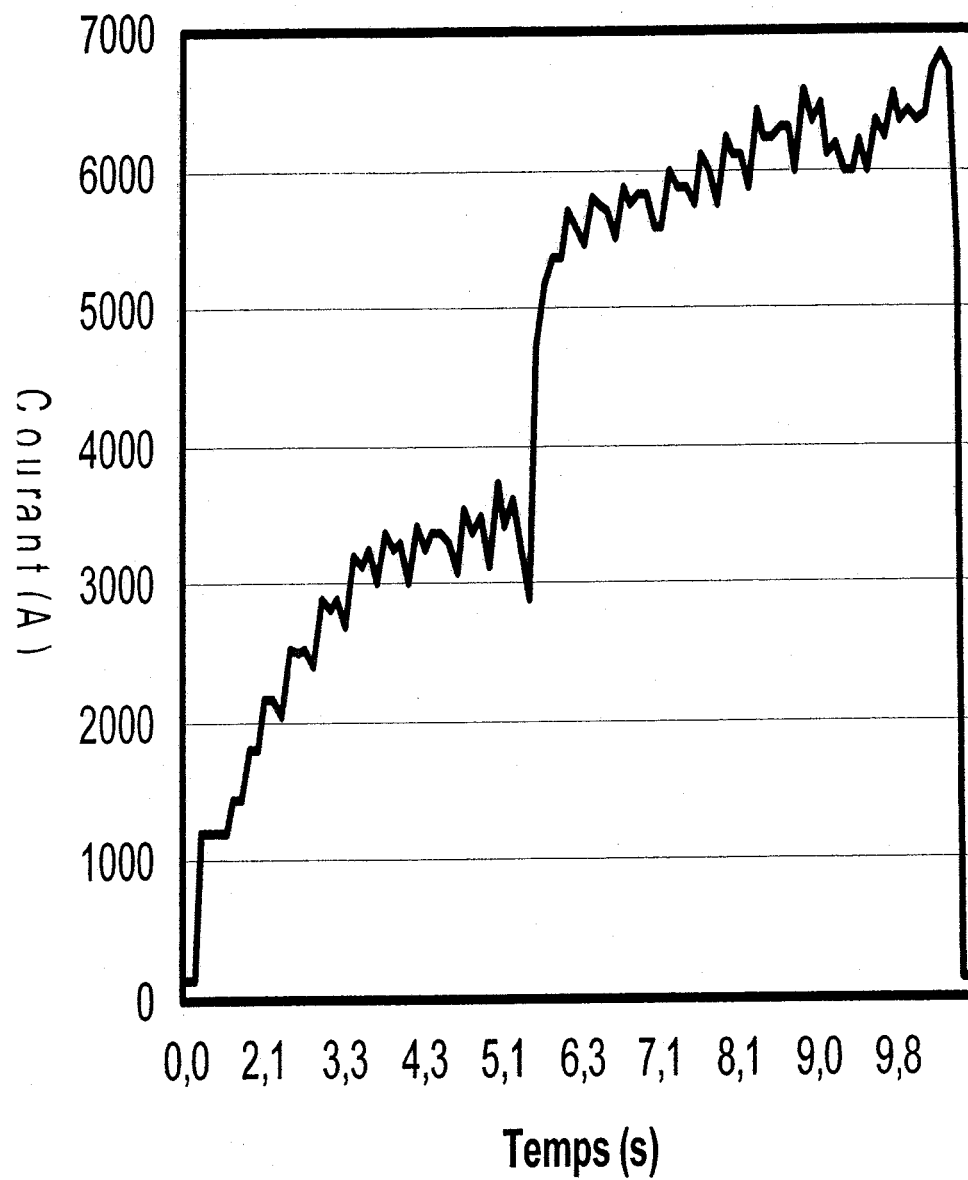


Figure 4.3 Courant de démarrage d'un train MR-63

Suite à l'analyse de l'enregistrement nous observons que :

Le courant de démarrage maximum d'un train MR-63 est de 6 840 A soit 1 140A multiplié par les six motrices.

Au passage du cran n° 15 au n° 16, le courant du train subirait une hausse soudaine de 2 640 A si les passages série/ parallèle étaient tous simultanés, il est réduit à près de 600 A.

Ces sauts de courants imposent les réglages du relais di/dt. La figure intitulée «Di/dt d'un train MR-63», regroupe les valeurs d'accroissement de courant dans le temps pour un train MR-63. L'analyse des valeurs d'accroissement de courant va servir au chapitre 6 sous la section relais di/dt.

Freinage

Aucun freinage par récupération n'existe sur les trains MR-63. Seul le freinage mécanique est possible.

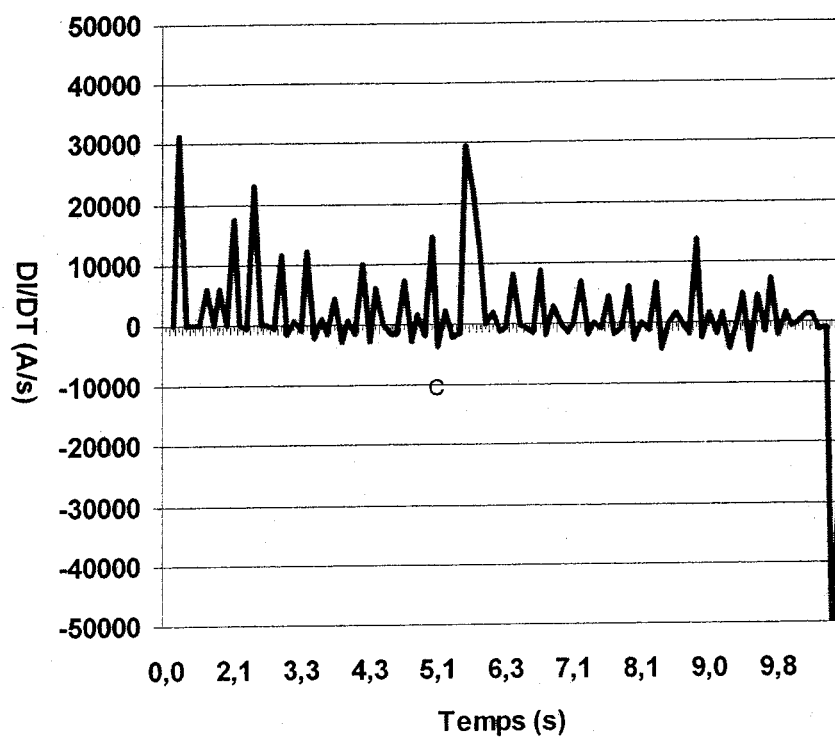


Figure 4.4 di/dt d'un train MR-63

Les di/dt maximum et minimum sont respectivement de 31 500 A/s et de - 52 500 A/s.

4.3.2 Modèle MR 73

Accélération

Les deux figures suivantes présentent les enregistrements du courant de démarrage d'une motrice et d'un train MR-73.

L'hacheur de courant du train modèle MR-73 est du type trois phases, a une fréquence de fonctionnement de 360 Hz par phase. Cette fréquence est fixe sauf au démarrage et durant l'accélération du train.

Des sous multiples de fréquences de 90, 120, 180 et 240 Hz sont utilisés afin de limiter les appels de courant au démarrage. Ces sous multiples utilisés sont responsables de la 'musique' caractérisant le démarrage des trains MR-73.

Une fréquence de 5 Hz est utilisée dans les ateliers limitant ainsi à près de 100 A, le courant requis pour déplacer le train dans l'atelier Youville.

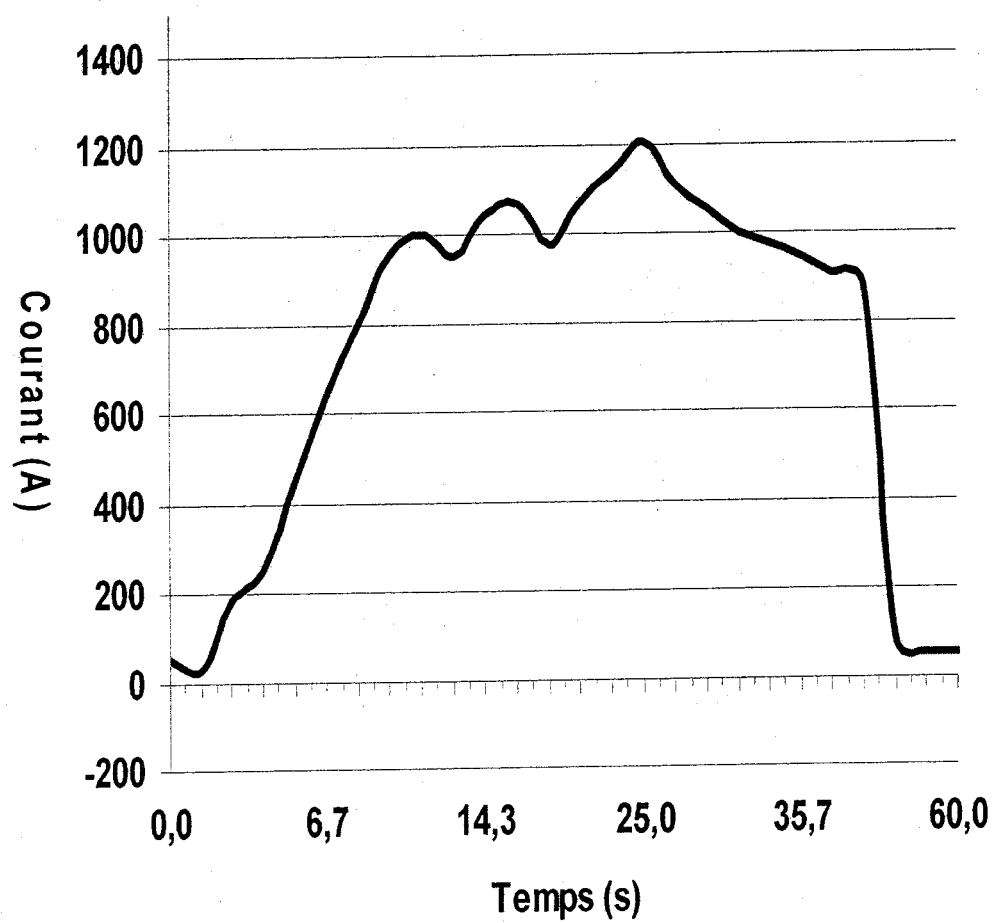


Figure 4.5 Courant de démarrage d'une motrice MR-73

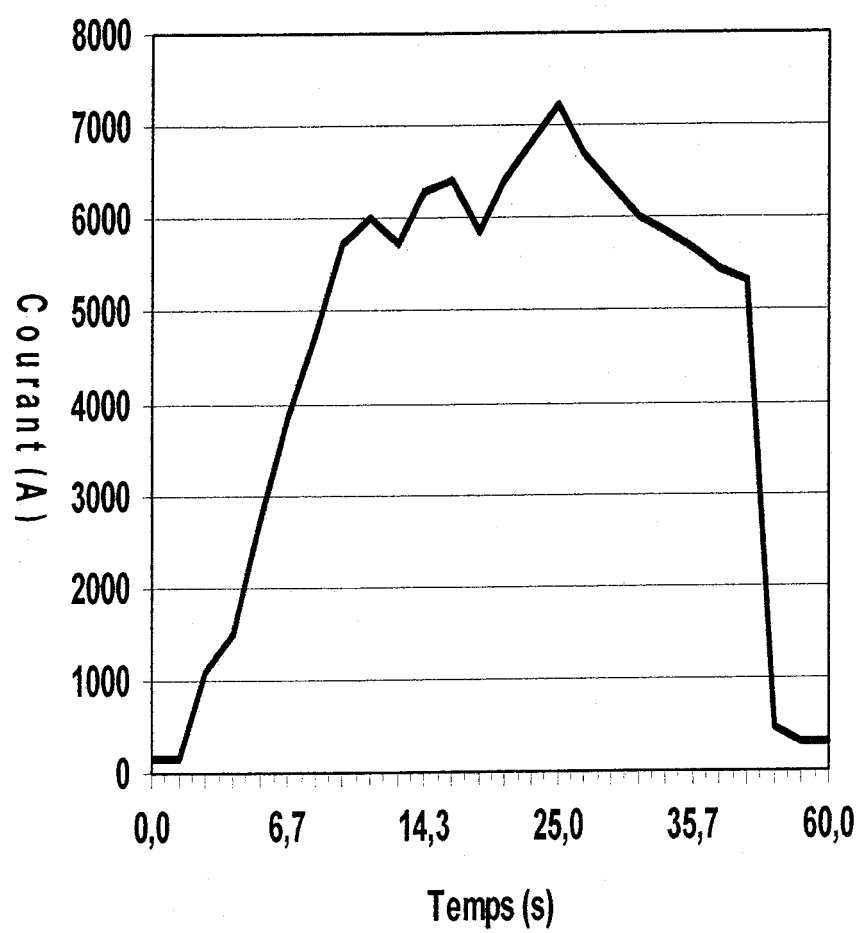


Figure 4.6 Courant de démarrage d'un train MR-73

Suite à l'analyse, nous observons que le courant de démarrage maximum d'un train est de 7 200 A soit 1 200 A multiplié par les six motrices.

Ces sauts de courants imposent les réglages du relais à accroissement de courant dans le temps. La figure intitulée «Di/dt d'un train MR-73», regroupe les valeurs di/dt pour un train MR-73.

Freinage

Des thyristors sont utilisés dans les trains MR-73. Ils permettent de retourner l'énergie du freinage dynamique des trains dans les barres de guidage et les rails de retour, du côté continu. Le retour vers le côté alternatif n'est pas possible puisque les redresseurs sont faites de diodes.

La régénération est efficace pour des vitesses supérieures à 5 mi/h après quoi le freinage mécanique est plus performant. De plus, la régénération est efficace lorsque sur une même ligne des trains sont localisés dans l'environnement immédiat du train qui régénère. C'est pour cette raison que la tension de régénération est limitée à 900 V afin d'éviter une trop grande sollicitation de l'isolation des composants sur le train et sur la voie.

La technologique du MR-73 par sa régénération permet de réduire l'usure des freins ainsi que la chaleur excessive en tunnel.

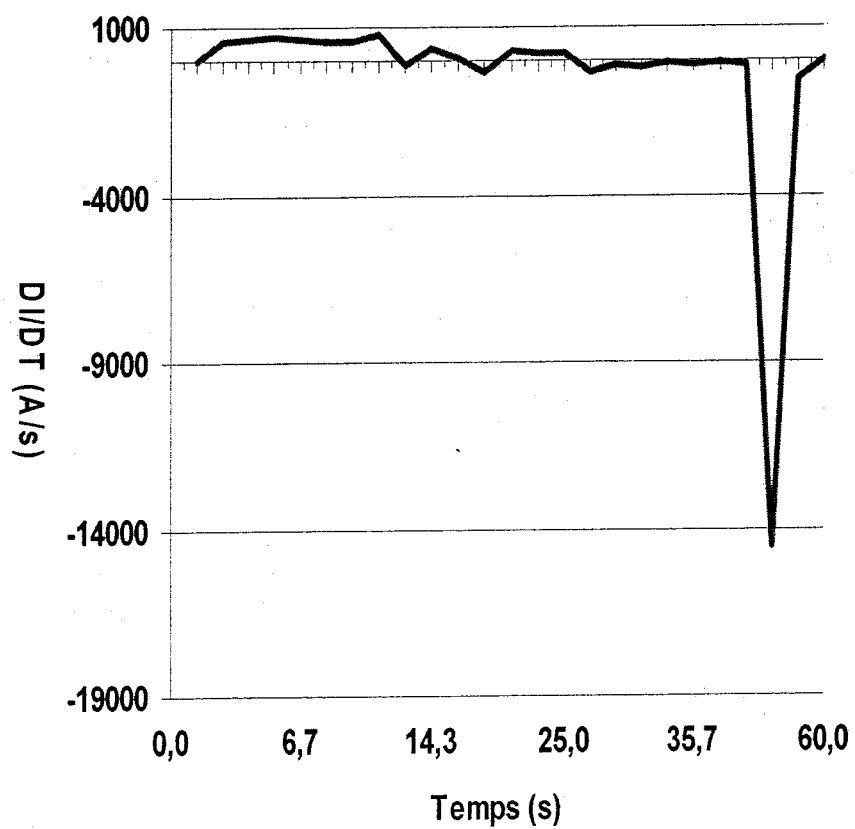


Figure 4.7 di/dt d'un train MR-73

Les di/dt maximum et minimum sont respectivement de 800 A/s et de -14 200 A/s.

CHAPITRE 5 – PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DES XFO/RED

Au chapitre 5 les technologies des transformateurs utilisées ainsi que leurs particularités sont présentées dans les contextes de l'application traction.

Les analyses de fonctionnement des groupes transformateurs/ redresseurs ainsi que des calculs des distributions de courant et de tension sont présentés dans ce chapitre.

Des calculs d'échauffement des redresseurs des différents réseaux sont également présentés dans le présent chapitre.

5.1 LE TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE

L'étude du transformateur de puissance se divise en trois sujets distincts :

- Les technologies utilisées;
- Les particularités de construction;
- Les impédances des transformateurs de puissance.

5.1.1 Les technologies utilisées

Les transformateurs de puissance utilisés en remplacement des transformateurs défectueux sont à sec, dont les enroulements sont imprégnés dans l'époxyde.

Pour comprendre ce choix, nous décrivons ici les exigences liées aux charges traction soit l'appel de courant et la «qualité de l'air ambiant» dans les PR. Les différentes technologies disponibles sont présentées selon leurs avantages et inconvénients pour conclure sur la technologie retenue.

5.1.1.1 L'appel de courant

Comme déjà montré au chapitre 3, la charge traction vue du PR est une variation soudaine du courant dans le temps dont l'amplitude est inversement proportionnelle à la distance qui sépare le train du PR. Cette variation soudaine du courant sollicite soudainement et de façon répétitive l'entretoisement des enroulements basse tension.

5.1.1.2 Qualité de l'air dans les postes de redressement

L'air dans les PR contient la poussière de carbone (conductrice) produite par les frotteurs des trains. Durant les heures sans exploitation, de 1 h 30 AM jusqu'à 5 h 00 AM, les transformateurs de puissance sont mis hors tension. L'air à l'intérieur des PR devient alors humide, puisque les PR ont des chauffages

d'appoint seulement. Au retour de l'alimentation haute tension, l'humidité combinée à l'accumulation de poussières de carbone présente un potentiel de contournement important.

Pour répondre à ces particularités (poussière de carbone, mise hors tension et humidité), tous les enroulements doivent être 'scellés'. L'isolation ne doit pas être réduite par l'accumulation de poussière, pour prévenir tout contournement. L'entretoisement doit être à toute épreuve.

5.1.1.3 Types de transformateurs disponibles

Deux familles de transformateurs de puissance sont disponibles soit le transformateur à l'huile et le transformateur à sec.

Transformateur à l'huile

L'huile peut être de type minéral, de type polychlorure byphyné (PCB) ou de type silicone.

L'huile doit être de type silicone puisque l'huile minérale peut brûler à des basses températures et l'huile de type PCB présente un risque certain pour l'environnement et l'utilisation de PCB est maintenant interdite. Un autre désavantage du transformateur utilisant l'huile comme milieu isolant est un suivi annuel permettant de valider le niveau d'huile ainsi que la qualité isolante de l'huile.

Pour les transformateurs à l'huile, les enroulements sont immergés dans l'huile isolante. Les enroulements sont donc isolés de l'air du PR.

Le transformateur à l'huile lorsqu'il est installé près des habitations (c'est le cas pour tous les PR du métro de Montréal), présente deux risques importants pour l'environnement : des fuites potentielles d'huile et un risque de dégagement de fumée toxique.

Transformateur à sec

Le transformateur à sec utilise l'air comme milieu ambiant. La famille des transformateurs à sec regroupe plusieurs technologies. Les différences sont liées aux techniques utilisées pour sceller les enroulements haute et basse tension.

Les enroulements sont imprégnés :

- Dans une résine «polyester» sous vide (connu sous l'appellation vacuum pressure impregnated V.P.I.);
- Dans une résine «silicone» sous vide (connu sous l'appellation vacuum pressure impregnated et enrobée d'un vernis fait d'époxyde V.P.E.);
- Dans une résine «époxyde» moulés sous vide (Cast coil);
- Dans une résine «époxyde» renforcée de fibre (Resibloc® cast resin).

Le transformateur à sec ne présente pas de risque pour l'environnement, pas de fuite et la résistance au feu est très bonne.

Par ailleurs, les enroulements haute et basse tension sont isolés par l'air. Comme l'air ambiant peut être contaminé, le risque de contournement probable impose la technologie des enroulements scellés dans une résine époxyde. Dans ces techniques de fabrication, aucun papier n'est utilisé comme isolant.

Pour comprendre ces deux techniques, analysons comment les enroulements sont construits.

Les enroulements enrobés de «résine époxyde» et moulés sous vide sont réalisés comme suit :

- Chaque enroulement est construit avec des matériaux isolants saturés;
- Chaque enroulement est placé dans un moule;
- L'ensemble est installé dans une chambre sous vide;
- L'enroulement est alors rempli d'époxyde sous pression. Les vides «voids» sont alors remplis d'époxyde (les vides sont éliminés). Aucune décharge partielle;
- L'enroulement est placé dans le four pour cuire et former un tout.

Les avantages de la technique utilisant la «résine époxyde» et moulés sous vide sont :

- Une finition lisse réduisant l'accumulation de poussière;
- Pas de décharge partielle;
- Un mûr isolant important, variant de 1,5 mm à 5 mm. Ce mûr important présente plusieurs avantages soit un scellement complet des enroulements, un potentiel de contournement très réduit, un taux d'absorption d'humidité très faible et une grande force mécanique pour résister aux efforts lors de cyclage des charges, typique pour l'application traction ou lors de court-circuit.

Les enroulements mouillés dans la «résine époxyde» renforcé de fibre de verre sont réalisés comme suit :

- Le fil de cuivre et la «résine époxyde» renforcée de fibre de verre sont bobinés directement sur la bobineuse;
- L'enroulement est placé dans le four pour cuire et former un tout.

Les avantages de la technique des enroulements utilisant la «résine époxyde» renforcé de fibre de verre sont ;

- Une finition lisse réduisant l'accumulation de poussière;
- Une grande force mécanique pour résister aux efforts lors de court-circuit;
- Un scellement complet des enroulements. Le potentiel de contournement est donc très réduit. Le taux d'absorption d'humidité est faible.

Les tableaux 5.1 et 5.2 regroupent respectivement les dimensions, les poids des différentes technologies au tableau 5.1 et au tableau 5.2, les avantages, les inconvénients des différentes technologies.

Tableau 5.1 - Dimensions et poids selon les différentes technologies

	Largeur		Profondeur		Hauteur		Poids	
	*1	*2	*1	*2	*1	*2	*1	*2
Huile	1 524	2 667	2 235	2 235	2 159	2 159	3 954	4 590
À Sec (VPI)	2 896	3 200	1 676	1 676	2 591	2 845	6 742	8 422
Resibloc® Cast resin	3 048	3 200	1 676	1 676	2 591	2 591	7 037	9 080
Moulé dans l'époxyde sous vide (Cast coil)	3 048	3 200	1 676	1 676	2 591	2 591	7 037	9 080

Note :

A Les données sont tirées des articles [A1] à [A5].

B Pour fin de comparaison, les transformateurs de puissance choisis sont similaires.

Les transformateurs de puissance à sec ont les spécifications suivantes :

*1 : 2 000 kVA, 15 kV, 95 kV (NIB), ΔT 80 C et 15 kV;

*2 : 2 500 kVA, 15 kV, 95 kV (NIB), ΔT 80 C et 15 kV.

Les transformateurs de puissance ayant l'huile comme milieu isolant ont les spécifications suivantes :

*1 : 2 000 kVA, 15 kV, 95 kV (NIB), ΔT 65 C (huile) et 15 kV;

*2 : 2 500 kVA, 15 kV, 95 kV (NIB), ΔT 65 C (huile) et 15 kV.

C Les dimensions sont présentées en mm et les poids sont présentés en kg.

Tableau 5.2 Avantages et inconvénients des différentes technologies

	Avantages	Inconvénients
Huile	Dimensions inférieures Poids inférieur Enroulements parfaitement scellés	Risque de fuite Faible résistance au feu Suivi annuel de la qualité isolante de l'huile
À Sec (VPI)	Bonne résistance au feu Aucune fuite	Dimensions supérieures Poids supérieur Possibilité de contournement lorsque l'air est contaminé Décharge partielle potentielle
Resibloc® Cast resin	Bonne résistance au feu Aucune fuite Peu d'accumulation de poussière Taux d'absorption d'humidité très faible Grande résistance aux efforts lors de court-circuit Peu de décharge partielle Enroulements parfaitement scellés	Dimensions supérieures Poids supérieur Décharge partielle potentielle
Moulé dans l'époxyde moulé sous vide (Cast coil)	Bonne résistance au feu Aucune fuite Peu d'accumulation de poussière Taux d'absorption d'humidité très faible Grande résistance aux efforts lors de court-circuit Pas de décharge partielle Enroulements parfaitement scellés	Dimensions supérieures Poids supérieur

Le tableau 5.1 met en évidence le principal désavantage des transformateurs à sec. Pour des caractéristiques identiques (puissance, échauffement, tension nominale, NIB ...), les dimensions, les poids des transformateurs de puissance à sec sont supérieurs. Par ailleurs, comme les PR sont installés près des habitations, la seule technologie retenue est le transformateur à sec, dont les enroulements doivent être imprégnés dans une résine époxyde.

5.1.2 Particularités de construction

Les transformateurs de puissance des PR possèdent également des particularités propres à la traction soit une impédance de court-circuit élevée et un facteur de couplage faible. De plus, des écrans électrostatiques sont installés entre les enroulements haute et basse tension lorsque le transformateur de puissance est à sec et imprégné dans une résine époxyde. L'impédance de court-circuit élevée est discutée à la section 5.1.3.

5.1.2.1 Facteur de couplage

Le facteur de couplage « k » représente le couplage magnétique existant entre les deux enroulements secondaires.

Pour les transformateurs de puissance des réseaux 1982, 1985 et 1966, les facteurs de couplage entre les deux enroulements secondaires sont égaux ou inférieurs à 0,20.

Pour les transformateurs de puissance du réseau 1976, le facteur de couplage entre les deux enroulements secondaires est égal à 0 puisque les deux noyaux magnétiques sont indépendants l'un de l'autre.

Les facteurs de couplage entre secondaires sont utilisés pour les calculs des impédances. Les figures suivantes montrent comment le facteur de couplage est influencé par la méthode utilisée pour construire les enroulements basse tension.

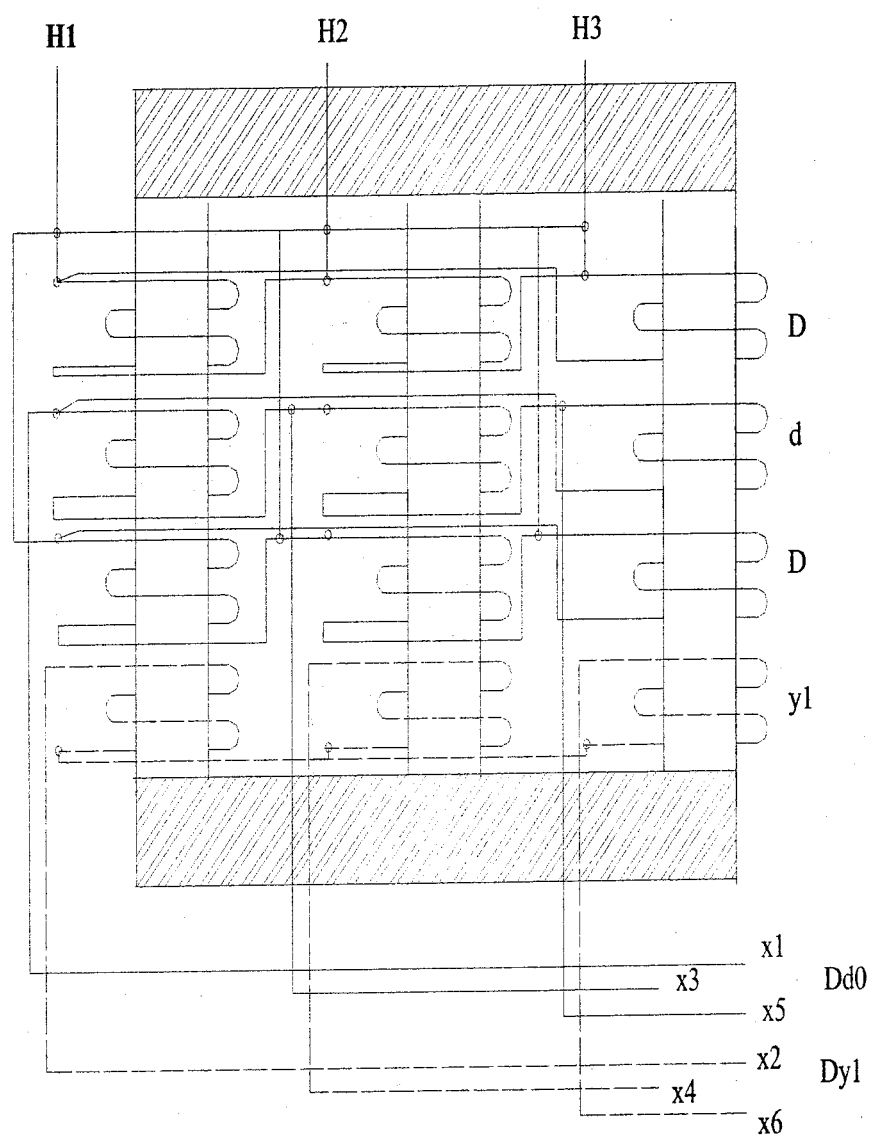


Figure 5.1 Faible couplage $K = 0.20$

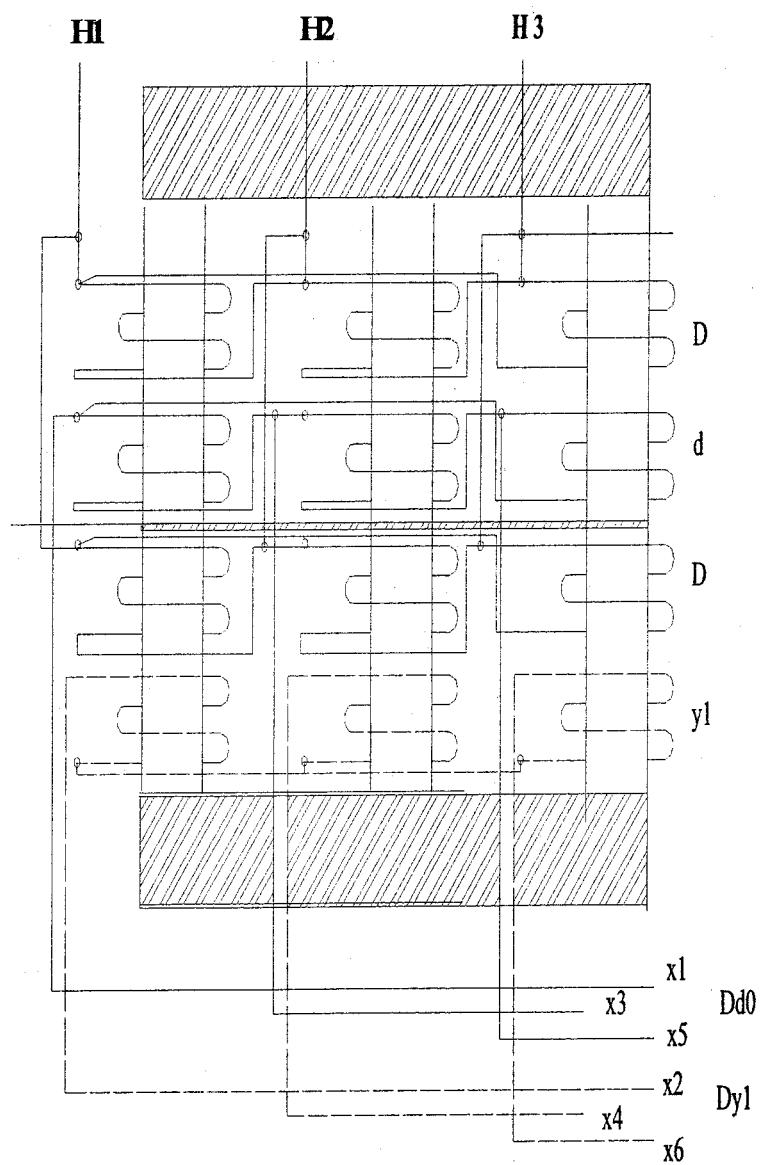
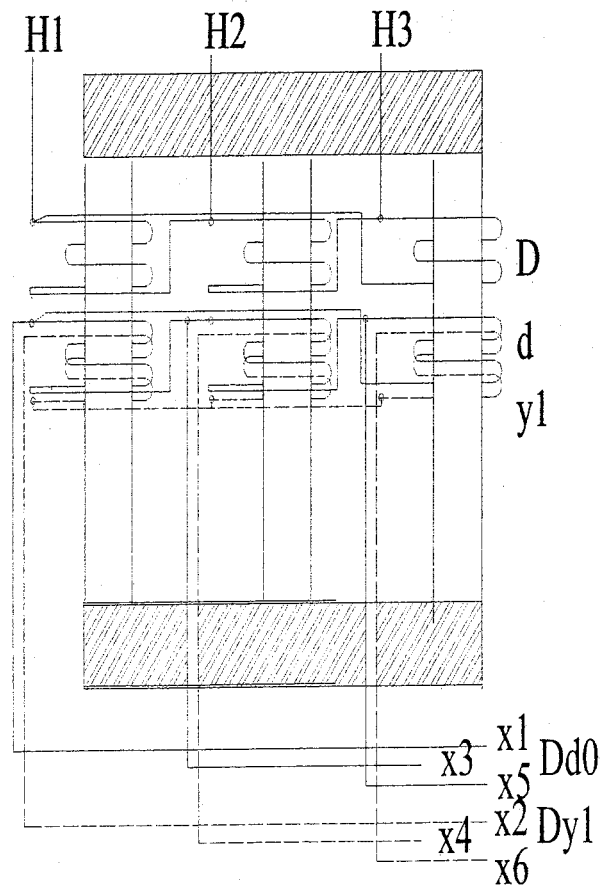


Figure 5.2 Couplage $K = 0$



**Les deux enroulements
secondaires sont inter reliés**

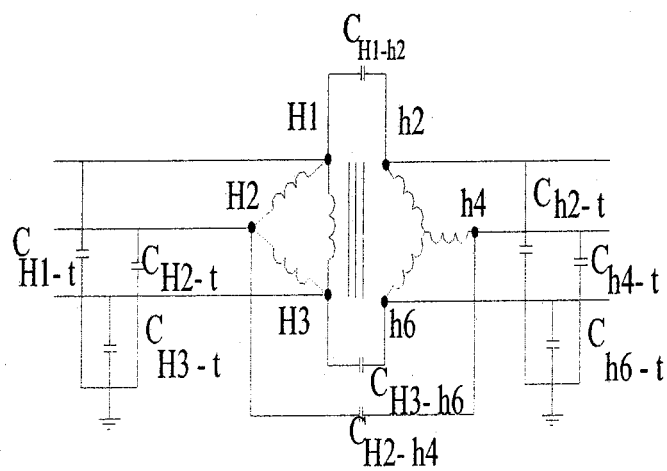
Figure 5.3 Fort couplage $K = 1$.

5.1.2.2 Écrans électrostatiques

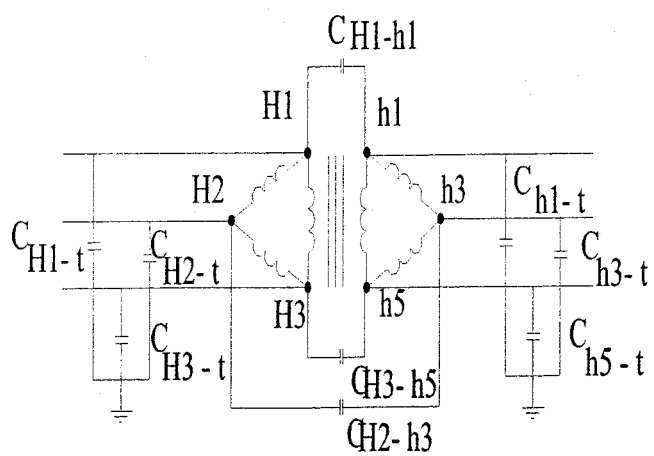
Par phase, un écran électrostatique sépare l'enroulement haute tension de l'enroulement basse tension. Cet écran électrostatique est fait d'une feuille de cuivre d'environ 3 mm (0,010'') d'épaisseur, distribuée sur toute la longueur du noyau magnétique. Cette feuille de cuivre ne doit pas être fermée sur elle-même pour prévenir une boucle fermée.

Comme tous les enroulements sont flottants, les écrans électrostatiques permettent de «découpler» les enroulements haute et basse tension. Cette particularité a pour but de prévenir que les surtensions (de manœuvre et de foudre) qui surviennent du côté haute tension, soit induites du côté basse tension par le couplage capacitif entre les différents enroulements.

La figure 5.4 présente les couplages capacitifs entre les différents enroulements.



Couplage capacitif enroulements Dyl



Couplage capacitif enroulements Dd0

Figure 5.4 Couplage capacitif

5.1.3 Impédances des transformateurs

Comme il a été mentionné en introduction au chapitre, les transformateurs de puissance ont une impédance de court-circuit élevée. Le tableau suivant regroupe les impédances de courts-circuits exprimées en par unité (p.u.) pour tous les réseaux, selon la légende au bas du tableau:

Tableau 5.3 - Impédances des transformateurs

Impédance de court-circuit (p.u.)	Réseau			
	1982-85	1976	1966	À sec
Minimum	13,2	11,7	15,7	12,4
Maximum	14,4	12,9	16,0	13,4
Moyenne	13,7	12,4	15,9	12,7
Facteur de couplage	0,19	0,00	0,20	0,20

Légende :

L'impédance de court-circuit est exprimée en p.u. à :

2 840 kVA, à 24 940 V, à 60 Hz pour les réseaux 1982 et 1985 ;

2 840 kVA, à 12 600 V, à 60 Hz pour les réseaux 1976 ;

2 700 kVA, à 12 600 V, à 60 Hz pour les réseaux 1966 et à ;

2 700 kVA, à 12 600 V, à 60 Hz pour les transformateurs à sec.

Ces valeurs sont utilisées pour les calculs des groupes transformateurs redresseurs. L'impédance de court-circuit présente l'avantage de limiter le courant de court-circuit, mais une forte impédance présente aussi une faible régulation de tension.

5.2 CALCULS DES GROUPES TRANSFORMATEURS REDRESSEURS

L'étude des groupes transformateurs redresseurs comprend les calculs des impédances, des tensions, des chutes de tensions et des courants pour le groupe transformateur redresseur des derniers prolongements. Les équations présentées sont tirées des livres [L11] à [L14] et [L18] à [L21].

5.2.1 Les impédances, chutes de tension, tensions et courants

Les intrants des redresseurs des réseaux prolongés sont les suivants :

Tableau 5.4 – Intrants des groupes XFO/ RED 1985

Tension secondaire à vide du XFO	Eso	601 V
Tension pleine charge du RED	Enom	750 V
Courant nominal du RED	Id	3333 A
Impédance de court-circuit en p.u.	Zcct_pu	0,1373 pu
Facteur de couplage	k	0,20
Nombre de diode par bras	Ndiode/bras	7
Tension de seuil de la diode	V _{fo}	0,78 V
Résistance apparente directe de la diode	r _f	0,322 mΩ
Résistance de jeu de barre du RED	R bus	500 μΩ
Rapport des tensions primaire/ sec.	A _{xfo}	41.50 :1

La tension continue côté redresseur en première approximation est calculée selon l'équation suivante :

$$E_{d0} = \frac{\sqrt{2} * E_{so} * \sin(\pi/6)}{(\pi/6)} \quad [\text{éq. 5.1}]$$

Une fois l'équation résolue, E_{d0} est égale à 811,64 V.

La puissance apparente au secondaire est trouvée selon l'équation suivante :

$$kVA_{sec} = \frac{E_{do} * Id}{(1000)} \quad [\text{éq. 5.2}]$$

Une fois l'équation résolue, kVA_{sec} est arrondie à 2800 kVA.

La puissance apparente au primaire est trouvée selon l'équation suivante :

$$kVA_{prim} = 1,015 * kVA_{sec} \quad [\text{éq. 5.3}]$$

Une fois l'équation résolue, $kVA_{prim} = 2\,842$ kVA.

Calculs des impédances

Les impédances sont calculées comme suit :

L'impédance de base est ramenée au primaire selon l'équation suivante :

$$Z_{base} = \frac{E_{pp-prim}^2}{(VA_{prim} * 1000)} \quad [\text{éq. 5.4}]$$

Et, la résistance de base est égale à 219 mΩ.

Ainsi la résistance de court-circuit est ramenée au primaire du transformateur, en ohms selon l'équation :

$$Z_{cct_ohms} = Z_{cct_pu} * Z_{base} * kVA_{base} / kVA_{xfo} \quad [\text{éq. 5.5}]$$

Et elle est égale à 30 mΩ.

Les impédances de commutation, et les impédances primaire et secondaire du transformateur de puissance selon le facteur de couplage des enroulements secondaires sont calculées ainsi :

$$Z_c = \frac{2 * k}{(1 + k)} \quad [\text{éq. 5.6}]$$

$$Z_{xfo_prim} = k * Z_c \quad [\text{éq. 5.7}]$$

$$Z_{xfo_sec} = Z_c * (1 - k) \quad [\text{éq. 5.8}]$$

Les impédances de commutation, les impédances au primaire et au secondaire du transformateur de puissance, après avoir été arrondies sont respectivement égales à 50 mΩ, 10 mΩ et 40 mΩ (ou respectivement 0,229 pu, 0,046 pu et 0,183 pu).

Le courant efficace au primaire du transformateur de puissance est égal à 65,8 A selon l'équation suivante :

$$I_{eff_prim} = \frac{kVA_{prim} * 1000}{\sqrt{3} * E_{prim-pp}} \quad [\text{éq. 5.9}]$$

Basé sur la distribution des pertes de ce type de transformateur, les résistances au primaire et secondaire sont calculées soit :

$$R_{xfo_prim} = \frac{P_{xfo_prim}}{I_{eff_prim}^2} \quad [\text{éq. 5.10}]$$

$$R_{xfo_sec} = \frac{P_{xfo_sec}}{I_{eff_prim}^2} \quad [\text{éq. 5.11}]$$

Les résistances obtenues sont de 1,6 mΩ pour R_{xfo_prim} et 6,2 mΩ pour R_{xfo_sec} .

Les réactances primaire et secondaire peuvent ainsi être calculées comme suit :

$$X_{xfo_prim} = \sqrt{Z_{prim}^2 - R_{prim}^2} \quad [\text{éq. 5.12}]$$

$$X_{xfo_sec} = \sqrt{Z_{sec}^2 - R_{sec}^2} \quad [\text{éq. 5.13}]$$

Les réactances obtenues sont de 9,9mΩ pour X_{xfo_prim} et 39,6 mΩ pour X_{xfo_sec} .

Sans tenir compte des réactions dues à la commutation, les calculs obtenus sont :

Les résistances du transformateur $R_{xfo_tot} = 7,8 \text{ m}\Omega$ ou 0,036 pu;

La réactance du transformateur $X_{xfo_tot} = 49,5 \text{ m}\Omega$ ou 0,226 pu.

Calculs des chutes de tension et tension résiduelle

Le calcul des chutes de tension permet de calculer la tension Edo soustrait des chutes de tensions soit :

La chute de tension dans les diodes est égale à 1,7 V soit :

$$\Delta V_{diode} = 2 * (\Delta V_{diode} + \Delta V_{fusible}) = 2 * (0,78 + (0,322 \text{ m}\Omega * 208,5 \text{ A})) \quad [\text{éq. 5.14}]$$

La chute de tension dans le jeu de barre du redresseur est égale à 1,67 V soit :

$$\Delta V_{red} = 500 \mu\Omega * 3333 \text{ A} \quad [\text{éq. 5.15}]$$

La chute de tension dans la résistance totale du transformateur est égale à 28,9 V soit :

$$\Delta V_{R_{xfo}} = Edo' * R_{tot} = 811,6 \text{ V} * 0,036 \text{ pu} \quad [\text{éq. 5.16}]$$

La chute de tension dans la réactance totale du transformateur (sans la réactance de commutation) est égale à 47,5 V soit :

$$\Delta V_{X_{xfo}} = Edo' * X_{tot_pu} * \sin(\pi/12) = 811,6 \text{ V} * 0,226 \text{ pu} * \sin(\pi/12) \quad [\text{éq. 5.17}]$$

La tension corrigée Edo, soustrait de toutes les chutes de tension (à l'exception des chutes de tension dues à la commutation), est égale à 735 V. Par ailleurs, selon les mesures obtenues, la tension à pleine charge devrait égaler 750 Vcc. Après deux itérations (réalisées également dans le livre [L12]), le tableau suivant regroupe les résultats obtenus :

Tableau 5.5 – Tension à pleine charge du groupe XFO/ RED

Tension et chutes de tension	Itération # 1	Itération # 2
Tension à vide calculée	811,6 V	840,3 V
Chute de tension		
Jeu de barre du redresseur.	1,7 V	1,7 V
Dans les diodes	1,7 V	1,7 V
Dans la résistance totale du XFO	28,9 V	30,3 V
Dans la réactance totale du XFO	47,5 V	49,2 V
Σ des chutes de tension	79,8 V	82,9 V
Tension pleine charge résultante	732 V	757 V

Lorsque les réactions dues à la commutation sont tenues en compte : la chute de tension ajoutée selon l'équation 5.17 est égale à 48 V, réduisant la tension pleine charge à près de 709 Vcc.

Calculs des courants

Le courant $I_d = 3\,333\text{ A}$.

Le courant efficace primaire est égal à 65,8 A soit :

$$I_{\text{eff_sec}} = \frac{kVA_{\text{prim}} * 1000}{\sqrt{3} * E_{\text{primpp}}} = \frac{2842,59 * 1000}{\sqrt{3} * 24\,940} \quad [\text{éq. 5.18}]$$

Le courant efficace au secondaire est égal à 1 360,7 A soit ;

$$I_{\text{eff_sec}} = \frac{\sqrt{2} * I_d}{\sqrt{3} * 2} = \frac{\sqrt{2} * 3333}{\sqrt{3} * 2} \quad [\text{éq. 5.19}]$$

Le courant efficace, de court-circuit soutenu, au secondaire du transformateur $I_{\text{cct_sec}}$ est égal à 9 910,6 A soit :

$$I_{cct_eff_sec} = \frac{I_{eff_sec}}{Z_{pu}} = \frac{1360,72}{0,1373} \quad [\text{éq. 5.20}]$$

Le courant efficace, de court-circuit soutenu, du côté du redresseur I_{ds} est égal à 26 767,6 A soit :

$$I_{ds} = \frac{6 * \sqrt{2} * I_{eff_sec}}{\pi} = \frac{6 * \sqrt{2} * 9\,910,6}{\pi} \quad [\text{éq. 5.21}]$$

Le courant efficace, par bras, par redresseur est égal à 962,2 A soit :

$$I_{eff / bras} = \frac{I_d}{\sqrt{3} * 2} = \frac{3333}{\sqrt{3} * 2} \quad [\text{éq. 5.22}]$$

Le courant moyen, par bras, par redresseur est égal à 555,5 A soit :

$$I_{moy / bras} = \frac{I_d}{3 * 2} = \frac{3333}{3 * 2} \quad [\text{éq. 5.23}]$$

Le rapport de X/R qui est égal à 6,34 sans tenir compte de l'impédance de commutation (soit le pire cas), permet d'obtenir la valeur du facteur k_p égale à 1,65, selon la figure 8,10 de la référence [L12].

Le courant de court-circuit de première crête i_{ds} est égal à 45 817 A soit :

$$i_{ds} = k_p * I_{ds} = 1,65 * 27\,767,6 \quad [\text{éq. 5.24}]$$

Le courant de court-circuit de première crête i_{as} sur une diode est égal à 8 817 A soit :

$$i_{as / diode} = \frac{k_p * 2 / \sqrt{3} * I_{ds}}{N_{diode / bras}} = \frac{1,65 * 2 / \sqrt{3} * 27\,767,6}{6} \quad [\text{éq. 5.25}]$$

Le courant de 8 817 A crête ne dépasse pas le maximum permis de la diode qui est de 14 700 A à 45 °C.

5.2.2 Les échauffements des redresseurs

Des calculs des échauffements sur les diodes sont faits pour les redresseurs des réseaux prolongés (1985, 1982 et 1976) ainsi que pour les redresseurs du réseau initial (1966).

Les calculs des échauffements pour les diodes sont faits pour les charges et les surcharges. La charge nominale est de 2 500 kW et la surcharge est de 3750 kW, d'une durée de deux heures.

Les calculs des courants moyen et efficace sont tels que décrit à la section précédente. Les courants moyens sont de 555,6 A et 833,3 A respectivement pour 100 % et 150 % de la charge.

Les courants efficaces sont de 962,3 A et 1 443,4 A respectivement pour 100% et 150% de la charge.

5.2.2.1 Les échauffements des redresseurs des prolongements (1976, 1982 et 1985)

Les intrants sont les suivants :

Tableau 5.6 – Intrants des redresseurs prolongés

Tension secondaire à vide du XFO	Eso	601 V
Tension pleine charge du RED	Enom	750 V
Courant nominal du RED	Id	3333 A
Impédance de court-circuit en p.u.	Zcct_pu	0,1373 pu
Nombre de diode par bras	Ndiode/bras	6
Coefficient thermique entre l'échangeur d'air et l'air ambiant	R _{thsa}	0,275 °C/W
Coefficient thermique entre la jonction et l'air ambiant	R _{thjs}	0,065 °C/W

Les calculs sont faits dans un premier temps avec toutes les diodes utilisées (six diodes par bras). Le facteur de 30% est ajouté pour tenir compte du déséquilibre possible entre les diodes.

Le courant efficace par diode multiplié par le facteur de déséquilibre est égal à 208,5 A soit :

$$I_{eff_diode_ \%dés} = I_{eff_bras} * 1,30 / 6 \quad [eq. 5.26]$$

Le courant moyen par diode multiplié par le facteur de déséquilibre est égal à 120,37 A soit :

$$I_{moy_diode_ \%dés} = I_{moy_bras} * 1,30 / 6 \quad [eq. 5.27]$$

Les pertes dans les diodes égales à 107,89 W, sont calculées selon l'équation suivante :

$$P_{diodes_6diodes} = (V_{fo} * I_{moy / diode \%dés}) + (r_f * I_{eff / diode \%dés}) \quad [eq. 5.28]$$

Les calculs sont répétés pour la surcharge de 150 % selon les équations décrites précédemment. Le tableau suivant regroupe les calculs obtenus :

Tableau 5.7 – Pertes dans les diodes selon la charge

	Charge	
	100%	150 %
I_{eff diode %dés} (Aeff)	208,5	312,7
I_{moy diode %dés.} (Amoy)	120,4	180,5
P_{diode} (W)	107,9	172,3

Les températures sur la jonction de la diode qui doivent être inférieures à 145 °C, sont calculées en fonction de la charge selon l'équation suivante :

$$T_{jo_diode} = T_a + (R_{thsa} * P_{diode}) + (R_{thjs} * P_{diode}) \quad [eq. 5.29]$$

Le tableau suivant regroupe les résultats des calculs.

Tableau 5.8 – Température des 6 diodes

	Charge	
	100%	150 %
Perte dans la diode - P_{diode} (W)	107,9	172,3
Température ambiante - T_a (°C)	55,0	55,0
Augmentation de température de l'échangeur /ambiant ΔT_{sa}	29,7	47,4
Température sur l'échangeur - T_s (°C)	84,7	102,4
Augmentation de température de l'échangeur/ jonction ΔT_{js}	7,0	11,2
Température sur la jonction - T_j (°C)	91,7	113,6

Les températures calculées sont inférieures aux températures maximales permises. Notez que selon les discussions auprès des fournisseurs des «redresseurs traction», la pratique courante est d'assumer une température ambiante de 55 °C, afin d'ajouter une marge de sécurité lors de la conception. L'échauffement calculé est inférieur de près de 30 °C à l'échauffement mesuré (à l'aide d'un thermomètre infrarouge), la température ambiante étant stabilisée à 20 °C lors des essais. Les calculs sont répétés, mais avec cinq diodes en fonction. Le facteur de 30% est maintenu. Le tableau suivant regroupe les résultats des calculs.

Tableau 5.9 – Température des 5 diodes

	Charge	
	100%	150 %
Perte dans la diode - P_{diode} (W)	132,9	214,4
Température ambiante - T_a (°C)	55,0	55,0
Augmentation de température de l'échangeur /ambiant ΔT_{sa}	36,5	59,0
Température sur l'échangeur - T_s (°C)	91,5	114,0
Augmentation de température de l'échangeur/ jonction ΔT_{js}	8,6	13,9
Température sur la jonction - T_j (°C)	100,2	127,9

Les températures calculées sont inférieures aux températures maximales permises.

5.2.2.2 Les échauffements des redresseurs 1966

Les intrants sont les suivants :

Tableau 5.10 – Intrants des redresseurs 1966

Tension secondaire à vide du XFO	Eso	584 V
Tension pleine charge du RED	Enom	750 V
Courant nominal du RED	Id	3333 A
Nombre de diode par bras	Ndiode/bras	7
Coefficient thermique entre l'échangeur d'air et l'air ambiant	R_{thsa}	0,275 °C/W
Coefficient thermique entre la jonction et l'air ambiant	R_{thjs}	0,11 °C/W

Les calculs sont faits avec toutes les diodes utilisées (7 diodes par bras). Le facteur de 30% est ajouté pour tenir compte du déséquilibre possible entre les diodes. Le tableau suivant regroupe les calculs obtenus.

Tableau 5.11 – Température des 7 diodes (1966)

	Charge	
	100%	150 %
Perte dans la diode - P_{diode} (W)	91,1	148,2
Température ambiante - T_a (°C)	55,0	55,0
Augmentation de température de l'échangeur /ambiant ΔT_{sa}	25,1	40,8
Température sur l'échangeur - T_s (°C)	80,1	95,8
Augmentation de température de l'échangeur/ jonction ΔT_{js}	10,0	16,3
Température sur la jonction - T_j (°C)	90,1	112,1

L'échauffement calculé est inférieur de près de 33 °C à l'échauffement mesurée (à l'aide d'un thermomètre infrarouge), la température ambiante étant stabilisée à 18 °C lors des essais.

CHAPITRE 6 CALCULS LIGNE 4 ET CALCULS D'ÉCHAUFFEMENT

Le chapitre 6 regroupe les résultats des calculs matriciels réalisés sur la ligne 4. Les calculs présentent les contributions des courants de chaque PR lorsqu'un court-circuit ou un train est localisé en station, en tunnel ou au pied d'un PR.

De plus, des calculs d'échauffement sont faits afin d'évaluer les températures totales des câbles haute tension et des câbles traction, selon les conditions typiques de charges d'un redresseur.

Finalement, le courant de faute suite à l'incident du court-circuiteur oublié à la station Sherbrooke est calculé.

Les valeurs suivantes sont utilisées pour toutes les simulations :

- La tension à vide (U_{do}) est égale à 840 V pour chaque groupe de transformateur de puissance et redresseur;
- L'impédance moyenne $Z_{moy.}$ est de $0,027 \Omega$ pour la résistance interne de chaque transformateur de puissance ;
- La résistance barre de guidage est égale à $29,4 \mu\Omega/m$ /barre de guidage;
- La résistance du rail négatif est égale à $43,33 \mu\Omega/m$ /rail négatif;
- La résistances linéaires par phase des câbles haute tension sont telles que montrées au tableau A1.2 de l'annexe A ;
- La résistance linéaire par câble traction est de $0,0709 \Omega/km$;
- La résistance statique d'un train est égale à $100 m\Omega$.

6.1 CALCULS SUR LA LIGNE 4

6.1.1 Configuration de la ligne 4

Trois PR alimentent les trains sur la ligne 4 (ligne jaune), soit les PR Bonsecours, Ile Notre-Dame et Longueuil.

La configuration de l'alimentation traction de la ligne 4 ainsi que les 10 points de mesures sont montrés à la figure suivante.

Les valeurs ohmiques des résistances calculées sont regroupées aux tableaux des pages suivantes :

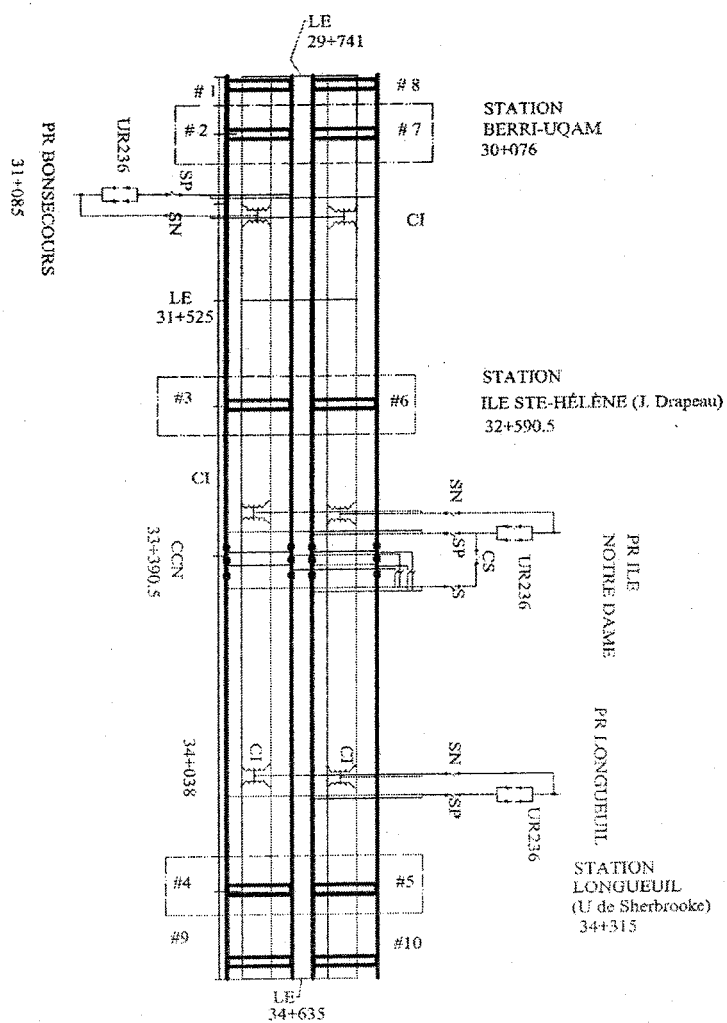


Figure 6.1 Alimentation traction de la ligne 4

Tableau 6.1 Ligne 4 - Résistances par voie

Endroit	Voie 2 Barre guidage Rail négatif		Voie 1 Barre guidage Rail négatif		Remarque
Arrière gare Berri UQAM [pk 29741]	point # 8		point # 1		LE
inter station d = 335 m	0,00492	0,00726	0,00492	0,00726	
Station Berri UQAM [pk 30076]	point # 7		point # 2		LE
inter «A» d = 1009 m	0,01483	0,02186	0,01483	0,02186	
Poste Bonsecours [pk 31085]					Zmoy. =0,027
inter «B» d = 440 m	0,02186	0,00000	0,02186	0,00000	
inter «C» d = 1065 m	0,01566	0,02308	0,01566	0,02308	
Station Ile Ste Hélène (Jean Drapeau) [pk 32590,5]	point # 6		point # 3		
inter «D» d = 800 m	0,01176	0,01733	0,01176	0,01733	
Poste Ile Notre Dame [pk 33390,5]					Zmoy. =0,027
inter «E» d = 647,5 m	0,00952	0,01403	0,00952	0,01403	
Poste Longueuil [pk 34038]					Zmoy. =0,027
inter «F» d = 277 m	0,00407	0,00600	0,00407	0,00600	
Station Longueuil (U Sherbrooke) [pk 34315]	point # 5		point # 4		
inter «G» d = 320 m	0,00470	0,00693	0,00470	0,00693	
Arrière gare Longueuil [pk 34635]	point # 10		point # 9		LE

Les contributions de chaque PR sont calculées par résolution de matrice (elles tiennent compte de la contribution des liaisons équipotentielle (L.E)).

6.1.2 Calculs au point de mesure n°1 (ou n°8)

Les calculs suivants sont réalisés pour le point de mesure n°1 (ou n°8) lorsque la contribution des liaisons équipotentielle (L.E.) est ignorée.

Une fois les calculs des résistances linéaires résolus au point de mesure n° 1, les matrices de résistances totales (à gauche) en fonction des trois PR est la suivante :

0,07588	0,00000	0,00000	I _{BONSECOURS}	840
0,00000	0,14277	0,00000	I _{Ile Notre-Dame}	840
0,00000	0,00000	0,16156	I _{Longueuil}	840

Par résolution de matrice nous obtenons les contributions suivantes des PR :

- Le poste Bonsecours débite 11 070 A ;
- Le poste Ile Notre-Dame débite 5 884 A ;
- Le poste Longueuil débite 5 199 A.

Les tableaux 6.2 et 6.3 regroupent les résultats des calculs des courants débités par chaque PR selon l'emplacement d'un court-circuit, en ignorant la contribution des liaisons équipotentielle (L.E.) au tableau 6.2 et en tenant compte des L.E. au tableau 6.3.

Les tableaux 6.4 et 6.5 regroupent les résultats des calculs des courants débités par chaque PR selon l'emplacement d'un train, en ignorant la contribution des L.E. au tableau 6.4 et en tenant compte des L.E. au tableau 6.5.

Tableau 6.2 - Ligne 4 – Courants de faute sans L.E.

	Courant en ampères provenant du poste de redressement			
	Bonsecours	Ile Notre Dame	Longueuil	Total de
Au point de mesure no.				
1 (ou 8)	11 070	5 884	5 199	22 153
2 (ou 7)	13 189	6 432	5 623	25 244
3 (ou 6)	11 272	15 541	11 773	38 586
4 (ou 5)	6 843	15 038	22 654	44 534
9 (ou 10)	6 250	12 444	17 245	35 939

Tableau 6.3 - Ligne 4 – Courants de faute avec L.E.

	Courant en ampères provenant du poste de redressement			
	Bonsecours	Ile Notre Dame	Longueuil	Total de
Au point de mesure no.				
1 (ou 8)	13 699	8 136	7 304	29 139
2 (ou 7)	15 921	8 872	7 890	32 683
3 (ou 6)	14 428	18 506	15 089	48 023
4 (ou 5)	9 570	18 321	24 648	52 539
9 (ou 10)	8 755	12 444	17 244	38 443

Tableau 6.4 - Ligne 4 – Courants d'un train sans L.E.

	Courant en ampères provenant du poste de redressement			
	Bonsecours	Ile Notre Dame	Longueuil	Total de
Au point de mesure no.				
1 (ou 8)	3 044	1 617	1 429	6 091
2 (ou 7)	3 293	1 606	1 404	6 303
3 (ou 6)	2 015	2 778	2 105	6 898
4 (ou 5)	1 086	2 386	3 595	7 067
9 (ou 10)	1 184	2 358	3 267	6 809

Tableau 6.5 - Ligne 4 – Courants d'un train avec L.E.

	Courant en ampères provenant du poste de redressement			
	Bonsecours	Ile Notre Dame	Longueuil	Total de
Au point de mesure no.				
1 (ou 8)	3 065	1 821	1 634	6 520
2 (ou 7)	3 255	1 814	1 613	6 683
3 (ou 6)	2 148	2 755	2 246	7 149
4 (ou 5)	1 319	2 525	3 398	7 242
9 (ou 10)	1 570	2 231	3 092	6 894

6.1.2.1 Résultats obtenus des calculs sur la ligne 4

Contribution des postes de redressement.

La contribution des PR est inversement proportionnelle à la distance qui sépare le train du PR. Ainsi, un train en arrière gare Berri-UQAM (ligne 4), sera alimenté principalement par le PR le plus près soit Bonsecours à 47%. La contribution restante sera partagée presque également par les PR Ile Notre-Dame à 28% et Longueuil à 25%.

Détection des fautes (courts-circuits).

Pour la ligne 4, la protection de surintensité des DV est réglée à 9 500 A. Lorsque tous les PR sont en service, un court-circuit qui survient n'importe où sur la ligne 4 sera détecté par le PR le plus près de la faute, suivi de l'asservissement aux autres PR.

Mais lorsque le PR Bonsecours est laissé hors service (pour fin d'entretien par exemple), une faute éloignée aux points 1, 2, 7 ou 8 ne sera pas détectée par la fonction instantanée des DV des autres PR. Ainsi, seule la fonction delta I du relais di/dt peut détecter ce niveau de faute (voir chapitre 7). Pour ce faire, les L.E. ont été ajoutées dans les années 1976 pour faciliter la détection des fautes éloignées.

6.2 CALCULS DES TEMPERATURES DES CABLES

6.2.1 TEMPERATURES DU CABLE HAUTE TENSION

Les températures du câble haute tension sont calculées selon le cycle de charge typique d'une journée d'un PR, montré au chapitre 8.

La charge d'un poste de redressement aux «heures de pointe» est de 1,2 MW, elle est abaissée à 0,6 MW aux «heures hors pointe».

Pour calculer les températures du câble selon le cycle de charge, les données et les équations utilisées sont tirées des livres [L7], [L26] ainsi qu'au tableau 2 du code [N3] (les équations utilisées sont similaires aux équations utilisées dans les logiciels commerciaux). Les données du câble trois conducteurs # 2/0 AWG – 28 kV sont les suivantes :

Tableau 6.6 – Paramètres techniques de 3c #2/0 AWG 28 kV

Courant maximum du conducteur	I_{max}	185 A
Température maximale du conducteur	T_{max}	90 °C
Température ambiante du conducteur	T_a	25 °C
Coefficient de température du conducteur	α_0	0,00427 /°C
Section du conducteur	A	0,0000674 m ²
Diamètre du conducteur	D	0,00927 m
Résistivité du cuivre	ρ_0	15,9 * 10 ⁻⁰⁹ Ω*m
Facteur de dégagement de chaleur spécifique du conducteur	C_p	383 J/kg* °K
Masse du conducteur	m	0,6 kg
Résistance du conducteur à 0 °C	R_0	235,9 μΩ*m
Résistance du conducteur à 25 °C	R_{25}	261,1 μΩ*m

Le calcul du coefficient h_0 du câble 3c # 2/0 (soit le coefficient de transfert de chaleur durant l'échauffement) est le suivant ;

$$h_0 = \frac{I^2 * R_{25} * (1 + \alpha_0 * (T_c - T_0))}{\pi * D * (T_c - T_a)} \quad [\text{éq. 6.1}]$$

Une fois l'équation résolue, $h_0 = 5,224 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$.

Le calcul de la constante d'échauffement τ_{ho} , du câble 3c # 2/0 est le suivant ;

$$\tau_{ho} = \frac{m * c_p}{\pi * D * ho - \alpha o * Ro * I^2} \quad [\text{eq. 6.2}]$$

Une fois l'équation résolue, $\tau_{ho} = 2015,9$ secondes pour le courant nominal de 185 A.

Les échauffements θ_i du câble 3c # 2/0, après les six niveaux de charges d'un PR selon leur durée, sont calculés selon l'équation suivante ;

$$\theta_i = \frac{R_{temp} * I_i^2 * (1 - \alpha o * T_{ref}.) + \pi * D * ho * Ta}{\pi * D * ho - \alpha o * Ro * I_i^2} \quad [\text{eq. 6.3}]$$

Dans laquelle les paramètres sont calculés comme suit;

La résistance en ohms selon la température à laquelle le conducteur est rendu R_{temp} :

$$R_{temp} = R_0 * (1 + \alpha o * Temp.) \quad [\text{eq. 6.4}]$$

La charge est calculée en ampères comme suit (le facteur 2 est ajouté puisque deux PR sont branchés sur un même DHT) ;

$$I_i = \frac{P * 10^6 * 2}{\sqrt{3} * 24940} \quad [\text{eq. 6.5}]$$

Les échauffements sont calculés selon les charges. Les échauffements sont présentés au tableau suivant ;

Tableau 6.7 – Température de 3c # 2/0 AWG

Période	θ_i	Charge du PR [MW]	Courant [A]	Température du câble θ [°C]
24:30 - 05:30	1	0,0	00,0	25,0
05:30 - 07:00	2	0,6	27,8	26,3
07:00 - 09:00	3	1,2	55,6	30,5
09:00 - 15:00	4	0,6	27,8	26,4
15:00 - 17:00	5	1,2	55,6	30,5
17:00 - 24:30	6	0,6	27,8	26,4

6.2.2 TEMPERATURES DES CABLES TRACTION

L'étude des câbles traction se divise en deux différentes études soit :

- Les températures des câbles traction installés sur chaque DV;
- Les températures des câbles traction installés sur le redresseur.

Selon la table 1 du code de l'électricité du Québec [N3], le câble 500 kcmils peut porter un courant permanent de 660 A tout en respectant l'intégrité du câble ($T < 90^\circ\text{C}$).

6.2.2.1 Câble traction sur chaque DV

Pour les câbles traction installés sur chaque DV, les deux cas suivants sont analysés soit avec les quatre câbles utilisés (la situation normale) ou trois câbles (lorsque la qualité de l'isolation est réduite sur un des quatre câbles).

Le profil de charge typique d'un PR est identique à celui décrit à la section précédente. Les données et les équations utilisées sont tirées des livres [L7] et [L26]. Les données du câble 500 kcmils sont les suivantes :

Tableau 6.8 – Paramètres techniques du câble 500 kcmils

Courant maximum du conducteur	I_{\max}	660 A
Température maximale du conducteur	T_{\max}	90°C
Température ambiante du conducteur	T_a	25°C
Coefficient de température du conducteur	α_0	$0,00427 / ^\circ\text{C}$
Section du conducteur	A	$0,000253 \text{ m}^2$
Diamètre du conducteur	D	$0,0254 \text{ m}$
Résistivité du cuivre	ρ_0	$15,9 \cdot 10^{-09} \Omega \cdot \text{m}$
Facteur de dégagement de chaleur spécifique du conducteur	C_p	$383 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{K}$
Masse du conducteur	m	$2,252 \text{ kg}$
Résistance du conducteur à 0°C	R_0	$62,8 \mu\Omega \cdot \text{m}$
Résistance du conducteur à 25°C	R_{25}	$69,5 \mu\Omega \cdot \text{m}$

Le calcul du coefficient h_0 du câble 500 kmils est réalisé selon l'équation 6.1 et

$$h_0 = 6,4599 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

Le calcul de la constante d'échauffement τ_{ho} , est fait selon l'équation 6.2 et

$$\tau_{ho} = 2233,3 \text{ secondes pour le courant nominal de } 660 \text{ A}.$$

6.2.2.1.1 Quatre câbles utilisés

Les échauffements θ_i des quatre câbles 500 kmils, après les six niveaux de charges d'un PR selon leur durée, sont calculés selon l'équation 6.3, dans laquelle les paramètres sont calculés comme suit ;

La résistance en ohms selon la température à laquelle le conducteur est calculé selon l'équation 6.4.

La charge est calculée en ampères comme suit (le facteur 1,25 est ajouté pour tenir compte d'un déséquilibre possible entre les câbles) ;

$$I_i = \frac{P * 10^6 * 1,25}{4 * 750} \quad [\text{éq. 6.6}]$$

Les échauffements sont calculés selon les charges et ils sont présentés au tableau suivant ;

Tableau 6.9 – Températures de 4c 500 kmils

Période	θ_i	Charge du poste [MW]	Courant/ câble [A]	Température du câble θ [$^\circ\text{C}$]
24:30 - 05:30	1	0,0	000,0	25,0
05:30 - 07:00	2	0,6	250,0	33,7
07:00 - 09:00	3	1,2	500,0	65,9
09:00 - 15:00	4	0,6	250,0	35,2
15:00 - 17:00	5	1,2	500,0	66,2
17:00 - 24:30	6	0,6	250,0	35,2

6.2.2.1.2 Trois câbles utilisés

Les échauffements θ_i des trois câbles 500 kcmils, après les six charges d'un PR selon leur durée, sont calculés selon l'équation 6.3 et 6.4.

Les calculs d'échauffement des trois câbles 500 kcmils, θ_1 à θ_6 sont faits selon les équations 6.3 et 6.4.

La charge est calculée en ampères comme suit (le facteur 1,33 est ajouté pour tenir compte d'un déséquilibre possible entre les câbles) ;

$$I_i = \frac{P * 10^6 * 1,33}{3 * 750} \quad [\text{éq. 6.7}]$$

Les échauffements sont calculés selon les charges et ils sont présentés au tableau suivant ;

Tableau 6.10 – Températures de 3c 500 kcmils

Période	θ_i	Charge du poste [MW]	Courant/ câble [A]	Température du câble θ [°C]
24:30 - 05:30	1	0,0	000,0	25,0
05:30 - 07:00	2	0,6	346,7	42,4
07:00 - 09:00	3	1,2	693,3	123,2
09:00 - 15:00	4	0,6	346,7	49,7
15:00 - 17:00	5	1,2	693,3	126,9
17:00 - 24:30	6	0,6	346,7	50,0

Selon les résultats des calculs obtenus, la température du câble est inférieure de beaucoup au maximum permis pour quatre câbles 500 kcmils. Par ailleurs, lorsque trois câbles sont utilisés, la température calculée est supérieure au maximum permis et il y aura détérioration théorique de l'isolation si l'utilisation à trois câbles est maintenue. Il faut noter que l'appel de puissance moyenne d'un train est de 20 secondes limitant ainsi l'échauffement réel du câble.

En pratique, la température des câbles pour l'application à quatre câbles, après la pointe du soir est égale à 60 °C (au lieu de 66 °C) pour une température ambiante de 25 °C.

6.2.2.2 Câble traction installé sur le redresseur

Pour les câbles traction du redresseur, le profil de charge typique d'un PR est identique à celui décrit à la section précédente et les données, les équations utilisées sont telles que décrites précédemment.

Les échauffements θ_i des huit câbles 500 kmils, après les six charges d'un PR selon leur durée (θ_1 à θ_6) sont calculés selon l'équation 6.3, dans laquelle les paramètres sont calculés comme suit ;

La résistance en ohms selon la température à laquelle le conducteur est calculé selon l'équation 6.4.

La charge est calculée en ampères comme suit (le facteur 1,125 est ajouté pour tenir compte d'un déséquilibre possible entre les câbles) ;

$$I_i = \frac{P * 10^6 * 1,125}{8 * 750} \quad [\text{eq. 6.6}]$$

Les échauffements sont calculés selon les charges et ils sont présentés au tableau suivant ;

Tableau 6.11 – Températures de 8c 500 kmils

Période	θ_i	Charge du poste [MW]	Courant/ câble [A]	Température du câble θ [°C]
24:30 - 05:30	1	0,0	000,0	25,0
05:30 - 07:00	2	0,6	112,5	26,7
07:00 - 09:00	3	1,2	225,0	32,1
09:00 - 15:00	4	0,6	112,5	26,8
15:00 - 17:00	5	1,2	225,0	32,1
17:00 - 24:30	6	0,6	112,5	26,8

Selon les résultats des calculs obtenus, la température du câble est inférieure de beaucoup au maximum permis.

En pratique, la température des câbles pour l'application à huit câbles, est égale à 28 °C (au lieu de 32 °C) pour une température ambiante de 25 °C.

6.3 CALCUL DU COURANT DE FAUTE SUITE A L'INCIDENT SHERBROOKE

Un court-circuiteur est utilisé pour sécuriser une intervention lorsque par exemple une réparation sur la voie est requise. Le court-circuiteur sert alors de cavalier pour brancher la barre de guidage au rail négatif. La résistance du court-circuiteur est de l'ordre de 80 $\mu\Omega$.

Suite à une réparation de nuit, un court-circuiteur a été oublié à la station Sherbrooke au point kilométrique 36 402.

Une première alimentation traction par le poste de redressement Bellechasse a alimenté le court-circuiteur à la station Sherbrooke distancé de 2 840 m.

Le niveau de courant de faute est calculé à 7 969 A, soit ;

$$\frac{840V}{((0,0709 \Omega/km * 0,030 km) + 0,5 * 2840 m * (29,4 \mu\Omega + 43,33 \mu\Omega) + 80 \mu\Omega + ,027 \Omega)]}.$$

Comme le UR236 est ajusté à 9 500 A, l'alimentation traction a été maintenue. Après inspection en tunnel, le court-circuiteur était soudé à la barre de guidage.

Par la suite, une alimentation traction par le poste de redressement Viger a déclenché l'alimentation traction par surintensité. Le PR Viger était distancé de 680 m et il fournissait un courant de faute estimé à 15 595 A soit ;

$$\frac{840V}{((0,0709 \Omega/km * 0,030 km) + 0,5 * 680 m * (29,4 \mu\Omega + 43,33 \mu\Omega) + 80 \mu\Omega + ,027 \Omega)]}.$$

CHAPITRE 7 – PROTECTIONS

Le chapitre 7 présente les protections et leur fonctionnement. Les protections sont regroupées selon qu'elles protègent en courant ou en tension.

Les protections en courant sont :

- **Le disjoncteur de voie (DV);**
- **Le relais de surintensité (50/51);**
- **Le relais de basse impédance (BI);**
- **Le relais à accroissement de courant dans le temps (di/dt);**
- **Le relais courant inverse (#32);**
- **Le fusible installé sur la diode ou sur la varistance.**

Les protections en tension sont :

- **La varistance (discuté à la section du disjoncteur de voie);**
- **Le relais de haute impédance (HI);**
- **Le dispositif essai de ligne (EDL).**

De plus, les déclenchements en séquence selon le type de faute détectée, sont également présentés à la fin du présent chapitre.

7.1 LES PROTECTIONS EN COURANT

7.1.1 Le disjoncteur de voie

L'étude des disjoncteurs de voie se divise en deux sujets distincts :

- les technologies utilisées;
- les surtensions de manœuvres suite à une ouverture.

7.1.1.1 Les technologies utilisées

Le disjoncteur de voie est l'appareil qui alimente les trains et interrompt l'alimentation aux trains lorsqu'une faute survient.

Deux types de disjoncteurs sont installés soit de type ultra-rapide ou semi-rapide.

Les disjoncteurs ultras-rapides sont de modèle UR-36 ou UR-236. Ces deux modèles sont fabriqués par la compagnie Secheron.

Le disjoncteur est appelé ultra-rapide puisqu'il limite l'amplitude du courant de faute sur un accroissement de courant dans le temps (di/dt) de $5 \cdot 10^6$ A/s. Son temps de réaction mécanique (T_m) est inférieur ou égal à 4 ms. Il est à maintien électrique avec une «résistance d'économie» pour réduire l'énergie consommée (puisque'il est alimenté 20 heures 30 minutes par jour, 365 jours par année). À l'enclenchement du disjoncteur de voie, l'énergie consommée est de 1 300 W soit 10,8 A à 120 Vcc. Elle est abaissée à 2,3 W soit 19,2 mA pour le maintien électrique de la bobine du disjoncteur.

L'alimentation des circuits du disjoncteur est montée «en sécurité». Ainsi, un incident causant la perte de l'alimentation de contrôle, fil coupé par exemple, implique l'ouverture immédiate du disjoncteur.

Le disjoncteur semi-rapide est de modèle GBJ8 de la compagnie BBC. Il est appelé semi-rapide puisqu'il ne limite pas l'amplitude du courant de faute. Son temps de réaction mécanique est de l'ordre de 40 ms. Le circuit de déclenchement n'est pas monté en sécurité. Sa bobine de déclenchement doit recevoir une impulsion pour être déclenché et son alimentation doit être supervisée par un relais de supervision d'alimentation.

7.1.1.2 Surtension de manoeuvre

Les surtensions de manoeuvre sont produites suite à l'ouverture du disjoncteur de voie. Puisque l'alimentation est continue, le disjoncteur doit arracher la tension continue pour interrompre la faute. Les disjoncteurs UR-36 et UR-236 utilisent la cheminée d'extinction d'arc, de tension nominale de 1000 Vcc, de modèle 61. La cheminée d'extinction d'arc, de conception «cathode à froid» (traduit de «cold cathode method») est composée d'une série de cellules parallèles faites de métal et isolées les unes des autres à l'aide de céramique. À l'ouverture des contacts principaux, l'arc est amené dans la cheminée d'extinction d'arc. L'arc est alors «brisé» et distribué sur les cellules isolées les unes des autres et ces cellules sont froides. La distribution égale entre les différentes cellules limite la surtension de manoeuvre (la différence de tension maximale entre deux cellules est près de 40 V). Grâce à cette technique de distribution égale de l'arc sur toute les cellules, la surtension de manoeuvre produite pour les disjoncteurs UR-36 et UR-236 ayant la cheminée 61, est limitée à deux fois la tension au moment de la faute. La surtension de manoeuvre maximale produite est de 1 800 Vcc (900 Vcc à vide *2).

Cette surtension de manoeuvre produite, impose des paramètres de tension inverse, qui doivent être supérieurs pour les équipements sensibles au dv/dt rapide soit :

- Les diodes des réseaux prolongés. Les tensions inverses répétitives et non répétitives de chaque diode sont respectivement égales à 2 000 et 2 200 Vcc. De plus, il y a toujours en série deux diodes en inverse. Les diodes utilisées sont des diodes avalanches dont les caractéristiques sont présentées en annexe. La diode doit avoir des tenues en tension inverse supérieure aux surtensions de manoeuvre produite par les disjoncteurs;
- Les varistances. Le circuit de protection des surtensions de manoeuvre ce compose d'une varistance (MOV) de 2 000V.
- *Les diodes du réseau initial. La tension inverse répétitive de chaque diode peut monter jusqu'à 3 000 V;*
- *Les varistances. Le circuit de protection des surtensions de manoeuvre ce compose de deux varistances de 2 000V.*

Ainsi, en terme de «coordination des surtensions de manœuvre», la surtension de manœuvre produite par les disjoncteurs de voie (égale à 1 800 V) est inférieure à la tension inverse de chaque diode (égale à 2 000 V), qui est également inférieure à la tension d'amorçage de chaque varistance (égale à 2 000 V).

7.1.2 Le relais de surintensité (50/51)

Pour les relais de surintensité, ils sont de type instantané (fonction 50) ou de type temporisé (fonction 51) dont la courbe est à temps inverse ou extrêmement inverse permet une coordination avec les protections en amont des disjoncteurs d'arrivée.

7.1.3 Le relais basse impédance (BI)

Le relais basse impédance (BI) valide le bon niveau d'isolation de l'équipement. La figure 7.1, présente les branchements typiques du relais basse impédance.

Pour les réseaux prolongés (1976, 1982 et 1985), le relais basse impédance (BI) est un relais à minimum de courant, de modèle MAS-2 de la compagnie Elektrobag monté sur un socle isolant. Le relais est ajusté au seuil minimum soit 80 A.

Pour le réseau initial (1966), le relais est également un relais à minimum de courant, de modèle RMI-XA de la compagnie Télémécanique. Le relais est ajusté à son seuil minimum soit 100 A.

Un courant de fuite de 80 A (ou de 100 A pour le réseau 1966) circulant entre la cellule du transformateur et la terre ou entre la grille du redresseur et la terre, impose un déclenchement du PR, puisque l'isolation du transformateur ou l'isolation du redresseur fait défaut. Le PR en faute doit alors être déclenché accompagné de l'indication avarie grave terre groupe transformateur redresseur et ce pour tous les PR.

Pour les réseaux 1982 et 1985, les transformateurs sont installés à l'extérieur et ils sont supervisés par un relais BI. Les redresseurs lorsque seuls, sont supervisés par un relais de haute impédance.

7.1.4 Le relais à accroissement de courant dans le temps (di/dt)

L'étude du relais à accroissement de courant dans le temps (di/dt) se divise en deux sujets distincts :

- l'historique justifiant le relais di/dt ;
- les fonctions intégrées dans le relais et leurs ajustements.

7.1.4.1 Historique

À l'origine du réseau 1966, le métro de Montréal n'avait pas de relais à accroissement de courant dans le temps. Seul l'élément de surintensité monté sur chaque disjoncteur pouvait détecter les surintensités. Comme discuté au chapitre 4, l'appel de courant d'un train est très similaire à un court-circuit de type éloigné.

Deux incendies sont survenus dans le métro de Montréal soit à la station Henri-Bourassa en 1971 et en 1974 entre les stations Laurier et Rosemont.

Prenons l'exemple de l'incident Henri-Bourassa, compte tenu des distances, le courant débité par le redresseur Sauriol était de 9 500 A, le courant débité par le redresseur Chabanel était de 6 837 A. Comme les réglages des disjoncteurs étaient ajustés à 10 500 A, aucune disjonction n'est survenue. Les redresseurs ont débité dans le train en faute de façon permanente jusqu'à l'incendie du train. Le relais à accroissement de courant dans le temps a fait son apparition suite à ces incidents.

7.1.4.2 Les fonctions intégrées

Pour analyser la forme d'onde des courants débités par le redresseur, un amplificateur de mesure isolé (MIU) est utilisé pour isoler le relais de protection du 750 Vcc.

Comme cet MIU est branchée sur un shunt de 5000A/ 100 mV, il transmet une tension proportionnelle de 100 mV lorsque le courant débité du redresseur est de 5000 A.

Le relais à accroissement de courant dans le temps intègre des fonctions de trois natures différentes ; fonctions de base, fonctions redondantes et fonctions non utilisées.

Les fonctions de base

Les fonctions de base sont les fonctions liées à l'amplitude et la durée du courant débité par le redresseur. Ces fonctions de base sont analysées selon deux pentes différentes.

La première série de fonctions de base est analysée lorsque la pente ascendante «E1» est supérieure à 10 kA/s et elle cesse d'être analysée lorsque la pente descendante «F1» est inférieure à 5 kA/s. Ces fonctions de base sont ;

- Accroissement dans le temps supérieur «delta I» ajustée à 1200 A (sauf Ahuntsic et Sauriol qui sont ajustées à 2000A) ;
- Limite du temps de montée du courant redresseur «Tmax» ajustée à 100 ms lorsque le courant débité est supérieur à 600 A.

La seconde série de fonctions de base est analysée seulement lorsque la pente ascendante «E2» est supérieure à 800 kA/s, et elle n'est plus analysée lorsque la pente descendante «F2» est inférieure à 600 kA/s. L'amplitude négative doit être supérieure à - 800 kA/s.

Ces fonctions de base analysées sont l'arc interrompu pour le relais modèle SEPCOS ou l'arc interrompu et l'anti-perturbation de l'utilité publique pour le relais modèle DDL ACA. La signature d'un arc interrompu étant très similaire à une perturbation liée à la fermeture d'un disjoncteur de distribution d'Hydro Québec, le relais DDL ACA intègre cette fonction.

Les fonctions redondantes

Deux fonctions sont redondantes aux relais de protection dans le poste de redressement pour le relais modèle SEPCOS soit ;

- L'amplitude maximum du courant débité du redresseur vers les voies soit «Imax+» ajustée à 9 500 A, qui est redondante à l'élément de surintensité monté directement sur le disjoncteur;
- L'amplitude maximum du courant débité des voies vers le redresseur soit «Imax » ajustée à 1 000 A, qui est redondante au relais de courant inverse # 32.

Le dépassement de l'un des paramètres du relais di/dt provoque dans les PR des réseaux prolongés (1976, 1982 et 1985), le déclenchement des DV dans le PR (habituellement quatre DV), suivi de l'asservissement des deux DV du PR en amont, et des deux DV du PR en aval. Par la suite, un réenclenchement est commandé par le dispositif EDL.

Dans les postes du réseau 1966, suite à la disjonction provoquée par un di/dt, comme il n'y a pas de dispositif EDL, une commande manuelle d'enclenchement du DV est alors requise.

Les fonctions non utilisées

Comme le relais SEPCOS est installé du côté du redresseur, comparativement aux autres métros dans le monde (voir le chapitre 9 - Vigies technologiques), plusieurs fonctions du relais SEPCOS sont laissées non utilisées soit ;

- L'effet thermique $I^2 \cdot t$ pour protéger les câbles traction ;
- Les fonctions du dispositif EDL.

De plus, il faut noter que le relais di/dt est inhibé durant 100 ms lors de la fermeture d'un DV dans le PR ou à la fermeture du DHT du PR. L'inhibition du di/dt est requise afin d'éviter une fausse opération des DV et des DHT compte tenu de sa grande sensibilité. Seul l'élément de surintensité du DV permet alors la détection d'une faute à la fermeture du DV ou du DHT.

7.1.5 Le relais courant inverse (#32)

Le relais courant inverse (#32) est branché sur le shunt de 5 000 A/ 100 mV. Il lit le sens du courant débité par le redresseur. Un court-circuit dans le redresseur provoque un courant de sens inverse, alimenté par la voie, dans le redresseur. Les relais sont ajustés à leur valeur minimum soit 700 A. Le relais #32 provoque le déclenchement de tous les DV dans le PR, suivi de l'asservissement des deux DV du PR en amont, des deux DV du PR en aval, du DHT et du SPM.

7.1.6 Le fusible installé sur la diode ou sur la varistance

Le fusible monté sur une diode

Le fusible est installé sur tous les redresseurs, en série avec chaque diode pour isoler la diode en court-circuit.

Pour les PR des réseaux prolongés, un fusible par bras permet le maintien du PR en fonction pour les PR des réseaux prolongés. Une alarme est alors envoyée au centre de contrôle.

Par ailleurs, deux fusibles sur un même bras entraînent la disjonction du PR par l'opération de tous les DV du PR, des DV des PR en amont et en aval, du DHT et du SPM.

Pour le réseau initial l'opération du fusible déclenche le PR par l'opération du DHT et de tous les DV dans la zone.

Le fusible monté sur une varistance

Pour tous les réseaux, le fusible monté sur la varistance, isole la varistance en court-circuit. Le fusible brûlé provoque la disjonction du poste par l'opération de tous les DV du poste, des DV des postes en amont et en aval, du DHT et du SPM.

7.2 LES PROTECTIONS EN TENSION

7.2.1 Le relais haute impédance

Le relais de haute impédance (HI) valide le bon niveau d'isolation de l'équipement. La figure suivante présente les branchements typiques des deux relais BI et HI selon la configuration du poste de redressement.

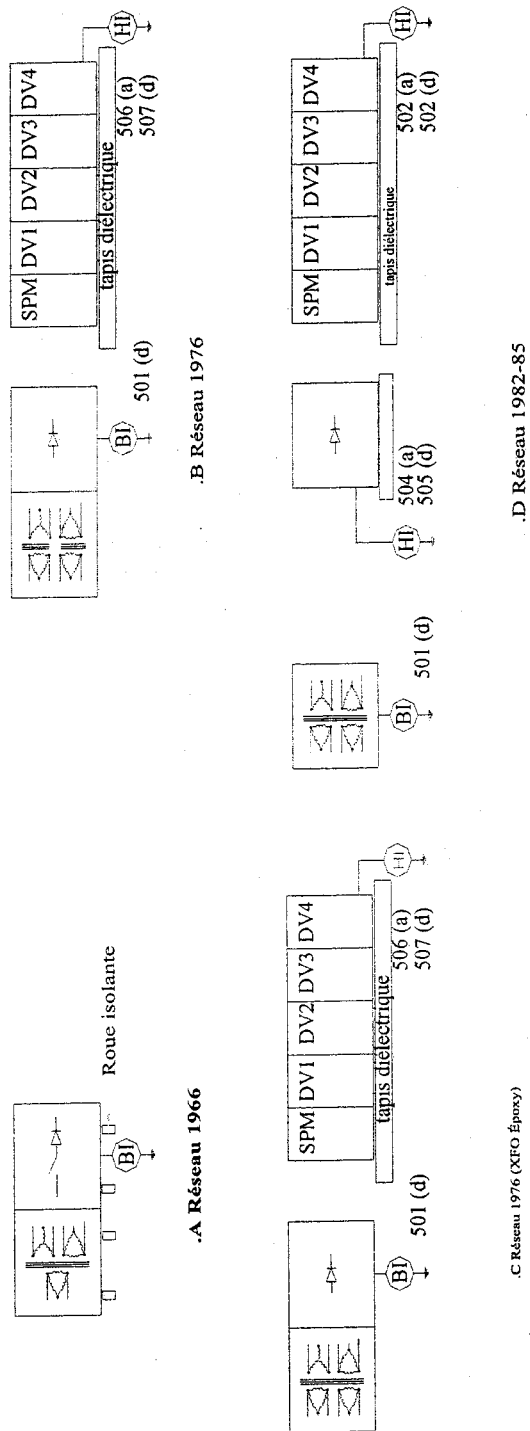


Figure 7.1 Protection basse et haute impédance

Le relais haute impédance est un relais de tension qui mesure le différentiel de tension entre la cage redresseur et la mise à la terre (MALT) du bâtiment pour le réseau 1982-1985.

Si le redresseur est seul (lorsque le transformateur est installé à l'extérieur), deux relais haute impédance permettent deux réglages soit :

- Le premier seuil d'alarme qui s'active lorsque le différentiel de tension est égal à 50 V. Une alarme «avarie légère terre redresseur» est envoyée au PSA local puis au centre de contrôle.
- Le deuxième seuil commande le déclenchement du PR lorsque le différentiel de tension est égal à 200 V. Une alarme «avarie grave terre redresseur» est envoyée au PSA local puis au centre de contrôle.

Pour tous les réseaux prolongés, l'ensemble des cellules contenant le sectionneur positif motorisé (SPM) et les quatre disjoncteurs de voies (DV) sont déposés sur un tapis diélectrique. Le châssis de toutes les cellules, la barre de MALT à l'arrière des cellules sur lequel tous les châssis des cellules sont branchés à la barre de MALT de la bâtisse par l'intermédiaire d'un relais de haute impédance.

Le relais haute impédance mesure le différentiel de tension des châssis des cellules DV, SPM et bâtiment.

Pour le SPM et les DV, deux relais permettent deux réglages soit :

- Le premier seuil d'alarme qui s'active lorsque le différentiel de tension est égal à 100 V. Une alarme «avarie légère terre SPM/DV» est envoyée au PSA local puis au centre de contrôle.
- Le deuxième seuil commande le déclenchement du poste de redressement lorsque le différentiel de tension est égal à 200 V. Une alarme «avarie grave terre SPM/DV» est envoyée au PSA local puis au centre de contrôle.

7.2.2 Détecter à l'alimentation les fautes sur les voies

Le dispositif essai de ligne (EDL) est introduit depuis le premier prolongement en 1976 et il est installé sur chaque DV.

Suite à une commande de fermeture d'un disjoncteur de voie (DV), d'une voie qui est non alimentée, le dispositif EDL injecte une tension entre le jeu de barre côté voie et le négatif. Le courant injecté est comparé au seuil de courant limite correspondant à $10\ \Omega$. Le DV aura la permission de fermer si cette mesure de résistance est supérieure ou égale à $10\ \Omega$. Le DV restera bloqué à l'état ouvert si l'impédance lue par le dispositif est inférieure à $10\ \Omega$. Une indication mesure impédance ligne (MIL) sera alors indiquée sur la cellule du DV, puis une indication MIL sera transmise au centre de contrôle.

Deux modèles sont installés :

- Le modèle «transformateur de fuite à forte impédance» installé dans les PR de la ligne 5 portion Ouest soit les postes Parc, Outremont, Édouard Montpetit et Decelles ainsi que dans le PR Metcalfe sur la ligne 1.
- Le modèle «IWX». Le «IWX gris» est installé sur les cellules des PR du prolongement 1976.
- Le «IWX-A orange» est installé sur les cellules des PR du réseau 1982 ainsi que les PR de la ligne 5 St-Michel, Iberville, Jean-Talon et Snowdon.

Les séquences du dispositif EDL sont décrites au tableau suivant ;

Tableau 7.1 - Séquences du EDL

Cde T=1s	←T=1s→	Commande reçue de fermeture d'un DV						
Initialisation du séquenceur	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'
Temps mort	←Temps mort de 3 s. →							
Présence de la tension voie	Après le temps mort, il y a mesure de la tension voie. Le DV ferme sans essai de validation lorsque la tension voie est supérieure à 450 Vcc. Sinon les séquences de validations sont :							
Alimentation contrôle [873]	L'alimentation du contrôle est maintenue du début de L'EDL jusqu'à la fermeture du DV.			←-----T= 5 - T _{Enc. DV} -----→				
Alimentation du XFO d'injection [872 +882]	L'alimentation du XFO est maintenue du début de L'EDL jusqu'à la fermeture du DV.			←-----T= 5 - T _{Enc. DV} -----→				
Bonne fenêtre de mesure	Remise à zéro si la mesure n'est pas bonne			←T= 2,5 s → Fenêtre de R>10 ohms qui se déplace				
Enregistrement essai concluant	Entre 3,7 et 4,6 s. L'essai doit être concluant sinon MIL						←1s→	
Enclenchement du DV [Enc. DV]								←1s→

7.3 LES DECLENCHEMENTS EN SEQUENCE

Dans cette section sont présentés en séquence les déclenchements et les alarmes générées selon la faute détectée.

Les séquences sont présentées pour deux familles de postes de redressement :

- La première famille regroupe les PR du dernier prolongement (soit les PR Decelles, Édourad-Montpetit, Outremont et Parc). Les plans et schémas de contrôle [PS2] sont étudiés ;
- La seconde famille regroupe les PR du réseau initial. Les plans et schémas de contrôle [PS10] sont étudiés.

7.3.1 Séquences des déclenchements des postes du dernier prolongement

Les séquences de déclenchement sont présentées par équipement aux pages suivantes ; Les numéros des relais de contrôle sont identifiés entre parenthèses.

La logique est présentée sous forme de porte logique «porte ET» ou «porte Ou».

Toutes les conditions doivent être vraies pour que la sortie d'une «porte ET» soit à un. Une seule des conditions doit être vraie pour que la sortie d'une «porte OU» soit à un.

Tableau 7.2 – Commande de fermeture du IHTM

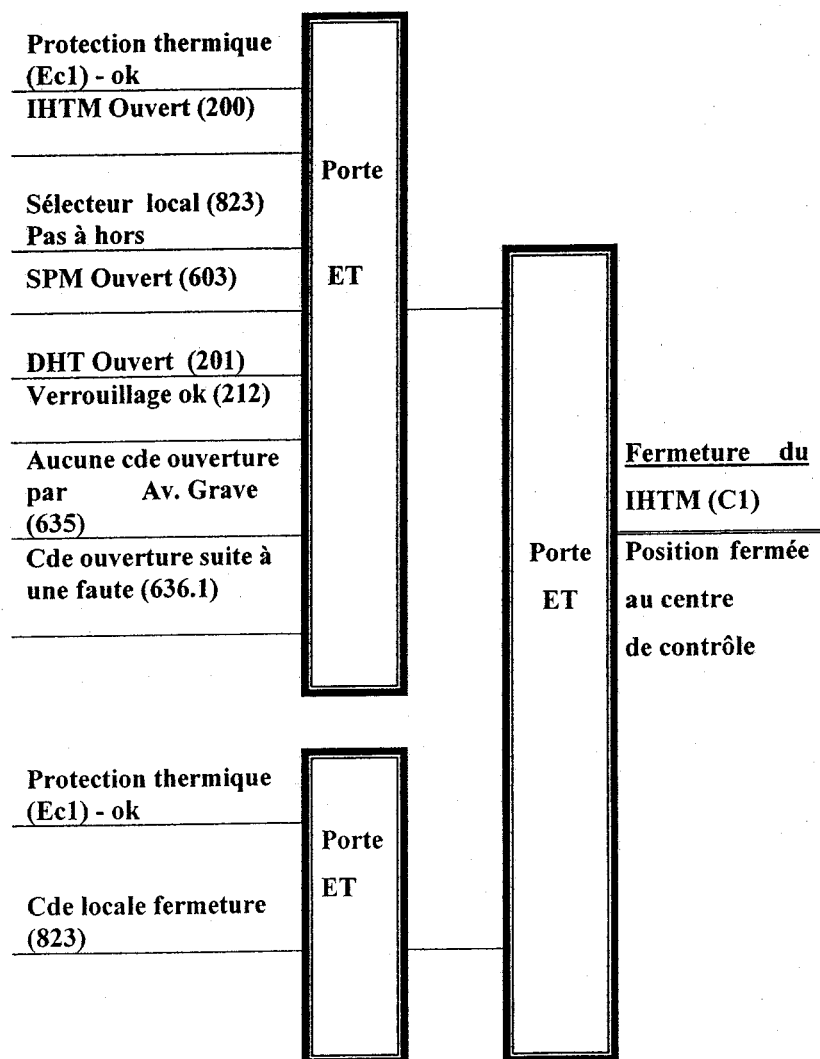


Tableau 7.3 – Commande d'ouverture du IHTM

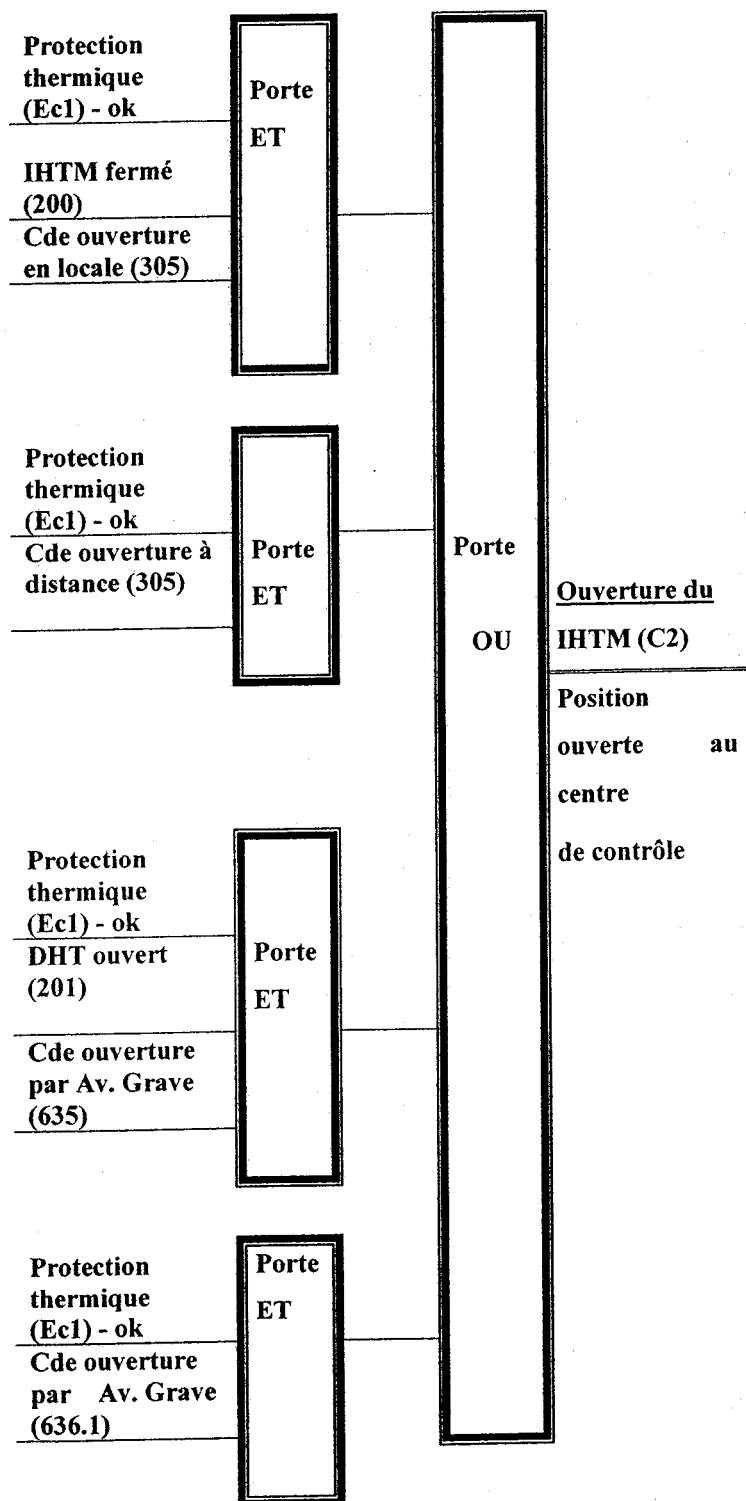


Tableau 7.4 – Avaries légères et graves du transformateur

XFO Temp. huile (23) $T_{\text{huile}} > 95^{\circ}\text{C} \rightarrow$ (633)	Ind./ PSA- TEMP. XFO Av. légère (639) I. AV. L transmise au centre
--	---

XFO Temp. huile (23) $T_{\text{huile}} > 105^{\circ}\text{C} \rightarrow$ (625)	Ind./ PSA- TEMP. XFO Déclenchement IHTM $\rightarrow (636.1) \text{ SPM}, 204, 208$ Déclenchement DHT si IHTM n'est pas ouvert après 11 s. $\rightarrow (636.2) \rightarrow (635) \text{ Av. grave soit déclenchement de ;}$ DHT +SPM+8 DV (4 DV/ PR + 2 DV/ AM+ 2 DV/AV). I. Av. Gr. Transmise au centre
---	--

Note : Le IHTM est déclenché lorsque les deux postes de redressement sont alimentés par le même DHT.

XFO Pression (63) 432 \rightarrow (626)	Ind./ PSA- Pression XFO Déclenchement DHT $\rightarrow (635) \text{ Av. grave soit déclenchement de ;}$ DHT +SPM+8 DV (4 DV/ PR + 2 DV/ AM+ 2 DV/AV). I. Av. Gr. Transmise au centre
---	--

Tableau 7.5 – Avaries légères et graves du redresseur

Redresseur	Ind./ PSA- TEMP. RED
Temp. 1 ^{er} seuil (430A)	Av. légère (639)
Tred > 100°C → (627)	
	I. AV. L transmise au centre

Redresseur	Ind./ PSA- TEMP. RED
Temp. 2 ^{ème} seuil (430B)	Déclenchement IHTM → (636.1) SPM, 204, 208
Tred > 110°C → (628)	
	Déclenchement DHT si IHTM n'est pas ouvert après 11 s. →(636.2) → (635) Av. grave soit déclenchement de ; DHT +SPM+8 DV (4 DV/ PR + 2 DV/ AM+ 2 DV/AV). I. Av. Gr. Transmise au centre

Note : Le IHTM est déclenché lorsque les deux postes sont alimentés par le même DHT.

Redresseur	Ind./ PSA- SURT. RED
Surtension 429 → (628)	Déclenchement IHTM → (636.1) SPM, 204, 208
	Déclenchement DHT si IHTM n'est pas ouvert après 11 s. →(636.2) → (635) Av. grave soit déclenchement de ; DHT +SPM+8 DV (4 DV/ PR + 2 DV/ AM+ 2 DV/AV). I. Av. Gr. Transmise au centre

Tableau 7.5 – Avaries légères et graves du redresseur (suite)

Redresseur claquage diode 1 seuil (454) → (634)	Ind./ PSA- Claquage diode Av. légère (639) I. AV. L transmise au centre
Redresseur claquage diode 2 seuil (455) → (629)	Ind./ PSA- Claquage diode Déclenchement IHTM → (636.1) SPM, 204, 208 Déclenchement DHT si IHTM n'est pas ouvert après 11 s. →(636.2) → (635) Av. grave soit déclenchement de ; DHT +SPM+8 DV (4 DV/ PR + 2 DV/ AM+ 2 DV/AV). I. Av. Gr. Transmise au centre

Tableau 7.6 – Commande d'ouverture du SPM

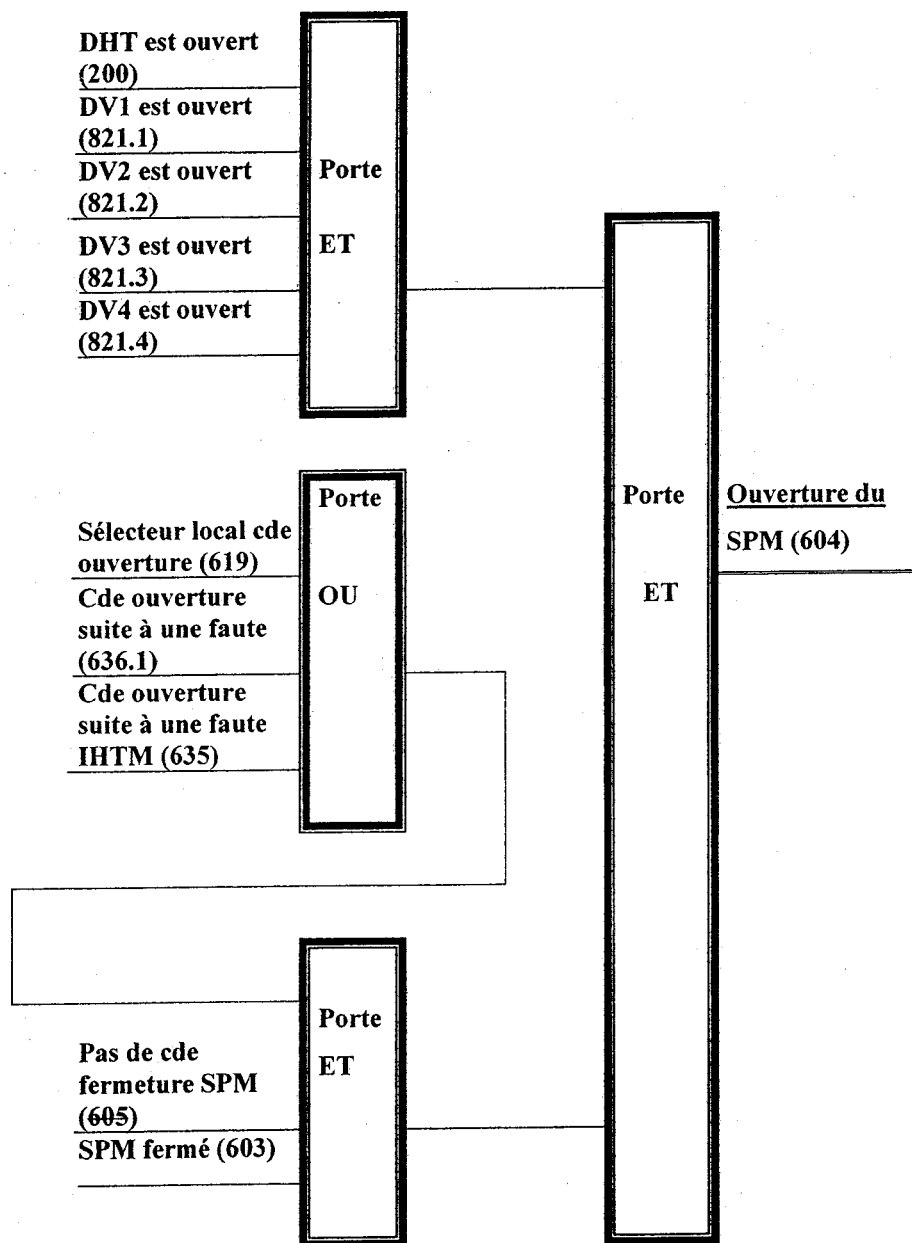


Tableau 7.7 – Commande de fermeture du SPM

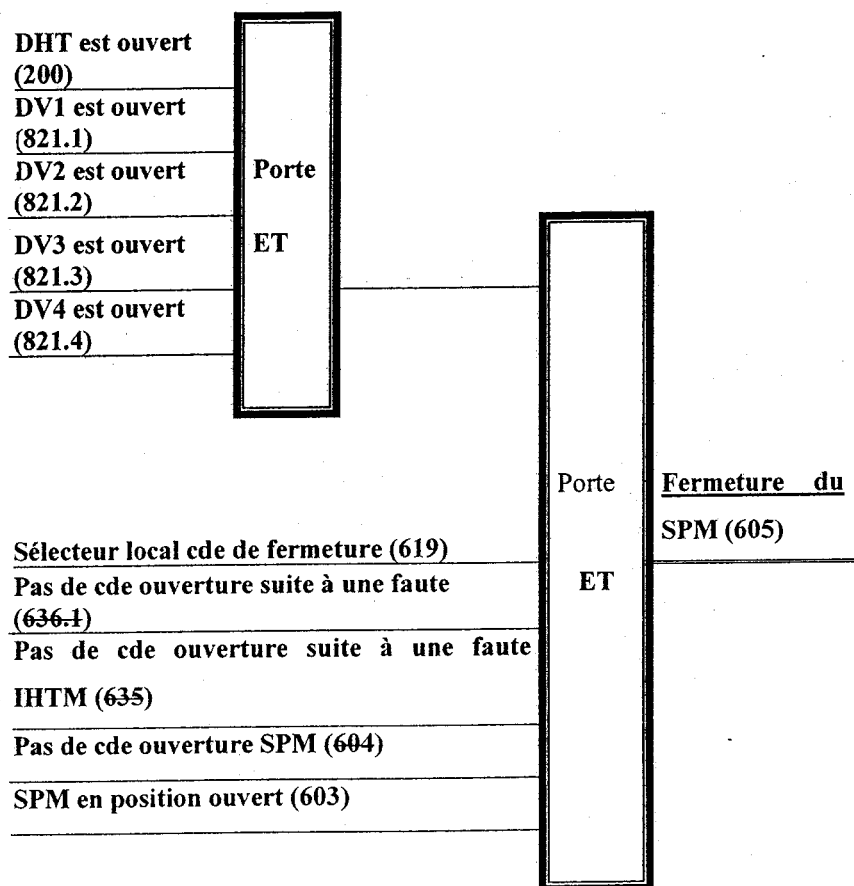


Tableau 7.8 – Avaries légères et graves terre

Terre XFO $I_{501} > 80 \text{ A} \rightarrow (622)$	Ind./ PSA- TERRE XFO Déclenchement $\rightarrow (635)$ Av. grave soit déclenchement de ; DHT +SPM+8 DV (4 DV/ PR + 2 DV/ AM+ 2 DV/AV). IRR transmise au centre
Terre redresseur $I_{503} > 100\text{V} \rightarrow$ (613)	Ind./ PSA- TERRE RED Av. légère (639) I.AV. L ET IRRR transmise au centre
Terre redresseur $I_{502} > 200\text{V} \rightarrow$ (614)	Ind./ PSA- TERRE RED Déclenchement IHTM $\rightarrow (636.1)$ SPM, 204, 208 Déclenchement DHT si IHTM n'est pas ouvert après 11 s. $\rightarrow (636.2) \rightarrow (635)$ Av. grave soit déclenchement de ; DHT +SPM+8 DV (4 DV/ PR + 2 DV/ AM+ 2 DV/AV). I. Av. Gr. Transmise au centre

Tableau 7.8 – Avaries légères et graves terre (suite)

Terre SPM/ DV
 $I_{505} > 50V \rightarrow$
 (623)

Ind./ PSA- TERRE SPM/DV

Av. légère (639)

I.AV. L transmise au centre

Terre SPM/ DV
 $I_{504} > 200V \rightarrow$
 (624)

Ind./ PSA- TERRE SPM/DV

Déclenchement IHTM

\rightarrow (636.1) SPM, 204, 208

Déclenchement DHT si IHTM n'est pas ouvert après 11 s.

\rightarrow (636.2) \rightarrow (635) Av. grave soit déclenchement de ;

DHT +SPM+8 DV

(4 DV/ PR + 2 DV/ AM+ 2 DV/AV).

I. Av. Gr. Et IRR Transmise au centre

\rightarrow (212)+(208) DONC ;

Déclenchement avec verrouillage de tous les tous les DV

Tableau 7.9 – Protections des autres avaries graves

Courant inverse $I_{418} > 700 \text{ A} \rightarrow$ (631)	Ind./ PSA Déclenchement DHT \rightarrow (635) Av. grave soit déclenchement de ; DHT +SPM+8 DV (4 DV/ PR + 2 DV/ AM+ 2 DV/AV).	Transmis au centre I. Av. Gr.
DV collé (817B)	I. Av. Gr. Transmise au centre	I. Av. Gr.
Rupteur dans le poste	\rightarrow(212) + (208) DONC ; Déclenchement avec verrouillage de	I.HUM.
Terre SPM/ DV (tableau 6.8)	tous les DV	
Cde à distance ouverture de chaque DV\rightarrow(205) (seul se DV ouvre et il demeure ouvert)		

Tableau 7.10 – Protections permettant un réenclenchement

Surintensité de chaque disjoncteur $I > 8000 \text{ A}$ (ou 10500 A) → (815)	Ind./ PSA ➤ Déclenchement des DV dans la section ; ➤ Mesure de l'impédance vue des DV. ➤ Si $R > 10 \text{ ohms}$ fermeture DV ➤ Si $R < 10 \text{ ohms}$ verrouillage DV et indication MIL.	Transmis au centre
Asservissement venant de l'autre poste → (207)		Indication position de chaque DV.
Limiteur de tension → (905)		
$Di/dt \rightarrow (436)$		I.oDiDT

Tableau 7.11 – Regroupement des avaries légères

<u>Terre redresseur</u>		
1 ^{er} seuil IRRR → (613)		
<u>Indication didt</u>		Relais (639)
IO Didt → (621)		Av. légère
<u>Terre SPM/DV</u>		
1 ^{er} seuil IRR → (623)		
<u>Température redresseur</u>		
1 ^{er} seuil → (627)		
<u>Température</u>		
<u>transformateur</u>		
1 ^{er} seuil → (633)		
<u>Claquage diode</u>		
<u>redresseur</u>		
1 ^{er} seuil → (634)		
<u>Perte alimentation</u>		
125 Vcc → (637)		
<u>Usure contact de chaque</u>		
DV → (638)		
<u>Défaut EDL de chaque</u>		
DV → (850.1), (850.2), (850.3), (850.4)		
<u>Surcharge Faute</u>		
thermique IHTM → (ec1)		

Tableau 7.12 – Regroupement des avaries graves

<u>Courant inverse</u> → (418)		Relais (635) Av. grave
<u>Redresseur Haute</u> <u>impédance</u> 2 ^{ième} seuil → (614)		
<u>Terre XFO</u> 2 ^{ième} seuil IRR → (622)		
<u>Terre SM/ DV</u> 2 ^{ième} seuil IRR → (624)		
<u>Transformateur</u> <u>température</u> 2 ^{ième} seuil → (625)		
<u>Transformateur pression</u> →(626)		
<u>Redresseur température</u> 2 ^{ième} seuil → (628)		
<u>Claquage diode</u> <u>redresseur</u> 2 ^{ième} seuil →(629)		
<u>Défaut IHTM</u> →(636.2)		
DV Collé →(817B)		

7.3.2 Séquences des déclenchements des postes du réseau initial

Les séquences de déclenchement sont présentées par équipement aux pages suivantes ;

Tableau 7.13 – R.I. - Avaries légères et graves du transformateur

XFO Temp. huile (23) $T_{\text{huile}} > 75^{\circ}\text{C} \rightarrow$ (21)	Ind./ automate – (A6) - Ventilateur Démarrage en haute vitesse du ventilateur du XFO
XFO Temp. huile (23) $T_{\text{huile}} > 120^{\circ}\text{C} \rightarrow$ (T1)	Ind./ automate – (A0) – Temp. XFO (G1) - Av. Groupe Déclenchement DHT → par (74G) à Providence Av. Groupe transmise au centre

Tableau 7.14 – R.I. - Avaries sectionneur six phases

Interrupteur de fin de course sur sectionneur six phases	Ind./ automate – (A3) – Sectionneur Six phases (G1) – Av. Groupe Déclenchement DHT → par (74G) à Providence Av. Groupe transmise au centre
---	---

Tableau 7.15 – R.I. - Avaries graves du redresseur

Redresseur Tred
130°C → (G1-400)

Ind./ automate
(A2) - Température redresseur
(G1) – Av. Groupe
Déclenchement DHT
→ par (74G) à Providence
Av. Groupe transmise au centre

Redresseur Claquage
diode «pos» → (G2-407)

Ind./ automate
(B0) - Diode côté positif
(G2) – Av. Groupe (rapide)
Déclenchement DHT
→ par (74G) à Providence
Av. Groupe transmise au centre

Redresseur Claquage
diode «nég» → (G2 -407)

Ind./ automate
(B1) - Diode côté négatif
(G2) – Av. Groupe (rapide)
Déclenchement DHT
→ par (74G) à Providence
Av. Groupe transmise au centre

Redresseur Varistance
→ (G2- 407)

Ind./ automate –
(A7) - Varistance
(G2) – Av. Groupe (rapide)
Déclenchement DHT
→ par (74G) à Providence
Av. Groupe transmise au centre

Tableau 7.16 – R.I. - Avaries des auxiliaires

Pertes alimentation 600 Vca →(G1 -400) (T>15 s) OU	Ind./ automate (A6) - Ventilateur (G1) – Av. Groupe
Éléments de surcharge ventilateur →(G1 -400) (T>15 s)	Déclenchement DHT → par (74G) à Providence
	Av. Groupe transmise au centre
Kirk accès au XFO→	Déclenchement DHT → par (74G) à Providence Av. Groupe transmise au centre
Détecteurs de feu dans les cellules HT/ XFO/ Vent. →	Ind./ automate (A4) - Feu (G1) – Av. Groupe Déclenchement DHT → par (74G) à Providence Av. Groupe transmise au centre

Tableau 7.17 – R.I. - Avaries grave terre

Terre XFO/ RED I₅₀₁ > 100 A → (G1-407)	Ind./ automate (A1) - Terre (G1) – Av. Groupe rapide Déclenchement DHT → par (74G) à Providence Av. Groupe transmise au centre
---	---

Tableau 7.18 – R.I.- Avaries groupe

Température du XFO - (A0)	PORTE OU AV. Groupe (G0 400) Déclenchement DHT → par (74G) à Providence
Température du redresseur – (A2)	
MS SHEXA – (A3)	
Feu – (A4)	
Ventilateur +CA (A5)	
Terre 501 – (A1)	PORTE OU AV. Groupe rapide (G1-407) Déclenchement DHT → par (74G) à Providence
Varistance – (A7)	
Diode pos. – (B0)	
Diode nég. – (B1)	
Séquence incomplète DHT/ DV	PORTE OU AV. Groupe (GO – 400) Déclenchement DHT → par (74G) à Providence
Alimentation 110 Vcc	

Tableau 7.19 – R.I. - Avaries ligne

Di/dt (R1)	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; text-align: center;"> <p>PORTE OU</p> <p>AV. Ligne G3 et G6</p> <p>400</p> <p>Déclenchement DHT</p> <p>→ par 74L à Providence</p> </div>
Surintensité (845)	
Asservissement	
Limiteur de tension (905)	
Surintensité simulée	

Il faut noter que dans le réseau initial il n'y a pas de EDL. La fermeture du DV est commandée manuellement.

CHAPITRE 8 – MESURES OBTENUES

Le chapitre 8 regroupe les enregistrements commentés qui ont été obtenus à l'aide d'un enregistreur rapide RPM1000 de la compagnie Power Recorder System.

Ces enregistrements présentent aux lecteurs, les appels de puissance typiques des redresseurs douze pulses.

Les courbes suivantes montrent la consommation typique du poste de district Snowdon qui alimente onze postes de redressement.

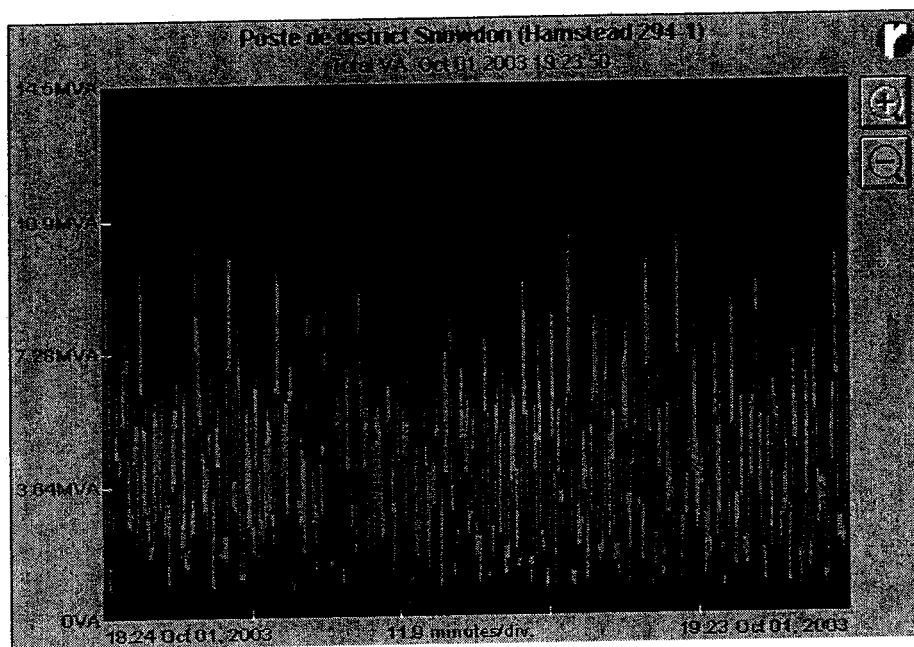


Figure 8.1 – Profil de charge typique du PD Snowdon (T=1 hre)

L'appel de puissance maximum d'une ligne d'arrivée est égal à environ 11,4 MVA.

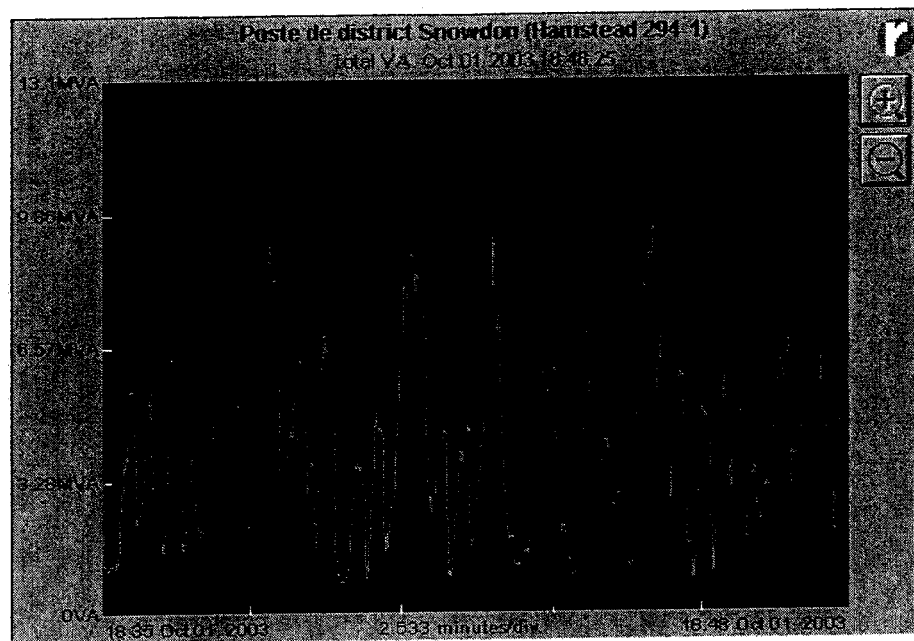


Figure 8.2 – Profil de charge typique du PD Snowdon (T=11 min.)

L'appel de puissance maximale d'une arrivée est égal à environ 9,9 MVA.

Les deux courbes suivantes montrent respectivement la consommation typique du poste de redressement pour une période de mesure de cinq heures et d'une heure.

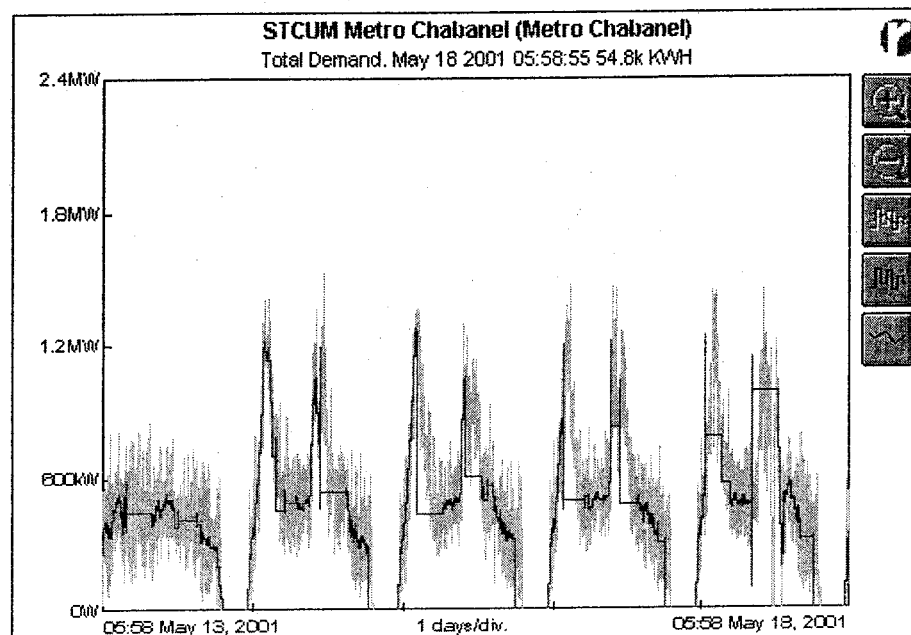


Figure 8.3 – MW du PR Chabanel (T= 5 jours)

Les consommations maximale et moyenne du poste de redressement Chabanel pour les cinq jours sont respectivement de 1,2 MW (en pointe) et de 0,6 MW (hors pointe).

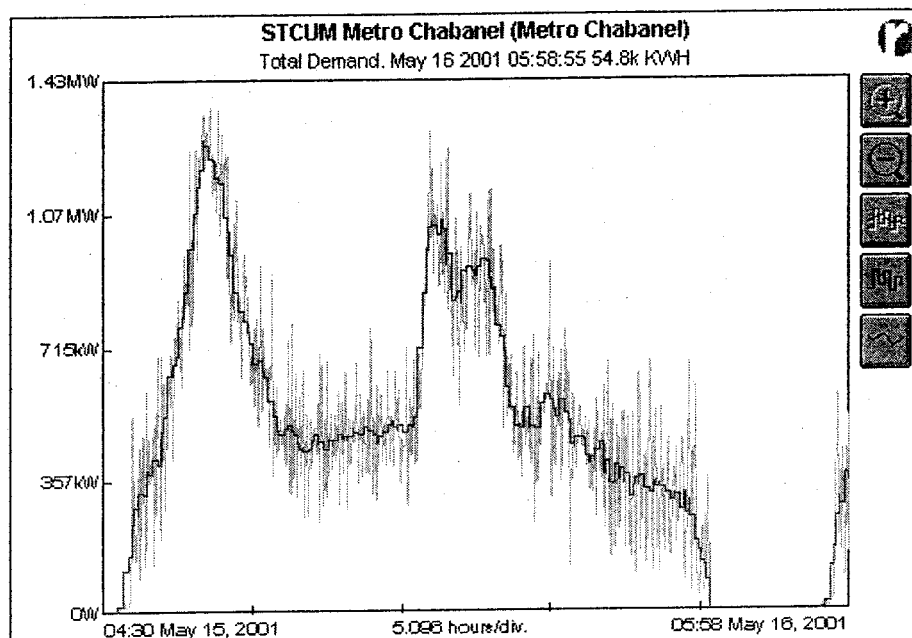


Figure 8.4 – MW du PR Chabanel (T= 1 jour)

Les consommations maximale et moyenne du poste de redressement Chabanel pour une période d'un jour, sont respectivement de 1,2 MW et de 0,6 MW.

Les figures 8.1 à 8.4 présentent les appels de puissance typiques que chaque artère Hydro Québec va subir. Comme il est mentionné au chapitre 1, le métro de Montréal est alimenté par des artères dédiés donc seulement le métro de Montréal est branché sur cet artère. Si le métro de Montréal partage sa source avec un autre utilisateur, l'autre utilisateur subira ces fluctuations de tension importantes, typiques des rames de type «Métro lourd».

CHAPITRE 9 - VIGIES TECHNOLOGIQUES

Le chapitre 9 regroupe les résultats des comparaisons réalisées auprès de fournisseurs afin de valider les nouveaux équipements disponibles sur le marché depuis le dernier prolongement.

De plus, ce même chapitre regroupe les résumés des discussions réalisées auprès des autres métros afin de comparer les principes d'alimentation traction.

9.1 NOUVEAUX EQUIPEMENTS

9.1.1 Les équipements d'isolation

Pour les équipements d'isolation (les interrupteurs haute tension, les sectionneurs positifs motorisés et les sectionneurs négatifs), les nouveaux équipements sont très similaires aux équipements existants.

9.1.2 Les transformateurs de puissance

Le transformateur de puissance à sec imprégné dans un époxyde est la tendance dans les nouvelles installations par soucis pour l'environnement.

9.1.3 Les redresseurs

Pour les redresseurs, la qualité et la robustesse des diodes disponibles se sont accrues de beaucoup depuis 1985. Seul ABB maintient la technologie des diodes de type avalanche. Tous les autres fabricants de diodes proposent des diodes régulières qui ont des tensions inverses importantes (V_{RRM}) de 3000 à 3500 V.

Certains des fabricants proposent d'éliminer les fusibles. Cette proposition est motivée par une grande confiance de la qualité des diodes des années 2000. Aucune faute impliquant une diode n'est attendue. Par ailleurs, par précaution, cette proposition n'est pas retenue.

9.1.4 Les disjoncteurs de voie

Pour les disjoncteurs de voie, les tableaux suivants regroupent les comparaisons faites sur les différents disjoncteurs traction disponibles sur le marché. Suite aux comparaisons faites des disjoncteurs traction de Secheron (tableau 9.1) et des autres (tableau 9.2). Le disjoncteur UR-36 est toujours un des meilleurs disjoncteurs du domaine, dû à ses caractéristiques supérieures (temps d'ouverture court, entretien limité et surtension de manœuvre limitée).

Tableau 9.1 – Comparaisons des disjoncteurs traction disponibles Secheron

	Disjoncteur ultra rapide de Secheron		
Courant thermique	UR36..61	UR36..81	UR236..61
En mode continu (Ith- A)	3 600	3 600	6000
Courant durant 1 heure (Ith1h- A)	3 900	3 900	6 400
Courant durant 5 minutes (Ith5min- A)	6 150	4 500	10 900
Courant durant 1 minute (Ith1min- A)	8 200	5 600	14 000
Courant durant 10 secondes (Ith10s- A)	10 400	6 500	19 000
Tension nominale (Unom.)	1000	1000	1000
Temps de réaction (pour un didt > $5 \cdot 10^6$) (Tdécl. – ms)	3	3	3
Courant d'interruption (Icc/ t - kA/ ms)	100/ 10	100/ 10	90/ 10
Nombre de coupure avant entretien (Nopé. sentre - #)	4*50 000	4*50 000	4*50 000
Sur tension de manœuvre (* U arc - V)	1800 V max	2 250 V max	1800 V max
Énergie consommée Fermeture et durée de la fermeture (Wcons/fer. – W)	1,300	1,300	1,300
Énergie consommée maintien (Wcons/mait. – W)	2,3	2,3	2,3

Tableau 9.2 – Comparaisons des autres disjoncteurs traction disponibles

	Autres disjoncteurs traction		
	Alstom	EMC traction	GE - GE RAPID
Compagnie	ARC 850	IR 6140	AEG 4207
Courant thermique			
En mode continu (I _{th} - A)	5 000	4 000	4 200
Courant durant 2 heures (I _{th2h} - A)		4 800	
Courant durant 5 minutes (I _{th5min} - A)		8 000 durée 7 minutes	
Courant durant 1 minute (I _{th1min} - A)	10 000		
Courant durant 10 secondes (I _{th10s} - A)		15 000 - 40 s	
Tension nominale (U _{nom} - V)	1000	1000	800
Temps de réaction (pour un didt > 5*10 ⁻⁶) (T _{décl.} - ms)	5	3	< 3
Courant d'interruption (I _{cc} / t - kA/ ms)	140/ 4	200	50 kA 31.5
Nombre de coupure avant entretien (Nopé. sentre.- #)	250 000 CYCLES	20 000	20 000
Surtension de manœuvre (* U _{arc} - V)		1,300 - 1,800	3 200
Énergie consommée Fermeture et durée de la fermeture (W _{cons/fer.} - W)		56	100

9.1.5 Les trains

Pour les trains, comme il a été mentionné au chapitre 4, le moteur série est une technologie des années 1960 à 1970. Cette technologie présente un coût d'entretien important (entretien des commutateurs par exemple).

La technologie des années 2000 est d'utiliser des moteurs asynchrones et de les contrôler en fréquences variables. Le rotor d'un moteur asynchrone est une cage d'écureuil qui ne requiert aucun entretien.

9.2 PRINCIPE D'ALIMENTATION TRACTION

Les principes d'alimentation traction existants sont similaires aux principes utilisés par d'autres métros tant en Europe (RATP, métro de Lyon...) que dans les métros en Amérique du Nord (TTC, New York ...).

Par ailleurs, une différence importante ressort soit la localisation du relais à accroissement de courant dans le temps (relais di/dt).

Le métro de Montréal est un des rares métros (sinon le seul), qui utilise le relais di/dt pour protéger le redresseur. Les autres métros localisent le relais di/dt sur chaque disjoncteur de voie.

Selon la configuration du métro de Montréal, un relais di/dt protégeant le redresseur ne peut pas discriminer qu'elle voie et qu'elle section est en faute. Il commande alors la disjonction de huit disjoncteurs de voie (les quatre dans le poste de redressement, les deux du poste en amont et les deux du poste en aval). La sélectivité est alors très pauvre.

Un relais di/dt localisé sur chaque disjoncteur de voie peut alors discriminer la section et la voie impliquée et ainsi commander la disjonction de la section impliquée seulement, ayant ainsi une meilleure sélectivité.

Pour le métro de Montréal, ce changement de configuration demande une révision importante des 57 postes de redressement existants. Le principe déjà établi demeure!

9.3 NOMBRE DE DISJONCTEUR DE VOIE

Après des entretiens avec les gens de la RATP, il apparaît que le choix d'alimenter par voie le train n'est plus la solution retenue. Cette configuration présente l'avantage d'une plus grande sélectivité de l'alimentation traction.

Par ailleurs, cette solution présente plusieurs désavantages soit un coût équipement supérieur et une surface d'installation requise qui est supérieure, ce pour une application très rarement utilisée.

9.4 COUPLAGE DU GROUPE TRANSFORMATEUR REDRESSEUR

L'utilisation d'un transformateur couplé D/dy1, utilisant une inductance d'équilibre (couplage n° 31 selon la norme [N18]), est le couplage privilégié.

Les avantages sont :

- Un transformateur moins dispendieux ;
- Un transformateur plus petit ;
- Un transformateur plus conventionnel.

Les fabricants utilisent maintenant des inductances d'équilibre (IPT) beaucoup moins bruyantes.

CHAPITRE 10 - CONCLUSIONS

Le chapitre 10 permet de conclure sur le travail réalisé traitant de l'alimentation traction du métro de Montréal. Dans ce même chapitre, sont identifiées les simulations restantes à réaliser.

Suite aux nombreuses vérifications faites sur les équipements existants, les annexes A1 à A4 regroupent les fiches techniques complètes, les schémas unifilaires, les photos et les points kilométriques de tous les postes de redressement et les équipements traction utilisés pour alimenter les trains du métro de Montréal.

Les études des normes utilisées permettent de bien résumer les principes de distribution haute et basse tension.

Les études des équipements tels les groupes transformateurs redresseurs permettent de comprendre le fonctionnement des équipements et les distributions de courant et de tension.

Les calculs obtenus permettent de valider la redondance des équipements, leurs protections et leur seuil de déclenchement. Les calculs permettent de valider le partage des charges traction selon les distances séparant les trains des postes de redressement. Ce principe de partage de charge permet également de valider les seuils de déclenchement laissés sur chaque équipement de protection.

Les calculs d'échauffement sont validés par des mesures d'échauffement sur les redresseurs et sur les câbles traction.

Les vigies technologiques permettent de constater que les équipements traction existants sont similaires aux nouveaux équipements utilisés. De plus, les principes d'alimentation traction utilisés sont similaires aux principes d'alimentation traction utilisés dans des prolongements récents. Le redresseur utilisé dans le domaine de la traction est fait de diode car le redresseur à diode est autonome et requiert peu d'entretien.

Par ailleurs, les comportements dynamiques ne sont pas simulés. Un logiciel commercialisé comme par exemple «RAILSYM» ou «train operations model» (TOM) permet de calculer le profil des tensions entre le négatif et la terre selon les différentes offres de service.

BIBLIOGRAPHIE

La bibliographie consultée pour rédiger la présente étude se compose d'articles [A1 à A25], d'encyclopédies [E1 à E10], de livres [L1 à L26], de manuels d'entretien [M1 à M19], de normes [N1 à N21] et des plans et schémas de contrôle [PS1 à PS10] :

ARTICLES:

- [A1] ABB Inc. 2001. «Duracast Small power transformer 112,5 kVA through 13 000 kVA 600 V through 35 kV primary voltage 120 V through 15 kV secondary voltage». www.abb.com. Descriptive bulletin 47-950. Février 2001. 9 p.
- [A2] ABB Inc. 2001. «Resibloc® Small power transformer 112,5 kVA through 13 000 kVA 600 V through 35 kV primary voltage 120 V through 15 kV secondary voltage». www.abb.com. Descriptive bulletin 47-850. Février 2001. 9 p.
- [A3] ABB Inc. 2001. «VPE Small power transformer 112,5 kVA through 13 000 kVA 600 V through 35 kV primary voltage 120 V through 15 kV secondary voltage». www.abb.com. Descriptive bulletin 47-750. Février 2001. 9 p.
- [A4] ABB Inc. 2001. «VPI Small power transformer 112,5 kVA through 13 000 kVA 600 V through 35 kV primary voltage 120 V through 15 kV secondary voltage». www.abb.com. Descriptive bulletin 47-650. Février 2001. 9 p.
- [A5] ABB Inc. 2002. «Three phase platform mounted transformer». www.abb.com. PDL 46-304. Janvier 2002. 2 p.
- [A6] BLYE, P.W, KENT, H.E. 1934. «Effects of rectifiers on system wave shape» Electrical Engineering. September. 54-63.
- [A7] BURTON, L.W. 1956. «Germanium rectifiers for industrial application» A.I.E.E Transaction. Mars 1956. 41-44.
- [A8] CHIN, P.T, MOYER, E.E. 1944. «A graphical analysis of the voltage and current waveforms of controlled rectifiers circuits» A.I.E.E Transaction. Vol.63. 501-508.
- [A9] DILLARD, J.K, KRESSER, J.V, WITZKE, R.L. 1953. «Voltage regulation of 12 pulse double way rectifiers» A.I.E.E Transaction. November 1953. 689-697.

- [A10] DORTORT, I.K. 1953. «Extended regulation curves for 6 phase double way and double wye» A.I.E.E Transaction. May 1953. 192-202.
- [A11] FRICK, C.W. 1944. «A short cut method of estimating telephone influence factor of power system with rectifier load». A.I.E.E Transaction. Vol.63. 91-96.
- [A12] GOODHUE, W.M. 1940. «The rectifier calculus» A.I.E.E Transaction. Vol.59. 687-691.
- [A13] HERSKIND, C.C. 1944. «Rectifier circuit duty» A.I.E.E Transaction. Vol.63. 123-128.
- [A14] HERSKIND, C.C., KELLOGG, H.I. 1945. «Rectifier fault current – Part I» A.I.E.E Transaction. Vol.64. 145-150.
- [A15] HERSKIND, C.C., RETTIG, C.E., SCHMIDT, A. 1949. «Rectifier fault current – Part II» A.I.E.E Transaction. Vol.68. 243-251.
- [A16] HERSKIND, C.C., STEINER, H.C. 1946. «Rectifier capacity» A.I.E.E Transaction. Vol.65. 667-670.
- [A17] JENSEN, L.E., RETTIG, C.E. 1955. «Regulator curves and transient currents of double way and double wye rectifiers» A.I.E.E Transaction. May 1955. 281-288.
- [A18] MARTI, O.K., TAYLOR, T.A. 1940. «Wave shape of 30 and 60 phase rectifier groups» A.I.E.E Transaction. Vol.59. 218-226.
- [A19] Morton, J.S. 1980. «Coil-less cold-cathode arc chutes for high-speed d.c. circuit breakers for use on traction systems» IEE Proc. Vol. 127. 34 – 45.
- [A20] Morton, J.S. 1985. «Circuit breaker and protection requirements for DC switchgear used in rapid transit systems» IEEE Transactions on industry applications Vol. IA-21. No.5. Septembre/Octobre. 1268-1273.
- [A21] VENARD, C. 1993. «La chasse aux harmoniques» RATP - Savoir faire n° 6. 22-26.
- [A22] VENARD, C. 1996. «Histoire de l'alimentation électrique du métro (partie I)» RATP - Savoir faire n° 17. 27-33.
- [A23] VENARD, C. 1996. «Histoire de l'alimentation électrique du métro (partie II)» RATP - Savoir faire n° 18. 23-31.
- [A24] VENARD, C. 1997. «Les divers système d'alimentation électrique des métros (partie I)» RATP - Savoir faire n° 23. 18-33.

- [A25] VENARD, C. 1998. «Les divers système d'alimentation électrique des métros (partie II)» RATP - Savoir faire n° 25. 24-33.

Encyclopédies :

- [E1] ARCHES, R., CHÉRRON, Y., ESCAULT, B., FOCH, H., MARTY, P., METZ, M. 1993. Convertisseurs continu - alternatif et alternatif - continu. 1^{ière} éd. Paris : Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique. D3 170. 2 p.
- [E2] ARCHES, R., CHÉRRON, Y., ESCAULT, B., FOCH, H., MARTY, P., METZ, M. 1993. Commutateurs de courant. 1^{ière} éd. Paris : Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique. D3 171. 2 p.
- [E3] ARCHES, R., CHÉRRON, Y., ESCAULT, B., FOCH, H., MARTY, P., METZ, M. 1993. Commutateurs de courant : Structures élémentaires. 1^{ière} éd. Paris : Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique. D3 172. 10 p.
- [E4] CIBOT, J.L. 1990. Transports électriques urbains : Équipements électriques du matériel roulant. 1^{ière} éd. Paris : Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique. D5 552. 19 p.
- [E5] DU PARC, J. 1992. Convertisseurs statiques : Réduction de la puissance réactive et des harmoniques produits. 1^{ière} éd. Paris : Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique. D3 210. 29 p.
- [E6] DU PARC, J. 1992. Réseaux industriels. 1^{ière} éd. Paris : Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique. D3 215. 24 p.
- [E7] FREIXE, G. 1990. Transports électriques urbains : Conception du matériel roulant. 1^{ière} éd. Paris : Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique. D5 551. 14 p.
- [E8] PERRIN, J.P., VÉNARD, C. 1991. Transports électriques urbains : Distribution d'énergie. Automatismes de contrôle. 1^{ière} éd. Paris : Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique. D5 554. 23 p.
- [E9] PHILIPPE, B. 1990. Transports électriques urbains : Introduction. 1^{ière} éd. Paris : Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique. D5 550. 3 p.

- [E10] THURIN, Y. 1990. Transports électriques urbains : Équipements de traction. 1^{ière} éd. Paris : Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique. D5 553. 16 p.

LIVRES:

- [L1] BIGEY, M., GUITTONNEAU, F., VANEL, M., VEINBERG, J. 1973. Construction des métros, Établissement des projets. 1^{ière} éd. Paris: RATP. 311 p.
- [L2] BIRD, B.M., KING, K.G. 1988. An introduction to power electronics. 4th ed. New York: John Wiley & Sons Ltd. 287 p.
- [L3] BOUCHARD, R.P., OLIVIER, G, 1996. Électrotechnique. 1^{ière} éd. Canada : École Polytechnique de Montréal. 620 p.
- [L4] BÜLER, H. 1981. Electronique de puissance. 2^e éd. Suisse : Dunod. 322 p.
- [L5] BÜLER, H. 1984. Électronique de puissance - Volume XV. 3^e éd. Suisse : Presses polytechnique romandes. 322 p.
- [L6] CONNOLLY, A.P., FOX, R.W., HEY, J.C., GORSS, D.R., KORN, S.R., LOCHER, R.E., WU, S.J., SAHM W.H. 1982. SCR manual including triacs and other thyristor. 6th ed. New York: Prentice-Hall inc. 630 p.
- [L7] DEB, A.K. 2000. Powerline ampacity system. 1^{ière} éd. New York : CRC Press. 251 p.
- [L8] ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTREAL. 2002. Guide de présentation des citations et des références bibliographiques: Guides documentaires no 12. 1^{ière} éd. Montréal : École Polytechnique de Montréal. 13 p.
- [L9] FERREE, H., KNOTT, D. , MEYERHOFF, A., ROTH, R.W. , SHERBONDY, G.M. , STEINBRUEGGE, H.A. 1970. Silicon controlled rectifier designers' handbook, 2nd ed. Pennsylvania: Westinghouse Electric Corporation Semiconductor Division. 13-72 p.
- [L10] KORB, F. 1978. Semiconductors and their main applications. 1st ed. Würzburg: Vogel-Verlag. 275 p.
- [L11] HARLOW. J.H. 2004. Electric power transformer engineering, 1st ed. New York: CRC press. 419 p.

- [L12] LYE, R.W., MURISON, G.E., ROBINS, W.H., SPEER, G.W., YOUNG J.A.I. 1976. Power converter handbook, Theory, design and application, 1^{ière} éd. Canada: Canadian General Electric Company limited. 279 p.
- [L13] MOUNIC, M. 1969. Électronique, Redressement. 1^{ière} éd. Paris : Foucher. 224 p.
- [L14] MASCARIN, R. 1973. Redresseurs industriels à semi-conducteurs. 1^{ière} éd. Paris : Eyrolles. 297 p.
- [L15] NATIONAL COOPERATIVE TRANSIT RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM. 1984. Reduction of peak-power demand for electric rail transit systems – Report 3 1st ed. Washington. D.C.: Transportation Research Board National Research Council. 142 p.
- [L16] NATIONAL COOPERATIVE TRANSIT RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM. 1984. Detection of low-current short circuits– Report 7 1st ed. Washington. D.C.: Transportation Research Board National Research Council. 216 p.
- [L17] PAICE, D. A. 1996. Power electronic converter harmonics – Multipulse methods for clean power. 1st ed. New York: IEEE Industry Applications Society. 177 p.
- [L18] SCHAEFER, J. 1964. Rectifier circuits : Theory and design. 1st ed. New York: John Willy & Sons inc. 335 p.
- [L19] SÉGUIER, G. 1970. Les montages redresseurs, Étude générale, 1^{ière} éd. Paris : Dunod. 218 p.
- [L20] SÉGUIER, G. 1978. L'électronique de puissance. 1^{ière} éd. Paris : Dunod. 254 p.
- [L21] SÉGUIER, G. 1988. Les convertisseurs de l'électronique de puissance - 1, La conversion alternatif - continu, 2^e éd. Paris: Technique et Documentation Lavoisier. 358 p.
- [L22] STCUM. 1999. Alimentation traction, Alimentation basse tension 750 Vcc, module 2.2. Montréal : STCUM. 55 p.
- [L23] STCUM. 2000. Alimentation traction, Appareils de protection et de contrôle, module 2.3. Montréal : STCUM. 52 p.
- [L24] STCUM. 2000. Alimentation traction, Alimentation traction et coupure d'alimentation traction, module 2.7. Montréal : STCUM. 65 p.

- [L25] STCUM. 1999. Alimentation traction, Postes de redressement, module 2.1.
Montréal : STCUM. 65 p.
- [L26] WILDI, T. 1978. Électrotechnique, 2^{ième} éd. Canada : Édition ESKA. 908 p.

MANUELS D'ENTRETIEN:

- [M1] BROWN BOVERI CANADA LTÉE. 1975. Disjoncteurs semi-rapide types GBJ8 et GB8 pour l'intérieur, Instructions de montage et de service. 1^{ième} éd.
Montréal : BBC. Publication N° AM 91054 F. 32 p.
- [M2] BROWN BOVERI CANADA LTÉE. 1973. Manuel d'opération et d'entretien groupe redresseur 2 500 kW 750 Vcc – Opération et entretien d'un PR en général, Manuel no 1. 1^{ième} éd. Montréal : BBC. Contrat N° 402-M1-73. 150 p.
- [M3] BROWN BOVERI CANADA LTÉE. 1973. Manuel d'opération et d'entretien groupe redresseur 2 500 kW 750 Vcc – Transformateur pour redresseur, Manuel no 2, 1^{ième} éd. Montréal: BBC. Contrat N° 402-M1-73. 100 p.
- [M4] BROWN BOVERI CANADA LTÉE. 1975. Manuel d'opération et d'entretien groupe redresseur 2 500 kW 750 Vcc – Opération et entretien d'un PR en général, Manuel no 1. 1^{ième} éd. Montréal : BBC. Contrat N° 402-M1-75. 155 p.
- [M5] BROWN BOVERI CANADA LTÉE. 1975. Manuel d'opération et d'entretien groupe redresseur 2 500 kW 750 Vcc – Transformateur pour redresseur, Manuel no 2. 1^{ième} éd. Montréal: BBC. Contrat N° 402-M1-75. 100 p.
- [M6] BROWN BOVERI/ASEA BROWN BOVERI. 1985. Manuel d'opération et d'entretien groupe redresseur 2 500 kW 750 Vcc, Tome 1. 1^{ième} éd. Montréal: BBC. Contrat N° 422-M1-85. 250 p.
- [M7] BROWN BOVERI/ASEA BROWN BOVERI. 1985. Manuel d'opération et d'entretien groupe redresseur 2 500 kW 750 Vcc – Instruction pour entretien et service. Tome 2. 1^{ième} éd. Montréal: BBC. Contrat N° 422-M1-85. 100 p.
- [M8] BROWN BOVERI - SÉCHERON SA. 1983. Détecteur de défauts de ligne pour réseaux de traction à c.c.- Type DDL ACA11- Description technique,
Genève: BBC-Sécheron. 1^{ième} éd. Publication N° HSBG 402 619 F. 41 p.

- [M9] BROWN BOVERI - SÉCHERON. 1979. Disjoncteur ultra-rapide à courant continu UR 36..61s : Description et caractéristiques techniques. 1^{ière} éd. Genève: BBC-Sécheron. Publication N° CH-SHR 267 F. 60 p.
- [M10] BROWN BOVERI - SÉCHERON. 1979. Disjoncteur ultra-rapide à courant continu UR 36..61s : Instructions de montage et de service. 1^{ière} éd. Genève: BBC-Sécheron. Publication N° HSBA 400600 F. 60 p.
- [M11] BROWN BOVERI - SÉCHERON SA. 1982. Amplificateur de mesure avec isolation galvanique – Type MIU 5 - Description technique. 1^{ière} éd. Genève: BBC-Sécheron. Publication N° HSHE 401 450 F. 17 p.
- [M12] BROWN BOVERI - SÉCHERON SA. 1983. Note d'application pour DDLACA 21.B (DDLACA 11.B équipé du circuit de détection «Arc interrompu»). 1^{ière} éd. Genève: BBC-Sécheron. Publication N° HSBG 403 241 F. 11 p.
- [M13] FERRANTI-PACKARD LTD. Instructions pour la mise en service et l'entretien des transformateurs de faible puissance. 1^{ière} éd. Ste-Catherines: Ferranti-Packard Ltd. 36 p.
- [M14] MÉGATRAN ÉLECTRIQUE LTÉE. 1991. Manuel d'instruction : Transformateur de redresseur S.T.C.U.M. 2700 kVA nominale 12470 V Delta – 584 V Delta/ 584 V Étoile. 1^{ière} éd. St_Jean-sur Richelieu : Mégatran Électrique Ltée. 11 p.
- [M15] SÉCHERON. 1999. High-speed DC circuit breaker type UR40-81/82S or TD : Assembly and maintenance instruction. 1st ed. Geneve: Sécheron. Publication N° SG 100753E. 95 p.
- [M16] SÉCHERON. 1980. Dispositif d'essai de ligne type EDL-C pour les réseaux de transports en commun à courant continu (600 à 3 500 Vcc). 1^{ière} éd. Genève: Sécheron. Publication N° HSHR 401 344. 6 p.
- [M17] SÉCHERON. 1976. Notice descriptive -Appareille type PCCE67aE-Schémas-blocs de principe, Instructions de montage et de service. 1^{ière} éd. Genève: Sécheron. Publication N° AM 91054 F. 15 p.
- [M18] SÉCHERON. 1981. Notice descriptive – Appareil détecteur de courant de retour - Description technique. 1^{ière} éd. Genève: Sécheron. Publication N° HSHE 402 514. 13 p.

- [M19] SÉCHERON. 1995. SEDEL Détecteur de défaut de ligne – Manuel d'utilisation. 1^{ière} éd. Genève : Sécheron. Publication N° 5.0300.060 f. 77 p.

NORMES:

- [N1] AMERICAN NATIONAL STANDARD. 1973. Practices and requirements for semiconductors power rectifiers. 2nd ed. New York: United States of American Standards Institute. 50 p. ANSI C34.2.
- [N2] AMERICAN NATIONAL STANDARD. 1981. Guide for loading mineral-oil-immersed power transformers up to and including 100 MVA with 55 °C or 65 °C winding rise. 2nd ed. New York: United States of American Standards Institute. 71 p. ANSI/IEEE C57.92.
- [N3] ASSOCIATION CANADIENNE DE NORMALISATION 1999. Code de l'électricité du Québec- Code canadien de l'électricité, Première partie et modifications du Québec. 18^{ième} éd. Canada : 847 p. Norme CSA C22.10-99.
- [N4] COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE. 1991. Équipements électriques ferroviaires pour matériel roulant – Composants électrotechnique - Partie 1: Règles générales. 2^{ième} éd. Suisse : Bureau Centrale de la commission Électrotechnique International. 44 p. CEI 77.
- [N5] COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE. 1973. Convertisseurs à semi-conducteurs. 2^{ième} éd. Suisse : Bureau Centrale de la commission Électrotechnique International. 272 p. CEI 146.
- [N6] COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE. 1991. Convertisseurs à semi-conducteurs - Spécifications communes et convertisseurs commutés par le réseau - Partie 1-1: Spécifications des clauses techniques de base. 3^{ième} éd. Suisse: Bureau Centrale de la commission Électrotechnique International. 134 p. CEI 146-1-1.
- [N7] COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE. 1991. Convertisseurs à semi-conducteurs - Spécifications communes et convertisseurs commutés par le réseau- Partie 1-2: Guide d'application. 3^{ième} éd. Suisse: Bureau Centrale de la commission Électrotechnique International. 181 p. CEI 146-1-2.
- [N8] COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE. 1991. Convertisseurs à semi-conducteurs - Spécifications communes et

- convertisseurs commutés par le réseau - Partie 1-3: Transformateurs et bobines d'inductance. 3^{ième} éd. Suisse: Bureau Centrale de la commission Électrotechnique International. 24 p. CEI 146-1-3.
- [N9] COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE. 1992. Convertisseurs à semi-conducteurs - Partie 6: Guide d'application pour la protection par fusibles des convertisseurs contre les surintensités. 1^{ième} éd. Suisse: Bureau Centrale de la commission Électrotechnique International. 32 p. CEI 146-6.
- [N10] COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE. 1998. Applications ferroviaires - Appareillage à courant continu des installations fixes - Partie 1: Généralités. 1^{ième} éd. Suisse: Bureau Centrale de la commission Électrotechnique International. 43 p. CEI 469.
- [N11] COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE. 1998. Applications ferroviaires- Appareillage à courant continu des installations fixes - Partie 2: Disjoncteurs. 1^{ième} éd. Suisse: Bureau Centrale de la commission Électrotechnique International. 32 p. CEI 470.
- [N12] COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE. 1998. Applications ferroviaires- Appareillage à courant continu des installations fixes - Partie 3: Sectionneurs d'intérieur à courant continu et sectionneurs commutateurs. 1^{ième} éd. Suisse: Bureau Centrale de la commission Électrotechnique International. 23 p. CEI 471.
- [N13] COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE. 1989. Degrés de protection procurés par les enveloppes (code IP). 2^{ième} éd. Suisse: Bureau Centrale de la commission Électrotechnique International. 72 p. CEI 529.
- [N14] COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE. 1988. Tension d'alimentation des réseaux traction. 1^{ième} éd. Suisse: Bureau Centrale de la commission Électrotechnique International. 10 p. CEI 850.
- [N15] CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. 1981. Dry type transformers 1st ed. Ontario: Canadian Standards Association. 32 p. CSA C9.
- [N16] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. 1998. IEEE Standard general requirments for dry type distribution and power

- transformer including those with solid cast resin encapsulated windings. 2nd ed. New York: IEEE Power Engineering Society. 36 p. IEEE std C57.12.01.
- [N17] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. 1998. IEEE Standard test code for liquid-immersed distribution, power and regulating transformers and IEEE guide for short-circuit testing of distribution and power transformers. 2nd ed. New York: IEEE Power Engineering Society. 15 p. IEEE std C57.12.60.
- [N18] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. 1998. IEEE Standard practices and requirements for semiconductor power rectifier transformers. 2nd ed. New York: IEEE Power Engineering Society. 61 p. IEEE std C57.18.10.
- [N19] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. 1998. IEEE Recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents. 2nd ed. New York: IEEE Power Engineering Society. 39 p. IEEE std C57.110.
- [N20] NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATIONS. 1973. Silicone rectifier units for transportation power supplies. 2nd ed. Washington DC: National Electrical manufacturers association. 8 p. NEMA RI-9.
- [N21] NORME FRANCAISE. 1993. Transformateurs de sous-stations de traction. 2^{ième} éd. Paris: L'Union technique de l'électricité. 20 p. NF F 41-010.

PLANS ET SCHEMAS DE CONTROLE :

- [PS1] BROWN BOVERI LTÉE. 1981. Schémas de contrôle du poste 1R56 Joliette. Montréal : BBC. Contrat N° 402-M1-73. Plans série CR30244. 45p.
- [PS2] BROWN BOVERI LTÉE. Schémas de contrôle des postes Ligne 5, Prolongement Ouest. Montréal : BBC. Contrat 422-M1-85. Plans série C300 R00256. 98p.
- [PS3] BROWN BOVERI LTÉE. 1981. Schémas de contrôle du poste 1R56 Joliette. Montréal : BBC. Contrat N° 402-M1-73. Plans série CR30244. 45 p.
- [PS4] BUREAU DE TRANSPORT MÉTROPOLITAIN. 1976. Plan – Profil – Signalisation – Alimentation traction : Ligne 1. Montréal : BTM. Plan série 0-9001-8.

- [PS5] BUREAU DE TRANSPORT MÉTROPOLITAIN. 1976. Plan – Profil – Signalisation – Alimentation traction : Ligne 2. Montréal : BTM. Plan série 0-9001-10.
- [PS6] BUREAU DE TRANSPORT MÉTROPOLITAIN. 1978. Plan – Profil – Signalisation – Alimentation traction : Ligne 4. Montréal : BTM. Plan série 0-9001-13.
- [PS7] BUREAU DE TRANSPORT MÉTROPOLITAIN. 1978. Plan – Profil – Signalisation – Alimentation traction : Ligne 5. Montréal : BTM. Plan série 0-9001-14.
- [PS8] COMMUNAUTE URBAINE DE MONTREAL.1991-92. Normes traction. Montréal : CUM. Plans série 000-4200. 20 p.
- [PS9] COMMUNAUTE URBAINE DE MONTREAL.1991-92. Normes haute tension. Montréal : CUM. Plans série 000-4100. 20 p.
- [PS10] STCUM. 1990. Schémas de contrôle du poste 2R79 Sauriol. Montréal : STCUM. Contrat 2R79. Plans du projet 2R79. 45 p.

ANNEXES

ANNEXE 1, FICHES TECHNIQUE DES EQUIPEMENTS TRACTION

Tableau A1.1 Caractéristiques des disjoncteurs haute tension

	Poste de district					
	St-Michel	Snowdon	Dickson	Lionel-Groulx	Providence	Legendre
Compagnie	1982 Merlin Gérin	1985 Merlin Gérin	1976 Merlin Gérin	1976 Merlin Gérin	1966 Général Electric	1966 Général Electric
Type	SF6	SF6	Dans l'air (Solenarc)	Dans l'air (Solenarc)	Soufflage magnétique	Soufflage magnétique
Modèle	Fluarc FB4	Fluarc FB4	DES-65	DES-65	Magnablast	Magnablast
Tension nominale (Unom. - kV)	25	25	15	15	15	15
Courant nominal (Inom - A)	630 A	630 A	1250 A	1250 A	1250 A	1250 A
Tenue au onde de choc (NIB - kV)	125 kV	125 kV	95 kV	95 kV	95 kV	95 kV

Tableau A1.2 Caractéristiques des câbles haute tension

	Réseau		
	1982/ 85	1976	1966
Compagnie	Pirelli	Pirelli	Pirelli
Type	XLPE	XLPE	PILC
Modèle	3 c # 2/0 AWG	3 c # 4/0 AWG	3 c # 4/0 AWG
Tension nominale (Uisol - kV)	28	15	15
Courant nominale (Inom. - A)	630	1250	1250
Tenue au onde de choc (NIB - kV)	125	95	95
Type de neutre	Concentrique individuel	Concentrique individuel	Gaine de plomb
Section (Acond - cm ²)	133079.	211600	211600
Résistance (Rc- Ω/km à 25 C)	0,250	0,214	0,164
Réactance par phase (Xl- Ω/km à 25 C)	0,171	0,154	non disponible
Capacitance par phase (C- μF/m)	0,0135	0,2930	non disponible

Tableau A1.3 Caractéristiques des IHT, IHTM, SHT

Compagnie Type Modèle Fréquence (Hz) Phase (ph) Classe d'isolation nominale (Uisol -kV) Courant nominal (Inom -A) Courant de court-circuit (Icct -kA) Conception selon norme	Modifié en			
	2000	1982/ 85	1976	1966
	FEDERAL PIONEER LTD	NEBB/ BBC	BBC	BBC
	IHT	IHTM	SHT	SHT
	NAL25	FN 24	AD	AD
	60 Hz 3 ph.	60 Hz 3 ph.	60 Hz 3 ph.	60 Hz 3 ph.
	25	25,2	15	15
	600	1250	630	400
	40	50	50	50
	UL	CEI 265	CEI 129	nd

Tableau A1.4 Caractéristiques des transformateurs de puissance

Transformateur remplacé						
Type (*1)	ANN	ANF	1985 ONAN	1982 ONAN	1976 LNAN	1966 LNP
Compagnie	Mégatr an	ABB	Ferranti Packard	Ferranti Packard	Westinghouse	Ferranti Packard
Technologie	Cast Coil	Resibloc	Huile	Huile	Huile (Askarel)	Huile (Pyrallène)
Puissance	2700	2700	2840	2840	2840	2700
Haute tension (U _{HT} - kV)	12,47 D/ 12,47D	12,47 D/ 12,47D	24,940 D /24,940 D	24,6 D/ 24,6 D	12,6 D/ 12,6 D	12,47 D/ 12,47D
Basse tension (U _{bt} - V)	584 d/584 y	584 d/584 y	601 d/601 y	601 d/601 y	601 d/601 y	584 d/584 y
Courant du côté haute tension (I _{HT} - A)	119,05/ 121,96/ 125,0/ 128,22/ 131,59	119,05/ 121,96/ 125,0/ 128,22/ 131,59	62,6/ 64,1/ 65,7/ 67,4/ 69,2	60,8/ 62,1/ 63,6/ 65,1/ 66,7	121,5/ 124,2/ 127,1/ 130,1/ 133,3	124/ 127/ 130/ 134/ 137
Courant côté basse tension (I _{bt} - A)	1335/ 1335	1335/ 1335	1364/ 1364	1364/ 1364	1360/ 1360	1335/ 1335
Tenue au onde de choc (NIB - kV)	95	95	150/ 45	150/ 45	110/ 45	95
Impédance de commutation moyenne (Z _{moy} - % à kVA nom, kV nom)	12,79	12,79	13,73	13,73	12,42	15,91
Installation de type	Intérie ur	Intérieur	Extérieur	Extérieur	Extérieur	Extérieur
Classe du transformate ur (XFMR)	XFMR redress eur triphas é	XFMR redresseur triphasé	Extra Grande traction classe G - NEMA RI-9	Extra Grande traction classe G - NEMA RI-9	Extra Grande traction classe G - NEMA RI-9	XFMR redresseur triphasé

*1 Légende;

ONAN: ...Transformateur à l'huile à ventilation par convection naturelle
 LNAN, LNP : Transformateur à l'huile (askarel-Pyrallène) à ventilation par
 convection naturelle

ANN : Transformateur à sec à ventilation par convection naturelle

ANF : Transformateur à sec à ventilation forcée

Tableau A1.5 Caractéristiques des redresseurs

	1985/ 82 et 76	1966
Type du redresseur	HN2 72 1 DB12N705S	
Nombre de pulse	12	12
Nombre de diode par redresseur (nd)	72	84
Philosophie	n-1	n
Classe	VI	F
Refroidissement	Air naturel	Air naturel
Compagnie	BBC	Merlin Gérin Électronique
Côté alternatif		
Puissance (Pnom. - kW)	2500	2500
Tension nominale (Es pp - Vca)	601	584
Courant nominal (Ica - A _{RMS})	1360	1360
Fréquence (f - Hz)	60 Hz	60 Hz
Phase (ph)	3 ph.	3 ph.
Côté continu		
Tension nominale en charge (Ed - Vcc)	750	750
Courant nominal (Id - A)	3333	3333
Fréquence (f - Hz)	Continu	Continu
Phase (ph)	12 phases	12 phases
Classe du redresseur	Extra Grande traction	Grande traction
Selon CEI	CEI 146	CEI 11
Inductance d'équilibre (IPT)		200 kVA, ANV 360 Hz

Tableau A1.6 Caractéristiques des diodes des redresseurs

	1985/ 1982/ 1976	1966
Compagnie	BBC	Siemens
Numéro de diode	DSA 750-20	SSI N 30100A
De type	Avalanche	Régulière
Nombre de diode/ redresseur (nd)	72	84
Philosophie	n-1	n
Paramètre de tension		
Tension inverse de pointe répétitive (V_{RRM} - V)	2 000	2 000 à 3 000
Tension inverse non répétitive (V_{AVAL} - V)	2200	
Résistance apprente en sens direct (R_f m Ω)	0,322	0,479
Seuil de conduction (V_{Fo} - V)	0,78	0,735
Paramètre de courant		
Valeur limite de courant moyen permanent (I_{FAVM} - A)	680 A à 100 C	450 à 121 C
Valeur limite de courant efficace maximum sens direct (I_{FRSM} - A)	1 500 A à 100 C	707 A
Valeur limite de courant direct non répétitif (I_{FSM} - A)	14 700 A à 45 C	9 400 A à 25 C
Protection du fusible (I_{FU} - A)	500	315

Tableau A1.7 Caractéristiques des sectionneurs traction

	1985/ 1982/ 1976	1966	
Compagnie	Berg		
Type	SPM ET SN	Sectionneur six phases	SP ET SN
Modèle	A4S		A4S
Tension nominale (Unom. - V)	3000	750 Vca	3000
Courant nominal (Inom - A)	6300 Acc	1500 Aca	6300 Acc

Tableau A1.8 Caractéristiques des disjoncteurs de voie

	1985	1982	1976	1966
Compagnie	BBC Secheron	BBC Secheron	BBC	BBC - Secheron
Type	Ultra-rapide	Ultra-rapide	Semi-rapide	Ultra-rapide
Modèle	UR36e61S	UR36e61S	GBJ8-12-3N	UR236e61s
Courant nominal (Inom - A)	4*3600	4*3600	4*3600	1*6000
Courant de court-circuit (Icc - kA)	100	100	90	100
Courant de déclenchement (Iseuil - A)	8000 A	8000 A	8000 A	9500 A
Classe d'isolation (Unom. - V)	1000	1000	750	1000
Surtension de manœuvre (Uarc - V)	2250	2250	2250	1890

Tableau A1.9 Caractéristiques des câbles traction

	Dans le poste	Disjoncteur de voie	Pour le négatif
Compagnie	Pirelli	Pirelli	Pirelli
Type	RW-90 type G	RW-90 type I	RW-90 type I
Modèle	500 kmils - Cuivre	500 kmils - Cuivre	500 kmils - Cuivre
Tension nominale (Unom. - V)	1000 V	1000 V	1000 V
Courant nominal (Inom. - A)	509 A	509 A	509 A
Isolation (Uisol. - V)	3000 V	3000 V	3000 V
Nombre de câble	8 par polarité	4 par disjoncteur	12
Résistance (Rc - Ω/km à 20 C)	0,0709	0,0709	0,0709

Type G; 259 brins

Type I; 1590 brins

Tableau A1.10 Caractéristiques des contacteurs traction

	1985	1982	1976	1966
Type	CCN	CCN	CCN	CS
Compagnie	CEM	UNELEC	CEM	
Modèle	IORE 800 40 CC	GBFC	IORE 800 40 CC	
Contact en série	2	2	2	1
Courant nominal (Inom. - A)	800	800	800	6000
Tension nominale (Unom. - V)	600	600	600	1000
Selon norme	CEI 158-1	CEI 158-1	CEI 158-1	

Tableau A1.11 Caractéristiques des protections

	1985	1982	1976	1966
PROTECTION DES CABLES HAUTE TENSION ET DES TRANSFORMATEURS - RELAIS 50/ 51				
Type de relais	CDG64 phases A /C	CDG64 phases A /C	IAC66 phases A /C	CO8 phases A /C
Compagnie	GEC Mesurment	GEC Mesurment	Général Électric	Westinghouse
T.I.	200A/5A (40 :1)	400A/5A (80 :1)	400A/5A (80 :1)	200A/5A (80 :1)
Installé sur	Phase A, C et sur le neutre N			
INTERVENTION EN TUNNEL - RUPTEUR				
Nombre de contact	4 contacts	4 contacts	4 contacts	2 contacts
I Nominal	20 A	20 A	20 A	20 A
V Nominal	48 V	48 V	48 V	48 V
RELAIS BASSE IMPEDANCE ET HAUTE IMPEDANCE				
➤ BI	80 A	80 A	80 A	100 A
➤ HI				
Premier seuil SPM/ DV Redresseur seul	50 V 100 V	50 V 100 V	50 V 50 V	50 V 50 V
Deuxième seuil	200 V	200 V	200 V	200 V
TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE				
➤ Température				
Av. légère	95 °C	95 °C	95 °C	95 °C
Av. grave	105 °C	105 °C	105 °C	105 °C
➤ Pression	Av. grave	Av. grave	Av. grave	Av. grave
➤ Niveau d'huile	Av. légère	Av. légère	Av. légère	

Tableau A1.11 Caractéristiques des protections (suite)

	1985	1982	1976	1966
REDRESSEUR				
➤ Température				
Av. légère	95 °C	95 °C	95 °C	95 °C
Av. grave	105 °C	105 °C	105 °C	105 °C
➤ Claquage diode				
Av. légère	1 diode / bras	1 diode / bras	1 diode / bras	1 diode / bras
Av. grave	2 diodes / bras	2 diodes / bras	2 diodes / bras	1 diode / bras
➤ Varistance				
	Av. grave	Av. grave	Av. grave	Av. grave
➤ Courant inverse (#32)				
	700A – Av. grave	700A – Av. grave	700A – Av. grave	700A – Av. grave
RELAIS DI/DT				
← Pour E1=10kA/s et F1=5kA/s →				
➤ Delta I	1200 A	1200 A	1200 A ou 2000 A	1200 A ou 2000 A
➤ Tmax.	100 ms-600A	100 ms-600A	100 ms-600A	100 ms-600A
← Arc Interrompu pour E2 et N=800 kA/s et F2=600 kA/s →				
➤ I_{max} +	9500 A	9500 A	9500 A	9500 A
➤ I_{max} -	1000 A	1000 A	1000 A	1000 A

Tableau A1.12 Caractéristiques des onduleurs du métro

	Compagnie	Symbole	Modèle	Nombre	Courant	Tension	Phase
					Nominal	Nominale	fréquence
					(Inom)	(Unom - V)	# ph. - Hz
Honoré Beaugrand ligne 1	BBC	Hors service					
Du côté haute tension							
Sectionneur haute tension	BBC	SHT	ADI	1	400 A	12 000 V	3 ph - 60 Hz
Transformateur de puissance	May & Christie	DD/dy1	1660/2*863 kVA	1		12,600 / 2* 406 V	3 ph - 60 Hz
Du côté basse tension							
Disjoncteur	BBC	DO	UR25E20	1	2500 A	2000 V	continu
Sectionneur négatif	Berg	SNO	HAZs	1	2000 A	3000 V	continu
Inductance de lissage	Trench Electric	Self	1,5 mH (à sec)	1	1500 A	3000 V	continu
Thyristors							
Jarry - ligne 5	Jeumont - Schneider	En service					
Du côté basse tension							
Sectionneur	Jeumont - Schneider	SHT	ADI	2	630 A	600 V	3 ph - 60 Hz
Auto-Transformateur de puissance	Jeumont - Schneider	Yy0	408 kVA	2		715/ 650 V	3 ph - 60 Hz
Disjoncteur	BBC	DO	UR25E20	1	2500 A	2000 V	continu
Sectionneur négatif	Berg	SNO	HAZs	1	2000 A	3000 V	continu
Inductance de lissage	Trench Electric	Self	1 mH (à sec)	1	1500 A	3000 V	continu
Thyristors	Jeumont - Schneider	PONT DE GRAETZ	T9G0-24-11	6			

ANNEXE 2, SCHEMAS UNIFILAIRES

SCHEMA UNIFILAIRE RESEAU 1982-85

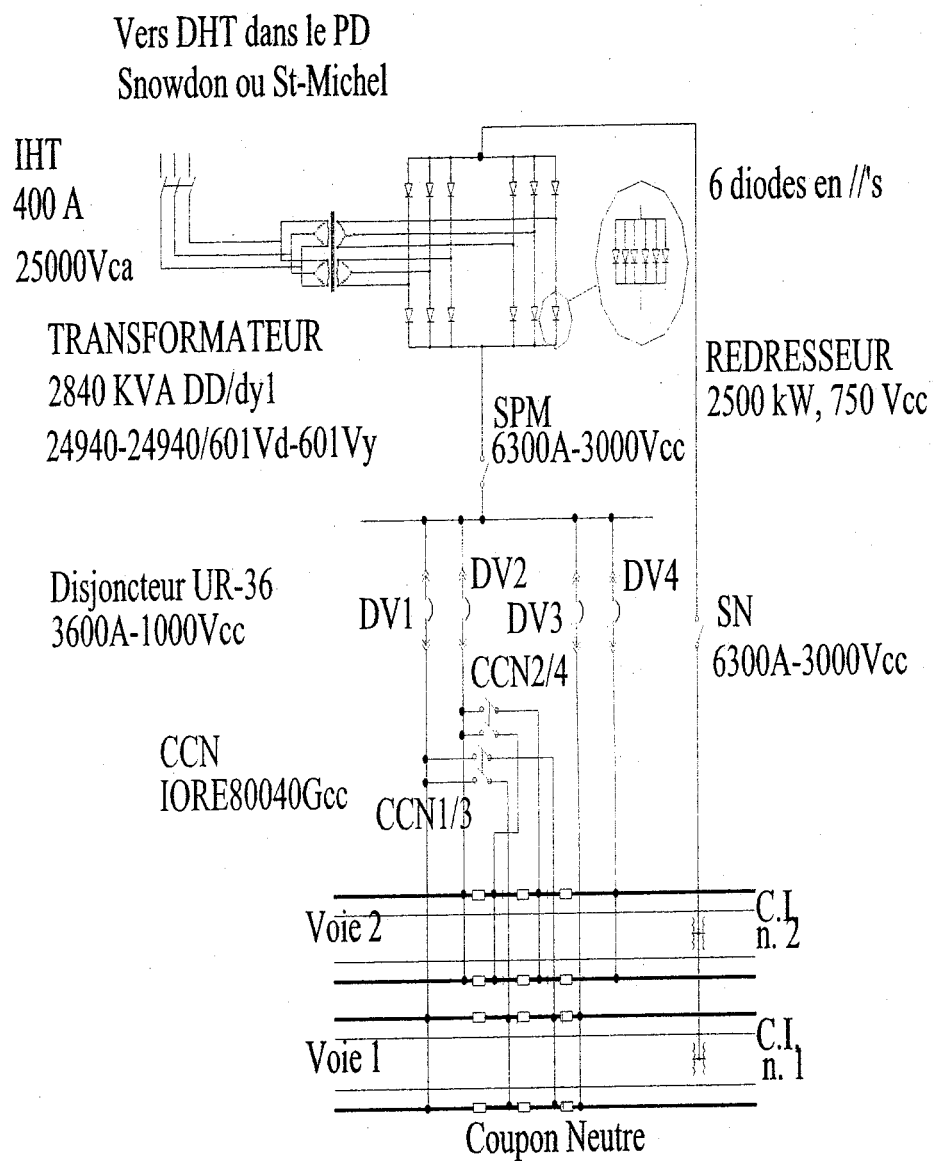


Figure A2.1 Schéma unifilaire réseau 1982- 1985

SCHEMA UNIFILAIRE RESEAU 1976

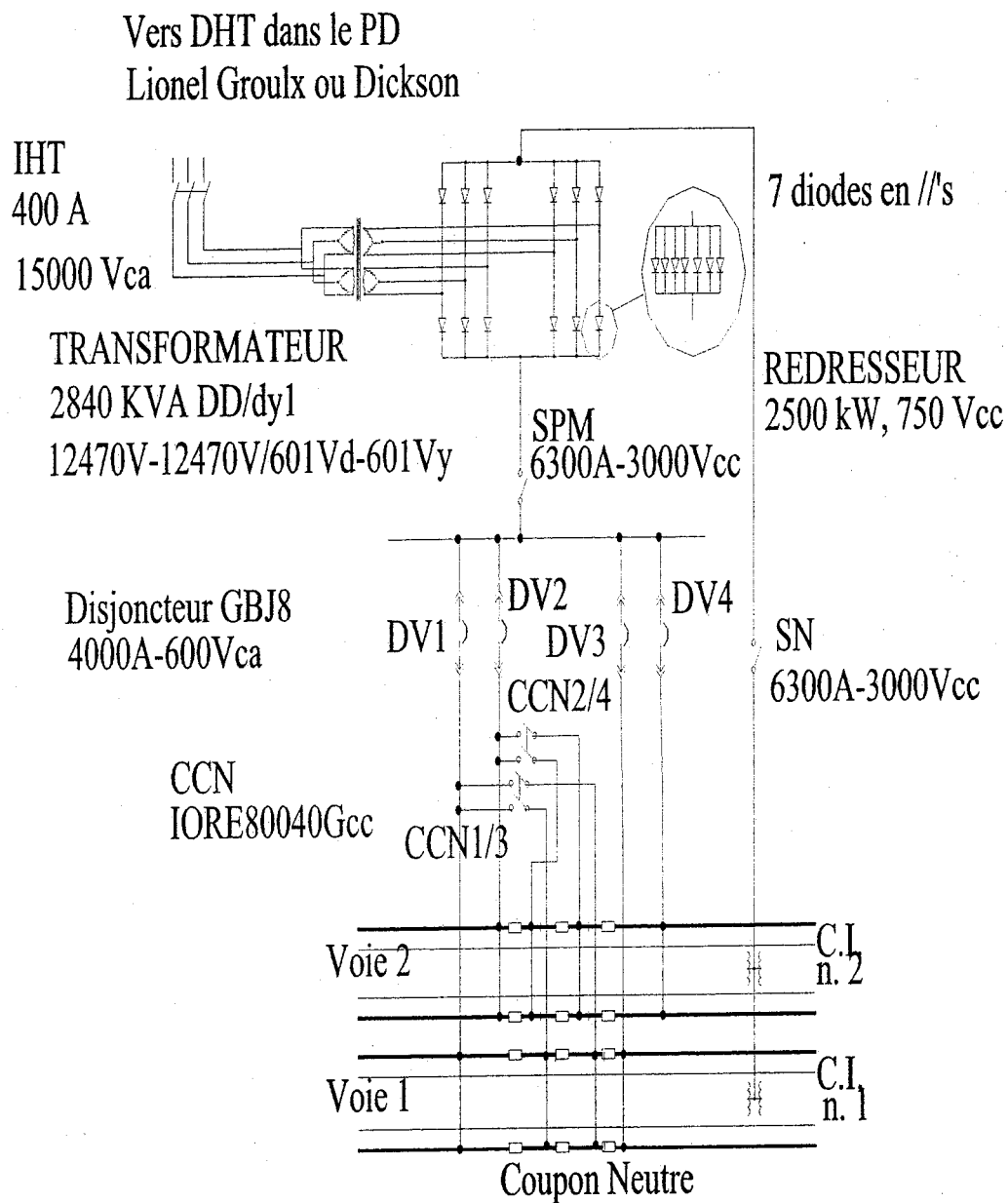


Figure A2.2 Schéma unifilaire réseau 1976

SCHEMA UNIFILAIRE RESEAU 1966

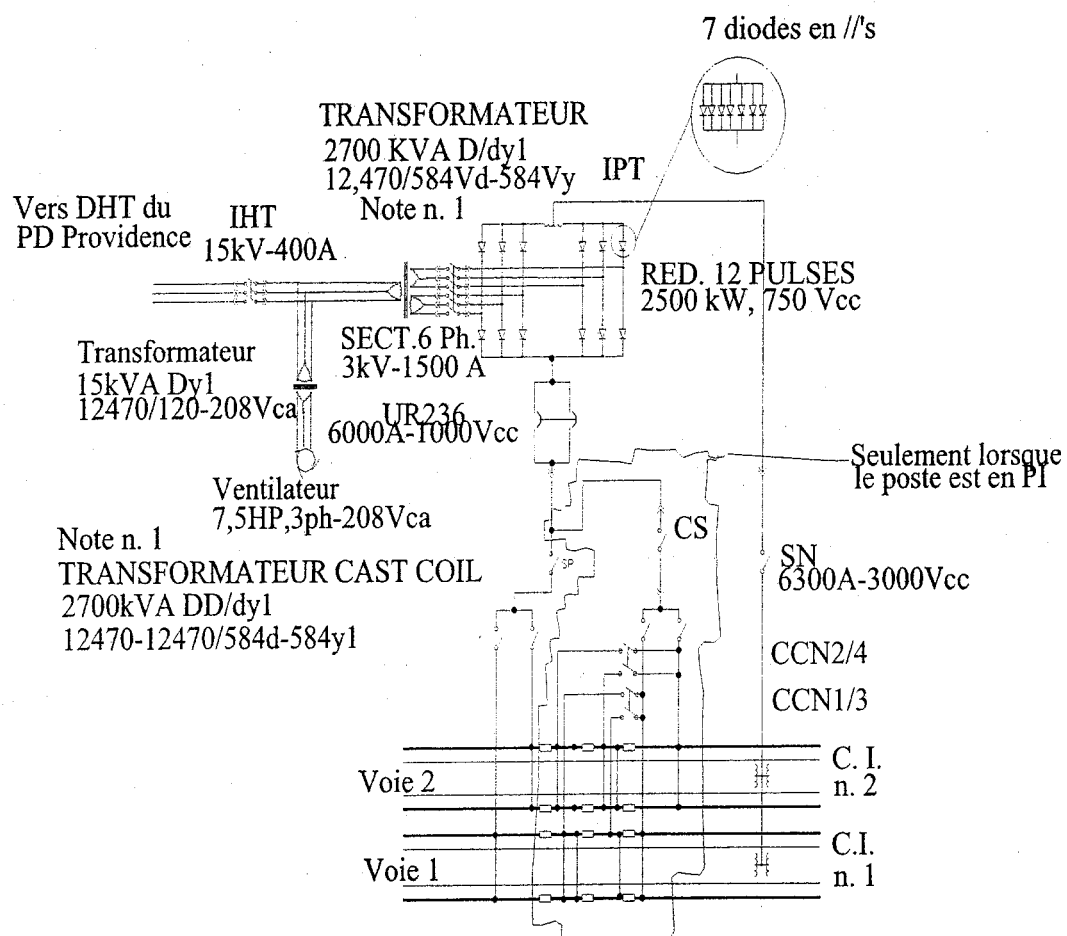


Figure A2.3 Schéma unifilaire réseau 1966

ANNEXE 3, PHOTOS NUMERISEES DES EQUIPEMENTS

LES DISJONCTEURS HAUTE TENSION (DHT)

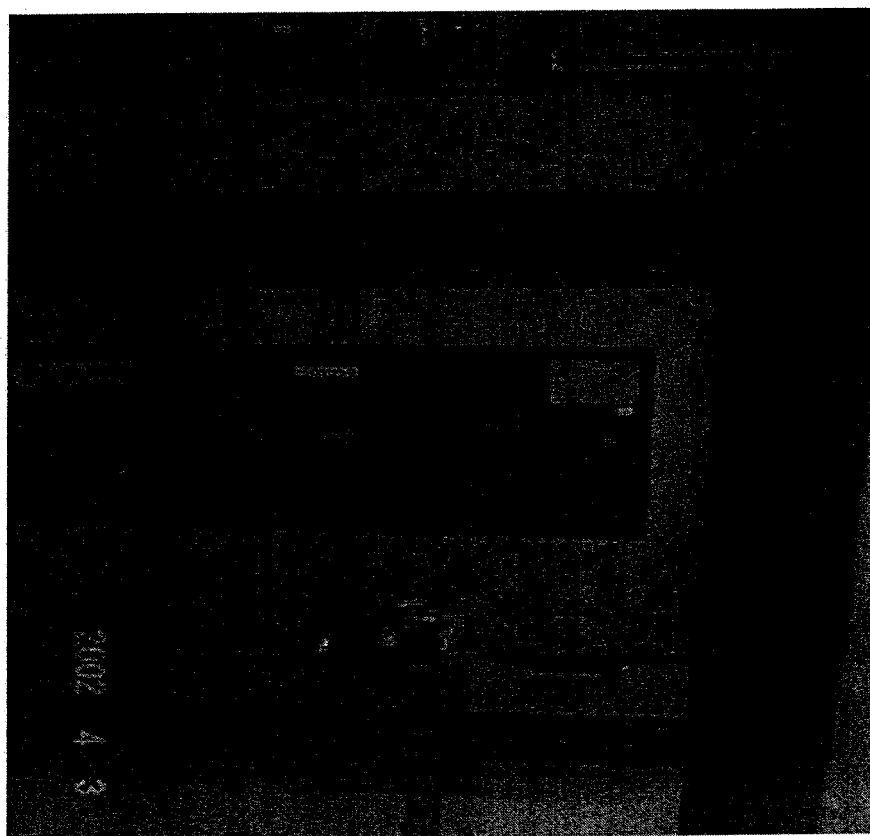


Figure A3.1 DHT 25 kV, 630 A (St-Michel et Snowdon 1982-85)

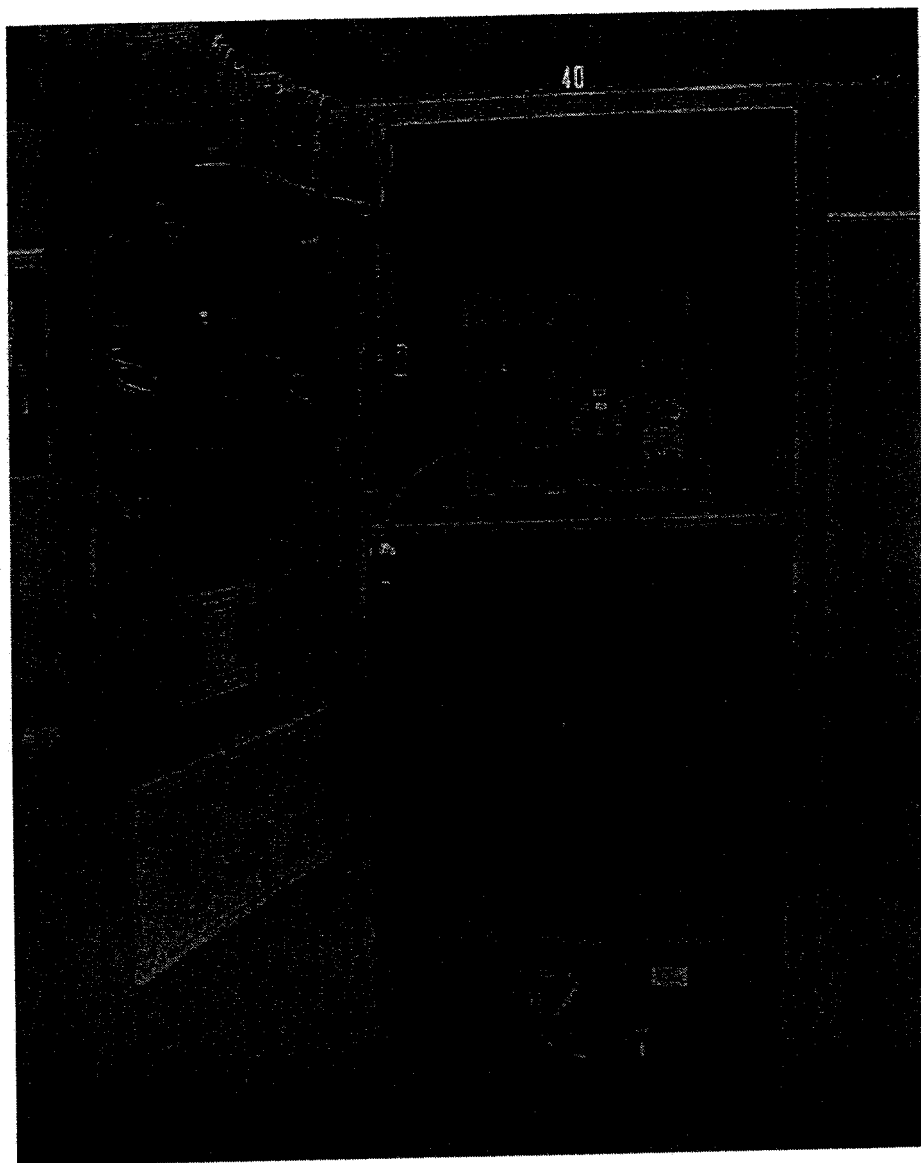


Figure A3.2 DHT 12 kV, 1250 A (Lionel Groulx, Dickson 1976)

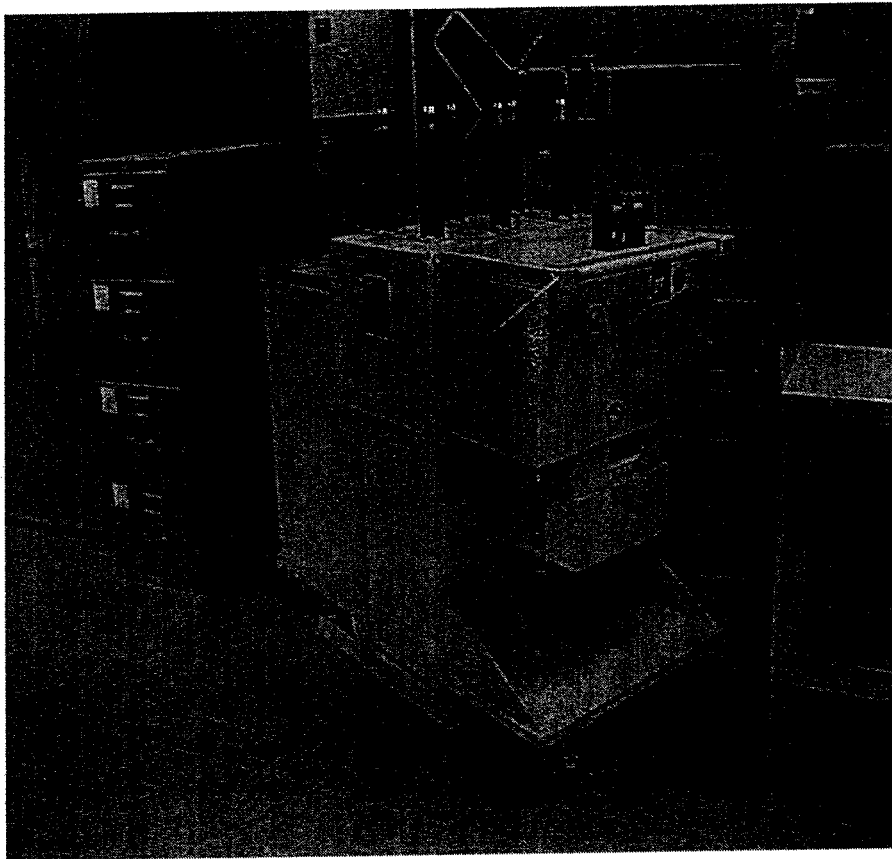


Figure A3.3 DHT 12 kV, 630 A (Providence 1966)

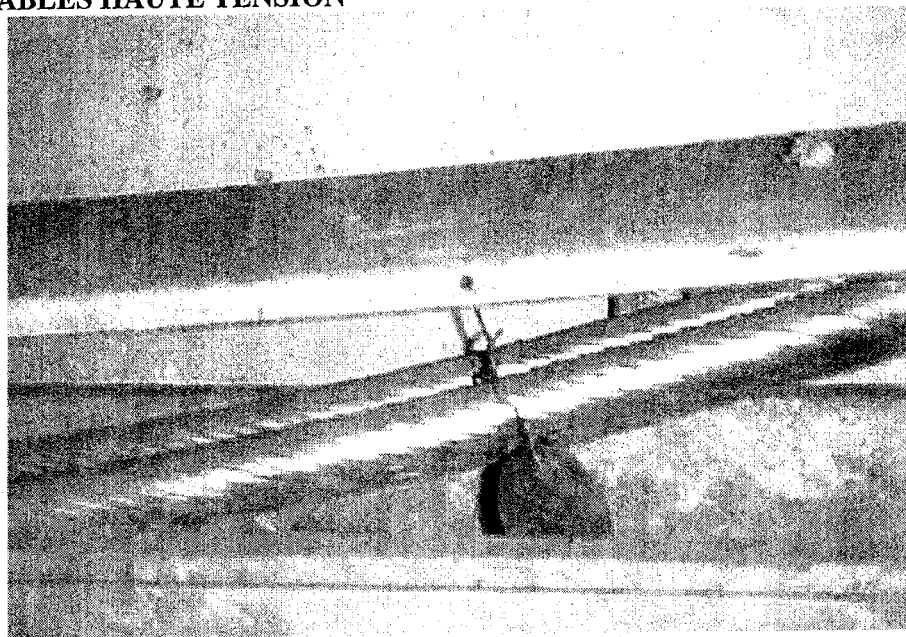
LES CABLES HAUTE TENSION

Figure A3.4 Câbles XLPE 25 kV, 3c #2/0 AWG (1982, 85)

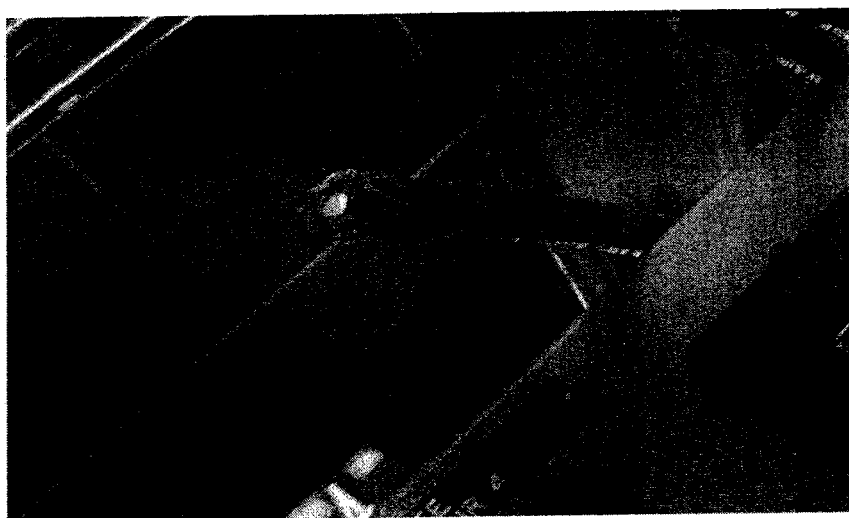


Figure A3.5 Câbles XLPE 12 kV, 3c #4/0 AWG (1976)

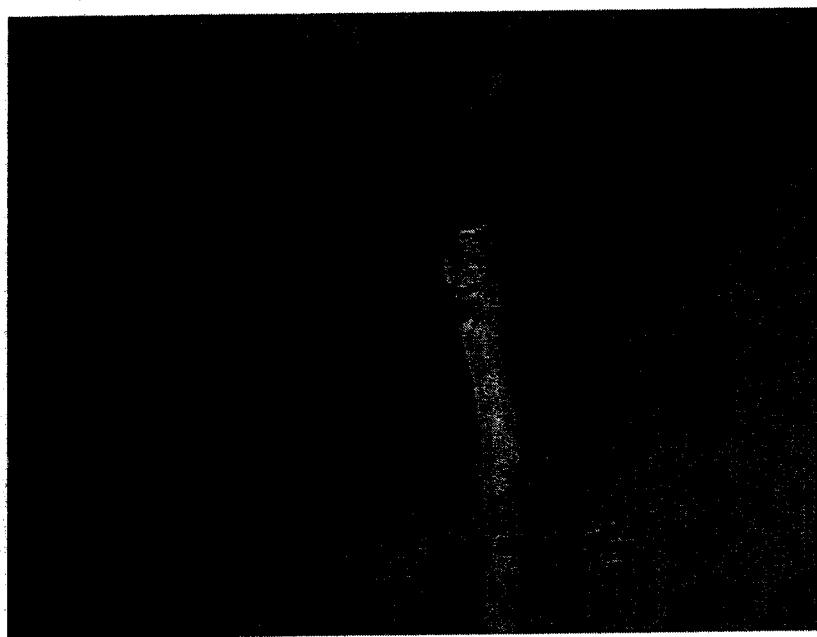


Figure A3.6 Câbles PILC 12 kV, 3c #4/0 AWG (1966)

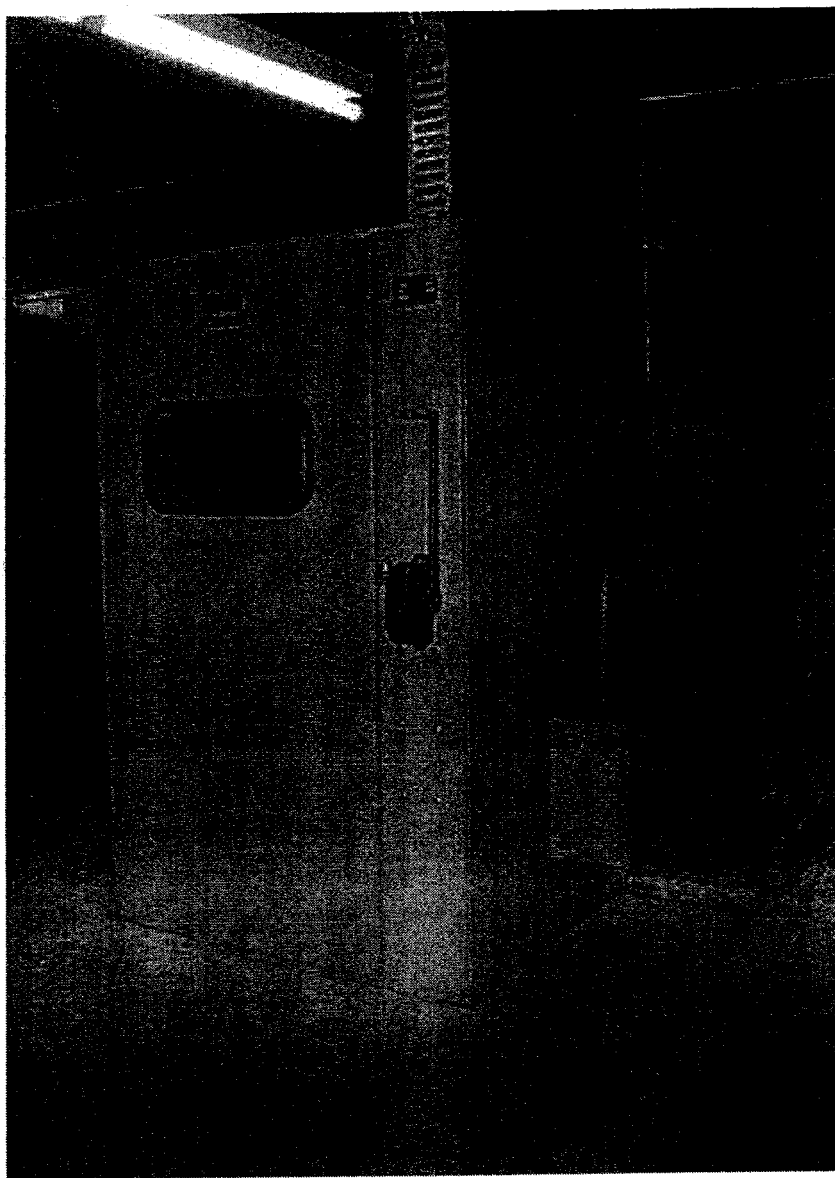
LES INTERRUPTEURS SOUS CHARGE HAUTE TENSION (IHT OU SHT)

Figure A3.7 Le IHTM 25 kV, 400 A (1982, 85)

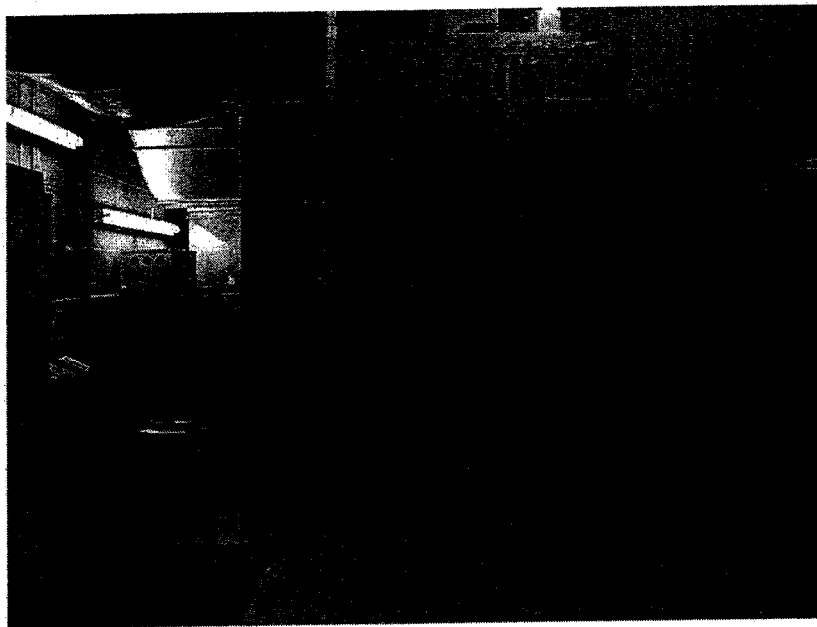


Figure A3.8 Le IHT 12 kV, 400 A (1976)

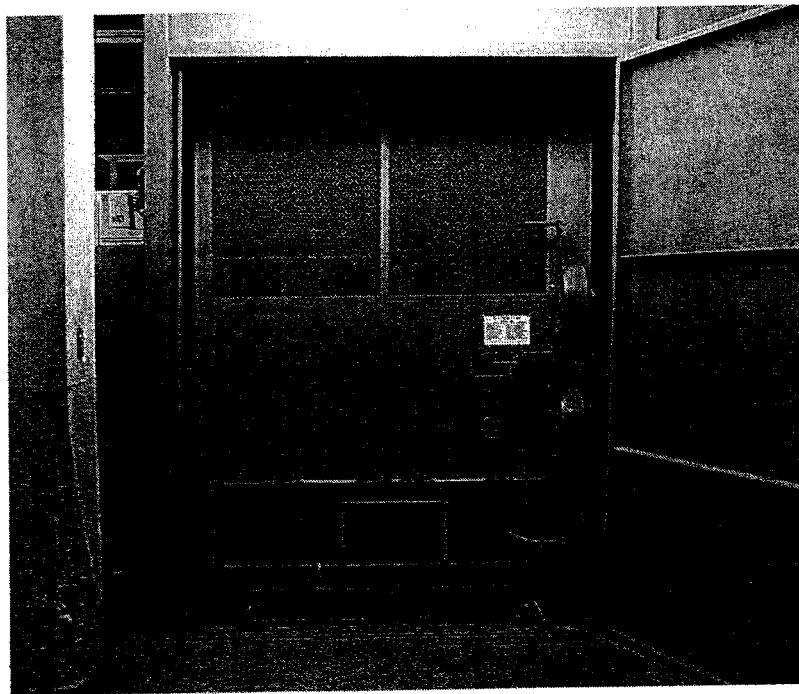


Figure A3.9 Le SHT 12 kV, 400 A (1966)

LES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE (XFO OU XFMR)

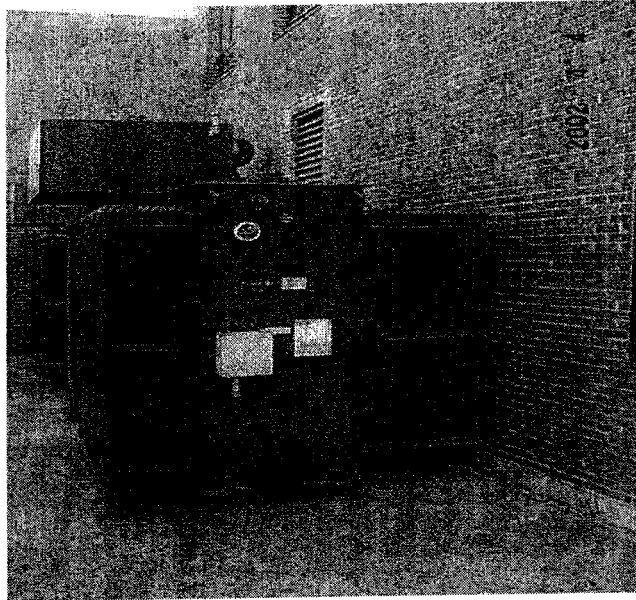


Figure A3.10 XFMR 2840 kVA Huile (1982, 85)

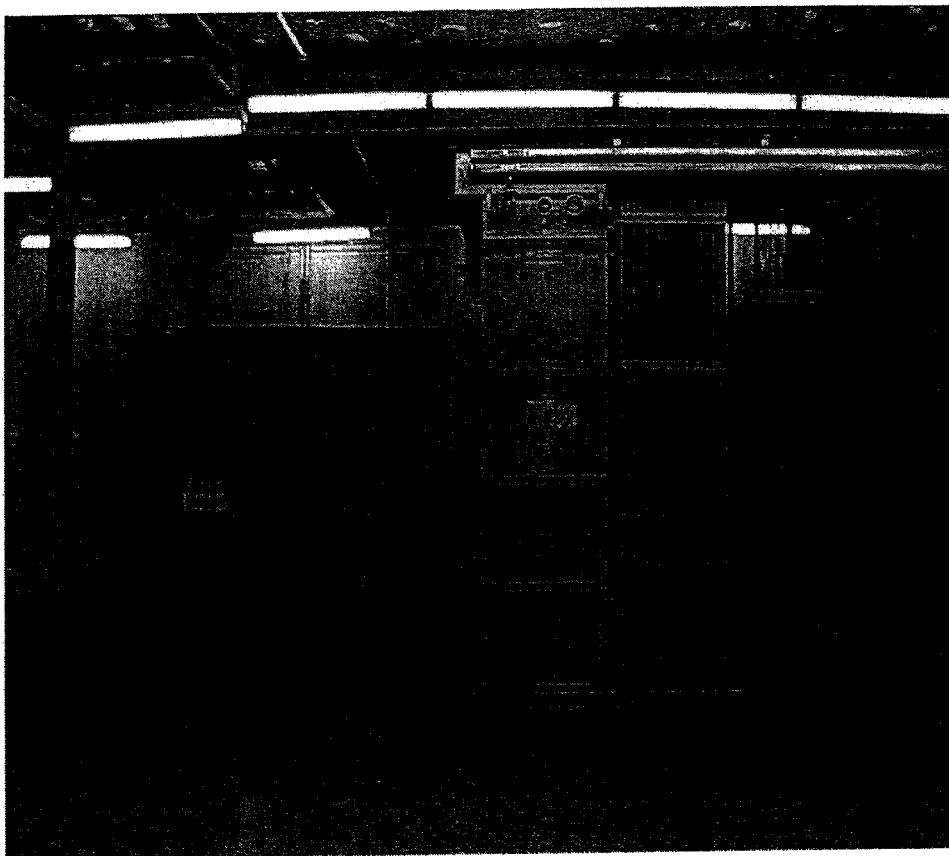


Figure A3.11 XFMR 2840 kVA Huile (1976)

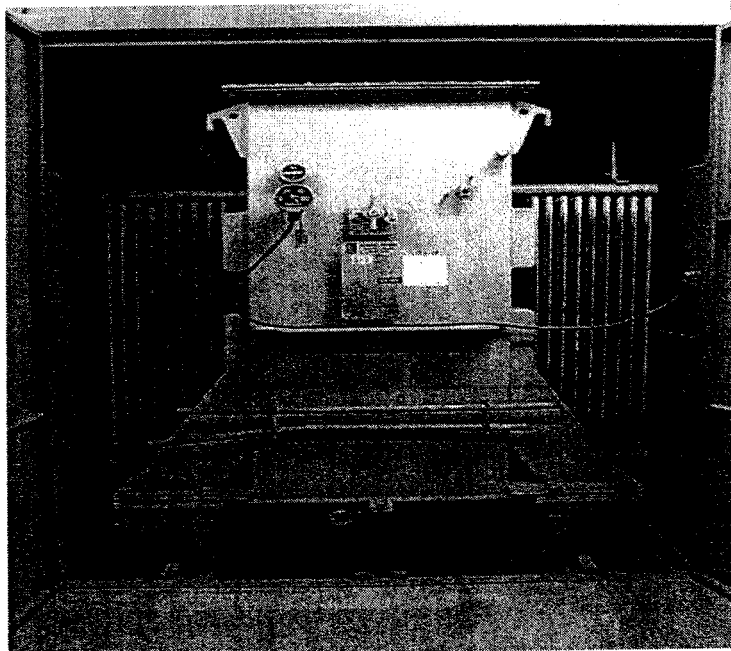


Figure A3.12 XFMR 2700 kVA Huile (1966)

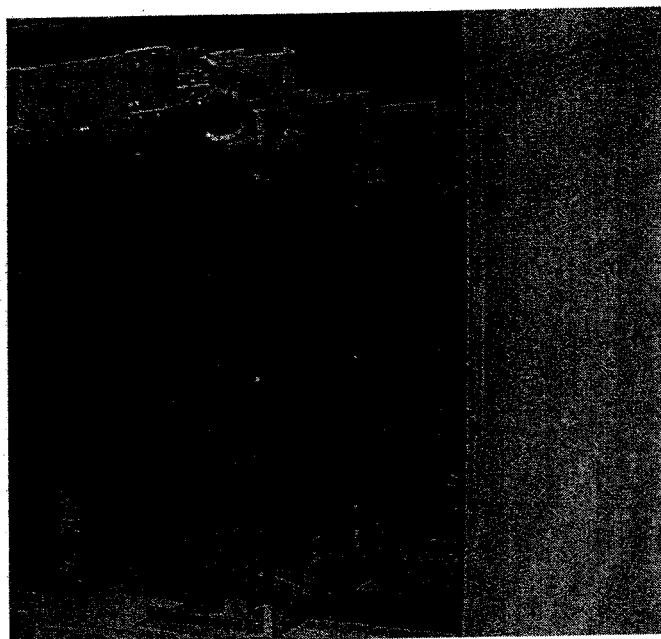


Figure A3.13 XFMR 2700 kVA époxyde

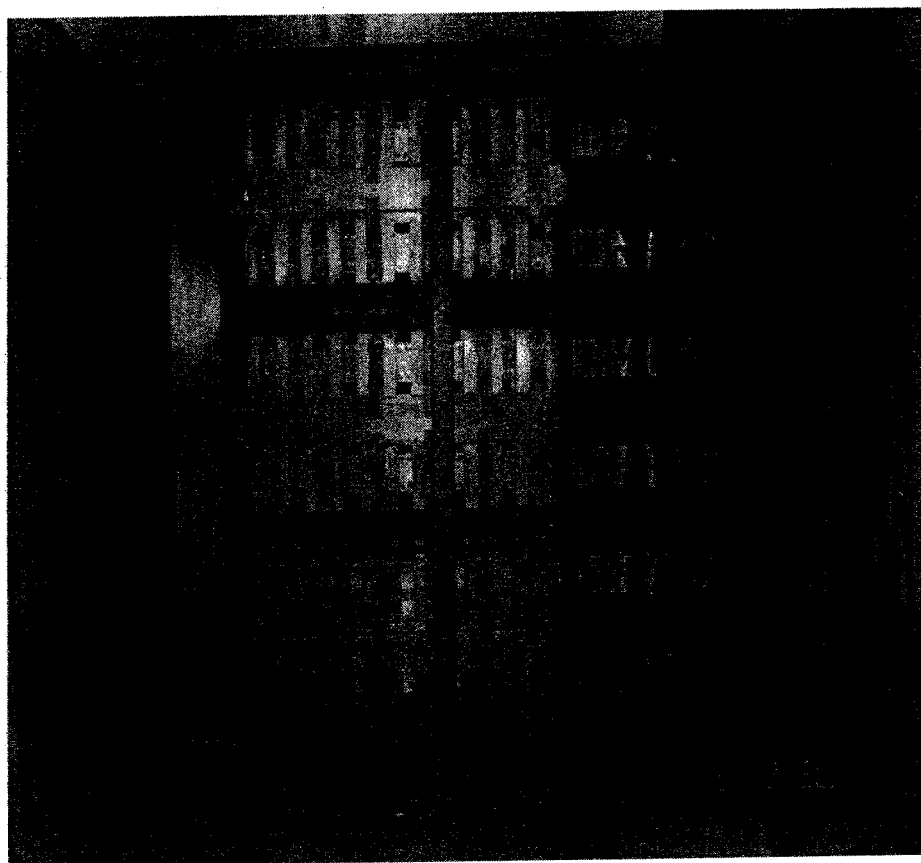
LES REDRESSEURS (RED)

Figure A3.14 Redresseurs 72 diodes (1976, 82, 85)

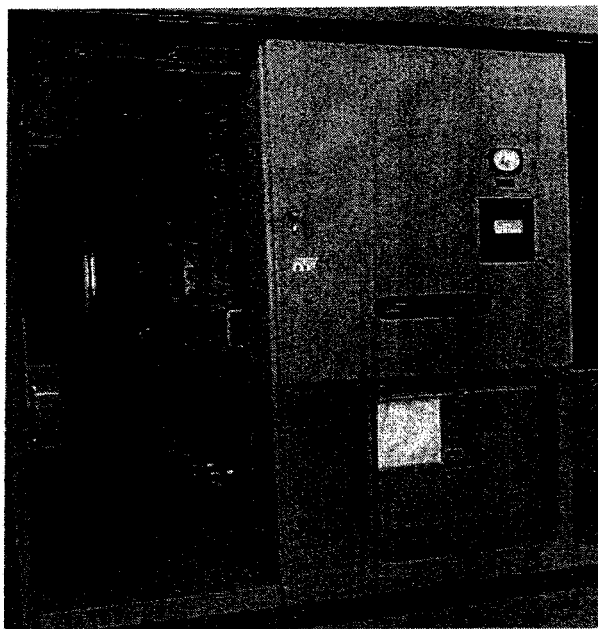


Figure A3.15 Redresseurs 84 diodes (1966)

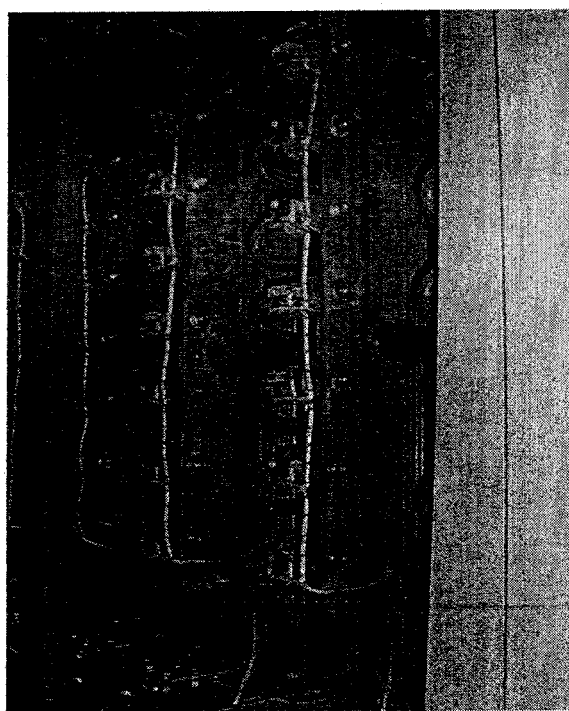


Figure A3.16 Cinq bras du redresseur (1966)

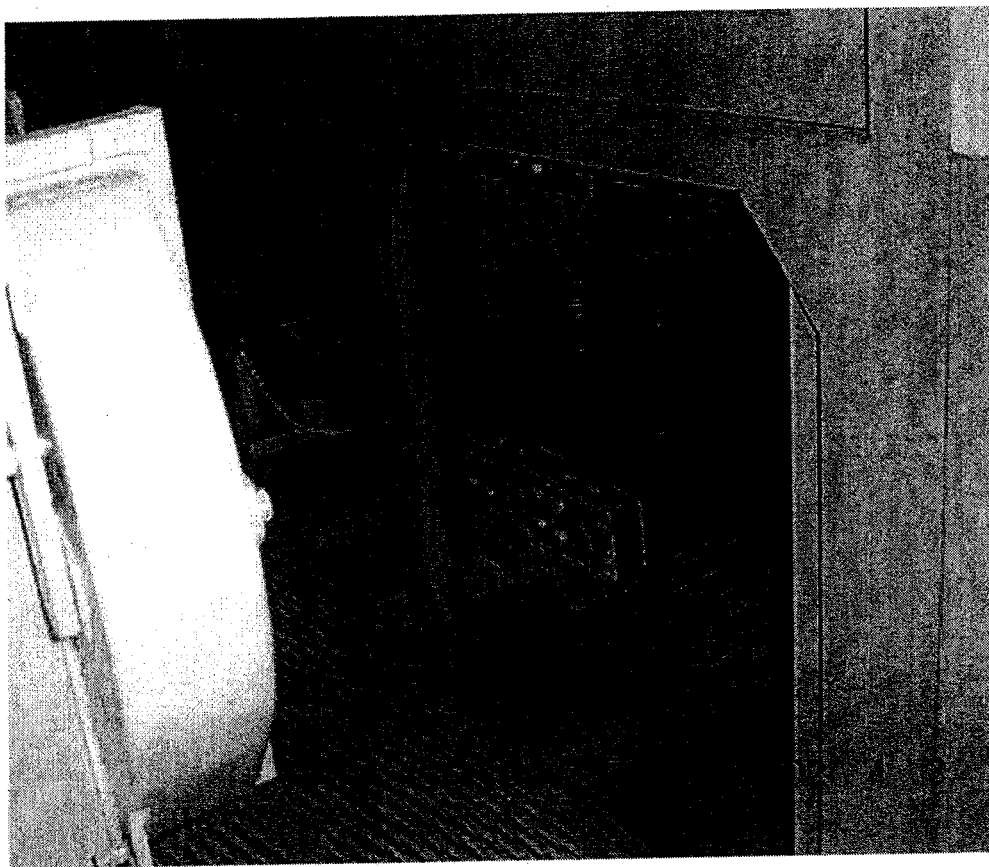


Figure A3.17 L'inductance d'équilibre (IPT) réseau 1966

LES DIODES

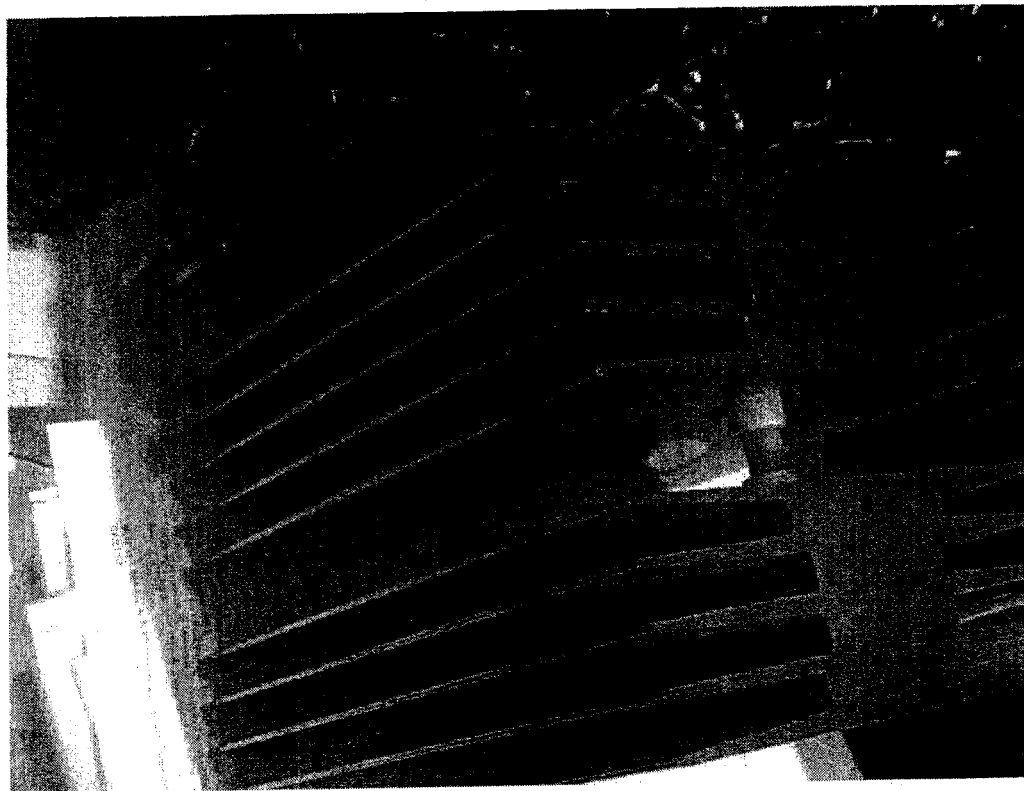


Figure A3.18 Diodes DSA ET 5DSA (1976, 82 et 85)

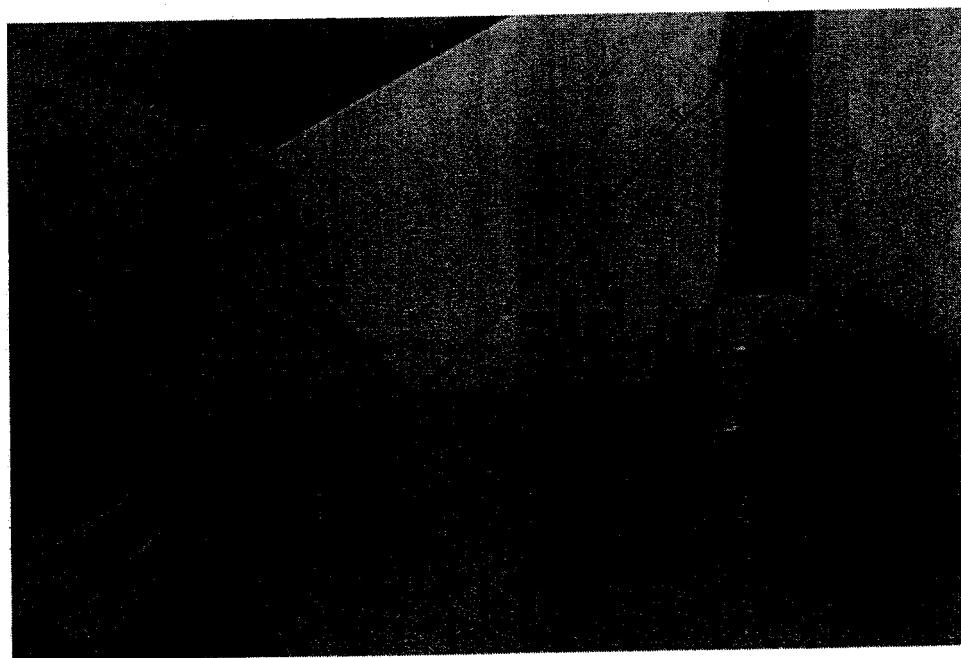


Figure A3.19 Diodes SSI (1966)

LES SECTIONNEURS (SPM, SIX PHASES, SP OU SN)

Le sectionneur positif motorisé confiné dans la dernière cellule de droite

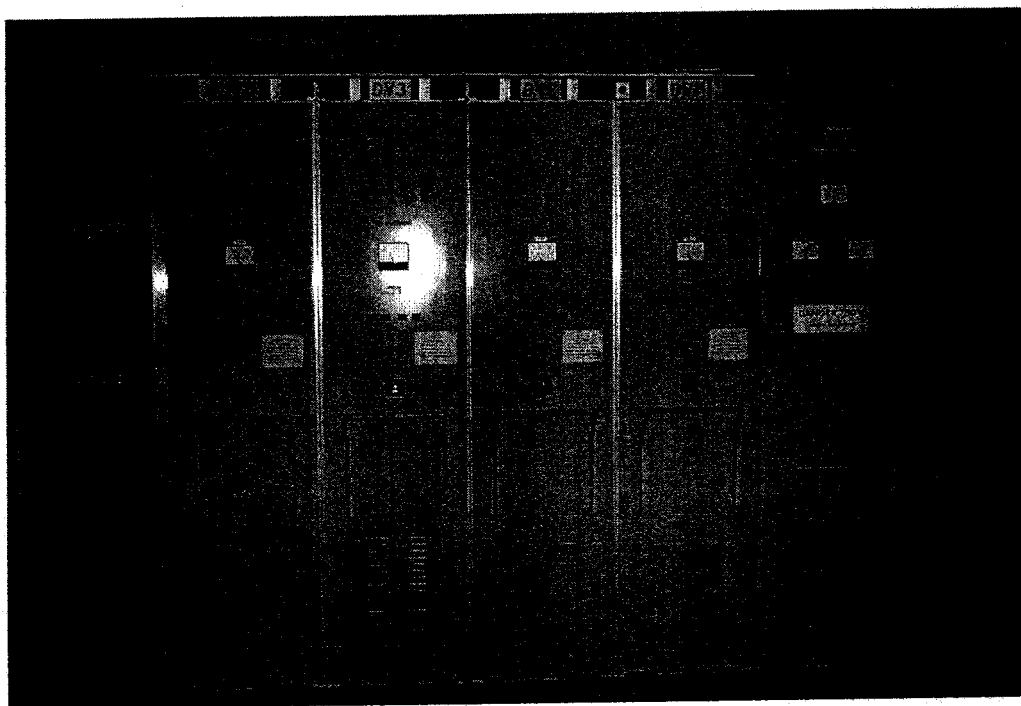


Figure A3.20 SPM (1976, 82 et 85)

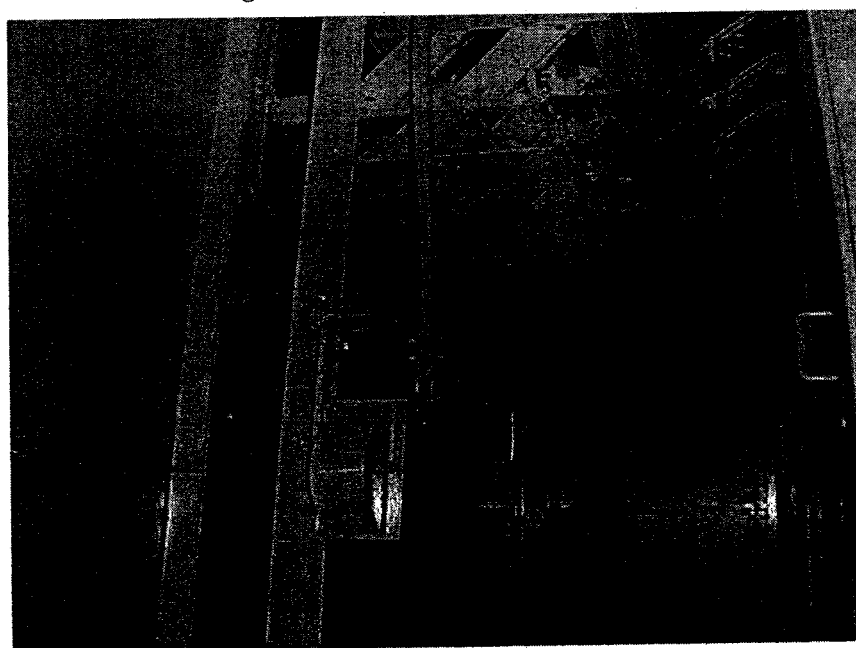


Figure A3.21 Sectionneur six phases (1966)

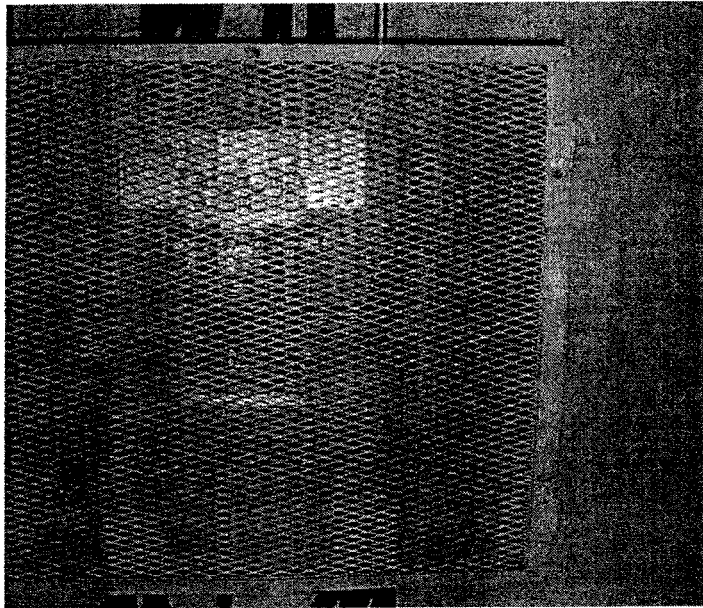


Figure A3.22 SN (1976, 82 et 85)

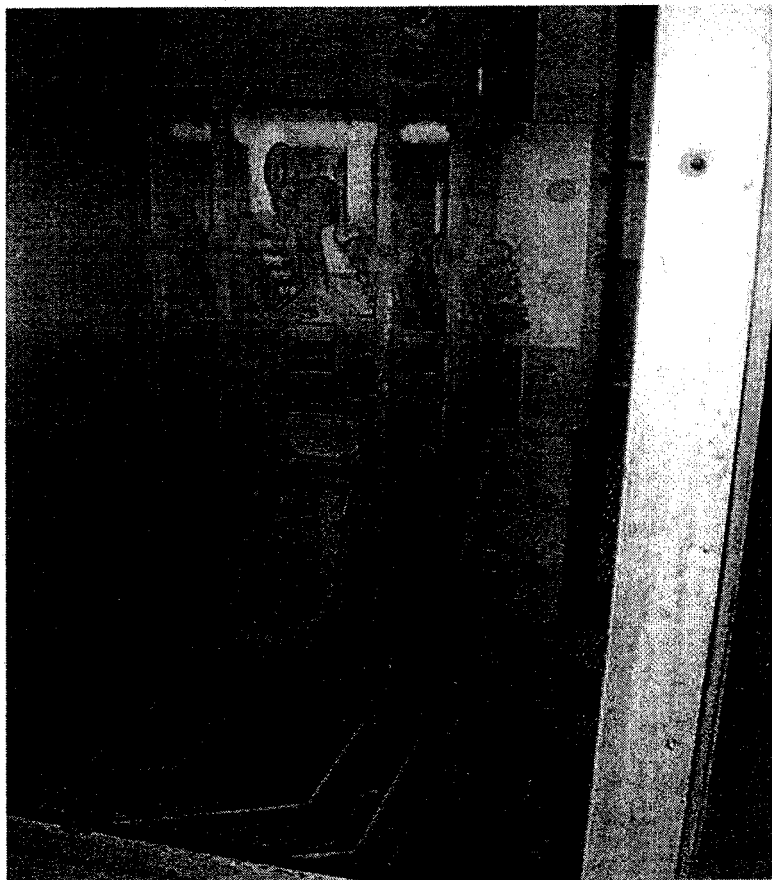


Figure A3.23 SP et SN (1966)

LES DISJONCTEURS DE VOIES (DV)

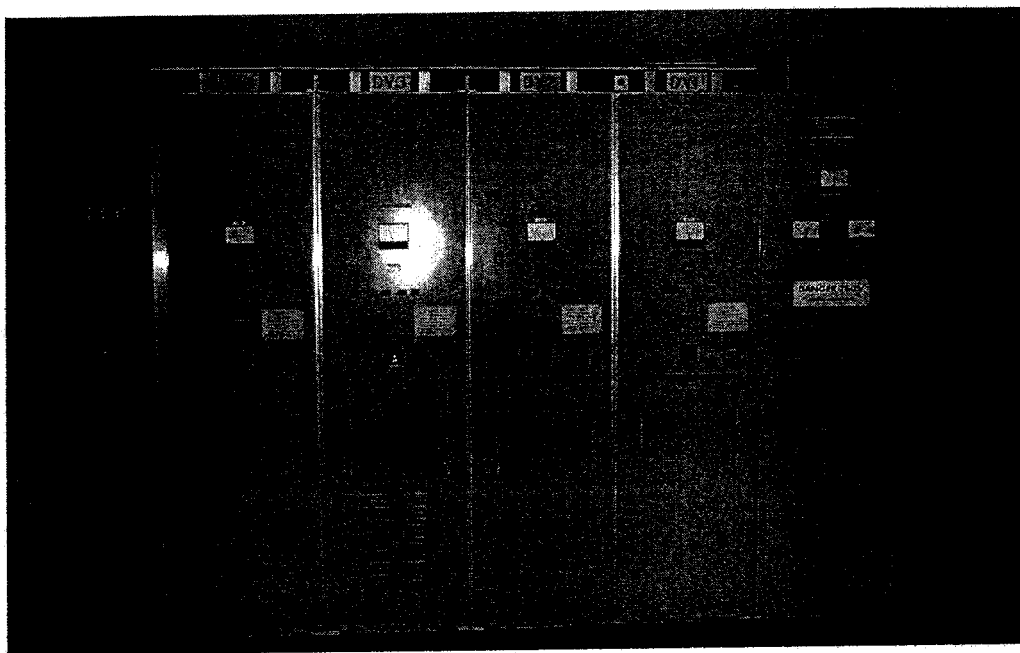


Figure A3.24 Quatre UR36 et un SPM (1976, 82 et 85)

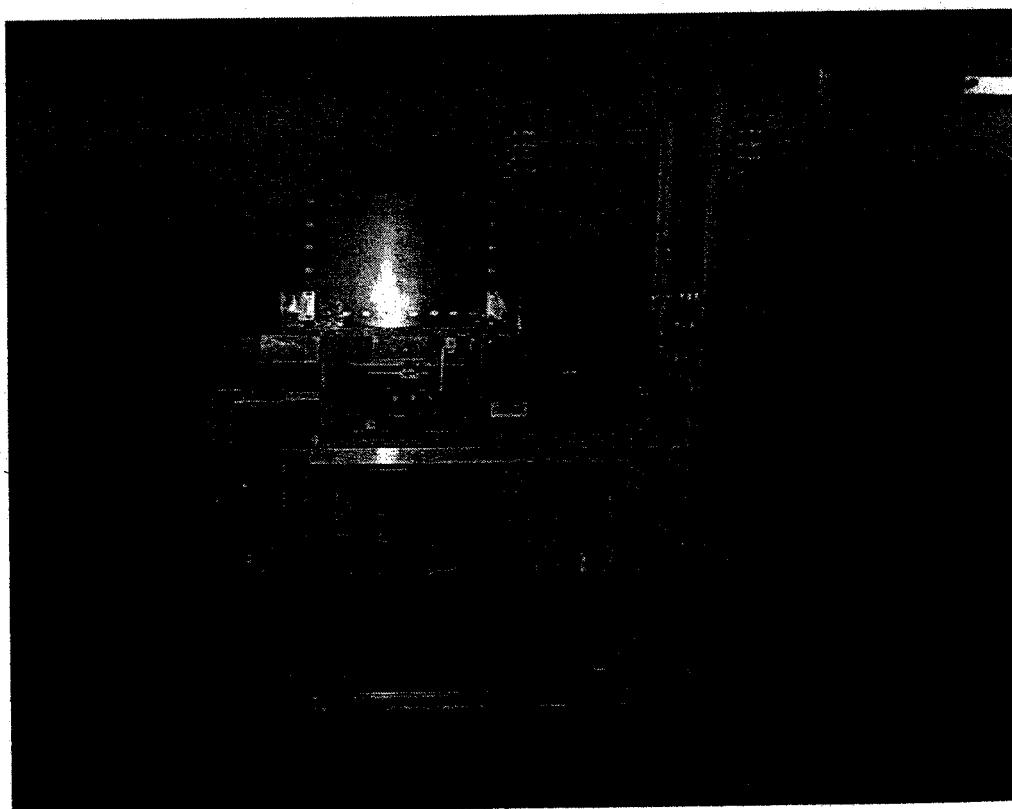


Figure A3.25 UR36 (1982 et 85)

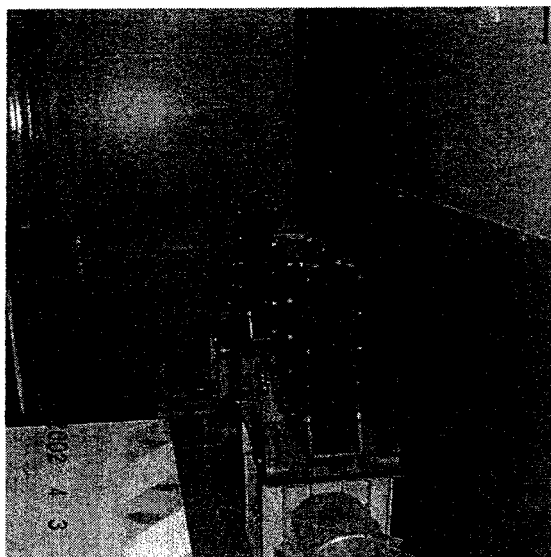


Figure A3.26 UR236 (1966)

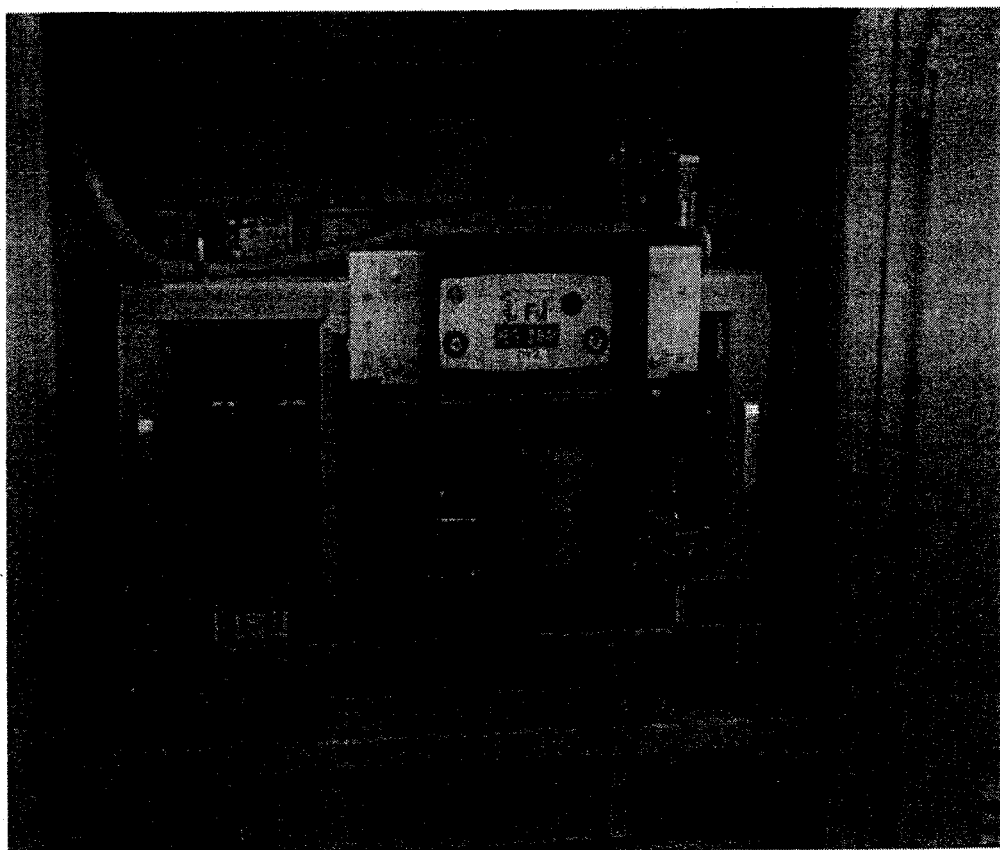
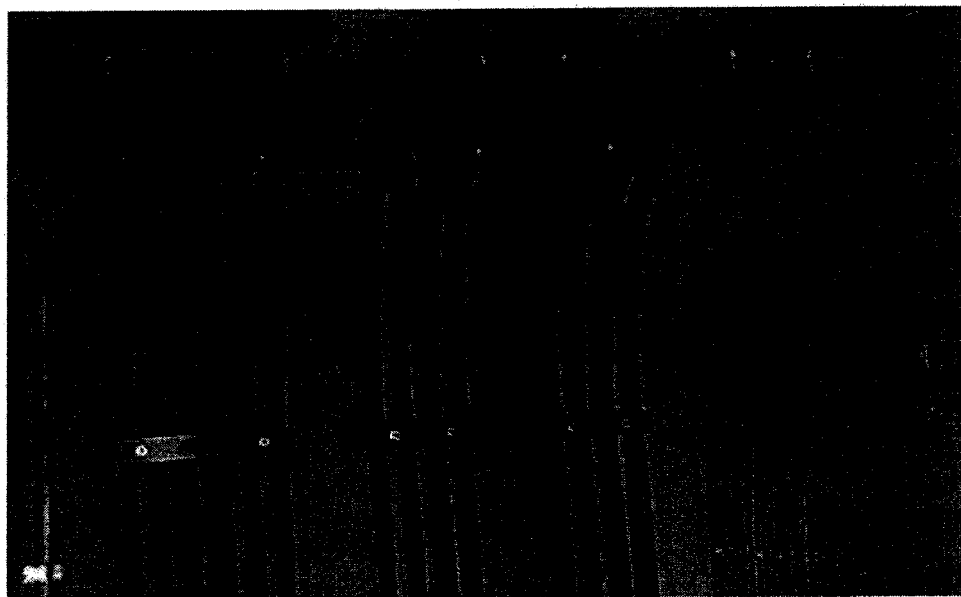


Figure A3.27 Un GBJ8 (1976)

LES CABLES TRACTION**Figure A3.28 Câbles 500 kmils**

LES CONTACTEURS

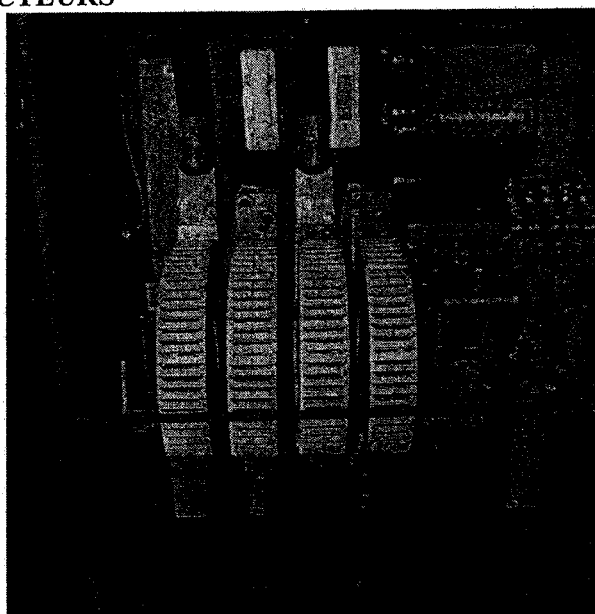


Figure A3.29 Le CCN (1976, 82 et 85)

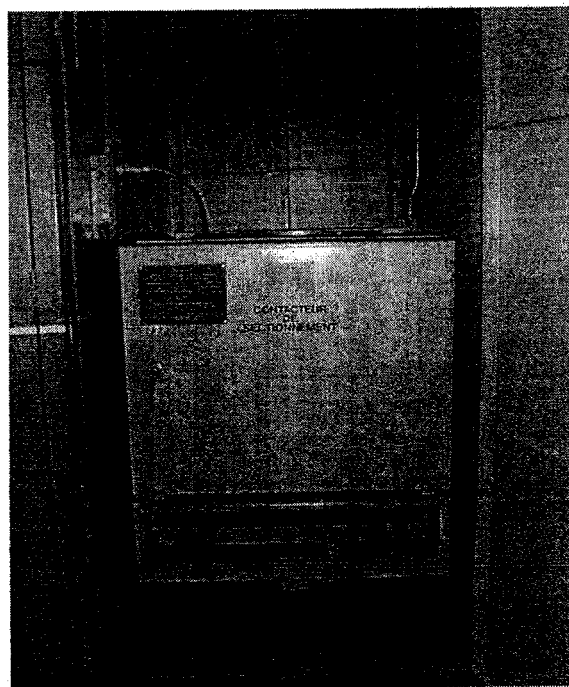


Figure A3.30 Le CS (1966)

LES PANNEAUX DE CONTROLE

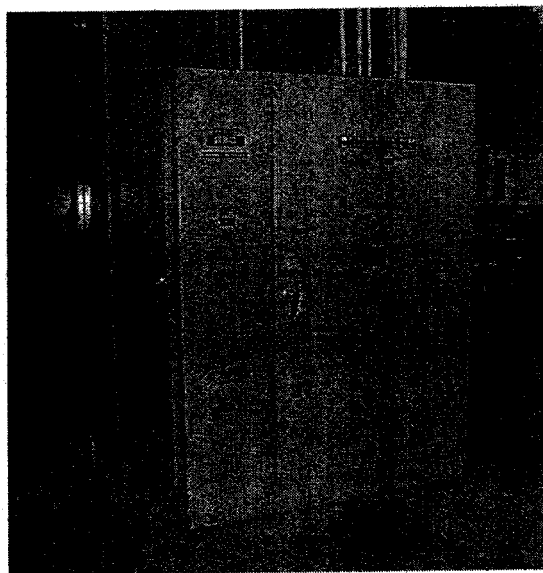


Figure A3.31 PSA (1976, 82 et 85)

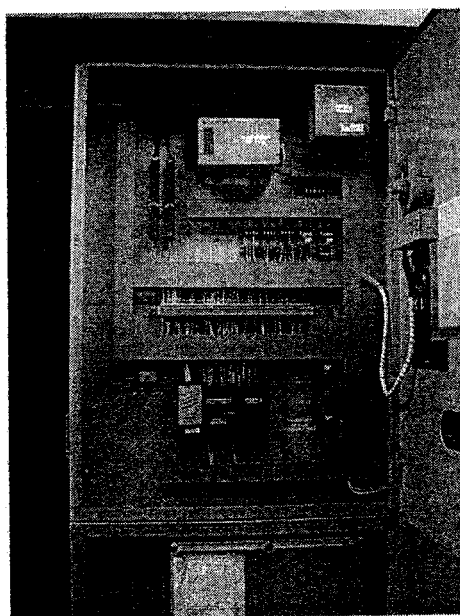


Figure A3.32 Le panneau de contrôle (1966)

LES EQUIPEMENTS DE PROTECTION

Les relais de protection

- Les relais 50/ 51 Phase et neutre (installés dans les postes de district)

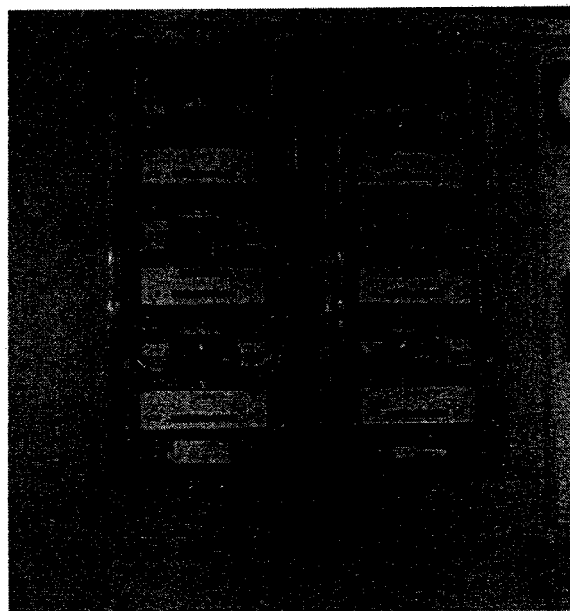


Figure A3.33 Relais 50/ 51 GDG54 (St-Michel et Snowdon)

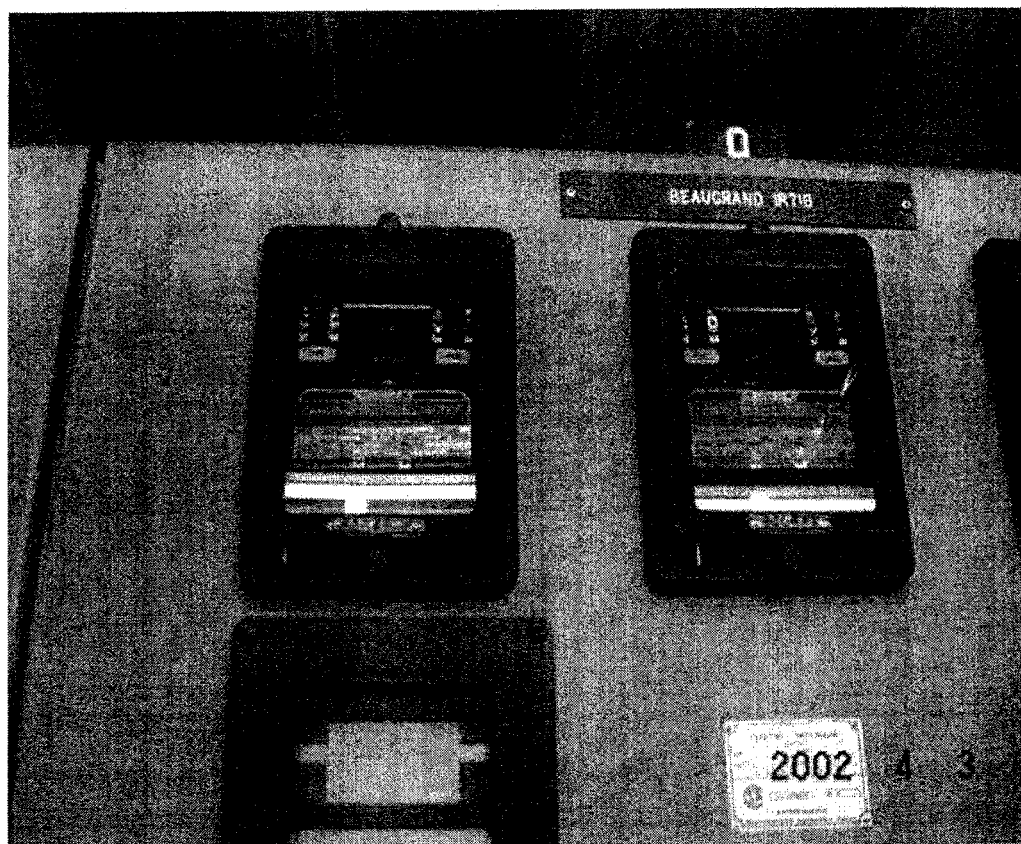


Figure A3.34 Relais 50/ 51 IAC (Dickson et Lionel Groulx)

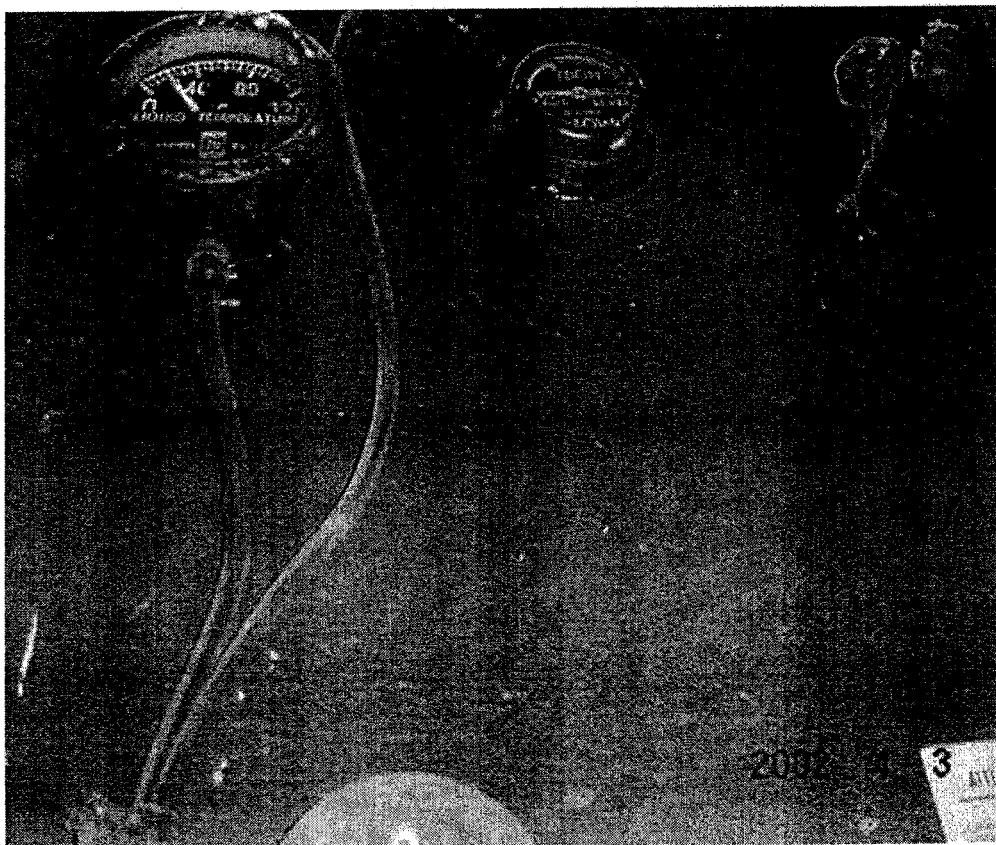
POUR LES TRANSFORMATEURS A L'HUILE

Figure A3.35 Indicateur de température d'huile (1976, 82 et 85)

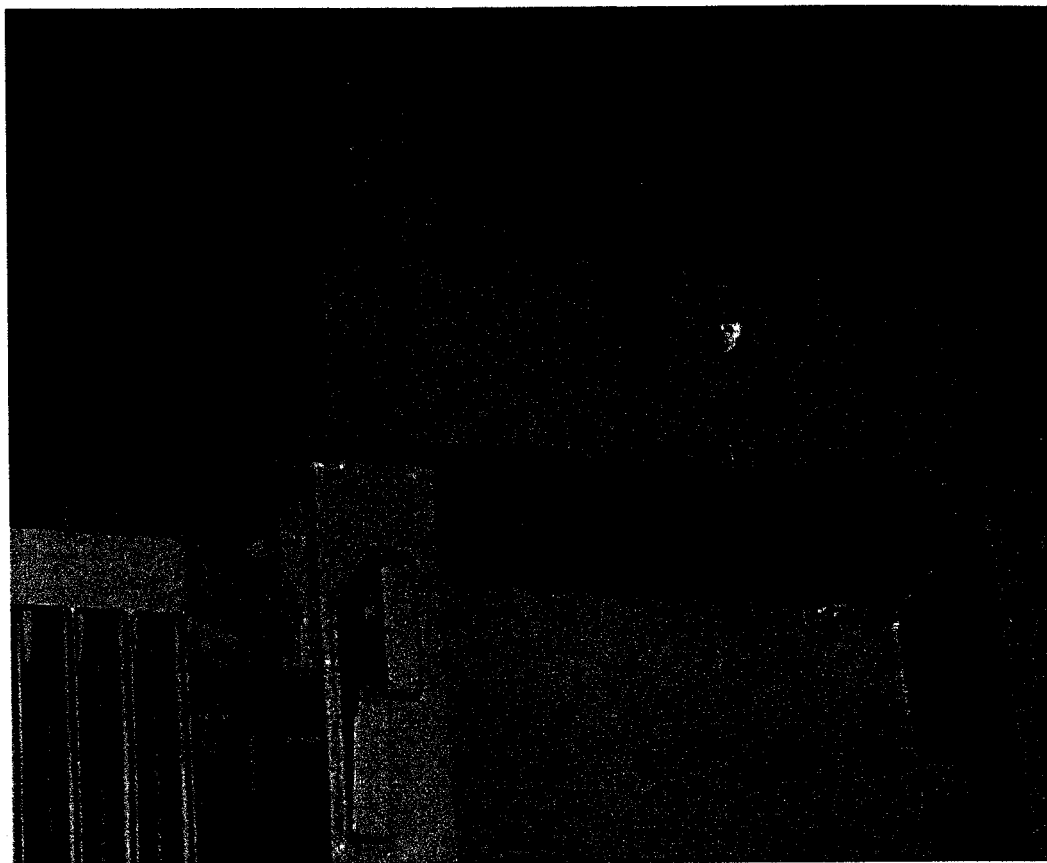


Figure A3.36 Relais pression soudaine (XFMR huile)

POUR LES TRANSFORMATEURS A SEC IMPREGNE DANS LE RESINE EPOXYDE

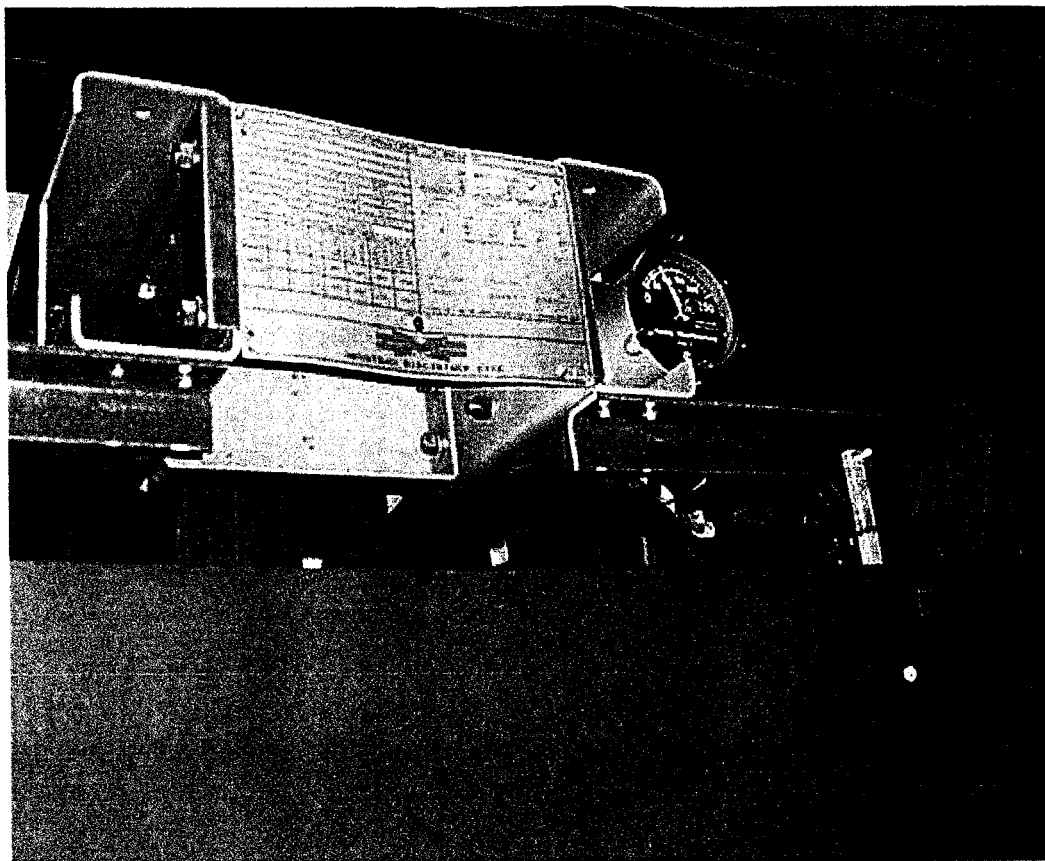


Figure A3.37 Indicateur de température (XFMR époxyde)

POUR LE REDRESSEUR

Figure A3.38 Fusible Ferraz 500 A (1976, 82 et 85)



Figure A3.39 Percuteur (1976, 82 et 85)

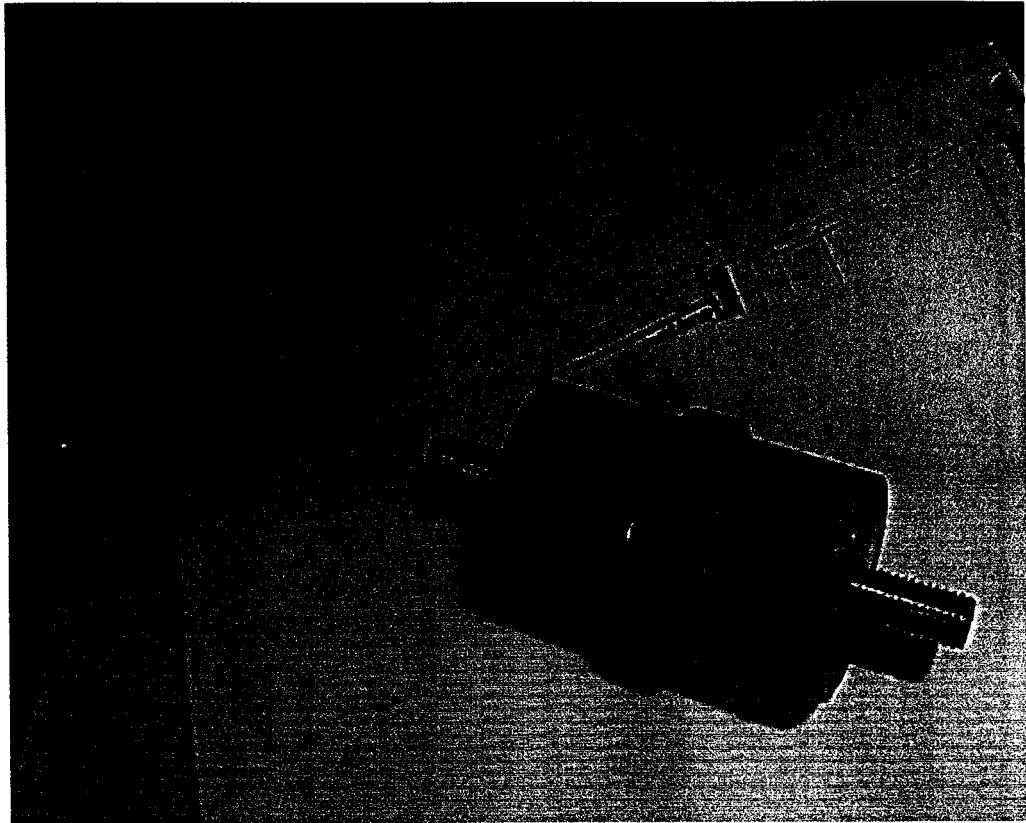


Figure A3.40 Fusible Ferraz 315 A (1966)



Figure A3.41 Relais de courant inverse (1976)

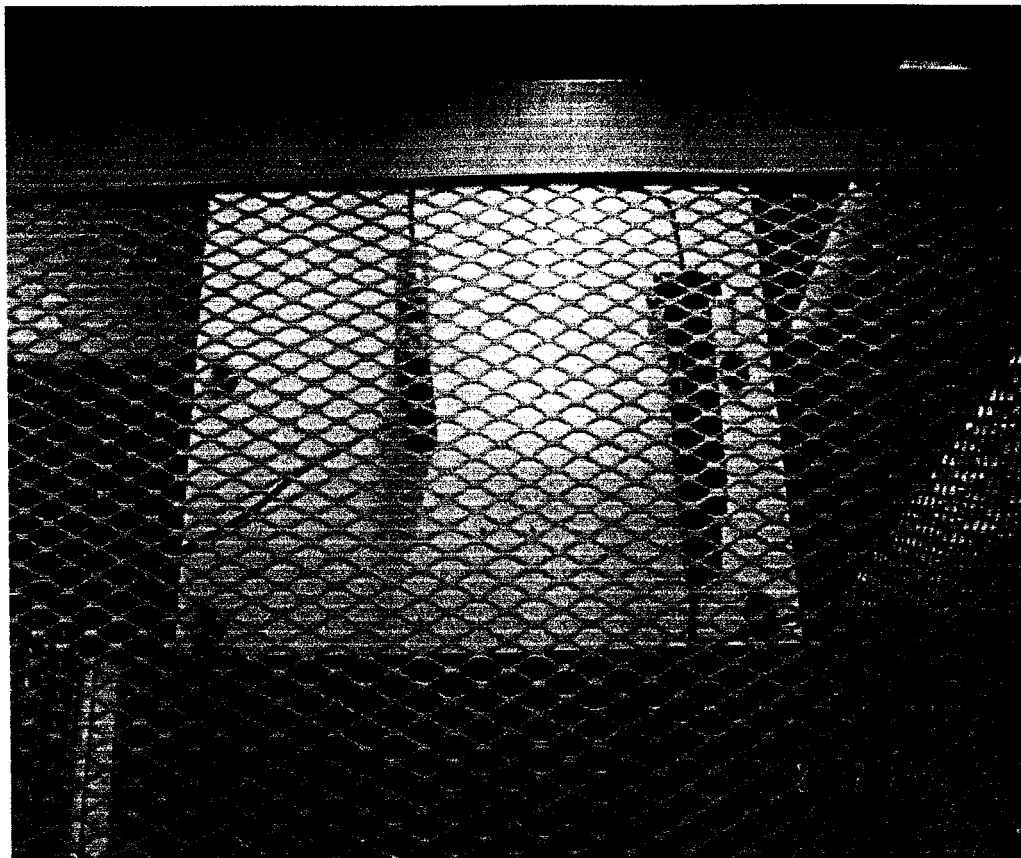


Figure A3.42 Varistance

LES RELAIS DE BASSE ET HAUTE IMPEDANCE

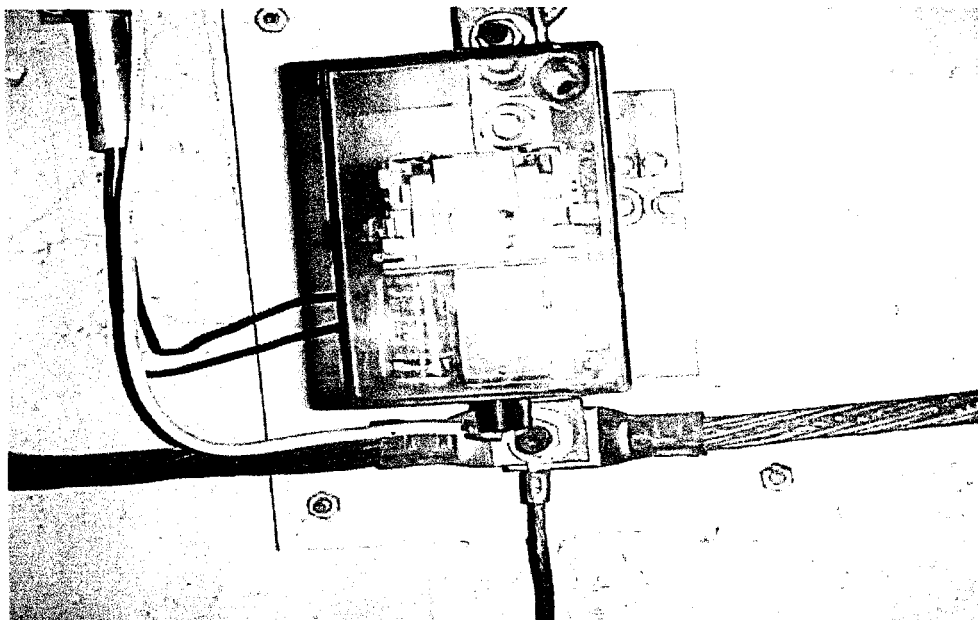


Figure A3.43 Relais basse impédance (BI) (1976, 82 et 85)

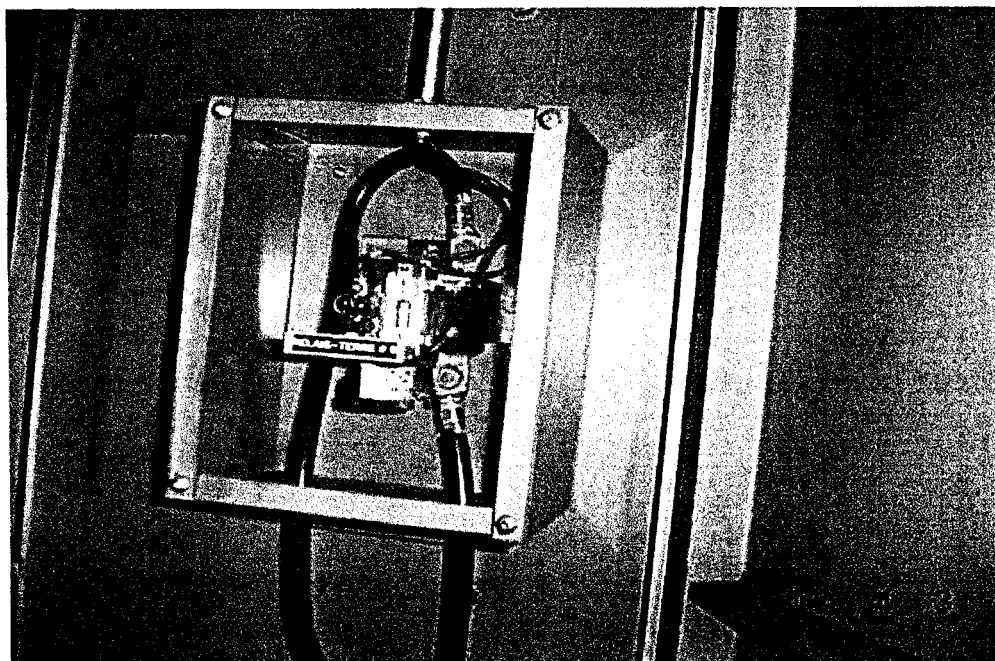


Figure A3.44 Relais basse impédance (BI) (1966)



Figure A3.45 Relais haute impédance (HI) (1982 et 85)

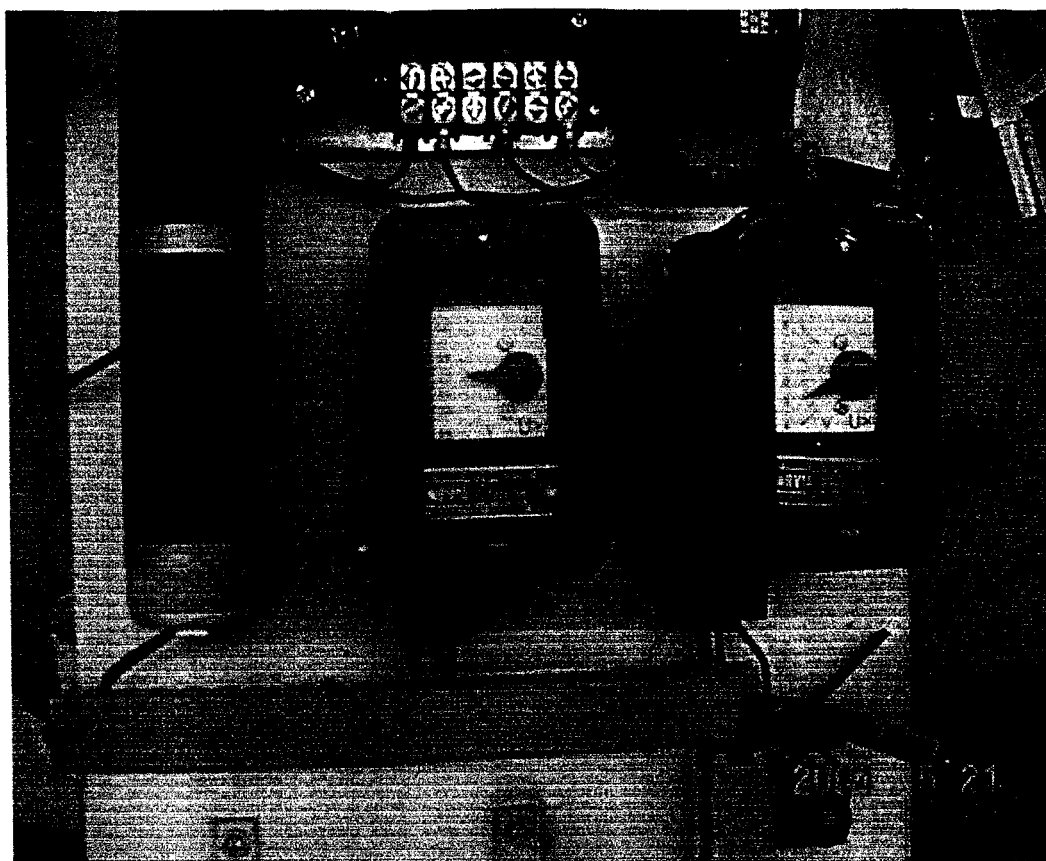


Figure A3.46 Relais haute impédance (HI) (1976)

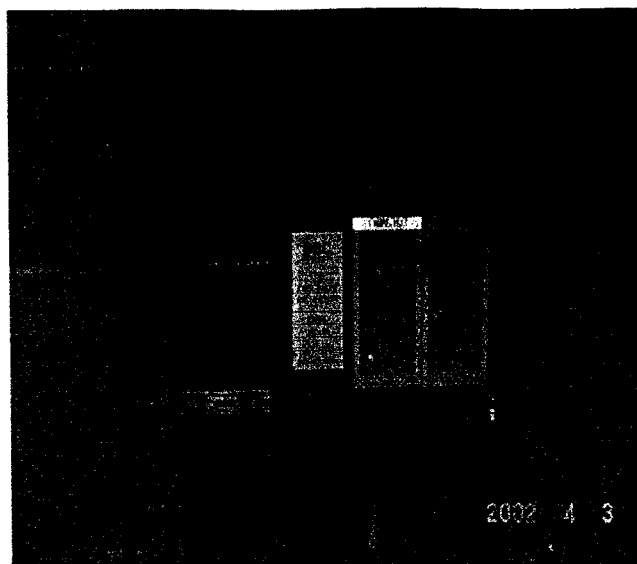
LES RELAIS DI/DT

Figure A3.47 Relais DDL ACA (1982, 85)

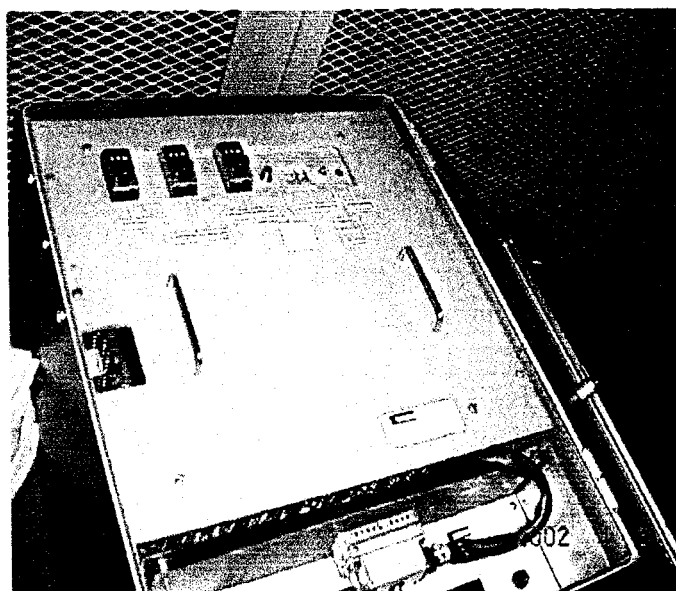
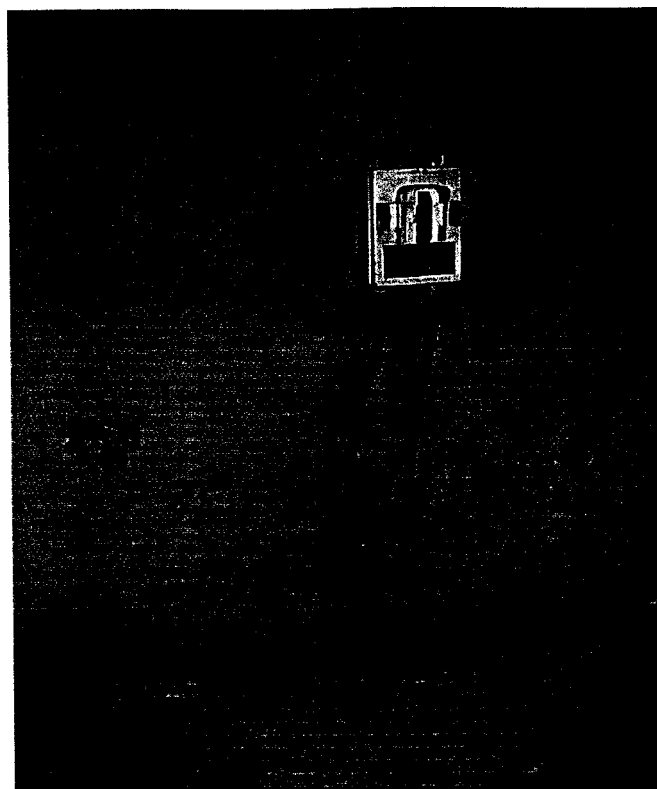


Figure A3.48 Relais PCC e67 (1976)



Figure A3.49 SEPCOS (2000)

LES EQUIPEMENTS REQUIS POUR UNE INTERVENTION**Figure A3.50 Rupteur**

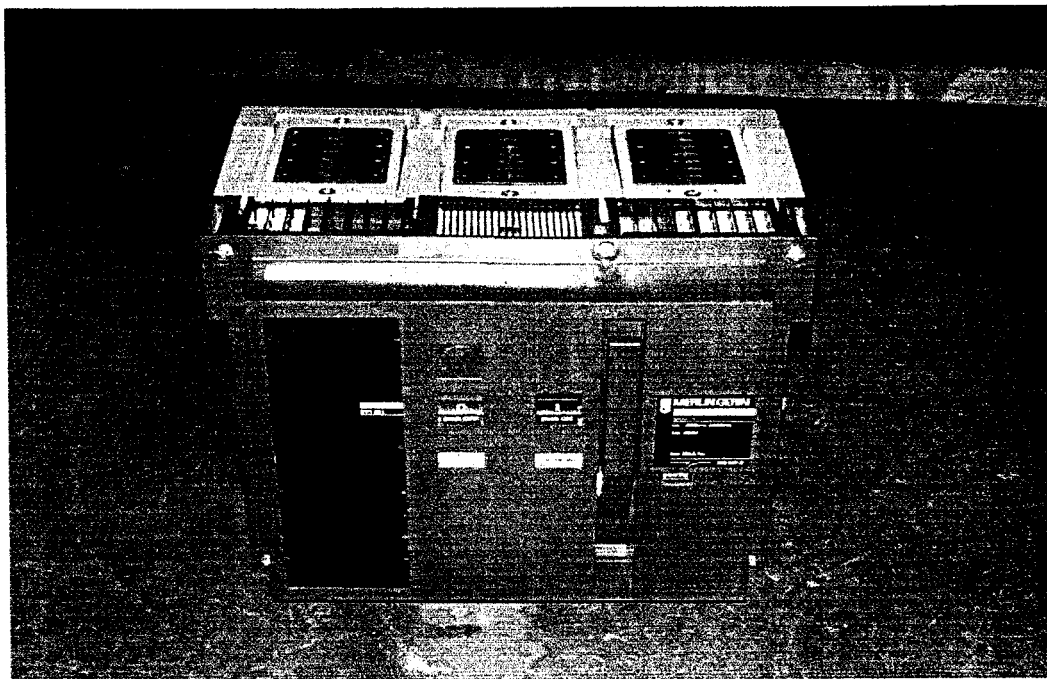


Figure A3.51 DMM

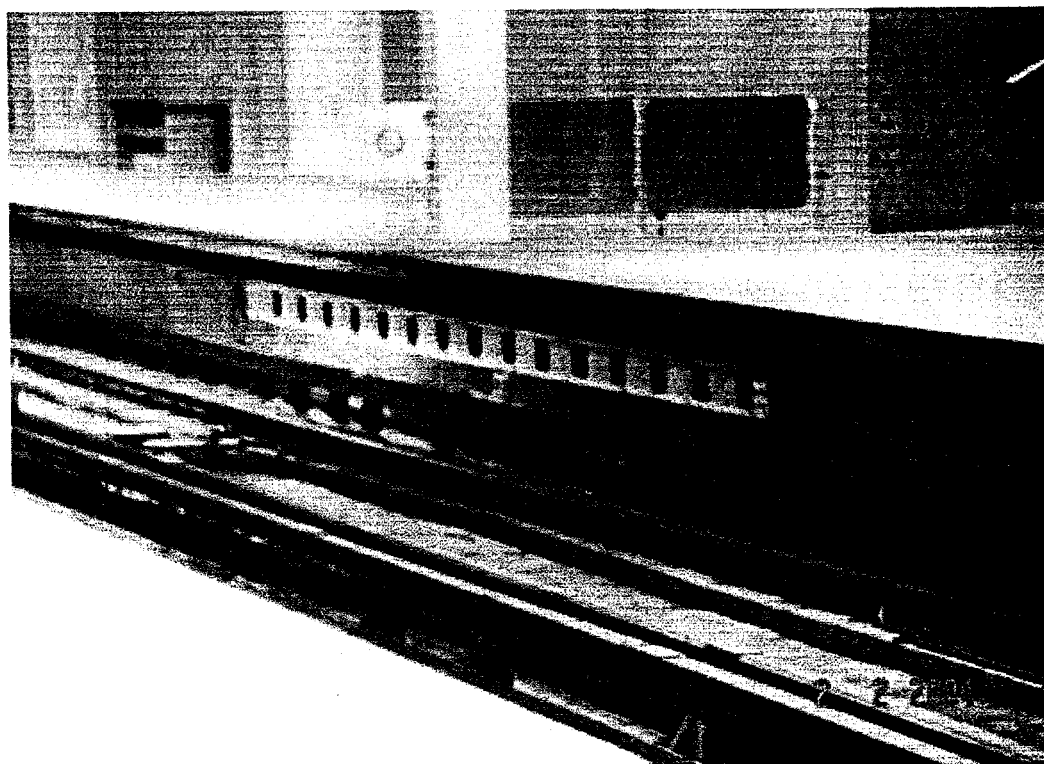


Figure A3.52 Coupon neutre

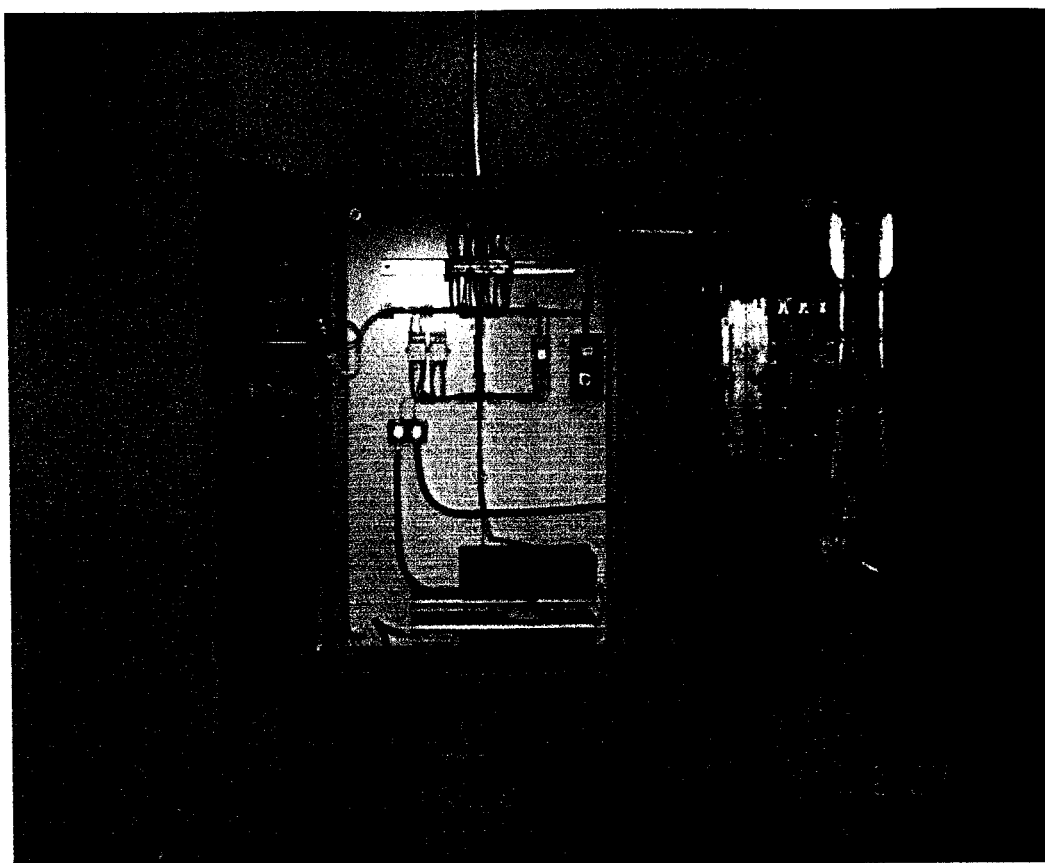


Figure A3.53 Limiteur de tension



Figure A3.54 Un train MR-73

ANNEXE 4, LES POSTES DE REDRESSEMENT LEUR PK ET LEUR TYPE

Tableau A4.1 Les postes de redressement sur la ligne 1

Numéro	Nom du poste	PK	zone	Type de PR
1R18	PR Angrignon	21 633,91	Z1	Fin de zone
1R19	PR Aragon	22 429,62	Z1	intermédiaire
1R21	PR Desmarchais	23 659,10	Z1	intermédiaire
1R25	PR Verdun	24 904,80	Z1	intermédiaire
1R27	PR Régina	25 794,68	Z1	intermédiaire
1R29	PR Ryde	26 350,22	Z1-2	Fin de zone
1R31	Duvernay	27 936,21	Z2	intermédiaire
1R32	PR Lionel Groulx	28 511,67	Z2	intermédiaire
1R33	PR Greene	29 764,34	Z2-3	Fin de zone
1R35	St-Mathieu	30 759,26	Z3	intermédiaire
1R39	Metcalfe	31 797,71	Z3-4	Fin de zone
1R43	Clark	32 936,95	Z4	en T (inter)
1R49	Plessis	34 393,48	Z4-5 - CS	en PI
1R51	Poupart	35 482,47	Z5	en T (inter)
1R53	Hogan	36 696,94	Z5	en T (inter)
1R56	Joliette	37 816,26	Z5-6	Fin de zone
1R59	Letourneux	39 039,79	Z6	intermédiaire
1R61	Boyce	40 043,80	Z6-7	Fin de zone
1R63	Dickson	40 883,35	Z7	intermédiaire
1R66	Langelier	42 120,08	Z7	intermédiaire
1R69	Versailles	43 297,50	Z7	intermédiaire
1R71B	Honoré Beaugrand	atelier	Z atelier	atelier

Tableau A4.2 Les postes de redressement sur la ligne 2

Numéro	Nom du poste	PK	zone	Type de PR
2R81	PR Ahuntsic	27 210,50	Z1	en PI
2R79	PR Sauriol	28 397,00	Z1	en T (inter)
2R77	PR Chabanel	29 364,00	Z1-2 (CS)	en PI
2R73	Faillon	31 682,50	Z2	en T (inter)
2R69	Bellechasse	33 543,50	Z2-3 (CS)	en PI
2R67	St-Grégoire	34 172,50	Z3	en T (inter)
2R63	Duluth	35 724,50	Z3	en T (inter)
2R59	Viger	37 666,50	Z3-4 (CS)	en PI
2R53	University	39 258,00	Z4	en T (inter)
2R49	Des Seigneurs	40 607,00	Z5	fin de zone
2R46	Lionel Groulx	41 696,00	Z5	intermédiaire
2R43	Richelieu	42 984,00	Z5-6	fin de zone
2R42	Vendôme	44 092,24	Z6	intermédiaire
2R38	Villa Maria	45 502,67	Z6	intermédiaire
2R37	Snowdon	46 513,09	Z6	intermédiaire
2R34	Côte Ste Catherine	47 470,77	Z6-7	fin de zone
2R31	Plamondon	48 203,20	Z7	intermédiaire
2R29	Namur	49 362,96	Z7-8	fin de zone
2R28	De la Savanne	50 216,70	Z8	intermédiaire
2R23	Du Collège	51 492,00	Z8	intermédiaire
2R22	Côte Vertu	52 507,89	Z8	intermédiaire

Tableau A4.3 Les postes de redressement sur la ligne 4

Numéro	Nom du poste	pk	zone	Type de PR
4R51	PR Bonsecours	31 085,00	Z1	En PI
4R53-A	PR Ile Notre Dame (CS)	33 390,50	Z1-2 (CS)	Fin de zone
4R53-B	PR Longueuil	34 038,00	Z2	En PI

Tableau A4.4 Les postes de redressement sur la ligne 5

Numéro	Ligne 5, bleu	PK	zone	Type de PR
5R31	Snowdon	29 092,60	Z2	fin de zone
5R35	Decelles	30 744,30	Z2	intermédiaire
5R38	Édouard Montpetit	32 090,00	Z2-3	fin de zone
5R40	Outremont	33 370,00	Z3	intermédiaire
5R44	Parc	35 110,00	Z4	fin de zone
5R48	Jean Talon	36 284,00	Z4	intermédiaire
5R54	D'Iberville	38 096,00	Z4-5	fin de zone
5R56	St-Michel	39 235,00	Z5	intermédiaire

Fin du document

