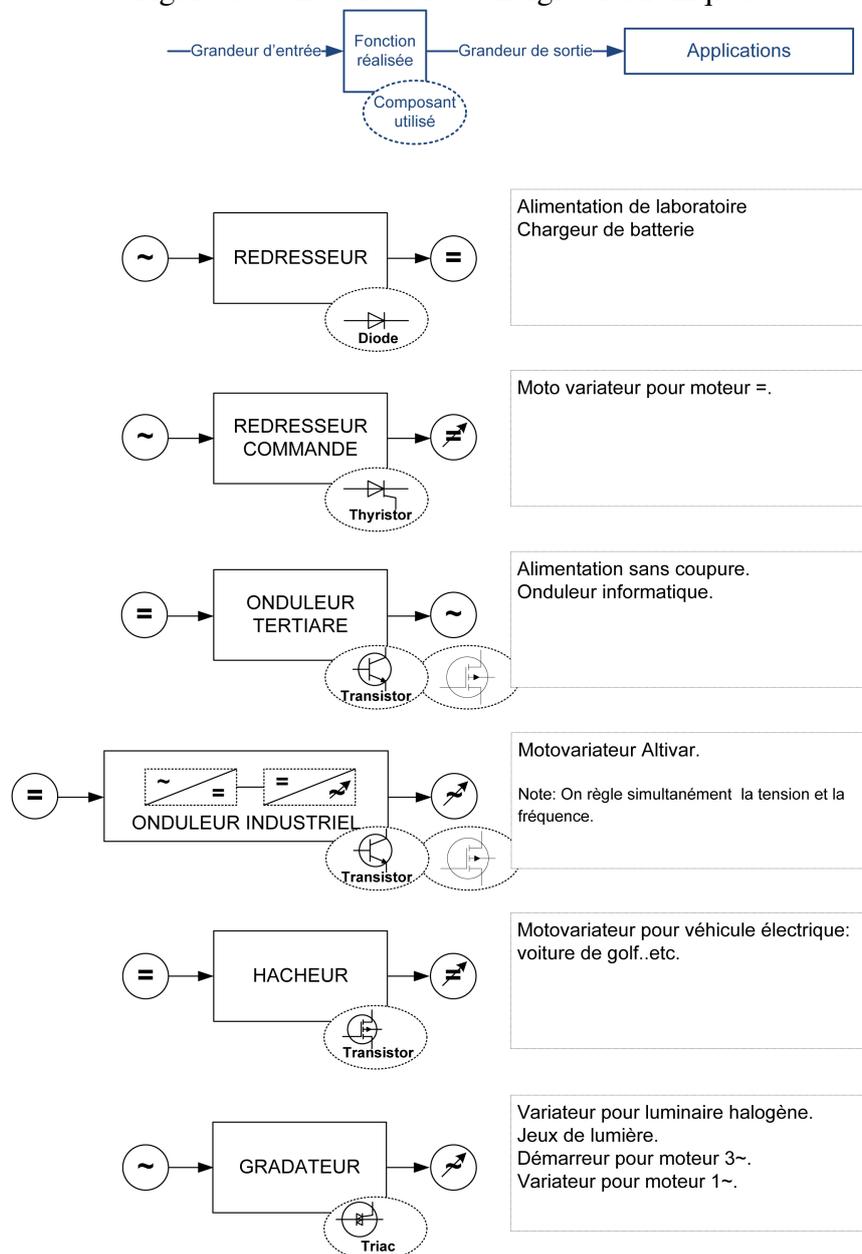


## Table des matières

<b>1</b>	<b>Les redresseurs</b>	<b>1</b>
1.1	Redressement monophasé . . . . .	1
1.1.1	Redressement mono alternance . . . . .	1
1.1.2	Redressement bi alternance . . . . .	7
1.2	Redressement triphasé . . . . .	10
1.2.1	Pont P3 . . . . .	10
1.2.2	Pont PD3 . . . . .	12
1.3	Le filtrage . . . . .	14
1.3.1	Les redresseurs commandés . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Les gradateurs</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>Les hacheurs</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>Quelques précisions supplémentaires</b>	<b>26</b>

# S0.5:Les convertisseurs d'énergie électronique

Figure 1: Convertisseurs d'énergie électroniques



## 1 Les redresseurs

### 1.1 Redressement monophasé

#### 1.1.1 Redressement mono alternance

##### Situation

Il n'existe pas de réseau de distribution de courant continu. Pourtant, les appareils alimentés à l'aide de batterie nécessitent des recharges fréquentes, et d'autres, comme les moteurs à courant continu, doivent être directement raccordés à une source de courant pour fonctionner.

### Conséquences

Il faut donc fabriquer le courant continu au cas par cas. La méthode la plus simple consiste à supprimer l'alternance négative du réseau alternatif. cette opération, réalisée à l'aide d'une diode s'appelle le redressement.

Figure 2: Symbole

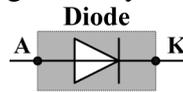
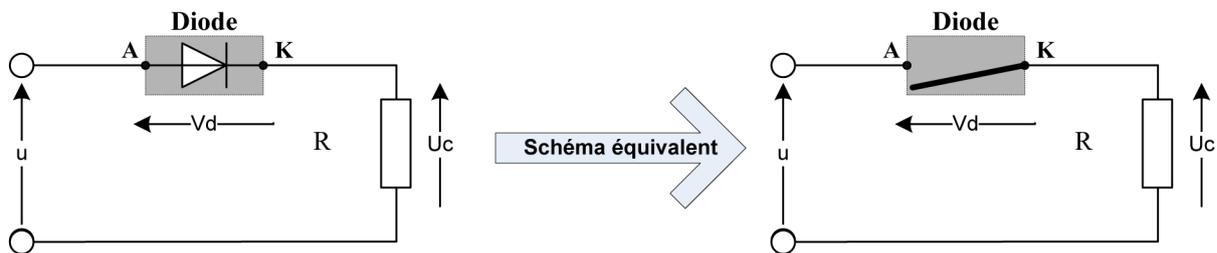
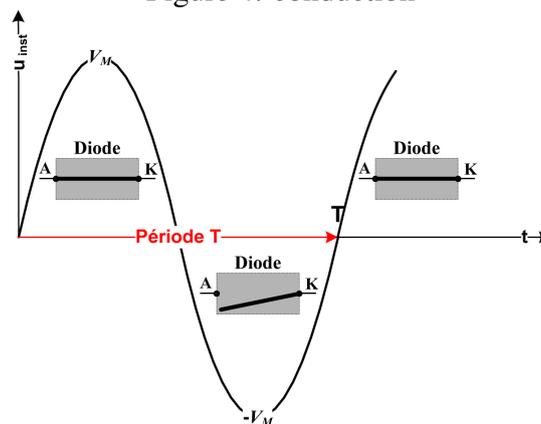


Figure 3: Modèle électrique



Le symbole non symétrique de la diode montre qu'elle possède un sens de branchement: elle est polarisée. Elle peut être modélisée par un contact électrique du point de vue du fonctionnement mais non par sa structure car la commutation est statique: la fermeture ou l'ouverture du contact diode s'effectue dans un matériau appelé semi-conducteur. La commutation statique n'est commandée ni manuellement (interrupteur), ni par champ magnétique (contacteur ou relais) mais s'effectue naturellement au gré de l'inversion de polarité de  $V_D$  entre l'anode(A) et la cathode(K) : figure 3.

Figure 4: conduction

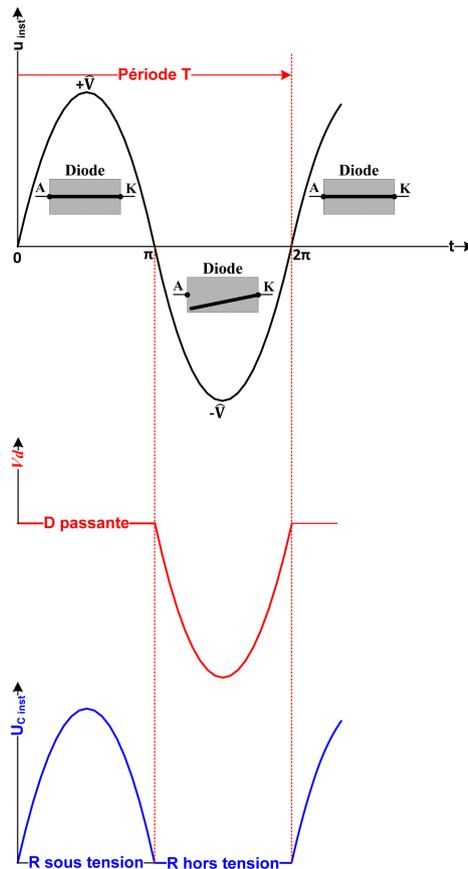


### Forme et valeur de la tension redressée : $U_c$

La fermeture de la diode pendant l'alternance positive génère aux bornes du récepteur R une tension dont la forme est celle représentée ci-dessous, et on constate que la loi des mailles se vérifie à chaque instant:

$$u(t) = V_d(t) + U_c(t)$$

Figure 5: loi des mailles graphique



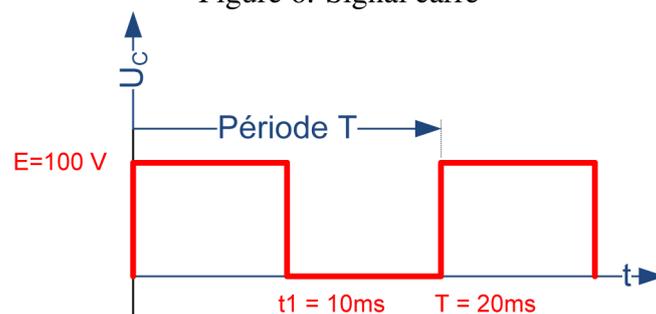
### Rappels:valeurs moyennes et efficaces

La tension obtenue aux bornes du récepteur est variable unidirectionnelle. elle est comparable à la tension que l'on obtiendrait aux bornes d'une lampe si l'on était capable de commuter<sup>1</sup> l'interrupteur qui la commande 100 fois par seconde:la rapidité du phénomène implique que l'œil ne retiendrait que les phases d'éclairage lors des alternances positives. En revanche, les phases d'alimentation de la lampe lors des alternances négatives ont disparu:la lampe est sous alimentée.

Par conséquent,on remarque que la valeur de  $U_C$  est directement liée à l'aire de la demi sinusoïde formée par la tension et étalée sur une période  $T$ . Sans se lancer dans des calculs compliqués,on démontre facilement cette propriété à l'aide de l'exemple ci-dessous.

La tension rectangulaire est égale à  $E = 100V$  de 0 à  $t_1$ , et  $E = 0V$  de  $t_1$  à  $T$ .

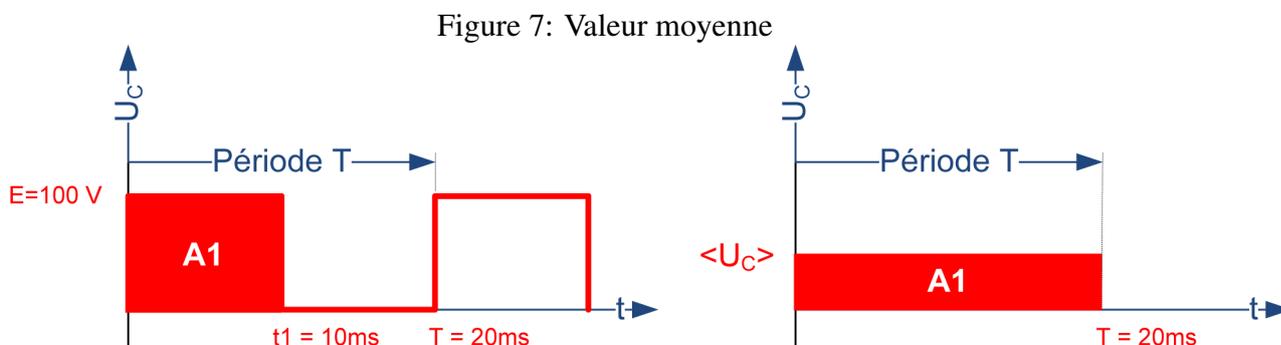
Figure 6: Signal carré



<sup>1</sup>à chaque passage au 0V

### Valeur moyenne

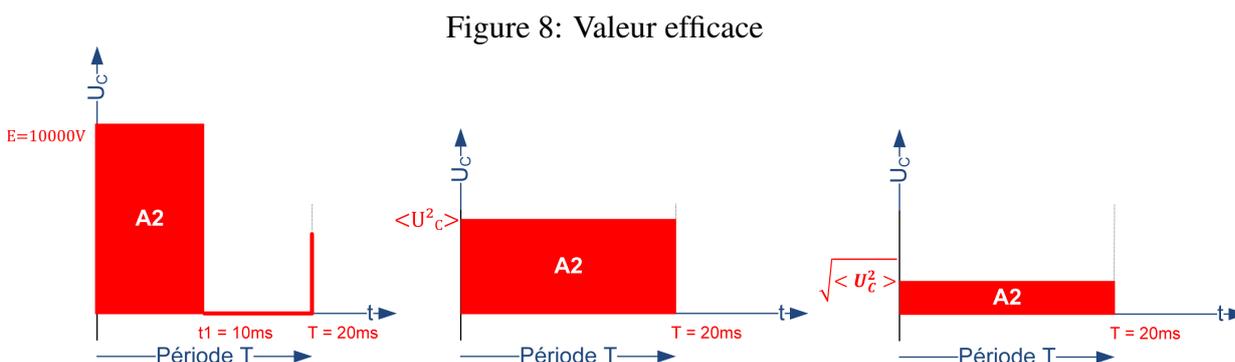
On remarque que l'aire supérieure de l'aire  $A_1$  étalée sur une période  $T$  se stabilise pour une valeur moyenne  $U_C$  qui vaut dans ce cas la:  $U_C = \frac{E}{2} = 50V$  car  $A_1 = E.t_1 = U_C.T$  La valeur moyenne notée  $\langle U_C \rangle$  est mesurée par un voltmètre commuté en position =.



### Valeur efficace

La valeur efficace mesurée par un voltmètre commuté en  $\sim$  se calcule comme ci-dessous (l'échelle non respectée):

1. On élève au carré  $E$  sur une période  $T$ : ici  $E^2 = 10000V$  n'existe que de 0 à  $t_1$ .
2. On calcule la valeur moyenne de la tension obtenue:  $\langle U_C^2 \rangle = 5000V$
3. On calcule la racine carrée de la tension obtenue:  $\sqrt{\langle U_C^2 \rangle} = 70,7V$



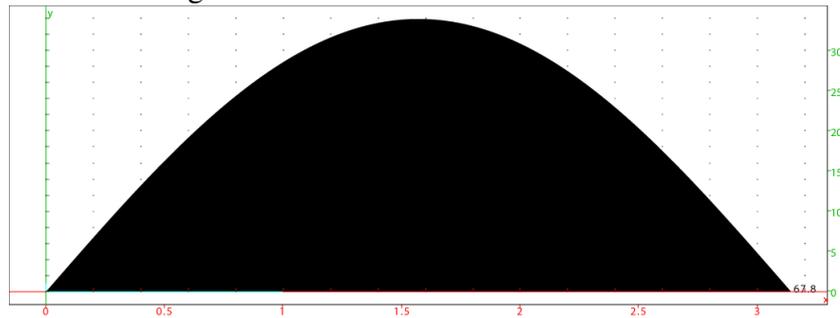
### Note

L'acronyme r.m.s (root mean square en anglais) signifie littéralement: la racine carrée de la moyenne des carrés.

Appliquons ces mêmes règles au redressement avec une tension sinusoïdale dont on calcule l'aire à l'aide du logiciel Xcas<sup>2</sup>. Le résultat s'affiche sur l'axe des x à droite de la courbe. Les calculs sont effectués pour une tension d'alimentation de valeur efficace:  $U = 24V$  et de valeur maximale:  $\hat{U} = \sqrt{2}U$ . Il ne reste plus ensuite qu'à étaler l'aire sur une période  $T$  pour obtenir la valeur moyenne  $U_C$ .

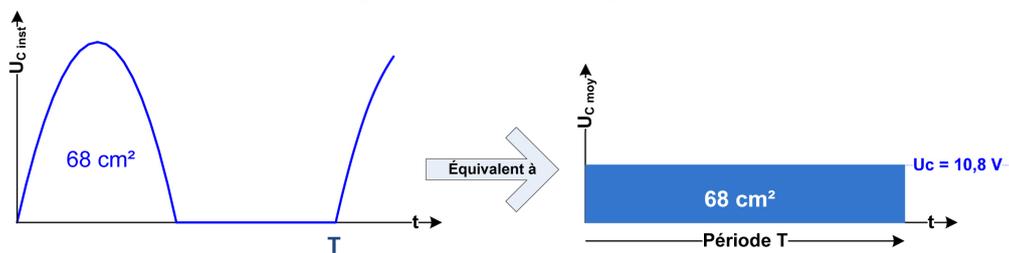
<sup>2</sup>car le calcul des valeurs moyennes et efficaces relèvent du calcul intégral

Figure 9: calcul de l'aire à l'aide de Xcas



- Soit en position= : dans ce cas le voltmètre indiquera la valeur moyenne de la tension, soit:  $U_C = \frac{68}{2\pi} = 10,8V$

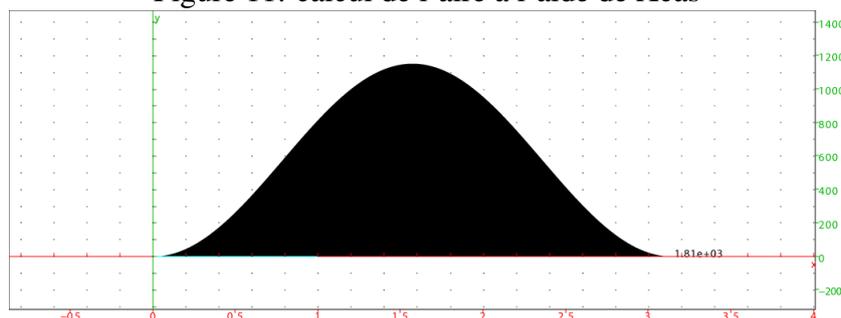
Figure 10: Valeur moyenne



- En position~ : dans ce cas le voltmètre indiquera la valeur efficace (r.m.s) de la tension.

Le calcul de la valeur efficace impose la même contrainte que pour le signal rectangulaire: l'élevation au carré qui reste une opération qu'on effectue ici aussi à l'aide de Xcas.

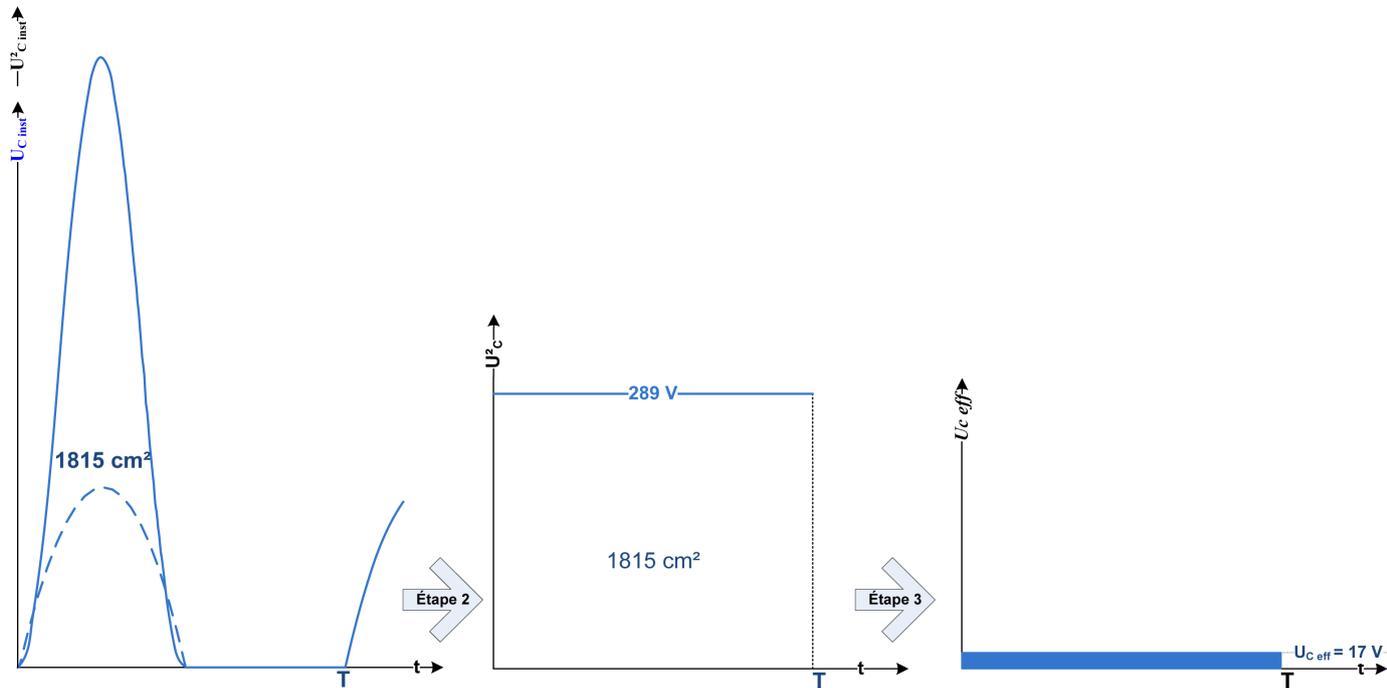
Figure 11: calcul de l'aire à l'aide de Xcas



La procédure de calcul de la valeur efficace en trois étapes:

1. L'aire calculée à l'aide de Xcas est reprise ci-dessous (a).
2. Elle est étalée sur une période T (b) avec pour valeur moyenne:  $U_C^2 = \frac{1815}{2\pi} = 289V$ .
3. Il reste à calculer:  $U_{eff} = U = \sqrt{289} = 17V$ .

Figure 12: (a)(b)(c) Étapes du calcul de la valeur efficace



### Calcul de la tension moyenne et efficace redressée

Les valeurs moyennes et efficaces des tensions se calculent à l'aide de relations ci-dessous. Celles-ci se démontrent à l'aide du calcul intégral.

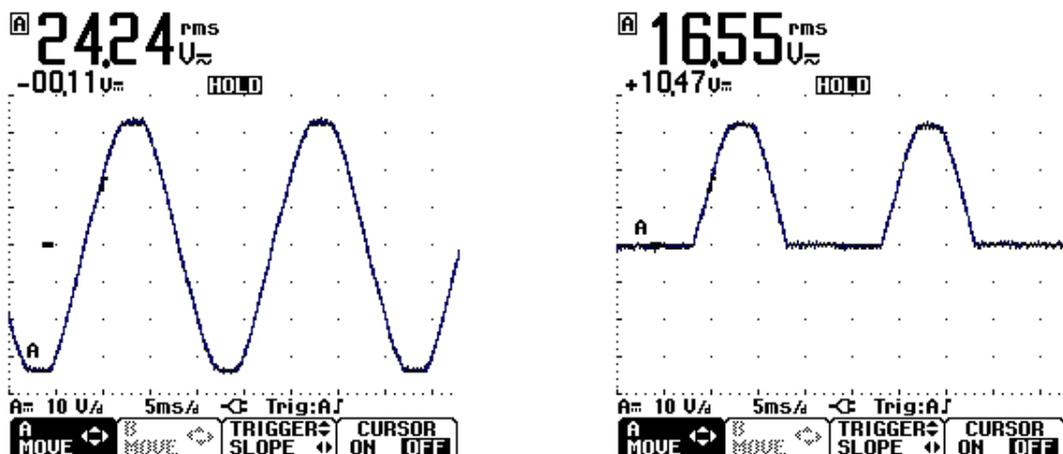
$$\text{Valeur moyenne: } \langle U_C \rangle = \frac{U\sqrt{2}}{\pi} = \frac{24\sqrt{2}}{\pi} = 10,8V \quad \text{et} \quad \langle I_C \rangle = \frac{\langle U_C \rangle}{R}$$

$$\text{Valeur efficace: } U_{eff} = U = \frac{U\sqrt{2}}{2} = \frac{24\sqrt{2}}{2} = 17V \quad \text{et} \quad I_{eff} = I = \frac{U}{R}$$

### Validation des résultats par le Scopmeter de chez Fluke

Nous sommes dans les conditions citées précédemment: La tension d'alimentation est  $U = 24V$ , la charge est une résistance; Le courant n'est pas visualisé car il prend la même forme que la tension redressée  $U_C$ .

Figure 13:  $u(t)$  et  $U_C$



## Conclusion

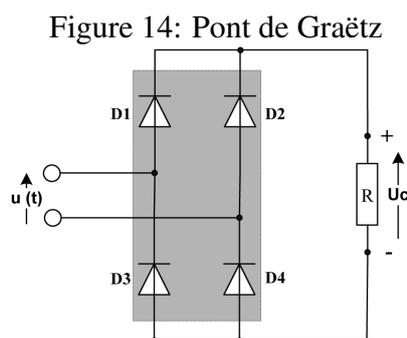
Les résultats sont conformes aux calculs. Il subsistera toujours une différence entre calculs et mesurages car nous avons modélisé la diode sous la forme d'un contact électrique parfait: il n'en est rien car la diode provoque une légère chute de tension  $< 1V$  qu'on néglige devant les tensions mises en jeu. Ici la chute de tension est de  $0,5V$ .

## Avantages et inconvénients des semi conducteurs

- ↗ Pas d'usure des contacts car commutation statique : dans le matériau.
- ↗ Rapidité de commutation : ici 100 fois par seconde ce qui est impossible à réaliser simplement avec un contact électrique.
- ↗ Silencieux.
- ↗ Peu onéreux car les diodes sont des composants très diffusés.
- ↘ La commutation s'effectue sur une surface minuscule : les semi conducteurs sont des composants sensibles aux surtensions et aux tensions inverses de blocage qui apparaissent à l'ouverture, et qui peuvent provoquer le claquage de la jonction.
- ↘ Les semi conducteurs, par construction, ne peuvent pas limiter la valeur du courant dans le circuit : ils sont passants ou bloqués. Seul, le récepteur fixe le courant qu'il faut surveiller afin d'éviter la destruction de la diode lors d'une surintensité : ces propriétés font que le choix d'un semi conducteur et de sa protection associée est quelquefois compliqué.

### 1.1.2 Redressement bi alternance

La tension  $u$  est alternative sinusoïdale issue du réseau B.T ou T.B.T comme pour le redressement mono alternance.



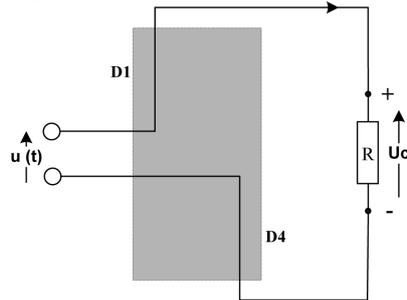
### Schéma de montage

### Fonctionnement du pont de Graëtz

Les diodes conduisent deux par deux :

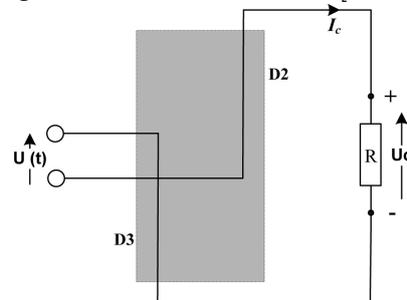
Pendant le passage de l'alternance positive, les diodes D1 et D4 sont polarisées dans le sens direct, les deux autres sont bloquées. Le fonctionnement est comme représenté ci-dessous.

Figure 15: Conduction sur  $[0 - \pi]$



Pendant le passage de l'alternance négative, les diodes D2 et D3 sont polarisées dans le sens direct, D1 et D4 sont bloquées.

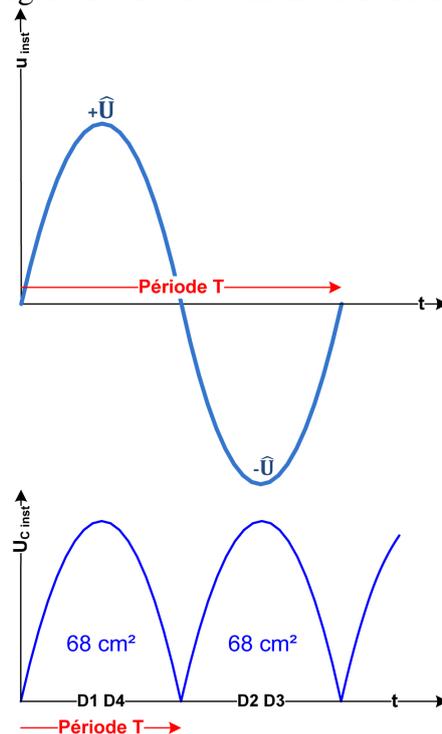
Figure 16: Conduction sur  $[\pi - 2\pi]$



### Forme et valeur de la tension redressée : $U_C$

La commutation provoque une tension  $U_C$  redressée toujours positive.

Figure 17: Redressement bialternance



Les calculs sont effectués pour une tension d'alimentation :  $U = 24 \text{ V}$  (efficace)

La tension  $U_C$  peut être mesurée à l'aide d'un voltmètre commuté :

- Soit en position= :figure 17

Dans ce cas le voltmètre indiquera que la valeur moyenne de la tension a doublé par rapport au redressement mono alternance car nous sommes en présence de d'une

alternance par période et par conséquent  $U_C = \frac{136}{2\pi} = 21,6\text{V}$ .

Figure 18: Valeur moyenne



- Soit en position~ : figure 18

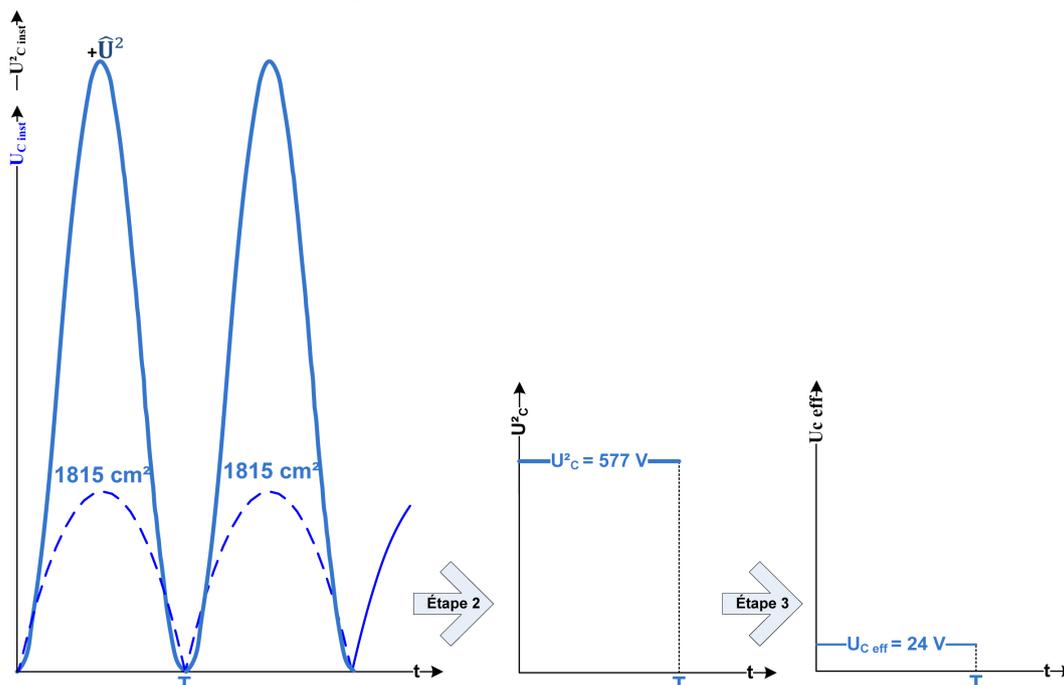
Dans ce cas le voltmètre indiquera la valeur efficace (r.m.s) de la tension qui obéit aux trois étapes suivantes:

1. L'aire est deux fois plus élevée qu'en monoalternance:(a)

2. La valeur de la tension moyenne au carré sur une période  $T^3$  vaut:  $U_C^2 = \frac{1815}{\pi} = 577\text{V}$ .

3. La valeur efficace vaut:  $U_{eff} = U = \sqrt{U_C^2} = \sqrt{577} = 24\text{V}$

Figure 19: (a)(b)(c)Valeur efficace



<sup>3</sup>attention: ici  $T = 10 \text{ ms}$

### Calcul des tensions moyennes et efficaces redressées

Les valeurs sont aussi données par le calcul intégral qui permet d'établir les relations suivantes:

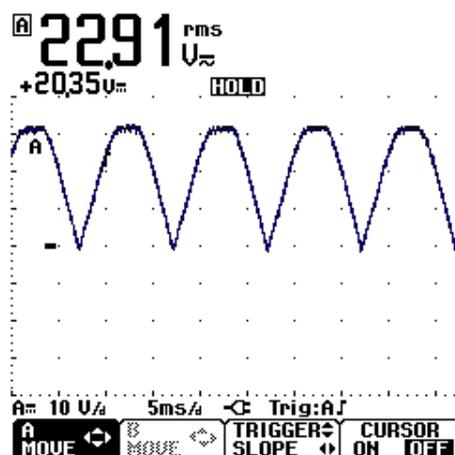
$$\text{Valeur moyenne: } \langle U_C \rangle = \frac{2U\sqrt{2}}{\pi} = \frac{2 \times 24\sqrt{2}}{\pi} = 21,6V \quad \text{et} \quad \langle I_C \rangle = \frac{\langle U_C \rangle}{R}$$

$$\text{Valeur efficace: } U_{eff} = U = 24V \quad \text{et} \quad I_{eff} = I = \frac{U}{R}$$

### Validation des résultats par le Scopmeter de chez Fluke

Nous sommes dans les conditions citées précédemment: La tension d'alimentation est  $U = 24V$ , la charge est une résistance; Le courant n'est pas visualisé car il prend la même forme que la tension redressée  $U_C$ .

Figure 20:  $U_C$



### Conclusion

Les résultats sont conformes aux calculs précédents.

## 1.2 Redressement triphasé

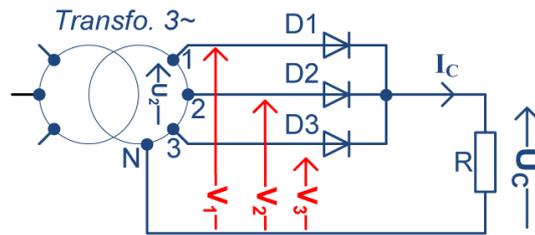
### 1.2.1 Pont P3

chaque diode est raccordée sur une phase, les cathodes sont communes et raccordées sur la charge. Le retour au transformateur s'effectue par le neutre.

### Schéma de montage

Comme en monophasé, l'alimentation du pont est fonction de la valeur de la tension que l'on désire obtenir: Soit celle-ci est prise au secondaire d'un transformateur comme sur le schéma ci-dessous, soit prise directement sur le réseau.

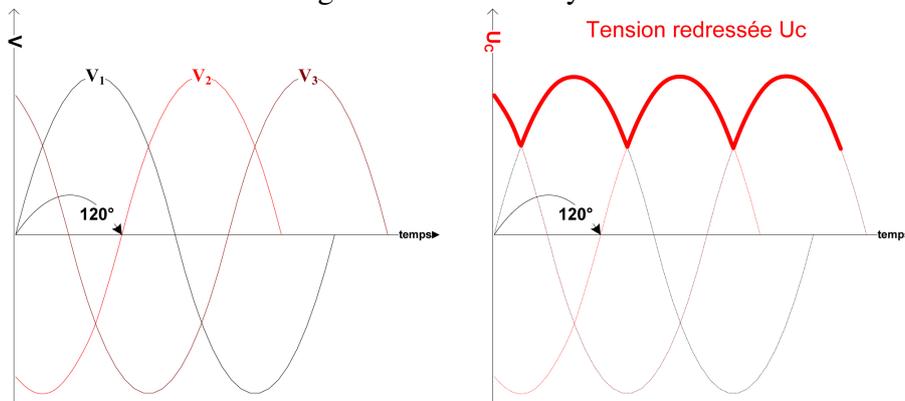
Figure 21: Pont P3



### Fonctionnement du pont P3

La diode dont l'anode est portée au potentiel le plus élevé conduit. Par conséquent, chaque diode conduit à son tour dans l'ordre suivant : D3, D1, D2, D3, D1, etc.

Figure 22: Valeur moyenne



Valeur de  $U_C$  et  $U_{eff}$  pour une tension d'alimentation:  $V = 24V$

$$\langle U_C \rangle = \frac{3\sqrt{6}V}{2\pi} = \frac{3\sqrt{6} \times 24}{2\pi} = 28V$$

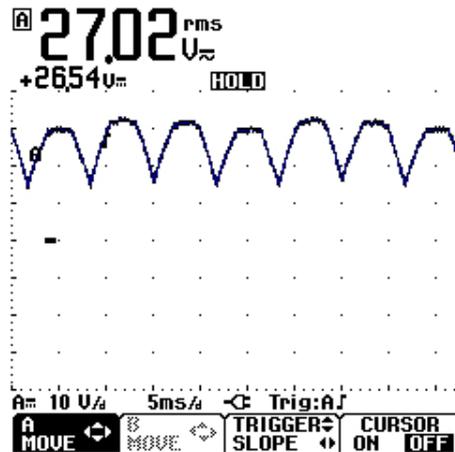
$$U_{eff} = \frac{V}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} (4\pi + 3\sqrt{3})} = 1,189 \times V = 1,189 \times 24 = 28,5V$$

### Validation des résultats par le Scopmeter de chez Fluke

Nous sommes dans les conditions citées précédemment: La tension d'alimentation est  $U = 24V$ , la charge est une résistance; Le courant n'est pas visualisé car il prend la même forme que la tension redressée  $U_C$ .

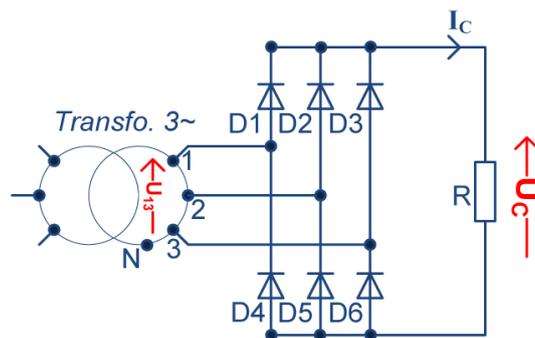
**Conclusion:** Les résultats sont conformes aux calculs précédents.

Figure 23:  $U_C$



### 1.2.2 Pont PD3

Figure 24: Pont PD3



#### Fonctionnement du pont PD3

Deux diodes vont conduire simultanément :

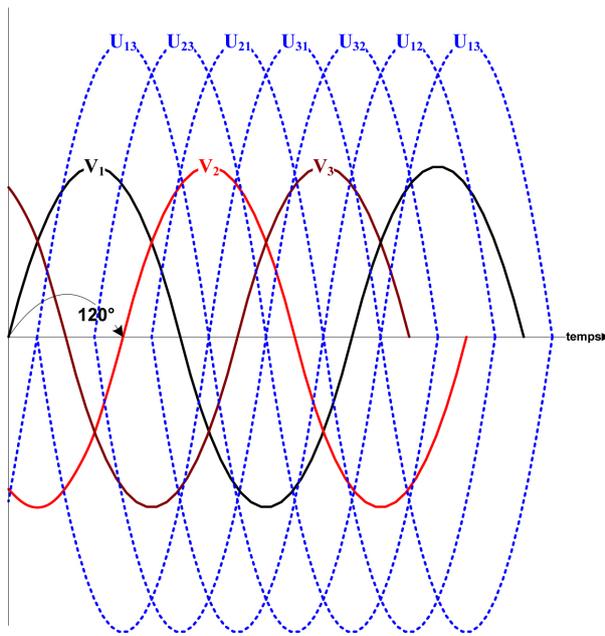
- La 1<sup>ere</sup> diode dont l'anode est portée au potentiel le plus positif : concerne le pont de diodes dont les cathodes sont communes.
- La 2<sup>eme</sup> diode dont la cathode est portée au potentiel le plus négatif : concerne le pont de diodes dont les anodes sont communes.

#### Oscillogrammes du réseau d'alimentation

$$f = 50\text{Hz} \quad \frac{U}{V} = \sqrt{3} \quad \omega = 2\pi f$$

$$v_1 = V\sqrt{2}\sin(\omega t) \quad v_2 = V\sqrt{2}\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad v_3 = V\sqrt{2}\sin(\omega t + \frac{4\pi}{3})$$

$V$  : tensions simples       $U$  : tensions composées



L'ordre de passage des tensions les plus positives et les plus négatives donnent l'ordre de conduction des diodes:

$$0 < \alpha < \frac{\pi}{6} : V_3 > 0 \quad \text{et} \quad V_2 < 0$$

**D3** et **D5** passantes:  $U_C = V_3 - V_2 = U_{32}$

$$\frac{\pi}{6} < \alpha < \frac{3\pi}{6} : V_1 > 0 \quad \text{et} \quad V_2 < 0$$

**D1** et **D5** passantes:  $U_C = V_1 - V_2 = U_{12}$

$$\frac{3\pi}{6} < \alpha < \frac{5\pi}{6} : V_1 > 0 \quad \text{et} \quad V_3 < 0$$

**D1** et **D6** passantes:  $U_C = V_1 - V_3 = U_{13}$

$$\frac{5\pi}{6} < \alpha < \frac{7\pi}{6} : V_2 > 0 \quad \text{et} \quad V_3 < 0$$

**D2** et **D6** passantes:  $U_C = V_2 - V_3 = U_{23}$

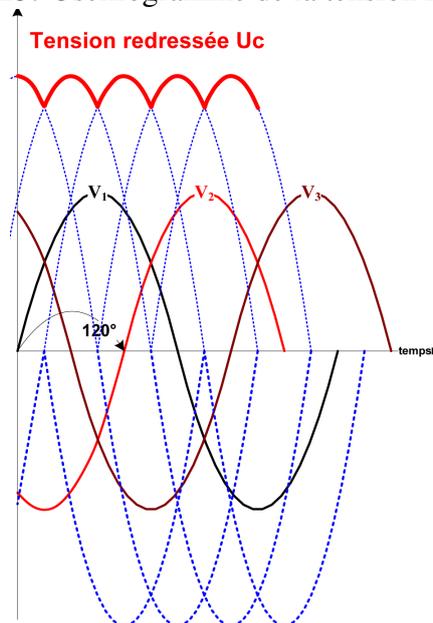
$$\frac{7\pi}{6} < \alpha < \frac{9\pi}{6} : V_2 > 0 \quad \text{et} \quad V_1 < 0$$

**D2** et **D6** passantes:  $U_C = V_2 - V_1 = U_{21}$

### Valeur de la tension redressée

- $U = V\sqrt{3} = 41,5V$
- $\langle U_C \rangle = \frac{3\sqrt{6}V}{\pi} = \frac{3\sqrt{6} \times 24}{\pi} = 56V$
- $U_{eff} = 3V \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2\pi}\right)} = 2,34 \times V = 2,34 \times 24 = 56V$

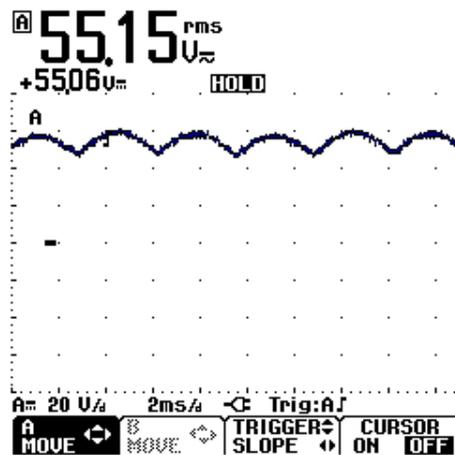
Figure 25: Oscillogramme de la tension redressée



### Validation des résultats par le Scopmeter de chez Fluke

Nous sommes dans les conditions citées précédemment: La tension d'alimentation est  $U = 41,5$ , car le pont est alimenté entre phases. La charge est une résistance.

Figure 26:  $U_C$

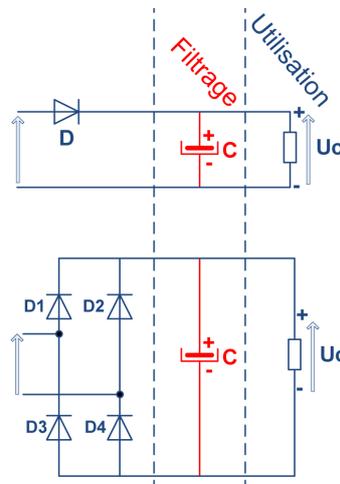


**Conclusion:** Ici aussi les mesurages donnent des résultats proches des calculs effectués.

### 1.3 Le filtrage

Le filtrage de la tension issue d'un pont redresseur consiste à élever la valeur de sa tension moyenne à l'aide d'un condensateur polarisé. Celui-ci réalise cette fonction en diminuant fortement l'ondulation  $\Delta U$ . Le condensateur doit se raccorder comme ci-dessous suivant que l'on se trouve en présence d'un redressement mono, bi alternance : en dérivation sur la charge.

Figure 27: Schéma de raccordement du condensateur



### Schéma de montage

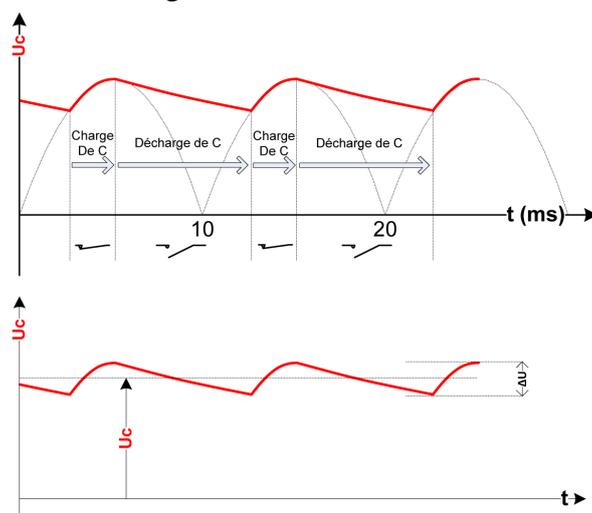
## Principe

Le condensateur se charge pendant le temps de conduction des diodes et se décharge dans le récepteur lors de leur ouverture. Lors de la décharge, seul le condensateur participe à l'alimentation de la charge. Cette particularité destine ces convertisseurs d'énergie à l'alimentation de charge de faible puissance : quelques kW. Il faut préciser que l'utilisation des alimentations redressées disparaît au profit des alimentations à découpage qui offrent un bien meilleur rendement et dont l'étude sera traitée ultérieurement. Cette raison me pousse à simplifier l'étude de la partie filtrage: dimensionnement des capacités de filtrage et étude des courants de circulation.

## Caractéristiques du condensateur de filtrage

- Il est de forte valeur (quelques centaines à plusieurs milliers de microfarad).
- Il est polarisé : son utilisation est interdite en alternatif
- Comme tous les condensateurs, il est prévu pour fonctionner sous une tension maximale à ne pas dépasser sous peine de claquer le diélectrique.
- Il faut attendre la décharge complète des condensateurs avant intervention sur les circuits : il faut prévoir un dispositif de décharge lors de la mise hors tension comme dans les variateurs pour moteurs à courant alternatif par exemple.
- Il génère une surintensité lors de sa mise sous tension qui diminue avec sa charge.
- $\Delta U$  diminue avec  $C$  : voir oscillogrammes ci-dessous.
- Il réduit considérablement le temps de conduction des diodes, ce qui a pour effet de générer des ondes riches en harmoniques et de solliciter de manière intensive les condensateurs dans les phases d'alimentation de la charge.

Figure 28: Tension filtrée



## Choix du condensateur de filtrage

Le fonctionnement du condensateur montre que la tension que l'on souhaite obtenir d'une alimentation continue filtrée ne peut en aucun cas dépasser  $V\sqrt{2}$  : ou  $V$  représente la valeur efficace obtenue à l'entrée du pont de diode. Ainsi un transformateur qui délivre 12V efficace sur son enroulement secondaire ne peut générer au maximum que  $12\sqrt{2} = 17V$  de tension redressée et filtrée.

### 1.3.1 Les redresseurs commandés

#### Fonction

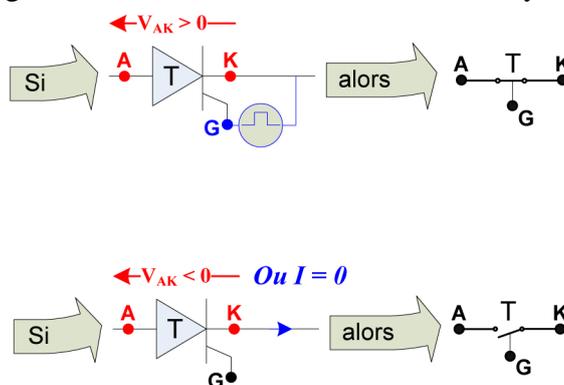
Il permet d'obtenir une tension unidirectionnelle réglable : un composant supplémentaire est nécessaire pour cette conversion : le THYRISTOR.

#### Symbole et fonctionnement simplifié du thyristor

Le thyristor possède 3 bornes de raccordement :

- Entre l'anode et la cathode on trouve le contact statique du semi-conducteur.
- La gâchette ne sert qu'à commander la fermeture du contact à l'aide d'une impulsion électrique : l'ouverture de la jonction est obtenue lorsque le courant s'annule ou bien si  $V_{AK} < 0$ .

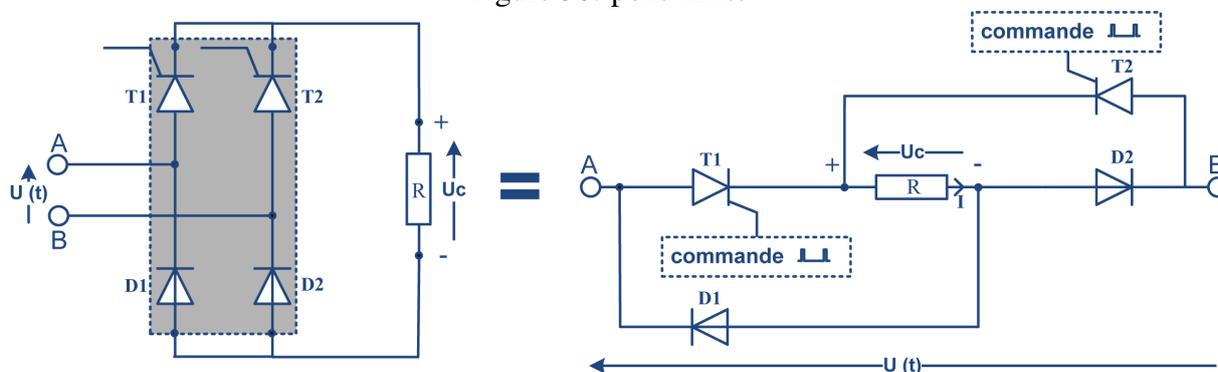
Figure 29: Conditions de conduction du thyristor



#### Schéma de montage: débit sur charge résistive

C'est un pont de Graëtz mixte dont le fonctionnement est équivalent au pont 4 diodes vu précédemment. Il est composé de deux diodes et de deux thyristors <sup>4</sup>.

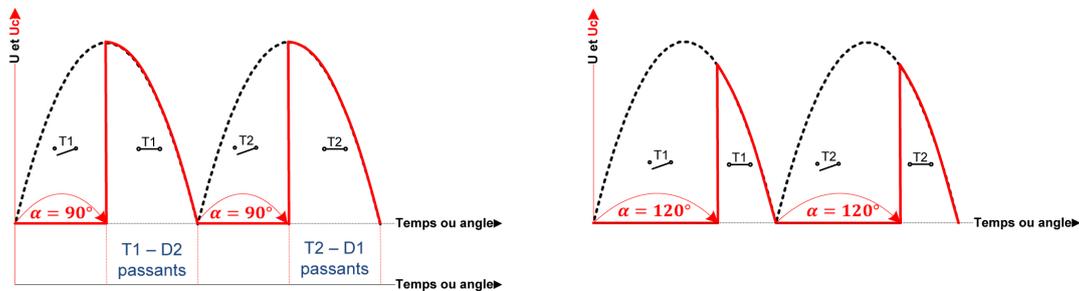
Figure 30: pont mixte



<sup>4</sup>les deux thyristors peuvent être ou ne pas être situés sur un même bras de pont: lorsque les cathodes sont communes, comme sur le schéma proposé, la commande des gâchettes est plus simple à réaliser alors que lorsqu'ils sont raccordés sur le même bras, les diodes en série peuvent jouer le rôle de roue libre

La tension apparaît aux bornes de la charge dès que le thyristor susceptible de conduire est amorcé : plus l'angle d'amorçage du thyristor est grand, plus la tension obtenue aux bornes de la charge est faible. La valeur de la tension obtenue est directement liée à son angle comme on peut le voir ci-dessous pour 2 tensions obtenues pour 2 valeurs de l'angle d'amorçage  $\alpha$ .

Figure 31: tension redressée:débit sur R



**Valeur de la tension moyenne obtenue**

$$\langle U_C \rangle = \frac{V\sqrt{2}}{\pi}(1 + \cos\alpha)$$

**Tableau de relevés pour une tension d'alimentation V = 230V**

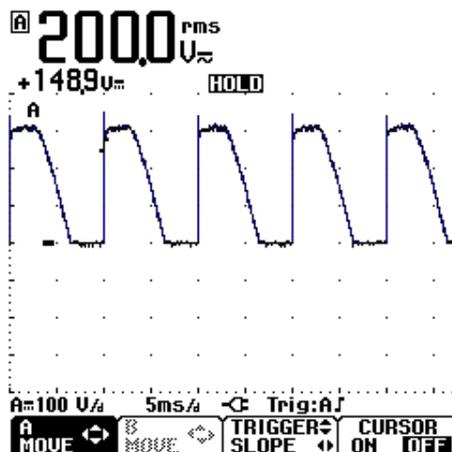
$\alpha(deg.)$	0°	30°	60°	90°	120°	150°
$U_C(V)$	207	193	155	103	52	14

**Validation des résultats par le Scopmeter de chez Fluke**

Nous sommes dans les conditions citées précédemment: La tension d'alimentation est  $V = 230V$ , la charge est résistive. Le courant n'est pas visualisé car il prend la même forme que la tension redressée  $U_C$ .

**Conclusion:** Les résultats sont conformes aux calculs précédents.

Figure 32: Débit sur R



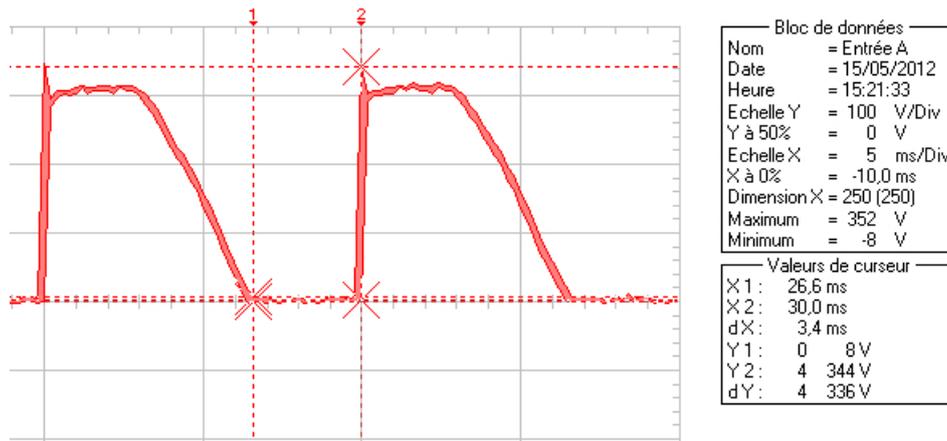
Le mesurage de l'angle de conduction  $\alpha$  des thyristors est effectué en capturant l'écran de mesure comme ci-dessous:

ici  $t = 3,4 \text{ ms}$  qu'il faut convertir en radians si on retrouve la valeur mesurée par le scopemeter:

La durée d'une période est :  $T = 20 \text{ ms}$  ( $2\pi$  radians), par conséquent, la valeur de l'angle  $\alpha$  est

$$: \alpha = \frac{3,4 \times 2\pi}{20} = 1,068 \text{rd}$$

Figure 33:  $\alpha = 1,07 \text{rd}$



Les mesurages sont effectués pour une tension d'alimentation  $V = 220 \text{V}$ .

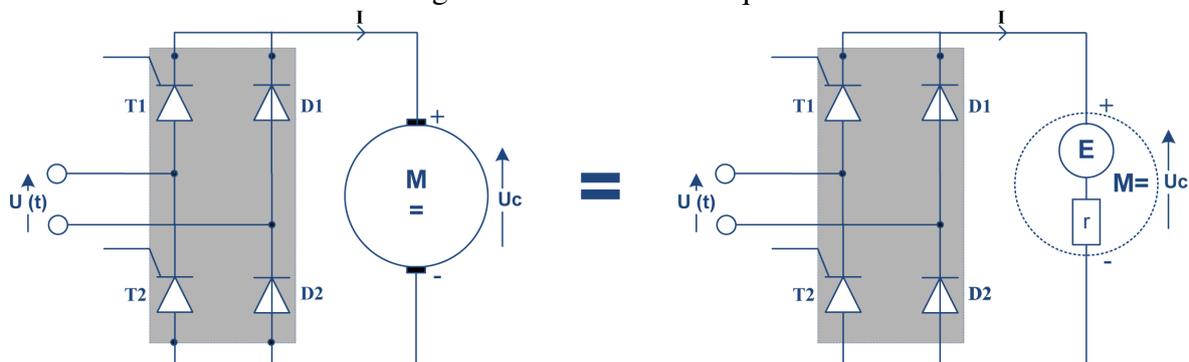
la valeur moyenne mesurée par l'appareil est:

$$\langle U_C \rangle = \frac{V\sqrt{2}}{\pi} (\cos \alpha + 1) = \frac{220\sqrt{2}}{\pi} (\cos 1,07 + 1) = 146 \text{V}$$

Et la valeur efficace mesurée par l'appareil est:

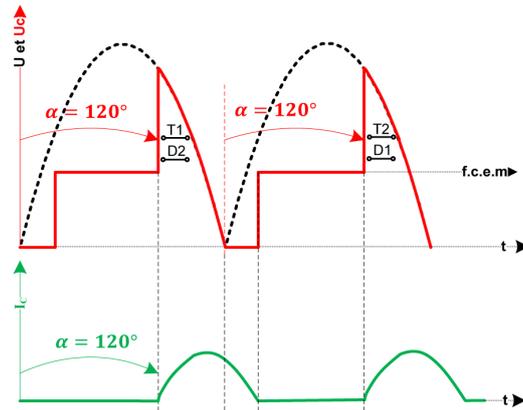
$$U_{eff} = V \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha} = 220 \sqrt{1 - \frac{1,07}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin(2 \times 1,07)} = 196 \text{V}$$

Figure 34: Modèle électrique



**Débit sur f.c.é.m: moteur ou batterie**

Figure 35: Tension redressée: débit sur f.c.e.m



### Oscillogrammes du fonctionnement

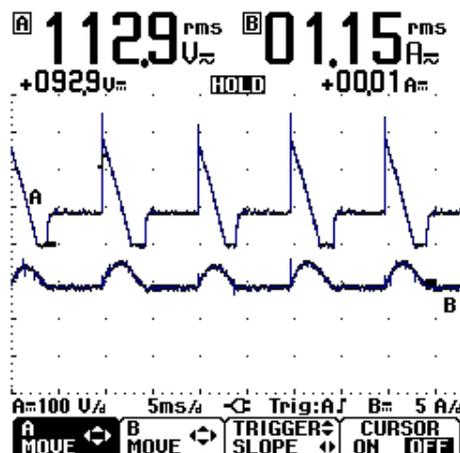
La tension aux bornes du moteur  $U_C$  prend la valeur de  $u$  (réseau) lorsque les semi-conducteurs sont passants et de  $E$  lorsque les semi-conducteurs sont bloqués. La valeur  $E$  correspond à la tension générée par l'induit du moteur lors de son fonctionnement en génératrice<sup>5</sup>. Valeur de la tension moyenne : La relation donnant la valeur  $\langle U_C \rangle$  vue précédemment ne peut plus être utilisée.

### Application : variateur de vitesse pour moteur à courant continu

- L'inducteur est alimenté sous tension fixe ou non alimenté s'il est constitué d'un aimant permanent.
- L'induit est alimenté sous tension réglable via le pont mixte.

Tension mesurée aux bornes de l'induit d'un moteur à courant continu alimenté par un pont mixte

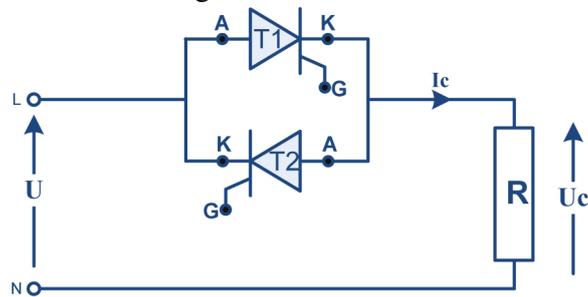
Figure 36: Tension d'alimentation de l'induit



<sup>5</sup>L'étude détaillée dépasse largement le cadre du programme car les semi-conducteurs voient leur conduction prolongée lorsque la tension  $U_C < u$

## 2 Les gradateurs

Figure 37: Gradateur



### Schéma électrique d'un gradateur monophasé

#### Fonctionnement

T1 et T2 sont des thyristors montés tête bêche de manière à pouvoir conduire sur les deux alternances.

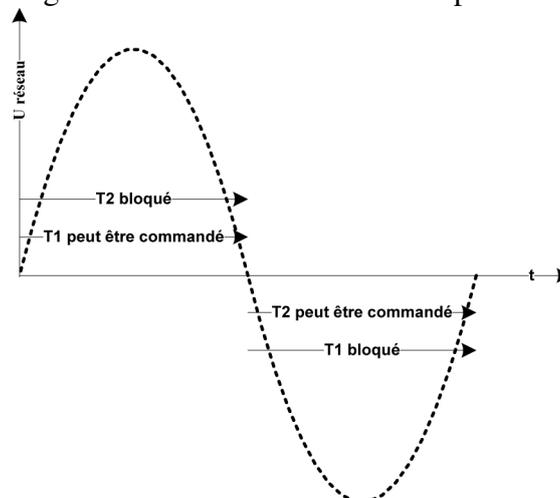
Lorsque l'application est de faible puissance, le gradateur est constitué d'un TRIAC : gradateur de lumière, démarreur et variateur pour moteur de faible puissance.

#### Fonctionnement

Une impulsion électrique, générée par un circuit de commande électronique, est appliquée sur la gâchette du thyristor pendant l'alternance ou il est susceptible d'être amorcé :

- T1 est amorçable sur l'alternance positive
- T2 est amorçable sur l'alternance négative

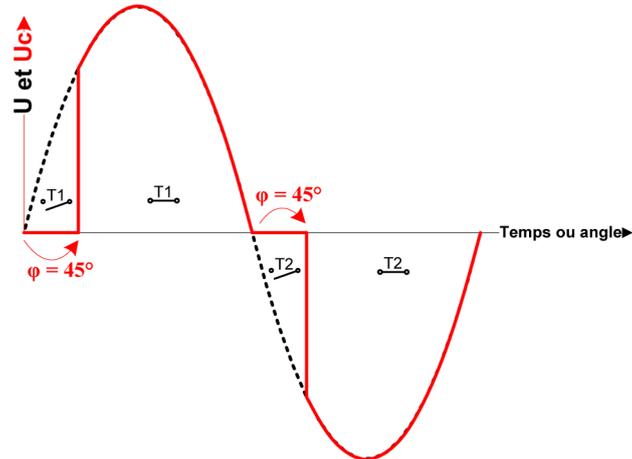
Figure 38: Période de conduction possible



### Ordres de fermeture des thyristors

Si une impulsion est appliquée sur la gâchette de T1, 45° après l'apparition de l'alternance positive, on appliquera sur la gâchette de T2 une impulsion « déphasée » d'un angle de 45° par rapport à l'apparition de l'alternance négative : les impulsions sont déphasées de  $\pi$ .

Figure 39: Tension redressée pour  $\alpha = 45^\circ$ : débit sur R



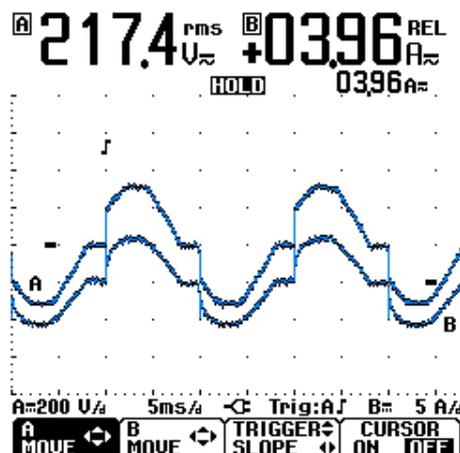
### Conséquences

La tension  $U_C$  mesurée aux bornes de la charge n'est plus sinusoïdale et possède une valeur efficace inférieure à la tension d'alimentation, car pendant 45° ou 2,5 ms, le thyristor est bloqué et n'alimente donc pas la charge R.

### Mesurage effectués sur un circuit d'éclairage

Le circuit d'éclairage est constitué de 6 projecteurs halogènes de puissance unitaire  $P = 500W$ , alimentés par 3 gradateurs Legrand (1000W). Les trois circuits sont repartis sur les trois phases du réseau triphasé.

Figure 40:  $u(t)$  et  $i(t)$



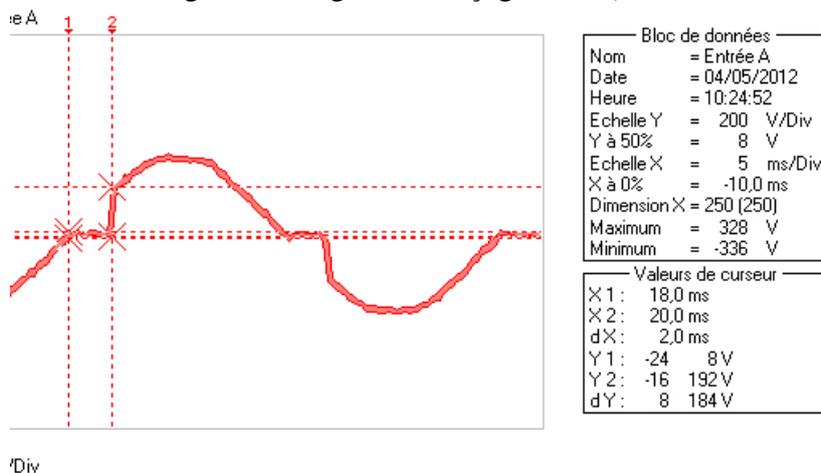
Le mesurage de l'angle de conduction  $\alpha$  des triacs peut s'effectuer de manière précise en capturant l'écran de mesurage comme ci-dessous:

ici  $t = 2 \text{ ms}$  qu'il faut convertir en radians si on retrouve la valeur mesurée par le scopmeter:

La durée d'une période est :  $T = 20 \text{ ms}$  ( $2\pi$  radians), par conséquent, la valeur de l'angle  $\alpha$  est

$$\alpha = \frac{2 \times 2\pi}{20} = 0,63rd$$

Figure 41: angle d'amorçage  $\alpha = 0,63rd$



Et la valeur efficace mesurée par l'appareil est:

$$U_{eff} = V \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha} = 230 \sqrt{1 - \frac{0,63}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin(2 \times 0,63)} = 224V$$

**Conclusion:** le mesurage vient ici aussi corroborer avec une assez bonne précision les calculs effectués.

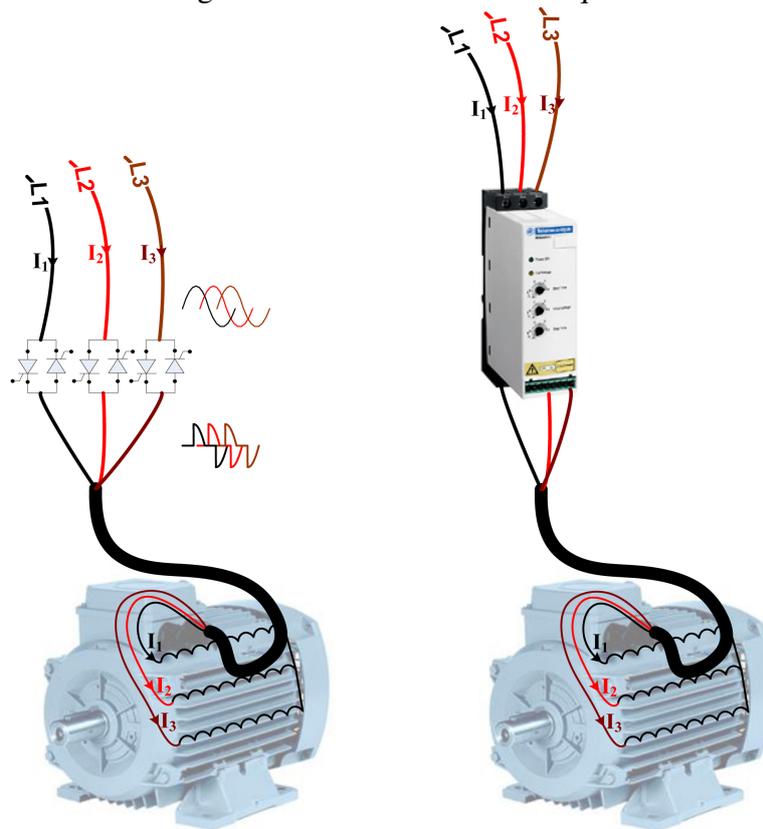
### Conclusion

En augmentant l'angle d'amorçage des thyristors, on règle la valeur de la tension d'alimentation de la charge.

### Applications

Le principe décrit ci dessus est utilisé dans les démarreurs progressifs pour moteurs asynchrones triphasés : dans ce cas, on dispose un groupe de thyristors par phase suivant le schéma de principe ci-dessous : l'Altistart de Schneider par exemple.

Figure 42: Démarreur électronique



### Avantages des gradateurs

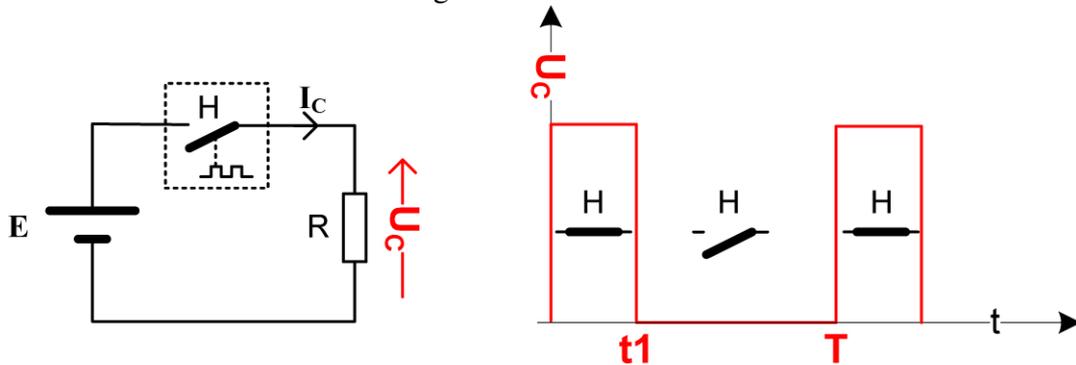
- ↗ Ils remplacent avantageusement les démarreurs statoriques : étoile triangle ou par élimination de résistances.
- ↗ Plus simple à mettre en œuvre (voir ci dessus) : raccordement simplifié, rapide et moins encombrant qu'un démarreur électromécanique.
- ↗ Plus fiables : car la commutation statique est moins fragile que les contacts mécaniques.
- ↗ Réglables : couple de démarrage et accélération réglables ; suppression de la coupure d'alimentation du moteur durant le passage du couplage étoile au couplage triangle.

## 3 Les hacheurs

### Schéma de montage

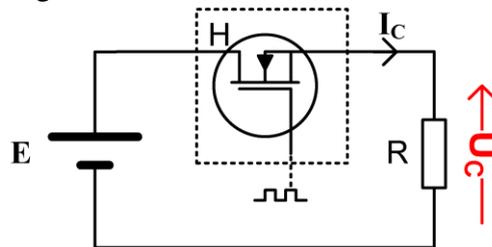
Le commutateur H, appelé hacheur, permet d'obtenir un régime de commutation de fréquence fixe et à rapport cyclique variable.

Figure 43: Schéma



Le Hacheur est constitué d'un transistor MOS dans le schéma proposé ci-dessous: seul le raccordement du circuit de puissance est représenté.

Figure 44: hacheur à transistor MOS

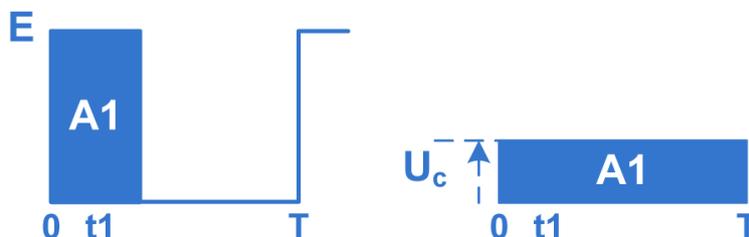


### Fonctionnement

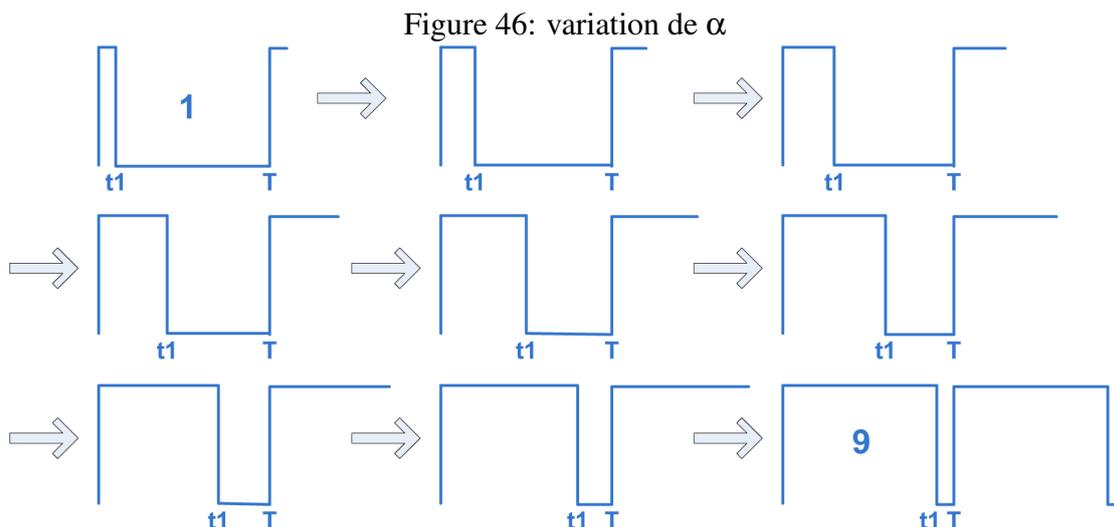
Lorsque l'on augmente la durée de fermeture de H (figure 45), on augmente le temps pendant lequel la charge se trouve sous tension, donc par conséquent l'aire A1 et la tension  $U_C$ . L'aire  $A1 = E \times t1$  peut s'étaler sur  $T$  qui prend alors la valeur moyenne  $U_C$  qui a pour expression:

$$U_C = E \frac{t1}{T} \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{t1}{T} \quad \text{et} \quad 0 < \alpha < 1$$

Figure 45: Valeur moyenne



Les 9 oscillogrammes de la figure 45 montre l'évolution de la tension aux bornes de la charge qui croît avec  $\alpha$



### Application numérique

$E = 100 \text{ V}$  ;  $T = 20 \text{ ms}$

- Calculons la valeur de la tension moyenne pour trois valeurs de  $t_1$ : 2 ms; 10 ms; 15 ms. Les valeurs de  $\alpha$  correspondant aux valeurs données sont successivement:

- Pour  $t_1 = 2 \text{ ms}$ :  $\alpha = \frac{t_1}{T} = \frac{2}{20} = 0,1$  et  $\langle U_C \rangle = E \frac{t_1}{T} = 0,1 \times 100 = 10V$
- Pour  $t_1 = 10 \text{ ms}$ :  $\alpha = \frac{t_1}{T} = \frac{10}{20} = 0,5$  et  $\langle U_C \rangle = E \frac{t_1}{T} = 0,5 \times 100 = 50V$
- Pour  $t_1 = 15 \text{ ms}$ :  $\alpha = \frac{t_1}{T} = \frac{15}{20} = 0,75$  et  $\langle U_C \rangle = E \frac{t_1}{T} = 0,75 \times 100 = 75V$

- Calculons les valeurs efficaces

A) Pour  $t_1 = 2 \text{ ms}$

- On élève au carré  $E$  sur une période  $T$ : ici  $E^2 = 10000V$  .
- On calcule la valeur moyenne de la tension obtenue:  $\langle U_C^2 \rangle = 1000V$
- On calcule la racine carrée de la tension obtenue:  $\sqrt{\langle U_C^2 \rangle} = 31,6V$

B) Pour  $t_1 = 10 \text{ ms}$

- On élève au carré  $E$  sur une période  $T$ : ici  $E^2 = 10000V$  .
- On calcule la valeur moyenne de la tension obtenue:  $\langle U_C^2 \rangle = 5000V$
- On calcule la racine carrée de la tension obtenue:  $\sqrt{\langle U_C^2 \rangle} = 70,7V$

C) Pour  $t_1 = 15 \text{ ms}$

- On élève au carré  $E$  sur une période  $T$ : ici  $E^2 = 10000V$  .
- On calcule la valeur moyenne de la tension obtenue:  $\langle U_C^2 \rangle = 7500V$
- On calcule la racine carrée de la tension obtenue:  $\sqrt{\langle U_C^2 \rangle} = 86,6V$

### Conclusion

On remarque évidemment que l'étude du hacheur traite le problème du signal **rectangulaire** abordé en début de cours.

## 4 Quelques précisions supplémentaires

### Précisions qui concernent les semi conducteurs

Voici quelques liens vers des fiches techniques de semi conducteurs, dans lesquels on trouve les caractéristiques propres à chaque composant utilisé dans ce cours. Ne perdons pas de vue que tous les composants cités dans ce document sont idéalisés pour éviter d'ajouter les problèmes de matériel aux concepts déjà difficiles introduits par l'étude des convertisseurs. La réalité est toute autre, car ces composants, au même titre que les matériels électromécaniques, possèdent des contraintes d'utilisation: courant, tension, fréquence de commutation..etc, qu'il faut absolument respecter, auxquels s'ajoutent des caractéristiques propres à l'électronique, c'est à dire aux semi conducteurs: la polarisation, tensions inverses maximum, ...etc. D'autres part, ces documents supplémentaires n'entrent pas dans le fonctionnement détaillé de ces composants car ces détails interviennent lors de l'étude du cycle de commutation des semi conducteurs qui relèvent de l'électronique de commande: ainsi, si la diode, comme nous venons de le voir, commute naturellement au gré de sa polarisation, les autres composants, triacs, transistors, ..etc, voient leur commutation forcée par la polarisation d'une troisième patte,<sup>6</sup> qui nécessite aussi un environnement technologique plus ou moins complexe, propre à chaque convertisseur. Ainsi, si un gradateur pour éclairage lumineux ou pour moteur asynchrone de faible puissance voit sa partie commande réalisée assez simplement à l'aide de quelques composants, il en est rien d'un variateur pour moteur asynchrone qui nécessite l'emploi d'un microprocesseur programmé pour élaborer le cycle de commutation de ses six transistors de puissance.

### Liens vers fiches techniques

Ces fichiers n'ont rien de particulier car tous les documents constructeurs utilisent les mêmes repères: par exemple la tension inverse maximale supportée par une diode est notée:  $V_{RRM}$

- [Diodes de redressement](#)
- [Diodes de redressement de puissance](#)
- [Pont de diodes](#)
- [Thyristors](#)
- [Thyristors de puissance](#)
- [Triacs](#)
- [Condensateurs polarisés](#)
- [Transistor NPN](#)
- [Transistors Mosfet](#)
- [Transistors IGBT](#)

---

<sup>6</sup>base, gâchette, gate, ..etc

### Précisions qui concernent les courants de circulation

Le courant électrique ne pose pas de problème particulier tant que les charges alimentées sont résistives, car dans ce cas, le courant absorbé est la copie conforme de la tension d'alimentation: le courant apparaît lorsque la tension est présente aux bornes de la charge et disparaît naturellement avec elle.

En revanche, lorsque le circuit est inductif, lors de l'alimentation d'un moteur par un pont mixte par exemple, ou bien lors d'un filtrage par inductance, le temps de conduction des semi-conducteurs est modifié. Sans entrer dans des détails qui débordent du cadre du cours et qui seraient trop long à développer ici, pendant la phase hachurée 1, l'inductance du moteur absorbe de l'énergie issue du réseau, qu'elle restitue lors de la phase 2 quand la tension  $U_C$  devient inférieure à la tension  $E + rI$  aux bornes du moteur. Ce phénomène produit le prolongement de la conduction des semi-conducteurs qui permettent l'évacuation de l'énergie emmagasinée comme en témoigne la présence du courant lors du phénomène.

Figure 47: Pont mixte

