

# Génie électrique

## Devoir Surveillé : N°3

Dans le cas où un(e) étudiant(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.

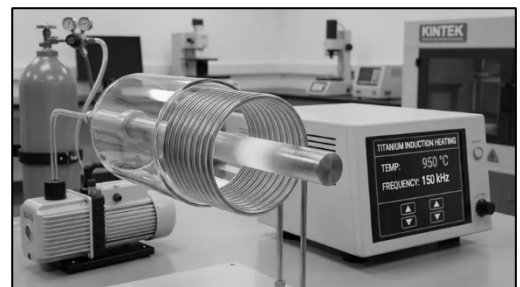
- L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire est rigoureusement interdit.
- Il est rappelé aux candidats que la qualité de la rédaction, la clarté et la précision des explications entreront pour une part importante dans l'appréciation des copies.

## Chauffage par induction

### A- Présentation :

Pour durcir une pièce métallique (arbre, denture, portée...), on cherche à améliorer sa résistance à l'usure et au matage. Le principe du traitement est de chauffer rapidement la zone utile, le plus souvent la surface, jusqu'à une température élevée, puis de réaliser un refroidissement rapide. Pour les aciers, ce cycle thermique conduit à des transformations de structure : après chauffage jusqu'à l'austénitisation (en général **850 à 950 °C** selon la nuance), la trempe peut former de la martensite, beaucoup plus dure.

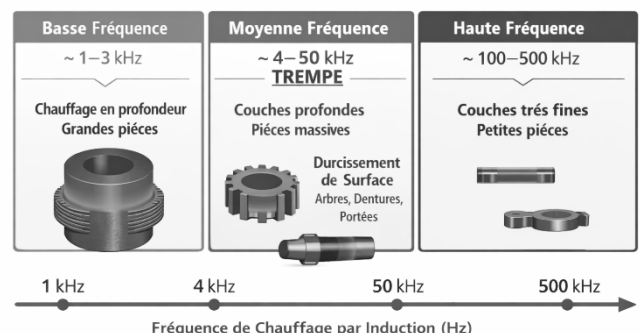
Parmi les moyens industriels pour effectuer ce chauffage localisé, le **chauffage par induction** est particulièrement efficace. Il s'agit d'un chauffage **sans contact** : une **bobine** parcourue par un **courant alternatif** crée un champ magnétique variable qui induit dans la pièce des **courants de Foucault**. Ces courants dissipent de l'énergie par **effet Joule**, ce qui chauffe la pièce de façon rapide et contrôlée. La **fréquence** influence la profondeur chauffée (effet de peau) : typiquement **3-50 kHz** pour des couches plus profondes et **50-500 kHz** pour des couches plus fines.



### B- Chauffage par induction : Fonctionnement

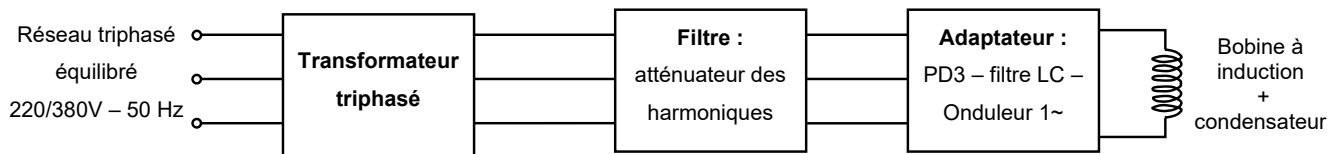
Dans une usine, une installation de **chauffage par induction** est utilisée pour traiter thermiquement des pièces métalliques afin d'améliorer leur **dureté** et leur **résistance à l'usure**. Le système est alimenté par le réseau triphasé équilibré **220/380 V – 50 Hz**. L'énergie électrique est d'abord convertie en continu par un **redresseur triphasé PD3 à diodes**, solution robuste et simple, adaptée aux environnements industriels. La tension continue obtenue est ensuite appliquée à un **filtre de lissage** (bus continu) afin de réduire les ondulations et d'assurer une alimentation plus stable pour l'étage suivant.

Enfin, un **onduleur monophasé** transforme cette énergie continue en une tension alternative à **fréquence réglable**, typiquement dans la plage **4 à 50 kHz**, utilisée en chauffage par induction de type "moyenne fréquence" pour le **durcissement de**

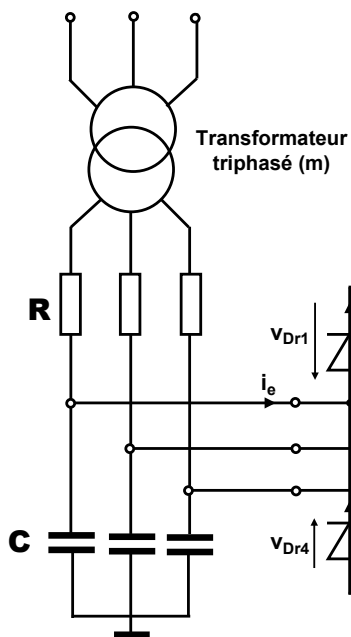


**surface** : l'augmentation de la fréquence renforce l'**effet de peau**, ce qui concentre l'échauffement près de la surface. La tension ainsi synthétisée alimente une **bobine d'induction** dont le champ magnétique variable engendre des **courants induits** dans la pièce, responsables de l'échauffement local nécessaire au traitement thermique.

Le schéma fonctionnel d'alimentation du système est illustré dans la figure suivante :



Réseau triphasé équilibré 220/380 - 50Hz



- **R** : représente la résistance des fils conducteurs.
- **C** : condensateur destiné au filtrage des harmoniques de courant issus du redresseur, ainsi qu'à la compensation de l'énergie réactive.

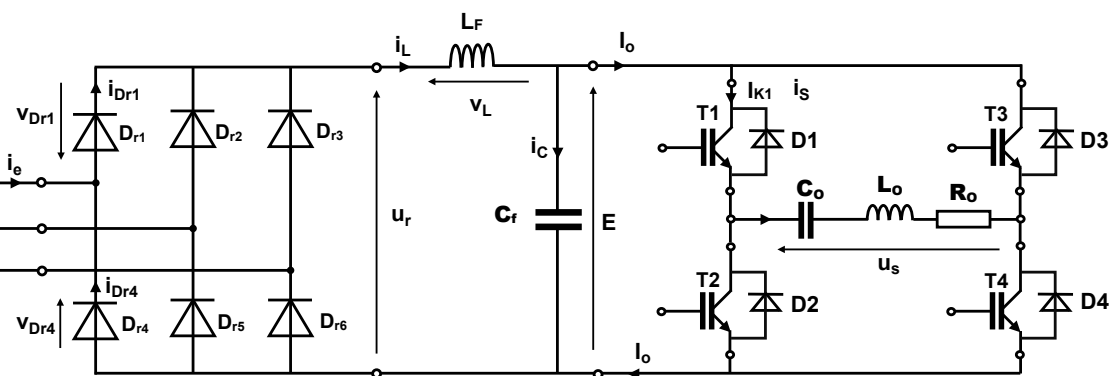


Figure 1: schéma d'alimentation du système

### C- Etude de l'onduleur autonome monophasé

Dans cette étude, l'alimentation du système de chauffage à induction est assurée par un onduleur de tension à commande décalée, délivrant une tension alternative  $u_s(t)$  dont la fréquence fondamentale est  $f_0 = 26 \text{ kHz}$ . La charge est modélisée par un dipôle  $R_o - L_o$  série ( $R_o = 2,8 \Omega$ ,  $L_o = 0,3 \text{ mH}$ ). Afin d'améliorer le transfert d'énergie et de réduire la puissance réactive, on associe en pratique un condensateur  $C_o$  en série pour constituer un circuit ( $R_o - L_o - C_o$ ) accordé à la résonance ( $Z_1 = R_o$ ) sur le fondamental de la tension d'alimentation.

#### Hypothèses :

- Le courant  $i_s(t)$  est supposé alternatif sinusoïdal en phase par rapport à la composante fondamentale de la tension  $u_s(t)$ .
- La sortie du filtre est modélisée par une source de tension  $E$  constante et égale à la valeur moyenne de la tension redressée  $u_r(t)$  :  $E = 200V$
- Les interrupteurs de puissance ( $H_i - D_i$ ) sont considérés comme idéaux.

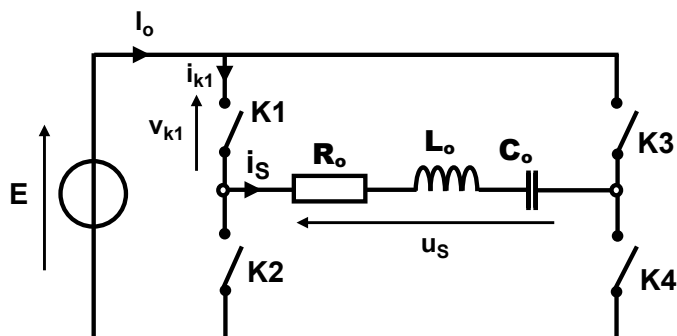


Figure 2: Onduleur monophasé alimentant une charge RLC

L'onduleur utilisé est composé de quatre interrupteurs bidirectionnels en courant, réalisés par la mise en parallèle de transistors IGBT et de diodes ( $K1 = \{H1, D1\}$ , ...,  $K4 = \{H4, D4\}$ ). Les transistors IGBT sont commandés à une fréquence de découpage  $f = 1/T$ . Les chronogrammes de la commande sont fournis en annexe.

Dans la configuration de la commande décalée, les deux bras opèrent avec la même période  $T$ . Cependant, les interrupteurs du bras 2 sont déphasés selon un angle  $\beta$  (dont la valeur est comprise entre  $0$  et  $\pi$ ). Ce choix d'angle vise à éliminer l'harmonique le plus gênant, tel que l'harmonique  $3$ , afin d'atténuer ses effets indésirables.

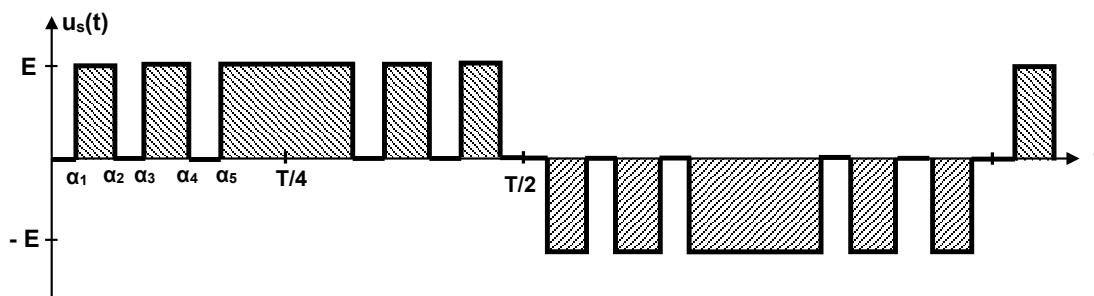
- **Question 1 :** À partir de la **figure 2**, déterminer l'expression de l'impédance du circuit  $Z_1$  en fonction de  $R_o$ ,  $L_o$  et  $C_o$ , puis **déduire la valeur du condensateur  $C_o$**  permettant d'accorder le circuit à la résonance pour la fréquence  $f_0$
- **Question 2 :** Donner les conditions sur ( $K1$  ;  $K2$  ;  $K3$  ;  $K4$ ) pour respecter la règle d'association des sources.
- **Question 3 :** Tracer la courbe représentative de  $u_s(t)$  et déduire leur valeur efficace notée  $U_s$  en fonction de  $\beta$  et  $E$ .
- **Question 4 :** Justifier pourquoi le courant  $i_s(t)$  est en phase par rapport à la composante fondamentale de la tension  $u_s(t)$

La tension  $u_s(t)$  est décomposée en série de Fourier tels que :

$$u_s(t) = \frac{4E}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2k+1} \cdot \cos\left((2k+1)\frac{\beta}{2}\right) \cdot \sin((2k+1)\omega t)$$

- **Question 5 :** Déterminer l'expression de l'**harmonique 3** notée  $u_{s3}(t)$  et en déduire Pour quelle valeur de l'angle  $\beta$  l'harmonique  $3$  est supprimé. On conserve par la suite de problème la valeur de  $\beta$  trouvée.
- **Question 6 :** Compléter le spectre de la tension aux bornes de la charge RLC  $U_s(f)$  dans le document réponse DRE.
- **Question 7 :** Quelles observations peuvent être faites concernant les harmoniques multiples de trois ? En déduire le rang de l'harmonique qui peut poser le plus gênant.
- **Question 8 :** Exprimer l'expression du fondamental  $u_{s1}(t)$ , de la tension  $u_s(t)$ , puis calculer sa valeur efficace, notée  $U_{s1}$ .
- **Question 9 :** Calculer le taux distorsion d'harmonique **THD**, puis conclure.

En réalité, La tension  $u_s(t)$  est obtenue par un découpage à **cinq angles de commutation (commande MLI)  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$**  et  $\alpha_5$  respectivement égaux à  **$6,4^\circ, 16,9^\circ, 27,6^\circ, 38,9^\circ$**  et  **$50,8^\circ$** . Ces angles ont été déterminés par la méthode de **Selective Harmonic Elimination (SHE)** afin d'annuler les composantes harmoniques situées à proximité du fondamental. La figure ci-dessous illustre l'allure temporelle de la tension  $u_s(t)$  ainsi obtenue.



La **décomposition en série de Fourier** de la tension  $u_s(t)$  est donnée par :

$$u_s(t) = 199,4 \sin(2\pi f_0 t) + 5,1 \sin(26 \pi f_0 t) + 6,4 \sin(30 \pi f_0 t) + 7,1 \sin(34 \pi f_0 t) + 6,8 \sin(38 \pi f_0 t)$$

- **Question 10 :** Identifier le type de commande MLI utilisé, préciser l'intérêt de cette commande, puis déterminer les harmoniques qui peuvent être éliminées grâce à cette configuration à cinq angles.
- **Question 11 :** Exprimer puis calculer alors l'intensité  $I_1$  du fondamental du courant en fonction  $U_{s1}$  et  $Z_1$
- **Question 12 :** Calculer la puissance  $P_1$  dissipée par effet Joule dans le four par le fondamental du courant.

Le module de l'impédance de l'ensemble four-condensateur à la fréquence de l'harmonique **13** de la tension d'alimentation vaut :  $Z_{13} = 634 \Omega$ .

- **Question 13 :** Calculer alors l'intensité  $I_{13}$  de l'harmonique **13** du courant. Peut-on négliger la puissance  $P_{13}$  dissipée par ce courant dans le Chauffage par induction ?

## D- Etude d'adaptateur : Redresseur et filtrage

Dans cette étude, l'installation est alimentée par un **transformateur triphasé** de puissance apparente  $S = 13 \text{ kVA}$ , fournissant un **réseau triphasé équilibré de fréquence 50 Hz**.

Le préactionneur de la bobine d'induction est un **onduleur de tension DC-AC à commande décalée**, chargé de générer une tension alternative à fréquence contrôlée pour le chauffage. Il est donc nécessaire de disposer, en amont, d'une **source continue**. La solution retenue consiste à convertir l'énergie du réseau triphasé en **tension continue** au moyen d'un **redresseur triphasé PD3 à diodes**, puis d'améliorer la qualité de cette tension grâce à un **filtre LC**.

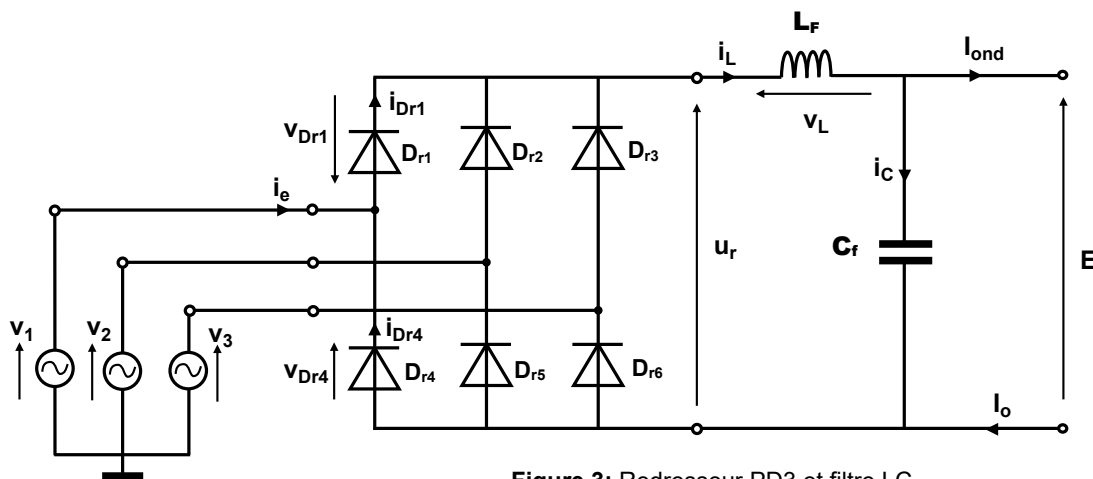


Figure 3: Redresseur PD3 et filtre LC

### Hypothèses :

- Le secondaire du transformateur peut être modélisé par trois sources de tension parfaites notées respectivement  $v_1(\theta)$ ,  $v_2(\theta)$  et  $v_3(\theta)$  de valeur efficace  $V$  formant un système triphasé sinusoïdal équilibré de fréquence  $f = 50 \text{ Hz}$ . On pose  $\theta = \omega t$  avec  $\omega = 100\pi \text{ rad/s}$ .
- Le courant  $i_L(t)$  dans l'inductance  $L_f$  ne s'annule jamais et est tel que  $i_L(t) = I_o = C_{ste}$ .
- La capacité  $C_f$  est choisie afin de réduire les ondulations de tension  $u_r(t)$  :  $E = \langle u_r(t) \rangle = 200V$
- Les diodes sont supposées parfaites.

### I. Allure temporelle et valeur de la tension de sortie du filtre

- **Question 15 :** Déterminer les expressions temporelles des trois tensions simples fournies par le secondaire du transformateur.

○ **Question 16** : Hachurer les cases correspondant aux diodes conductrices sur le document réponse DR pour tous les intervalles de temps.

○ **Question 17** : Pour les intervalles  $[t_1 ; t_2]$  ;  $[t_2 ; t_3]$  et  $[t_3 ; t_4]$ , exprimer la tension de sortie du pont  $u_r(t)$  en fonction de  $v_1(t)$ ,  $v_2(t)$  et  $v_3(t)$  puis en fonction des tensions composées  $u_{12}(t)$ ,  $u_{23}(t)$  et  $u_{31}(t)$ .

Ensuite, Représenter la tension  $u_r(t)$  sur le document réponse DRE. Quelle est sa fréquence ?

○ **Question 18** : Montrer que la valeur moyenne  $\langle u_r \rangle$  de  $u_r(t)$  a pour expression :  $\langle u_r \rangle = \frac{3\sqrt{6} V}{\pi}$

En déduire la valeur efficace  $V$  des tension fournies par le secondaire de transformateur triphasé. Justifier.

## II. Validation des diodes de redressement

On considérera désormais que le système de chauffage par induction consomme une puissance active  $P_a = 7,1 \text{ kW}$  et l'onduleur absorbe un courant fortement déformé. Afin d'améliorer le comportement du système, le concepteur recommande l'insertion d'un filtre LC dont la bobine  $L_f$  de valeur **80 mH**. Les résultats du courant traversant cette bobine sont présentés à la figure 5. Le rendement de l'onduleur à MLI est supposé égal à 1.

**Remarque** : Par la suite d'étude, le transformateur fourni trois tensions de valeur efficace : **86/149V – 50Hz**

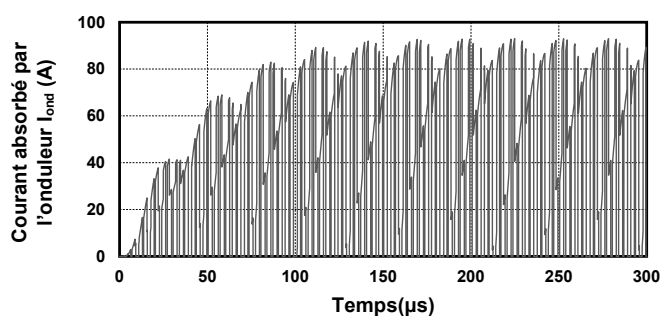


Figure 4 : le courant absorbé par l'onduleur  $I_{ond}(t)$

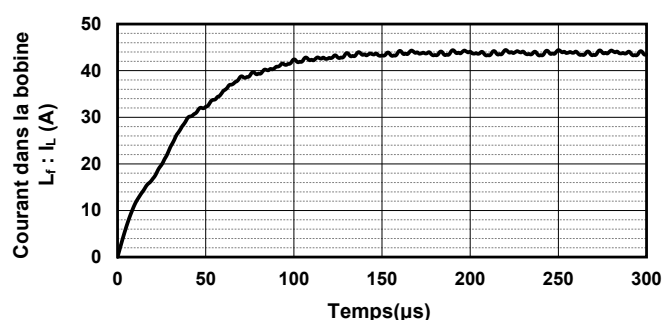


Figure 5: le courant traversant la bobine du filtre LC

○ **Question 19** : Discuter les résultats présentés aux figures 4 et 5 afin de mettre en évidence l'intérêt du filtre LC, puis valider l'hypothèse 2 selon laquelle le courant traversant la bobine est quasi constant en régime permanent. En déduire la valeur du courant  $I_o$  circulant dans la bobine en régime permanent (pour  $t > 250 \mu s$ ).

○ **Question 20** : Sur le document réponse (DR), représenter à l'aide de couleurs distinctes les courants  $i_{Dr1}(t)$  et  $i_{Dr4}(t)$  circulant dans les diodes  $D_{r1}$  et  $D_{r4}$ , ainsi que la tension  $v_{Dr1}(t)$  aux bornes de la diode  $D_{r1}$ .

○ **Question 21** : En déduire  $I_{Dmoy}$  et  $I_{Dmax}$  respectivement les valeurs moyenne et maximale du courant dans les diodes ainsi que la valeur de la tension inverse maximale notée  $V_{r-max}$ .

○ **Question 22** : Effectuer un choix des diodes à partir de document technique de VISHAY 40EPF ... en annexe pour un coefficient de sécurité de 50%.

## III. Dimensionnement du transformateur

○ **Question 23** : Sur le document réponse DR, représenter le courant  $i_e(t)$  dans la phase 1 du secondaire du transformateur. Calculer sa valeur efficace  $I_e$ .

○ **Question 24** : En assimilant les courants dans les phases du secondaire du transformateur à des courants alternatifs sinusoïdaux de valeur efficace  $I_e$ , calculer la puissance apparente  $S$  nécessaire de la source de tension triphasée. Conclure en la comparant avec celle du transformateur.



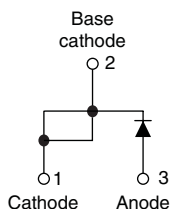
## 40EPF.. Soft Recovery Series

Vishay High Power Products

### Fast Soft Recovery Rectifier Diode, 40 A



TO-247AC modified



#### FEATURES/DESCRIPTION

The 40EPF.. fast soft recovery rectifier series has been optimized for combined short reverse recovery time and low forward voltage drop.

The glass passivation ensures stable reliable operation in the most severe temperature and power cycling conditions.

This product series has been designed and qualified for industrial level.

#### APPLICATIONS

- Output rectification and freewheeling in inverters, choppers and converters
- Input rectifications where severe restrictions on conducted EMI should be met

#### PRODUCT SUMMARY

$V_F$ at 10 A	< 1 V
$t_{rr}$	60 ns
$V_{RRM}$	200 to 600 V

#### MAJOR RATINGS AND CHARACTERISTICS

SYMBOL	CHARACTERISTICS	VALUES	UNITS
$I_{F(AV)}$	Sinusoidal waveform	40	A
$V_{RRM}$		200 to 600	V
$I_{FSM}$		475	A
$V_F$	10 A, $T_J = 25^\circ\text{C}$	1	V
$t_{rr}$	1 A, - 100 A/ $\mu\text{s}$	60	ns
$T_J$		- 40 to 1	$^\circ\text{C}$

#### VOLTAGE RATINGS

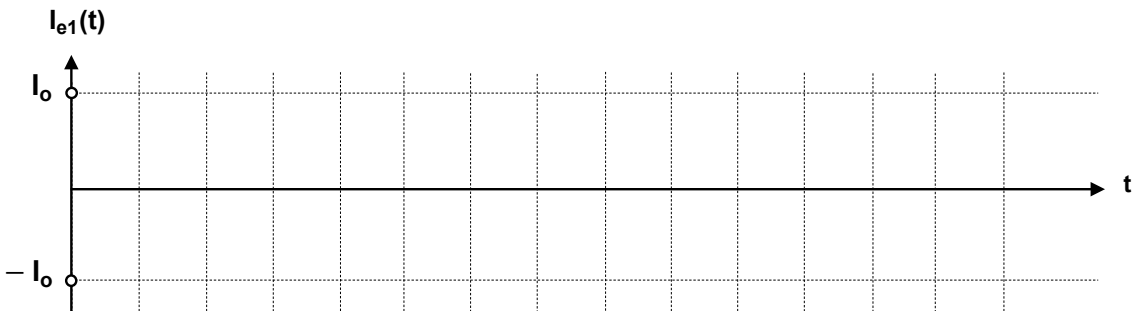
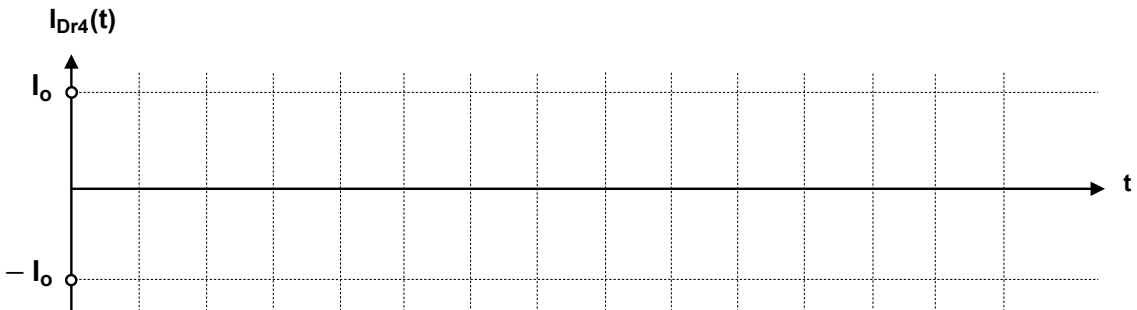
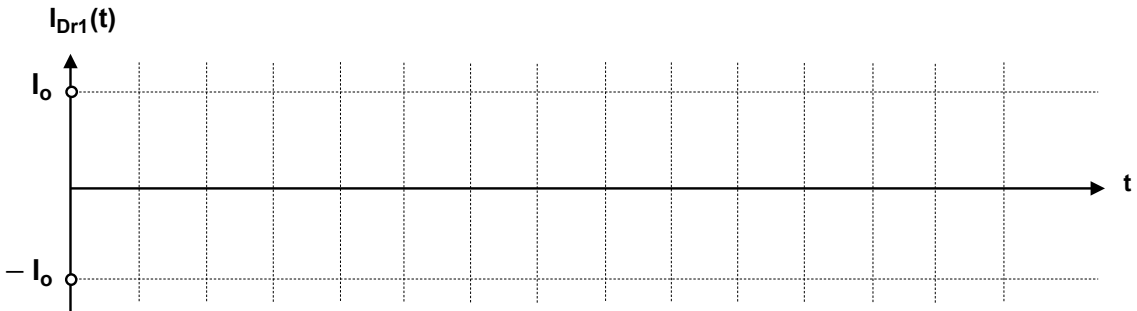
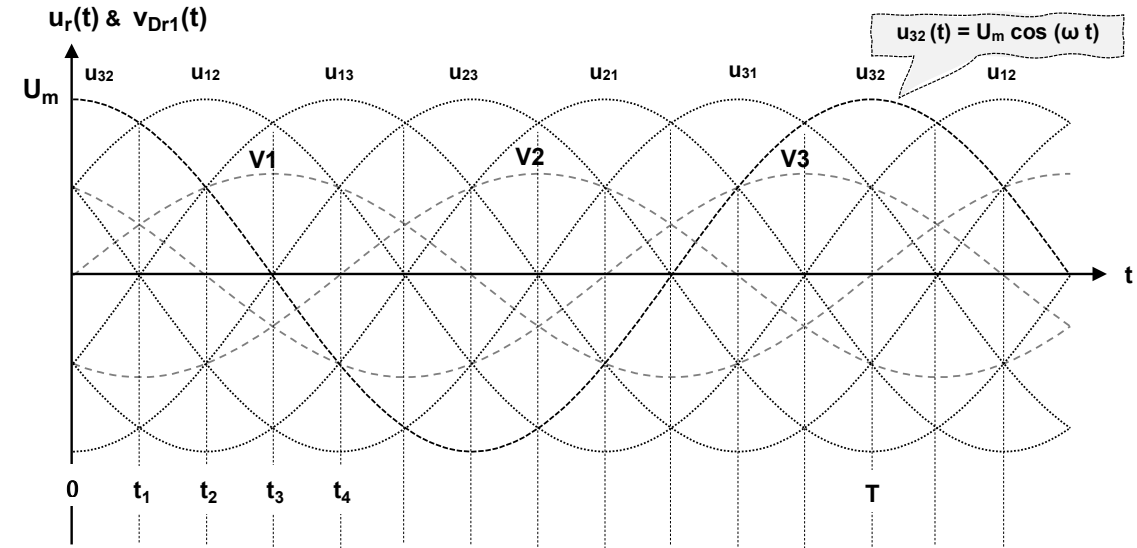
PART NUMBER	$V_{RRM}$ , MAXIMUM PEAK REVERSE VOLTAGE V	$V_{RSM}$ , MAXIMUM NON-REPETITIVE PEAK REVERSE VOLTAGE V	$I_{RRM}$ AT 150 $^\circ\text{C}$ mA
40EPF02	200	300	7
40EPF04	400	500	
40EPF06	600	700	

#### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	VALUES	UNITS
Maximum average forward current	$I_{F(AV)}$	$T_C = 105^\circ\text{C}$ , 180 $^\circ$ conduction half sine wave	40	A
Maximum peak one cycle non-repetitive surge current	$I_{FSM}$	10 ms sine pulse, rated $V_{RRM}$ applied	400	
		10 ms sine pulse, no voltage reapplied	475	
Maximum $I^2t$ for fusing	$I^2t$	10 ms sine pulse, rated $V_{RRM}$ applied	800	$\text{A}^2\text{s}$
		10 ms sine pulse, no voltage reapplied	1131	
Maximum $I^2\sqrt{t}$ for fusing	$I^2\sqrt{t}$	$t = 0.1$ to 10 ms, no voltage reapplied	11 310	$\text{A}^2\sqrt{\text{s}}$

# Document réponse (DRE)

Nom et prénom : .....



	Dr1
	Dr2
	Dr3
	Dr4
	Dr5
	Dr6

# Document réponse (DRE)

