

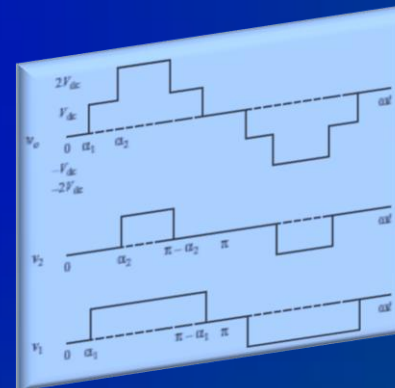
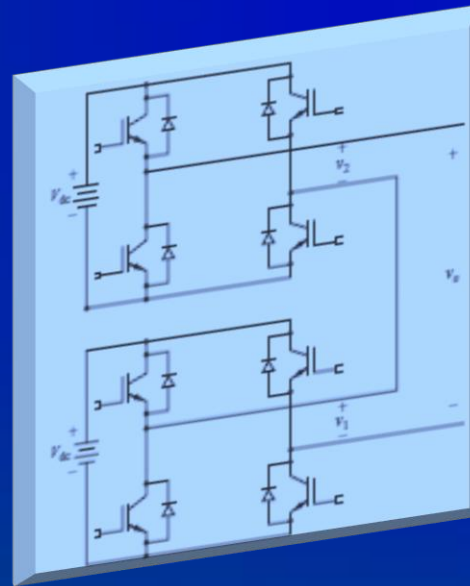
# Electronique de Puissance Avancée

Dr. Chaouki GHENNAI

Département Electrotechnique

Faculté de Technologie

Université Batna 2

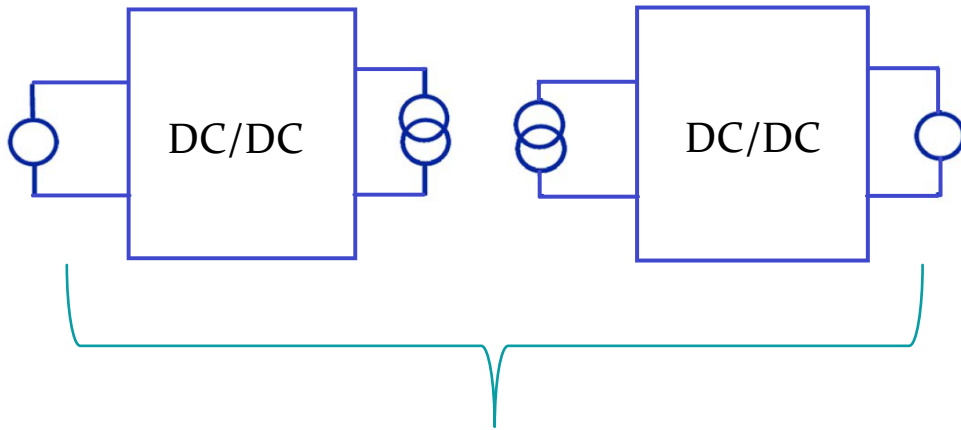


# Convertisseurs DC/DC

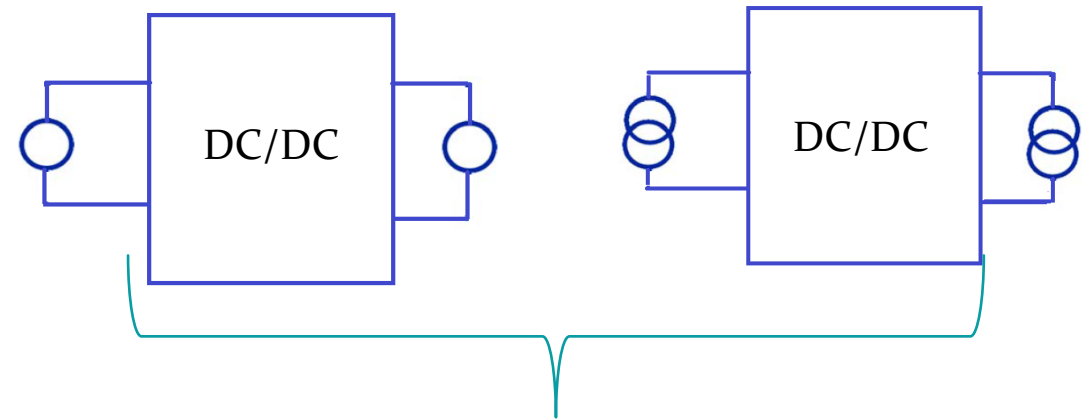
Les convertisseurs DC/DC ou hacheurs réalisent une conversion continu-continu. Ils permettent de régler la tension appliquée au récepteur ou le courant qui y circule. Ils peuvent être directs ou indirects.

- Les hacheurs directs relient un générateur et un récepteur qui se comportent l'un comme une source de tension, l'autre comme une source de courant, conformément à la règle d'alternance des sources (cours 2). Ils ne comportent que des interrupteurs qui permettent d'agir sur les connexions entre le générateur et le récepteur.
- Les hacheurs indirects relient un générateur et un récepteur de même nature. Ils comportent des interrupteurs et un élément de stockage d'énergie qui joue le rôle de source intermédiaire de courant ou de tension. L'élément de stockage reçoit de l'énergie du générateur puis la transmet au récepteur en fonction des connexions établies par les interrupteurs.

# Convertisseurs DC/DC



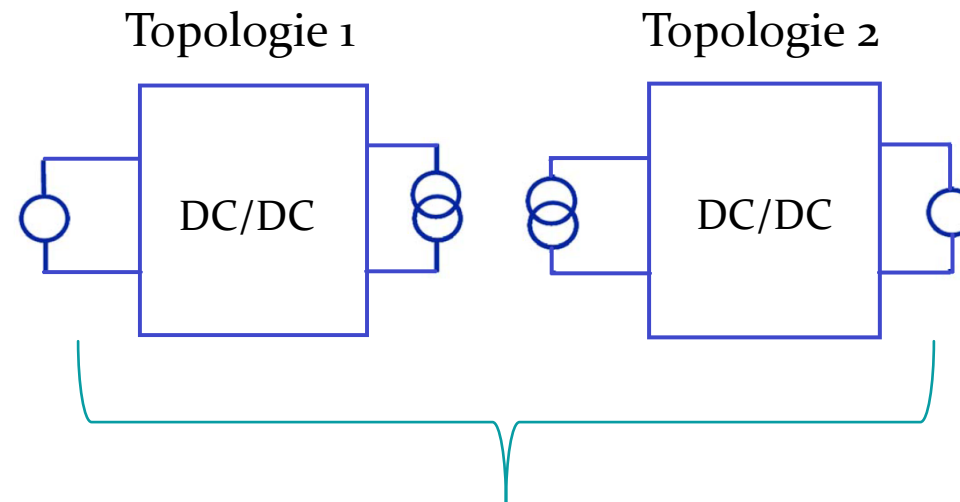
**Convertisseurs DC/DC directs**



**Convertisseurs DC/DC indirects**

# Convertisseurs DC/DC directs

Dans cette partie du cours on va étudier et concevoir les deux principales topologies des convertisseurs DC/DC directs représentées-dessous.

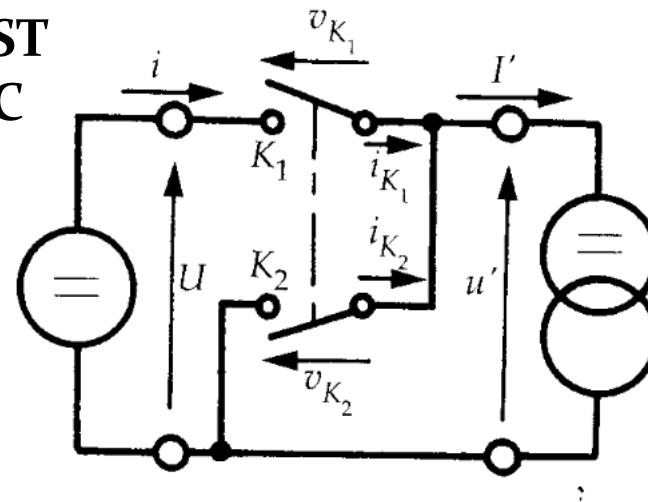


**Convertisseurs DC/DC directs**

# Convertisseurs DC/DC directs

## Topologie 1

- La source d'entrée (générateur): Source de tension  $ST$
- La source de sortie (récepteur): Source de courant  $SC$
- Les interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$  sont complémentaires
- Séquences de fonctionnement sur une période
  - Séquence 1;  $K_1$  – ON
  - Séquence 2;  $K_1$ - OFF



Dans le but de choisir le type de chaque interrupteur, il est nécessaire de déterminer les branches de caractéristiques utilisées par les interrupteurs et les commutations à réaliser.

# Convertisseurs DC/DC directs

## Topologie 1

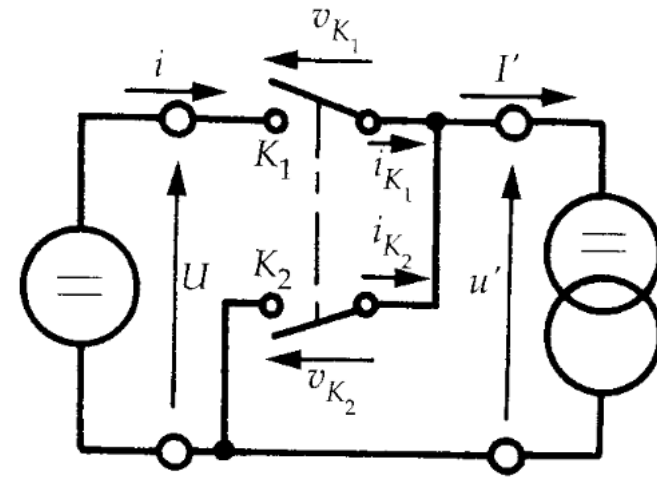
### Séquence 1: $K_1$ ON

La source de tension est directement connectée à la source de courant **Règle 4** ✓

### Séquence 2: $K_1$ OFF ( $K_2$ ON)

La source de tension en circuit-ouvert ✓

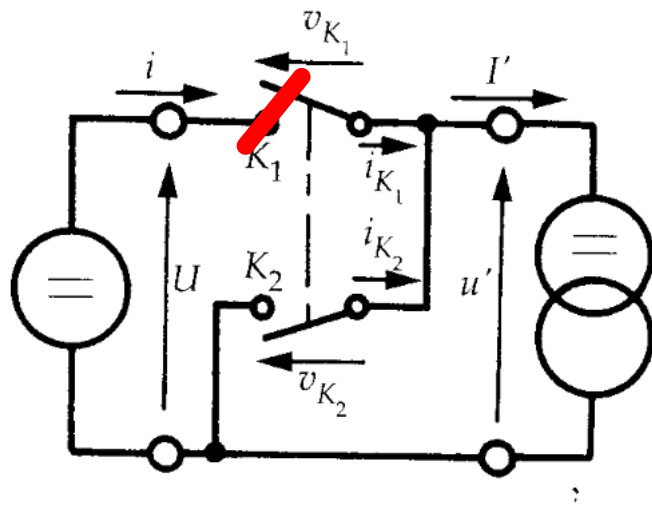
La source de courant en court-circuit ✓



# Convertisseurs DC/DC directs

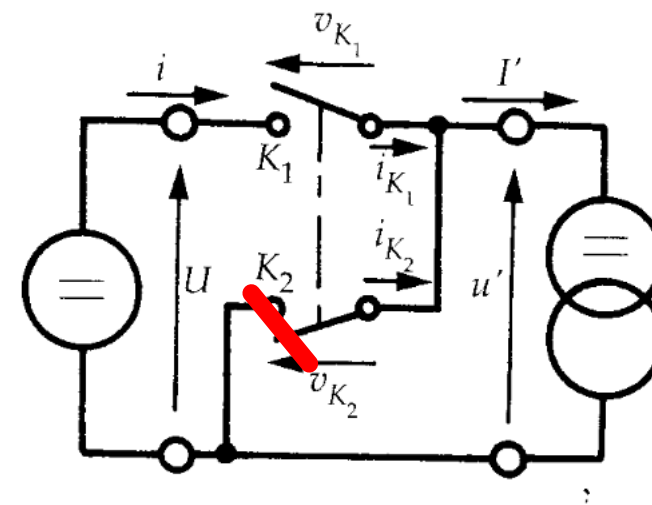
## Topologie 1

Séquence 1: K1 - ON



$$\begin{aligned} v_{k1} &= 0 & i_{k1} &= I' \\ v_{k2} &= -U & i_{k2} &= 0 \end{aligned}$$

Séquence 2: K1 - OFF

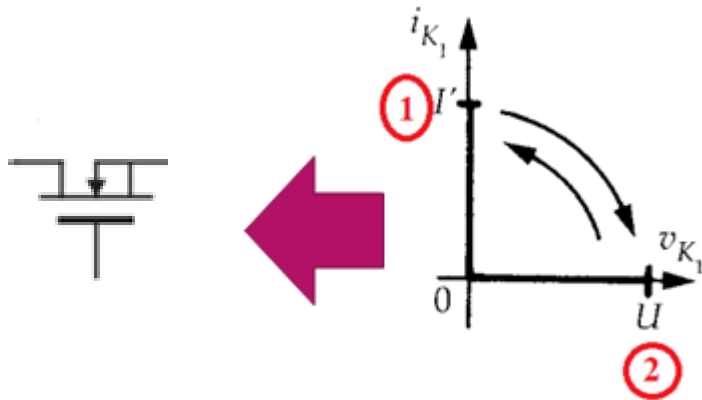


$$\begin{aligned} v_{k1} &= U & i_{k1} &= 0 \\ v_{k2} &= 0 & i_{k2} &= I' \end{aligned}$$

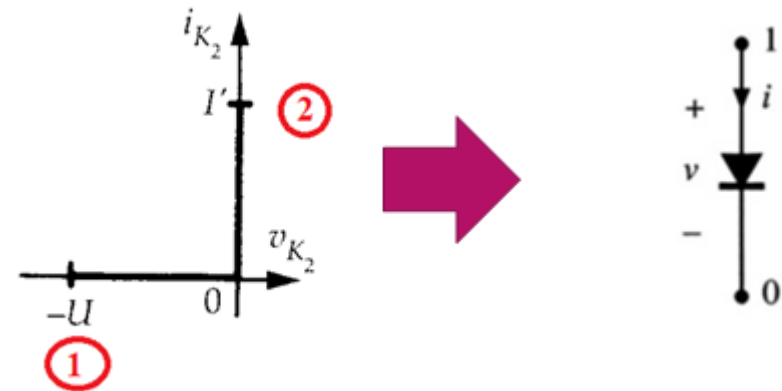
# Convertisseurs DC/DC directs

## Topologie 1

Caractéristique I-V de l'interrupteur  $K_1$



Caractéristique I-V de l'interrupteur  $K_2$



D'après les caractéristiques statiques des deux interrupteurs et les commutations à réaliser entre les deux séquences de fonctionnement, on peut conclure que:

- $K_1$  doit être un interrupteur à deux segments **CF** et **CO** (Transistor)
- $K_2$  doit être un interrupteur à deux segments non commandé (diode)



# Convertisseurs DC/DC directs

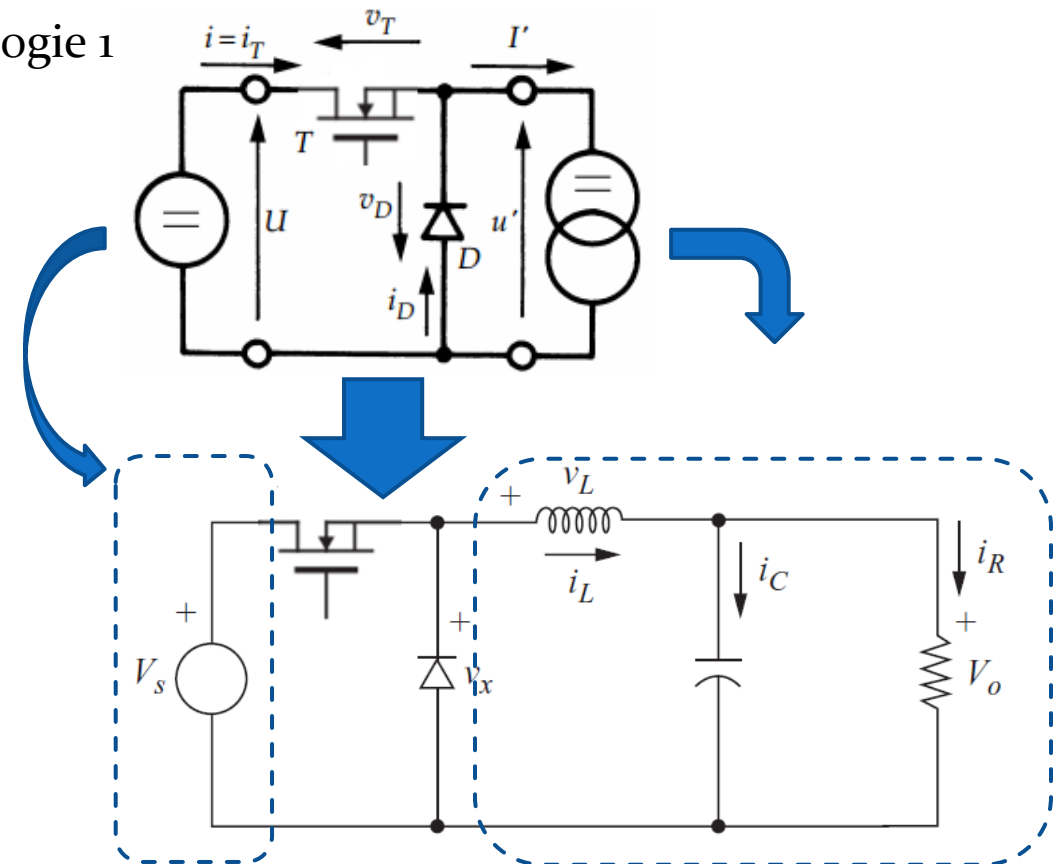
## Topologie 1

Le schéma de principe du convertisseur DC/DC direct de la topologie 1 est un hacheur série abaisseur (Buck convertor) composé de:

1. Interrupteur principale série – transistor
2. Une diode
3. Un générateur - source de tension DC
4. Un récepteur – source de courant DC

Le schéma de montage pratique est représenté ci-contre, dont la source d'entrée est une source de tension  $V_s$  et la source de sortie est source de courant composée d'une charge  $R$  et un filtre  $LC$ .

1. Le condensateur  $C$  de large capacité pour minimiser les ondulations de la tension de sortie  $V_o$
2.  $L$  c'est une inductance de lissage du courant



# Analyse du hacheur série – Buck convertor

Pour l'analyse en régime permanent des convertisseurs DC/DC il est généralement raisonnable de prendre les considérations suivantes:

1. Le courant de l'inductance est périodique

$$i_L(t + T) = i_L(t)$$

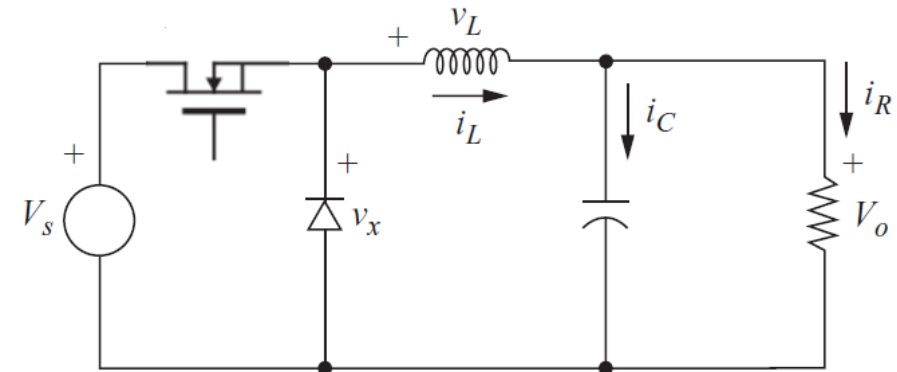
2. La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle

$$V_L = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_L(\lambda) d\lambda = 0$$

1. La valeur moyenne du courant du condensateur est nulle

$$I_C = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_C(\lambda) d\lambda = 0$$

2. Les pertes du convertisseur sont négligeables

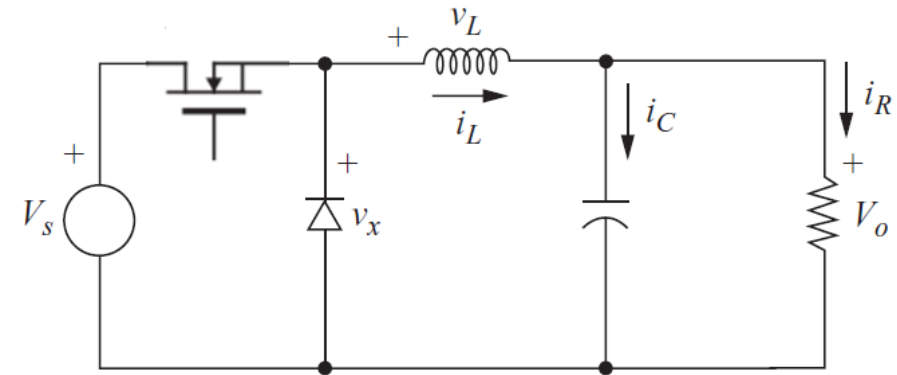


# Analyse du hacheur série – Buck convertor

## Les hypothèses d'analyse

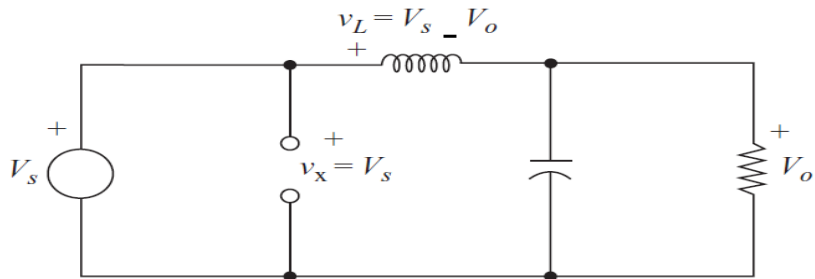
1. Régime permanent
2. Mode de conduction continue ( $i_L \geq 0$ )
3. Le condensateur est de large capacité ( les ondulations  $\Delta V_o \approx 0$  )
4. Les composants du circuit sont idéaux
5. La période de fonctionnement 'hachage' est  $T$ 
  - Le transistor est à l'état **ON** pendant  $DT$
  - Le transistor est à l'état **OFF** pendant  $(1-D)T$

$D$ : est le rapport cyclique



# Analyse du hacheur série – Buck convertor

## Séquence 1 Transistor ON $0 < t < DT$

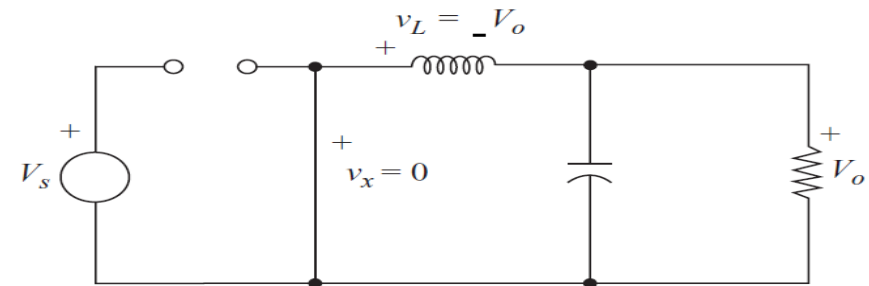


$$v_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad \text{Le courant croit linéairement}$$

$$(\Delta i_L)_{\text{closed}} = \left( \frac{V_s - V_o}{L} \right) DT$$

## Séquence 2 Transistor OFF $DT < t < T$



$$v_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad \text{Le courant décroît linéairement}$$

$$(\Delta i_L)_{\text{open}} = - \left( \frac{V_o}{L} \right) (1 - D) T$$

# Analyse du hacheur série – Buck convertor

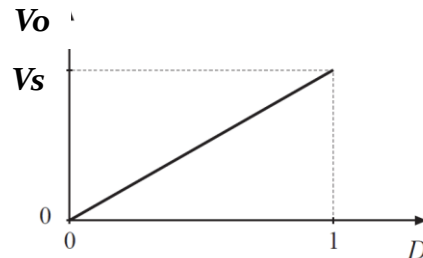
Puisqu'en régime permanent la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle:

$$V_L = (V_s - V_o)DT + (-V_o)(1 - D)T = 0$$

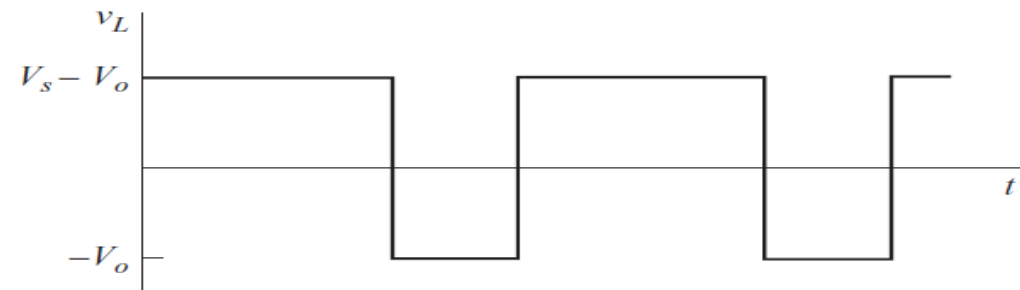
Donc on peut exprimer de la tension de sortie  $V_o$  en fonction de la tension d'entrée  $V_s$  par l'expression linéaire suivante:

$$V_o = V_s D$$

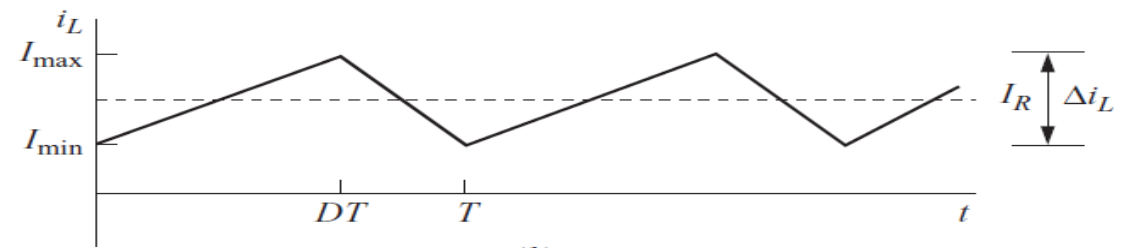
Cette expression représente la caractéristique de réglage de la tension de sortie par le rapport cyclique  $D$ .



## Chronogrammes de la tension et du courant de l'inductance



(a)



(b)

# Dimensionnement des éléments du filtre LC

Pour assurer un mode de conduction continue, la valeur l'induction  $L$  doit être supérieur à  $L_{min}$  donnée par l'expression suivante:

$$L_{min} = \frac{(1 - D)R}{2f}$$

Généralement on fait un choix tel que  $L = 1.25L_{min}$

La capacité du condensateur est déterminé par le taux d'ondulation de la tension de sortie imposé par le cahier des charges :

$$C = \frac{1 - D}{8L(\Delta V_o/V_o)f^2}$$

## Exemple:

Concevoir un hacheur série '**Buck converter**' pour alimenter une charge équivalente à  $10\Omega$  par une tension continue  $V_o = 18V$ . Le taux d'ondulation de la tension de sortie ne doit pas dépasser  $0.5\%$ . La tension de la source d'alimentation  $V_s = 48V$  et la fréquence de fonctionnement imposée est  $40kHz$ .

# Dimensionnement des éléments du filtre LC

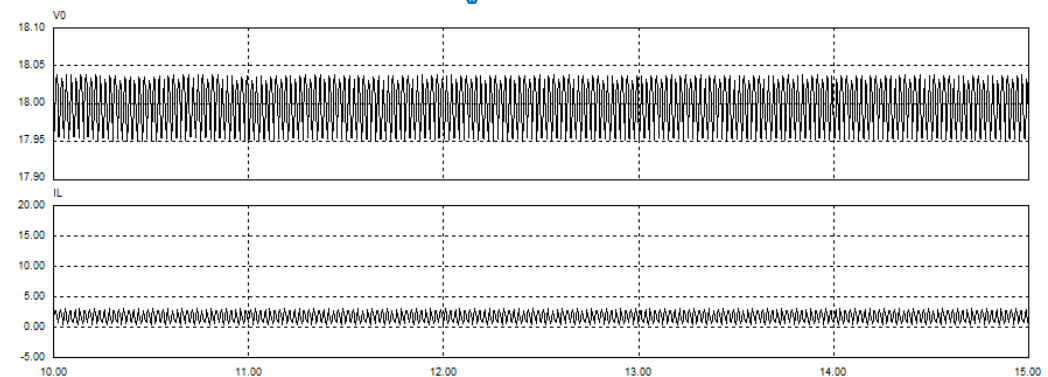
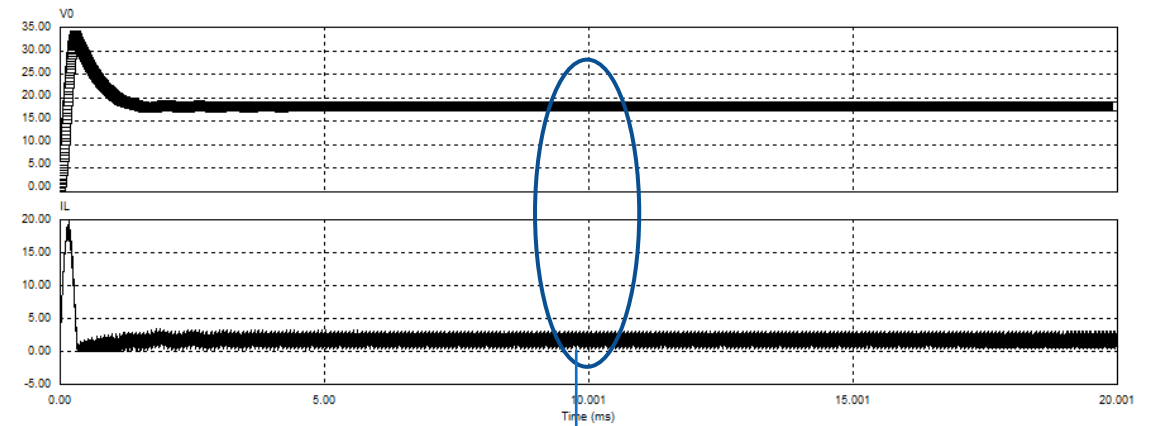
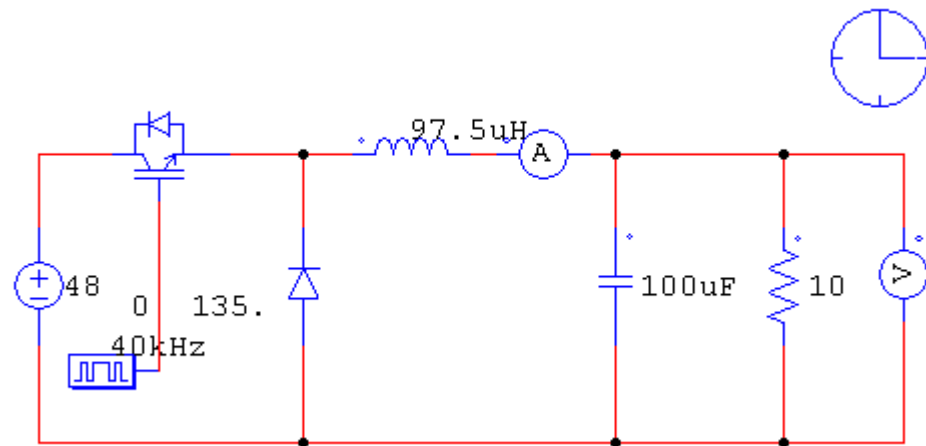
Le rapport cyclique pour un mode de conduction continue est:  $D = \frac{V_o}{V_s} = \frac{18}{48} = 0.375$

Pour une fréquence de fonctionnement 40 kHz  $L_{\min} = \frac{(1 - D)(R)}{2f} = \frac{(1 - 0.375)(10)}{2(40,000)} = 78 \mu\text{H}$

Généralement on prend une valeur de l'inductance 25% supérieur à  $L_{\min}$ :  $L = 1.25L_{\min} = (1.25)(78 \mu\text{H}) = 97.5 \mu\text{H}$

La capacité du condensateur est:  $C = \frac{1 - D}{8L(\Delta V_o/V_o)f^2} = \frac{1 - 0.375}{8(97.5)(10)^{-6}(0.005)(40,000)^2} = 100 \mu\text{F}$

# Simulation par PSIM

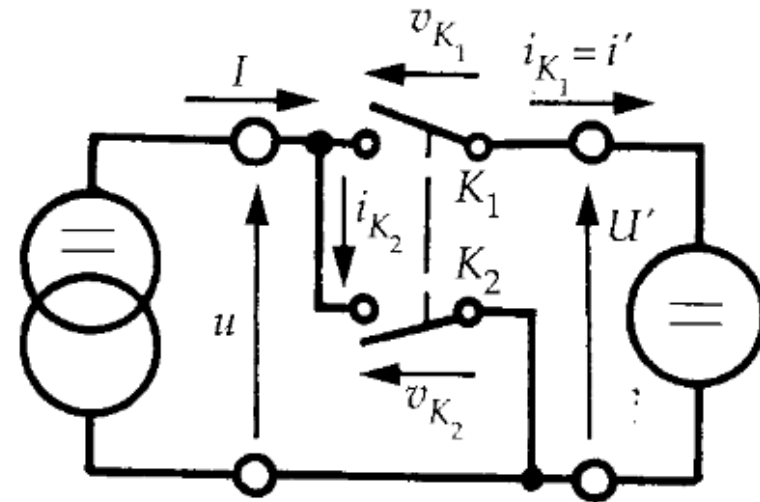




# Convertisseurs DC/DC directs

## Topologie 2

- La source d'entrée (générateur): Source de courant
- La source de sortie (récepteur): Source de tension
- Les interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$  sont complémentaires
- Séquences de fonctionnement sur une période
  - Séquence 1;  $K_1$  – ON
  - Séquence 2;  $K_1$ - OFF



Dans le but de choisir le type de chaque interrupteur, il est nécessaire de déterminer les branches de caractéristiques utilisées par les interrupteurs et les commutations à réaliser.

# Convertisseurs DC/DC directs

## Topologie 2

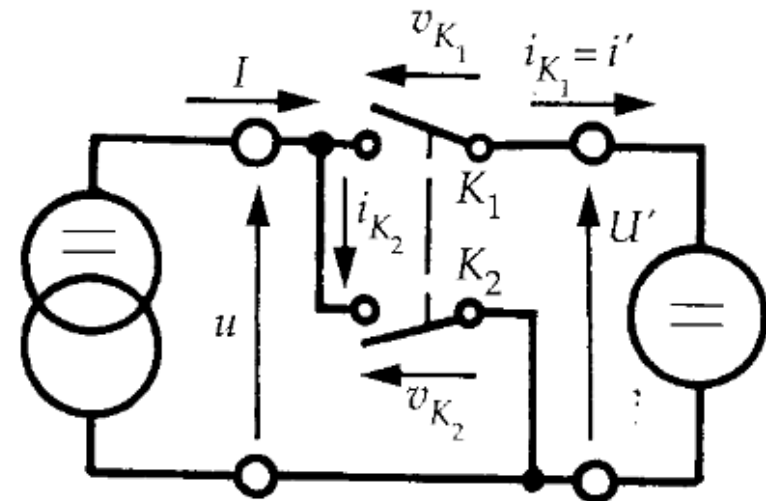
### Séquence 1: K<sub>1</sub> ON

La source de courant est directement connectée à la source de tension Règle 4 ✓

### Séquence 2: K<sub>1</sub> OFF (K<sub>2</sub> ON)

La source de tension en circuit-ouvert ✓

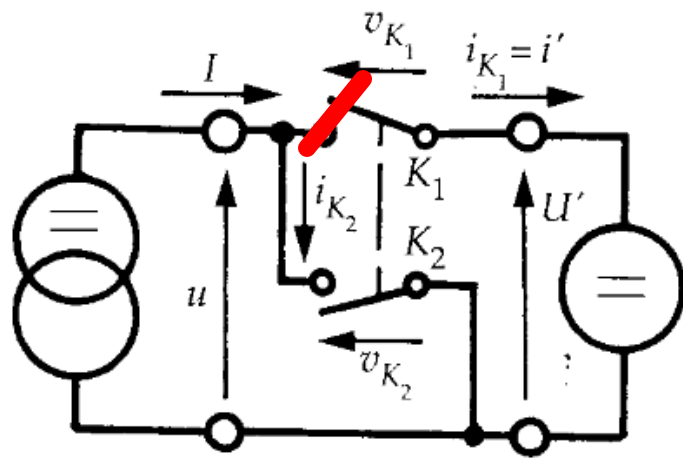
La source de courant en court-circuit ✓



# Convertisseurs DC/DC directs

## Topologie 2

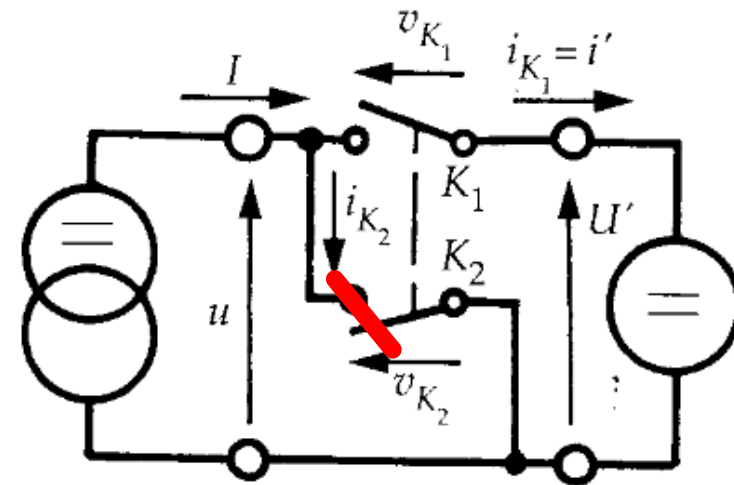
Séquence 1: K1 - ON



$$v_{k1} = 0 \quad i_{k1} = I,$$

$$v_{k2} = +U' \quad i_{k2} = 0$$

Séquence 2: K1 - OFF



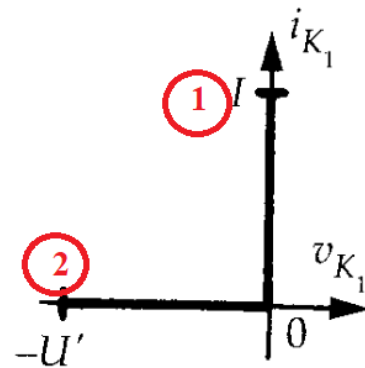
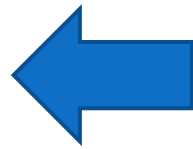
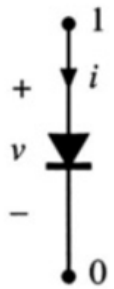
$$v_{k1} = -U' \quad i_{k1} = 0,$$

$$v_{k2} = 0 \quad i_{k2} = I$$

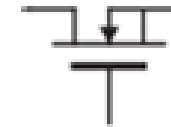
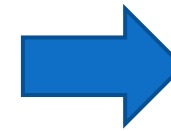
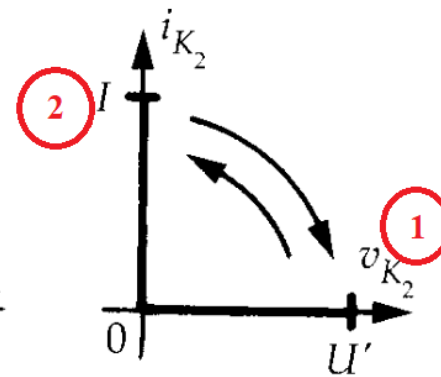
# Convertisseurs DC/DC directs

## Topologie 2

Caractéristique I-V de l'interrupteur  $K_1$



Caractéristique I-V de l'interrupteur  $K_2$



D'après les caractéristiques statiques des deux interrupteurs et les commutations à réaliser entre les deux séquences de fonctionnement, on peut conclure que:

- $K_1$  doit être un interrupteur à deux segments non commandé (diode)
- $K_2$  doit être un interrupteur à deux segments **CF** et **CO** (Transistor)

# Convertisseurs DC/DC directs

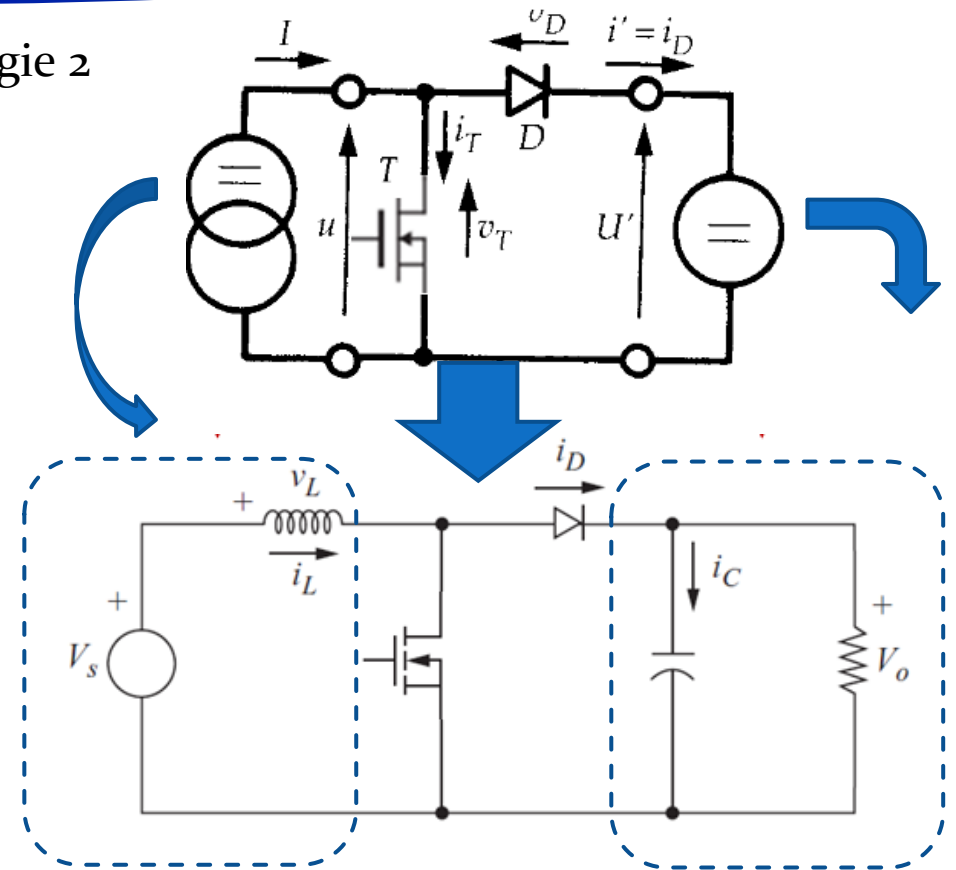
## Topologie 2

Le schéma de principe du convertisseur DC/DC direct de la topologie 2 est un hacheur parallèle élévateur (Boost convertor) composé de:

1. Interrupteur principale par allèle – transistor
2. Une diode
3. Un générateur - source de courant DC
4. Un récepteur – source de tension DC

Le schéma de montage pratique est représenté ci-contre, dont la source d'entrée est une source de courant  $I$  et la source de sortie est source de tension avec une charge  $R$ .

1. Le condensateur  $C$  de large capacité pour minimiser les ondulations de la tension de sortie  $V_o$
2.  $L$  c'est une inductance de lissage du courant

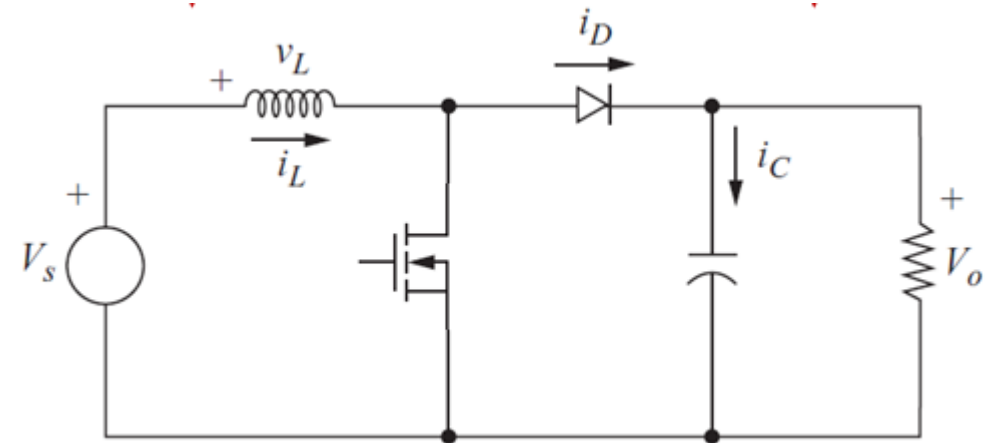


# Analyse de l'hacheur parallèle – Boost convertor

Les hypothèses d'analyse

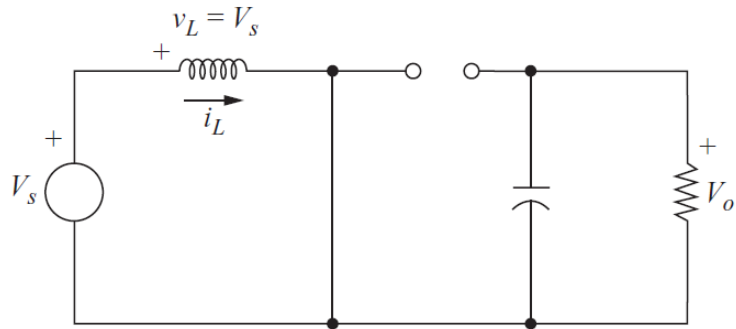
1. Régime permanent
2. Mode de conduction continue ( $i_L \geq 0$ )
3. Le condensateur est de large capacité ( les ondulations  $\Delta V_o \approx 0$  )
4. Les composants du circuit sont idéaux
5. La période de fonctionnement 'hachage' est  $T$ 
  - Le transistor est à l'état **ON** pendant  $DT$
  - Le transistor est à l'état **OFF** pendant  $(1-D)T$

$D$ : est le rapport cyclique



# Analyse de l'hacheur parallèle – Boost convertor

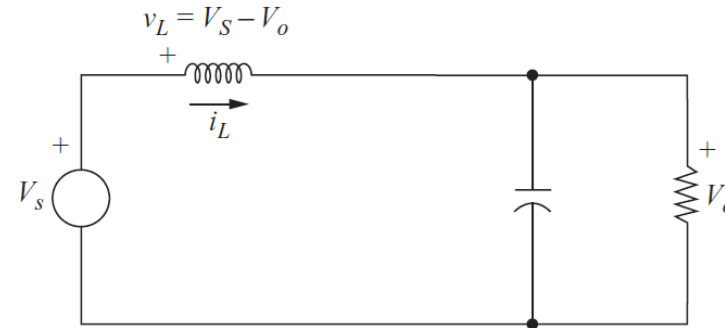
Séquence 1 Transistor ON  $0 < t < DT$



$$v_L = V_s = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} > 0 \quad \text{Le courant } \mathbf{iL} \text{ croit linéairement}$$

Séquence 2 Transistor OFF  $DT < t < T$



$$v_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} < 0 \quad \text{Le courant } \mathbf{iL} \text{ décroît linéairement}$$

# Analyse de l'hacheur parallèle – Boost convertor

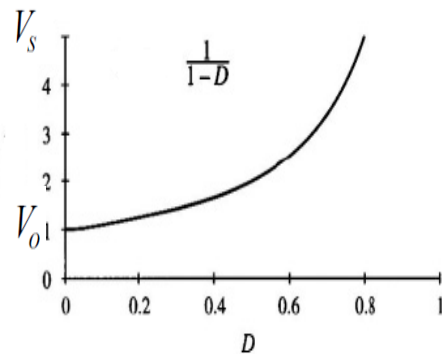
Puisqu'en régime permanent la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle:

$$V_L = V_s D T + (V_s - V_o)(1 - D)T = 0$$

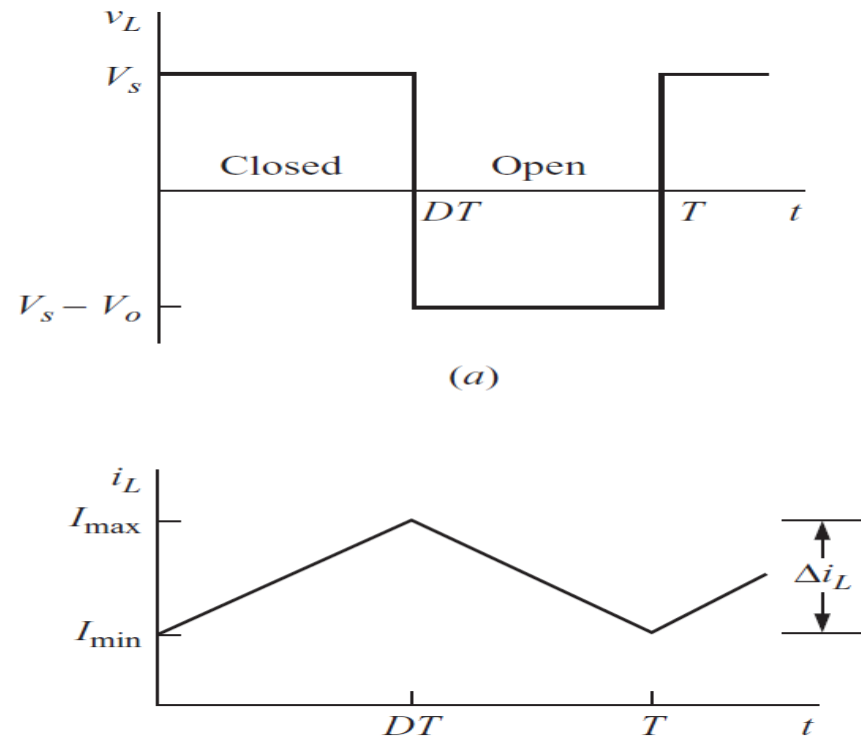
Donc on peut exprimer de la tension de sortie  $V_o$  on fonction de la tension d'entrée  $V_s$  par l'expression suivante:

$$V_o = \frac{V_s}{1 - D}$$

Cette expression représente la caractéristique de réglage de la tension de sortie par le rapport cyclique  $D$ .



## Chronogrammes de la tension et du courant de l'inductance





# Dimensionnement des éléments L et C

La conception d'un hacheur parallèle pour un mode de conduction continue, nécessite une valeur de l'induction  $L$  supérieur à  $L_{min}$  donnée par l'expression suivante:

$$L_{min} = \frac{D(1 - D)^2 R}{2f}$$

Généralement on fait un choix tel que  $L = 1.25L_{min}$

La capacité du condensateur est déterminé par le taux d'ondulation de la tension de sortie imposé par le cahier des charges :

$$C \geq \frac{D}{R(\Delta V_o/V_o)f} :$$

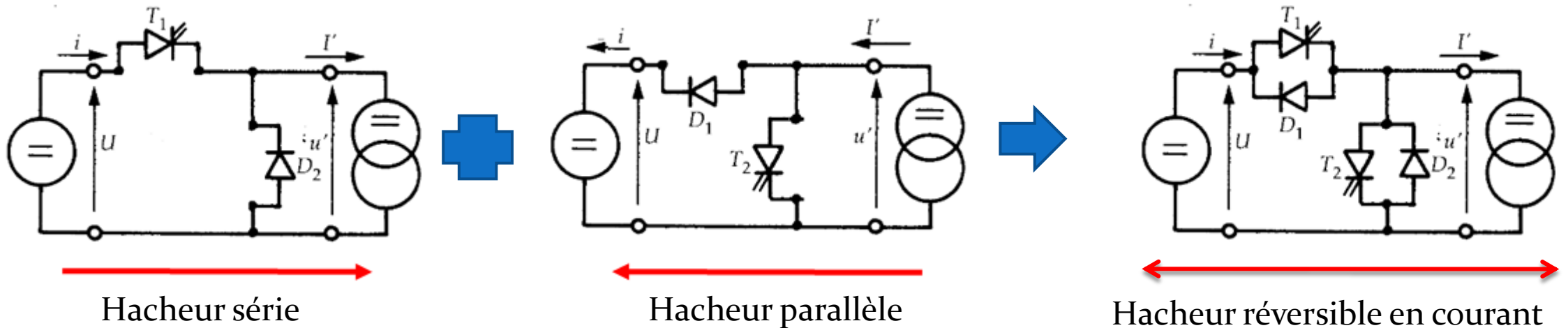
# Autres structures des convertisseurs directs

## Hacheur réversible en courant

Avec un schéma à deux interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$  on peut commander le transfert de l'énergie dans les deux sens entre :

- une source de tension et
- une source de courant

à condition que les deux sources soient réversibles en courant



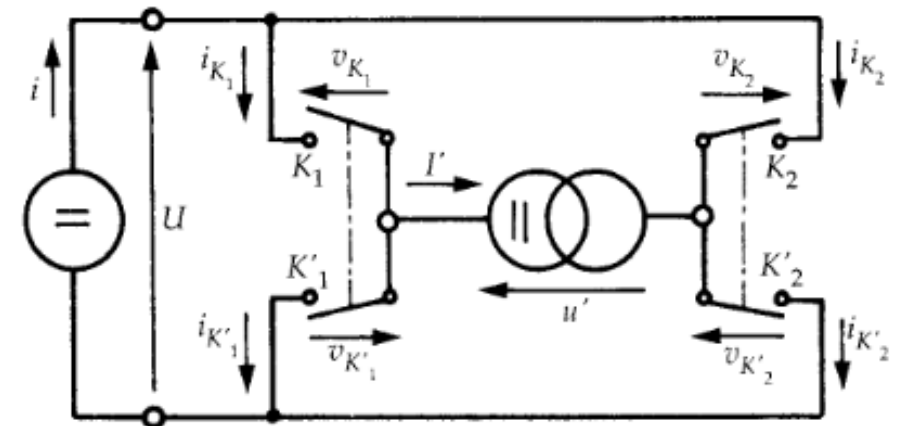
# Autres structures des convertisseurs directs

## Hacheur en pont

La structure à quatre interrupteurs **CF**, **CO** et réversibles en courant offre plus de possibilités que celle à deux interrupteurs car elle permet de relier chacune des bornes de sortie à chacune des bornes d'entrée ou de les séparer. La structure en pont, la plus utilisée correspond au hacheur reliant :

1. une source de tension réversible en courant: et
2. une source de courant réversible en courant et en tension

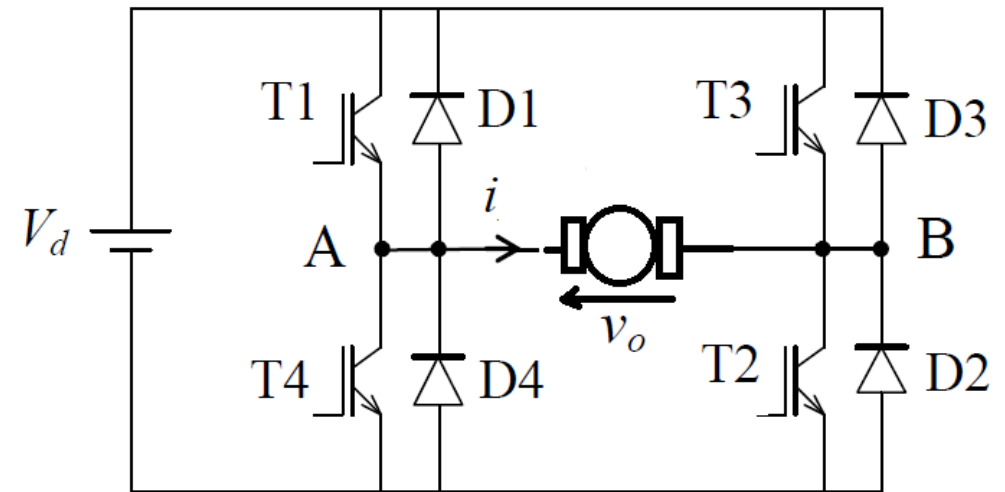
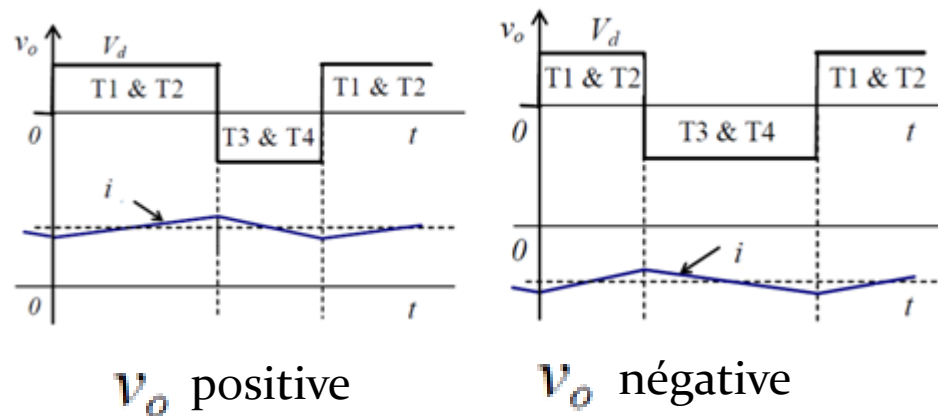
➤ Cette structure est généralement utilisé dans la commande des moteurs DC



# Autres structures des convertisseurs directs

## I. Technique de commande bipolaire

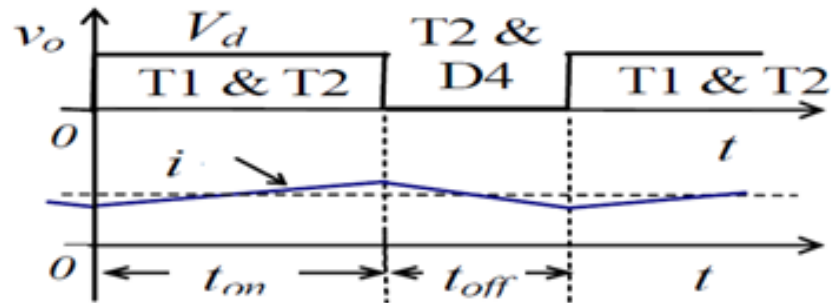
Dans cette technique deux interrupteurs diagonaux sont commandés ensemble.



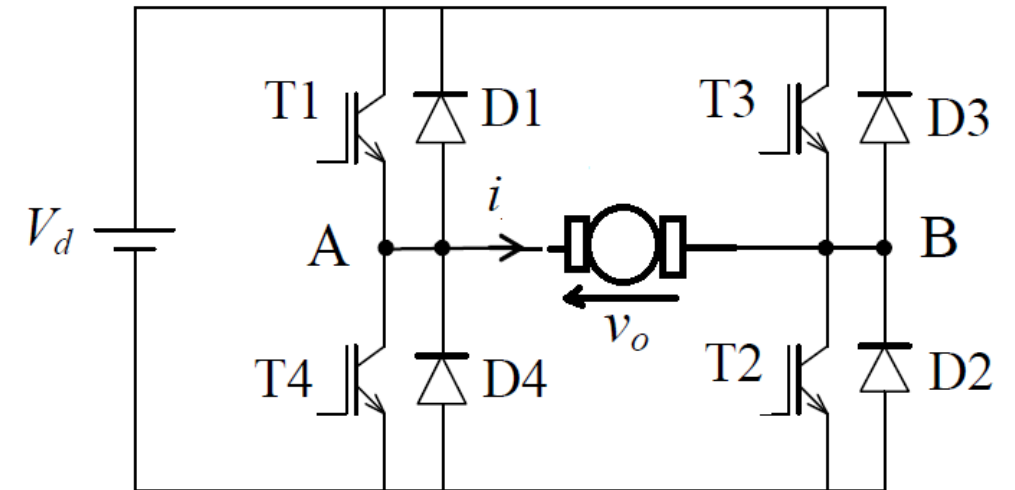
# Autres structures des convertisseurs directs

## II. Technique de commande unipolaire

Un seul interrupteur est commandé pour une polarité donnée de la tension de sortie, pendant *toff* le courant passe par l'autre interrupteur et la diode de roue libre.



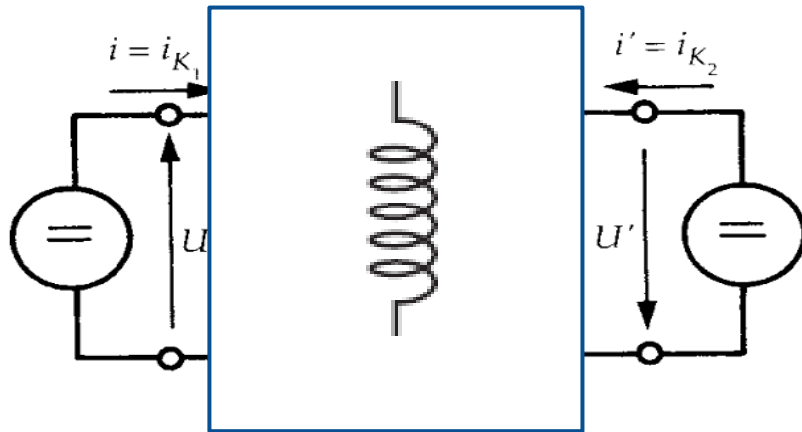
Exemple pour  $i$  positif



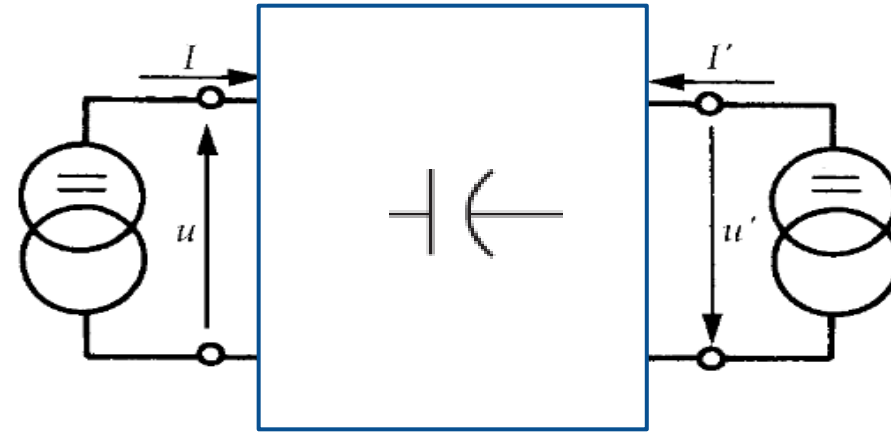
# Convertisseurs DC/DC indirects

Le principe de fonctionnement de ces convertisseurs est basé sur le stockage d'énergie électrique dans un élément de stockage (L ou C) pendant un premier cycle et puis la transmettre pendant le deuxième cycle. Ils existent deux topologies principales des convertisseurs indirects:

- Convertisseurs DC/DC à liaison inductive: sources **ST-ST**
- Convertisseurs DC/DC à liaison capacitive: sources **SC-SC**



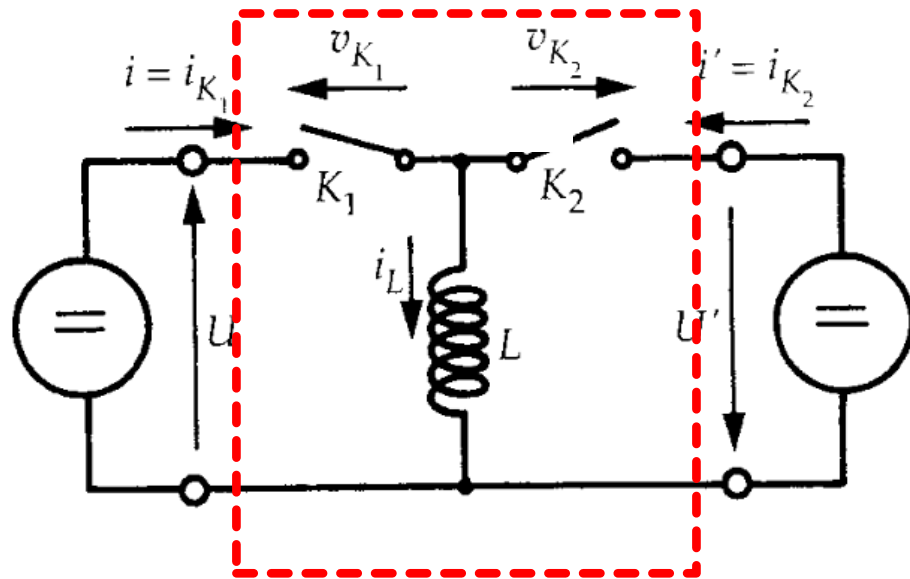
Topologie 1



Topologie 2:

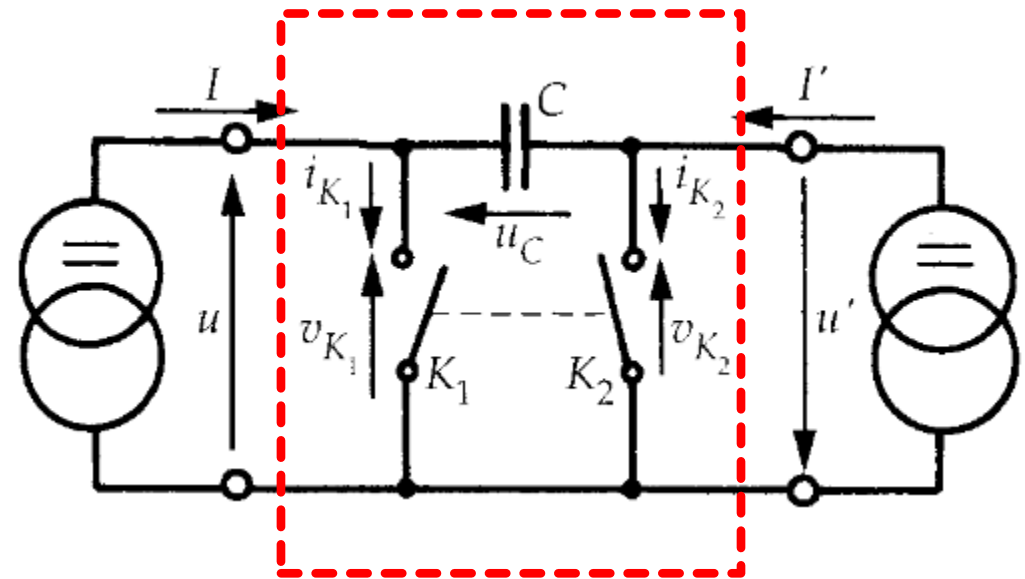
# Convertisseurs DC/DC indirects

Stockage inductif



Topologie 1

Stockage capacitif



Topologie 2:

# Convertisseurs DC/DC indirects

## Hacheur à stockage inductif

Lorsque le hacheur est monté entre un générateur de tension et un récepteur de tension, l'élément de stockage doit être une inductance. Celle-ci joue le rôle d'une source de courant reliée à l'entrée (phase de charge) ou à la sortie (phase de décharge). Les deux interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$  sont complémentaires.

### Séquence 1: phase charge $K_1$ -ON-

La Source d'entrée **ST** connectée à une **SC** (inductance)

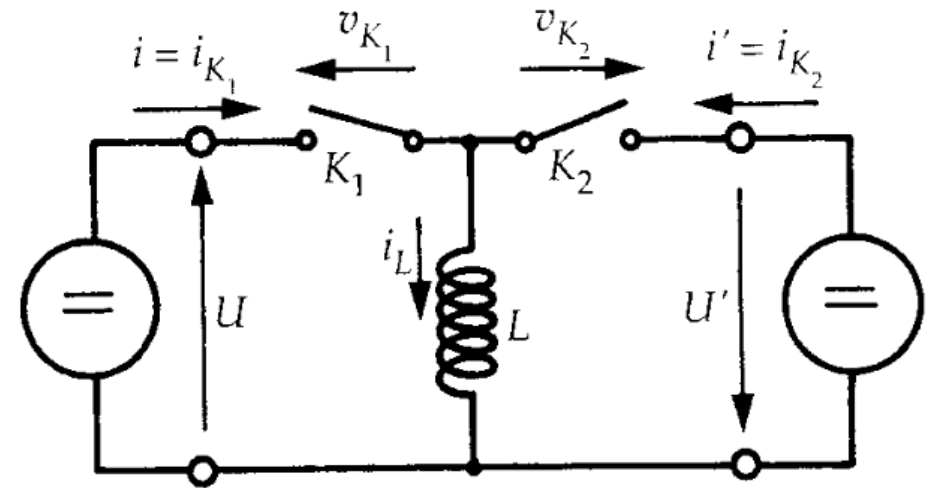
La source de sortie **ST** en circuit ouvert

### Séquence 2: phase décharge $K_1$ -OFF-

La Source d'entrée **ST** en circuit ouvert

La source de sortie **ST** connectée à une **SC** (inductance)

Hacheur à stockage inductif

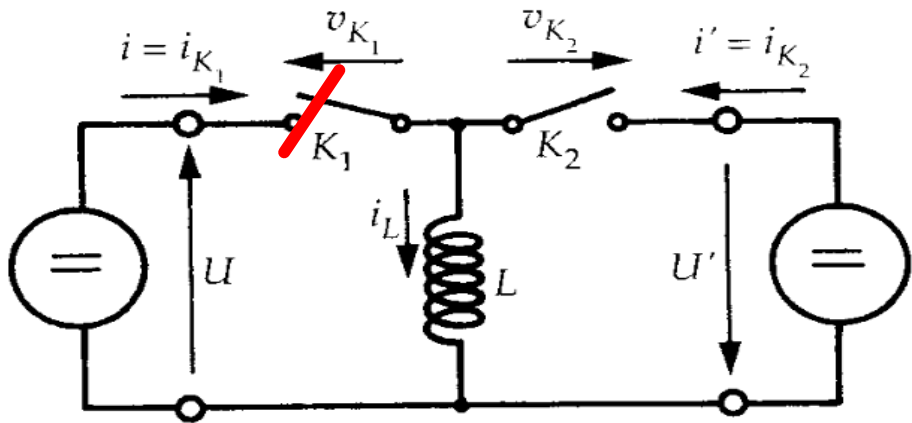




# Convertisseurs DC/DC indirects

## Sélection des interrupteur $K_1$ et $K_2$

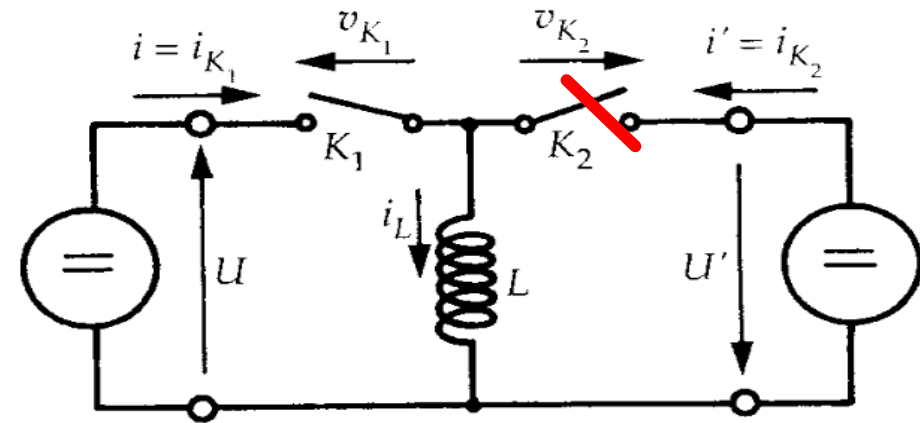
Séquence 1  $K_1$  -ON-



$$v_{k1} = 0 \quad i_{k1} = i_L$$

$$v_{k2} = -(U + U') \quad i_{k2} = 0$$

Séquence 2  $K_1$  -OFF-

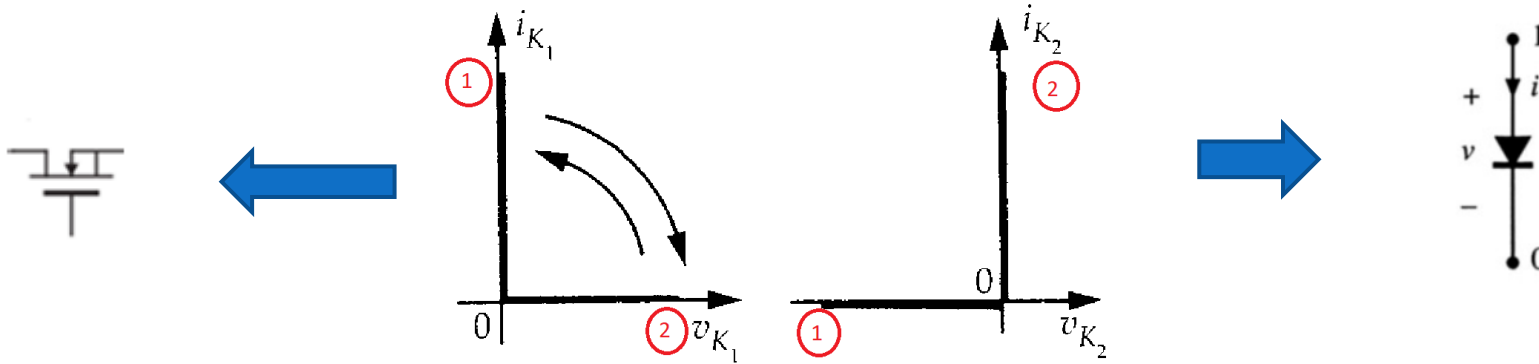


$$v_{k1} = (U + U') \quad i_{k1} = 0$$

$$v_{k2} = 0 \quad i_{k2} = i_L$$

# Convertisseurs DC/DC indirects

## Sélection des interrupteur $K_1$ et $K_2$

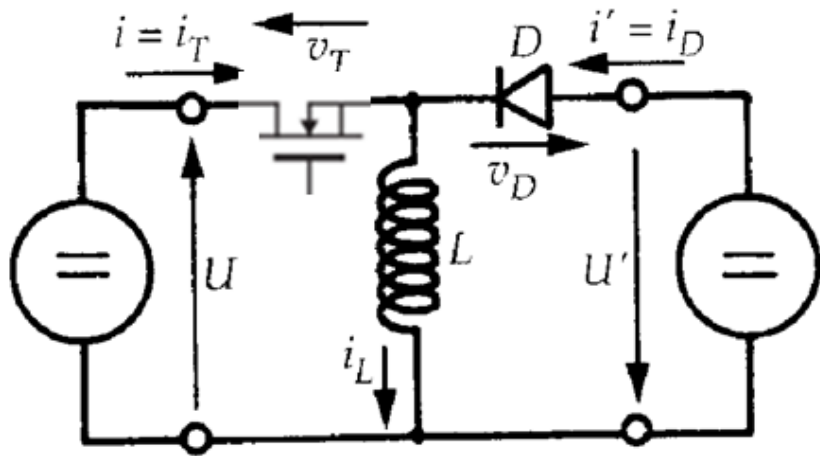


Interrupteur à 2 segment CF et CO

Diode

# Convertisseurs DC/DC indirects

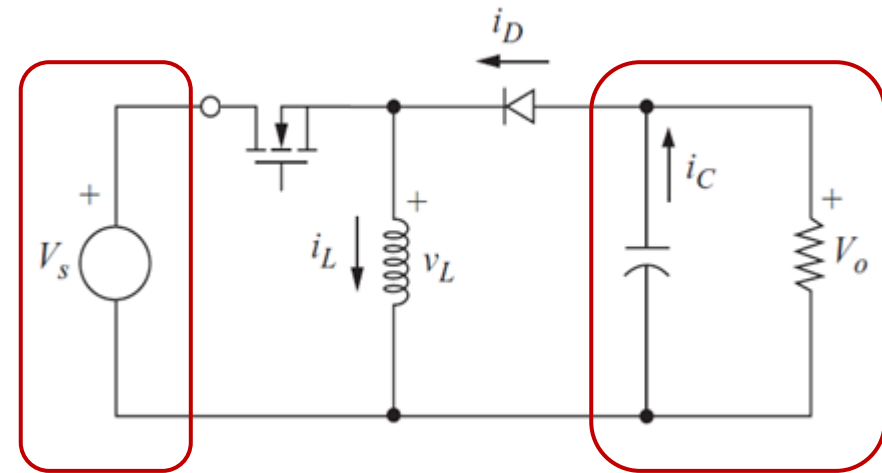
## Schéma de montage



### Remarque:

Le hacheur à stockage inductif et un inverseur car la tension de sortie  $V_o$  est inversée par rapport à  $V_s$

## Schéma de montage pratique



ST

ST

# Convertisseurs DC/DC indirects

## Hacheur à stockage capacitif

Lorsque le hacheur est monté entre un générateur de courant et un récepteur de courant, l'élément de stockage doit être un condensateur. Celui-ci joue le rôle d'une source de tension relié à l'entrée (phase de charge) ou à la sortie (phase de décharge). Les deux interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$  sont complémentaires.

### Séquence 1: phase décharge $K_1$ –ON-

La Source d'entrée **SC** court-circuitée par  $K_1$

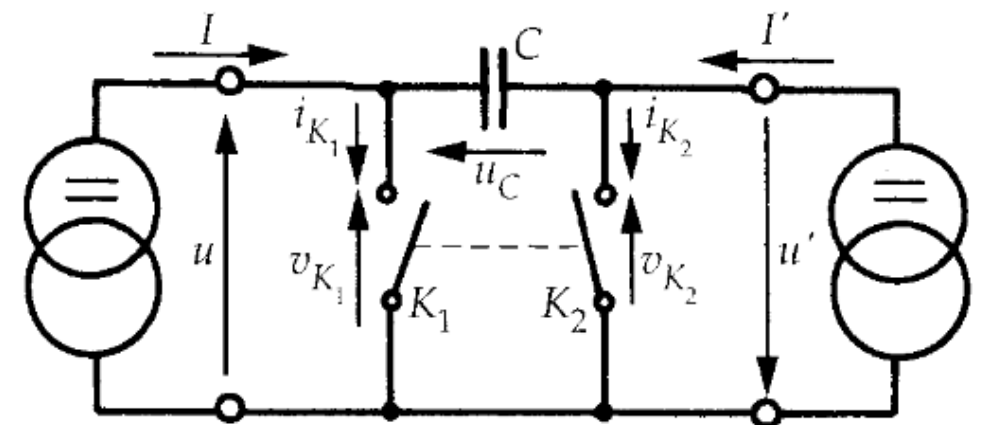
Le condensateur se décharge à travers source de sortie **SC**

### Séquence 2: phase charge $K_1$ –OFF-

La Source d'entrée **SC** charge le condensateur à travers  $K_1$

La source de sortie **SC** court-circuitée par  $K_2$

Hacheur à stockage capacitif

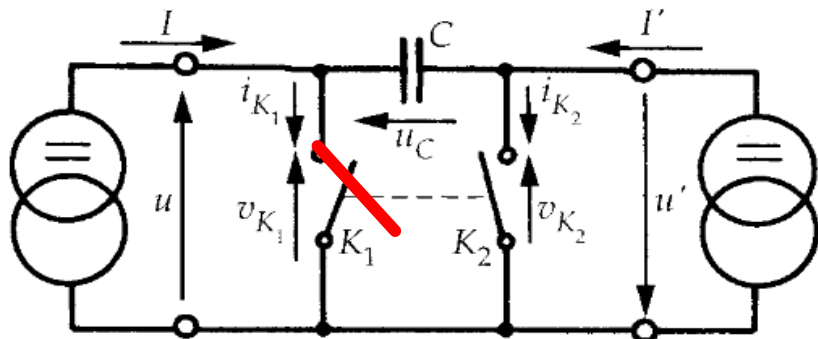


# Convertisseurs DC/DC indirects

## Hacheur à stockage capacitif

### Sélection des interrupteur K1 et K2

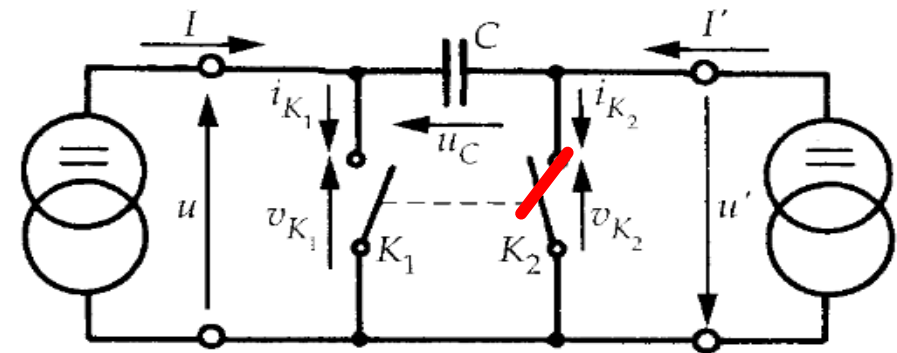
Séquence 1 K1 - ON



$$v_{K1} = 0, \quad i_{K1} = I + I'$$

$$v_{K2} = -U_C, \quad i_{K2} = 0$$

Séquence 2 K1 - OFF



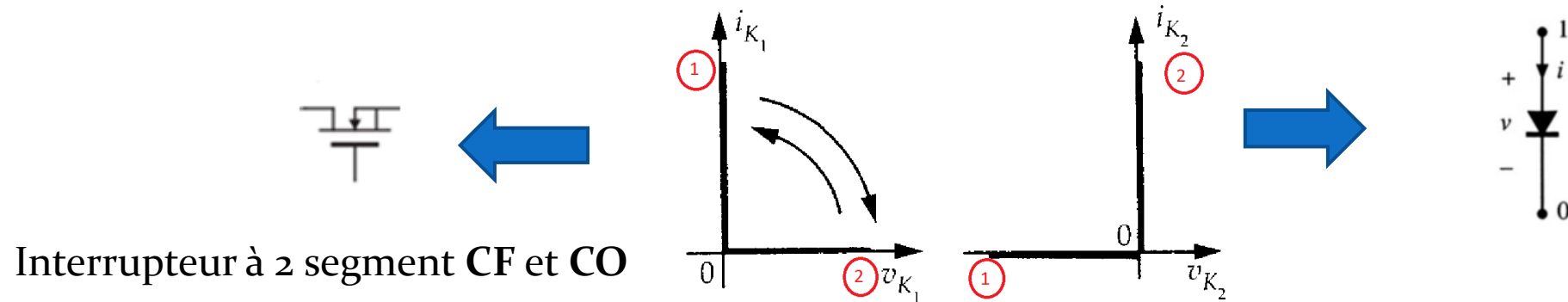
$$v_{K1} = U_C, \quad i_{K1} = 0$$

$$v_{K2} = 0, \quad i_{K2} = I' + I$$

# Convertisseurs DC/DC indirects

## Hacheur à stockage capacitif

### Sélection des interrupteur $K_1$ et $K_2$



# Convertisseurs DC/DC indirects

## Hacheur à stockage capacitif

Schéma de montage

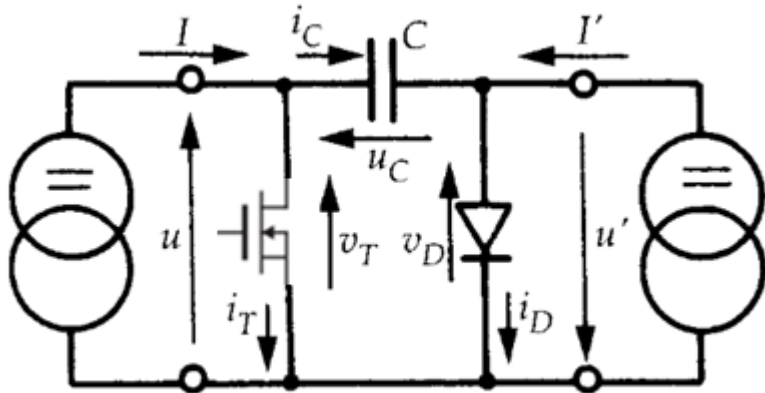
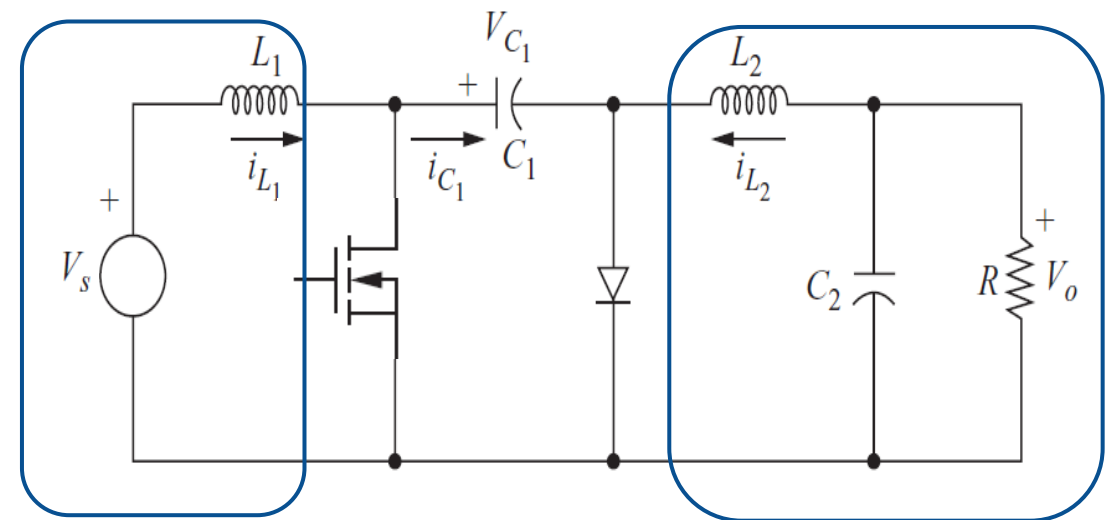


Schéma de montage pratique



**Remarque:**

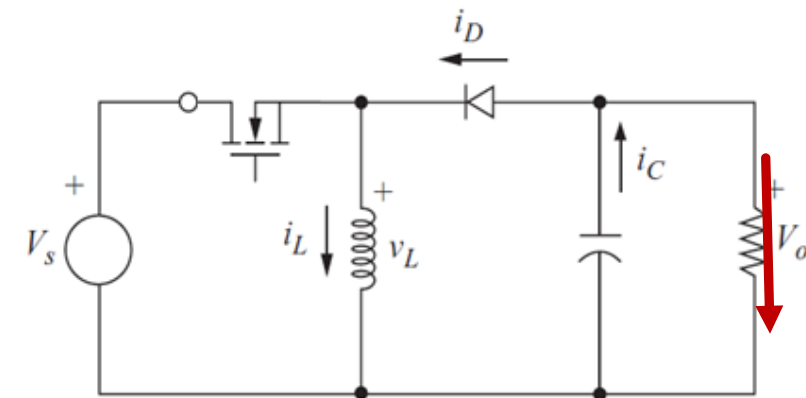
Le hacheur à stockage capacitif est un inverseur car la tension de sortie  $V_o$  est inversée par rapport à  $V_s$

# Convertisseurs DC/DC indirects

## Exercice 1

Soit le montage d'un hacheur à stockage inductif présenté ci-contre  
On note  $T$  la période du hachage et  $D$  est le rapport cyclique.  
Le transistor MOSFET est commandé à la fermeture (ON)  
pendant l'intervalle de temps  $DT$  et commandé à l'ouverture  
pendant l'intervalle de temps  $(1-D)T$ . On suppose un mode de conduction  
continue en régime permanent.

1. Pour chaque séquence de fonctionnement
  - a. Donner l'expression de la tension  $v_L$
  - b. Déduire la forme du courant  $i_L$
  - c. Tracer les chronogrammes de  $v_L$  et  $i_L$
2. Déterminer et tracer caractéristique de réglage  $V_o = F(D)$



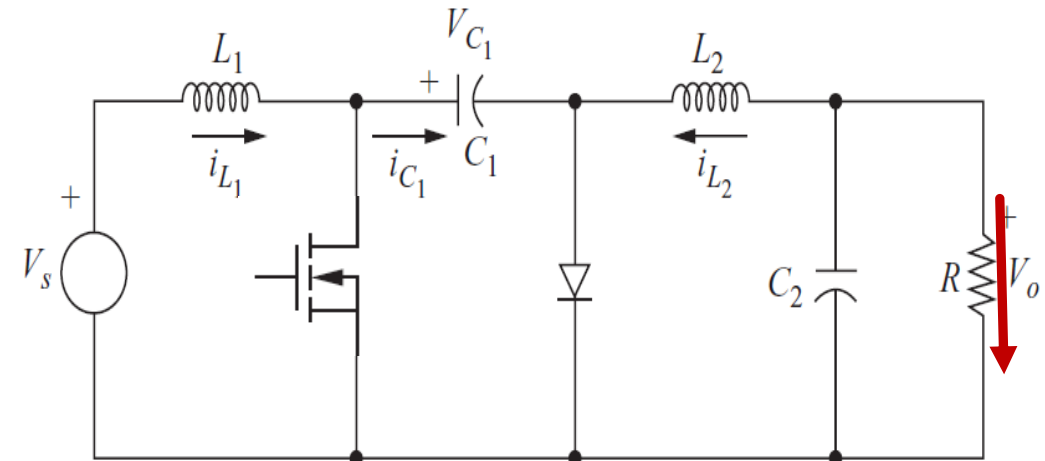


# Convertisseurs DC/DC indirects

## Exercice 2

Soit le montage d'un hacheur à stockage capacitif présenté ci-contre  
On note  $T$  la période du hachage et  $D$  est le rapport cyclique.  
Le transistor MOSFET est commandé à la fermeture (ON)  
pendant l'intervalle de temps  $DT$  et commandé à l'ouverture  
pendant l'intervalle de temps  $(1-D)T$ . On suppose un mode de  
conduction continue en régime permanent.

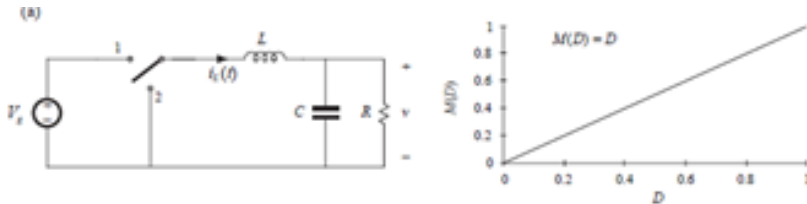
1. Pour chaque séquence de fonctionnement
  - a. Donner l'expression de la tension  $V_{C1}$
  - b. Déduire la forme du courant  $i_{C1}$
  - c. Tracer les chronogrammes de  $i_{C1}$  et  $V_{C1}$
2. Déterminer et tracer caractéristique de réglage  $V_o = F(D)$



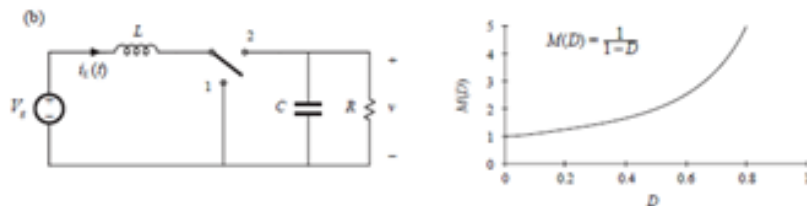
# Résumé

## Hacheurs directs

Buck



Boost



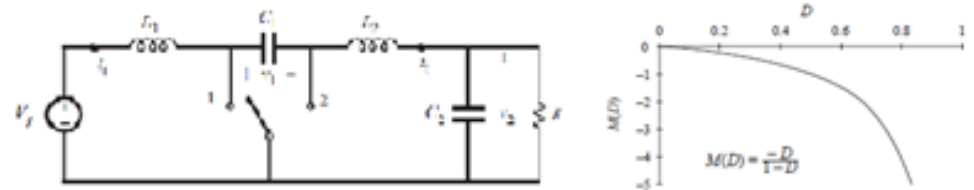
- Hacheur série (Buck) est un abaisseur
- Hacheur parallèle (Boost) est élévateur

## Hacheurs indirects

Buck-boost



Cuk



- Hacheur à stockage inductif (Buck-boost) est un abaisseur et élévateur
- Hacheur à stockage capacitif (cuk) est abaisseur et élévateur
- Ces deux hacheurs sont inverseurs de tension