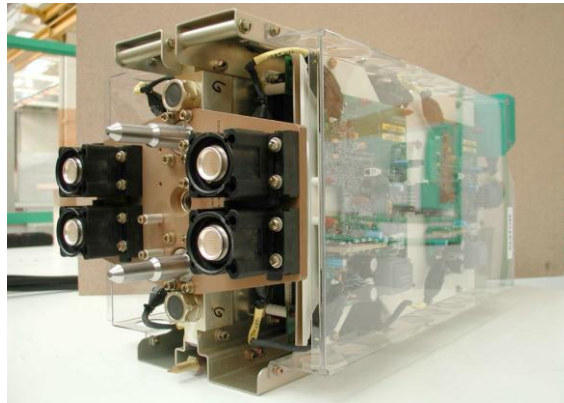


Partie B

ETUDE DE LA CHAÎNE ALIMENTATION DE MOTORS SYNCHRONES

CORRECTION



Convertisseur ONIX™ haute tension 3600 V
(IGBT Power module)

- Etude des différents convertisseurs
- Etude d'un redresseur double alternance monophasé
- Etude d'un redresseur MLI (absorption sinusoïdale)

Ce dossier est constitué de :

- 8 pages numérotées de B2 à B9 [Questionnement et Réponse]
- 2 pages numérotées de DRB1 à DRB2 [Documents réponse]
- 3 pages numérotées de DTB1 à DTB3 [Documents techniques]

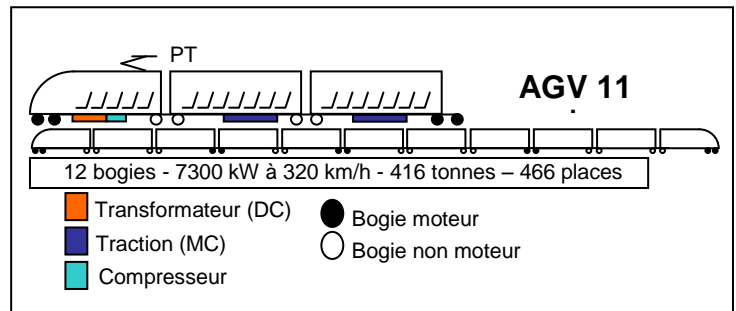
Durée conseillée : 1 H30.

PROBLEMATIQUE : Montrer que le besoin d'interopérabilité (alimentation sous diverses tensions) nécessite l'adaptation de la tension et du courant d'alimentation en utilisant des structures de convertisseur plus ou moins complexes.

B.1 ETUDE DES DIFFERENTS CONVERTISSEURS NECESSAIRE POUR ALIMENTER LES MOTEURS:

L'énergie électrique est prélevée par un pantographe (PT) de la caténaire et acheminée vers le coffret transformateur DC à travers des dispositifs de protection et de contrôle-commande.

L'énergie est convertie puis acheminée aux coffrets de traction MC qui alimentent les moteurs de chaque bogie motorisé.



La chaîne de traction de chacun des essieux moteurs est constituée, d'un « bus » de tension continue alimentant un onduleur (OND) associé à son moteur de traction.

Dans le cas des alimentations à courant monophasé, chacun des « bus » est alimenté respectivement par un enroulement du transformateur principal (TFP) associé à un convertisseur 4 quadrants appelé « Pont Monophasé à Commutation Forcée » (P.M.C.F.).

Le rôle essentiel du convertisseur d'entrée (P.M.C.F.) est de contrôler le déphasage entre la tension caténaire et le courant de traction afin de régler le facteur de puissance au voisinage de l'unité. Ce convertisseur possède la topologie d'un onduleur monophasé avec une commande MLI.

Pour l'AGV, les réseaux d'alimentation prévus par le constructeur ALSTOM sont :

- 25 KV 50Hz
- 15 KV 16,7 Hz
- 3000V continu

Chaque bogie est équipé de moteurs synchrones à aimants permanents triphasés autopilotés. Les caractéristiques nominales de chaque moteur (Moteur type 12 LCS 3550 B) sont données ci-dessous :



P= 800 kW - Cmax : 4200 Nm - 4570 tr/min - 768 kg - I_{max}= 280 A
tension = 1600/2800 V - 12 pôles - Puissance continue 730 kW de 3000 à 4500 tr/min.
Les convertisseurs de traction à IGBT type ONIX 233 haute tension 3600 V avec IGBT 6,5 kV – 400 A.

B.1.1. D'après les documents techniques DTB1 et DTB2, **donner** le domaine de tension des alimentations monophasées possibles sur AGV. **Préciser** les limites de ce domaine.

Tensions 3kV et 25 kV donc domaine HTA de 1000 V à 50 000 V alternatif.

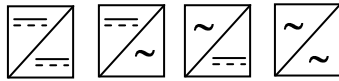
B.1.2. **Rappeler** l'habilitation nécessaire pour un exécutant électricien qui intervient sur cette installation.

H1 ou H1V

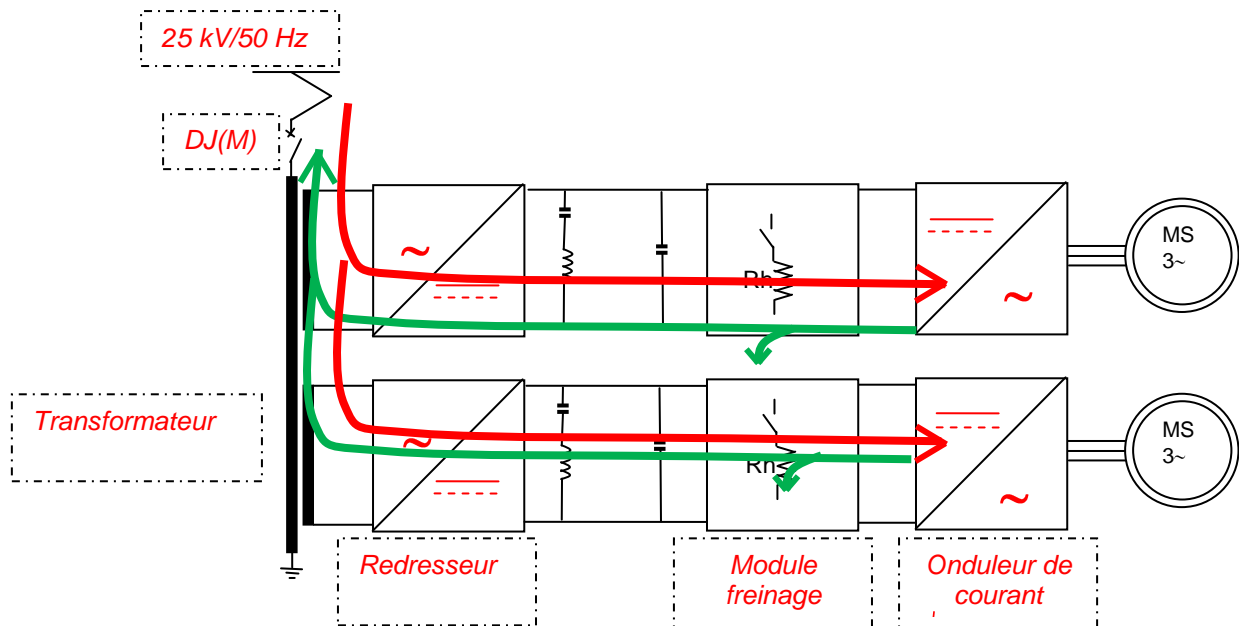
B.1.3. A partir du document technique DTB2, **compléter** sur le schéma bloc les noms et les symboles proposés ci dessous. Le coffret de traction est alimenté sous caténaire alternative.

Propositions : Transformateur - Onduleur de courant - Redresseur - Hacheur - Module freinage - 25 kV/50 Hz - 3 kV DC – DJ(C) –DJ(M).

Symboles :



Tous les symboles ne sont pas à utiliser !



B.1.4. Sur le schéma bloc ci-dessus, **flécher en rouge** le sens du transfert d'énergie réseau/machine synchrone en traction.

B.1.5. Sur le schéma bloc ci-dessus, **flécher en vert** le sens du transfert d'énergie réseau/machine synchrone en freinage.

B.1.6. En observant le pont d'entrée du PMCF sur le document technique DTB2, **montrer** que l'énergie peut être renvoyée sur le réseau.

Oui le pont d'entrée est bidirectionnel IGBT tête bêche avec **diode** donc réversible en courant.

B.1.7. En cas de coupure réseau (ouverture du disjoncteur DJ(M) par exemple), l'énergie ne peut plus être renvoyée sur le réseau. **Expliquer** alors comment sera traitée l'énergie restituée par la machine synchrone en phase de freinage.

Lors des phase de freinage la machine synchrone devient générateur. Si coupure réseau : Il faut pouvoir récupérer cette énergie de freinage qui est stockée dans un premier temps dans le condensateur de filtrage puis dissipé sous forme de chaleur dans la résistance Rh.

B.1.8. A partir des documents techniques DTB1et DTB2, **trouver** le repère du composant permettant la protection contre les surintensités des circuits en alimentation continue.

Donner le nom du repère.

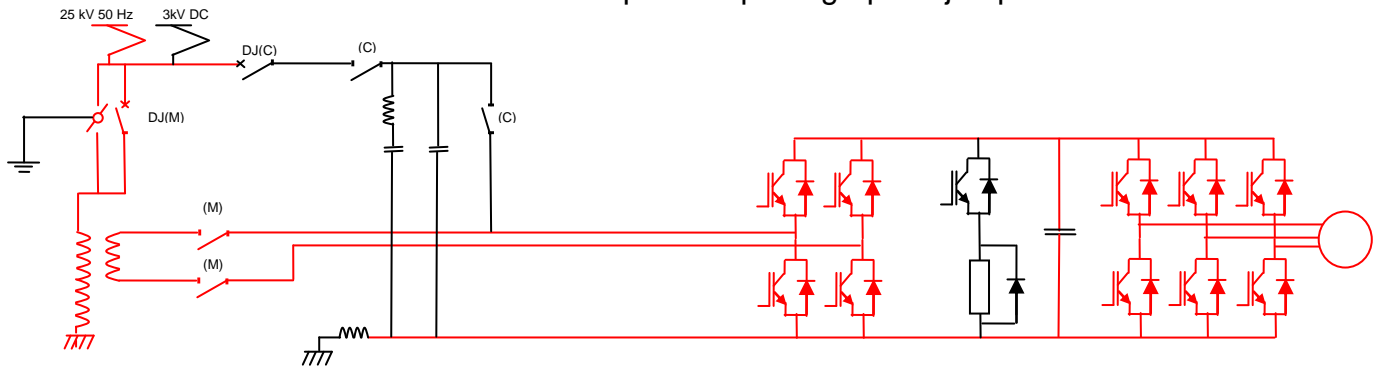
DJ(C)

B.1.9. A partir des documents techniques DTB1 et DTB2, **trouver** le repère du composant permettant la protection contre les surintensités des circuits en alimentation alternative.

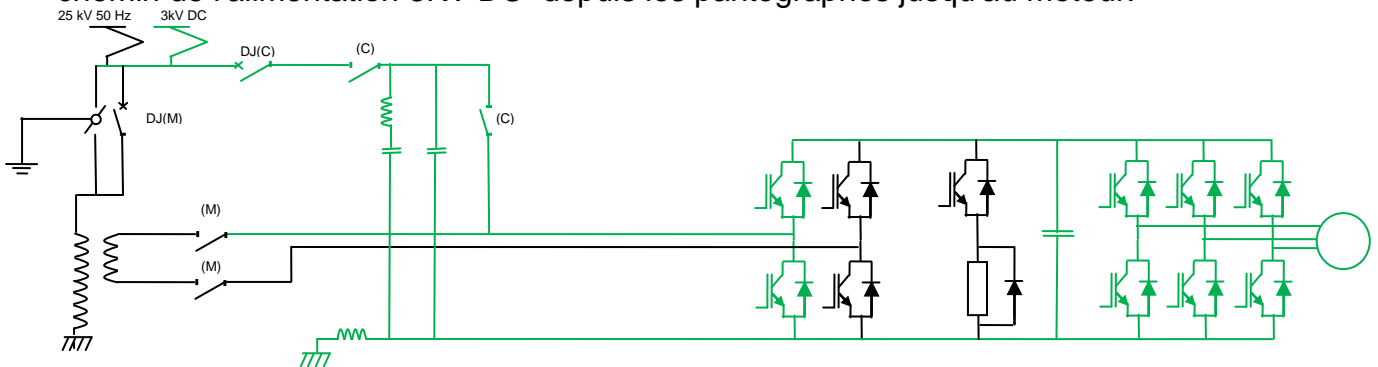
Donner le nom du repère.

DJ(M)

B.1.10. Sur le schéma simplifié d'alimentation de la machine, **tracer en rouge** le chemin de l'alimentation 25KV 50Hz depuis les pantographes jusqu'au moteur.



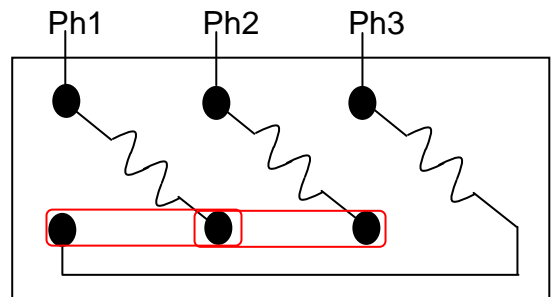
B.1.11. Sur le schéma simplifié d'alimentation de la machine, **tracer en vert** le chemin de l'alimentation 3KV DC depuis les pantographes jusqu'au moteur.



B.1.12. La tension délivrée entre phases aux bornes du moteur étant de 2800 volts, **définir** le couplage du moteur synchrone.

Réseau 2800 v moteur 1600/2800 v: COUPLAGE ETOILE

B.1.13. **Représenter** les barrettes de couplage permettant de coupler correctement le stator de la machine.



B.1.14. La vitesse de rotation de la machine synchrone (n) dépend de deux paramètres, la fréquence (f) du courant d'alimentation et nombre de paire de pôle (p) de la machine. **Exprimer** n (en tr/s) en fonction de f (en Hz) et de p.

$$n = \frac{f}{p}$$

B.1.15. D'après la structure mise en place sur l'AGV, **citer** la grandeur physique sur laquelle l'on agit pour faire varier la vitesse de rotation du moteur.

f : la fréquence

B.1.16. **Calculer** la fréquence des courants d'alimentation pour que ce moteur tourne à sa vitesse nominale.

$$f = p \times n = 6 \times (4570/60) = 457 \text{ Hz}$$

B.1.17. A l'aide du schéma bloc de la question B1.3, **Citer** le convertisseur permettant d'agir sur cette grandeur physique ?

Il s'agit de l'onduleur de courant

B.2 ETUDE D'UN REDRESSEUR DOUBLE ALTERNANCE :

PROBLEMATIQUE : L'alimentation des machines synchrones est composée de plusieurs étages de conversion. Le mode de fonctionnement du premier étage de conversion (PMCF) possède un fort régime discontinu qui engendre des perturbations sur le réseau.

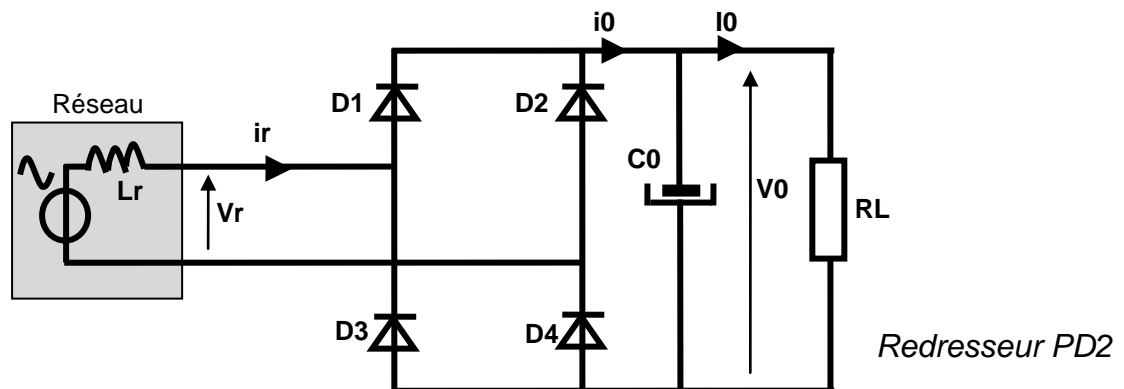
En France, le train est un consommateur comme un autre sur le réseau EDF. Contrairement à l'Allemagne, par exemple, ou le réseau 15 kV est dédié au ferroviaire.

Dans le domaine ferroviaire la minimisation de ces perturbations générées par la caténaire sur l'environnement (signalisations, communications...) est particulièrement recherchée.

Dans un premier temps, nous allons montrer qu'un simple redresseur pollue fortement le réseau électrique.

Dans un deuxième temps, nous allons montrer qu'un redresseur commandé avec une loi de commande adaptée permettra de réduire grandement ces perturbations.

Simplifions la représentation du pont d'entrée du convertisseur ONIX™ de la manière suivante :



B.2.1. Connaissant l'allure de la charge et de la décharge du condensateur C_0 en régime établi. **Tracer** sur le document réponse N°1 l'allure de la tension V_0 .

B.2.2. Sur une période, **délimiter** par des traits pointillés verticaux les différents intervalles de conduction et **préciser** les diodes qui conduisent.

B.2.3. Sachant que le courant i_r a pour valeur maximale 700 A, **tracer** l'allure du courant i_r .

B.2.4. A l'aide des documents techniques DTB3 et DTB4, **comparer** l'allure du courant i_r aux exemples donnés. A quelle type de charge pourrait ce rapprocher notre étude.

Un ordinateur portable ou ampoule à économie d'énergie

B.2.5. D'après l'étude spectrale de ce type de charge, le courant est-il pollueur du réseau ? Justifier.

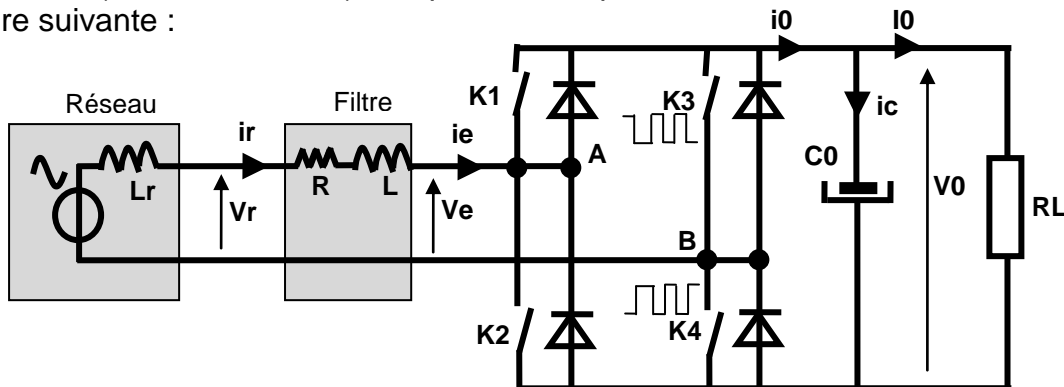
*Le courant pollue fortement le réseau, le régime discontinu crée de nombreux harmoniques.
Ou THD différent de 0.*

B.2.6. En ferroviaire les courants moteur circulent avec les signaux de signalisation et de commande dans les mêmes supports. **Expliquer** pourquoi l'allure du courant i_r n'est-elle pas acceptable.

*Elle entraîne la perturbation possible des signaux de communication transmis par cette même voie par la présence de fréquences multiples du signal.
A compter aussi juste si précise : Il génère de nombreux harmoniques qui sont néfaste à la chaîne d'alimentation en énergie de notre AGV (échauffement de la caténaire, vieillissement prématuré et perturbation de l'appareillage).*

B.3 ETUDE DU REDRESSEUR MLI :

En réalité le pont d'entrée du convertisseur (PMCF) est composé d'interrupteurs commandés (K1, K2, K3 et K4). Simplifions la représentation du redresseur MLI de la manière suivante :



Redresseur MLI monophasé (PMCF)

L'intérêt connu du découpage est de réduire considérablement la taille des éléments de filtrage.

PROBLEMATIQUE : Nous allons montrer ici, qu'il est aussi possible par l'utilisation d'une loi de commande appropriée, de corriger le facteur de puissance entre la tension caténaire et le courant de traction et d'obtenir un courant i_r sinusoïdal et en phase avec la tension V_r .

Hypothèses de fonctionnement :

- La tension de sortie est supposée constante et déjà régulée à V_o (3.6 kV).
- V_r efficace à vide = 1700 volts.
- Les interrupteurs électroniques sont supposés parfaits.

B.3.1. On donne l'allure des tensions V_A et V_B . **En déduire** le tracé de $V_e(t)$ sur le document réponse N°2.

B.3.2. D'après l'allure de la tension $V_e(t)$ obtenue, **expliquer** ce qu'est une tension de type MLI.

Tension alternative composée d'impulsions (créneaux) de largeur variable.

B.3.3. . A partir de votre tracé question B3.1, **tracer** en couleur bleu l'allure du fondamental de V_e (noté V_{eBF}) sur le document réponse N°2 . Pour effectuer correctement le tracé, **calculer** l'amplitude du fondamental de V_e . On précise que la valeur $V_{eBF} = 0,6xV_o$ avec V_{eBF} : représentant la valeur efficace du fondamental de V_e .

Calcul : *L'amplitude du fondamental peut être déduite : $V_{eBF} \cdot \sqrt{2} = r \cdot V_o$
 $V_{emax} = 0,85 V_o$*

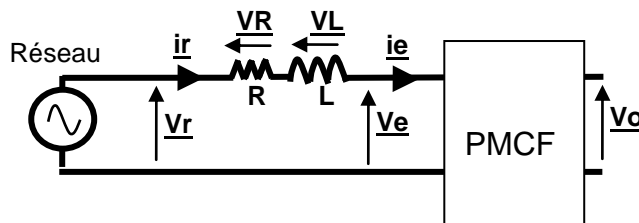
B.3.4. **Donner** la valeur (en degré) du déphasage δ (angle de calage) entre le fondamental de V_e et V_r .

$\delta \approx 17^\circ$

B.3.5. On ne considère maintenant que les grandeurs fondamentales de pulsation ω , on les notera :

- i_{rBF} pour le fondamental de i_r .
- V_{eBF} pour le fondamental de V_e .

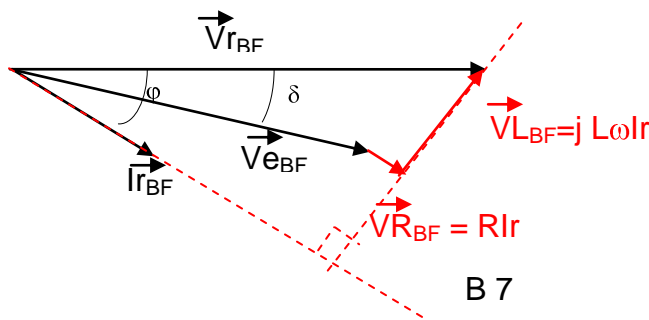
On considère la maille d'entrée du redresseur :



Exprimer la loi des mailles dans la maille d'entrée :

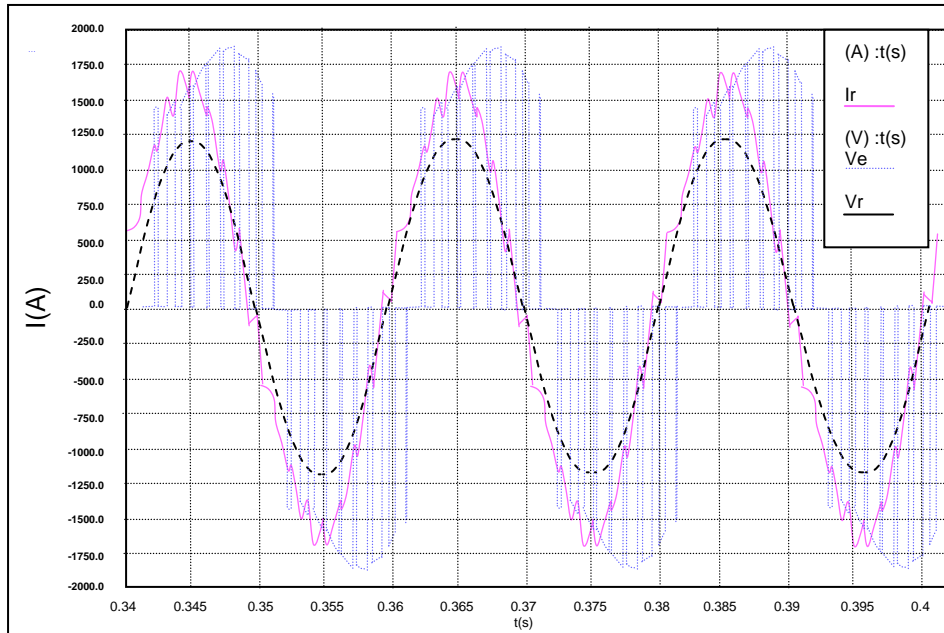
$$\vec{V}_r = \vec{V}_R + \vec{V}_L + \vec{V}_e$$

B.3.6. **Compléter** le diagramme de Fresnel relatif à la maille d'entrée. On notera ϕ et δ les retards angulaires respectifs de i_{rBF} et de V_{eBF} par rapport à V_{rBF} .



Sur le diagramme de Fresnel ci-dessus, le $\cos \varphi$ est inférieur à 1. En agissant sur l'angle de calage δ , on peut ramener I_r en phase avec V_r et atteindre le $\cos \varphi$ unitaire.

B.3.7. On a relevé les tensions V_r , V_e et le courant I_r en entrée du PMCF. A l'aide de ces courbes, **mesurer** l'angle φ et **calculer** le $\cos \varphi$.



Détails calculs :
Si l'on observe V_r et I_r l'on constate un déphasage d'environ 10° soit un $\cos \varphi \sim 0,98$

B.3.8. Vu du réseau, si le cosinus φ est égal à 1, que peut on dire de la puissance réactive Q absorbée par le PMCF ?

La puissance réactive Q est nulle.

B.3.9. On considère ici que V_r et i_r sont parfaitement sinusoïdaux. Le fait de pouvoir 'corriger' l'énergie réactive consommée apporte de nombreux avantages sur la distribution d'énergie électrique. Nous allons montrer ici son influence sur le dimensionnement du transformateur TFP en tête de la chaîne d'alimentation.

On considère que l'ensemble de la chaîne de traction et des auxiliaires consomme une puissance de 2800 kW et que le transformateur TFP peut fournir une puissance apparente de 3500 kVA.

Calculer la puissance appelée par l'installation (S) si le $\cos \varphi$ est mal réglé et égal à 0,75.

$$S = P / \cos \varphi = 3733 \text{ kVA}$$

Montrer alors que le transformateur est sous dimensionné en exprimant son taux de surcharge en pourcent.

$$\text{Transfo en surcharge : } \frac{3733 - 3500}{3500} \times 100 = 6,65 \%$$

Maintenant corrigeons le $\cos\varphi$ en le ramenant proche de 1. Prenons un $\cos\varphi = 0,928$.

Calculer alors, en pourcent, la charge du transformateur.

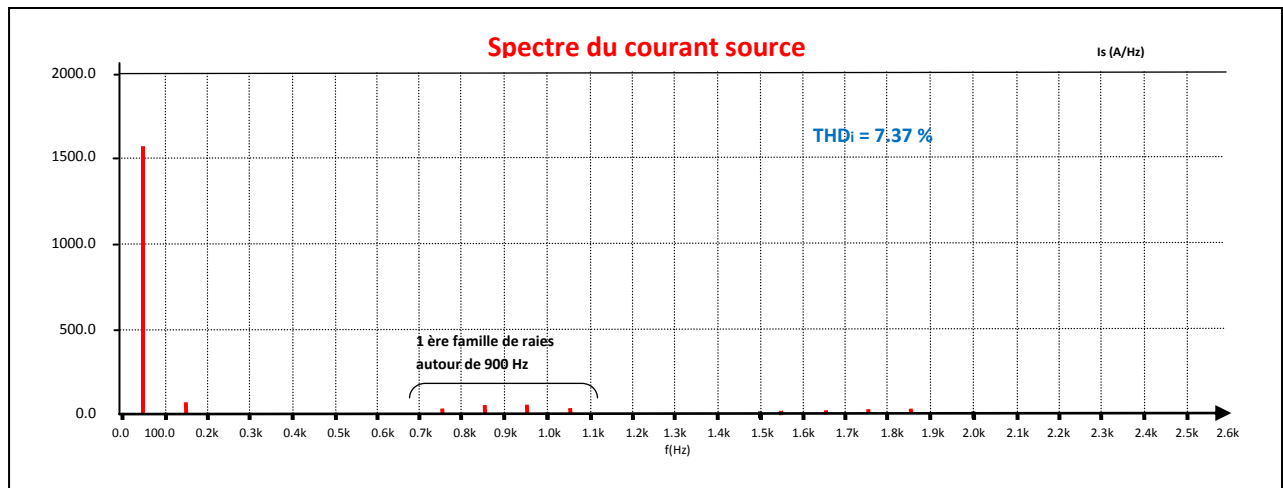
$$S = P / \cos\varphi = 3017 \text{ kVA}$$

$$\text{Transfo en surcharge : } \frac{3017 - 3500}{3500} \times 100 = -13 \%$$

Le transformateur est-il alors en surcharge ou possède t-il encore de la puissance disponible ?

Il reste encore 13 % de puissance disponible.

B.3.10. D'après l'allure du courant en B3.7 et de son analyse spectrale donnée ci-dessous :



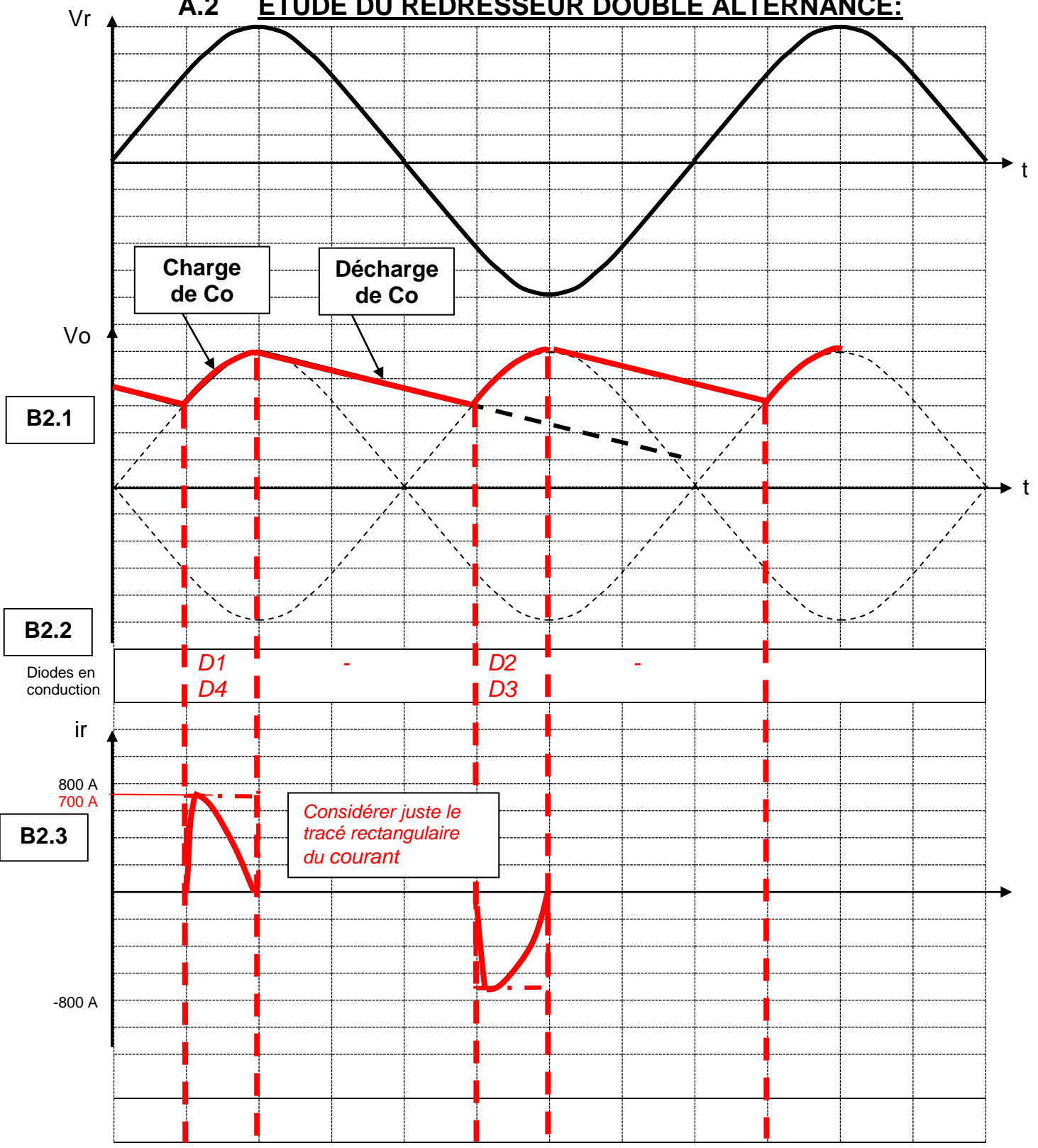
Repérer son fondamental, et donner sa fréquence :

50 Hz

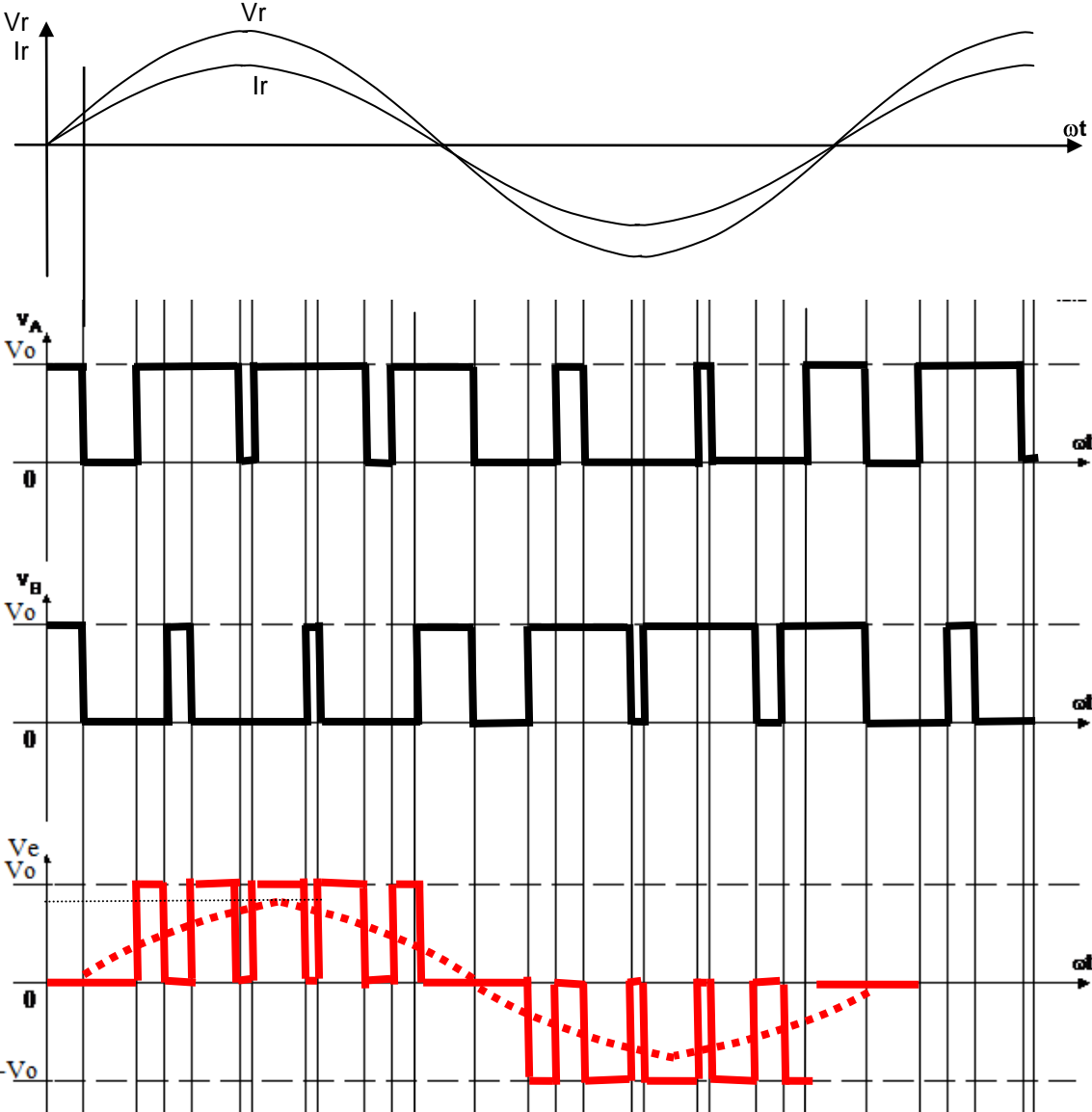
B.3.11. **Résumer** l'ensemble des caractéristiques qui permettent de dire que le PMCF vu par le réseau, se rapproche d'une charge résistive qui ne crée pas de 'pollution' sur le réseau.

Le courant absorbé est en phase avec la tension (1^{ère} série de raie autour de 900 hz) $\cos\varphi$ proche de 1 et de plus il est sinusoïdal (pas de production d'harmoniques).

A.2 ETUDE DU REDRESSEUR DOUBLE ALTERNANCE:



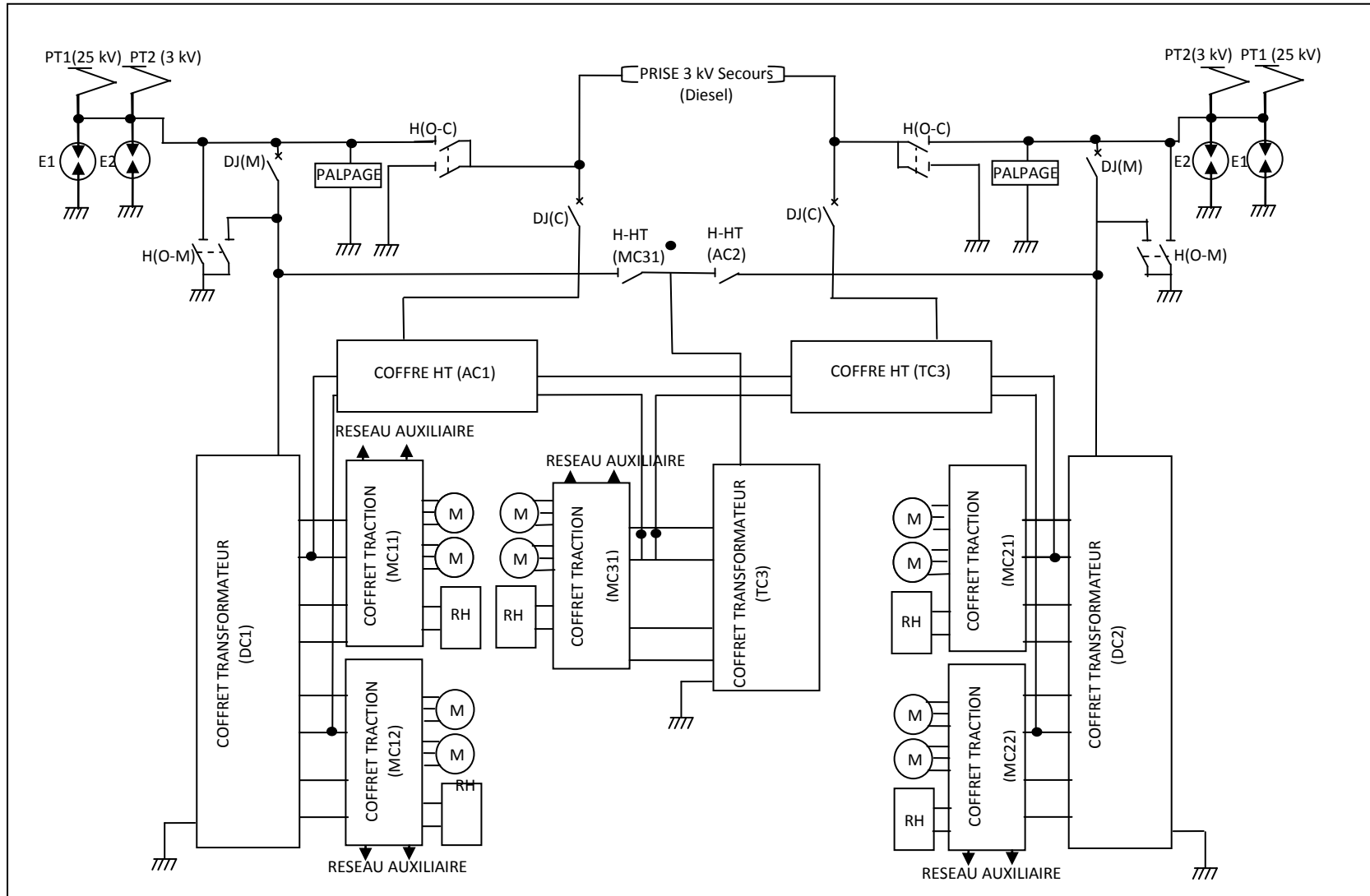
B.3 ETUDE DU REDRESSEUR MLI:



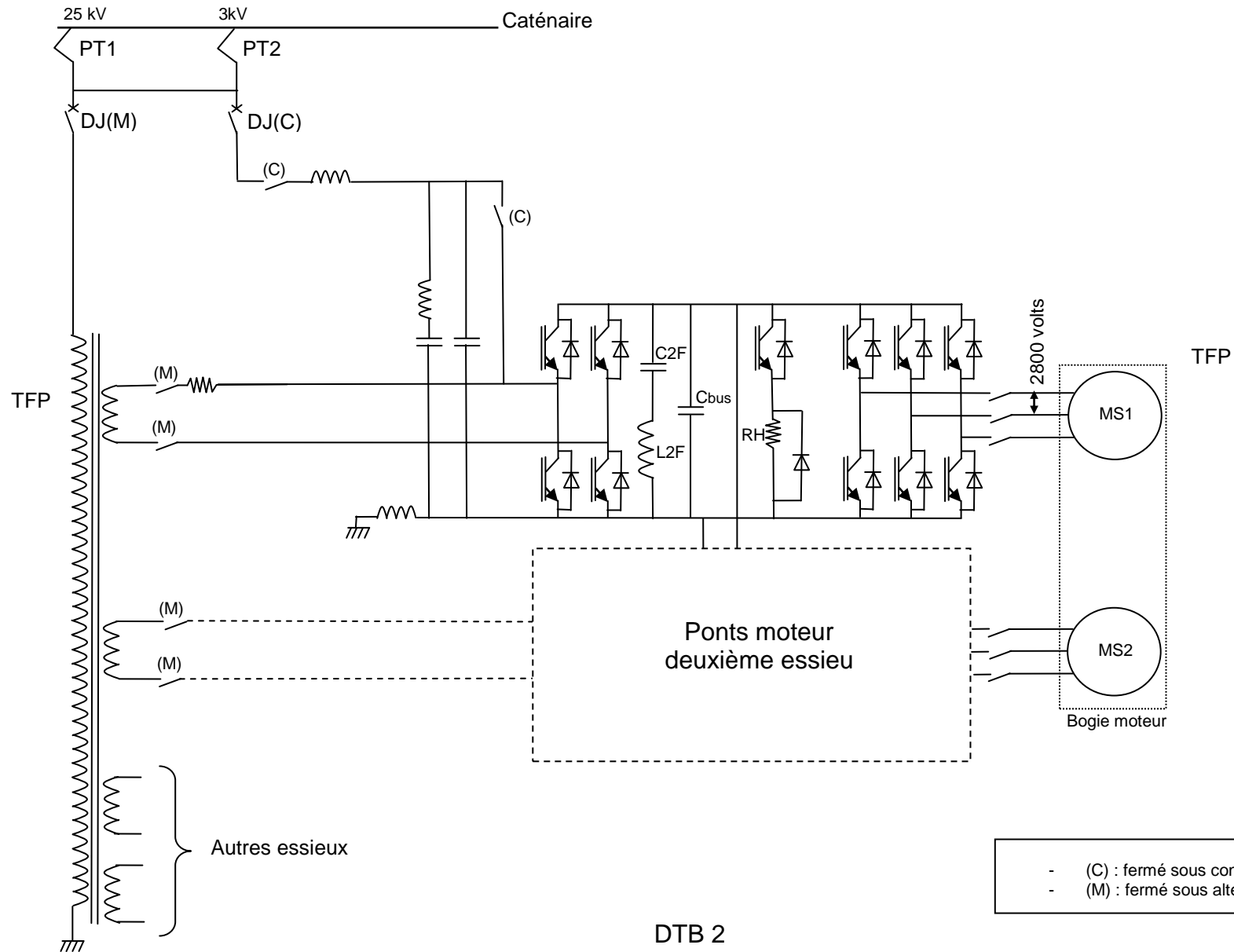
B3.1

B3.3

A.1 SCHEMA DE PRINCIPE PUISSANCE AGV NTV 11 voitures:



A.2 ALIMENTATION SOUS CATENAIRE 3 kV CONTINUE et 25 kV ALTERNATIVE (Coffret traction):



Document technique N°3

La pollution harmonique :

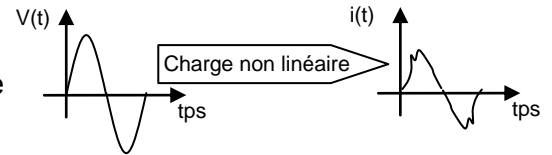
La pollution est la dégradation d'une ressource.
 Dans le cas de la pollution harmonique la ressource est l'énergie électrique fournie par le réseau.

Cette énergie est idéalement de forme sinusoïdale. (TDH = 0)

Lorsque l'allure du courant se déforme, on parle de pollution harmonique.

Un POLLUEUR est une charge non linéaire (C'est-à-dire une charge qui, alimentée par une tension sinusoïdale $v(t)$, appelle sur le réseau un courant déformé).

L'étude spectrale du courant permet de mettre en évidence les raies d'harmonique, leur amplitude et leur fréquence d'action. Par exemple, sur le spectre du courant appelé par un ordinateur sur le réseau donné ci dessous, on constate que le courant appelé est loin d'être sinusoïdal ! Il y a de nombreux harmoniques aux fréquences 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz, 450 Hz ...



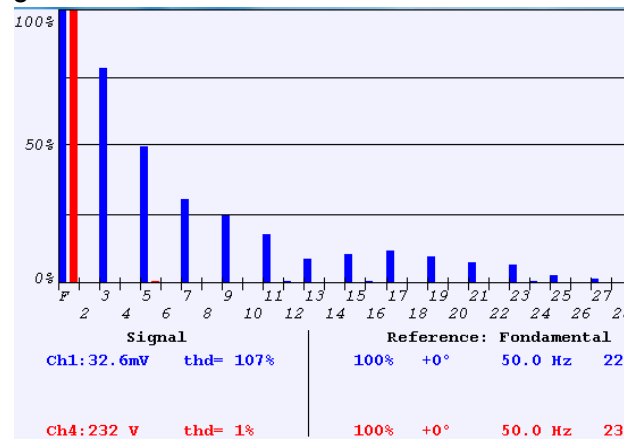
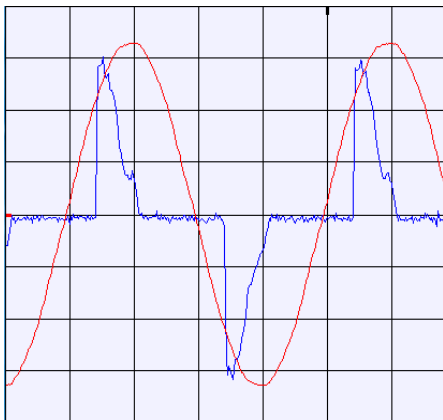
Effets des harmoniques :

Effets instantanés : Perturbations dans le fonctionnement des appareils de protection et de commutation.

Effets à moyen et long terme : Echauffement des matériels électriques et par conséquent vieillissement prématuré.

Exemple de charge non linéaire :

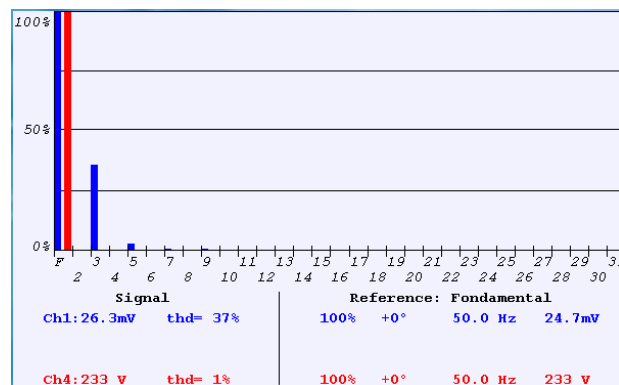
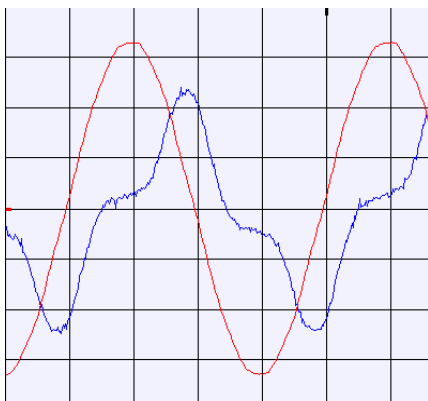
- Ampoule à économie d'énergie :



Nombreux harmoniques impaires.

THD de 107 % : La valeur efficace des harmoniques de courant est aussi importante que la valeur efficace du fondamental.

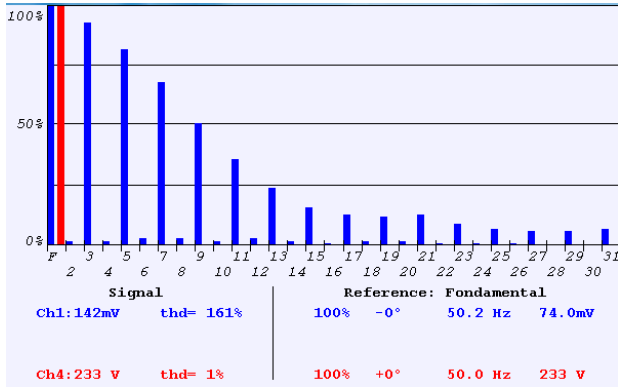
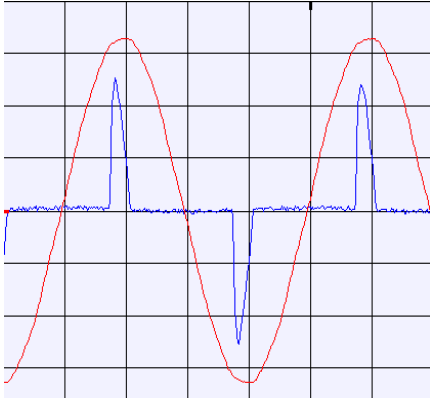
- Transformateur à vide :



Présence des harmoniques de rang 3 et 5
 THD = 37 %

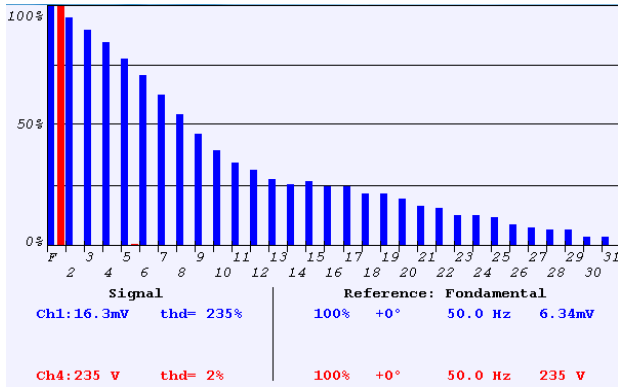
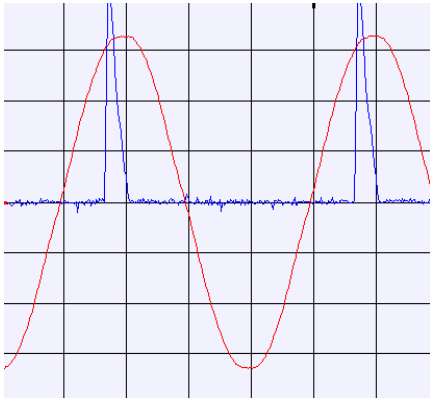
Document technique N°4

- Ordinateur portable :



Nombreux harmoniques de rang impair
THD = 161 %

- Téléphone portable :



Pollution harmonique importante
(Rang pair et impair présents)
THD = 235 %