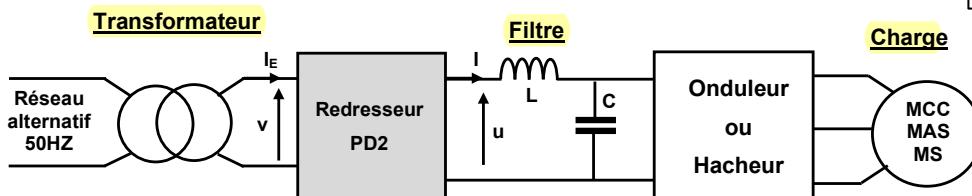


Chapitre 5 : Redresseur monophasé PD2 non commandé

I. Introduction

Un redresseur monophasé est un dispositif électronique de conversion qui permet de transformer une tension alternative (AC) en une tension continue (DC). Cette opération est essentielle dans de nombreuses applications où une source de courant continu stable est requise, comme dans les alimentations de dispositifs électroniques, les chargeurs de batteries ou encore les systèmes de commande de moteurs.



Le schéma ci-dessus illustre la chaîne de conversion de l'énergie, du réseau électrique jusqu'à la charge. Elle comprend les éléments suivants :

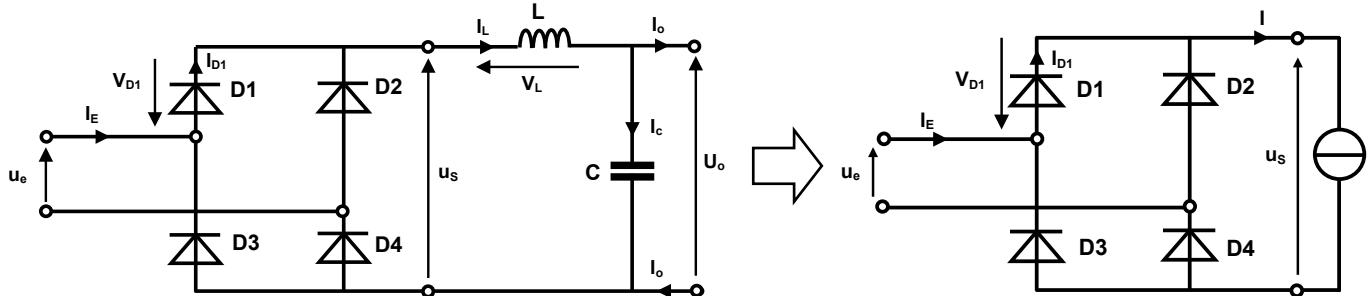
- **Un transformateur** : adapte le niveau de tension à celui requis par le redresseur.
- **Un redresseur** : assure la conversion de l'alternatif en continu.
- **Un filtre** : atténue les ondulations de tension et de courant avant l'étage suivant.
- **Un onduleur ou un hacheur** : fournit une alimentation adaptée à la nature de la charge (continue ou alternative).

Dans ce cours, nous nous limiterons à l'étude des redresseurs **non commandés**, constitués uniquement de **diodes**. Les redresseurs **commandés**, faisant appel à des interrupteurs pilotés, ne seront pas abordés ici.

II. Redresseur parallèle double monophasé PD2 non commandé

1. Structure d'un redresseur PD2

La figure ci-dessous illustre l'architecture du redresseur PD2.



⌚ Tension d'alimentation :

La tension entre la phase et le neutre d'un réseau monophasé est de forme alternative sinusoïdale et s'exprime par :

$$u_e(t) = V_m \cdot \sin(\omega t)$$

Avec :

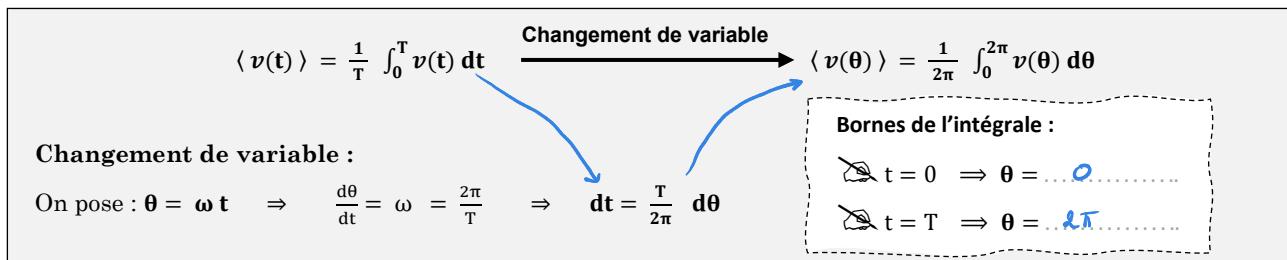
- $V_m = \sqrt{2} V$: la valeur maximale de la tension, V étant la valeur efficace du réseau,
- $\omega \cdot t = 2\pi \cdot f \cdot t$: la phase instantanée,
- $f = 50 \text{ Hz}$: la fréquence du réseau,

⌚ Hypothèses retenues :

- La source d'entrée est un réseau monophasé délivrant une tension alternative sinusoïdale.
- La charge est constituée d'un filtre LC, ce qui implique une source de sortie de type courant.

- Les diodes **D1**, **D2**, **D3** et **D4** sont considérées idéales (sans pertes).
- L'inductance **L** est supposée suffisamment grande pour maintenir le courant quasiment constant : $i_L(t) \approx I_0$
- Le condensateur **C** est choisi de valeur élevée afin de minimiser l'ondulation de la tension redressée.

Par souci de simplicité et afin d'éviter toute erreur dans le calcul des intégrales (notamment pour la détermination de la valeur moyenne), il est préférable de résoudre les intégrales en remplaçant la variable **temps t** par la variable de **phase θ** .



2. Conduction des diodes du redresseur

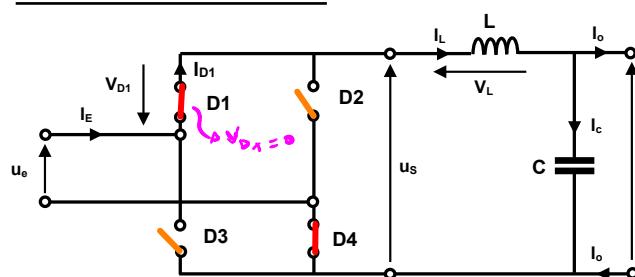
La conduction des diodes dépend de la polarité de la tension alternative sinusoïdale appliquée en entrée. Le tableau suivant résume les états de conduction en fonction de la phase θ .

Phase θ	$[0 ; \pi]$	$[\pi ; 2\pi]$	
Diodes passantes	D1 et D4	D2 et D3	<ul style="list-style-type: none"> D passante $\Rightarrow V_D = 0$ et $i_D \neq 0$ D bloquée $\Rightarrow V_D \neq 0$ et $i_D = 0$

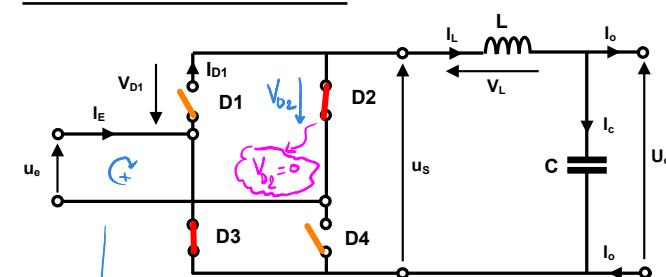
3. Etudes analytique de redresseur PD2

3.1. Etude des tensions u_s et v_{D1}

Phase 1 : pour $\theta \in [0 ; \pi]$



Phase 2 : pour $\theta \in [\pi ; 2\pi]$

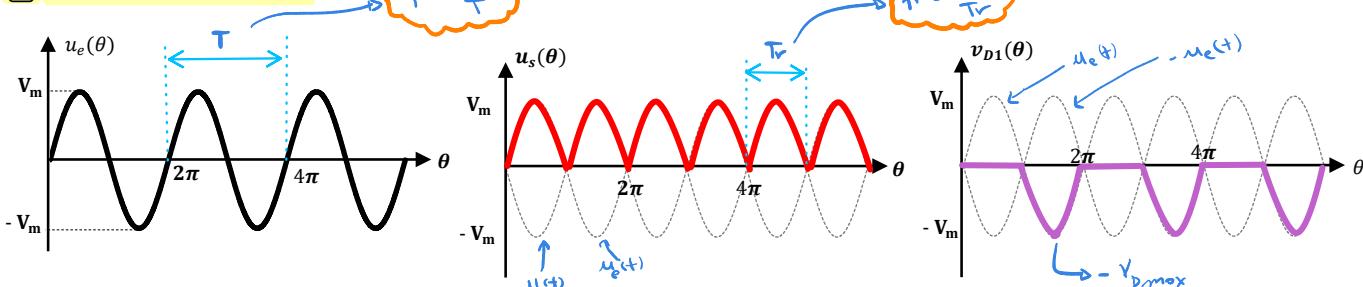


Expression des tensions

Toutes les expressions seront établies en fonction de la tension d'entrée $u_e(t)$.

Intervalle	u_s	v_{D1}
$\theta \in [0 ; \pi]$	$u_s(t) = u_e(t)$	$v_{D1}(t) = 0$
$\theta \in [\pi ; 2\pi]$	$u_s(t) = -u_e(t)$	$v_{D1}(t) = u_e(t)$

Allures des tensions



La tension redressée $u_s(t)$ se compose de deux alternances maximales de la sinusoïde par période du réseau.

Période en rad	Fréquence f_r	Valeur maximale
$T_v = \frac{\pi}{2}$	$f_r = 2 \times f$	$V_{smax} = V_m$

■ Valeur moyenne de la tension redressée $u_s(t)$

La valeur moyenne de $u_s(t)$ représente la composante continue de la tension délivrée par le redresseur. Elle permet d'estimer ensuite la puissance transmise à la charge et intervient également dans le calcul du facteur de puissance d'un redresseur PD2. Elle est définie par : $\langle u_s \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T u_s(t) dt$

$\text{On a : } \langle u_s \rangle = \frac{1}{T} \int_0^{T_0} u_s(t) dt$ $= \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} u_e(t) dt = \frac{1}{T_0} \int_0^T V_m \sin(\omega t) dt$ $\text{Changement de variable : } \theta = \omega t$ $\Rightarrow \langle u_s \rangle = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin(\theta) d\theta = \frac{V_m}{\pi} \int_0^{\pi} \sin(\theta) d\theta$	$\Leftrightarrow \langle u_s \rangle = \frac{V_m}{\pi} [-\cos(\theta)]_0^{\pi} = \frac{V_m}{\pi} [\cos(0)]_0^{\pi}$ $\text{Donc : } \langle u_s \rangle = \frac{V_m}{\pi} (1 - (-1))$ $\Leftrightarrow \langle u_s \rangle = \frac{2V_m}{\pi}$ $V_m = \sqrt{2}V$ $\langle u_s \rangle = \frac{2\sqrt{2}V}{\pi}$
---	---

■ Valeur maximale supportée par la diode

Il est primordial de connaître la tension maximale admissible par une diode afin d'effectuer un choix sûr et adapté. Ce paramètre, noté **V_{RRM}** (Voltage Repetitive Reverse Maximum), correspond à la valeur crête de la tension inverse répétitive que la diode peut supporter sans défaillance.

Donc, à partir de l'allure V_D : $\text{On a : } V_{max} = V_m \Rightarrow V_{RRM} = V_m$

3.2. Étude des courants i_E et i_{D1}

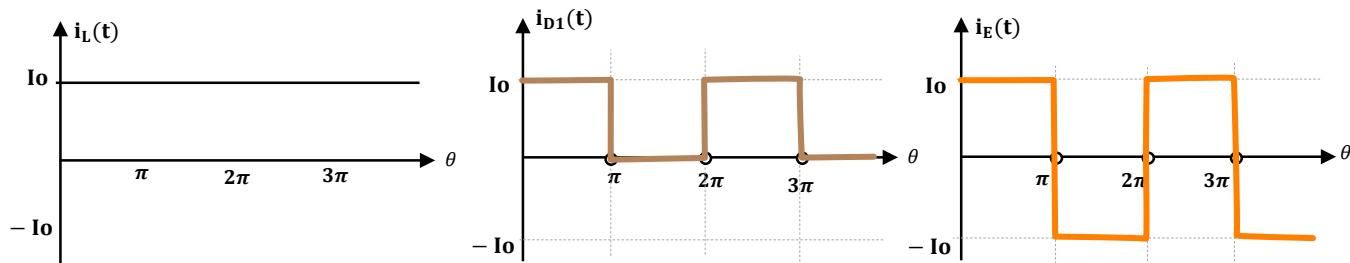
Conformément à l'hypothèse initiale, la **bobine L** du filtre est dimensionnée avec une valeur suffisamment élevée pour limiter l'ondulation du courant $i_L(t)$ et le maintenir quasi constant, soit $i_L(t) \approx I_0$

■ Expression du courant

Toutes les expressions seront formulées en termes de courant de sortie $i_L(t)$, donc en fonction de I_0 .

Intervalle	$i_E(t)$	$i_{D1}(t)$
$\theta \in [0 ; \pi]$	$i_E(t) = i_L(t) \approx I_0$	$i_{D1}(t) = i_L(t) \approx I_0$
$\theta \in [\pi ; 2\pi]$	$i_E(t) = i_L(t) \approx -I_0$	$i_{D1}(t) = 0$

■ Allures des courants



■ Valeur moyenne du courant dans les diodes

Un autre critère de dimensionnement d'une diode consiste à évaluer le courant qui la traverse, lequel doit toujours rester inférieur au courant direct maximal I_F . Dans notre cas, il s'agit du courant moyen circulant dans les diodes. Étant donné que la forme d'onde du courant est de type rectangulaire, il est préférable de calculer cette valeur moyenne par la méthode de la surface :

$$I_{D1} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{D1}(t) dt \Rightarrow I_{D1} = \frac{\text{Surface}}{T}$$

$$\text{On a : } I_m = \langle i_{0, \gamma} \rangle = \frac{\text{Surface}}{T} \xrightarrow{T \sim (2\pi)} \text{or : Surface} = \pi \times I_0$$

$$\text{donc : } \langle i_{0, \gamma} \rangle = \frac{\pi \cdot I_0}{2\pi} = \frac{I_0}{2}$$

$$\text{d'où : } I_{p_1} = \langle i_{0, \gamma} \rangle = \frac{I_0}{2}$$

III. Comportement global en puissance du redresseur

1. Facteur de puissance de redresseur PD2

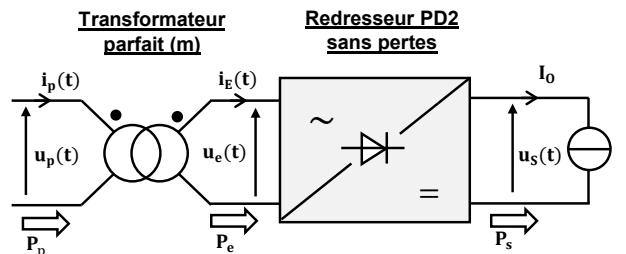
Le calcul du facteur de puissance est une étape clé pour évaluer l'efficacité énergétique d'un redresseur, limiter les pertes d'énergie, réduire l'impact des harmoniques sur le réseau et assurer la conformité aux normes et réglementations en vigueur en matière de qualité de l'énergie. On définit :

$$\text{⇒ Facteur de puissance au primaire : } f_p = \frac{P_p}{S_p} = \frac{P_p}{U_p \cdot I_p}$$

$$\text{⇒ Facteur de puissance au secondaire : } f_s = \frac{P_e}{S_e} = \frac{P_s}{U_e \cdot I_e}$$

Avec :

- U_p : Valeur efficace de la tension au primaire.
- U_e : Valeur efficace de la tension au secondaire.
- I_p : Valeur efficace du courant au primaire.
- I_e : Valeur efficace du courant au secondaire.



- P_p : Puissance active au primaire du transformateur.
- P_e : Puissance active au secondaire du transformateur.
- P_s : Puissance active fournie à la charge.

■ Hypothèses :

- Les diodes sont supposées parfaites : $P_e = P_s$
- Le transformateur est parfait : $P_p = P_e$

Facteur de puissance au secondaire du transformateur

La puissance active au secondaire, notée P_s , correspond à la puissance réellement transmise à la charge. Elle est égale à la valeur moyenne de la puissance instantanée de sortie $p_s(t)$: $P_s = p_s = \langle u_s(t) \cdot I_0 \rangle$

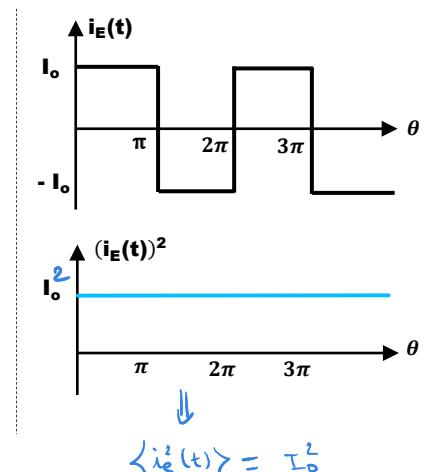
$$\text{On a : } p_s = \langle u_s(t) \cdot I_0 \rangle \Rightarrow p_s = \langle u_s(t) \rangle \cdot I_0 \text{ et } \langle u_s(t) \rangle = \frac{2V_m}{\pi}$$

$$\text{d'où : } P_s = \frac{2}{\pi} \cdot V_m \cdot I_0 \Rightarrow P_s = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot V \cdot I_0$$

Pour déterminer la puissance apparente, on commence par calculer la valeur efficace

$$\text{du courant } i_E(t) : I_E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_E(t))^2 dt} \Rightarrow I_E = \sqrt{\langle (i_E(t))^2 \rangle}$$

$$\text{on a : } I_E = \sqrt{\langle i_E(t) \rangle^2} \Rightarrow I_E = \sqrt{I_0^2} \Rightarrow I_E = I_0$$



$$\text{Le facteur de puissance au secondaire s'exprime alors par : } f_s = \frac{P_s}{U_e \cdot I_E} = \frac{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot V \cdot I_0}{U_e \cdot I_0} \Rightarrow \text{d'où : } f_s = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}$$

pour un PD2 : $f_s = 0.9$

Facteur de puissance au primaire du transformateur

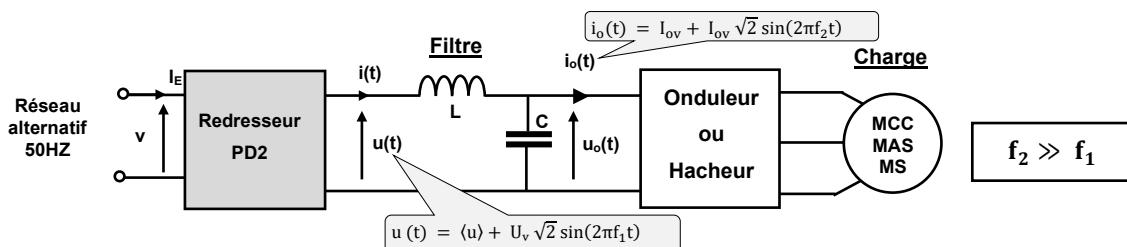
En appliquant la même démarche que pour le secondaire, il convient simplement d'intégrer le **rapport de transformation** dans les expressions, afin d'éviter toute erreur de calcul.

Dans le cas d'un transformateur idéal, les puissances active et apparente sont identiques des deux côtés, ce qui implique :

$$f_p = f_s = 0.9$$

2. Dimensionnement du filtre : méthode du 1er harmonique

Le filtre de sortie d'un redresseur, souvent constitué d'une inductance L en série et d'un condensateur C en parallèle, a pour rôle de réduire l'ondulation de la tension et du courant afin d'obtenir une alimentation aussi continue que possible. Le dimensionnement repose sur la méthode du premier harmonique, qui consiste à ne considérer que la composante fondamentale de la tension redressée, les harmoniques supérieurs étant négligeables.



- L'inductance L est choisie pour limiter l'ondulation crête-à-crête Δi du courant. En utilisant la tension du premier harmonique et la pulsation ω , on obtient :

$$L = \frac{4 V \sqrt{2}}{3 \pi \Delta i \omega}$$

Exemple :

Un redresseur PD2 est alimenté par une tension alternative monophasée **V = 230 V, 50Hz**

On souhaite limiter l'ondulation crête-à-crête du courant à **$\Delta i = 0,5 A$** .

On a : $L = \frac{4 V \sqrt{2}}{3 \pi \Delta i \omega} \Rightarrow L = 878 \text{ mH}$

- Le condensateur C, associé à L, permet de maintenir la tension de sortie $u_0(t)$ stable face aux variations de la tension redressée $u(t)$ et du courant de charge $i_0(t)$. Deux cas sont analysés :

Variation de tension seule	Variation de courant seul (c)
$C_1 \geq \frac{U_v}{\omega_1^2 \cdot L \cdot \Delta_{0v1}}$ Avec $U_v = \frac{2 V}{\pi \sqrt{2}}$ et $\omega_1 = 2 \omega$	$C_2 \geq \frac{I_{0v}}{\omega_2 \cdot \Delta_{0v2}}$

Où U_v et I_{0v} sont les valeurs efficaces des variations de tension et de courant, et Δ_{0v1} et Δ_{0v2} les tolérances maximales acceptées en sortie (la charge Hacheur ou Onduleur). ω_1 est la pulsation du premier harmonique de la tension redressée d'un PD2 et ω_2 est pulsation liée à la fréquence de découpage du hacheur ou onduleur en aval

La valeur finale de C est choisie comme la plus grande issue des deux conditions précédentes. Cette approche garantit un filtrage efficace, minimise l'ondulation résiduelle et assure la conformité aux exigences de l'application.

Exemple :

Un redresseur PD2 est alimenté par **V = 230 V, f = 50 Hz**.

On utilise une inductance **L = 0,31 H** et on souhaite une tolérance de l'ondulation de sortie : $\Delta_{0v1} = \Delta_{0v2} = 3 V$.

Le courant efficace ondulant côté charge est **$I_{0v} = 6 A$** et la fréquence du hacheur est **$f_2 = 16 kHz$**

Question : Déterminer la valeur minimale de C à retenir.

*Variation de tension seul :

$$\text{On a : } C_1 = \frac{U_v}{\omega_1^2 \cdot L \cdot \Delta_{0v1}} = \frac{V}{2 \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \omega^2 \cdot L \cdot \Delta_{0v1}}$$

d'où : $C_1 > 282 \mu F$

*Variation de courant seul

$$\text{On a : } C_2 \geq \frac{I_{0v}}{\omega_2 \cdot \Delta_{0v2}}$$

d'où : $C_2 > 6,63 \mu F$

choix :

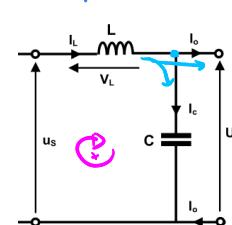
$$C = \sup(C_1, C_2) \\ = C_1$$

d'où :

$$C > 282 \mu F$$

Relation supplémentaire : filtre LC

- Filtrage de la tension : $\text{On a : } u_s(t) = u_v(t) + u_0$ opposé filtre $\Rightarrow \langle u_s(t) \rangle = \langle u_v(t) \rangle + \langle u_0 \rangle = \frac{2 \sqrt{2} V}{\pi}$
- régime périodique $\Rightarrow \langle u_v(t) \rangle = 0 \Rightarrow \text{d'où : } \langle u_0 \rangle = \langle u_s(t) \rangle = \frac{2 \sqrt{2} V}{\pi}$
- Filtrage du courant : $\text{On a : } i_s(t) = i_v(t) + I_0 \Rightarrow \langle i_s(t) \rangle = \langle i_v(t) \rangle + I_0$ $\text{d'où : } \langle i_v(t) \rangle = 0 \Rightarrow \text{d'où : } \langle i_s(t) \rangle = I_0$



IV. Choix des diodes du pont redresseur

Les diodes d'un redresseur sont soumises à des courants directs et à des tensions inverses. Pour garantir leur fiabilité, il faut que leurs caractéristiques nominales soient **supérieures aux valeurs maximales** que l'on prévoit dans l'application.

Les paramètres **essentiels à vérifier** sont :

- **Courant direct moyen I_{FAV}** : $I_{FAV} \geq I_{Dmoy}$

Où I_{Dmoy} est la valeur moyenne du courant traversant la diode (souvent $I_0/2$ pour un PD2).

- **Tension inverse répétitive maximale V_{RRM}** : $V_{RRM} \geq 2 \times V_{D \max}$

(Facteur $\times 2$ recommandé par AN-556 ON Semiconductor et IEC 60038 pour couvrir les surtensions et variations secteur).

- **Courant de surtension admissible I_{FSM}** : $I_{FSM} \geq k \times I_0$

Avec $k = 10$ à 20 selon la charge indicative (IEC 60747-2 et AN Vishay). En charge capacitive, on retient souvent $k \approx 20$.

Exemple :

Données :

- Tension secteur : $V = 230 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$.
- Filtre : $L = 0,3 \text{ H}$, $C = 330 \mu\text{F}$.
- Courant continu de sortie : $I_0 = 5 \text{ A}$.

$$\begin{aligned} * I_{FAV} &> \frac{I_0}{2} \Rightarrow I_{FAV} = 2.5 \text{ A} \\ * V_{RRM} &> 2 \cdot V_{D \max} \Rightarrow V_{RRM} > 2 \times V_m \Rightarrow V_{RRM} > 2\sqrt{2} \text{ V} \\ * I_{FSM} &> 10 \times I_0 \Rightarrow I_{FSM} > 50 \text{ A} \end{aligned}$$

Question : Calculer les valeurs de I_{FAV} , V_{RRM} et I_{FSM} , puis sélectionner, à partir du tableau ci-dessous, la diode la plus adaptée à l'application.

Référence (STMicroelectronics)	I_{FAV} (A)	V_{RRM} (V)	I_{FSM}
1N4007	1	1000	30
STTH102	1	200	50
STTH302	3	200	130
STTH512	5	1200	55
STPR1020	5	200	50

Exemple : Diode STTH302



STTH302

MAIN PRODUCT CHARACTERISTICS

$I_{F(AV)}$	3A
V_{RRM}	200 V
T_j (max)	175 °C
V_F (max)	0.75 V
trr (max)	35 ns

ABSOLUTE RATINGS (limiting values)

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{RRM}	Repetitive peak reverse voltage	200	V
$I_{F(AV)}$	Average forward current	3	A
I_{FSM}	Surge non repetitive forward current	130	A
T_{stg}	Storage temperature range	- 65 to + 175	°C
T_j	Maximum operating junction temperature	175	°C



Références bibliographiques :

- ⚡ **Claude CHEVASSU.** Électronique de puissance (Principes) : cours et problèmes [PDF]. Version 5 décembre 2013. Licence Libre. Disponible sur : <http://mach.elec.free.fr>
- 📘 **Christophe FRANÇOIS,** Les grandes fonctions de la chaîne d'énergie - IUT, BTS, CPGE, FRANCE : Ellipses, 2016
- 📘 **Pierre Tréhin,** Sciences industrielles de l'ingénieur (SII) - spécial ATS, Ellipses 2019
- ⚡ **Piou Michel.** Les bases d'électricité (Baselecpro : Ch3 – Conversion AC - DC) [PDF]. France, 2014.