

## 2.4 Commande du moteur en boucle ouverte

Valeur moyenne du courant d'induit :  $\langle i_s \rangle = I_0 = \frac{\alpha E - e'}{r} = \frac{\alpha E - \Phi_0 \Omega}{r}$

TMC appliqué au rotor :  $J \frac{d\Omega}{dt} = \Gamma - \lambda \Omega - \Gamma_{ch} = \Phi_0 i_s - \lambda \Omega - \Gamma_{ch}$

Sur la durée  $T$ ,  $\Omega = Cte$

$\Gamma = Cte$       couple électromagnétique      frottements      charge  $-\Gamma_{ch} < 0$

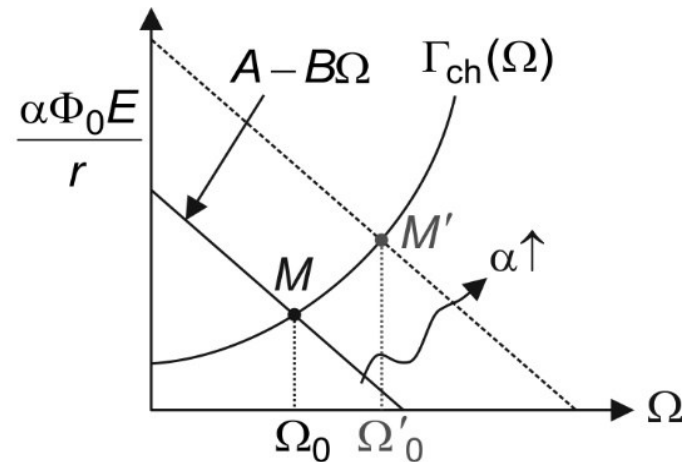
$\Rightarrow \Phi_0 \langle i_s \rangle - \lambda \Omega = \Gamma_{ch}$  soit

$$\frac{\alpha \Phi_0 E}{r} - \left[ \lambda + \frac{\Phi_0^2}{r} \right] \Omega = \Gamma_{ch}$$

de la forme  $A - B\Omega = \Gamma_{ch}(\Omega)$

avec  $\Gamma_{ch}(\Omega)$  fonction croissante

$\Rightarrow \Omega_0$  commandée grâce à  $\alpha$



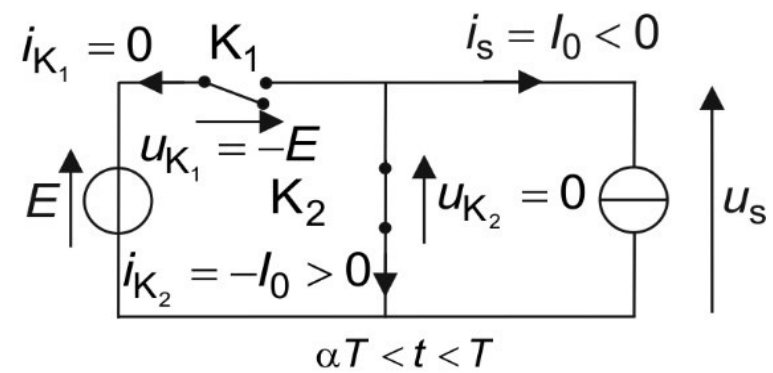
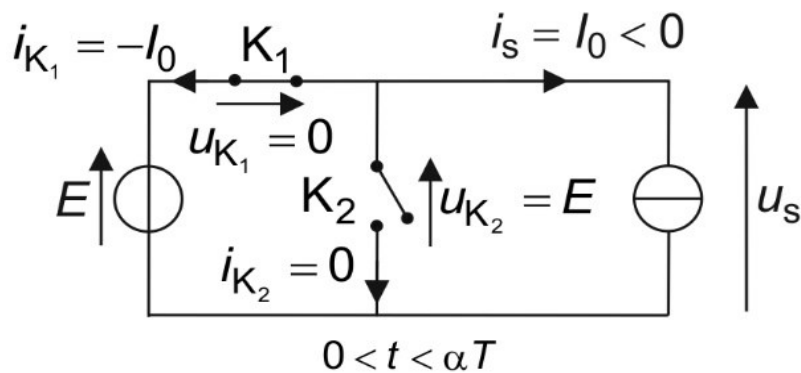
M: point de fonctionnement

## 2.5 Récupération d'énergie au freinage

La M.C.C tourne à  $\Omega > 0$

On diminue  $\alpha$  suffisamment pour que  $I_0 = \frac{\alpha E - \Phi_0 \Omega}{r} < 0$

On néglige les ondulations de courant (ordre 0 en  $\frac{T}{\tau}$ )



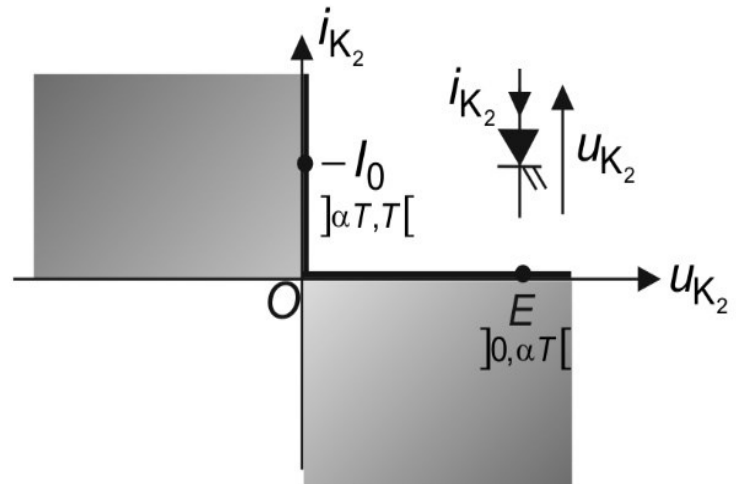
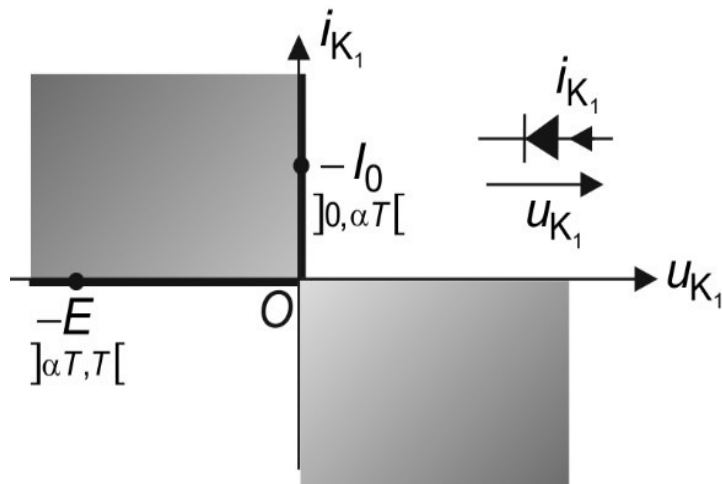
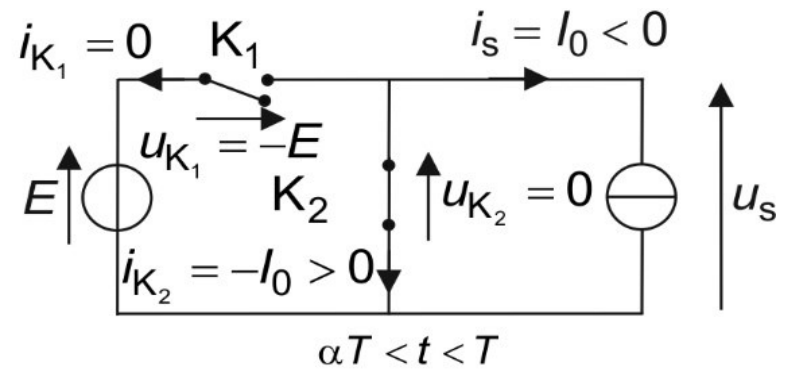
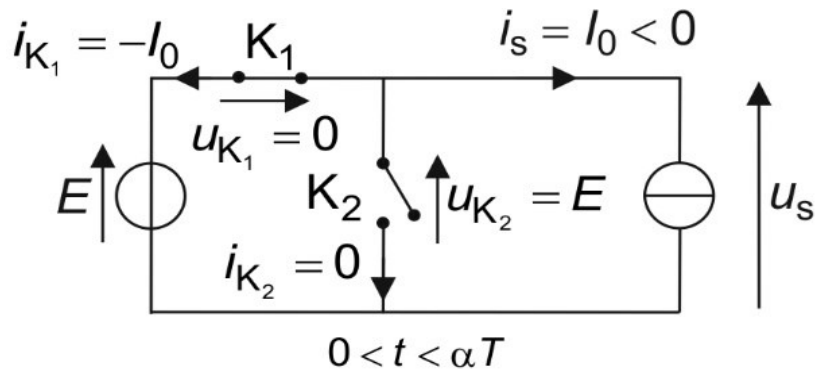
- $0 < t < \alpha T$   $K_1$  (f) et  $K_2$  (o)  $\Rightarrow p_s = EI_0 < 0$

la M.C.C fonctionne maintenant en **génératrice** et fournit  $-p_s > 0$  à la source d'entrée.

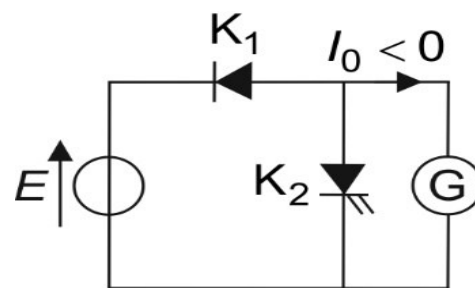
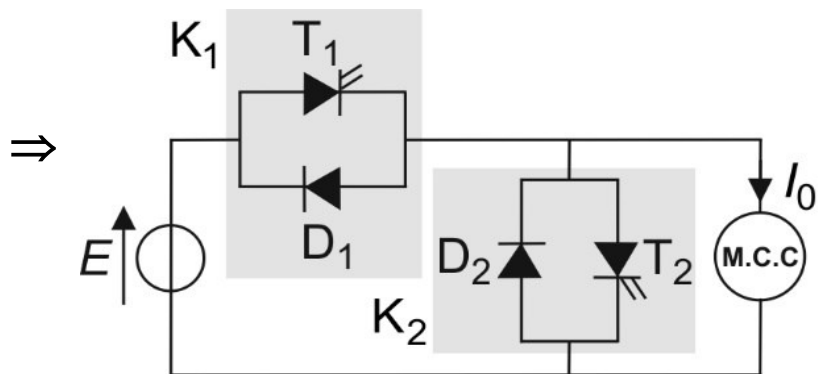
- $\alpha T < t < T$   $K_1$  (o) et  $K_2$  (f)  $\Rightarrow p_s = 0$

Couple subit par le rotor :  $\Gamma < 0$  (phase de freinage)

Nature des interrupteurs :



Circuit pendant la phase de freinage :



Pour un hacheur « réversible en courant »  
(hacheur deux quadrants).

● Phase de traction ( $I_0 > 0$ ) :

$T_2(o)$   $T_1(f)$  pour  $0 < t < \alpha T$   
 $T_1(o)$  pour  $\alpha T < t < T$

(commandé)

$D_1(o)$   $D_2(0)$  pour  $0 < t < \alpha T$   
 $D_2(f)$  pour  $\alpha T < t < T$

(spontané)

● Phase de freinage ( $I_0 < 0$ ) :

$T_1(o)$   $T_2(o)$  pour  $0 < t < \alpha T$   
 $T_2(f)$  pour  $\alpha T < t < T$

(commandé)

$D_2(o)$   $D_1(f)$  pour  $0 < t < \alpha T$   
 $D_1(o)$  pour  $\alpha T < t < T$

(spontané)

Mais...  $\Omega$  reste positif

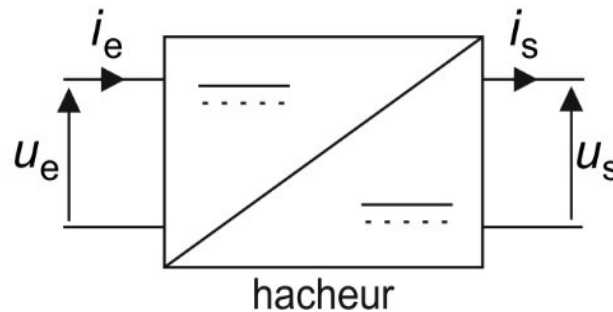
Pour que le moteur fonctionne sur 4 quadrants (vitesse positive et négative, récupération d'énergie dans les deux cas)...

Il faut un **ONDULEUR** (hacheur 4 quadrants, pont en H)

## 3. REDRESSEUR / ONDULEUR

### 3.1 Structure à 4 interrupteurs

HACHEUR : conversion CONTINU --> CONTINU, obtenu avec une structure à 2 interrupteurs

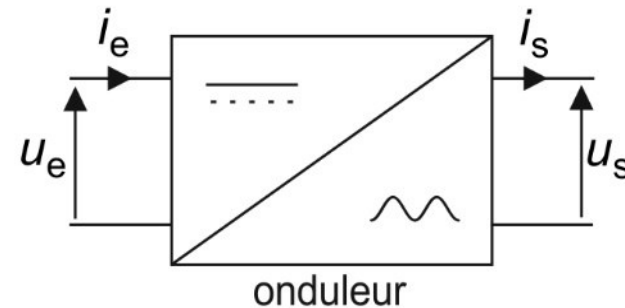
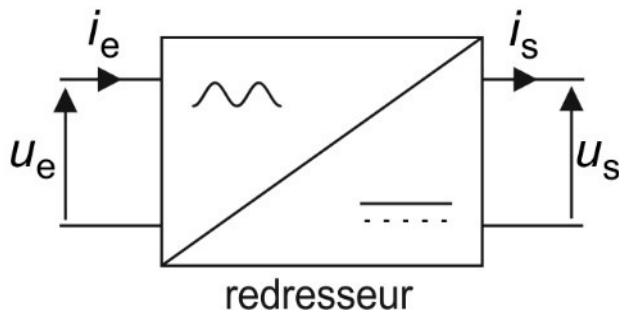


REDRESSEUR : conversion ALTERNATIF --> CONTINU

ONDULEUR : conversion CONTINU --> ALTERNATIF

Il va falloir

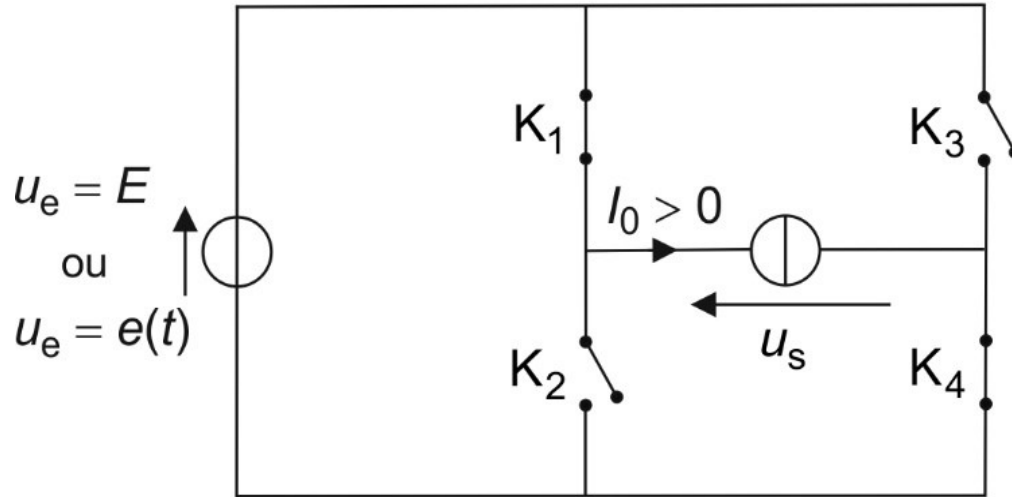
4 interrupteurs...



### Cas étudié :

source d'entrée : source de tension  $e(t)$  (redresseur) ou  $E$  (onduleur)

source de sortie : source de courant (M.C.C par exemple)



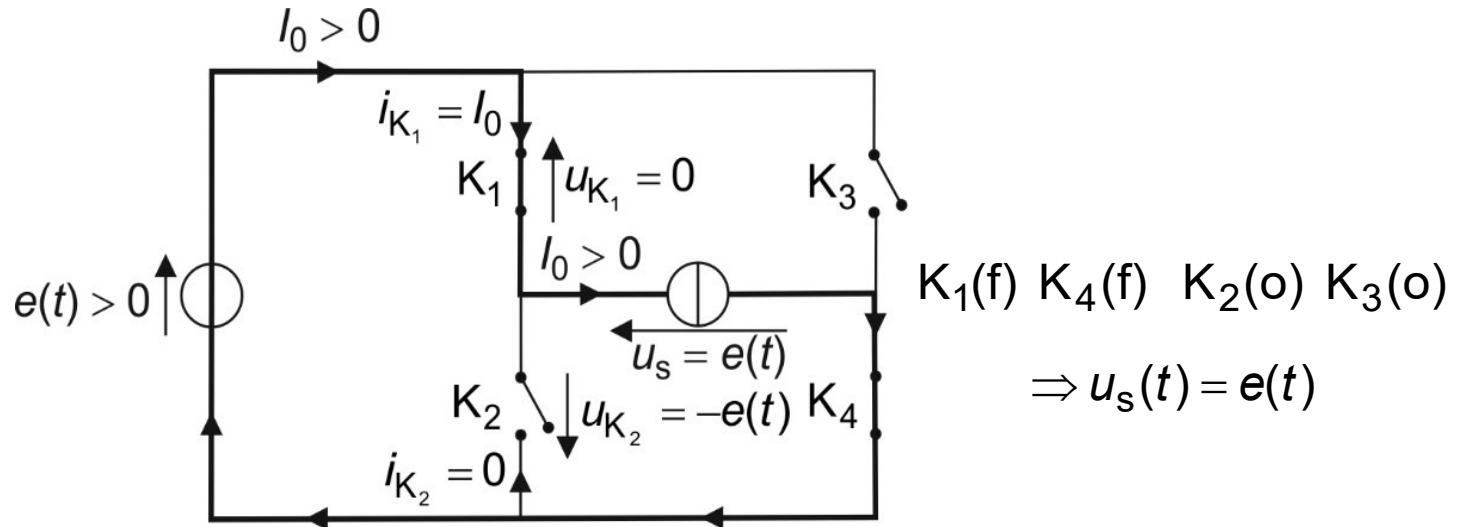
| $K_1$ | $K_2$ | $K_3$ | $K_4$ | $u_s$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| (f)   | (f)   |       |       | non   |
|       |       | (f)   | (f)   | non   |
| (o)   | (o)   |       |       | non   |
|       |       | (o)   | (o)   | non   |
| (f)   | (o)   | (f)   | (o)   | 0     |
| (f)   | (o)   | (o)   | (f)   | $E$   |
| (o)   | (f)   | (f)   | (o)   | $-E$  |
| (o)   | (f)   | (o)   | (f)   | 0     |

$2^4 = 16$  états mais seulement 4 vérifient les règles de connexion

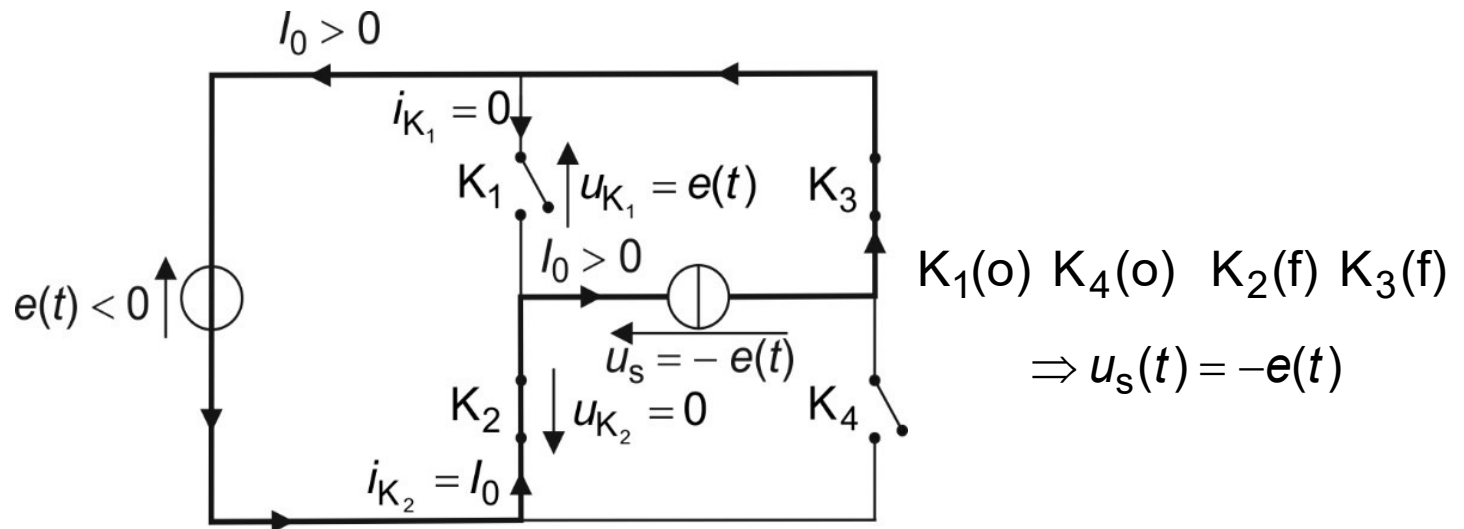
### 3.2 Redresseur

On veut  $u_s(t) = |e(t)|$

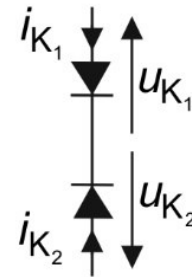
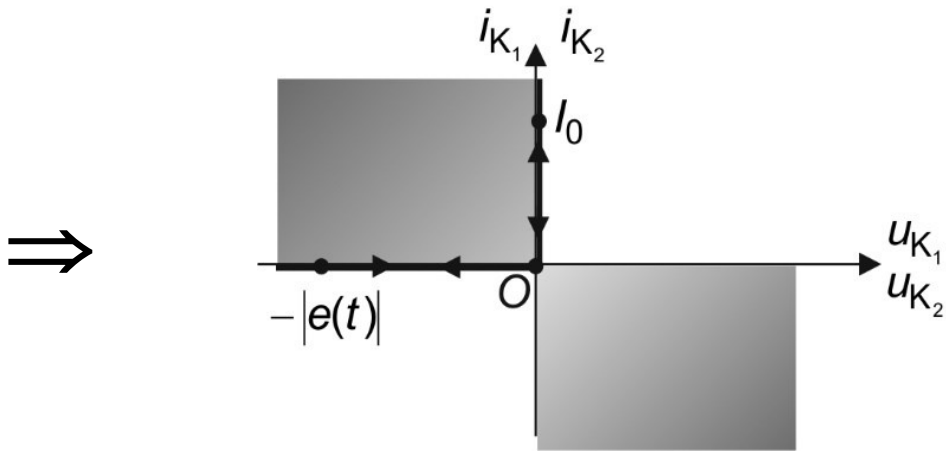
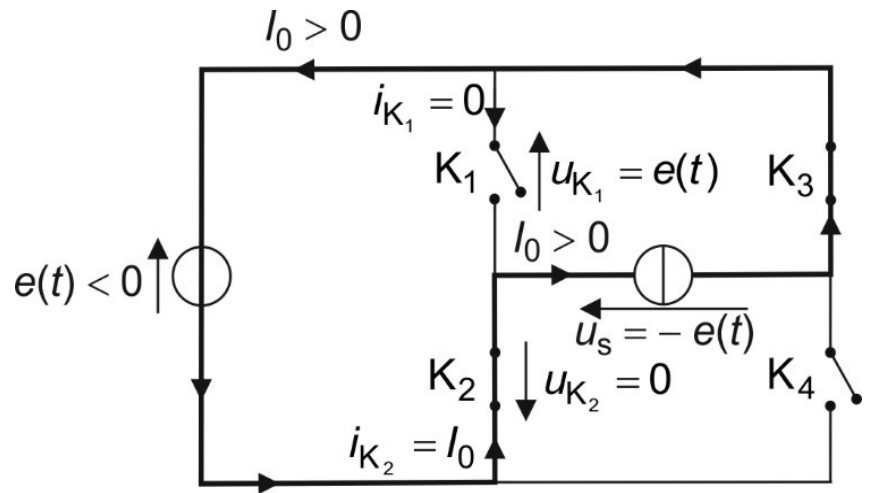
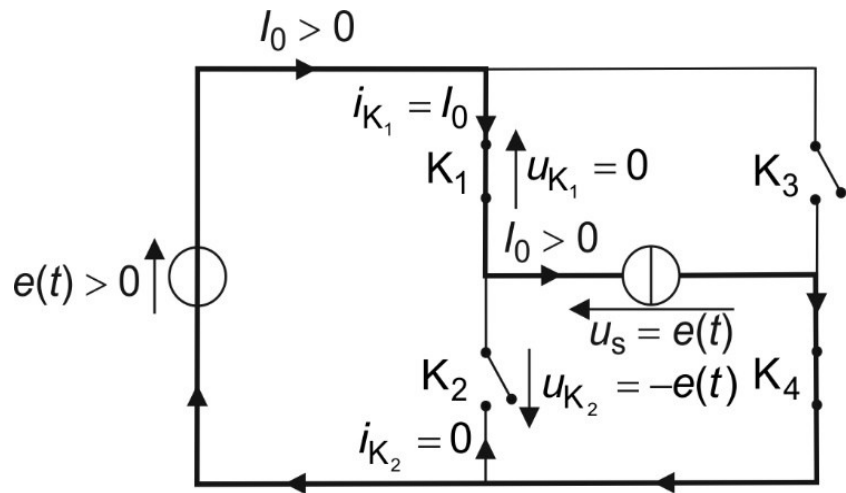
● si  $e(t) > 0$



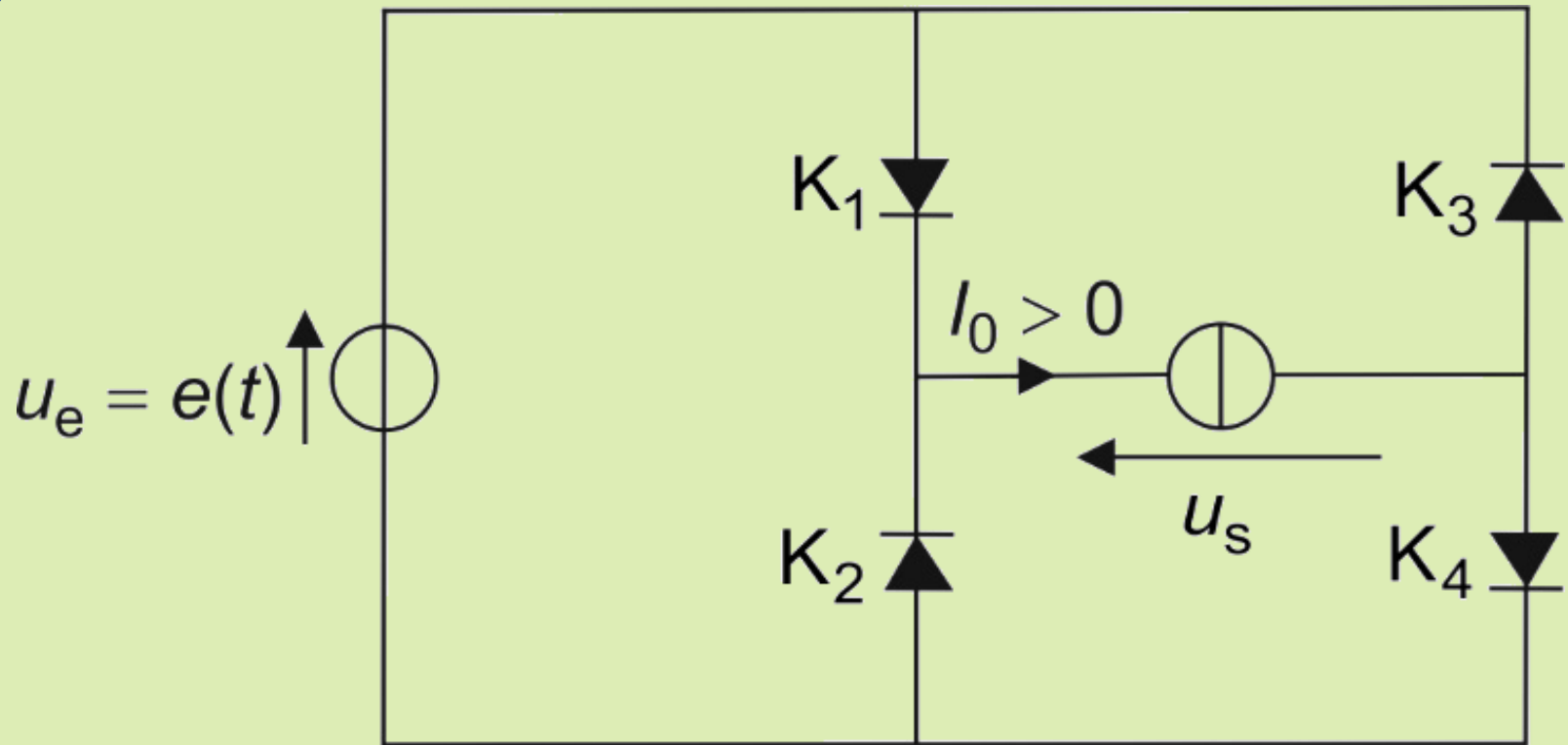
● si  $e(t) < 0$







Pont de **DIODES**



pont de Graetz

### 3.3 Onduleur

#### (i) Commande d'un moteur à courant continu

$$u_e(t) = Cte = E > 0$$

$$\bullet \quad 0 < t < \alpha T \quad K_1(f) \quad K_4(f) \quad K_2(o) \quad K_3(o) \quad \Rightarrow u_s(t) = E$$

$$\bullet \quad \alpha T < t < T \quad K_1(o) \quad K_4(o) \quad K_2(f) \quad K_3(f) \quad \Rightarrow u_s(t) = -E$$

$u_s$  oscille entre  $E$  et  $-E$

$$\langle u_s \rangle = \frac{E\alpha T - E(1-\alpha)T}{T} = (2\alpha - 1)E$$

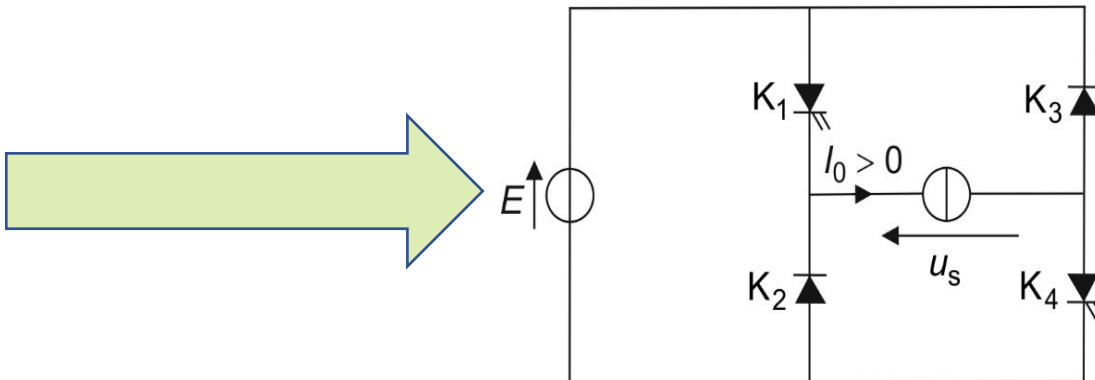
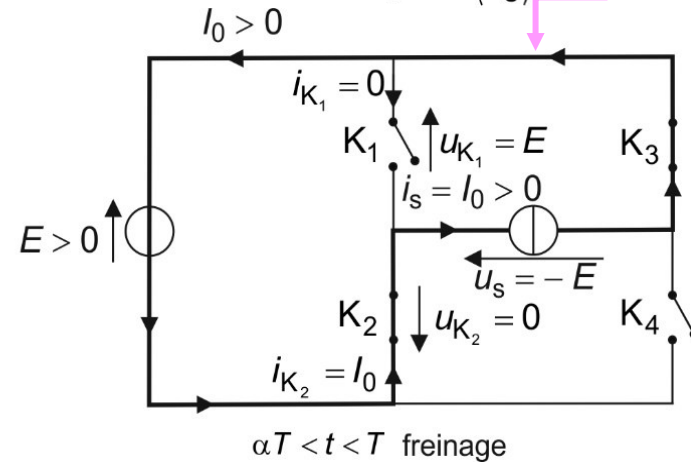
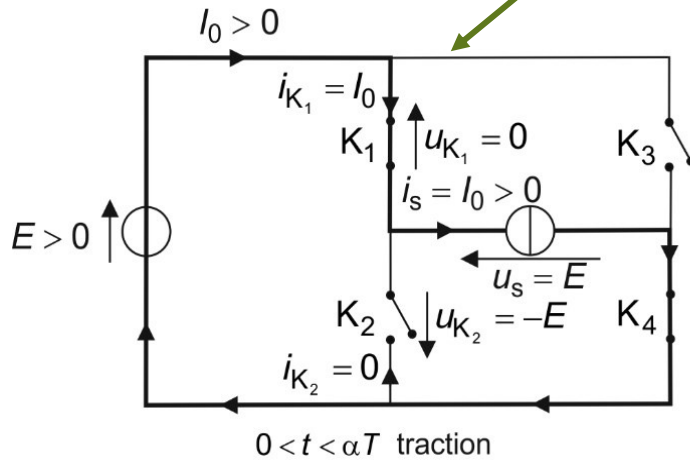
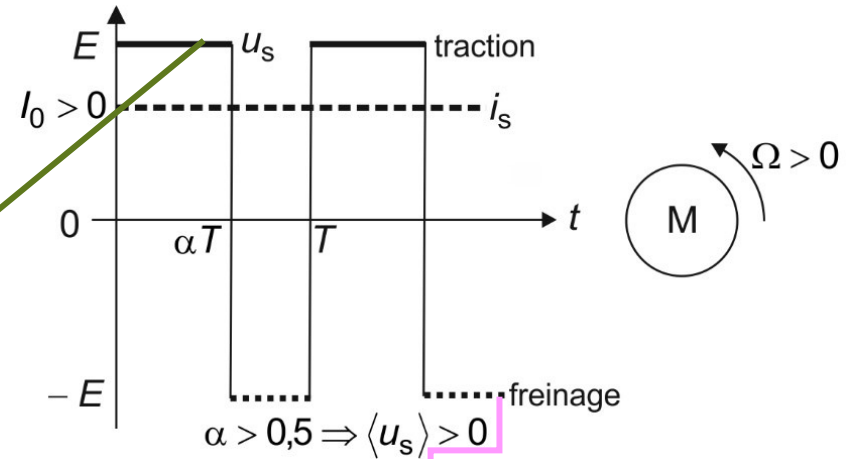
- $\alpha > 0,5 \Rightarrow \langle u_s \rangle > 0$

$$\langle p_s \rangle = \langle u_s I_0 \rangle = \langle u_s \rangle I_0 > 0 \Rightarrow I_0 > 0 \Rightarrow \Gamma = \Phi_0 I_0 > 0$$

Le moment du couple des actions électromagnétique est positif dans le cas d'un moteur :

$$\Gamma \Omega > 0 \Rightarrow \Omega > 0$$

Le moteur tourne dans le sens **positif** (premier quadrant)



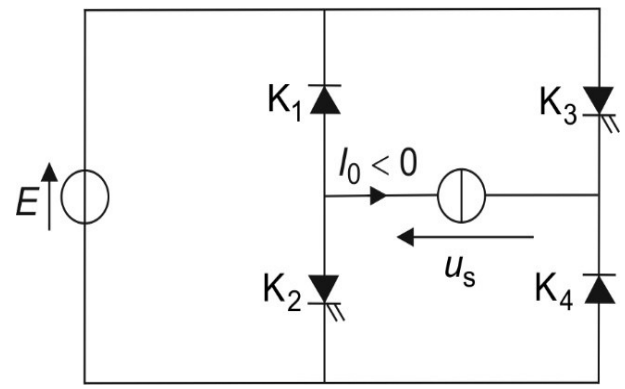
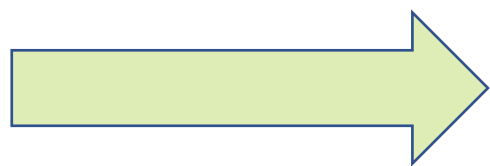
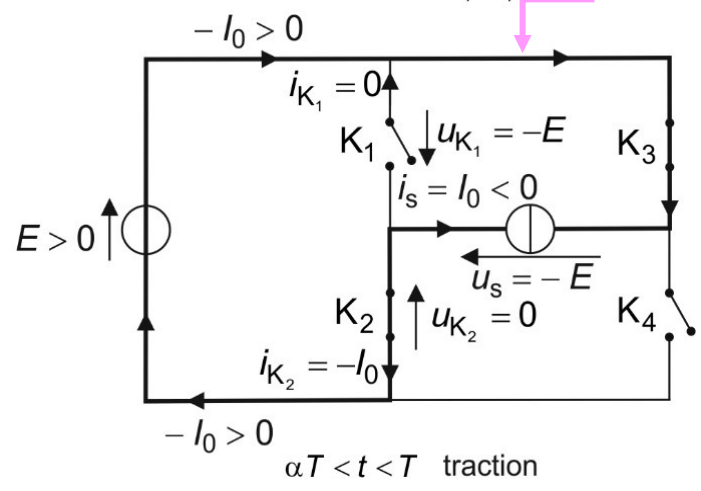
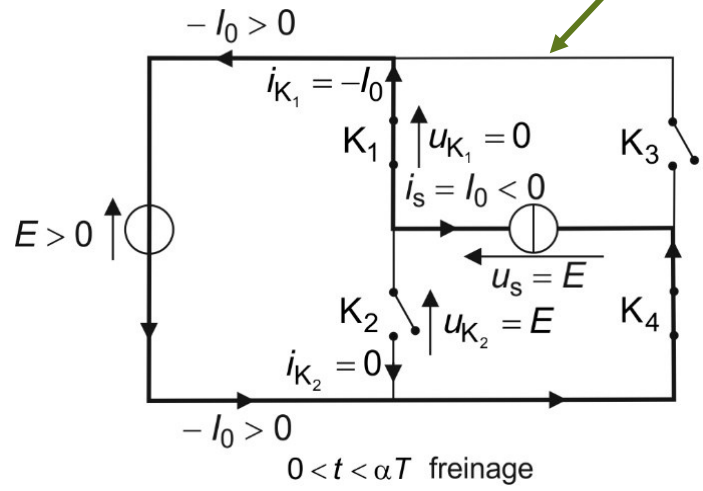
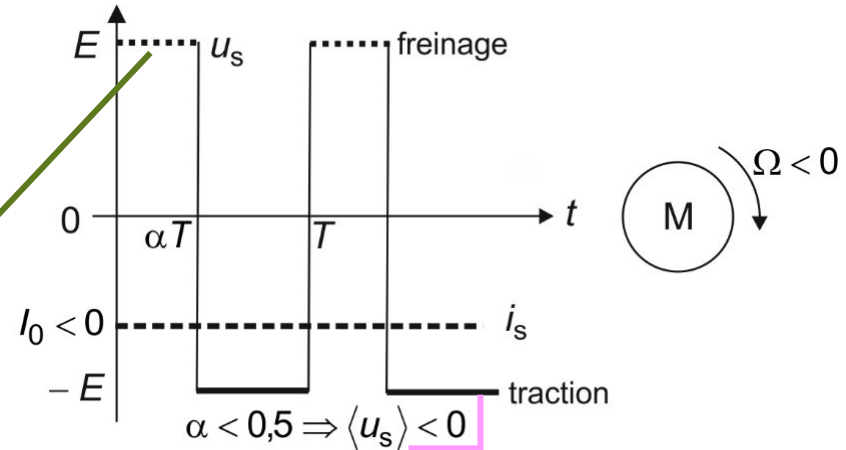
$$\bullet \alpha < 0,5 \Rightarrow \langle u_s \rangle < 0$$

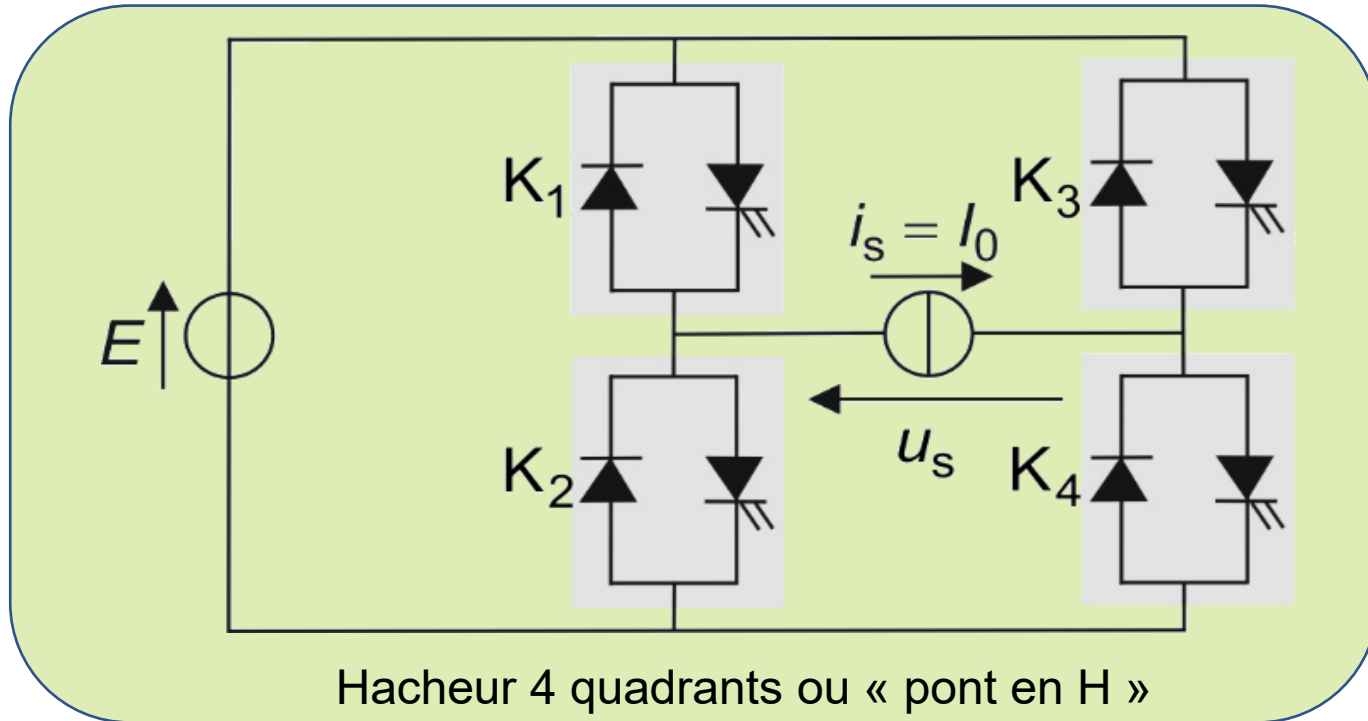
$$\langle p_s \rangle = \langle u_s I_0 \rangle = \langle u_s \rangle I_0 > 0 \Rightarrow I_0 < 0 \Rightarrow \Gamma = \Phi_0 I_0 < 0$$

Le moment du couple des actions électromagnétique est positif dans le cas d'un moteur :

$$\Gamma \Omega > 0 \Rightarrow \Omega < 0$$

Le moteur tourne dans le sens **négalif** (troisième quadrant)



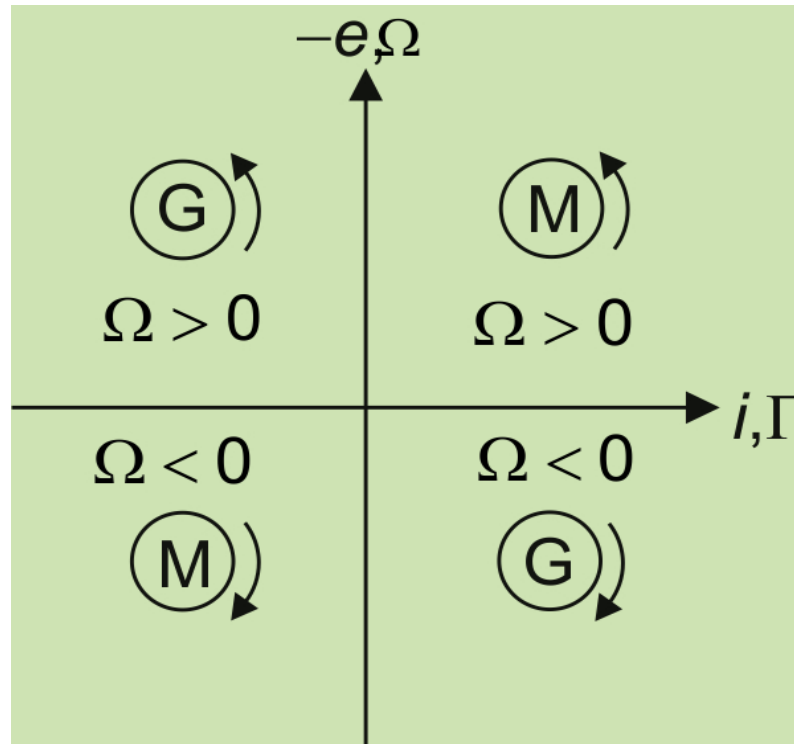


Dans les deuxième et quatrième quadrants, la MCC est **génératrice**.

deuxième quadrant :  $\Omega > 0$   $\Gamma < 0$   $I_0 < 0$   $\langle p_s \rangle = \langle u_s \rangle I_0 < 0$   $\alpha > 0,5$

quatrième quadrant :  $\Omega < 0$   $\Gamma > 0$   $I_0 > 0$   $\langle p_s \rangle = \langle u_s \rangle I_0 < 0$   $\alpha < 0,5$





Avec le pont en H, tous les quadrants sont accessibles

## (ii) Obtention de signaux alternatifs à partir d'une source continue (fonction onduleur)

Exemples :

- Les alimentations de secours (délivrent une tension sinusoïdale, de fréquence et d'amplitude fixes)
- Les variateurs de vitesse (délivrent des courants sinusoïdaux, de fréquence et d'amplitude variables, dans les enroulements du stator d'une machine asynchrone)
- L'alimentation d'un haut-parleur (délivre un signal de puissance proportionnel à un signal sonore)

La tension délivrée  $u_s$ , de période  $T$ , constante par morceaux, ne peut prendre que **trois** valeurs : 0 et  $\pm E$

On étudie le cas d'une charge résistive, de résistance  $R$

On cherche à obtenir un courant sinusoïdal dans la charge, soit  $u_s = Ri$  sinusoïdale, grâce à une bobine de lissage

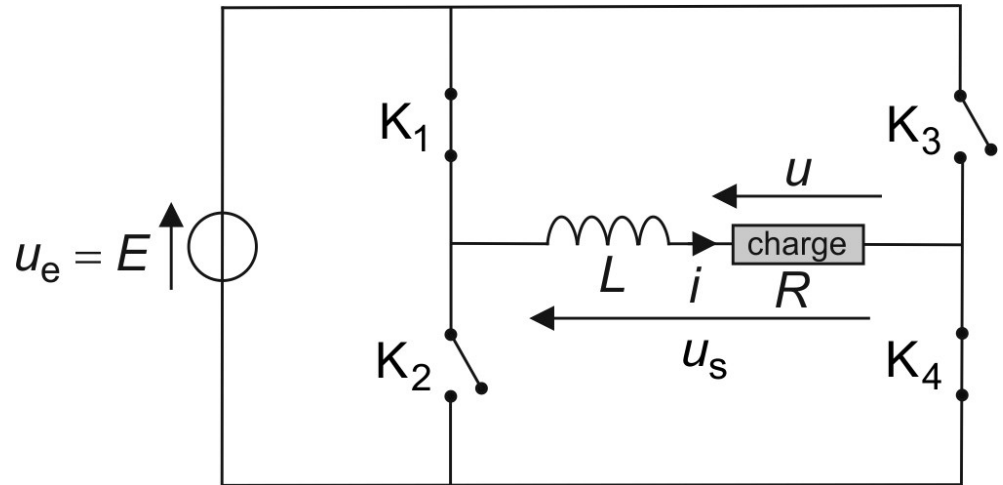
$$\Rightarrow H = \frac{u}{u_s} = \frac{1}{1 + j\omega / \omega_0}$$

On pose :

$$\omega_0 = \frac{R}{L} \quad \Omega = \frac{2\pi}{T} \quad \theta = \Omega t$$

$$\Rightarrow \frac{du}{d\theta} + \frac{u(\theta)}{\lambda} = \frac{u_s(\theta)}{\lambda} \quad \text{avec } \lambda = \frac{\Omega}{\omega_0} = \frac{f}{f_0}$$

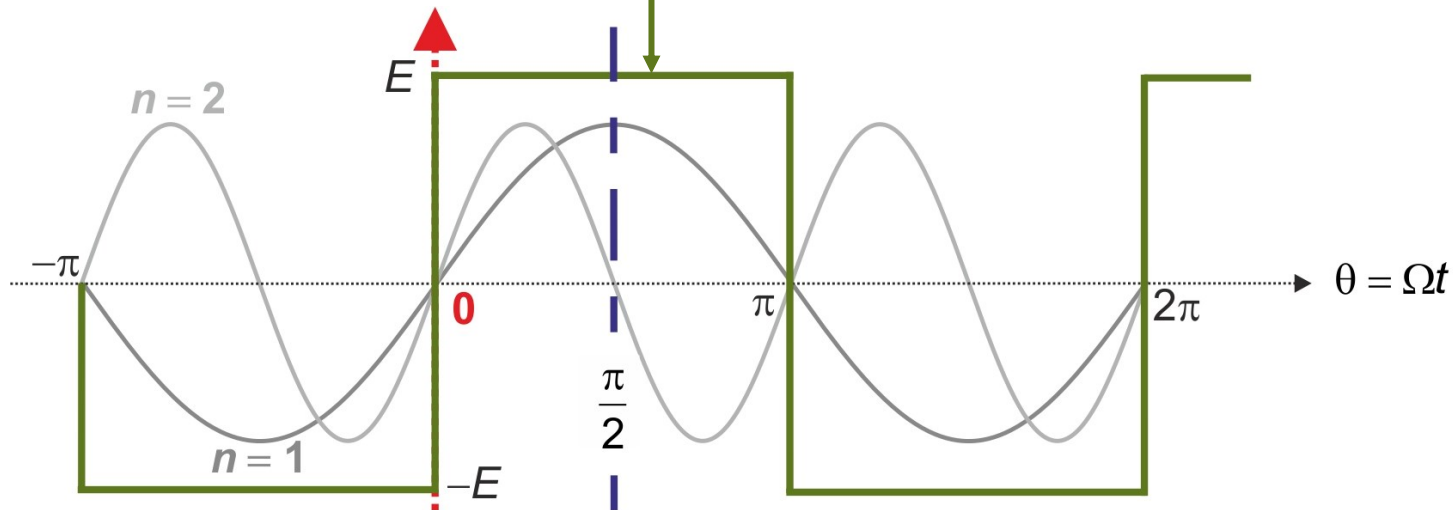
← hachage  
← coupure



Comme  $u_s$  est constante par morceaux, la courbe représentative de  $u(\theta)$  est constituée de branches d'exponentielles

## (i) Commande symétrique

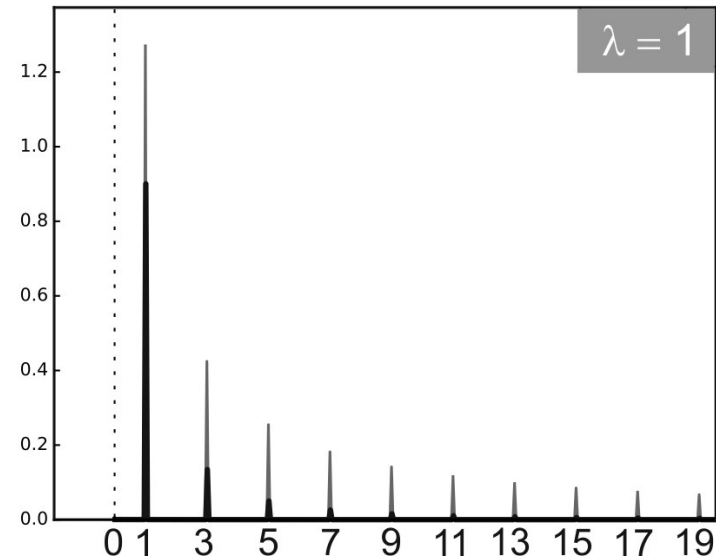
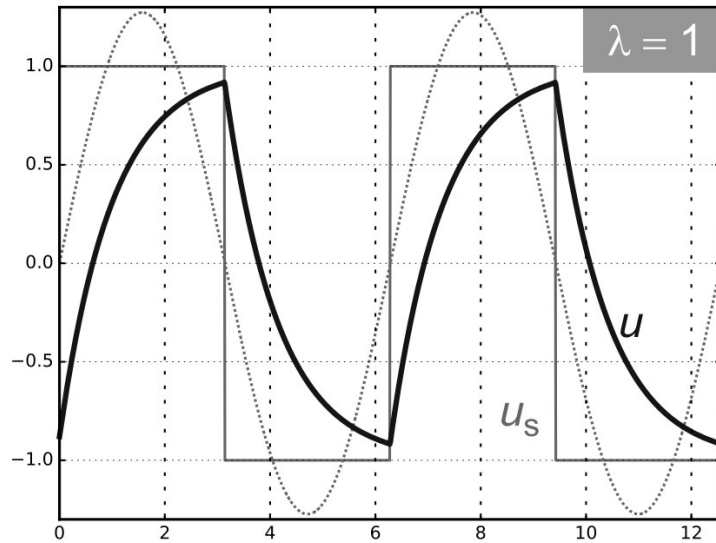
$$u_s = \pm E \text{ avec } \alpha = 0,5$$



$\theta \mapsto u_s(\theta)$   $2\pi$ -périodique, impaire, mais paire par rapport à  $\theta = \frac{\pi}{2}$

$$\Rightarrow u_s(\theta) = \sum_{n=1}^{+\infty} b_n \sin(n\theta) \quad \text{avec} \quad b_n = \frac{2}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \underbrace{u_s(\theta) \sin(n\theta)}_{\text{paire}} d\theta = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u_s(\theta) \sin(n\theta) d\theta$$

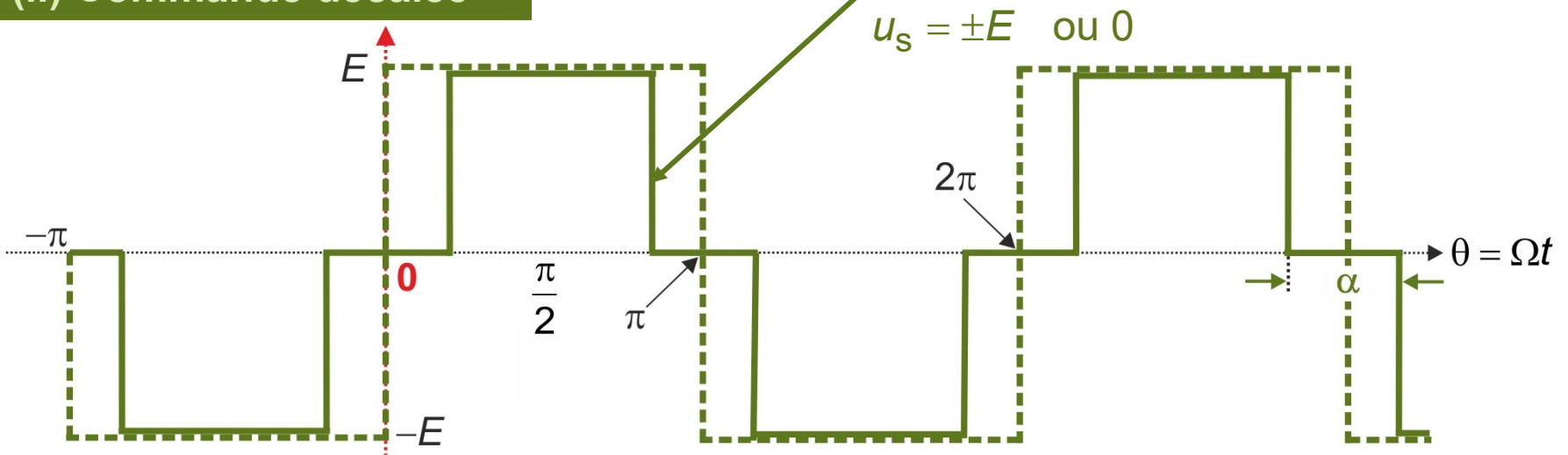
$$\Rightarrow b_{2p} = 0 \quad \text{et} \quad b_{2p+1} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} u_s(\theta) \sin[(2p+1)\theta] d\theta$$



Ici,  $\lambda = 1$  : la pulsation de coupure du passe-bas est égale à la pulsation fondamentale du signal

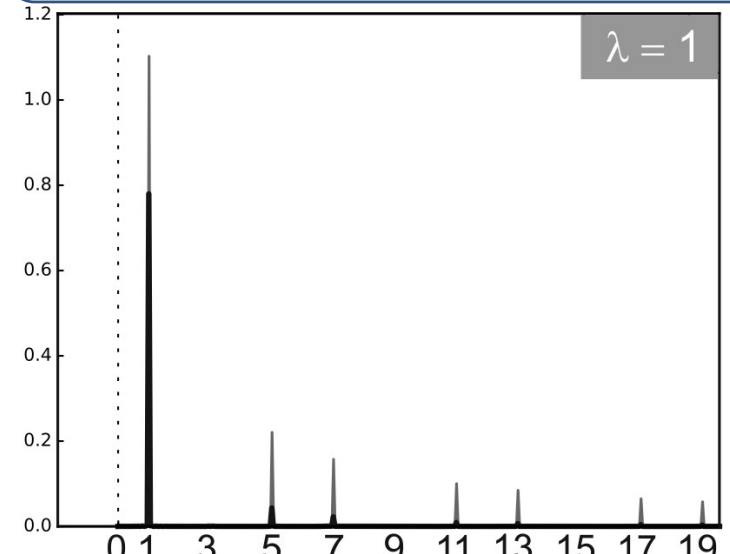
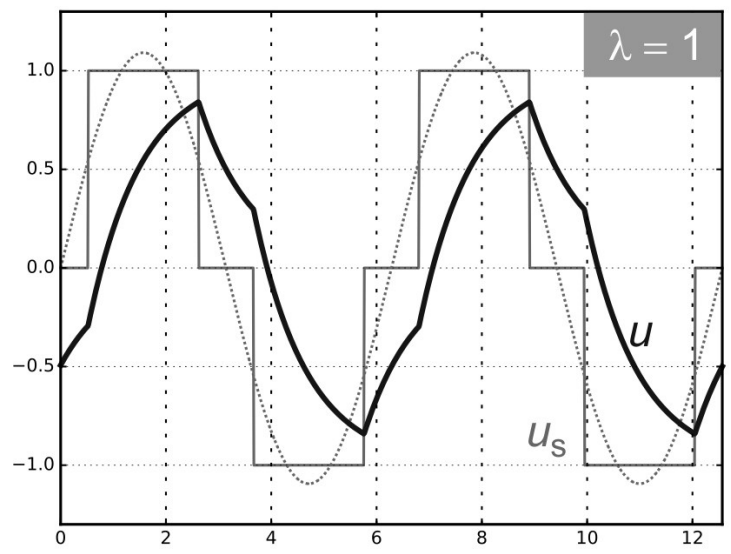
Les harmoniques de rang 3, 5, 7, etc., ne sont pas nuls, et un filtrage passe-bas du premier ordre ne permet pas d'obtenir un signal proche d'une sinusoïde

## (ii) Commande décalée



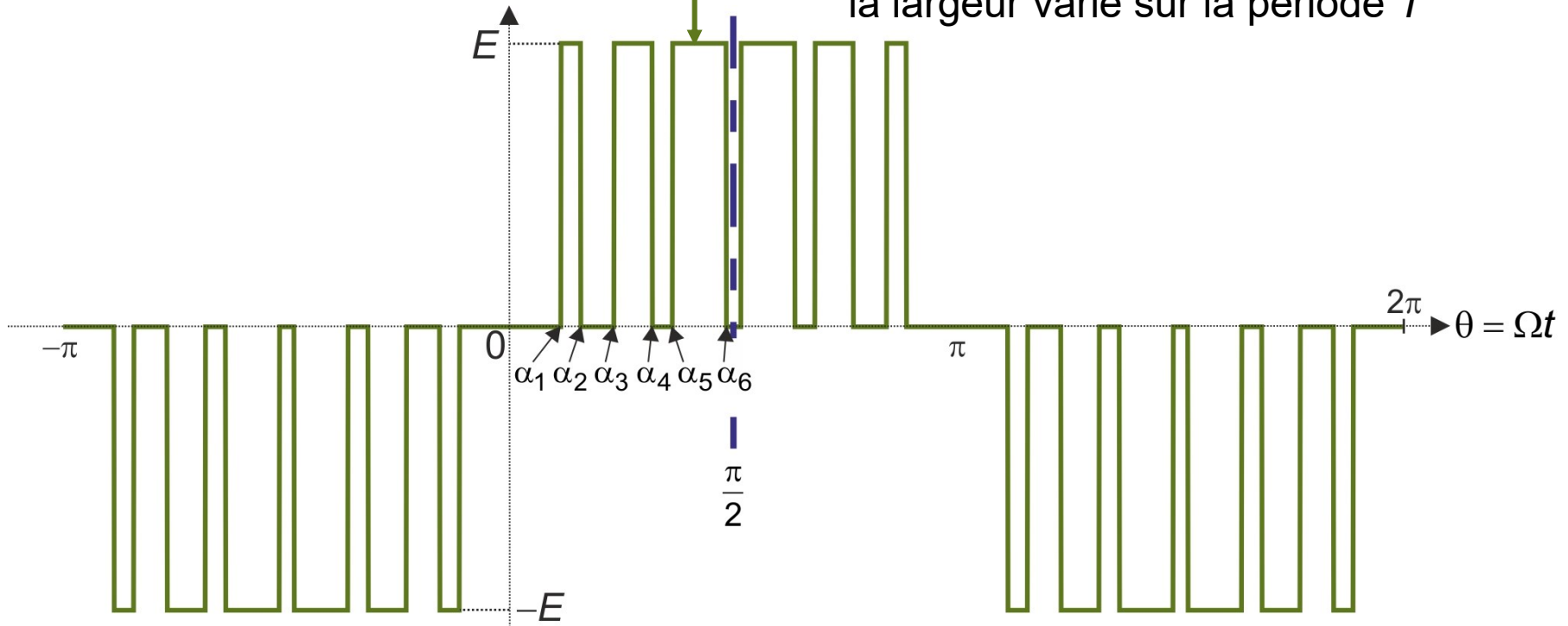
On choisit l'angle de décalage  $\alpha = \pi / 3 \Rightarrow$

$$b_3 = \frac{4E}{\pi} \int_{\alpha/2}^{\pi/2} \sin(3\theta) d\theta = \frac{4E}{3\pi} \cos\left(\frac{3\alpha}{2}\right) = 0$$



(iii) M.L.I calculée

Modulation de Largeur d'Impulsion :  
 $u_s$  ondule toujours entre  $E$ , 0 et  $-E$ ,  
 sous forme de salves d'impulsions dont  
 la largeur varie sur la période  $T$



Exemple : 6 impulsions positives et 6 impulsions négatives par période

$\Rightarrow \theta \mapsto u_s(\theta)$  est caractérisée par 6 angles  $\alpha_j$ ,  $i \in 1,6$

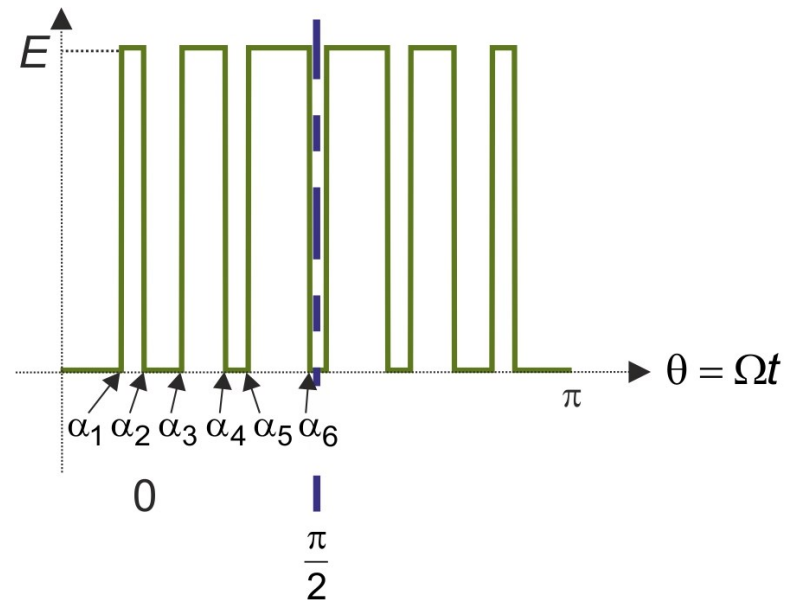
La période de  $\theta \mapsto u_s^2(\theta)$  est  $\pi / 2$ , donc :

$$\begin{aligned} \langle u_s^2 \rangle &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} u_s^2 d\theta \\ &= \frac{2}{\pi} E^2 [(\alpha_2 - \alpha_1) + (\alpha_4 - \alpha_3) + (\alpha_6 - \alpha_5)] \end{aligned}$$

$$\Rightarrow E_{\text{eff}} = E \sqrt{\frac{2}{\pi} [\alpha_2 - \alpha_1 + \alpha_4 - \alpha_3 + \alpha_6 - \alpha_5]}$$

Pour  $n$  impair :

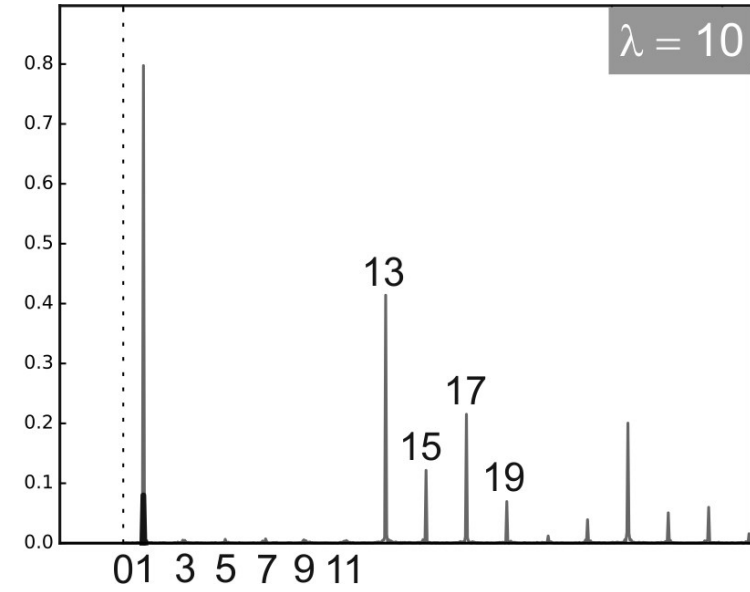
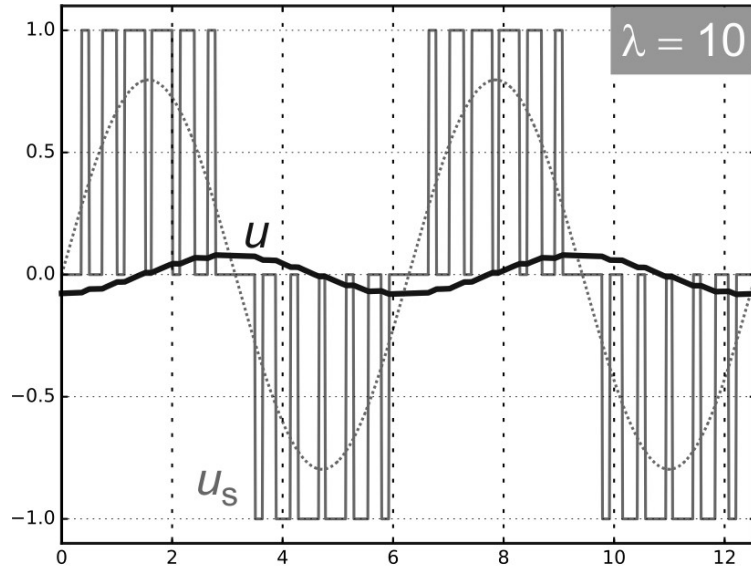
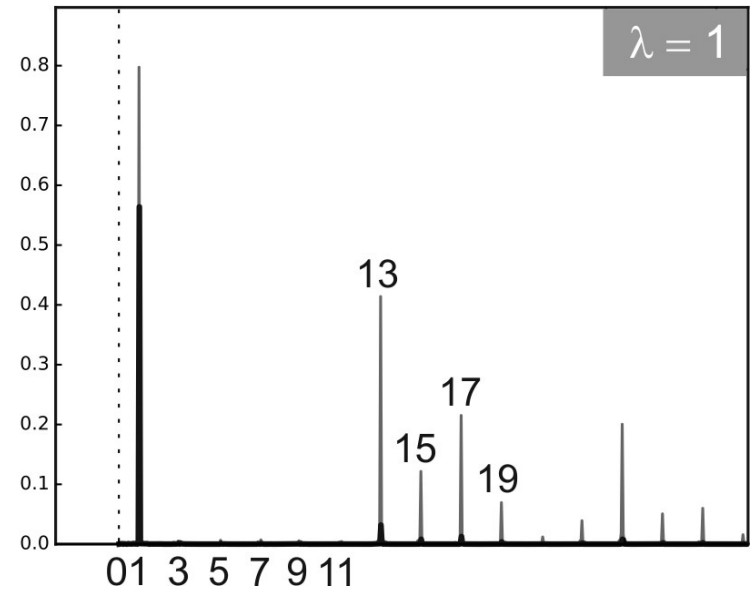
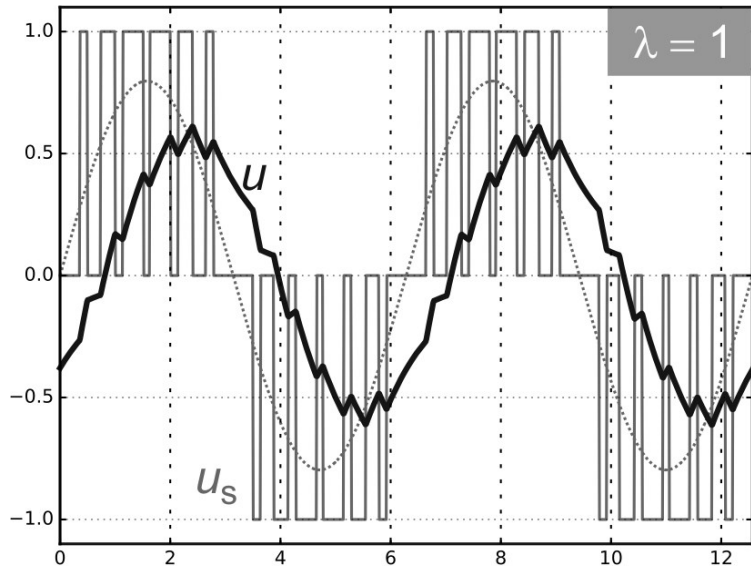
$$\begin{aligned} b_n &= \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} u_s(\theta) \sin(n\theta) d\theta = \frac{4E}{\pi} \left[ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin(n\theta) d\theta + \int_{\alpha_3}^{\alpha_4} \sin(n\theta) d\theta + \int_{\alpha_5}^{\alpha_6} \sin(n\theta) d\theta \right] \\ &= \frac{4E}{n\pi} [\cos(n\alpha_1) - \cos(n\alpha_2) + \cos(n\alpha_3) - \cos(n\alpha_4) + \cos(n\alpha_5) - \cos(n\alpha_6)] \end{aligned}$$



Une fois  $E_{\text{eff}}$  choisie, on a la possibilité d'éliminer les 5 harmoniques de rangs 3,5,7,9 et 11 (il y a 6 équations pour 6 inconnues)

Le filtrage passe-bas permet d'obtenir une tension  $u$  quasi-sinusoïdale





## (iv) M.L.I triangle - sinus

On module les largeurs d'impulsion de  $u_s$  en comparant un signal modulant  $v_m(t)$

de fréquence  $f$ , à une porteuse triangulaire  $v_p(t)$  de fréquence  $f_p \gg f$ :

$$v_m(t) > v_p(t) \Rightarrow u_s = +E$$

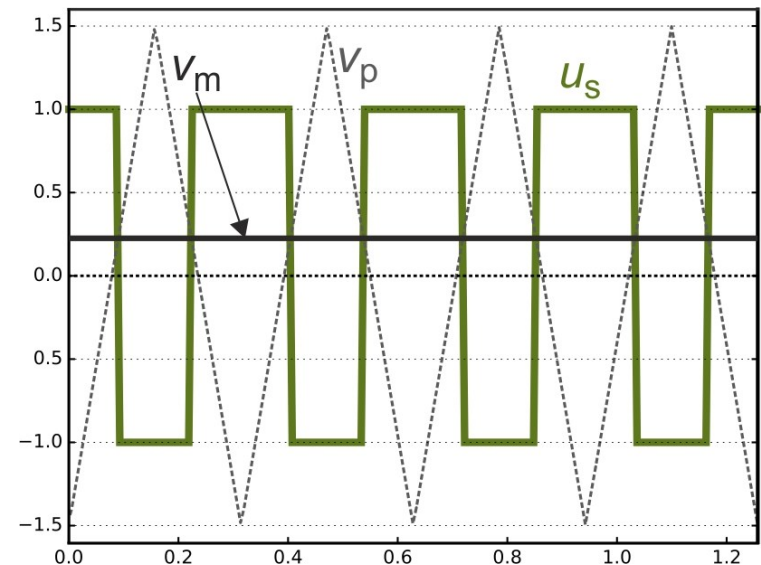
$$v_m(t) < v_p(t) \Rightarrow u_s = -E$$

**Premier cas** :  $v_m(t) = Cte$ . Le rapport cyclique  $\alpha$  est donc constant.

Pour démoduler : filtrage passe-bas de

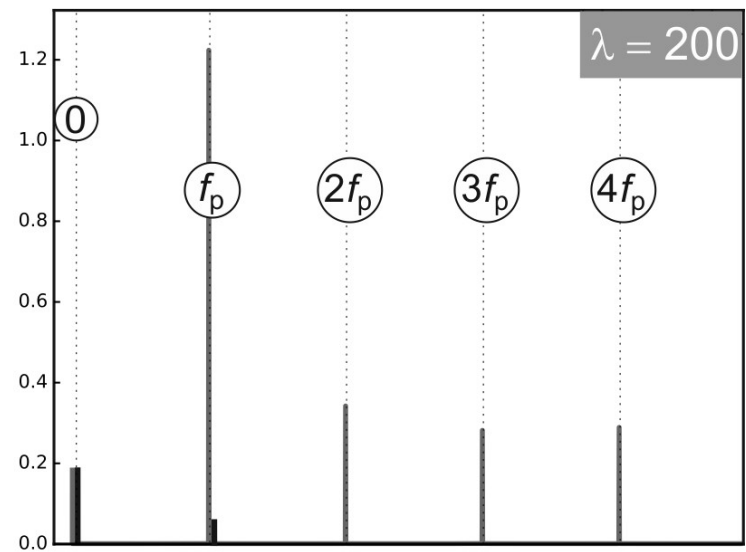
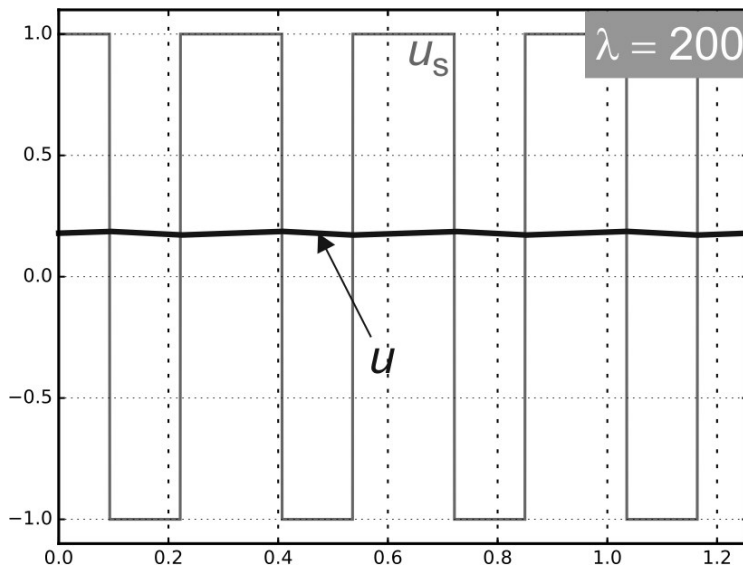
fréquence de coupure  $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \ll f_p$

$$\lambda = \frac{f_p}{f_0} \leftarrow \begin{array}{l} \text{« hachage »} \\ \text{coupure} \end{array}$$



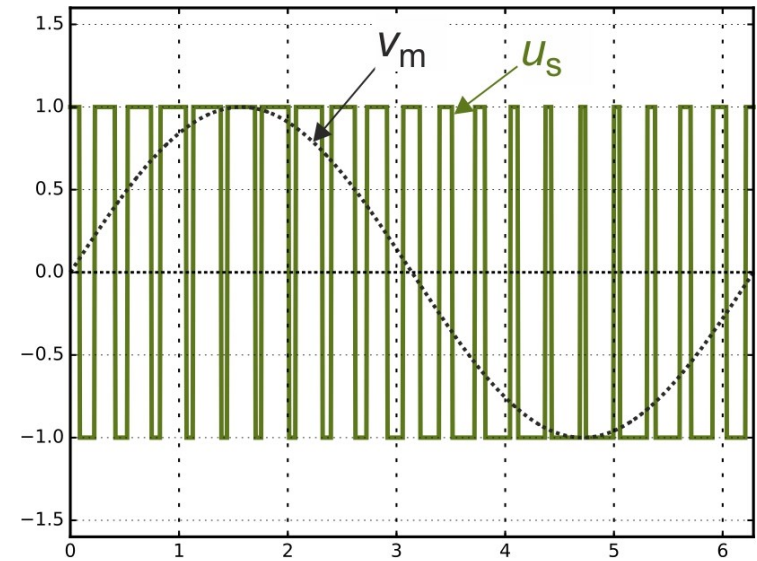
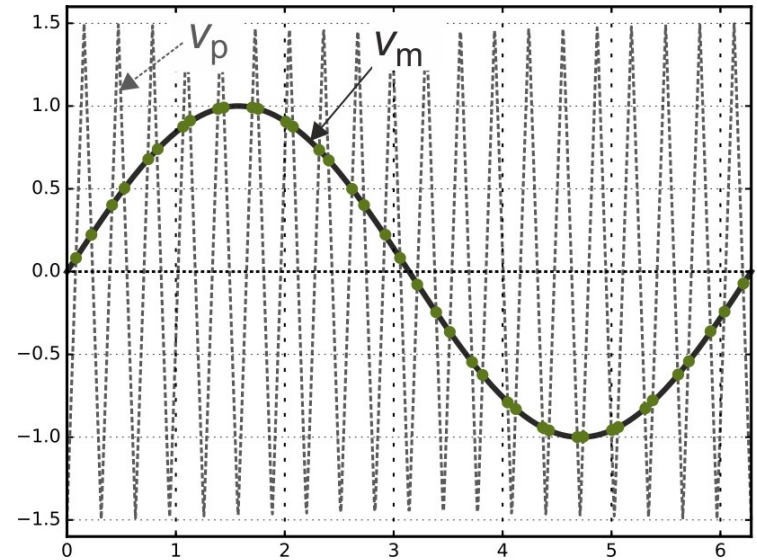
Pour  $\lambda = \frac{f_p}{f_0} = 200$  on ne conserve que la valeur moyenne :  $u \approx \langle u_s \rangle$

image du signal modulant.



Deuxième cas :  $v_m(t) = V_m \cos(\omega t)$

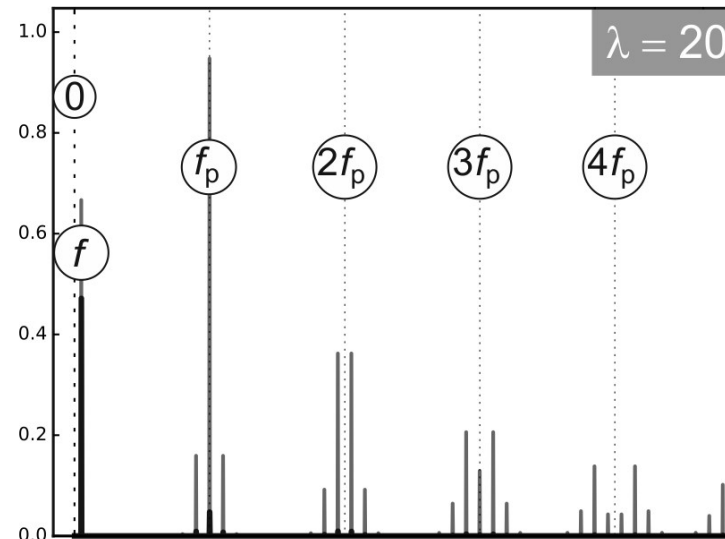
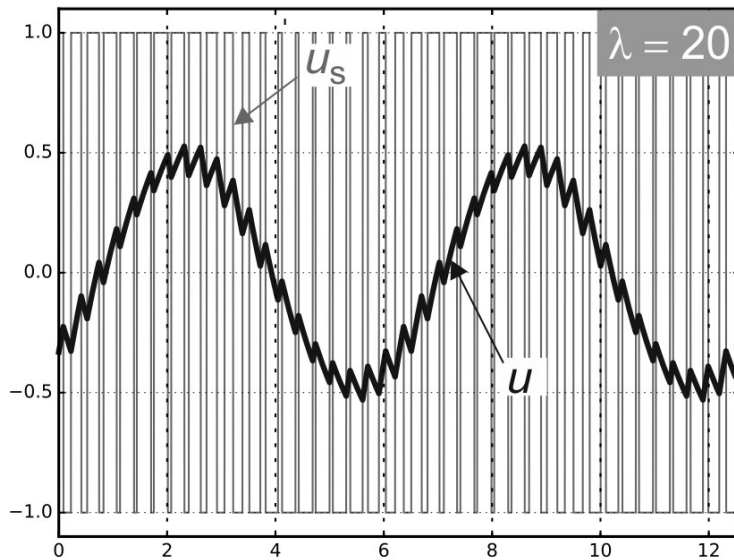
Le rapport cyclique  $\alpha$ , moyenné sur  $T_p$  est donc sinusoïdal



Pour démoduler : filtrage passe-bas de fréquence de coupure  $f \ll f_0 \ll f_p$

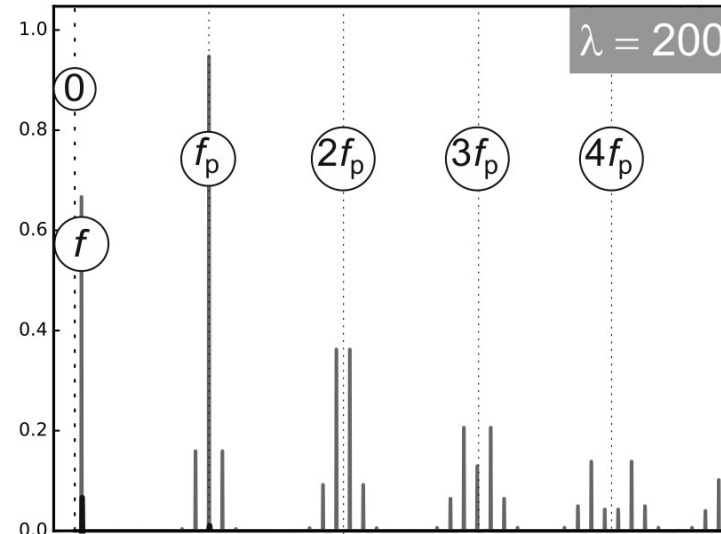
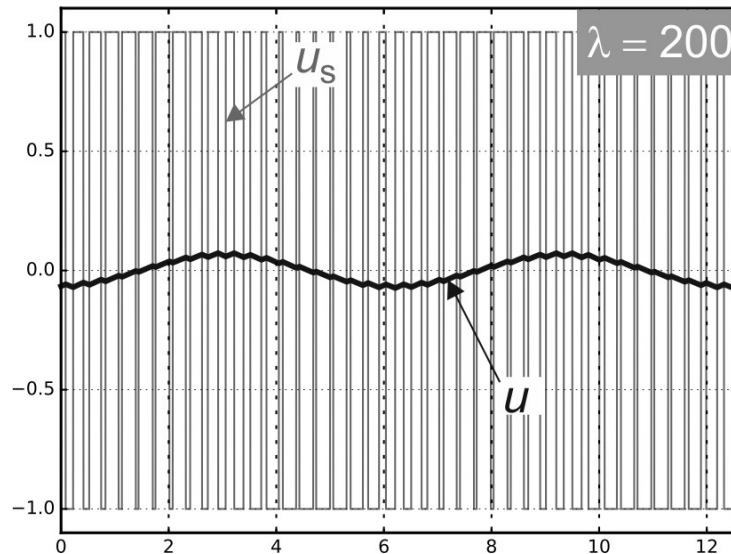
Pour la simulation  $f_p = 20f$  : on a 20 périodes de la porteuse pendant une période du signal modulant

$f_p = 20 f_0$  donc  $f_0 = f$  :  $u$  est proche d'une sinusoïde



Pour la simulation  $f_p = 20f$  : on a toujours 20 périodes de la porteuse pendant une période du signal modulant

$f_p = 200 f_0$  on élimine mieux la porteuse et ses harmoniques, mais  $f = 10 f_0$   
 $u$  est encore plus proche d'une sinusoïde, mais atténuée



On retrouverait une sinusoïde non atténuée avec par exemple  $f = f_0 / 10$  et  $f_p = 200 f_0$