

LU3EE104 : Réseaux électriques et Electronique de puissance

IV. CONVERSION DC/DC, LES HACHEURS

Ouvrage de référence :

Electronique de puissance, 2^e édition - Luc Lasne

Editions Dunod - ISBN 978-2-10-072135-1

IV. Conversion DC/DC : les hacheurs

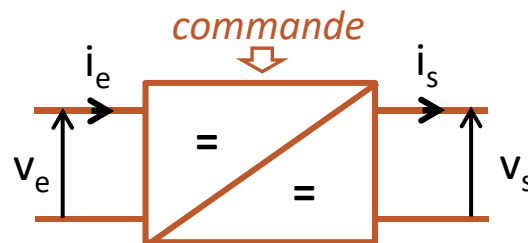
Principe du hacheur abaisseur de tension

Caractérisation et filtrage des grandeurs de sortie

Quels interrupteurs ?

Notion de conduction continue / discontinue

Réversibilité en courant et/ou en tension

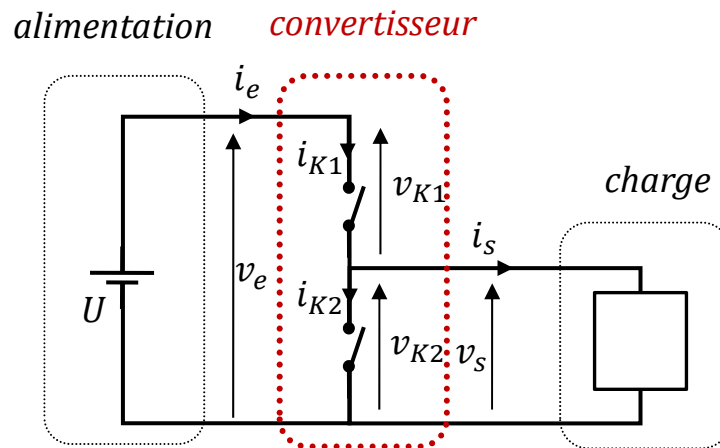


La commande du convertisseur sert à piloter la valeur de la tension de sortie V_s .

AVERTISSEMENT : CES SUPPORTS DE COURS DOIVENT ÊTRE COMPLETES PAR VOS NOTES
De nombreux développements sont faits au tableau.

Principe du hacheur abaisseur de tension

Schéma de principe :



- K1/K2 : cellule de commutation
- Commande de K1 : α
 - Période T, fréquence $f=1/T$
 - Sur $[0, \alpha T[$: K1 fermé
 - Sur $[\alpha T, T[$: K1 ouvert
 - α : rapport cyclique
- Commande de K2 :
 - Complémentaire de K1

Développements faits au tableau

- v_s hachée : U ou 0
- Valeur moyenne $\langle v_s \rangle = \alpha \cdot U$, commandée par le rapport cyclique
- Allure de i_s : dépend de la charge

Caractérisation et filtrage des grandeurs de sortie

Caractérisation d'un signal continu s :

- Valeur moyenne $\langle s \rangle$
- NB : en EP, on parle de signal continu si $\langle s \rangle \neq 0$!
- Ondulation $\Delta s = s_{max} - s_{min}$

Qualité d'un signal continu s :

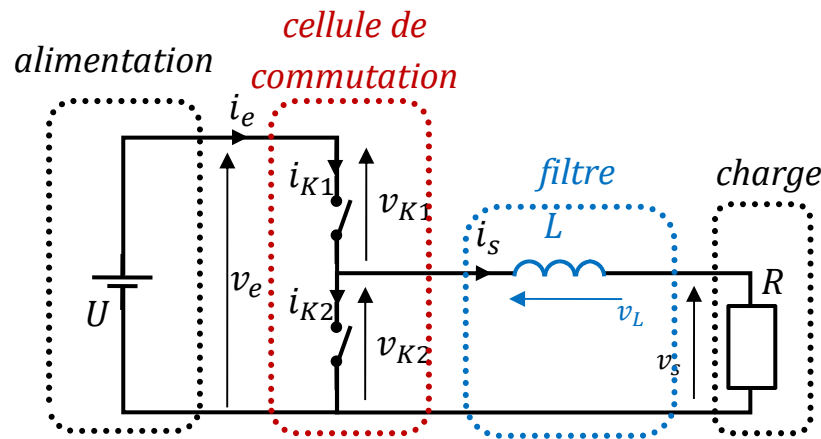
- Caractérisée par le taux d'ondulation $\tau_s = \frac{\Delta s}{\langle s \rangle}$

Éléments de filtrage :

- Nécessaires pour réduire le taux d'ondulation
- Inductance en série (s'oppose aux variations de courant)
- Condensateur en parallèle (s'oppose aux variations de tension)

Hacheur abaisseur de tension

Schéma du montage : charge RL



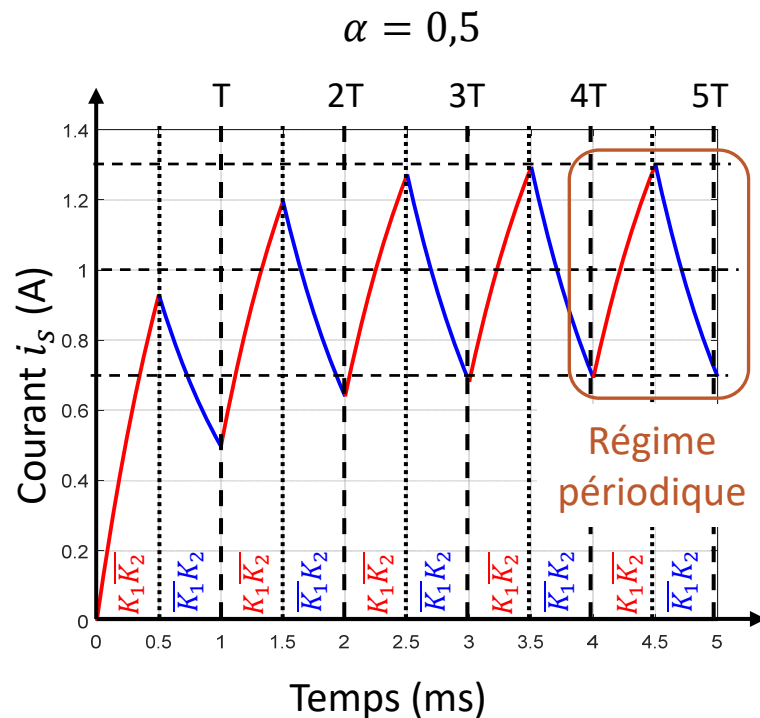
- $K1/K2$: cellule de commutation
- Commande de $K1$: α
 - Période T , fréquence $f=1/T$
 - Sur $[0, \alpha T[$: $K1$ fermé
 - Sur $[\alpha T, T[$: $K1$ ouvert
 - α : rapport cyclique

*Développements faits au tableau et en TD
+ voir littérature abondante*

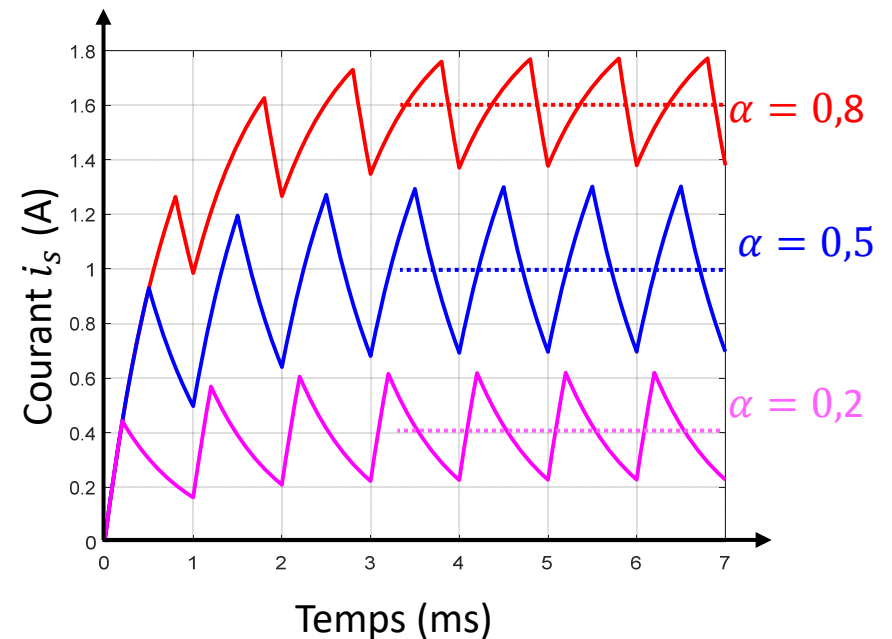
Hacheur abaisseur de tension

Résultats

Établissement du courant :



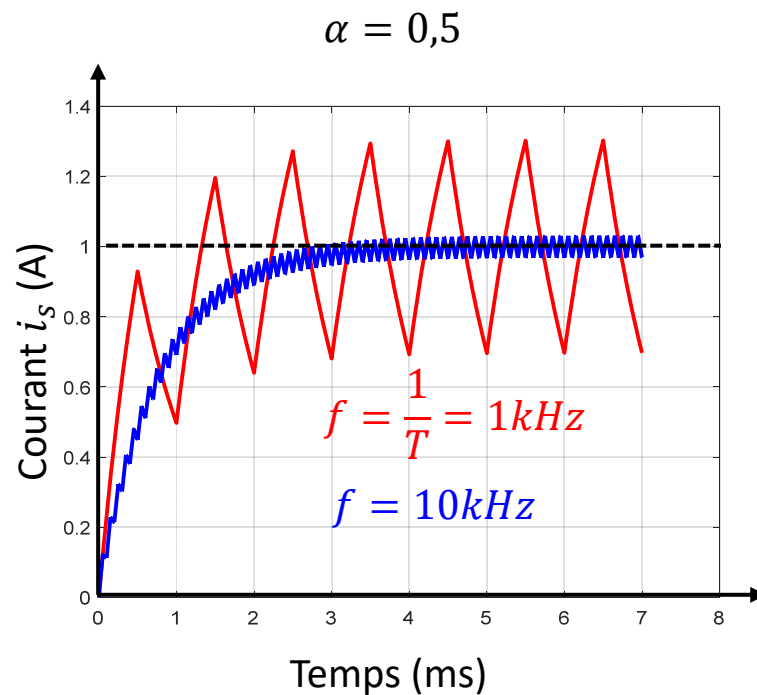
Influence de α :



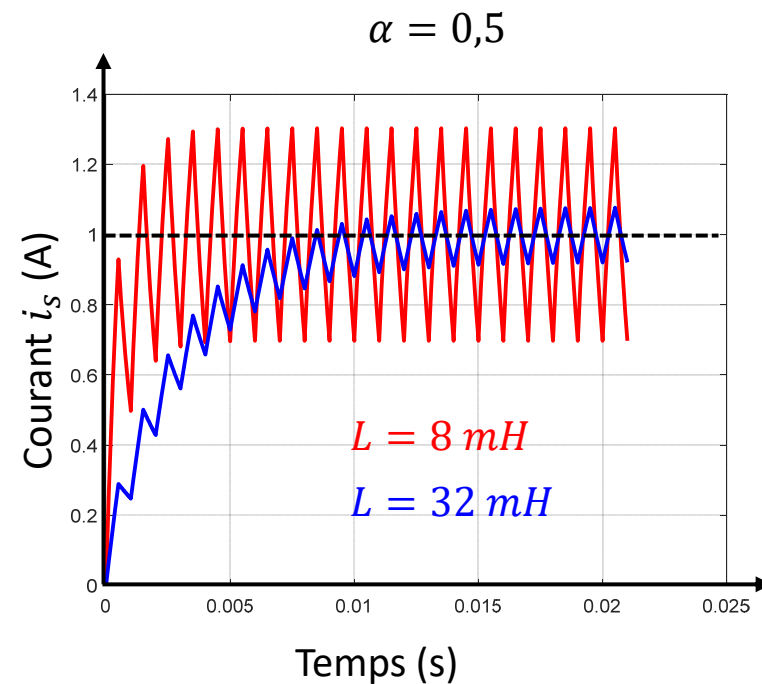
Hacheur abaisseur de tension

Résultats

Influence de $f_{\text{découpage}}$:

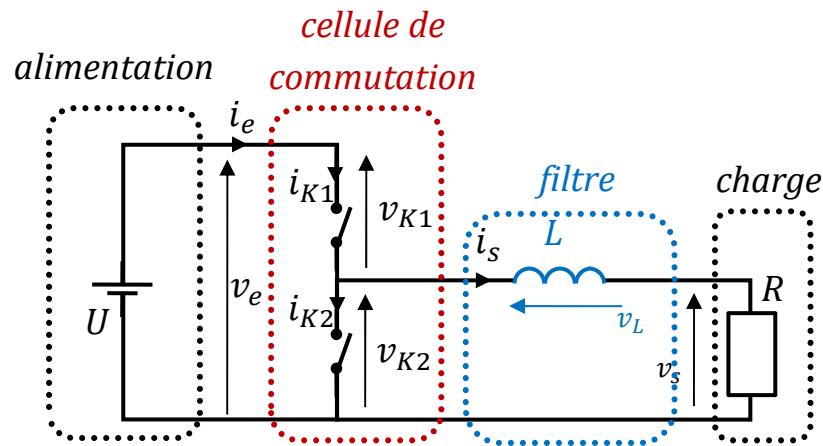


Influence de L :



Hacheur abaisseur de tension

Résultats principaux (à connaître parfaitement) :

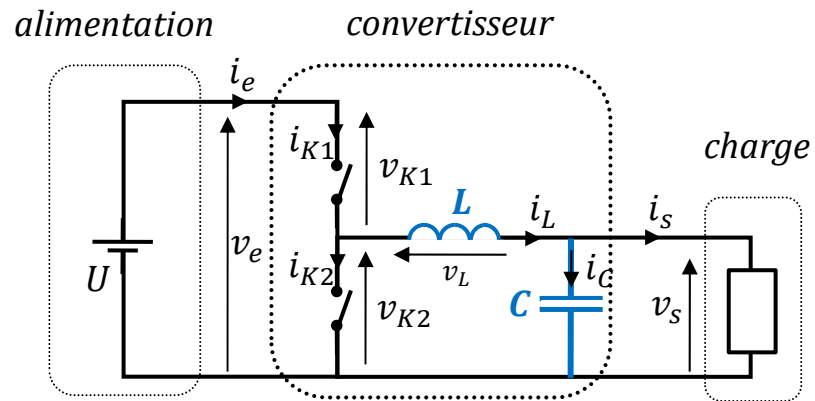


- K_1/K_2 : cellule de commutation
- Commande de K_1 : α
 - Période T , fréquence $f=1/T$
 - Sur $[0, \alpha T[$: K_1 fermé
 - Sur $[\alpha T, T[$: K_1 ouvert
 - α : rapport cyclique

- v_{K2} hachée, v_s filtrée : $\langle v_s \rangle = \langle v_{K2} \rangle = \alpha \cdot U$
 - i_s filtré : $\langle i_s \rangle = \alpha \cdot \frac{U}{R}$
 - Ondulation de courant : $\Delta i_s = i_{max} - i_{min} \approx U \cdot \frac{\alpha(1-\alpha)}{Lf}$
- (hypothèse de conduction continue)

Hacheur abaisseur de tension

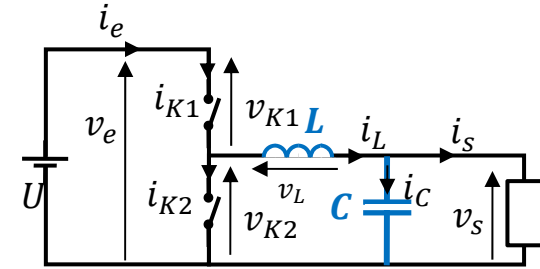
Filtrage par une cellule LC :



- $K1/K2$: cellule de commutation
- Commande de $K1$: α
 - Période T , fréquence $f=1/T$
 - Sur $[0, \alpha T[$: $K1$ fermé
 - Sur $[\alpha T, T[$: $K1$ ouvert
 - α : rapport cyclique

- En régime périodique : $\langle v_L \rangle = 0$ et $\langle i_C \rangle = 0$
- **Hypothèses simplificatrices :**
 - ↪ **C grand, donc $v_s \approx \langle v_s \rangle = \alpha U$ et $i_C \approx 0$**
 - ↪ **L inductance pure (résistance négligeable)**

Calculs *avec les hypothèses simplificatrices*



Sur $[0, \alpha T[$:

$$v_{K1} = 0, v_{K2} = U, v_s = \alpha U$$

$$i_e = i_{K1} = i_s = \mathbf{i_L}, i_{K2} = 0$$

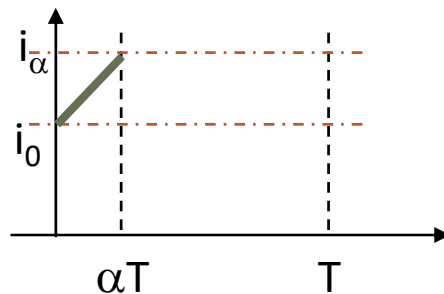
$$L \frac{di_L}{dt}(t) = U - \alpha U$$

Hypothèse : à $t = 0, i_L(0) = i_0$

$$\text{D'où : } i_L(t) = \frac{U(1-\alpha)}{L} t + i_0$$

À $t = \alpha T^-$:

$$i_L(\alpha T^-) = \frac{U(1-\alpha)}{L} \alpha T + i_0 = i_\alpha$$



Sur $[\alpha T, T[$:

$$v_{K1} = U, v_{K2} = 0, v_s = \alpha U$$

$$i_e = i_{K1} = 0, -i_{K2} = i_s = \mathbf{i_L}$$

$$L \frac{di_L}{dt}(t) = -\alpha U$$

À $t = \alpha T^+, i_L(\alpha T^+) = i_\alpha$

Car le courant dans L est continu

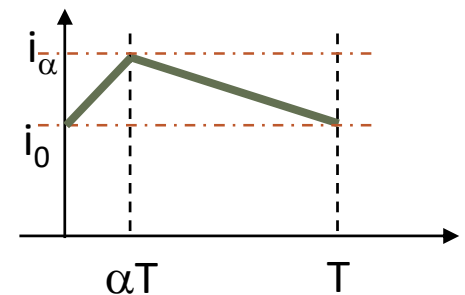
$$\text{D'où : } i_L(t) = \frac{-\alpha U}{L} (t - \alpha T) + i_\alpha$$

On exprime i_α en fonction de i_0 et après calcul on obtient :

$$i_L(t) = \frac{-\alpha U}{L} (t - T) + i_0$$

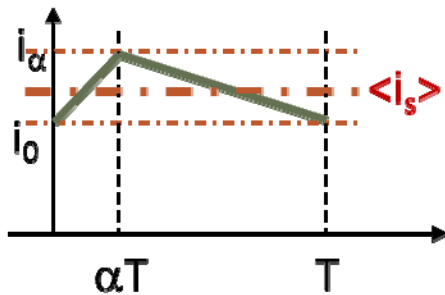
À $t = T^-, i_L(T^-) = i_0$

Courant périodique



Bilan

A très bien connaître:



$$\langle v_s \rangle = \alpha U$$

$$i_\alpha = \frac{U(1-\alpha)}{L} \alpha T + i_0$$

$$\langle i_s \rangle = \frac{i_0 + i_\alpha}{2} \text{ dépend de la charge}$$

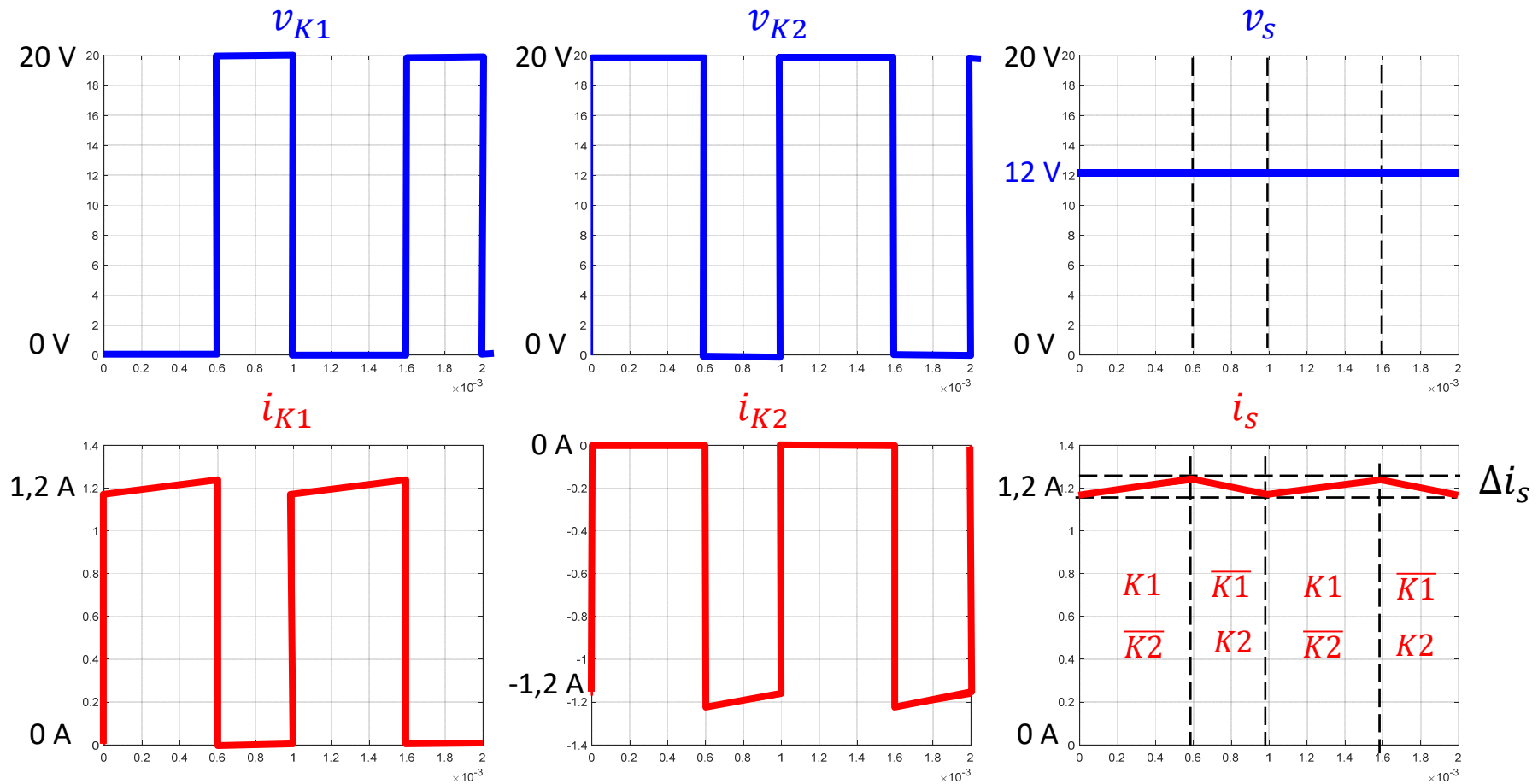
Ondulation de courant :

$$\Delta i_s = i_\alpha - i_0 = U \cdot \frac{\alpha(1-\alpha)}{Lf}$$

(en conduction continue)

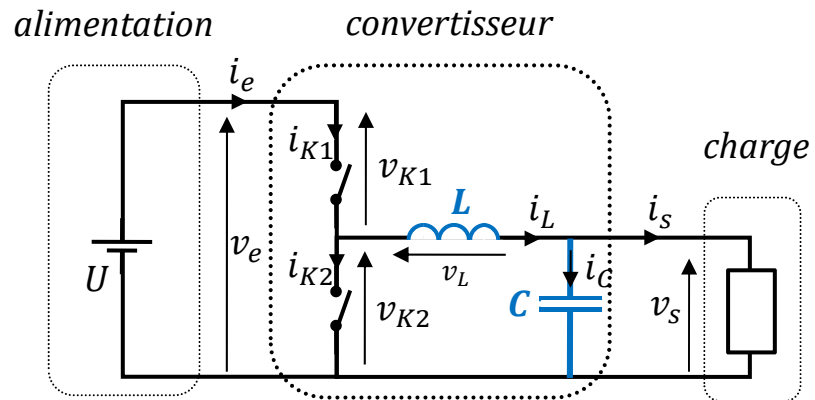
Hacheur abaisseur de tension

Exemples de chronogrammes : $\alpha = 0,6$ et $U = 20\text{ V}$ charge $R = 20\Omega$



Hacheur abaisseur de tension

Bilan de puissance :



- K1/K2 : cellule de commutation
- Commande de K1 : α
 - Période T, fréquence $f=1/T$
 - Sur $[0, \alpha T[$: K1 fermé
 - Sur $[\alpha T, T[$: K1 ouvert
 - α : rapport cyclique

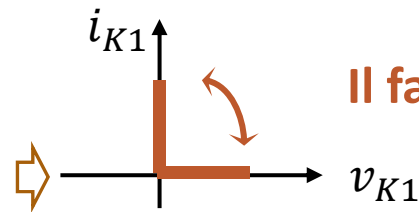
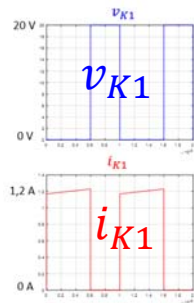
- Puissance transmise : $P = \langle v_e \cdot i_e \rangle = \langle v_s \cdot i_s \rangle$
- $v_e = U$, donc $P = U \langle i_e \rangle$
- $v_s = \alpha U$, donc $P = \alpha U \langle i_s \rangle$
- On en déduit que $\langle i_e \rangle = \alpha \langle i_s \rangle$

Quels interrupteurs ?

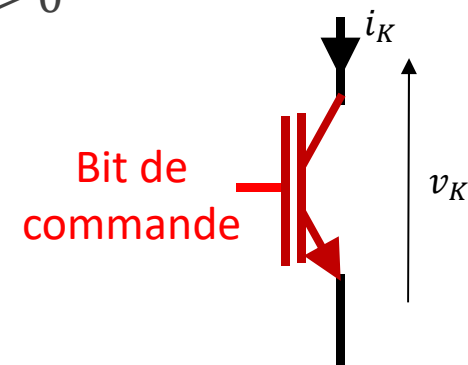
Identification des interrupteurs :

- Caractéristique courant/tension de K1

L'analyse du circuit montre que $i_{K1} > 0$ et $v_{K1} > 0$

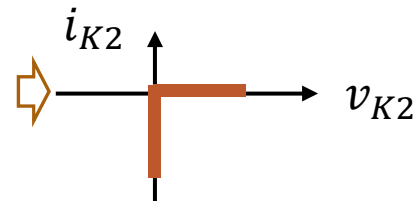
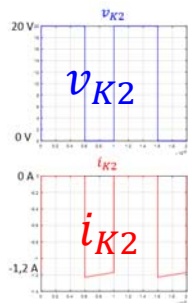


Il faut un transistor

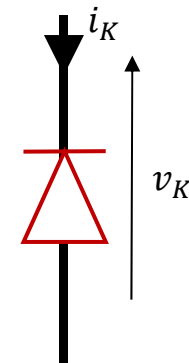


- Caractéristique courant/tension de K2

L'analyse du circuit montre que $i_{K2} < 0$ et $v_{K2} > 0$

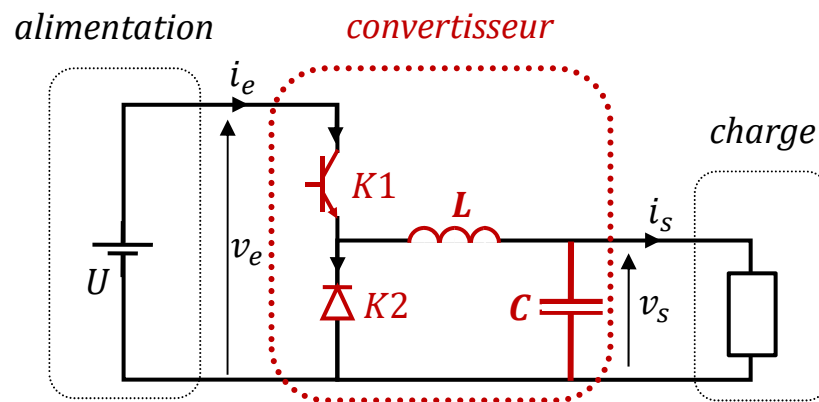


**Il faut une diode
montée en inverse**



Hacheur *buck* unidirectionnel en tension et en courant

Structure finale :



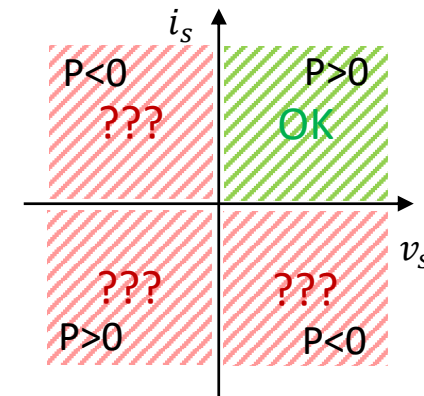
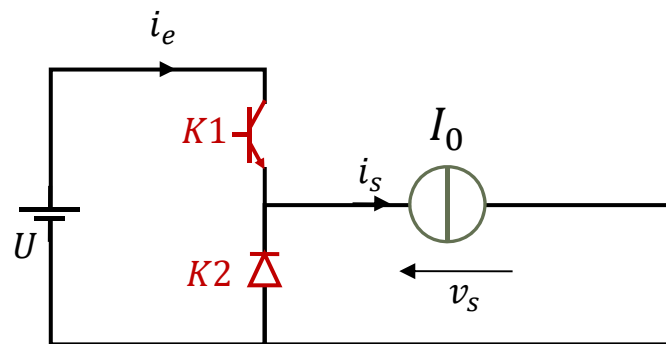
- $K1/K2$: cellule de commutation
- Commande de $K1$: α
 - Période T , fréquence $f=1/T$
 - Sur $[0, \alpha T[$: $K1$ fermé
 - Sur $[\alpha T, T[$: $K1$ ouvert
 - α : rapport cyclique, commande $\langle v_s \rangle$

- unidirectionnel en tension : v_s ne peut être que positive
- Unidirectionnel en courant : i_s ne peut être que positif

Réversibilité en courant et/ou en tension

Structure de base :

- Entrée = source de tension $U > 0$
- Sortie = source de courant $I_0 > 0$



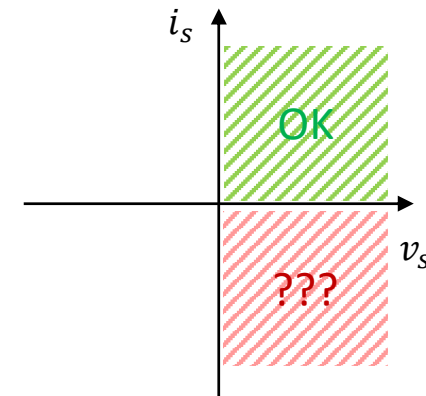
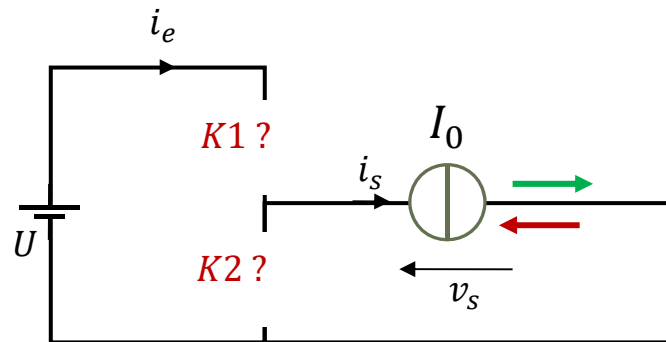
Besoin de réversibilité :

- Si on veut pouvoir connecter $I_0 < 0$? (freinage récupératif)
- Si on veut alimenter avec $v_s < 0$? (pour inverser le sens de marche)

Réversibilité en courant et/ou en tension

Réversibilité en courant

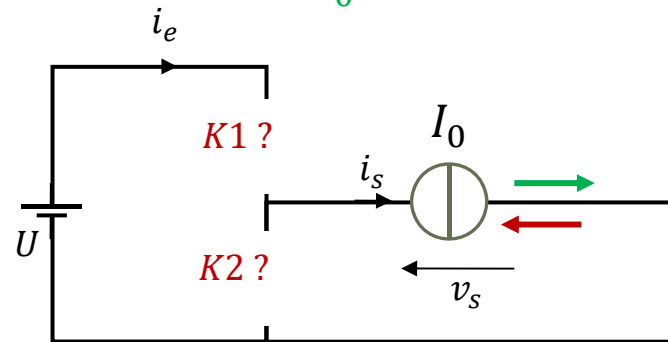
- Entrée = source de tension $U > 0$ donc $v_s > 0$
- Sortie = source de courant $I_0 > 0$ ou < 0



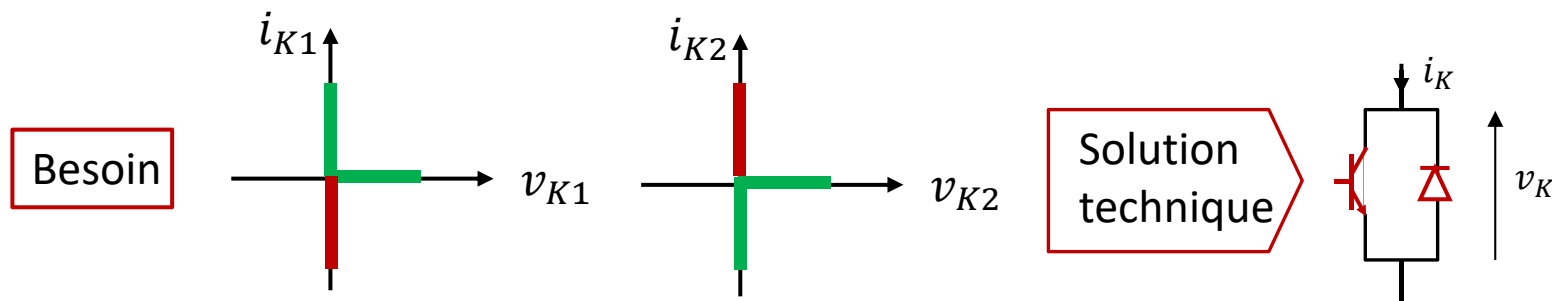
Réversibilité en courant et/ou en tension

Réversibilité en courant

- Entrée = source de tension $U > 0$ donc $v_s > 0$
- Sortie = source de courant $I_0 > 0$ ou < 0



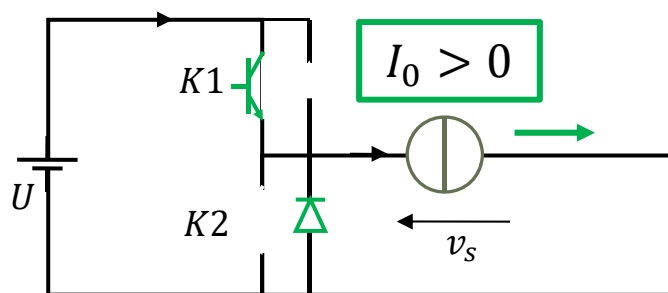
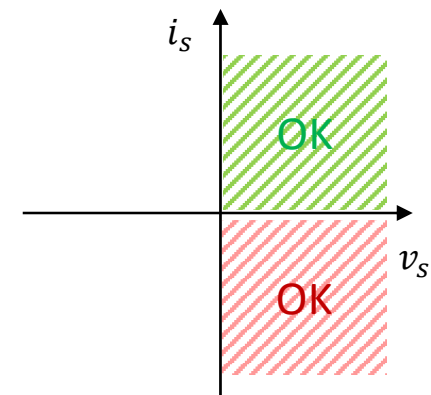
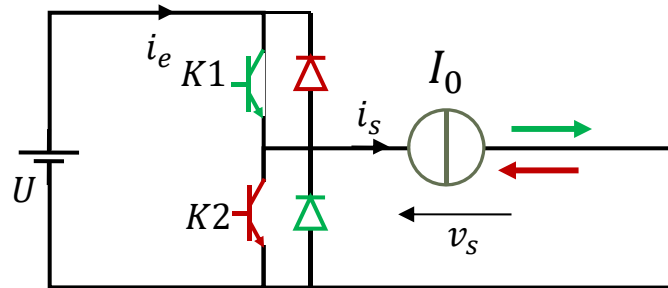
- Solution : choisir des interrupteurs $K1$ et $K2$ réversibles en courant



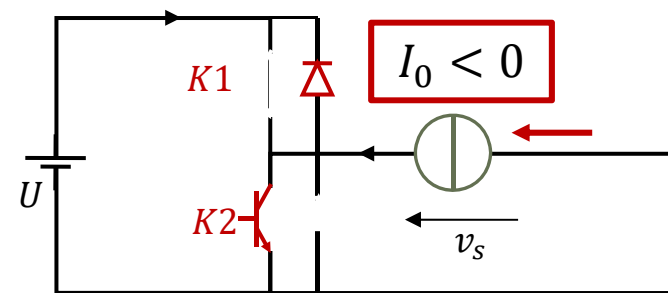
Réversibilité en courant et/ou en tension

Réversibilité en courant

- Entrée = source de tension $U > 0$ donc $v_s > 0$
- Sortie = source de courant $I_0 > 0$ ou < 0



T2 bloqué, T1 « actif »

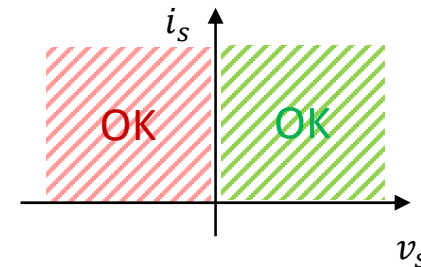
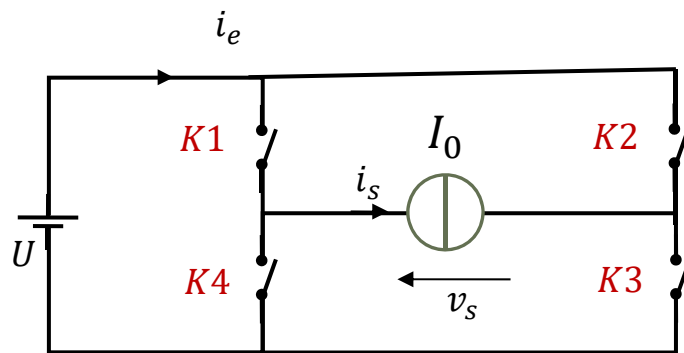


T1 bloqué, T2 « actif »

Réversibilité en courant et/ou en tension

Réversibilité en **tension** : hacheur 2 quadrants

- Charge = source de courant $I_0 > 0$
- Tension de sortie $v_s > 0$ **ou** < 0



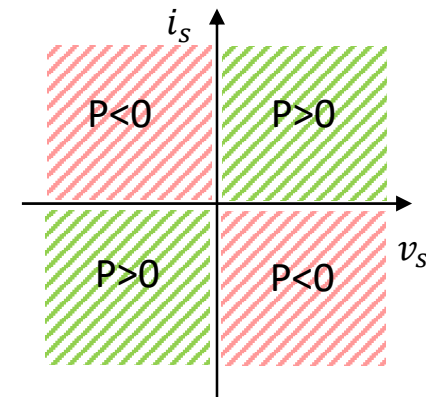
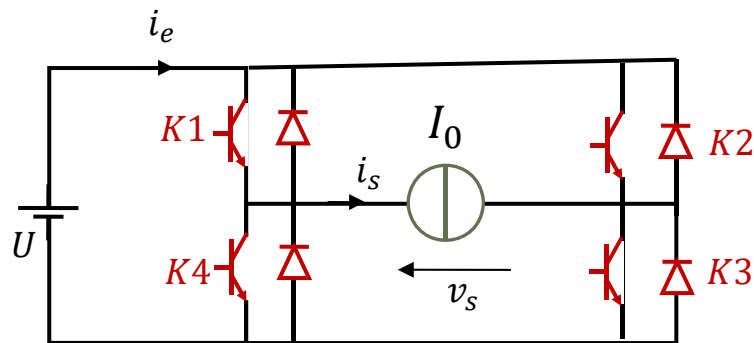
Sur $[0, \alpha T[: v_s = U$
Sur $[\alpha T, T[: v_s = -U$
 v_s hachée, $\langle v_s \rangle = \frac{1}{T} [\alpha T \times U + (1 - \alpha)T \times (-U)]$
 $\langle v_s \rangle = \alpha U - U + \alpha U = (2\alpha - 1)U$
 $\langle v_s \rangle > 0$ si $0,5 \leq \alpha < 1$
 $\langle v_s \rangle < 0$ si $0 < \alpha \leq 0,5$

- Cellules de commutation :
 - K1K4 et K2K3
- Commande de K1 : α
 - Période T, fréquence $f=1/T$
 - Sur $[0, \alpha T[: K1$ et $K3$ fermés
 - Sur $[\alpha T, T[: K1$ et $K3$ ouverts
 - α : rapport cyclique

Réversibilité en courant et/ou en tension

Réversibilité courant et tension : hacheur 4 quadrants

- Charge = source de courant $I_0 > 0$ *ou* < 0
- Tension de sortie $v_s > 0$ *ou* < 0

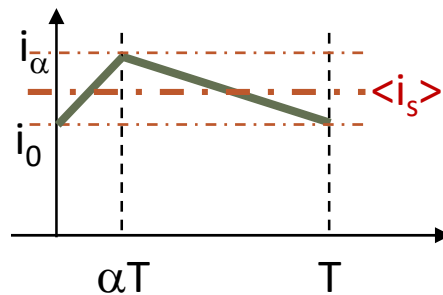


v_s hachée, valeur moyenne $\langle v_s \rangle = (2\alpha - 1) \cdot U$

Notion de conduction discontinue

Conduction continue :

- Le courant de sortie fluctue mais ne s'annule jamais
- $0 < i_0 < \langle i_s \rangle < i_\alpha$



- A α donné, $\langle i_s \rangle$ dépend de la charge.

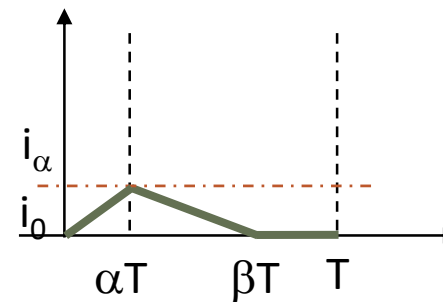
$$\langle i_s \rangle = \alpha \frac{U}{R}$$

Conduction discontinue :

- Si la demi-ondulation est plus grande que le courant moyen...

$$\frac{1}{2} \frac{U\alpha(1-\alpha)}{Lf} > \langle i_s \rangle$$

- Le courant de sortie s'annule à l'instant βT , ce qui entraîne le blocage de la diode



$$\langle v_s \rangle = \frac{U}{1 + \frac{2LI}{\alpha^2 TU}} > \alpha U$$

Quelques autres structures de hacheurs

Hacheur boost (élevateur de tension)

Hacheur buck-boost

Hacheur fly-back (isolation galvanique)