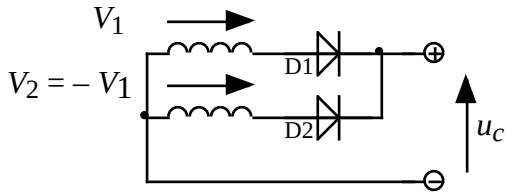
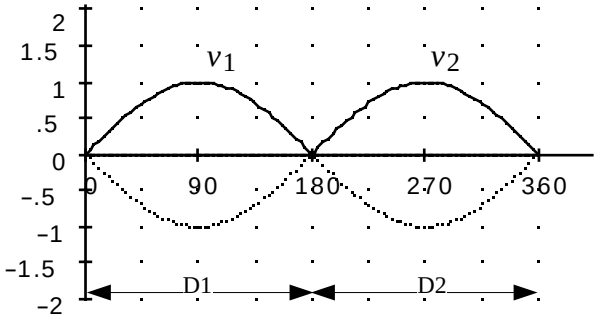
C22 - Conversions alternatif - continu

Redresseurs non commandés sur charge résistive

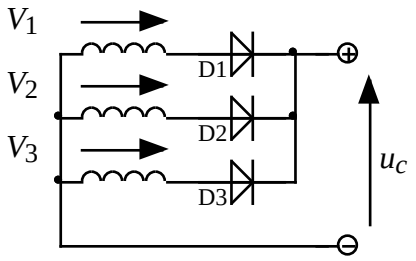
Soit T la période du signal alternatif (par ex., T = 20 ms à f = 50 Hz), T_{red} celle du signal redressé

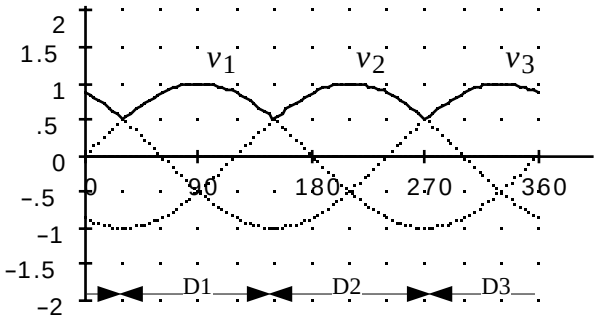
P2 $T_{red} = T/2$ ($\Rightarrow f$ = 100 Hz)



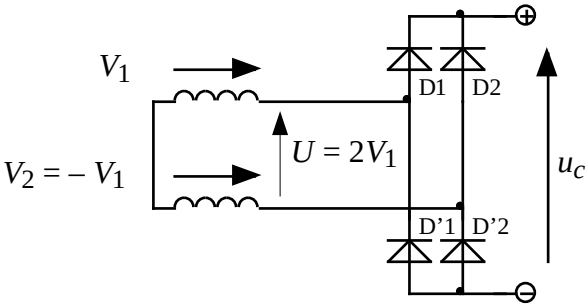


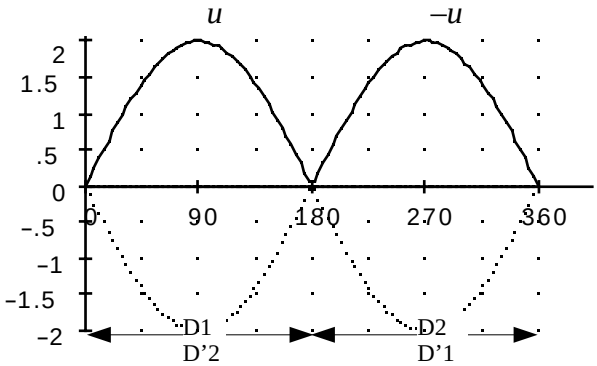
P3 $T_{red} = T/3$ ($\Rightarrow f$ = 150 Hz)



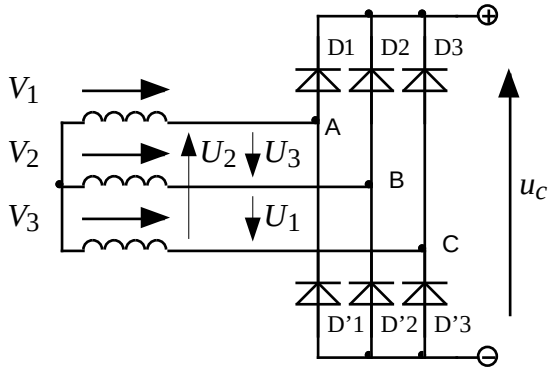


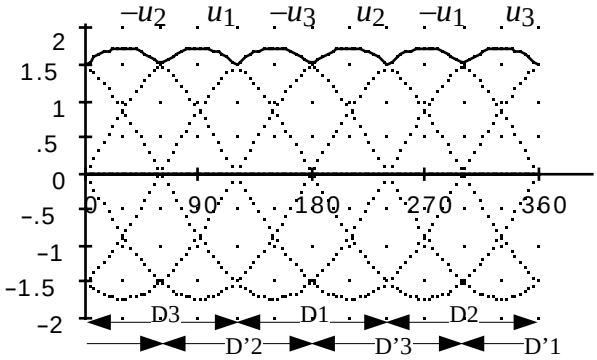
PD2 $T_{red} = T/2$ ($\Rightarrow f$ = 100 Hz)



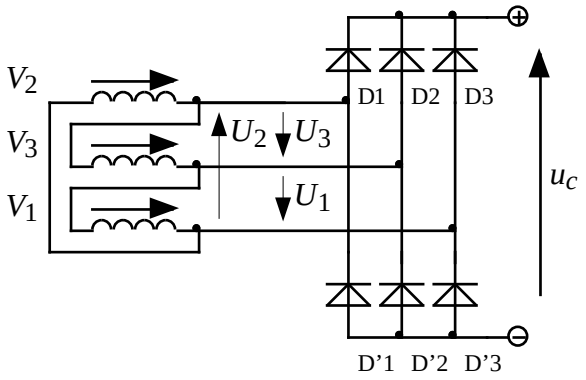


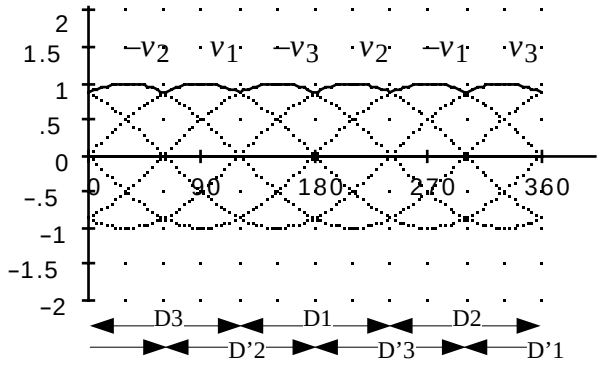
PD3 $T_{red} = T/6$ ($\Rightarrow f$ = 300 Hz)



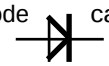


S3 $T_{red} = T/6$ ($\Rightarrow f = 300$ Hz)





Détermination de l'ordre de conduction des diodes en triphasé

Rappel : anode  cathode (**K**athode...)

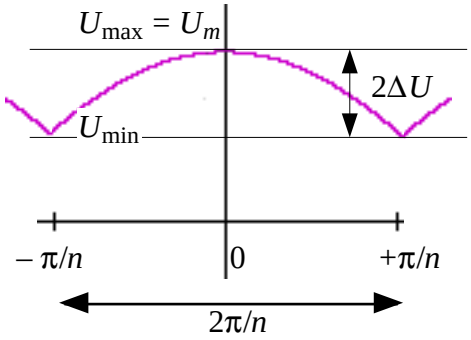
On considère que les points A ; B ; C (voir pont PD2) sont portés respectivement aux potentiels U_2 ou $-U_3$; U_3 ou $-U_1$; U_1 ou $-U_2$ ($+U$ correspond à l'extrémité d'une flèche, $-U$ à l'origine).

Parmi les diodes D_1, D_2, D_3, celle qui conduit est la diode dont la cathode est portée au potentiel le plus positif parmi $\{U_1, U_2, U_3, -U_1, -U_2, -U_3\}$.

Parmi les diodes D'_1, D'_2, D'_3, celle qui conduit est la diode dont l'anode est portée au potentiel le plus négatif parmi $\{U_1, U_2, U_3, -U_1, -U_2, -U_3\}$.

Calculs des valeurs moyenne et efficace de la tension redressée dans le cas général

On effectue plus facilement les calculs à partir de fonctions en cosinus :



nb d'arcs de sinusoïdes par période	Facteur de crête $F_c = \frac{U_{max}}{U_{eff}}$	Taux d'ondulation $K = \frac{\Delta U}{U} = \frac{U_{max} - U_{min}}{2\overline{U}}$
2	1,414	0,785
3	1,190	0,302
6	1,046	0,070
12	1,011	0,017

valeur moyenne :

$$\overline{U} = \frac{1}{\frac{2\pi}{n}} \int_{-\frac{\pi}{n}}^{+\frac{\pi}{n}} U_m.\cos x \, dx = U_m \frac{n}{\pi} \sin\frac{\pi}{n}$$

valeur efficace :

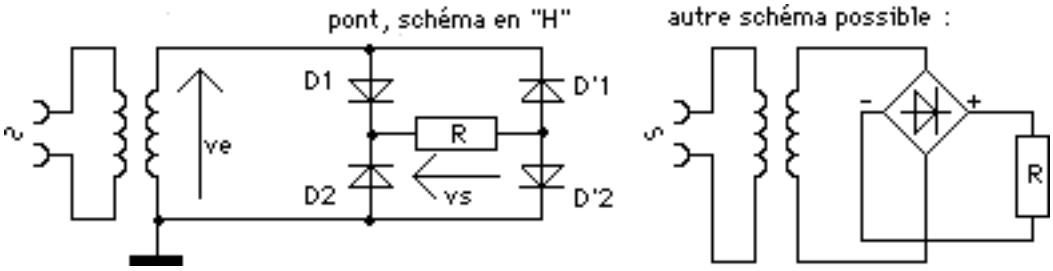
$$U_{eff}^2 = \frac{1}{\frac{2\pi}{n}} \int_{-\frac{\pi}{n}}^{+\frac{\pi}{n}} U_m^2 \cos^2 x \, dx$$

$$\cos^2 x = \frac{1+\cos 2x}{2}$$

$$\Rightarrow U_{eff} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{n}{2\pi} \sin\frac{2\pi}{n}}$$

Application : alimentation stabilisée

• ***Redressement***



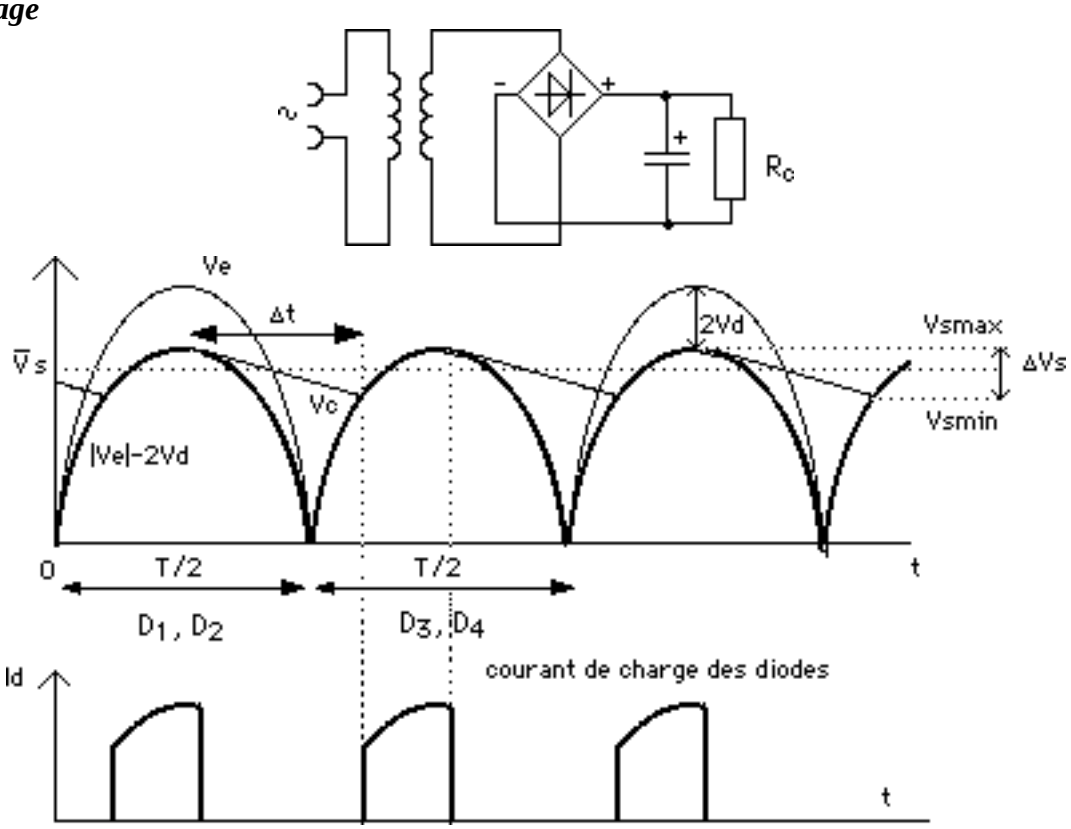
$v_e(t) = V_{eff}\sqrt{2}\sin\omega t$

$v_s(t) = \left|V_m \sin\omega t\right|$ $\Rightarrow$ **un montage PD2 réalise la fonction "valeur absolue"**

$\overline{V_s} = \dfrac{2V_m}{\pi}$

NB : si l'on tient compte des tensions de seuil des diodes : $V_m \approx V_{\text{eff}}\sqrt{2} - 2\,V_d$

• ***Filtrage***



Calcul du condensateur de filtrage : d'une demi-période à l'autre, la tension de sortie v_s diminue de ΔV_s. Cela correspond à une variation de charge $\Delta Q = C\Delta V_s = \overline{I}\Delta t$, où :

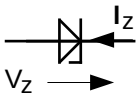
$\Delta t \approx T/2$ (avec $T = 1/f$ et $f = 50$Hz) si le condensateur est de valeur suffisante

$\overline{I} = \overline{V_s} / R_c$ courant moyen passant dans la charge

Pour une valeur donnée de l'ondulation de tension ΔV_s, et pour un courant moyen $\overline{I}$ donné, il faut un condensateur dont la capacité vaut : $C = \dfrac{\overline{I}.T}{2.\Delta V_s}$

NB : la tension est d'autant mieux "lissée" que la capacité est grande. Mais si l'on choisit un condensateur de valeur trop élevée, la charge de celui-ci s'effectue en un temps très bref, ce qui entraîne un courant de crête important dans les diodes, avec risque de destruction de celles-ci.

• ***Stabilisation de tension***

Diode Zener 

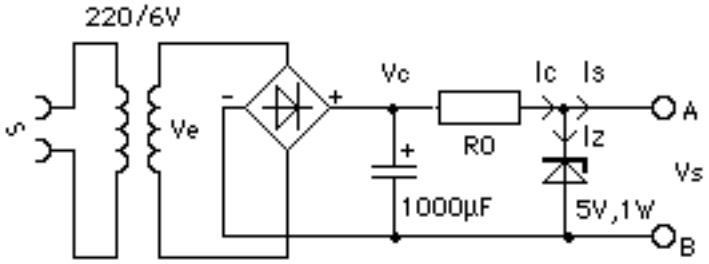
Diode jonction spéciale dont la tension d'avalanche ou "tension Zener", notée V_z , ne dépasse pas quelques volts. En fonctionnement Zener, la diode est parcourue par un courant inverse I_z.

NB : Diode "Transil" : diode zener bidirectionnelle utilisée en protection des circuits

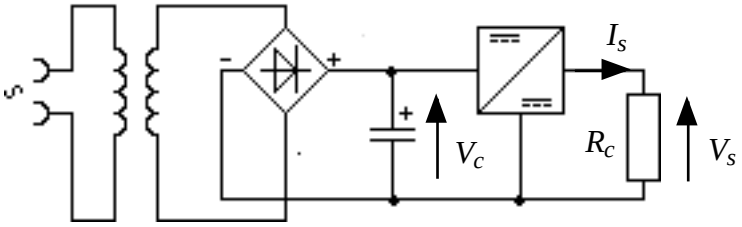
Application : stabilisation de tension à diode Zener

Exemple : alimentation stabilisée 5 V. Dans le schéma ci-dessous la résistance R_0 est une résistance de polarisation de la diode Zener, calculée pour que celle-ci soit traversée par son courant inverse nominal lorsque l'alimentation est à vide.

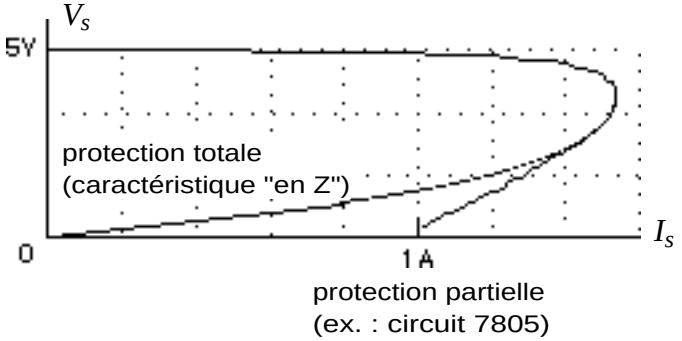
Inconvénient : les diodes Zener étant des diodes de faible puissance, ce genre d'alimentation est réservée aux courants au plus égaux à qq 10 mA.



Meilleure solution : stabilisation de tension avec régulateur



Outre qu'un tel circuit est capable de délivrer un courant > 1 A, il possède une caractéristique de sortie avec protection contre les court-circuits (caractéristique en "Z") :



Inconvénient : ce système de régulation par abaissement de la tension a un mauvais rendement, puisque l'excédent de tension se solde par des pertes Joule évacuées au niveau du

régulateur. Une meilleure solution est assurée par un hacheur abaisseur de tension avec régulation (cf §C23).

Schéma dynamique équivalent : régulation de tension

Un générateur de tension stabilisée V_s est équivalent à un générateur de Thévenin d'impédance interne R_s commandé par une tension V_0 telle que : $V_s = A.V_0$.

Le générateur reçoit son énergie d'une source extérieure de tension redressée et filtrée V_c.

Il est plus simple d'étudier le comportement du système pour des variations autour d'un point de repos fixé : le paramètre de commande est alors nul, puisque $\Delta V_0 \equiv 0$ par définition.

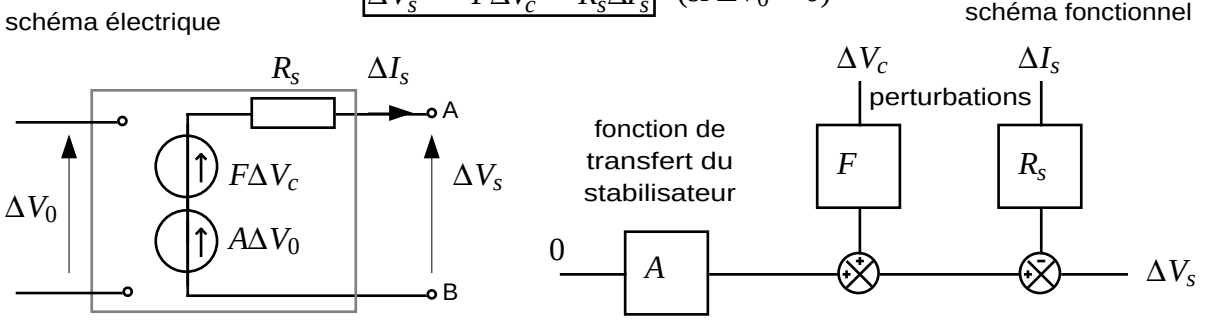
Il y a deux facteurs de perturbation de V_s : a) variation de la charge, donc du courant de sortie I_s ; b) variation de la source d'énergie (réseau de distribution alternatif), donc de V_c. On définit :

$$R_s = \left(-\frac{\Delta V_s}{\Delta I_s}\right)_{\Delta V_c = 0}$$ Perturbation aval = impédance de sortie (supposée purement résistive)

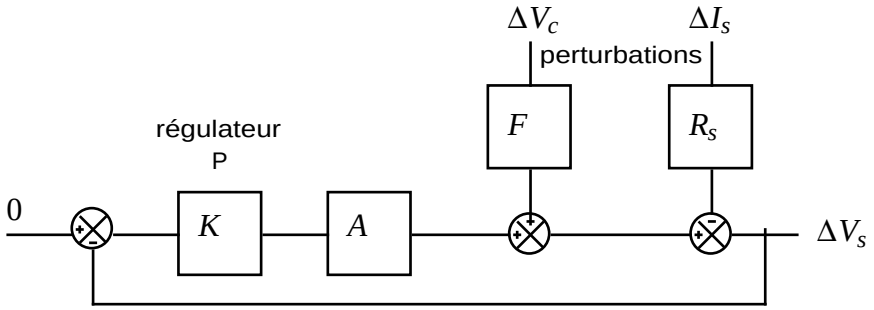
$$F = \left(\frac{\Delta V_s}{\Delta V_c}\right)_{\Delta I_s = 0}$$ Perturbation amont = facteur de stabilisation

NB : le signe – dans la définition de R_s vient du fait que, lorsque I_s augmente, V_s diminue. Alors que, si la tension réseau V_c diminue, il en est de même de la tension de sortie V_s .

$$\boxed{\Delta V_s = F\Delta V_c - R_s\Delta I_s} \quad (\text{si } \Delta V_0 = 0)$$



La régulation de la tension de sortie est obtenue en boucle fermée. Avec une régulation proportionnelle de gain K à retour unitaire, le schéma devient :



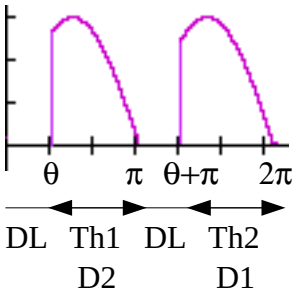
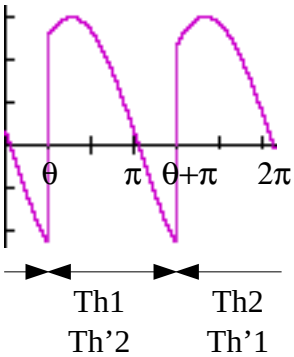
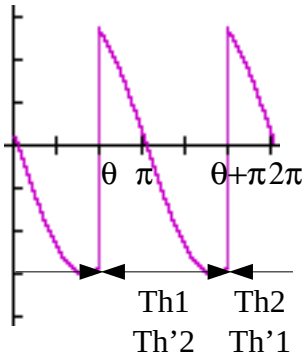
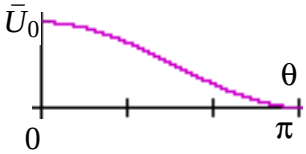
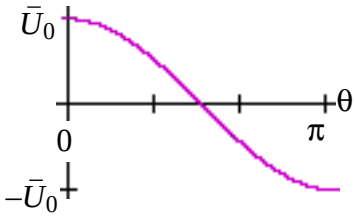
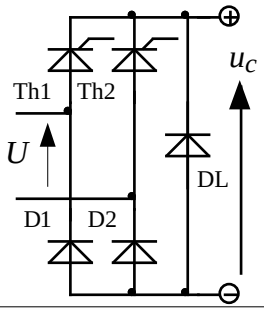
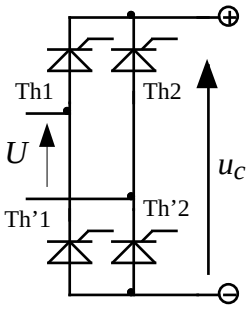
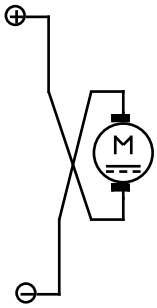
Il vient : $$\Delta V_s = F\Delta V_c - R_s\Delta I_s + A.K(0 - \Delta V_s)$$

Soit : $$\Delta V_s = \frac{F\Delta V_c - R_s\Delta I_s}{1 + A.K} = F'\Delta V_c - R_s'\Delta I_s$$

Par identification : $F' = \dfrac{F}{1 + A.K}$; $R_s' = \dfrac{R_s}{1 + A.K}$

Intérêt de la régulation : les perturbations du système sont diminuées d'un facteur 1 + *A.K*.

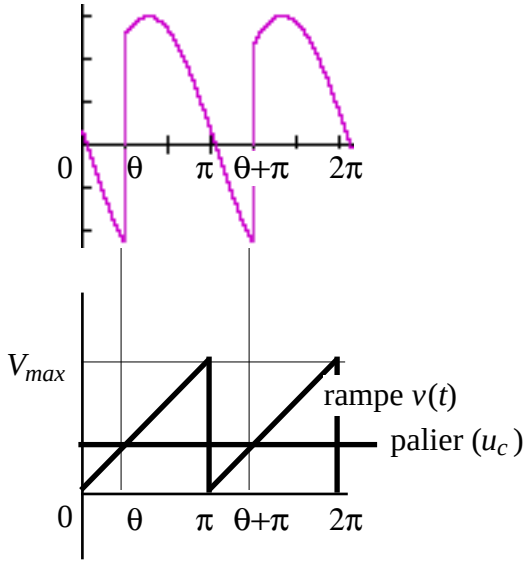
Redresseurs commandés

	$0 \le \theta \le 180°$	$0 \le \theta \le 90°$	$90° \le \theta \le 180°$
Formes d'onde →			
Fonctions de transfert → (*avec* $\overline{U_0} = \frac{2U_{max}}{\pi}$)	$\overline{U} = \frac{U_{max}}{\pi}\int_{\theta}^{\pi} \sin x\, dx = \overline{U_0}\,\frac{1+\cos\theta}{2}$ 	$\overline{U} = \frac{U_{max}}{\pi}\int_{\theta}^{\theta+\pi} \sin x\, dx = \overline{U_0}\cos\theta$	$\overline{U} = \frac{U_{max}}{\pi}\int_{\theta}^{\theta+\pi} \sin x\, dx = \overline{U_0}\cos\theta$
Type de ponts (PD2) ↓			
PONT MIXTE 	*Charges :* R, R, L, R, L, E	*impossible*	*impossible*
PONT COMPLET 	*Charges :* R	*Charges :* R, L, R, L, E	*Charges :* R, L, –E (si charge active) 

Fonctions de transfert des ponts complets $\overline{U} = f(u_c)$

tension de commande u_c — pont — $\overline{U}$ tension redressée

Commande "palier et rampe"



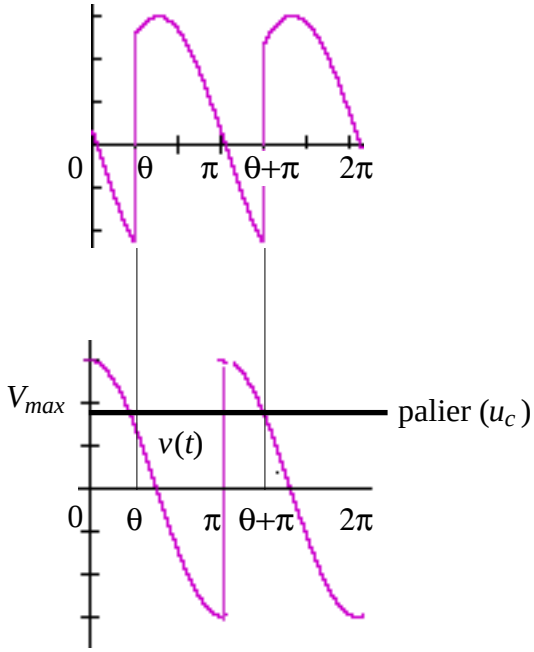
Soit $x = \omega t$. On génère une rampe $v(x)$, synchronisée avec la tension redressée.
Un détecteur génère une impulsion de gachette quand $v(x)$ passe par la valeur u_c.

$$\left.\begin{array}{l} v(x) = \dfrac{V_{max}}{\pi} x \\ \text{à} \quad x = \theta \,,\, v(x) = u_c \end{array}\right\} \Rightarrow \theta = \frac{\pi}{V_{max}} u_c$$

$$\text{d'où : } \overline{U} = \overline{U_0} \cos \pi \frac{u_c}{V_{max}}$$

$\Rightarrow$ F.T. non linéaire

Commande "en arccos"



On génère une fonction $v(x)$ en cosinus, synchronisée avec la tension redressée.
Un détecteur génère une impulsion de gachette quand $v(x)$ passe par la valeur u_c.

$$\left.\begin{array}{l} v(x) = V_{max} \cos x \\ \text{à} \quad x = \theta \,,\, v(x) = u_c \end{array}\right\} \Rightarrow \theta = \arccos \frac{u_c}{V_{max}}$$

$$\text{d'où : } \overline{U} = \overline{U_0} \cos\left(\arccos \frac{u_c}{V_{max}}\right) = \frac{\overline{U_0}}{V_{max}} u_c$$

$\Rightarrow$ F.T. linéaire

* **COMPLEMENTS** *

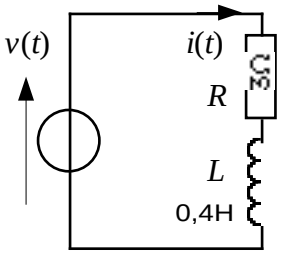
Simulation numérique d'un pont PD2 sur charge inductive

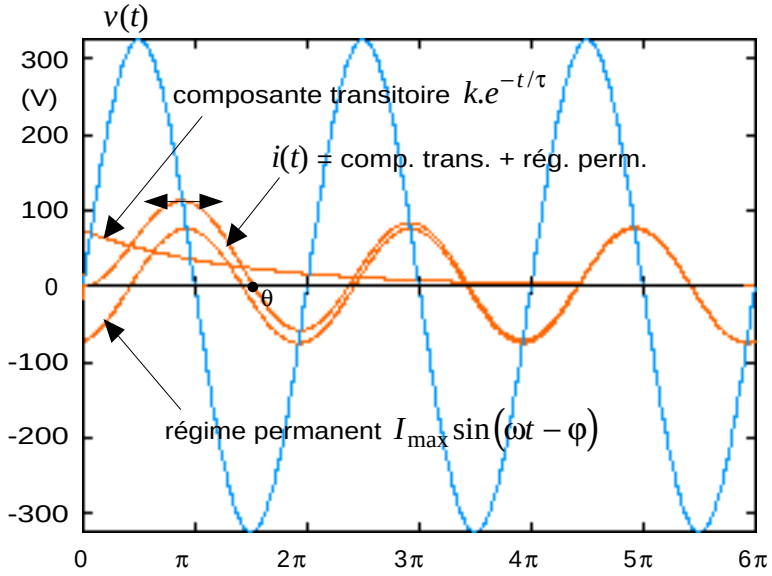
Le comportement d'un redresseur alimentant une charge inductive est régi par une équation différentielle du type $R.i + L\dfrac{di}{dt} = v(t)$. Du fait de la présence de composants non linéaires (diodes et thyristors), la résolution de cette équation qui permettrait de connaître l'évolution du courant et de la tension aux bornes de la charge est compliquée. Une simulation numérique permet de décrire plus aisément le fonctionnement du redresseur. C'est une application des §B21 et §B23.

- ***Étude préliminaire : redressement monophasé sur charge inductive***

Régime transitoire d'un circuit RL en alternatif

T = 20 ms
f = 50 Hz
V_{eff} = 230 V
$v(t) = V_{\text{eff}}\sqrt{2}\sin 2\pi f\, t$





En régime permanent, le courant est de la forme $i_p(t) = I_{\max}\sin(\omega t - \varphi)$, avec $\tan\varphi = \dfrac{L\omega}{R}$ et $I_{\max} = \dfrac{V_{\text{eff}}\sqrt{2}}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}}$. En régime transitoire, il est de la forme $i(t) = K.e^{-\frac{t}{\tau}} + i_p(t)$, avec $\tau = \dfrac{L}{R}$ et K constante dépendant des conditions initiales.

La simulation numérique approchée par dérivée arrière conduit à l'équation aux différences :

$$R\, i_k + L\frac{i_k - i_{k-1}}{T_e} = V_{\max}\sin\omega\, kT_e$$

T_e est la période d'échantillonnage ; l'indice k est compris entre 0 et N, où N est la dimension des tableaux (nombre total d'échantillons). On en déduit l'équation de récurrence :

$$i_k = \frac{V_{\max}\sin\omega\, kT_e + \dfrac{\tau}{T_e}\, i_{k-1}}{1 + \dfrac{\tau}{T_e}} \quad \text{avec } i_0 = 0 \text{ (condition initiale)}$$

A.N. : si l'on choisit d'étudier la réponse du système pendant trois périodes avec 300 échantillons, on calcule : T_e = 3.20 / 300 = 0,1 ms. D'autre part $\tau = R/L$ = 0,4/3 = 133 ms.

Programme :

```
DIM v(N), i(N)  :  REM définition des tableaux
i(0) = 0  :  REM condition initiale
FOR k = 1 TO N
      v(k) = Vmax*SIN(ω* k*Te)
      i(k) = [v(k) + (τ/Te)*i(k–1)] / [1+(τ/Te)]
NEXT k
Tracer v( ), i( )  :  REM vers sous-programme graphique
END
```

NB1 : pour des raisons de clarté, le graphe représente l'évolution de la tension $R.i(t)$ aux bornes de la résistance, et non pas du courant lui-même.

NB2 : à l'intersection des courbes $R.i(t)$ et $v(t)$, on a évidemment $R.i(t) = v(t)$, ce qui entraîne que la tension $L.di/dt$ soit nulle. A cet instant, la courbe $R.i(t)$ a donc une tangente horizontale ($di/dt = 0$).

Conclusion : on remarque que le courant s'inverse avant la fin de la première période, à un certain instant noté θ sur le graphe.

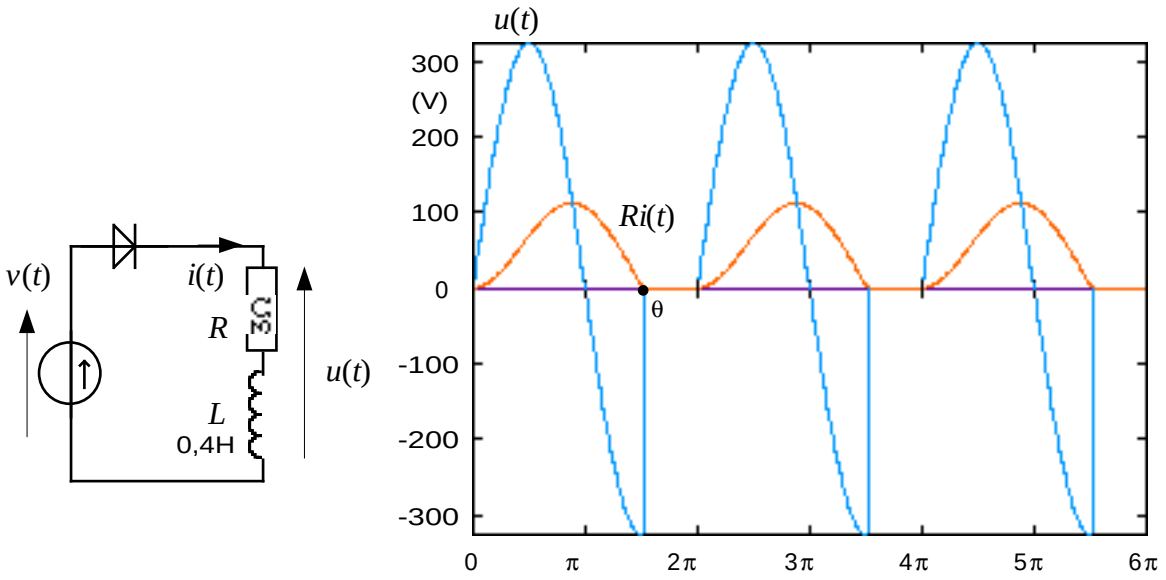
Régime transitoire avec diode (redressement monophasé simple alternance)

De cette dernière remarque, on déduit la simulation du circuit dans lequel on a ajouté une diode. Elle se traduit par la condition **SI** $i(k) < 0$ **ALORS** $i(k) = 0$, à insérer dans la boucle *après* le calcul de $i(k)$: cette condition force le courant à la valeur zéro lorsque la diode se bloque.

La courbe bleue représente maintenant la tension $u(t)$ aux bornes de la charge ($v(t)$ est sans changement). Cette tension est telle que (deuxième condition à insérer dans la boucle) : **SI** $i(k) = 0$ **ALORS** $u(k) = 0$ **SINON** $u(k) = v(k)$.

D'où le programme :

```
DIM v(N), i(N), u(N)
i(0) = 0
FOR k = 1 TO N
    v(k) = Vmax*SIN(ω *k*Te)
    i(k) = [v(k) + (τ/Te)*i(k–1)] / [1+(τ/Te)]
    IF i(k) < 0 THEN
        i(k) = 0 : REM le courant ne peut s'inverser : s'il tend à devenir < 0, on impose i = 0
        u(k) = 0 : REM dans ce cas, la conduction est interrompue, ce qui entraîne u = 0
    ELSE
        u(k) = v(k)
    END IF
NEXT k
Tracer u( ), i( )
END
```



Conclusion : on constante que le courant et la tension u s'annulent à chaque période. Le régime de conduction est interrompu. **Le courant n'atteint jamais la valeur nominale $\bar{v}/R$ qu'il aurait en régime continu** ($\bar{v} \approx 100$ V).

Régime transitoire avec diode de redressement et diode de roue libre

De cette dernière constatation, on déduit qu'une diode de roue libre est nécessaire pour que le courant puisse continuer à circuler dans la charge d'une période à l'autre.

La diode de roue libre conduit lorsque la tension d'alimentation devient négative. La présence de cette diode se traduit donc dans la simulation par la condition sur la tension d'alimentation (qui remplace les conditions précédentes), à insérer dans la boucle *avant* le calcul de $i(k)$: **SI** $v(k) < 0$ **ALORS** $v(k) = 0$ (avec $u(k) = v(k)$ pour tout k) *:*

```
DIM v(N), i(N), u(N)
i(0) = 0
FOR k = 1 TO N
```

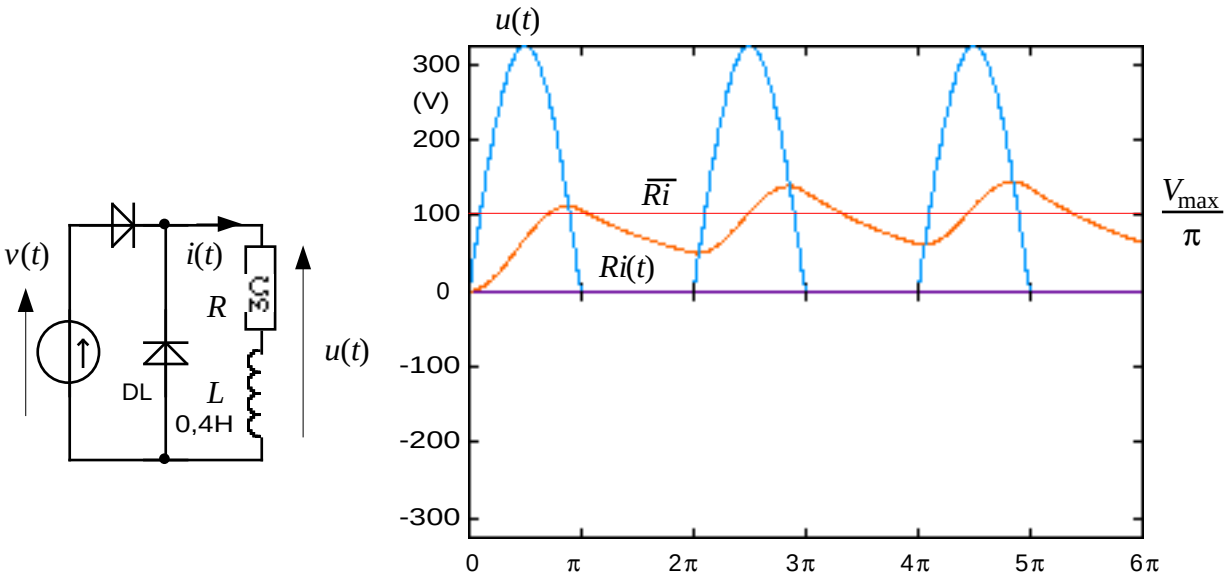
```
        v(k) = Vmax*SIN(ω *k*Te)
        IF v(k) < 0 THEN u(k) = 0 ELSE u(k) = v(k) : REM action de la diode de roue libre
        i(k) = [u(k) + (τ/Te)*i(k–1)] / [1+(τ/Te)]
    NEXT k
    Tracer u( ), i( )
    END
```

NB : à tout instant, $u(t) = Ri(t) + Ldi/dt$, avec $u = v$ pour $0 < t < T/2$ et $u = 0$ pour $T/2 < t < T$.

En *moyenne* et *en régime permanent*, on a : $\overline{u} = \overline{R.i} + L\overline{\dfrac{di}{dt}}$

Soit : $\begin{cases} \overline{u} = \dfrac{1}{T}\displaystyle\int_0^{T/2} V_{max}\sin\omega t\, dt = \dfrac{V_{max}}{\pi} \\ \overline{R.i} + \dfrac{L}{T}\displaystyle\int_0^{T}\dfrac{di}{dt}dt = \overline{R.i} + \dfrac{L}{T}\displaystyle\int_0^{T} di = \overline{R.i} + \dfrac{L}{T}\left[i(t)\right]_0^T = \overline{R.i} \end{cases}$

car, par définition du régime permanent, $i(T) - i(0) \equiv 0$ (le courant en fin de période doit être le même que le courant en début de période). On en déduit la valeur moyenne du courant : $\overline{i} = \dfrac{V_{max}}{\pi R}$.



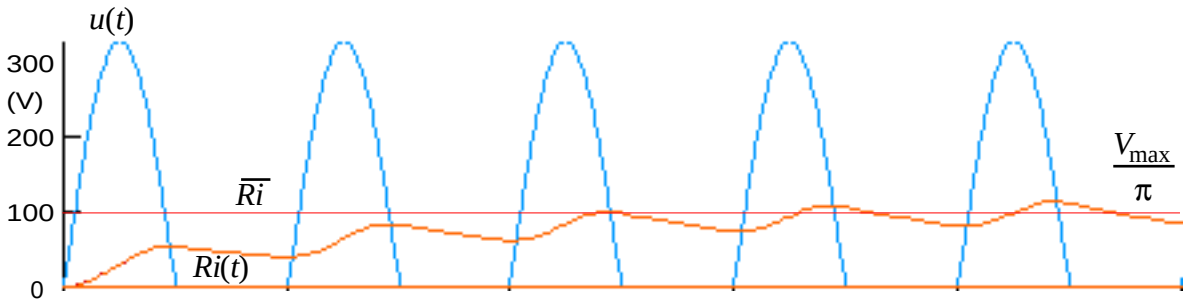
Conclusion : le régime de conduction est non interropu, ce qui permet au courant d'atteindre une valeur moyenne égale à $\overline{u}/R$: on vérifie sur la simulation que la tension $R.i$ tend vers $V_{max}/\pi \approx 100$ V en moyenne.

Cas d'une charge très inductive

Si on augmente la valeur de l'inductance, l'ondulation de courant diminue : dans le cas d'une charge très inductive, le courant est suffisamment "lissé" pour pouvoir être considéré comme continu.

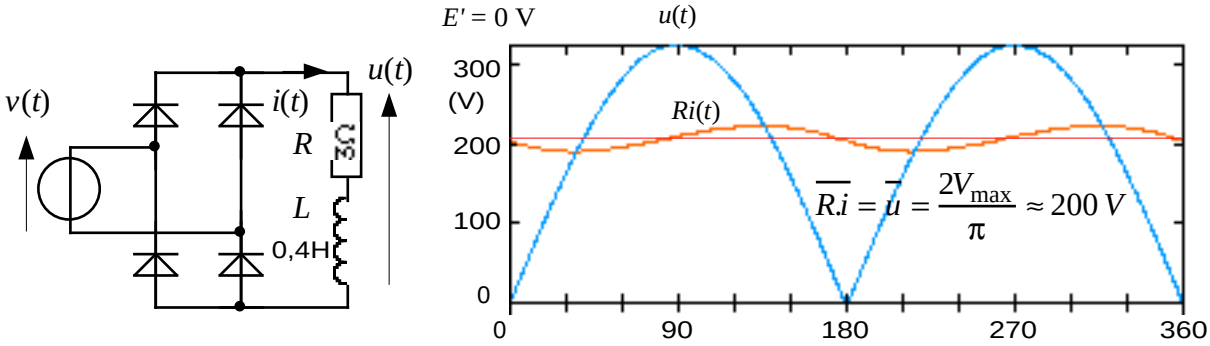
Toutefois, on note que le temps d'établissement du courant vers sa valeur moyenne augmente.

Exemple avec $L = 1$ H :

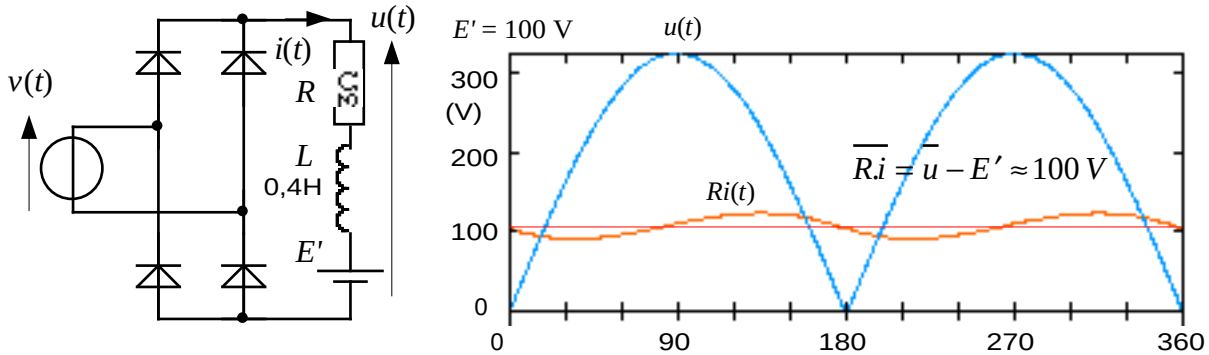


- ***Pont non commandé sur charge inductive (en régime permanent)***

Cas d'une charge passive (circuit RL)

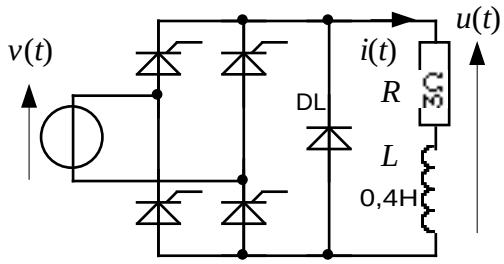


Cas d'une charge active réceptrice (circuit RL avec fcem E' ou moteur CC)

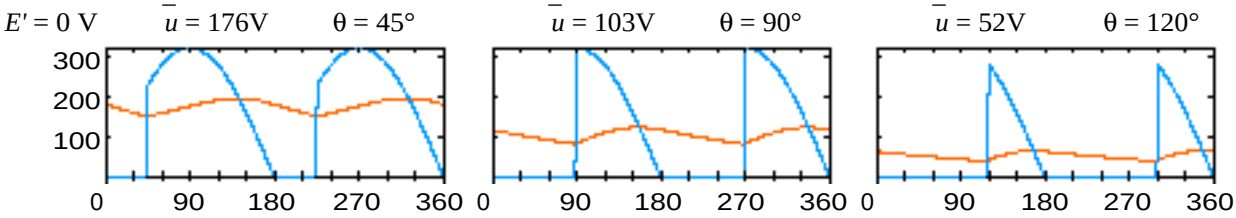


- ***Pont mixte***

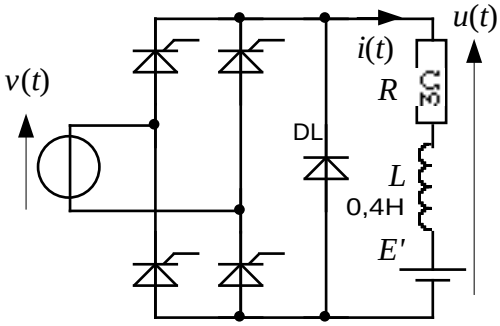
Cas d'une charge passive (circuit RL)



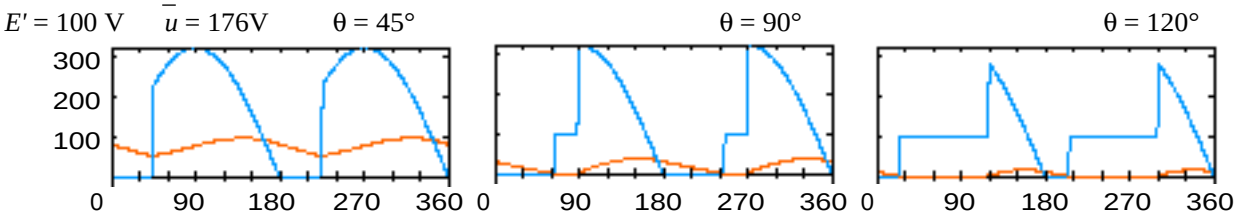
$$\overline{R.i} = \overline{U} = \frac{2V_{max}}{\pi}\frac{1+\cos\theta}{2} \approx 100(1+\cos\theta) \quad \text{V}$$



Cas d'une charge active réceptrice (circuit RLE' ou moteur CC)



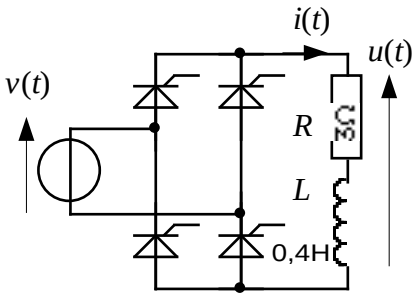
$$\overline{R.i} = \overline{U} - E' = \frac{2V_{max}}{\pi}\frac{1+\cos\theta}{2} - E' \approx 100(1+\cos\theta) - E' \quad \text{V}$$



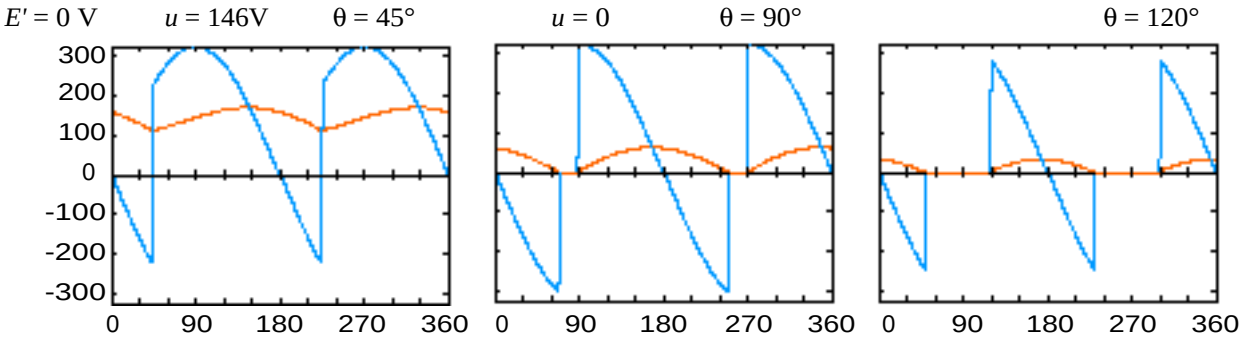
conduction non interrompue limite de non interruption : θ ≈ 80°

• ***Pont complet***

Cas d'une charge passive (circuit RL)

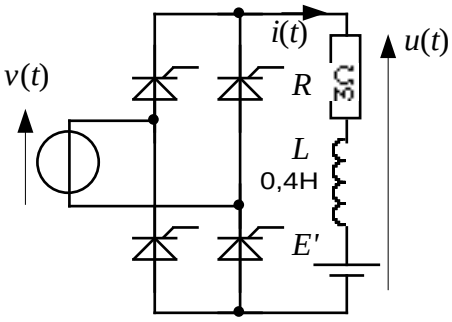


$$\overline{R.i} = \overline{U} = \frac{2V_{max}}{\pi}\cos\theta \approx 200\cos\theta \quad \text{V}$$

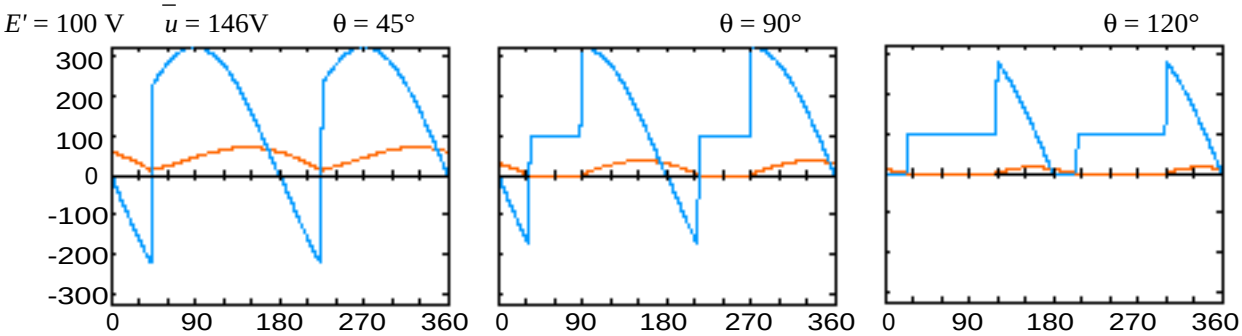


conduction non interrompue limite de non interruption : θ ≈ 80°

Cas d'une charge active réceptrice (circuit RLE' ou moteur CC)

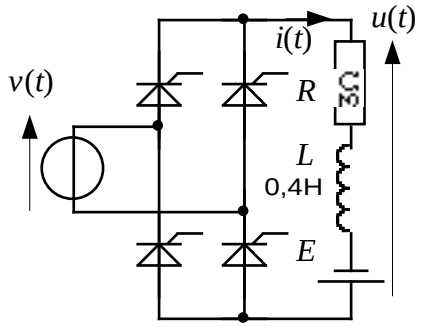


$$\overline{R.i} = \overline{U} - E' = \frac{2V_{max}}{\pi}\cos\theta - E' \approx 200\cos\theta - E' \quad \text{V}$$

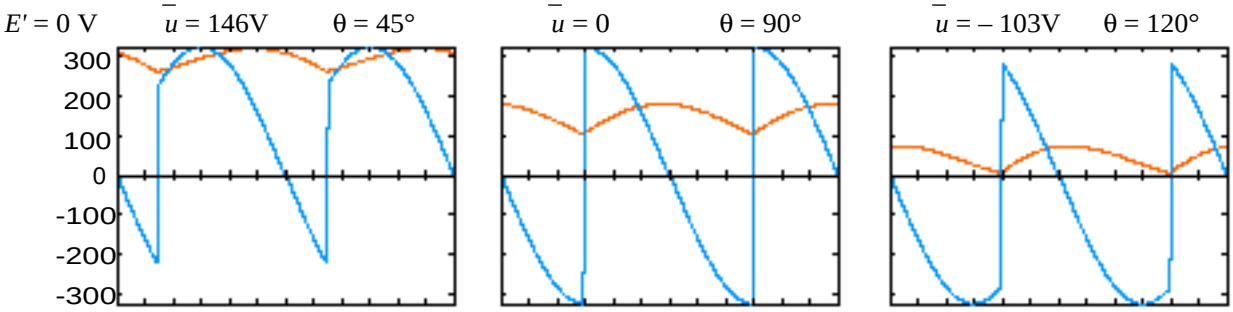


conduction non interrompue limite de non interruption : θ ≈ 50°

Cas d'une charge active génératrice (circuit RLE ou génératrice CC) : onduleur assisté



$$\overline{R\,i} = \overline{U} + E = \frac{2V_{max}}{\pi}\cos\theta + E \approx 200\cos\theta + E \quad \text{V}$$



onduleur assisté

Programme (extrait)

Le programme qui suit trace les graphes $u(t)$ et $Ri(t)$ qui viennent d'être présentés, pour un pont PD2 mixte ou complet, avec charge inductive et active. On choisit ici : V_{eff} = 230 V ; R = 3Ω ; L = 0,04 H.

```
REM Ne figurent pas ici les différentes instructions nécessaires à l'exécution de la routine graphique (cf fichier BASIC)
OPTION BASE 0 : REM les tableaux commencent à l'indice 0
INPUT "type de pont : pont complet = 0 ; pont mixte = 1"; pontmixte : REM entrée des variables
INPUT "fcem E' (> 0) ou fem E (< 0) "; E
INPUT "angle d'ouverture θ en degrés"; theta
N = 200 : REM nombre de points de calcul par alternance
N2 = 2 * N + 1 : REM nombre de points de calcul par période
M = 1 : REM deux courbes à tracer (u et i)
DIM Ri(N) AS SINGLE, U(N) AS SINGLE, y(N2, M) AS SINGLE : REM définition des tableaux de valeurs
Ri(N) = 0 : REM initialisation : le calcul est effectué en boucle, alternance après alternance :
U(N) = 0 : REM le dernier point d'une alternance sera le premier point de l'alternance suivante
DO:
    REM 1ère alternance
    Ri(0) = Ri(N) : REM initialisation
    U(0) = U(N)
    pont Ri( ), U( ), E, theta, pontmixte : REM vers routine de simulation
    FOR i = 0 TO N
        y(i, 0) = U(i)  : REM ranger les résultats dans un tableau pour tracer les graphes
        y(i, 1) = Ri(i)
    NEXT i
    REM 2ème alternance
    Ri(0) = Ri(N)
    U(0) = U(N)
    pont Ri( ), U( ), E, theta, pontmixte
    FOR i = 0 TO N
        y(i + N + 1, 0) = U(i) : REM ranger les résultats
        y(i + N + 1, 1) = Ri(i)
    NEXT i
    tracer y( ) : REM vers routine graphique
LOOP WHILE ABS(y(N2, 1) - y(0, 1)) > .1 : REM effectuer le calcul en boucle tant que la différence
REM entre la tension Ri en fin de période et la tension Ri en début de période excède 0,1 V :
REM on considère qu'en dessous de cette limite, le régime permanent est atteint
END
```

```
SUB pont (Ri() AS SINGLE, U() AS SINGLE, E AS SINGLE, Sdeg AS SINGLE, H AS INTEGER)
kmax = UBOUND(Ri) : REM dimension des tableaux
pi# = 4 * ATN(1)        : REM constante π en double précision
Vm = 230 * SQR(2)       : REM tension
T = .01                 : REM demi-période (10 ms à 50 Hz)
Te = T / kmax           : REM période d'échantillonnage
R = 3                   : REM résistance
L = .04                 : REM inductance
tau = L / R             : REM constante de temps τ
tst = tau / Te          : REM rapport τ / Te
psi = ATN((E / Vm) / SQR(1 - (E / Vm) ^ 2)): REM fonction ARCSINUS pour calculer l'intersection entre v(t) et E'
S = Sdeg * pi# / 180    : REM conversion degrés → radians de l'angle d'ouverture
FOR k = 1 TO kmax
    x0 = k * pi# / kmax : REM  valeur en radians de l'angle courant
    IF Ri(k - 1) = 0 THEN
        IF x0 < MAX(psi, S) THEN : REM au début (avant le déclenchement des thyristors), i reste nul
            Ri(k) = 0
            U(k) = E
        ELSE
            GOSUB calcul
        END IF
    ELSE
        IF x0 < S THEN
            Vm = -Vm: REM v = – Vmax sin(ωt) en debut d'alternance
            GOSUB calcul
            Vm = ABS(Vm)
        ELSE
            GOSUB calcul
        END IF
    END IF
NEXT k
EXIT SUB

REM sous-programme de calcul proprement dit
calcul:
    v = Vm * SIN(x0)
    IF H <> 0 THEN IF v < 0 THEN v = 0: REM cas d'un pont mixte
    Ri(k) = (v + tst * Ri(k - 1) - E) / (1 + tst) : REM équation de récurrence
    IF Ri(k) < 0 THEN : REM le courant ne peut s'inverser
        Ri(k) = 0
        U(k) = E
    ELSE
        U(k) = v
    END IF
RETURN : REM fin du sous-programme de calcul

END SUB : REM fin de la routine de simulation du pont PD2
```