

**Compatibilité de véhicules ferroviaires avec les installations
fixes du réseau ferré luxembourgeois**

**Interaction entre les véhicules ferroviaires et les installations
fixes du réseau ferré luxembourgeois**

Document référence
IF.PE.STC-VF.02

<p>Vérifié :</p> <p>Luxembourg, le 13.11.2008</p> <p align="center">Le Chef du Pôle Equipements,</p> <p align="center">(s) A. FELTZ Dipl.-Ing.</p>	<p>Vu et approuvé :</p> <p>Luxembourg, le 13.11.2008</p> <p align="center">Le Chargé de Gestion du Ressort Installations Fixes,</p> <p align="center">(s) H. WERDEL Ingénieur Civil</p>
<p>Date de mise en vigueur : dès parution.</p>	

Suivi des modifications

Edition No.	Motivation de la modification : (description, page(s) concernée(s))	Rédaction: Date, Nom	Vérification: Date, Nom	Approbation: Date, Nom
04	Chapitre 2.1.1.2 (page 10) : Adjonction des CE du type « Zp30H » (première mise en service sur le RFL le 09.11.2009)	24.11.2009 T. JUNG (IF/CSE9)	11.12.2009 A. FELTZ (IF/PE)	15.12.2009 H. WERDEL (IF)
03	Chapitres 2.3.3 (page 14) et 2.4.2 (page 15) : Explication concernant le dispositif automatique d'adaptation de la puissance absorbée.	29.06.2009 T. JUNG (IF/CSE9)	30.06.2009 A. FELTZ (IF/PE)	01.07.2009 H. WERDEL (IF)
02	Chapitre 0.3 (page 3) : Mise à jour.	05.06.2009 T. JUNG (IF/CSE9)	15.06.2009 A. FELTZ (IF/PE)	19.06.2009 H. WERDEL (IF)
01	Chapitre 0.3 (page 3) : Mise à jour. Chapitre 2.3 (page 14) : Adjonction du chapitre 2.3.3 relatif au paramètre A14. Chapitre 2.4 (page 15) : Adjonction du chapitre 2.4.2 relatif au paramètre C9.	14.04.2009 T. JUNG (IF/CSE9)	26.05.2009 A. FELTZ (IF/PE)	29.05.2009 H. WERDEL (IF)
00	Première édition	11.11.2008 T. JUNG (IF/CSE9)	Voir ci-dessus	Voir ci-dessus



Structure :

0	Préambule	3
1	Abréviations, symboles et définitions	5
2	Interactions de véhicules ferroviaires avec les installations fixes du réseau ferré luxembourgeois	6

0 Préambule

0.1 Objet

Tout véhicule ferroviaire, dont la circulation sur les lignes du RFL (réseau ferré luxembourgeois) non électrifiées ou bien alimentées en 25 kV 50 Hz monophasé et/ou 3 kV CC est souhaitée, doit répondre aux spécifications techniques de compatibilité.

Le présent document expose les interactions possibles et connues entre les véhicules et les installations fixes de contrôle-commande, de signalisation, de télécommunications et de traction électrique du RFL et lesquelles ont conduit à la définition des paramètres exposés aux livres I à V du document référence IF.PE.STC-VF.01 [1] pour évaluer la compatibilité des véhicules avec les installations précitées.

Le présent document a un caractère strictement informatif.

0.2 Domaine d'application

0.2.1 Installations fixes du réseau ferré luxembourgeois

Se référer document référence IF.PE.STC-VF.01 [1].

0.2.2 Véhicules

Se référer document référence IF.PE.STC-VF.01 [1].

0.2.3 Lignes du réseau ferré luxembourgeois

Se référer document référence IF.PE.STC-VF.01 [1].

0.3 Documents de référence

- [1] Compatibilité de véhicules ferroviaires avec les installations fixes du réseau ferré luxembourgeois
Spécifications techniques de compatibilité
Document référence IF.PE.STC-VF.01
Edition 02

0.4 Table des matières

0	Préambule	3
0.1	Objet	3
0.2	Domaine d'application	3
0.2.1	Installations fixes du réseau ferré luxembourgeois	3
0.2.2	Véhicules	3
0.2.3	Lignes du réseau ferré luxembourgeois	3
0.3	Documents de référence	3
0.4	Table des matières	3
1	Abréviations, symboles et définitions	5
2	Interactions de véhicules ferroviaires avec les installations fixes du réseau ferré luxembourgeois	6
2.1	Les installations de contrôle-commande et de signalisation	6
2.1.1	Les installations de détection de la non-occupation de la voie	6
2.1.2	Les installations d'annonce et de libération des passages à niveau	10

2.1.3	Les pédales.....	11
2.1.4	Contact fixe monté dans la voie - Crocodile	11
2.2	La transmission par circuits galvaniques	11
2.3	Les installations fixes de traction électrique des lignes alimentées en 25 kV 50 Hz monophasé	12
2.3.1	Relais de protection des alimentations	12
2.3.2	Harmoniques.....	13
2.3.3	Courant maximal du train.....	14
2.4	Les installations fixes de traction électrique de la ligne alimentée en 3 kV CC	14
2.4.1	Phénomènes de résonance.....	14
2.4.2	Courant maximal du train.....	15

1 Abréviations, symboles et définitions

Abréviation / Symbole / Définition	Description
BIV	Boucle d'induction de voie
CC	Courant continu
CdV	Circuit de voie
CE	Compteur d'essieux
Crocodile	Contact fixe dans la voie afférent au dispositif MEMOR II+
EM	Electromagnétique
FP	Facteur de puissance
HT	Haute tension
Hz	Hertz
IFTE	Installations fixes de traction électrique
IPSO	Courant psophométrique
ITE	Impulsion de tension élevée, CdV à ITE
kHz	Kilohertz, 10^3 Hz
kV	Kilovolt, 10^3 V
MEMOR II+	Système d'aide à la conduite opérationnel sur le RFL
PAT	Poste à autotransformateurs
PSI	Poste de sécurité informatisé
PN	Passage à niveau
RFL	Réseau ferré luxembourgeois
TFP	Transformateur principal
THD	Distorsion harmonique totale
THDI	THD de l'onde du courant de ligne
V	Volt
Zp	« <i>Zählpunkt</i> », point de comptage afférent à une installation de comptage d'essieux

2 Interactions de véhicules ferroviaires avec les installations fixes du réseau ferré luxembourgeois

2.1 Les installations de contrôle-commande et de signalisation

Il s'agit de manière générale de systèmes de détection de trains au sol, à savoir :

- les installations de détection de la non occupation de la voie ;
- les installations d'annonce et de libération des PN ;
- les pédales ;

ainsi que les système d'aide à la conduite « Crocodile » et « MEMOR II+ », à savoir :

- les contacts fixes montés dans la voie (crocodile).

Pour que les systèmes de signalisation puissent fonctionner correctement, leurs caractéristiques physiques doivent être vérifiées par rapport à celles du véhicule.

2.1.1 Les installations de détection de la non-occupation de la voie

Deux types de systèmes de détection de la non-occupation de la voie sont opérationnels sur le RFL :

- les CdV ;
- les CE.

2.1.1.1 Les circuits de voie

Les CdV permettent de détecter automatiquement et d'une façon continue l'absence de véhicules en tous les points d'une section de voie déterminée.

Le CdV est un circuit électrique dont la ligne de transport d'énergie entre le générateur et le récepteur est constituée par les deux files de rails de roulement. Ces deux files sont isolées l'une par rapport à l'autre. Lorsqu'une circulation se trouve sur le CdV, les essieux établissent une liaison électrique de faible impédance (shunt) entre les rails ; l'alimentation alors insuffisante du récepteur entraîne sa désexcitation. Cette information est acheminée au moyen d'une transmission galvanique au poste de signalisation.

- *Le shuntage du récepteur de la voie*

Paramètres : G2, G3, G4 et G11 [1].

La détection d'un train repose essentiellement sur le shuntage électrique des CdV. En conséquence, l'impédance du shunt présentée par le véhicule ne doit pas dépassé une valeur limite pour que la fiabilité du shuntage dans toutes les conditions de service soit garantie.

L'expérience montre que le sable éjecté par les installations de sablage installées sur les engins moteurs peut provoquer un mauvais contact rail-roue par altération de la propreté de la surface :

- de roulement de la roue ;
- du champignon des rails ;

inhibant ainsi le shuntage du récepteur du CdV par les essieux de l'engin moteur par accroissement de la résistance de contact rail-roue.

Le débit des sablières installées sur les engins moteurs doit être tel que le shuntage électrique des CdV ne soit pas compromis.

D'autres paramètres afférents au véhicule doivent être pris en considération pour garantir un bon contact galvanique entre les roues de roulement et le rail :

- La géométrie des roues.
- La masse du véhicule.

▪ *Enjambement d'une section de voie*

Paramètre : G6 [1].

La distance entre des essieux contigus d'un même véhicule ne doit pas dépasser une valeur maximale pour éviter un enjambement de la section de voie contrôlée par le CdV et le trou de détection subséquent.

▪ *Le gabarit de libre passage des appareils de voie*

Paramètre : G7 [1].

La distance entre l'essieu extrême et le front des tampons d'un même véhicule ne doit pas dépasser une valeur maximale pour éviter l'engagement du gabarit de libre passage lors du stationnement de véhicules sur une voie raccordée au talon d'un appareil de voie.

▪ *Les courants d'interférences*

Paramètres : A1, A4, A5, C1, C2, C3, C4, V1, V2, D1, D2 et D3 [1].

Les CdV sont affectés par les courants d'interférences suivants :

- Les courants consommés par le véhicule sous l'effet d'harmoniques contenus dans la tension d'alimentation des IFTE avec le véhicule considéré comme une impédance passive.

En ce qui concerne la ligne alimentée en 3 kV CC, une composante à 50 Hz est présente à la tension caténaire. Cette composante résulte :

- de couplages inductif et galvanique entre les caténaires, circuit de retour et systèmes d'alimentation 25 kV 50 Hz monophasé et 3 kV CC en gare de Luxembourg ;
- d'un déséquilibre du réseau primaire HT d'alimentation via le transformateur-redresseur de la sous-station de Hollerich.

L'impédance passive du véhicule convertit cette tension à 50 Hz en un courant de même fréquence lequel peut alors avoir un impact néfaste sur le bon fonctionnement des CdV à 50 Hz.

- Les courants alternatifs générés par le véhicule au niveau des convertisseurs de l'équipement de traction, notamment des onduleurs pilotant les moteurs alternatifs (asynchrones ou synchrones), au niveau des convertisseurs d'auxiliaires embarqués ainsi qu'au niveau des convertisseurs constituant la charge à bord du matériel remorqué et dont le circuit électrique est réalisé au moyen d'une ligne de train alimentée en énergie électrique à partir d'un engin moteur à traction électrique ou autonome.

Il y a lieu de distinguer les CdV monorails et birails.

- Les CdV monorails :

Les courants injectés dans les rails impliquent une chute de tension sur la longueur du rail de retour de traction incluse dans le CdV et laquelle apparaît aux bornes du récepteur du CdV. Lorsque le courant de retour présente des composantes égales à ou proches de la fréquence de fonctionnement du CdV, celui-ci pourra continuer à présenter l'indication « voie libre » alors qu'il est occupé par le train.

Par ailleurs, des signaux perturbateurs dont les fréquences diffèrent de la fréquence de fonctionnement du CdV et dont les amplitudes sont suffisantes peuvent par superposition au signal utile du CdV provoquer le dérangement de ce dernier.

- Les CdV birails :

En fonctionnement normal, le courant de retour de traction est à peu près le même dans chaque rail et il n'y a qu'une très petite tension qui se retrouve aux bornes du récepteur du CdV. Cependant, dans le cas d'un rail cassé ou d'une connexion inductive coupée, le courant de retour sera complètement déséquilibré et il apparaîtra une tension transversale. Une telle cassure entraîne normalement la présentation de l'indication « voie occupée » par le CdV (défaut « auto-détecté »). Cependant, il est possible que le récepteur soit faussement excité dans le cas où le courant de retour présente des composantes égales à ou proches de la fréquence de fonctionnement du CdV. Ce dernier pourra alors continuer à présenter l'indication « voie libre » alors qu'il est occupé par le train.

Aussi bien en fonctionnement normal que dans le cas d'un déséquilibre du circuit retour du courant de traction, des signaux perturbateurs dont les fréquences diffèrent de la fréquence de fonctionnement du CdV et dont les amplitudes sont suffisantes peuvent provoquer la saturation de la connexion inductive et conséquemment le dérangement du CdV.

Les fréquences de fonctionnement des différents types de CdV opérationnels sur les lignes du RFL sont les suivantes :

- Les CdV monorails à 83,3 Hz opérationnels sur les lignes alimentées en 25 kV 50 Hz monophasé et 3 kV CC.
- Les CdV mono- et birails à 125 Hz opérationnels sur les lignes alimentées en 25 kV 50 Hz monophasé.
- Les CdV mono- et birails à 50 Hz opérationnels sur la ligne alimentée en 3 kV CC.
- Les CdV mono- et birails à impulsion de tension élevée (impulsions dissymétriques à la cadence de 3 Hz) réputés comme étant insensibles au courant de traction vue leur principe de fonctionnement. Ces CdV sont opérationnels sur les lignes alimentées en 25 kV 50 Hz monophasé (CdV à ITE mono- et birails) et 3 kV CC (CdV à ITE birails).

2.1.1.2 Les compteurs d'essieux

Les CE permettent de détecter automatiquement et d'une façon discontinue l'absence de véhicules sur une section de voie déterminée.

Un CE associé à une section de voie comprend deux points de comptage. Le premier point de comptage compte le nombre d'essieux entrant dans le tronçon de ligne, le second point de comptage compte le nombre d'essieux quittant cette même section de voie. Lorsque le nombre d'essieux entrant équivaut au nombre d'essieux sortant, la non occupation du tronçon de ligne a pu être déterminée.

Un point de comptage est composé chaque fois de deux couples de capteurs électromagnétiques. Un couple de capteurs est constitué par un émetteur et par un récepteur. Ce dédoublement permet la détermination du sens de circulation d'un véhicule.

Les signaux des capteurs sont traités dans un boîtier électronique près de la voie et dont l'information subséquente est acheminée au moyen d'une transmission galvanique au poste de signalisation.

Les détecteurs de roues sont isolés galvaniquement par rapport aux courants circulant dans les rails.

Le principe de fonctionnement des équipements en campagne repose essentiellement sur la déviation du champ EM ou bien la variation de la réluctance du circuit magnétique des détecteurs en présence d'une roue et qui influe alors sur la tension induite aux récepteurs. De cette variation de la tension induite résultent des impulsions de tension lesquelles permettent le comptage des essieux.

- *La détection des roues*

Paramètres : G1 et G2 [1].

Vue le principe de fonctionnement des équipements en campagne, les paramètres afférents au véhicule qui doivent être pris en considération sont :

- Le matériau constituant la roue.
- La géométrie de la roue.

- *Le comptage des essieux*

Paramètres : G5 [1].

Pour que l'unité d'évaluation puisse générer et par la suite évaluer les impulsions de comptage, les paramètres afférents au véhicule qui doivent être pris en considération sont :

- La distance minimale entre essieux contigus.
- La vitesse maximale du véhicule.

- *Enjambement d'une section de voie*

Paramètre : G6 [1].

La distance entre des essieux contigus d'un même véhicule ne doit pas dépasser une valeur maximale pour éviter un enjambement de la section de voie contrôlée par l'installation de comptage d'essieux et le trou de détection subséquent.

- *Le gabarit de libre passage des appareils de voie*

Paramètre : G7 [1].

La distance entre essieu extrême et le front des tampons d'un même véhicule ne doit pas dépasser une valeur maximale pour éviter l'engagement du gabarit de libre passage lors du stationnement de véhicules sur une voie raccordée au talon d'un appareil de voie.

- *Les sources d'interférences mécaniques*

Paramètre : G8 [1].

Des parties mécaniques installées à proximité immédiate du rail peuvent par déviation du champ EM ou par variation de la réluctance du circuit magnétique des détecteurs de roues influencer sur la tension induite aux récepteurs et conséquemment altérer la fiabilité de la détection de la non occupation de la voie.

- *Les sources d'interférences EM*

Paramètres : A11, C8, V4 et D6 [1].

Les CE peuvent être perturbés par des interférences EM au niveau des détecteurs de roue.

Les principales sources d'interférences EM sont les suivantes :

- Les TFP et les convertisseurs statiques associés à leur lignes de transmission, surtout lorsqu'ils sont situés près du rail.
- Les freins magnétiques et les freins à courant de Foucault qui sont montés sur le véhicule directement au-dessus des rails. Les niveaux d'interférences dépendent notamment des modes d'excitation des freins.
- Les antennes de transmission montées sur le véhicule, surtout lorsque celles-ci sont montées à proximité du rail.

Ces sources de pollution EM risquent non seulement de perturber les CE lorsque la fréquence du signal perturbateur est égale à ou proche de la fréquence de fonctionnement du détecteur de roues, mais suite à des phénomènes de saturation au niveau des circuits magnétiques des détecteurs munis de noyau en ferrite, des perturbations de ces CE peuvent se manifester à des fréquences qui diffèrent des fréquences de fonctionnement des susdits capteurs.

En fonction des caractéristiques constructives des détecteurs de roues et notamment de leur fréquence de fonctionnement, il y a lieu de distinguer les installations de comptage suivantes :

- Les CE de type « Zp30 » et dont les émetteurs sont munis d'un noyau en ferrite (fréquences de fonctionnement : de 27,40 kHz à 31,25 kHz) opérationnels sur les lignes alimentées en 25 kV 50 Hz monophasé et 3 kV CC.
- Les CE de type « Zp30C-NT » (fréquences de fonctionnement : de 27,40 kHz à 31,30 kHz) opérationnels sur les lignes alimentées en 25 kV 50 Hz monophasé.
- Les CE de type « Zp30H » (fréquences de fonctionnement : de 26,80 kHz à 31,30 kHz) opérationnels sur les lignes alimentées en 25 kV 50 Hz monophasé.
- Les CE de type « Zp43E » (fréquence de fonctionnement = 43,00 kHz) opérationnels sur les lignes alimentées en 25 kV 50 Hz monophasé.

2.1.2 Les installations d'annonce et de libération des passages à niveau

Il s'agit de boucles d'induction montées dans la voie. Leurs fréquences de fonctionnement se situent entre 45 kHz et 110 kHz.

Ces BIV génèrent un champ EM lequel entre en interaction avec tout véhicule lorsque celui-ci passe par-dessus les boucles en question.

Lors du passage d'un véhicule par-dessus les BIV, il faut essentiellement distinguer deux types d'interaction :

- Les essieux du véhicule associés aux rails de roulement forment des boucles de shuntage magnétiques. Les flux magnétiques émanant des BIV induisent dans ces boucles de shuntage des courants électriques de mêmes fréquences. Ces courants génèrent à leur tour des flux magnétiques antagonistes aux flux incidents.
- Les champs EM générés par les BIV induisent dans la coque du véhicule des courants de Foucault lesquels ont pour conséquence des pertes par effet Joule. Ces pertes dépendent notamment de la nature, de l'épaisseur ainsi que du volume du matériau constituant la coque.

Les effets cumulatifs des interactions précitées permettent la détection de la présence du véhicule.

▪ *La constitution du véhicule*

Paramètre : G4 et G9 [1].

Vu le principe de fonctionnement des BIV, les matériaux constituant les bogies, les essieux, les roues et la coque ainsi que la proximité de la coque par rapport à la superstructure de la voie jouent un rôle essentiel quant à la fiabilité de la détection du véhicule.

- *Le courant de traction*

Paramètres : A9 et C6 [1].

Le courant de retour dans les rails (alternatif ou continu) peut interférer indirectement avec les capteurs inductifs par ses effets sur la perméabilité magnétique du rail.

- *Les sources d'interférences EM*

Paramètres : A10, C7, V3 et D5 [1].

Des champs EM perturbateurs peuvent influencer sur le champ EM généré par les BIV ou bien sur la perméabilité magnétique du rail (par exemple freins magnétiques, freins à courant de Foucault, radars, TFP, lignes de courant retour en dessous de la coque, autre) et conséquemment altérer la fiabilité de la détection des véhicules.

2.1.3 Les pédales

Paramètre : G2 [1].

Il s'agit de capteurs de présence mécaniques-hydrauliques montés latéralement sur le rail dans la voie. Le paramètre afférent au véhicule qui doit être pris en considération pour la compatibilité physique avec les pédales associées au dispositif MEMOR II+ est la hauteur du boudin de la roue dont une valeur minimale est essentielle pour garantir l'activation de la pédale.

2.1.4 Contact fixe monté dans la voie - Crocodile

Paramètre : G10 [1].

Il ne faut pas qu'il y ait des parties inférieures du véhicule engageant le gabarit des contacts fixes montés dans la voie, à savoir les crocodiles.

2.2 La transmission par circuits galvaniques

Paramètres : A6, C5, V2 et D4 [1].

Le paramètre permettant de caractériser le véhicule vis-à-vis des perturbations qu'il émet sur les circuits galvaniques téléphoniques longeant les voies ferroviaires est le courant psophométrique. Il s'agit de la somme quadratique des composantes harmoniques du courant caténaire affectées de coefficients de pondération traduisant leur influence sur l'oreille humaine.

C'est dans la bande de fréquence de 800 à 1200 Hz que les coefficients de pondération pour la détermination du IPSO sont les plus importants parce que la voie humaine possède dans cette bande fréquentielle le plus grand niveau de puissance.

De manière générale, un engin de traction électrique se comporte comme un injecteur de courant. Par couplage inductif, ces courants harmoniques induisent dans les circuits galvaniques des tensions dont résultent des interférences. L'importance de ces interférences dépend notamment de l'intensité du courant inducteur ainsi que de la longueur du parallélisme et de la distance entre l'inducteur et l'induit.

Ces interférences se manifestent sur les circuits téléphoniques par des bruits empêchant toute communication verbale.

La qualité des transmissions peut être attestée par une valeur faible du IPSO mais il faut avant tout que les amplitudes des composantes du courant de ligne situées dans la bande de fréquence allant de 800 à 1200 Hz soient faibles.

Bien que la notion de IPSO fut historiquement introduite pour caractériser les influences EM sur les circuits téléphoniques, son champ d'application s'étend désormais sur tous les circuits galvaniques

dont les fréquences de fonctionnement sont proches de celles perçues par l'oreille humaine. En occurrence, l'IPSO donne de façon générale une information relative au contenu harmonique du courant de ligne.

Ainsi, des valeurs élevées du IPSO risquent de perturber non seulement les lignes téléphoniques mais aussi d'autres circuits galvaniques véhiculant des informations tels que par exemple :

- Les circuits des installations de block de section.
- Les circuits des installations de téléconduite des installations fixes de traction électrique.
- Les circuits des installations de télécommande, voire de télécontrôle, des postes à relais, voire PSI, à partir d'une commande centralisée de la circulation des trains.

Dans le cas des lignes alimentées en 25 kV 50 Hz, l'ensemble formé par la caténaire, les PAT, les sous-stations et le raccordement au réseau du fournisseur en énergie électrique se comporte comme une source imparfaite de tension dont l'impédance interne est à la fois résistive, inductive et capacitive. Cette impédance dépend de la fréquence à laquelle on la considère mais aussi de la position du train concerné et de celle des autres engins à traction électrique présents sur le réseau ferroviaire au même instant. Ainsi, la caténaire associée au système d'alimentation a le pouvoir d'amplifier ou d'atténuer le courant et la tension en fonction de la fréquence considérée et suivant la distance séparant l'engin moteur de la source. Des phénomènes de résonance entre le réseau d'alimentation et l'engin de traction peuvent se produire ayant pour conséquence des valeurs plus élevées de certaines composantes du courant de ligne, d'où une augmentation de la valeur totale du IPSO enregistrée à bord des engins moteurs.

Par ce qui précède, l'IPSO mesuré à la sous-station, aux PAT ou bien à d'autres points de la ligne caténaire, peut avoir des valeurs plus élevées que l'IPSO mesuré à bord des engins moteurs et dont la grandeur peut rester sensiblement constante.

2.3 Les installations fixes de traction électrique des lignes alimentées en 25 kV 50 Hz monophasé

2.3.1 Relais de protection des alimentations

Paramètre : A8 [1].

Lors de la mise sous tension du TFP d'un engin de traction électrique et suite à la saturation de ce TFP et l'augmentation importante subséquente de son courant magnétisant, des courants très importants peuvent apparaître sans que le TFP soit en charge (« *Transformer Inrush* »).

L'amplitude du courant magnétisant dépend notamment de l'amplitude de la tension caténaire. En considérant les chutes de tension liées à l'impédance de la ligne caténaire, l'amplitude du courant magnétisant risque d'être le plus importante à la hauteur d'une sous-station.

Pour que la valeur crête du courant puisse avoir une valeur importante, il faut que la valeur instantanée de la tension caténaire au moment d'enclenchement du TFP soit faible (voire nulle) et que le flux magnétique rémanent du circuit magnétique du TFP possède la même direction que le flux magnétique généré par le courant magnétisant.

Une valeur crête importante du courant résultant de l'enclenchement du TFP d'un engin moteur peut avoir pour conséquence le déclenchement des organes de protection (disjoncteurs) des sous-stations et des PAT.

2.3.2 Harmoniques

Paramètres : A2, A3, A7, A12 et A13 [1].

Les courants harmoniques sont générés par des charges non-linéaires, c.-à-d. absorbant un courant n'ayant pas la même forme que la tension qui les alimente. Les charges de ce type les plus courantes sont celles à base de circuits redresseurs.

L'expérience montre qu'en première approximation seul le redresseur (convertisseur statique d'entrée de la chaîne de traction) influe de manière significative sur la qualité de l'énergie électrique consommée par le véhicule.

Les redresseurs (type à commande par déphasage ou à commutation forcée) montés sur le véhicule engendrent des harmoniques de courant (ou de tension) qui peuvent être représentés de manière simplifiée par des sources de courant (ou de tension). Chaque type de convertisseur engendre un spectre de courant (ou de tension) typique. Le convertisseur associé à des éléments passifs tels que les TFP et les filtres démontre un comportement de source et une impédance interne typique.

Les harmoniques rejetés à la caténaire 25 kV 50 Hz provoquent des effets indésirables. Ces effets peuvent être instantanés ou bien à terme dus aux échauffements.

Les effets instantanés :

- Des perturbations induites sur les lignes de transmission par circuits galvaniques.
- Des vibrations et des bruits acoustiques dans les appareils EM (transformateurs, inductances) suite aux efforts EM qui sont proportionnels aux courants instantanés.
- Une déformation de l'onde de courant, voire de tension, à la caténaire.

Les effets à terme :

- Des échauffements supplémentaires dans les transformateurs (PAT, sous-stations, installations de réchauffage d'aiguilles) dus à l'effet de peau (augmentation de la résistance du cuivre avec la fréquence), ainsi que des pertes par hystérésis et par courants de Foucault (phénomènes se produisant dans le circuit magnétique des transformateurs).

Les harmoniques injectés dans la caténaire par des engins de traction électrique génèrent à travers l'impédance de ligne un harmonique de tension à la même fréquence. La distorsion de la tension caténaire subséquente entraîne une distorsion du réseau haute tension et dont le fournisseur en énergie électrique impose une valeur limite.

L'indicateur de l'influence thermique de l'ensemble des harmoniques est le taux de distorsion harmonique (« *Total Harmonic Distortion* » (THD)). Il s'agit du rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du fondamental seul.

Cet indicateur, exprimé usuellement en %, permet aussi de chiffrer la distorsion de l'onde de courant (THDI) en se rapportant toujours au fondamental du courant de ligne. L'évaluation de la distorsion de l'onde de courant par une valeur non relative permet de rendre cet indicateur indépendant de toute grandeur référentielle et donc plus significatif quant au rejet d'harmoniques provoqué par le véhicule.

Une attention particulière doit être portée aux harmoniques de rang 3 et 5 du courant de ligne vue leur amplitude importante en absence de dispositif de filtrage et dont le fournisseur en énergie électrique impose des valeurs limites en guise de protection de son propre réseau de distribution en énergie électrique.

Des phénomènes de résonance entre le réseau d'alimentation ferroviaire et l'engin de traction électrique ont pour conséquence une amplification de certains harmoniques injectés par les

convertisseurs embarqués dans le système d'alimentation et conséquemment une augmentation du THDI mesuré ainsi qu'une déformation plus prononcée de la tension caténaire.

Des engins à traction électrique munis de filtres d'antiparasite raccordés à un enroulement tertiaire du TFP ou bien en amont de l'enroulement primaire du TFP peuvent présenter une impédance d'entrée de nature capacitive aux basses fréquences. Comme l'impédance de la caténaire est de nature inductive en-dessous de sa première fréquence de résonance, des phénomènes de résonance entre l'engin à traction électrique et le système d'alimentation ferroviaire peuvent se produire à basse fréquence.

La distorsion de la tension caténaire peut avoir pour conséquence des surtensions mises en évidence par des valeurs crêtes importantes de la tension caténaire. Pour que ces surtensions ne deviennent pas critiques pour la caténaire, la valeur crête de la tension caténaire ne doit pas dépasser 50 kV.

Finalement, pour rendre compte de la consommation de puissance réactive, l'indicateur utilisé est le facteur de puissance (FP). L'énergie réactive transitant par les caténaires aura pour conséquences des pertes par effet Joule et elle est facturée par le fournisseur en énergie électrique.

2.3.3 Courant maximal du train

Paramètre : A14 [1].

Afin de pouvoir circuler librement sur les lignes du RFL alimentées en 25 kV 50 Hz monophasé dans des conditions prospectives ou anormales d'exploitation ⁽¹⁾, le courant maximal absorbé par les engins de traction électrique doit être limité.

Pour garantir le maintien de la tension caténaire dans des limites acceptables, les engins de traction électrique doivent être munis d'un dispositif automatique permettant d'adapter le niveau de la puissance absorbée.

⁽¹⁾ Conditions prospectives ou anormales d'exploitation :

- Des charges de trafic plus importantes (par exemple augmentation de la capacité d'une ligne, engins de traction électrique à forte puissance).
- Une situation dégradée des IFTE (par exemple effacement de PAT ou d'une sous-station).

2.4 Les installations fixes de traction électrique de la ligne alimentée en 3 kV CC

2.4.1 Phénomènes de résonance

Paramètre : C1 [1].

En considérant :

- la nature inductive de l'impédance de la caténaire en dessous de sa première fréquence de résonance ;
- la présence d'une composante à 50 Hz à la tension caténaire ;

des phénomènes de résonance entre l'engin à traction électrique et le système d'alimentation ferroviaire peuvent se produire à 50 Hz.

Le fait d'imposer une impédance du véhicule à 50 Hz de nature inductive permet d'éviter des phénomènes de résonance à la fréquence précitée.

2.4.2 Courant maximal du train

Paramètre : C9 [1].

Afin de pouvoir circuler librement sur la ligne du RFL alimentée en 3 kV CC dans des conditions prospectives ou anormales d'exploitation ⁽¹⁾, la faible puissance de la sous-station impose une limitation du courant maximal absorbé par les engins de traction électrique.

Pour garantir le maintien de la tension caténaire dans des limites acceptables, les engins de traction électrique doivent être munis d'un dispositif automatique permettant d'adapter le niveau de la puissance absorbée.

⁽¹⁾ Conditions prospectives ou anormales d'exploitation :

- Des charges de trafic plus importantes (par exemple augmentation de la capacité d'une ligne, engins de traction électrique à forte puissance).
- Une situation dégradée des IFTE.