

SESSION 2009

**CONCOURS INTERNE
DE RECRUTEMENT DE PROFESSEURS AGRÉGÉS
ET CONCOURS D'ACCÈS A L'ÉCHELLE DE RÉMUNÉRATION**

**Section : GÉNIE ÉLECTRIQUE
Option B : ÉLECTROTECHNIQUE ET ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE**

ÉPREUVE PRENANT APPUI SUR UN SYSTÈME INDUSTRIEL

Durée : 8 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

Convertisseur en euros autorisé.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

A

Eléments de fonctionnement d'un Tramway

Ce sujet comporte 3 dossiers distincts :

📁 Dossier de présentation, texte du sujet avec le travail demandé	42 pages
📁 Documents ressources et annexes	7 pages
📁 Documents réponses	13 pages

Ce sujet comporte trois parties indépendantes :

Partie A : Etude mécanique générale

Partie B : Etude des modules PM1 et PM2 du convertisseur de bord

Partie C : Etude du module PM3 du convertisseur de bord

Une lecture préalable et complète du sujet est indispensable.

Il sera tenu compte de la cohérence avec laquelle les candidats traiteront chaque partie, le jury préférant une réflexion d'ensemble de la partie abordée à un éparpillement des réponses.

Les candidats sont invités à numéroter chaque page de leur copie et à indiquer clairement le numéro de la question traitée.

Les candidats sont priés de rédiger les différentes parties du problème sur feuilles séparées et clairement repérées. Chaque question est identifiée par une police gras et repérées par un numéro.

Il leur est rappelé qu'ils doivent utiliser les notations propres au sujet, présenter clairement les calculs et dégager ou encadrer tous les résultats.

Tout résultat incorrectement exprimé ne sera pas pris en compte. En outre les correcteurs leur sauront gré d'écrire lisiblement et de soigner la qualité de leur copie.

Il sera tenu compte de la qualité de rédaction, en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul. Le correcteur attend des phrases complètes respectant la syntaxe de la langue française.

Pour la présentation des applications numériques, il est rappelé que lors du passage d'une forme littérale à son application numérique, il est recommandé aux candidats de procéder comme suit :

- après avoir rappelé la relation littérale, chaque grandeur est remplacée par sa valeur numérique en respectant la position qu'elle avait dans la relation puis le résultat numérique est donné sans calculs intermédiaires et sans omettre son unité.

PRESENTATION GENERALE [1]

1 - CONTEXTE

1.1 Le retour du Tramway

L'asphyxie progressive des grandes agglomérations nationales ont conduit l'Etat français dès l'année 1974 à proposer aux maires de quelques villes l'idée de réintroduire le tramway en tant que mode de transport en commun. En contrepartie, l'Etat s'engageait à subventionner une partie des travaux des infrastructures et lançait également un concours d'idées pour la création d'un tramway français standard.

Il fallut attendre encore quelques années pour que Nantes, tout d'abord, puis Grenoble ne se lancent dans l'aventure en ouvrant les premières lignes respectivement en 1985 puis en 1987. Le mouvement était alors lancé et les prévisions d'équipements dans les villes françaises courent désormais jusqu'en 2013.

1.2 Les avantages du tramway

Malgré une vitesse inférieure à celle du métro traditionnel, le tramway est gagnant en terme de coût de construction des infrastructures. Ce mode de transport est confortable, offre des capacités de transport importantes par rapport au transport de type bus et est surtout bien moins gourmand en énergie que ses concurrents.

Le tramway est également un moyen de transport silencieux et est assez peu sensible aux intempéries. Il offre en outre une très bonne accessibilité en station.

2 – CONTRAINTES SPECIFIQUES DU TRAMWAY

Depuis la réhabilitation du tramway, les nouvelles réalisations ont amené un certain nombre de normes pour optimiser au mieux les nouveaux matériels.

Ainsi des contraintes spécifiques au tramway existent. Elles touchent l'intégration urbaine du réseau, la plate-forme de circulation, les gabarits, le tracé et le profil de la ligne et les alimentations en énergie.

L'alimentation en énergie dans ces nouveaux réseaux de tramway est de 750 V plus ou moins 20% , soit le quart d'un réseau 3000 V qui est la tension normalisée par la Commission Electrotechnique Internationale pour les applications ferroviaires. L'alimentation se fait généralement par ligne aérienne, mais peut se faire par le sol.

Toutes ces composantes ainsi que les principes généraux d'exploitation spécifique au tramway sont à prendre en compte lors de la conception du matériel roulant.

3 – CONCEPTION DU MATERIEL ROULANT

La mise en œuvre d'un matériel roulant répond généralement à des contraintes dimensionnelles. L'origine de ces contraintes se trouve dans la définition du tramway français standard. Elles prennent en compte l'espace voyageur et l'accessibilité, le confort climatique et acoustique, la capacité et la disposition des équipements.

En ce qui concerne les équipements, en plus de ceux liés à la traction, un tramway comporte des équipements électriques, pneumatiques et hydrauliques qui nécessitent des structures énergétiques spécifiques.

Nous nous intéresserons ici principalement à l'étude des structures d'alimentation de certains de ces équipements.

1 – CONCEPTION DU VEHICULE

1.1 Généralités

Le tramway de Nantes est un matériel de type Incentro de Bombardier. L'Incentro est un tramway de construction modulaire dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

Type	Voie (mm)	Longueur (m)	Largeur (m)	Puissance (kW)
AT6/5L	1435	36,40	2,40	8 x 45

1.2 Agencement du Véhicule

Le tramway de Nantes, de type AT6/5L est un véhicule bidirectionnel composé de 5 modules – **figure 1** - Les rames ne sont pas prévues pour un fonctionnement en unités multiples.

Le plancher est de type intégralement bas surbaissé. Le véhicule est construit à partir d'éléments normés de 1,70 m de long. L'association de 2 à 4 de ces éléments forme les modules qui sont reliés entre eux par des articulations.

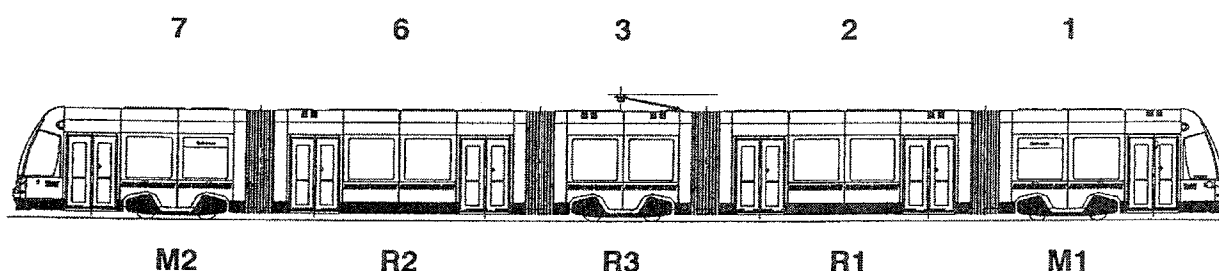


Figure 1 – Véhicule bidirectionnel – Document Semitan

Le véhicule comprend les modules suivants :

- Module 1 / M1 = module de tête : 3 éléments de base = bout avant + articulation
- Module 2 / R1 = module voyageurs : 4 éléments de base
- Module 3 / R3 = module central : 2 éléments de base + boggy porteur + 2 articulations
- Module 6 / R2 = module voyageurs : 4 éléments de base
- Module 7 / M2 = module de tête : 3 éléments de base = bout avant + articulation

Les modules 1 et 7 sont équipés d'une unité de traction autonome. Les 2 boggies moteurs sont équipés de 4 moteurs asynchrones triphasés. L'alimentation de ces moteurs se fait par un convertisseur de courant qui comporte deux onduleurs à IGBT avec unités de commande de traction (DCU). Chaque onduleur alimente 2 moteurs.

Le véhicule est équipé de 4 systèmes de freinage indépendants : un frein électrodynamique, un frein électrohydraulique à ressort accumulé sur les boggies moteur, un frein électrodynamique actif sur le boggie porteur et un frein électromagnétique sur le rail.

La commande du véhicule s'effectue au moyen de l'unité centrale de commande (VCTU). Ce dispositif gère et transmet les signaux d'entrée et de sortie du module, aux appareils entre eux, sur le bus du véhicule (MVB, Multifunctional Vehicle Bus) ; il est formé de composants MITRAC.

1.3 Fiche Technique du véhicule

Ecartements des rails	1435 mm
Dimension de la caisse :	
- Longueur totale	36 400 mm
- Largeur totale	2 400 mm
- Hauteur totale sans pantographe	3 280 mm
- Hauteur du plancher à vide	285 à 350 mm
Masses et charges :	
- Masse en ordre de marche	38700 kg
- Masse à charge CC0	38770 kg
- Masse en charge CCN	55500 kg
- Masse en charge CCM	61300 kg
Performances :	
- Vitesse	70 km/h
- Accélération maximale	1,15 m.s ⁻²
- Frein de service max	1,15 m.s ⁻²
- Frein d'urgence max	2,74 m.s ⁻²
Propulsion :	
- Mode de propulsion	Electrique – moteur triphasé
- Puissance par boggie	4 x 45 kW
- Vitesse de rotation	2260 tr/min
- Nombre de roues motrices	8
Convertisseur de Traction :	
- Tension d'entrée en continu	600/750 V
- Tension de sortie	0 à 520 V
- Fréquence de sortie	0 à 300 Hz
Convertisseur de bord :	
- Tension d'entrée	420 à 1000 V DC
- Tension triphasée de sortie	400 V – 50 Hz
- Tension en continu de sortie	24 V
- Courant de sortie	320 A
- Puissance de sortie	34 kVA

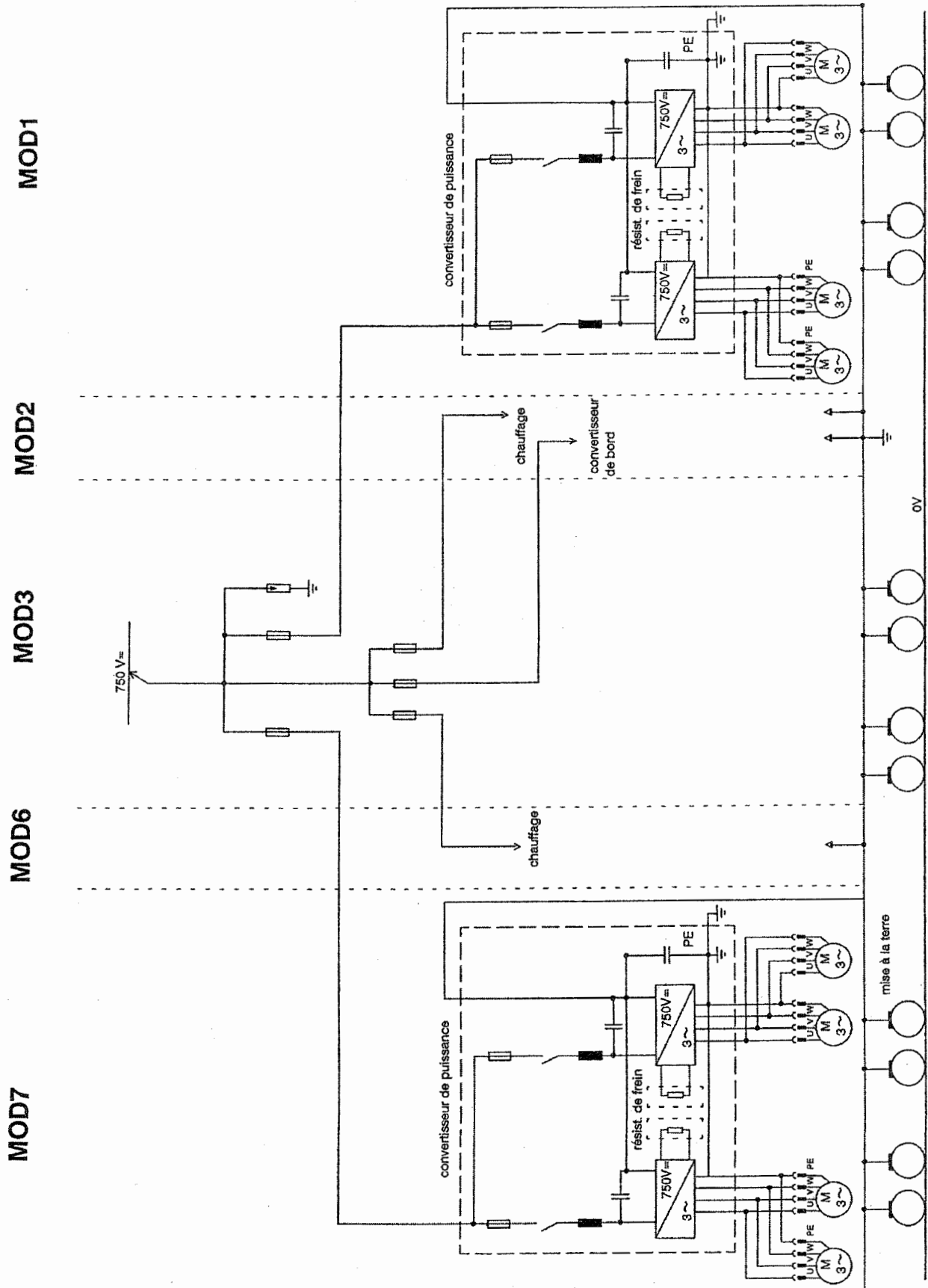


Figure 2 – Schéma du circuit de puissance¹

¹ Reproduction avec l'autorisation de la SEMITAN

2 – LE CONVERTISSEUR DE BORD

Sur le toit du module 2 / R1 se trouve le convertisseur de bord pour l'alimentation du réseau de bord à partir de la ligne de contact. Le réseau de bord dispose de 2 tensions : 3 x 400 V – 50 Hz et 24 V continu avec alimentation de secours par batterie. Le convertisseur est de type CVS pour Converter Voltage Switching.

Le réseau triphasé alimente les climatiseurs de l'espace voyageurs et la totalité des moteurs de ventilation, ainsi que l'appareillage en triphasé du convertisseur.

Le réseau continu 24 V alimente entre autre la commande du pantographe, le frein du ressort accumulé, le frein électromagnétique sur rail, le mécanisme des portes, l'essui-glace, les éclairages, les phares et le dispositif de sablage.

Le CVS est constitué de 3 modules notés respectivement PM1, PM2 et PM3 et d'une carte de commande centralisée.

Le module PM1 permet la production d'une tension continue, isolée du réseau 750 V. Il assure l'alimentation des équipements du tramway ainsi que la charge de la batterie. Il est construit autour d'un convertisseur DC/DC à résonance.

Le module PM2 permet l'obtention d'une tension continue disponible sur un bus. Ce bus continu possède un point milieu accessible qui permettra de véhiculer le courant homopolaire issu du filtre MLI du module PM3.

Le module PM3 fournit quant à lui un réseau triphasé avec neutre. Lorsque la fréquence de la tension en sortie de PM3 est de 50 Hz, le module PM2 alimente le module PM3 en 640 V continue.

Les figures ci-dessous présentent succinctement le convertisseur de bord et sa constitution.

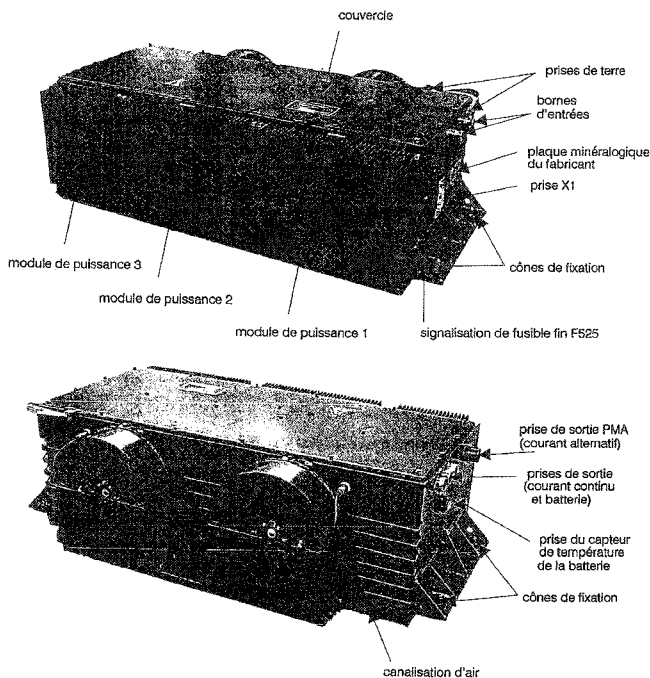


Figure 3 – Convertisseur de bord

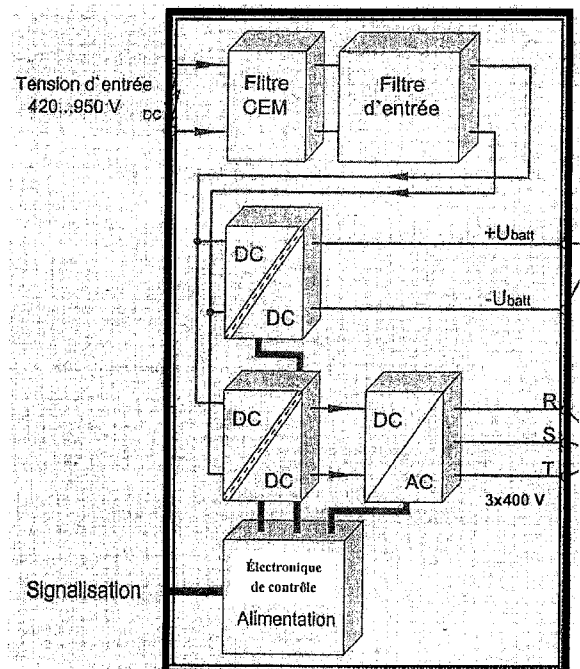


Figure 4 – Synoptique du convertisseur²

² Reproductions avec l'autorisation de la SEMITAN

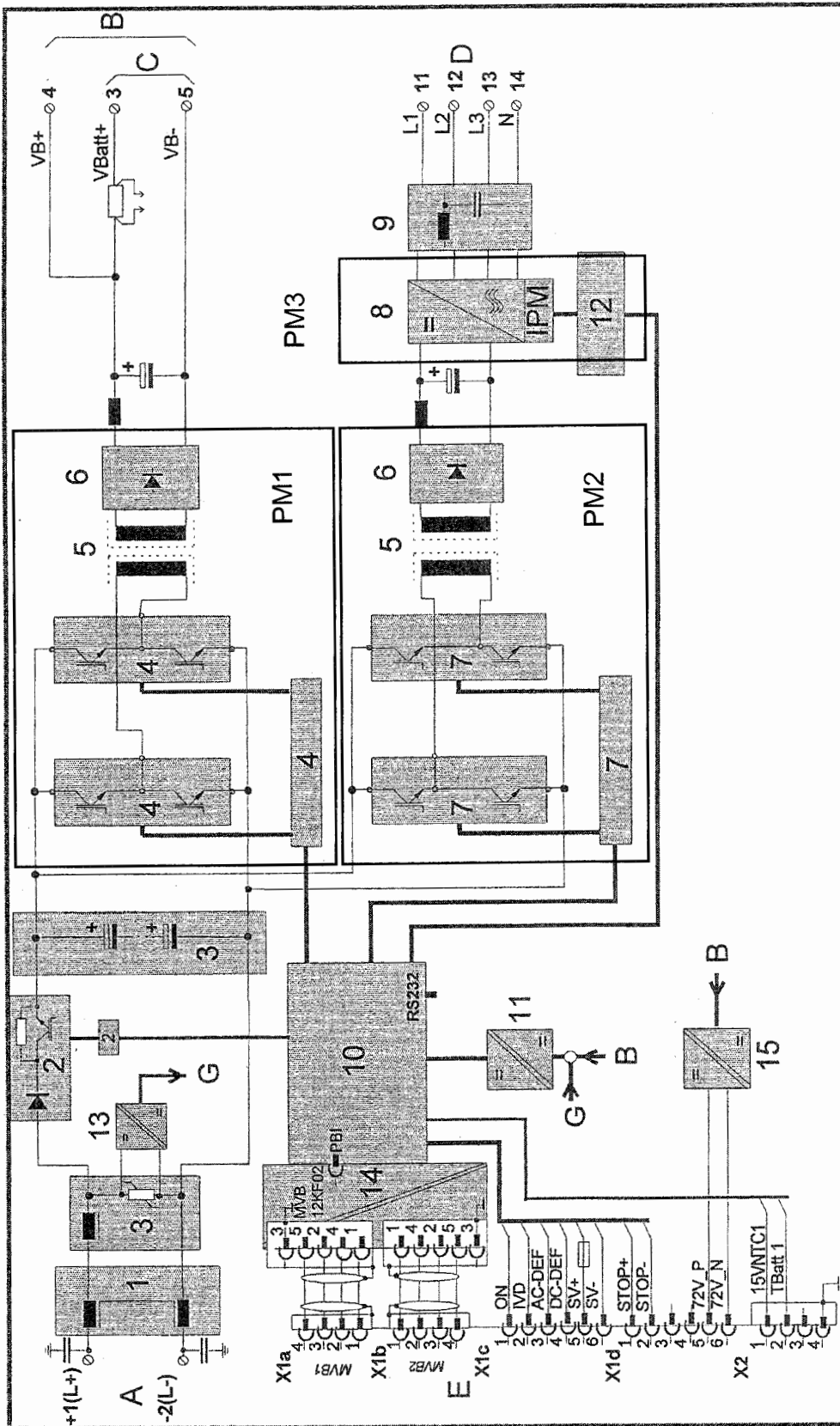


Figure 5 – Schéma de principe du convertisseur³

³ Reproduction avec l'autorisation de la SEMITAN

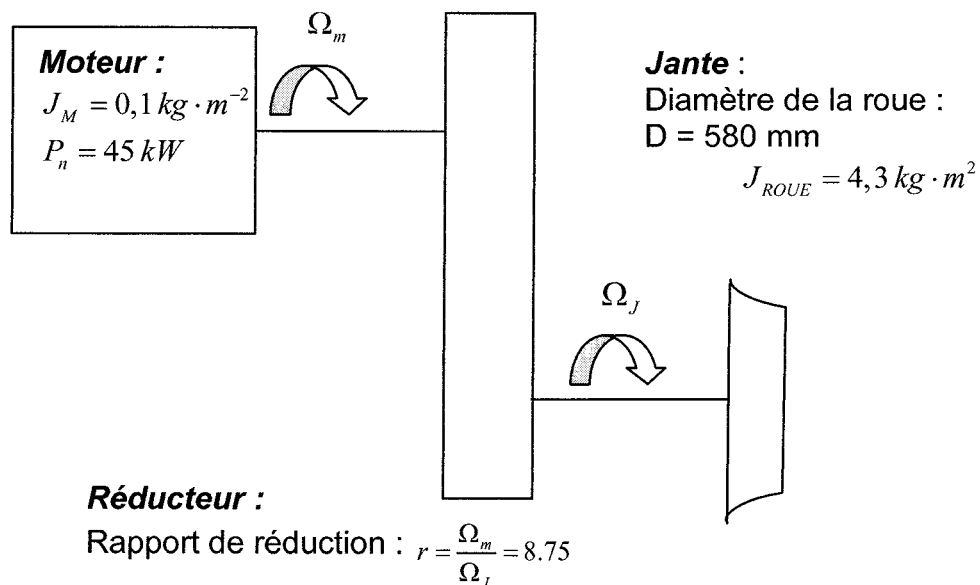
Légende de la **Figure 5** :

- 1** – Filtre CEM
 - 2** – Circuit de pré-charge
 - 3** – Filtre d'entrée
 - 4** – Partie du module de puissance PM1 pour la production de la tension DC
 - 5** – Transformateur haute-fréquence pour transmission de puissance avec séparation galvanique
 - 6** – Redresseur
 - 7** – Partie du module de puissance PM2 pour la production de la tension de circuit intermédiaire
 - 8** – Module de puissance PM3 : unité de l'onduleur triphasé
 - 9** – Filtre de sortie
 - 10** – Système de contrôle avec module MVB
 - 11** – Alimentation de l'électronique
 - 12** – Commande de l'inverseur
 - 13** – Alimentation de secours
 - 14** – Carte de couplage
 - 15** – Alimentation 72V
-
- A** – Tension d'entrée
 - B** – Tension de sortie DC
 - C** – Tension de sortie charge batterie
 - D** – Tensions de sorties triphasées
 - E** – Entrées et sorties de signalisation, de contrôle et de raccordement MVB sur le bus de communication du véhicule.

PARTIE A – Etude Mécanique Générale

1 – PRESENTATION

Nous allons dans cette partie étudier le comportement mécanique d'une rame de tramway, afin de valider le dimensionnement des moteurs de traction, et de s'assurer en particulier qu'ils permettront de parcourir le tracé des différentes lignes de la ville dans de bonnes conditions horaires. Nous vérifierons également le comportement de la rame en freinage d'urgence. Le schéma suivant précise les caractéristiques cinématiques de la chaîne de transmission :



Par ailleurs le rendement de la transmission est $\eta = 0,8$

La caractéristique couple moteur – vitesse imposé par la commande est constituée de 2 zones :

Zone 1 : de la vitesse nulle à une vitesse V_0 , le couple moteur C_m est constant,

Zone 2 : de V_0 à $V_{\max} = 70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ la commande se fait à puissance constante.

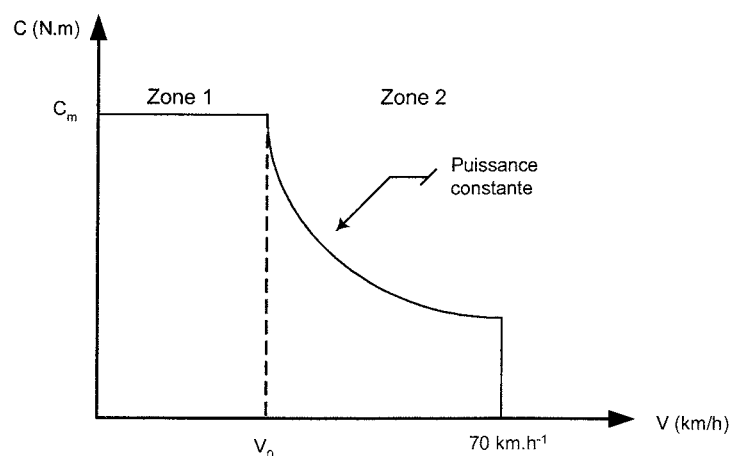


Figure A1 – Caractéristique Couple-Vitesse

Le couple maximum C_m transmissible est limité par le coefficient d'adhérence rail-roue λ . Ce coefficient dépend grandement de l'état de la voie :

- $\lambda = 0.25$, sur une voie parfaitement propre,
- $\lambda = 0.10$ sur une voie humide et grasse.

Il existe des dispositifs de sablage de la voie, intégrés devant chaque roue motrice de la rame qui permettent en toute circonstance de garantir un coefficient d'adhérence maximum durant la phase de démarrage du convoi. En revanche ce dispositif n'est pas utilisable durant les phases de freinage.

QA1 – Déterminer l'effort maximal que l'on peut exercer sur la jante d'une roue motrice du tramway. En déduire le couple moteur maximum au démarrage. Que se passe-t-il si le couple de démarrage dépasse ce couple moteur C_m ?

QA2 – Dans la phase de fonctionnement à puissance constante, le moteur fonctionne à sa puissance nominale. Quelle est la vitesse de la rame lorsque la commande passe du fonctionnement à couple constant au fonctionnement à puissance constante ? Quel est le couple moteur lorsque la vitesse du tramway atteint 70kmh^{-1} ? Tracer à partir des résultats précédents l'allure de la caractéristique de commande sur le document réponse REPAl.

Lorsqu'il se déplace sur un tronçon de ligne horizontal, le tramway doit vaincre une force appelée résistance à l'avancement. Cette action mécanique est modélisable par la relation suivante :

$$F_T = A + Bv + Cv^2$$

La constante C rend compte des actions aérodynamiques sur la caisse du convoi, et compte tenu de la vitesse limitée du tramway, ce terme en v^2 est négligeable devant les deux autres. Le terme constant A généralement appelé roulement pur ne dépend que de la charge des essieux. Enfin le terme B prend en compte la qualité de la voie et la stabilité de la rame. Nous supposons en première approximation qu'il est constant. Nous appellerons F_1 l'action mécanique due au roulement pur et F_2 l'action mécanique due à la qualité de la voie sur une roue motrice. Les valeurs numériques de A et B sont obtenues à partir de relevés expérimentaux :

$$A = M \cdot g \cdot \mu, \text{ où } M \text{ représente la masse de la rame, et } \mu = 0,01$$

et $B = 50\text{N.m.s}^{-1}$.

QA3 – Déterminer les expressions littérales de F_1 et F_2 . En déduire l'expression couple $C_T(v)$ nécessaire pour vaincre la résistance à l'avancement ramenée sur l'arbre d'un moteur où v est exprimée en km.h^{-1} . Donner les valeurs numériques de $C_T(0)$ et de $C_T(70)$. Tracer la caractéristique correspondante sur le document réponse REPAl.

QA4 – La pente maximale que l'on rencontre sur le tracé des lignes est de 6%. Déterminer l'action F_3 due à la déclivité de la ligne. En déduire le couple C_3 ramené sur l'arbre d'un moteur nécessaire pour vaincre cette action. Donner l'expression du couple résistant total, $C_{T6\%}$. Tracer la caractéristique correspondante sur le document réponse REPAl.

QA5 – Déduire de ce qui précède la vitesse de la rame sur un tronçon de ligne en palier, puis sur un tronçon de ligne présentant une pente de 6%.

Compte tenu du profil de la ligne, il est nécessaire de s'assurer que la rame de tramway sera en mesure de démarrer quelque soit l'endroit de son arrêt. Nous allons vérifier que la motorisation choisie permet de disposer d'un couple accélérateur suffisant pour démarrer en toute circonstance.

QA6 – Déterminer le moment d'inertie $J_{\text{RAMÉ}}$ de la rame en translation ramené sur l'axe d'une jante. En déduire l'inertie totale J_T du tramway ramenée sur l'arbre moteur.

QA7 – En appliquant le principe fondamental de la dynamique déterminer le couple moteur accélérateur nécessaire sur un profil en palier pour assurer l'accélération au démarrage de $1,15\text{ms}^{-2}$ comme indiqué dans le cahier des charges. Cette accélération est-elle compatible avec le résultat de la question QA1 ?

QA8 – Peut-on assurer la même accélération dans le cas où le profil présente une pente à 6% ? Quelle est l'accélération maximum admissible dans cette configuration ?

Pour terminer cette étude mécanique, nous allons déterminer les performances limites en cas de freinage d'urgence.

QA9 – Le freinage d'urgence consiste à bloquer toutes les roues de la rame. Dans ces conditions, combien de temps faut-il pour que la rame s'immobilise lorsqu'elle est lancée à 70 km.h^{-1} ? Que vaut l'accélération pendant cette phase ? Est-ce conforme au cahier des charges ?

QA10 – Déterminer la distance maximum d'arrêt de la rame sur un tronçon horizontal. Quelle(s) solution technique peut-on mettre en œuvre pour améliorer la distance de freinage d'urgence ?

Exploitation pédagogique

QP : On souhaite aborder les notions de **réversibilité de la chaîne d'énergie** d'un système en classe de terminale STI Génie électrotechnique.

En utilisant le contexte industriel que constitue le tramway Nantais, proposer une ou plusieurs séquences pédagogiques en précisant le ou les support(s) utilisé(s) ainsi que la raison de votre choix et tout le matériel nécessaire à la séquence. Vous veillerez particulièrement à identifier les objectifs visés par chacune des séances, et à préciser les stratégies pédagogiques mises en œuvre pour les atteindre.

1 – PRESENTATION DU MODULE PM2 AU SEIN DU CVS

1.1 Organes connectés au module PM2

Le module PM2 – **Figure B.1** - est connecté au réseau 750V par le biais d'un bus de condensateurs et du module PM1 qui assure la précharge du bus continu. Le module PM2 fournit une tension continue avec point milieu accessible au module PM3. Les ordres de commandes de PM2 sont issus de la carte de commande électronique. Des mesures ont montré que :

- le module PM2 fournit une tension de 640 V lorsque le module PM3 fournit une tension alternative avec une fréquence du fondamental de 50 Hz
- le module PM2 fournit une tension de 720 V lorsque le module PM3 fournit une tension alternative dont la fréquence du fondamental est de 60 Hz.

1.2 Caractéristiques du module

- La structure retenue est un convertisseur continu-continu de type onduleur-redresseur.
- L'utilisation d'un onduleur permet de monter en fréquence pour gagner du poids pour ce système embarqué.
- La liaison entre l'onduleur et le redresseur est assurée par un transformateur.
- La technologie retenue pour les composants liés à l'onduleur est de type IGBT.
- Le redressement est assuré par des diodes.
- La structure retenue et sa commande forment une structure globale qui minimise les pertes par commutation.

2 – PRINCIPE THEORIQUE DU MODULE

2.1 Principe général.

Le module PM2 est donc construit autour d'un convertisseur continu/continu qualifié de résonant. Le schéma structurel du module – **Figure B.2** - fait apparaître un onduleur monophasé, un transformateur à 2 secondaires et 2 redresseurs connectés à un point milieu.

Dans les alimentations à résonance classiques, l'onduleur est connecté à un circuit résonant de type 'RLC'. Pour cela, on ajoute une inductance et une capacité, et la charge placée à la sortie de l'ensemble, vue à travers le transformateur et le redresseur, constitue l'élément résistif du circuit oscillant.

L'utilisation d'une alimentation à résonance plutôt qu'une alimentation à découpage classique présente l'avantage de choisir le type de commutation à réaliser, de réduire les effets électromagnétiques et les pertes dans les semi-conducteurs et d'augmenter la fréquence de fonctionnement de l'onduleur.

Cette structure nécessite cependant une augmentation de la puissance de dimensionnement et rend la régulation du courant plus délicate.

Le choix du rapport ω/ω_0 avec ω_0 la pulsation de résonance permet de choisir le type de commutation (ouverture ou fermeture) que l'on peut contrôler.

Dans cette application, la charge est en fait le module PM3 et on utilise de prime abord les inductances du transformateur, les capacités de 22nF et les capacités des modules IGBT pour constituer la charge oscillante. La construction autour d'un transformateur à 2 secondaires auxquels sont connectés en série les redresseurs permet d'obtenir une tension continue avec point milieu pour le module PM3.

Les réseaux RC (résistance et condensateur) ainsi que les réseaux RCD (résistance, condensateur et diode) en sortie des redresseurs réalisent la limitation des surtensions sur le bus.

Si du schéma de la **figure B.2**, on retire les circuits limiteurs et les condensateurs en parallèle sur les cellules de commutations de l'onduleur monophasé, la structure du module PM2 correspond au montage de la **figure B.4** qualifié de push-pull que l'on étudiera par la suite.

2.2 Généralités sur les circuits de limitation.

2.2.1 Circuit 'snubber de type RC'

Ce type de circuit de limitation – **Figure B.3** - est très présent en électronique de puissance. On les retrouve surtout en parallèle des diodes afin d'améliorer les commutations.

2.2.2 Circuit 'snubber de type RCD'

Ce type de montage – **Figure B.3** - permet d'absorber les surtensions excessives que sont les pics de commutations des diodes de redressement. Le principe consiste à connecter un condensateur aux bornes du redresseur par l'intermédiaire d'une diode. Lorsque la surtension apparaît, une résistance permet de maintenir, pendant la phase de roue libre, la tension du condensateur à la valeur de la tension d'écrêtage.

2.2 Signaux mesurés sur l'onduleur monophasé.

Les formes d'ondes de la tension et du courant relevées au primaire du transformateur sont fournies à la **figure B.5**. Si on néglige le courant magnétisant, le courant primaire ou secondaire, au rapport de transformation près, peut-être considéré comme sinusoïdal au sens du premier harmonique. La tension de sortie du transformateur ou celle du primaire est formée de créneaux alternatifs dont on peut calculer le fondamental. La tension redressée que l'on peut observer à la **figure B.6** est réglable grâce à l'onduleur.

Ces premières observations font néanmoins apparaître des phases de fonctionnement à courant croissant et décroissant de pente variable et des surintensités au moment des commutations.

3 – ETUDE DU MODULE PM2

Le but de cette étude est de comprendre globalement le fonctionnement de cette structure d'alimentation et de mettre en avant la prise en compte des imperfections des éléments pour retrouver les formes d'ondes observées.

L'étude porte sur le rôle des capacités aux bornes des 'interrupteurs' de puissance de l'onduleur et permet de qualifier la résonance du système par rapport à des structures classiques.

En effet, la structure retenues s'accompagne d'une commande particulière des 'interrupteurs' de puissance utilisant des temps morts au moment de certaines commutations.

Pour chaque structure étudiée, on mettra en évidence ces limites pour comprendre les choix particuliers qui ont conduit à cette structure dite 'Zéro Voltage Switching' du module PM2.

3.1 Etude d'un dévolteur classique.

Le module PM2 étant d'abord une alimentation à découpage, le premier montage qui nous servira de base est représenté à la **figure B.7**. Il s'agit d'un montage dévolteur. La cellule de commutation est constituée d'un transistor (exemple : IGBT, MOS) qui est à amorçage et blocage commandé et d'une diode qui est à amorçage spontané et blocage spontané.

On note que l'inductance L en série avec le condensateur C_s et la résistance R_s constitue bien une source de courant d'un point de vue électronique de puissance. La règle de connexion de sources de nature différente est alors respectée.

Les hypothèses faites pour faire l'étude de ce montage sont les suivantes :

- On ne considère que le fonctionnement en régime périodique.
- On ne considère que le régime de conduction continu ($i_L > 0$).
- La composante alternative de $v_s(t)$ notée $v_{s\text{ alt}}$, est négligeable devant la valeur moyenne de $v_s(t)$, notée $\langle V_s \rangle$: $v_s(t) = \langle V_s \rangle + v_{s\text{ alt}}(t) \cong \langle V_s \rangle \cong V_s$
- L est une inductance pure et C_s un condensateur parfait.
- Les interrupteurs T et D sont idéaux (temps de commutation nul, résistance statique et dynamique nulles).
- On donne les valeurs numériques suivantes : $E = 100 \text{ V}$, $f_d = 20 \text{ kHz}$ et $R_s = 5 \Omega$

Phases de fonctionnement :

La période de découpage est notée T_d . On distingue 2 phases de fonctionnement :

- Phase 1 : $t \in [0, t_f]$, le transistor T est passant et la diode D est bloquée.
- Phase 2 : $t \in [t_f, T_d]$, le transistor T est bloqué et la diode D est passante.

QB1 - Tracer, sur le document réponse REPBI, pour une période de découpage T_d et pour $\alpha = 0,4$ les allures de $v_L(t)$ et $i_L(t)$. Justifier le tracé de $i_L(t)$. On note $\alpha = t_f / T_d$, le rapport cyclique.

QB2 – Déterminer l'expression analytique de $\langle V_L \rangle$, valeur moyenne de $v_L(t)$, en fonction de E , V_s , et α .

QB3 – En déduire les expressions analytiques de V_s et I_s , tension et courant de charge. Application numérique : Déterminer la valeur de α pour obtenir $V_s = 40 \text{ V}$.

QB4 – Déterminer, en fonction de E , T_d , L et α , l'expression de l'ondulation crête à crête Δi_L de $i_L(t)$. Pour $\alpha = 0,4$, calculer la valeur de L pour obtenir $(\Delta i_L)_{\max} = 1 \text{ A}$.

QB5 – Déterminer la valeur du rapport cyclique pour laquelle l'ondulation du courant est maximum. Préciser l'expression de cette ondulation maximale.

QB6 – Déterminer l'expression analytique de $\langle I_L \rangle$, valeur moyenne de $i_L(t)$, en fonction de α , E et R_s . Calculer $\langle I_L \rangle$ pour $\alpha = 0,4$. En déduire les valeurs numériques de $I_{L\max}$ et $I_{L\min}$.

QB7 – Tracer, sur le document réponse REPB1 pour $\alpha = 0,4$ et pour une période de découpage T_d , les graphes de $v_T(t)$ et $i_T(t)$, tension et courant du transistor T et $v_D(t)$ et $i_D(t)$, tension et courant de la diode D .

QB8 – Tracer, sur le document réponse REPB1 pour $\alpha = 0,4$, $i_C(t)$ le courant dans le condensateur C .

Jusqu'ici nous avons négligé l'ondulation de tension $v_{s\text{ alt}}$ qui bien que faible, existe cependant.

QB9 – Dans le cas où le condensateur est considéré comme parfait, déterminer l'expression analytique de l'ondulation de tension $v_{s\text{ alt}}$ en fonction de Δi_L , f_d et C_s . On pourra s'aider du tracé de $v_{s\text{ alt}}$ et de celui de $i_C(t)$.

Une grandeur importante pour caractériser ce type de montage est la puissance installée en silicium, $P(\text{Si})$. Pour un semi-conducteur donné, elle correspond généralement au produit $\hat{V}\hat{I}$ des valeurs crêtes de la tension et du courant que doit supporter le semi-conducteur.

Un critère utilisé pour comparer les différentes structures de convertisseurs de la même catégorie que le dévolteur, est le facteur d'utilisation du silicium, que l'on peut noter F_u défini par :

$$F_u = \frac{P(\text{Si})}{P_a}, \text{ avec } P_a, \text{ la puissance absorbée par le convertisseur.}$$

QB10 – En négligeant l'ondulation de courant pour $i_L(t)$ et à partir des courbes tracées précédemment, déterminer les expressions de $P(\text{Si})$, P_a et $F_u(\text{Si})$ pour le dévolteur.

QB11 – Tracer sur le document réponse REPB2, la caractéristique $F_u(\alpha)$ pour α variant de 0 à 1.

QB12 – Pour comparer le montage dévolteur, au montage survolteur et au dévolteur-survolteur, on donne les facteurs d'utilisation du silicium de ces 2 derniers montages : pour le survolteur,

$$F_u(\alpha) = \frac{1}{1-\alpha} \text{ et pour le survolteur-dévolteur, } F_u(\alpha) = \frac{1}{\alpha(1-\alpha)}. \text{ Tracer sur le document réponse}$$

REPB2, la caractéristique $F_u(\alpha)$ pour α variant de 0 à 1 de ces 2 montages.

QB13 – Conclusions :

- Justifier brièvement la dénomination 'dévolteur' de ce montage.
- Préciser les éventuelles réversibilités de montage.
- Préciser la zone de fonctionnement en α dans laquelle le dévolteur est le plus mal utilisé en termes de facteur d'utilisation.
- Comment se situe le montage dévolteur par rapport aux 2 autres montages en termes de facteur d'utilisation.
- Préciser le principal inconvénient de la liaison ohmique entre l'entrée et la sortie du montage.

3.2 Etude du montage Forward.

Contraint d'isoler galvaniquement la liaison ohmique entre l'entrée et la sortie du montage précédent, il faut modifier la structure précédente. Le terme 'isolé galvaniquement' indique qu'il n'y a pas de liaison ohmique entre la source de tension fixe en entrée et la source de tension réglable en sortie. Cette isolation galvanique est réalisée par **un transformateur** fonctionnant à fréquence relativement élevée (quelques dizaines de kilohertz).

Les applications de ces alimentations sont multiples : alimentation des circuits de commande des drivers des semi-conducteurs de puissance (MOS, IGBT ...), alimentations embarquées ...

On dénombre 3 principales alimentations à découpage isolées galvaniquement : le montage Flyback, le montage Forward et le montage Push-Pull.

Dans le cadre de cette étude, on se limitera à l'étude du montage Forward et on introduira le montage Push-Pull.

3.2.1 Le transformateur industriel.

Le schéma électrique équivalent du transformateur monophasé industriel (alimentation par une tension sinusoïdale 50 Hz) est représenté à la **figure B.8**.

On note respectivement :

- R_1 et R_2 les résistances des bobinages primaire et secondaire.
- L_{f1} et L_{f2} les inductances de fuite.
- L_{h1} l'inductance magnétisante.
- R_F la résistance qui modélise les pertes fer dans le circuit magnétique.

Les bornes homologues sont repérées par le point •.

Le transformateur parfait est tel que : $m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{v_2}{v_1} = -\frac{i_2}{i_1}$

3.2.2. Le transformateur utilisé dans les alimentations à découpage.

Bien que les principes fondamentaux restent les mêmes, les transformateurs d'alimentation à découpage et leur fonctionnement diffèrent sensiblement des transformateurs industriels classiques utilisés en électrotechnique : tensions de forme carrée (ou rectangulaire), courants triangulaires avec éventuellement une composante continue, fréquence de fonctionnement élevée, réalisation technologique (utilisation de matériaux type ferrite pour le circuit magnétique, conducteurs multibrins isolés : fils de Litz), enroulements multiples, possibilité d'ouverture d'un des enroulements lorsqu'un semi-conducteur se bloque, etc...

Pour comprendre le fonctionnement des différentes structures, nous raisonnerons tout d'abord avec un modèle simplifié du transformateur :

- Il n'y a pas de fuites magnétiques.
- La résistance électrique des enroulements est négligeable.
- Les pertes fers sont négligées.

La perméabilité du circuit magnétique n'est pas infinie et la réluctance ne peut pas être considérée comme nulle. Le schéma électrique équivalent du transformateur utilisé pour la compréhension du fonctionnement des alimentations à découpage est représenté à la **figure B.9**.

La prise en compte des inductances de fuite sera indispensable dès lors qu'on s'intéressera aux contraintes sur les semi-conducteurs de puissance.

L'introduction du transformateur dans les alimentations à découpage se fait de 2 manières :

- En l'utilisant comme une inductance. On a alors une branche courant qui s'intercale de façon naturelle entre les sources de tension. On passe d'une phase de fonctionnement à une autre par l'intermédiaire de l'énergie stockée dans l'inductance magnétisante. C'est le cas de l'alimentation Flyback
- En le faisant fonctionner effectivement en transformateur. La puissance $p(t)$ est transmise instantanément du primaire au secondaire. C'est le cas des alimentations Forward et symétrique.

3.2.3. Le montage Forward

C'est la structure du convertisseur dévolteur, où on insère un transformateur à 2 enroulements dans le convertisseur.

Comme le transformateur ne peut fonctionner qu'avec des tensions et courants alternatifs, il ne peut être insérer qu'à un endroit où le potentiel varie, c'est à dire au niveau du collecteur du transistor – **Figure B.10**.

La démagnétisation complète du circuit magnétique est assurée par la diode D_3 et la diode zener D_z .

Les hypothèses faites pour faire l'étude de ce montage sont les suivantes :

- On ne considère que le fonctionnement en régime périodique et en démagnétisation complète.
- On ne considère que le régime de conduction continu ($i_L > 0$).
- La composante alternative de $v_s(t)$ est négligeable devant la valeur moyenne de $v_s(t)$.

$$v_s(t) = \langle V_s \rangle + v_{s\text{ alt}}(t) \cong \langle V_s \rangle \cong V_s$$

- L est une inductance pure et C un condensateur parfait.
- Les interrupteurs T et D sont idéaux (temps de commutation nul, résistance statique et dynamique nulles).
- Les pertes Joules et les pertes fer dans le transformateur sont négligées.
- La tension zener est notée v_{DZ} .
- Le rapport de transformation m sera pris égal à 1.

Phases de fonctionnement :

La période de découpage est notée T_d . On distingue 3 phases de fonctionnement :

- Phase 1 : $t \in [0, t_f = \alpha T_d]$, le transistor T et la diode D_2 sont passants. Les diodes D_1 , D_3 et D_Z sont bloquées. On note $\alpha = t_f / T_d$, le rapport cyclique.
- Phase 2 : $t \in [t_f, t_e]$, le transistor T et la diode D_2 sont bloqués. Les diodes D_1 , D_3 et D_Z sont passantes. t_e est défini par $i_{10}(t_e) = 0$. Ce temps sera pris égal à $0,4 T_d$.
- Phase 3 : $t \in [t_e, T_d]$, seule la diode D_1 est passante.

QB14 - Tracer, sur le document réponse REPB3, pour une période de découpage T_d et pour $\alpha = 0,4$ les allures de $v_1(t)$ la tension au primaire du transformateur et $i_{10}(t)$ le courant magnétisant. Justifier le tracé de $i_{10}(t)$.

QB15 - Tracer, sur le document réponse REPB3, pour une période de découpage T_d et pour $\alpha = 0,4$ les allures de $v_L(t)$, $i_L(t)$ et $i_1(t)$.

QB16 - Tracer, sur le document réponse REPB3, pour une période de découpage T_d et pour $\alpha = 0,4$ les allures de $v_T(t)$ et $i_T(t)$, tension et courant de l'interrupteur T.

QB17 – Déterminer l'expression analytique de $\langle V_s \rangle$, valeur moyenne de $v_s(t)$, en fonction de E, m et α .

QB18 – Conclusions :

- Justifier brièvement la qualité de 'dévolteur' de ce montage.
- Préciser la valeur limite de α pour que ce montage continue à fonctionner en démagnétisation complète.
- Préciser comment doit être V_{DZ} par rapport à E pour que le montage fonctionne correctement.
- En déduire le domaine d'application de type de montage.
- A quelle surtension est soumis l'interrupteur T. Proposer une variante de ce montage pour s'affranchir de ces surtensions.

3.3 Etude du montage Push-Pull.

Afin d'éviter de rajouter des éléments externes pour permettre la démagnétisation du transformateur, il suffit de l'alimenter directement par une tension alternative. C'est ce que propose la structure push-pull – **Figure B.11**.

Par rapport au montage 'Forward' précédent, on supprime la diode zener, mais on augmente le nombre d'interrupteurs.

Pour obtenir une tension de sortie continue avec un point milieu, le transformateur possède 2 enroulements secondaires. Le redressement de chaque enroulement secondaire est de type simple alternance.

La stratégie de commande des transistors de l'onduleur est indiquée à la **figure B.12**. Les temps morts éventuels entre les commandes des interrupteurs d'un même bras ne sont pour l'instant, pas pris en compte. **Dans ce cas, les intervalles de commande coïncident avec les intervalles de conduction des interrupteurs K_i .**

Etude du fonctionnement de la cellule hors-commutation

Les composants de type diode et transistor seront considérés comme parfaits. Ils seront assimilés à de simples interrupteurs.

La charge en sortie du pont redresseur structure RLC est pour l'instant assimilée à une source de courant parfaite : $i_s(t) = I_s$.

Le transformateur est considéré comme parfait et on néglige le courant magnétisant. Le rapport de transformation sera supposé égal à 1.

Sur le document réponse REPB4, pour une période de découpage T_d et pour $\alpha = 0,25$.

QB19 - Tracer l'allure de la tension $v_1(t)$ au primaire du transformateur, de la tension $v_2(t)$ au secondaire du transformateur et de la tension $v_{red}(t)$.

QB20 - Tracer l'allure du courant $i_1(t)$ et du courant $i_2(t)$ au secondaire du transformateur portant la diode D5.

QB21 - En déduire l'allure des tensions $v_{K1}(t)$ et $v_{K3}(t)$ ainsi que celle du courant $i_{K1}(t)$ dans l'interrupteur K1. $v_{K1}(t)$ est la tension aux bornes de l'interrupteur K1 composé du transistor T1 et de la diode D1.

3.4 Etude du montage réel.

3.4.1. La structure de base

Nous allons dans un premier temps étudier le fonctionnement du montage de la **figure B.4** hors commutations. Le montage est toujours du type push-pull, mais le redressement au secondaire se fait en réalité avec 4 diodes dans une structure simple de type PD2 – **Figure B.4**.

Les composants de type diodes et transistors seront considérés comme parfaits. Ils seront assimilés à de simples interrupteurs.

La stratégie de commande des transistors de l'onduleur est indiquée à la **figure B.12**. Les temps morts éventuels entre les commandes des interrupteurs d'un même bras ne sont pour l'instant, pas pris en compte. Dans ce cas, les intervalles de commande coïncident avec les intervalles de conduction des interrupteurs K_j .

La charge en sortie du pont redresseur – structure RLC + Module PM3 - est pour l'instant assimilée à une source de courant parfaite : $i_s(t) = I_s$.

Le transformateur est considéré comme parfait et on néglige le courant magnétisant. Le rapport de transformation sera supposé égal à 1.

Les allures des tensions et des courants obtenues avec ce montage sont données dans le document ressource DRB1.

QB22 - Justifier les allures de $v_1(t)$, $v_{K1}(t)$ et $v_{K3}(t)$ obtenues pour une période de découpage T_d et pour $\alpha = 0,25$. On note $v_{K1}(t)$ la tension aux bornes de l'interrupteur K1 composé du transistor T1 et de la diode D1.

QB23 – Justifier les intervalles de conduction des interrupteurs K_1 à K_4 .

3.4.2. Prise en compte des imperfections de la ligne et du transformateur

La distance qui sépare les modules PM1 et PM2 de la prise d'énergie et le fait que le transformateur du module PM2 ne soit pas parfait, font que le primaire du transformateur présente une inductance de ligne ou de fuite non négligeable.

Cette inductance est de valeur faible mais suffisante pour que le courant au primaire du transformateur ne présente pas de discontinuité.

Les temps morts sont toujours négligés.

La nouvelle allure du courant au primaire est donnée sur le document ressource DRB2. Le courant magnétisant est négligé devant le courant de sortie de l'onduleur.

Justifier, d'après le document ressource, pour une période de découpage T_d et pour $\alpha = 0.25$, l'allure des courbes suivantes :

QB24 - $v_I(t)$, $v_{K1}(t)$ et $v_{K3}(t)$. On note $v_{K1}(t)$ la tension aux bornes de l'interrupteur $K1$ composé du transistor $T1$ et de la diode $D1$. Précisez les intervalles de conduction des interrupteurs K_1 à K_4 .

QB25 - $i_{D5}(t)$ et $i_{D6}(t)$, le courant dans les diodes $D5$ et $D6$. Mettre en évidence le phénomène d'empiètement.

QB26 - la tension $v_{red}(t)$ ainsi obtenue et le courant $i_{K1}(t)$.

QB27 - Justifier le séquençement des commutations D_1-T_1 et T_1-T_2 , ainsi que les intervalles de conduction de la diode D_1 et du transistor T_1 au sein de l'interrupteur K_1 .

QB28 - Exprimer la valeur moyenne de la tension redressée en fonction de E , T_d , α et t_r . En déduire la valeur approximative de la tension E pour obtenir la tension souhaitée à l'entrée du module PM3. On pourra négliger la valeur de t_r .

QB29 – Conclusions :

- Justifier brièvement la qualité de 'dévolteur' de ce montage.

3.4.3. Prise en compte des imperfections de la charge

La charge en sortie du redresseur est désormais modélisée par un ensemble 'RLC' conforme au schéma de la **figure B.2**. L'inductance L limite l'ondulation à la fréquence souhaitée entre I_{max} et I_{min} . Le condensateur C assure en sortie du pont redresseur une tension parfaitement continue. On négligera l'ondulation de la tension de sortie.

Les temps morts sont toujours négligés.

Les allures des courants et des tensions nécessaires à l'étude de ces imperfections sont précisées sur le document ressource DRB3. Le courant magnétisant est négligé devant le courant de sortie de l'onduleur. L'allure de la tension en sortie de l'onduleur est également précisée.

QB30 – Justifier les tracés des courants dans les diodes D_5 et D_6 du redresseur et le courant $i_1(t)$ au primaire du transformateur.

QB31 – Comparer ces tracés aux relevés expérimentaux et valider l'analyse précédente.

3.3.3. Etude du fonctionnement de la cellule en commutation

Nous allons maintenant étudier le fonctionnement du montage de la **figure B.4** lors d'une commutation et mettre en avant la résonance de ce montage.

La charge en sortie du redresseur est toujours modélisée par une ensemble 'RLC'.

Les temps morts ne sont plus négligés. En effet, l'étude des intervalles de conduction des différents interrupteurs fait apparaître un temps mort entre le blocage de T_1 et la mise en conduction de T_2 . La **figure B.13** illustre cette commande.

Les allures des courants et des tensions durant cette commutation sont donnés sur le document ressource DRB4.

QB32 - Justifier les intervalles de commutation au sein de l'interrupteur K_2 entre T_2 et D_2 durant la commutation.

QB33 – Conclusions :

- Commenter l'allure du courant i_1 durant la commutation. Valider son allure en fonction des commutations de l'interrupteur K_2 .
- Sous quelle tension commute l'interrupteur T_2 ? Quelles sont les conséquences pour les pertes en commutation ?
- Proposez une solution pour améliorer cela.

Pour inverser rapidement le courant au primaire du transformateur pendant la commutation et limiter la tension de commutation de T_2 , une structure à résonance est effectivement mise en place. Pour cela, on place un condensateur aux bornes de l'interrupteur K_1 qui va résonner en série avec l'inductance de fuite ou ligne au primaire du transformateur.

L'étude dans le plan de phase de ce circuit oscillant pendant la commutation K_1 - K_2 permet de dimensionner les éléments pour une commutation optimale pour un temps donné ou inversement.

L'utilisation du plan de phase est rappelée sur le **document annexe 1**.

Le schéma étudié est le schéma définitif de l'alimentation donné à la **figure B.2**.

Pour un courant moindre par rapport aux essais précédents, et pour un temps mort de $5\mu s$, les principales allures des courants et des tensions ont été relevés à la **figure B.14**.

Les grandeurs retenues pour le plan de phase sont le courant i_1 et la tension v_{K1} . La capacité aux bornes de K_1 est donnée pour 44 nF . L'inductance de fuite ou de ligne au primaire est donnée pour $10\mu H$.

QB34 - Précisez les conditions initiales v_{K10} et i_{10} du circuit oscillant étudié.

Les conditions en régime forcé v_{K1-RF} et i_{1-RF} du circuit oscillant étudié sont données pour $0V$ et $0A$.

QB35 - Tracer dans le plan de phase associé, le déplacement du point de fonctionnement. Traduire ce plan en courbes temporelles pour valider si nécessaire ce fonctionnement. En déduire la valeur de v_{K1} maximum

QB36 - Calculer la fréquence d'oscillation propre et en déduire la durée de l'inversion du courant.

Pour valider complètement l'intérêt de cette commutation résonnante, on souhaite modifier la valeur de l'inductance de fuite pour commuter l'interrupteur sous une tension minimum afin de limiter au maximum les pertes par commutation et contribuer ainsi à la réduction en taille de cette alimentation embarquée.

On souhaite donc commuter sous une tension v_{K2} de 150 V en conservant la capacité aux bornes de K1 de 44 nF.

QB37 - Pour une même variation du courant que précédemment de l'ordre de 15A, calculer la valeur de l'inductance de fuite à avoir pour commuter dans les conditions choisies.

QB38 - En déduire la fréquence d'oscillation propre du système résonnant ainsi que la nouvelle valeur du temps mort à imposer par la commande.

QB39 - Tracer l'allure de la tension $v_{K2}(t)$ durant cette commutation. Comparer à l'allure de cette tension de la figure B.14. Valider la réduction de pertes et l'intérêt de ce type d'alimentation.

PARTIE B – Figures

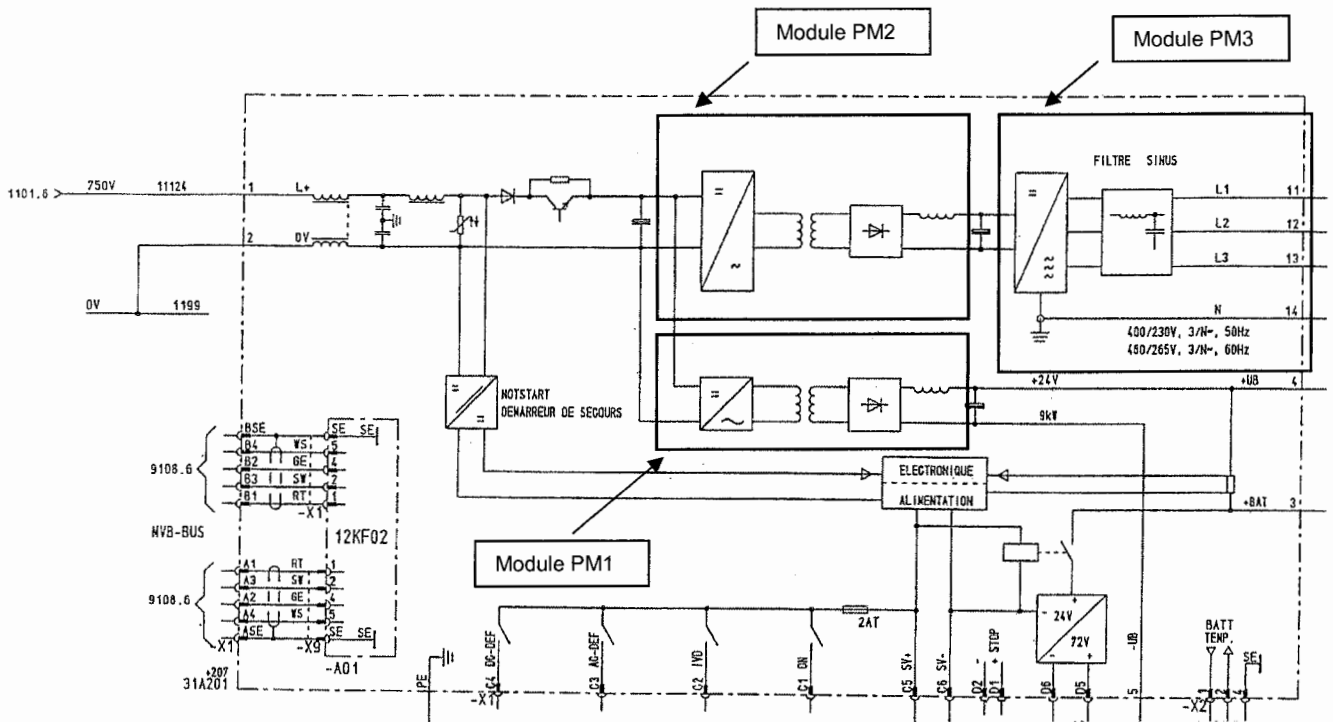


Figure B.1 – Le module PM2 au sein du CVS

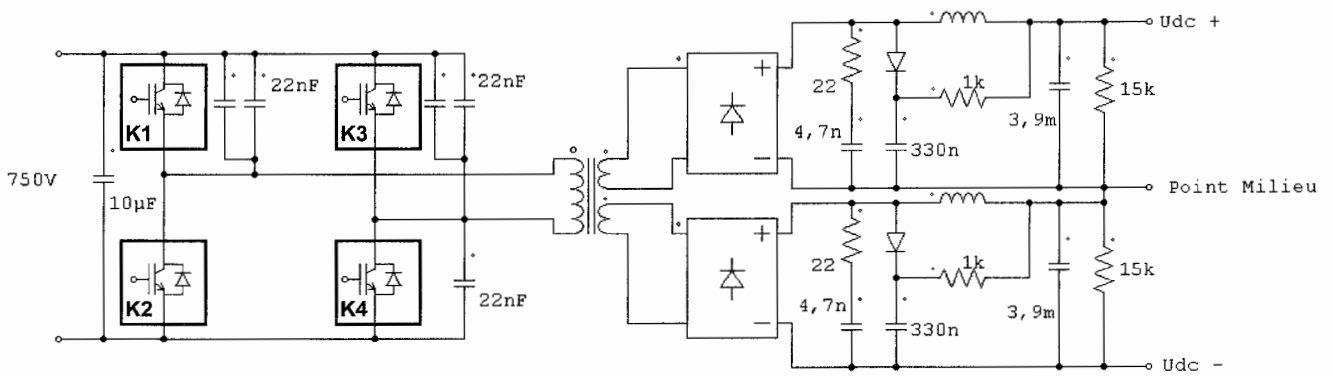


Figure B.2 – Schéma structurel de PM2

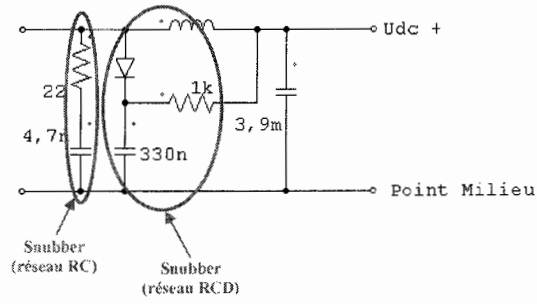


Figure B.3 – Circuit de type ‘Snubber’

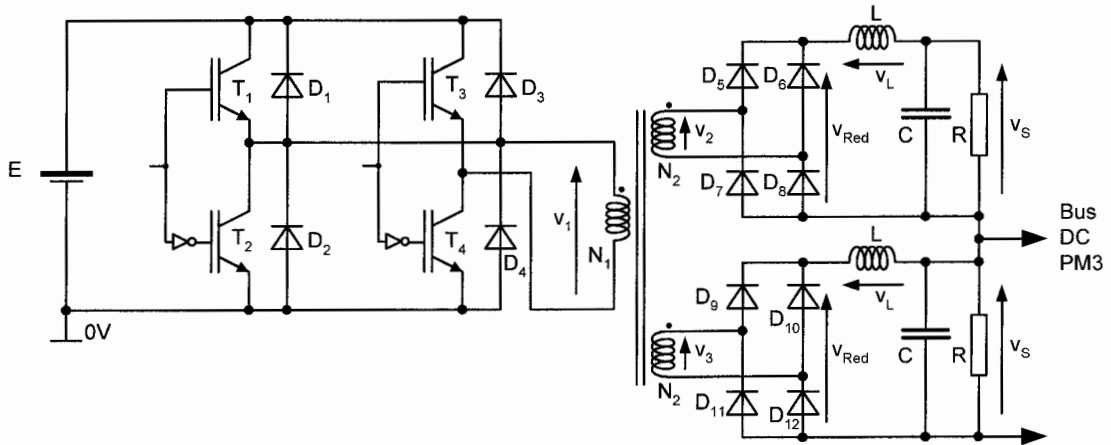


Figure B.4 – Montage Push Pull – Principe du module PM2

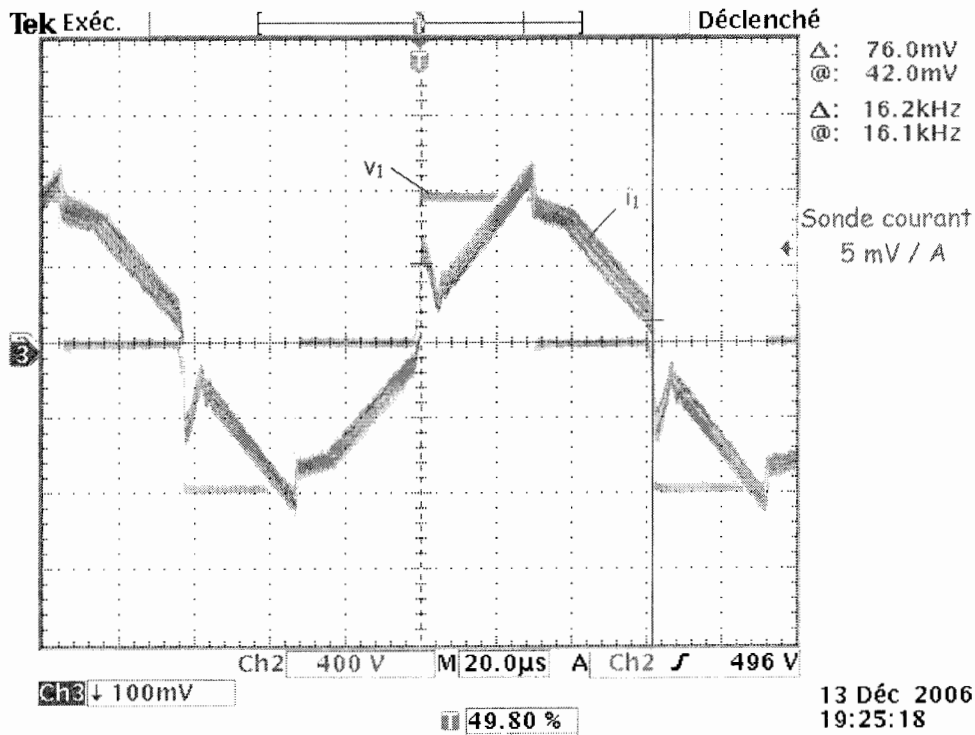


Figure B.5 – Tension et courant mesurés au primaire du transformateur

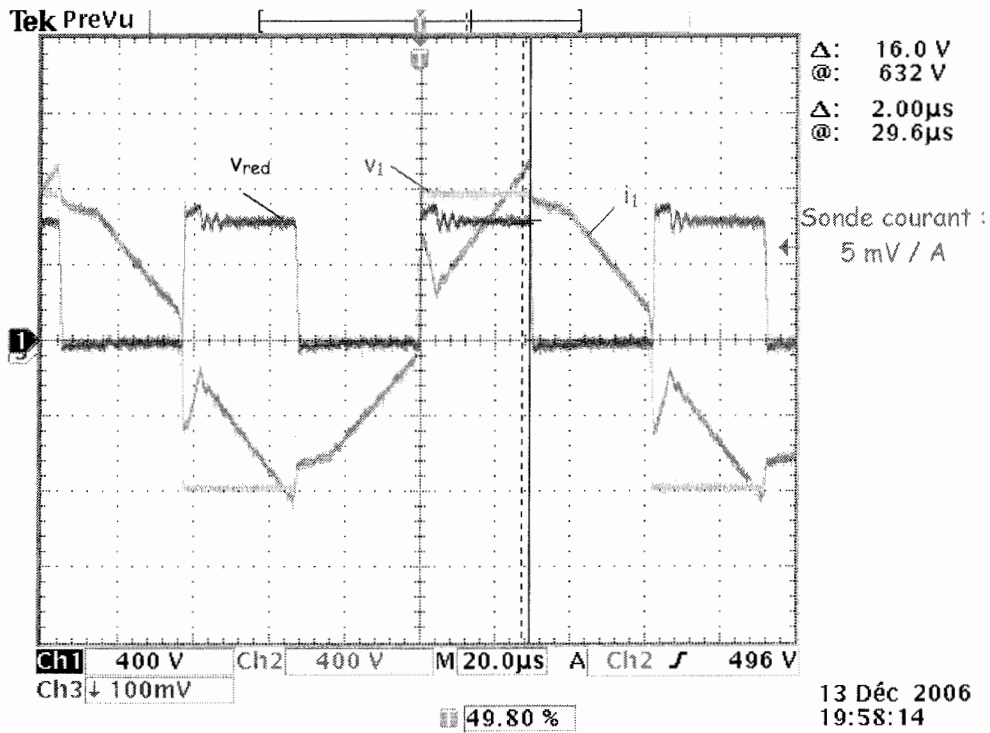


Figure B.6 – Tension, courant au primaire du transformateur et tension redressée

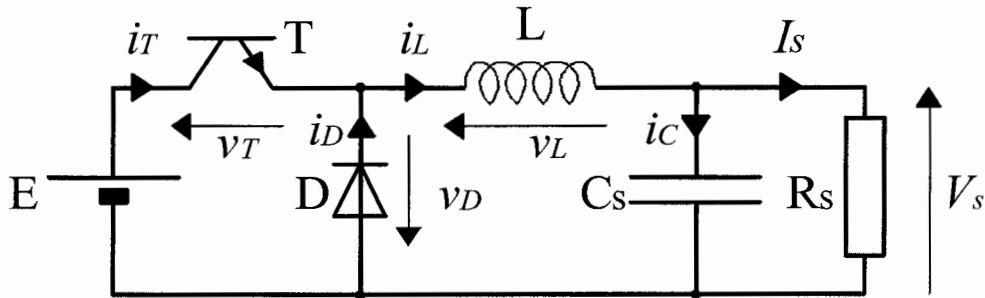


Figure B.7 – Montage dévolteur

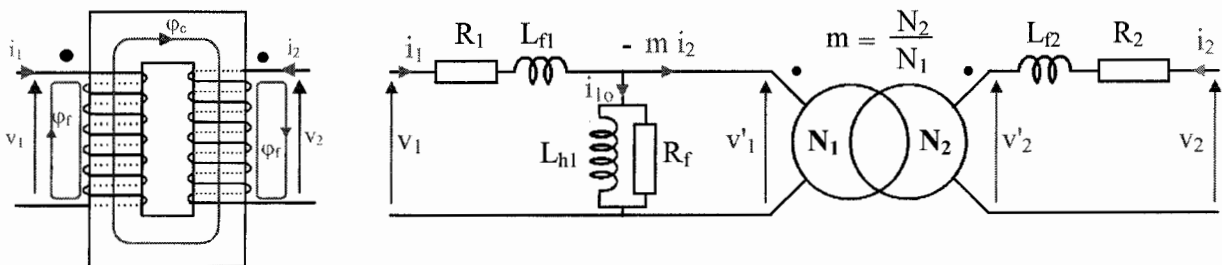


Figure B.8 – Transformateur monophasé industriel

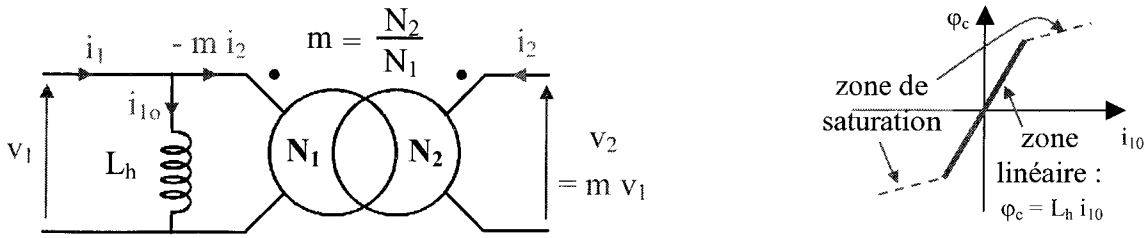


Figure B.9 – Schéma électrique équivalent pour l'étude des alimentations à découpage

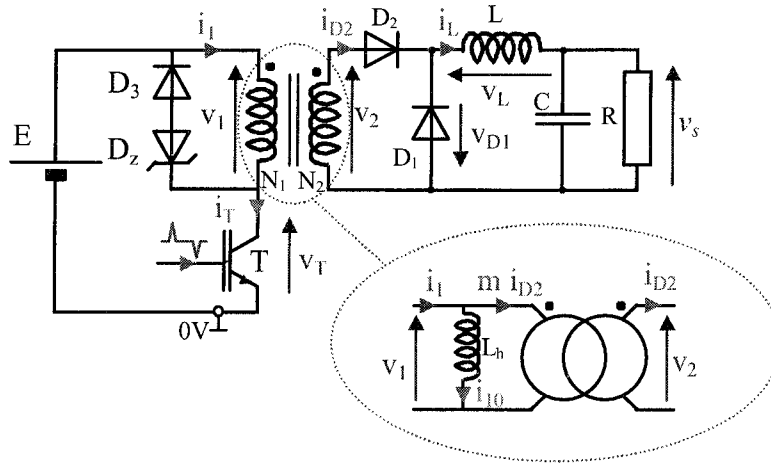


Figure B.10 – Structure du montage Forward

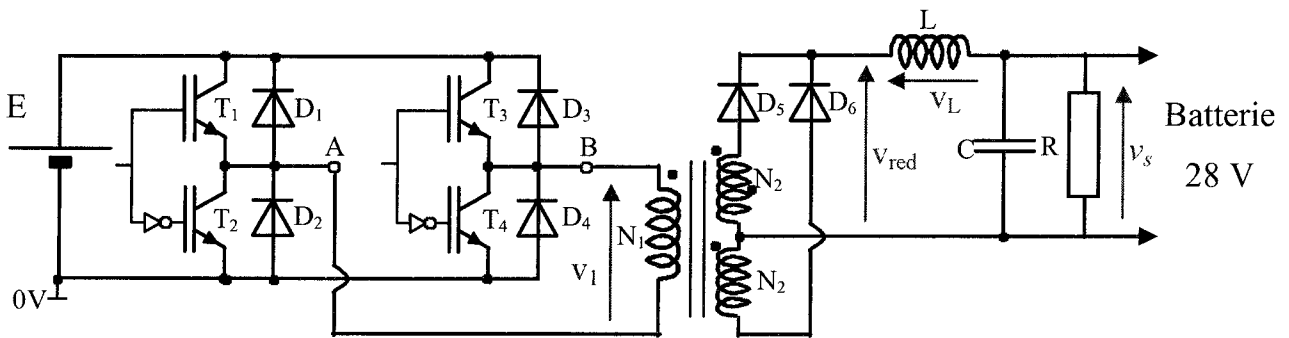


Figure B.11 – Montage Push Pull

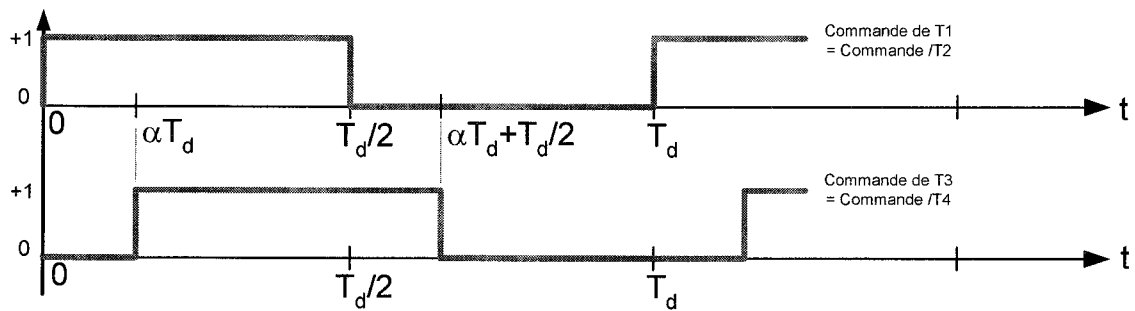


Figure B.12 – Stratégies de commande des interrupteurs

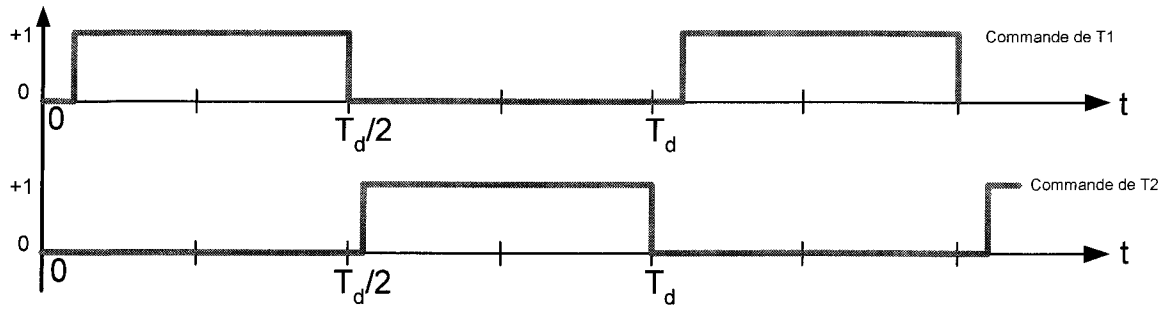


Figure B.13 – Stratégies de commande des interrupteurs avec temps morts

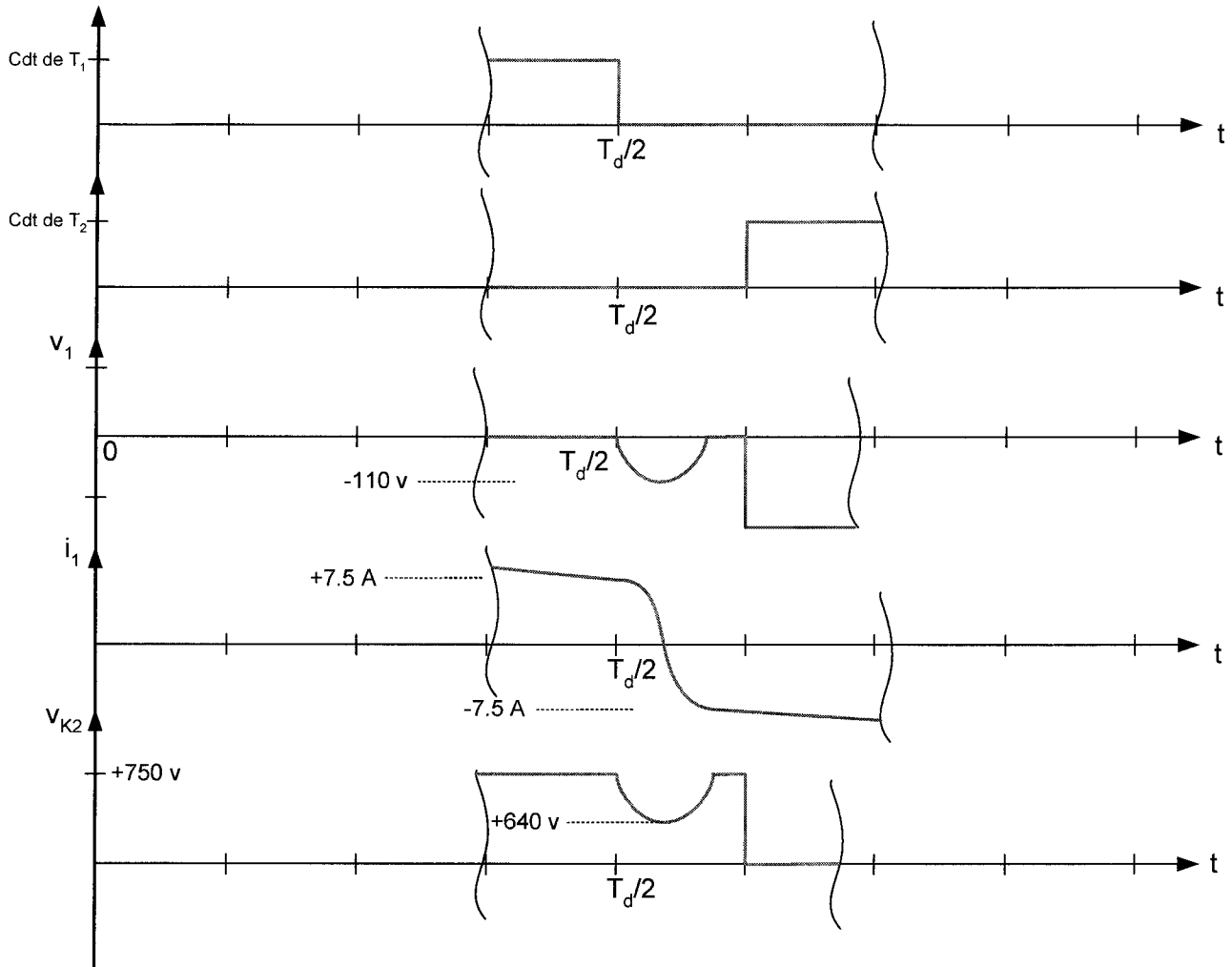


Figure B.14 – Signaux durant la commutation résonnante K1-K2