

CONVERTISSEURS

DC/DC : HACHEURS

1 -à quoi ça sert ?.....	2
2 -Comment ça marche ?.....	3
3 -Ce qu'il faut retenir.....	4
4 -Pilotage d'une Mcc par hacheur.....	5
4.1 -Quadrants de fonctionnements.....	5
4.2 -Contrôle de la Mcc.....	5
5 -Hacheur 1 quadrant.....	6
5.1 -Structure hacheur série.....	6
5.2 -Fonctionnement normal.....	6
5.3 -Conduction discontinue.....	7
6 -Hacheur 2QI.....	8
6.1 -Structure.....	8
6.2 -Formes d'onde et relations E/S.....	8
7 -Hacheur 4Q.....	10
7.1 -Structure.....	10
7.2 -Formes d'onde et relations E/S.....	10

1 - À QUOI ÇA SERT ?

Un hacheur est un convertisseur DC/DC : à partir d'une source de tension continue de valeur fixe, il permet d'obtenir une tension continue réglable.

Comme les redresseurs commandés un hacheur peut alimenter :

- les inducteurs d'une Mcc ou d'une MS (charge R+L, contrôle du courant)
- l'induit d'une Mcc (charge R+L+E, contrôles du courant et de la vitesse).

L'avantage d'un hacheur par rapport au redresseur commandé est que sa commande est plus rapide : la fréquence de hachage est supérieure à 1kHz alors que la commande d'un redresseur est à 50Hz.

En augmentant la fréquence de commande, on va mieux lisser le courant dans la charge. Si l'ondulation du courant est plus faible,

- on va diminuer les pertes Joule de la machine (qui dépendent de I efficace),
- on va limiter les oscillations mécaniques (le moteur n'aura pas le temps de réagir à une oscillation de 1kHz),
- on va limiter le phénomène de conduction discontinue, qui entraîne une perte de contrôle de la machine.

La limitation du hacheur vient du rapport entre la puissance et la fréquence de hachage supportées par les interrupteurs commandés :

- les transistors sont rapides mais moins puissants que les thyristors,
- les thyristors GTO sont puissants mais pas rapides ($f < 1\text{kHz}$).

Les hacheurs ont surtout été utilisés en robotique (« servomoteurs » moteurs cc de petite puissance, mouvements très rapides et précis).

L'autre utilisation des hacheurs est dans les alimentations à découpage (alimentations DC - charge R//C).

Une alimentation à découpage par rapport à une alimentation linéaire a :

- un meilleur rendement ($>90\%$ au lieu $<60\%$ - elles chauffent moins)
- un poids et un encombrement réduits (le transformateur de l'alimentation fonctionnant à une fréquence $>10\text{kHz}$, sa dimension est d'autant réduite par

rapport à un transformateur 50Hz).

Les alimentations à découpage sont de type :

- non isolée (avec bobine de lissage) type abaisseur de tension (« buck ») ou élévateur de tension (« boost »)
- isolée (avec transformateur de lissage) type « fly-back »

2 - COMMENT ÇA MARCHE ?

Un hacheur comporte obligatoirement 3 composants :

1. un transistor (interrupteur commandé à l'ouverture et à la fermeture),
2. une bobine (ou un transformateur HF),
3. une diode de roue libre.

1. Le transistor est commandé à une fréquence de hachage f et avec un rapport cyclique α (rapport entre le temps où il conduit et la période de hachage).

Le transistor permet de « hacher » la tension continue d'entrée.

2. L'énergie échangée entre la source et la charge est stockée transitoirement sous forme d'énergie magnétique par la bobine.

Lorsque l'interrupteur est fermé, la bobine stocke de l'énergie : son courant augmente.

Lorsque l'interrupteur s'ouvre, la bobine libère l'énergie accumulée vers la charge : son courant diminue.

Le courant circulant dans la bobine est donc périodique.

3. Pour que cette énergie soit évacuée de la bobine alors que l'interrupteur commandé est ouvert, il faut qu'il y ait au moins une diode de roue libre.

3 - CE QU'IL FAUT RETENIR.

La tension de sortie est de forme rectangulaire.

Sa valeur moyenne dépend du rapport cyclique α et est donc réglable.

Dans le cas d'une charge R+L+E, on a la relation suivante en instantanée :

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di}{dt} + E, \text{ mis sous forme canonique : } \frac{L}{R} \frac{di}{dt} + i(t) = \frac{u(t) - E}{R}$$

Le courant circulant dans la bobine (L+R) se comporte comme un LP1 de constante de temps $\tau_E = L/R$.

Conséquence : Si la fréquence de hachage est telle que $\tau_E > T$, le courant dans la bobine est triangulaire (il n'a pas le temps de s'établir).

L'ondulation du courant dans la bobine $\Delta I = I_{Max} - I_{min}$ vérifie la relation :

$$\Delta I = \alpha \times (1 - \alpha) \times \frac{\Delta U}{L f} \quad \text{où } \Delta U \text{ est la variation de la tension alimentant la branche contenant la}$$

bobine.

L'ondulation du courant est maximale pour $\alpha = 0,5$.

On pourra diminuer l'ondulation en augmentant :

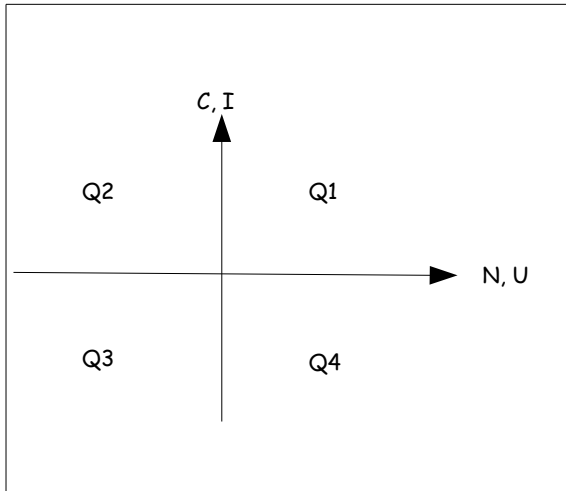
- soit l'inductance L (rajout d'une inductance de lissage)
- soit la fréquence f (limitée par les transistors).

Dans le cas d'une charge R+L+E, on a la relation entre les valeurs moyennes :

$$U_{DC} = R \times I_{DC} + E \quad \text{car en régime périodique } U_{L-DC} = 0.$$

4 - PILOTAGE D'UNE MCC PAR HACHEUR.

4.1 - QUADRANTS DE FONCTIONNEMENTS.

	On définit les quadrants mécaniques (vitesse N et couple C) et les quadrants électriques (U et I). Dans une Mcc, la vitesse est liée à la tension et le couple au courant. Les quadrants 1 et 3 sont des quadrants moteurs ($P = C \times N > 0$). Lors d'un freinage en récupération, la machine passe de moteur à génératrice et participe ainsi au freinage. Le couple s'inverse, et la machine renvoi de l'énergie électrique vers son alimentation.
--	--

Les hacheurs que l'on va étudier sont :

- 1 quadrant : fonctionnement moteur Q1
- 2 quadrants : fonctionnement moteur 1 sens de rotation avec renvoi (Q1 et Q4),
- 4 quadrants.

4.2 - CONTRÔLE DE LA MCC.

Dans une Mcc à flux constant :

- l'induit est modélisé par un circuit RLE,
- le couple est proportionnel au courant : en valeur moyenne : $C = k I_{DC}$,
- la fem est proportionnelle à la vitesse de rotation : $E = k \Omega$.

Le hacheur fournit une tension moyenne U_{DC} qui dépend de la tension d'entrée V_{in} et du rapport cyclique α .

Cette tension alimente l'induit : $U_{DC} = E + R I$.

L'ondulation du courant dans l'induit a pour expression : $\Delta I = \alpha \times (1 - \alpha) \times \frac{\Delta U}{L f}$

où ΔU est la variation de la tension dans la branche contenant la bobine.

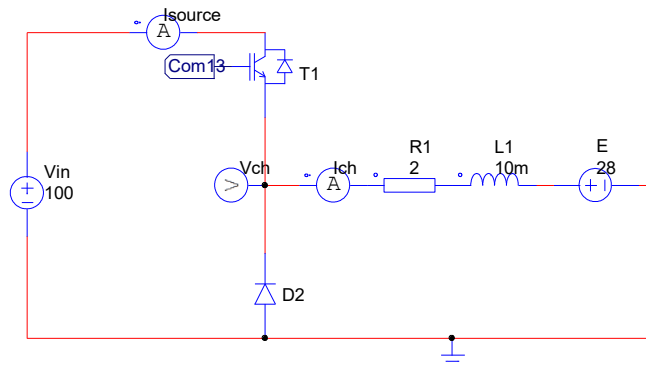
On peut diminuer l'ondulation du courant en augmentant :

- soit l'inductance L (rajout d'une inductance de lissage)
- soit la fréquence f (limitée par les transistors).

5 - HACHEUR 1 QUADRANT.

5.1 - STRUCTURE HACHEUR SÉRIE.

Le hacheur série est le plus simple : il comporte 1 transistor en série avec la charge, 1 inductance (on va régler la fréquence du hacheur pour que l'inductance de la charge suffise) et une diode de roue libre en parallèle avec la charge.



Le transistor est fermé de 0 à αT , ouvert sinon.

Une fois le transistor ouvert, la diode se met à conduire pour évacuer l'énergie stockée dans la bobine.

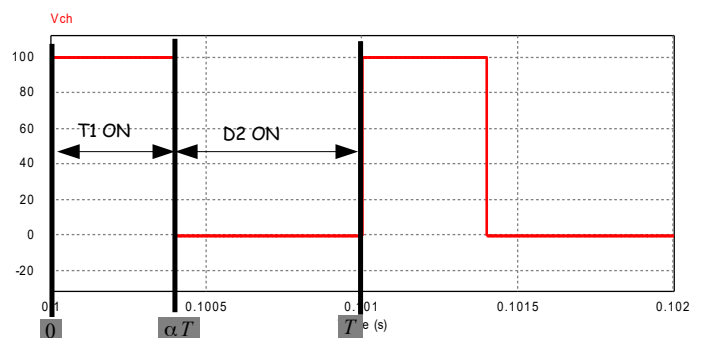
5.2 - FONCTIONNEMENT NORMAL.

Le hacheur série permet un fonctionnement dans le quadrant Q1 ($v > 0$ et $i > 0$).

La tension de sortie est rectangulaire et comprise entre 0 et V_{in} .

$$V_{out-DC} = \alpha V_{in} \geq 0$$

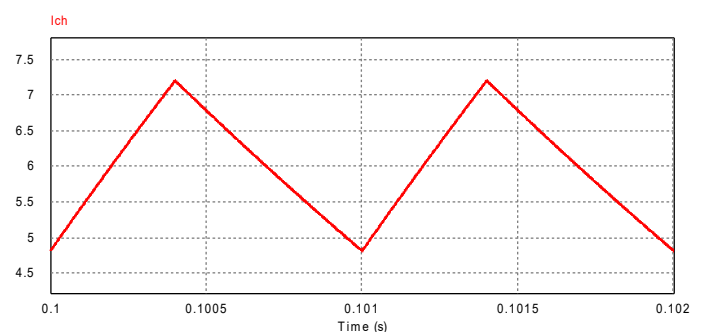
$$\Delta U = V_{in}$$



Le courant dans la charge est triangulaire (car $\tau_E > T$) et toujours positif.

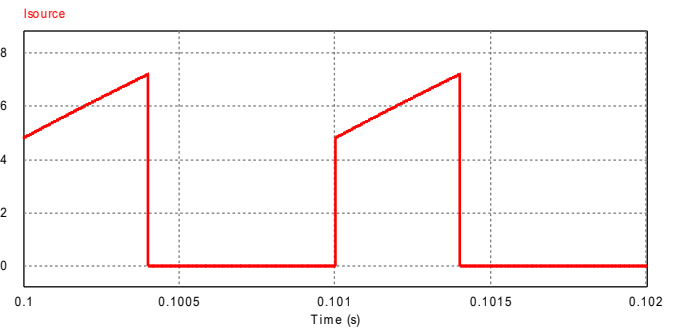
$$I_{DC} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} \geq 0$$

$$\Delta I = \alpha \times (1 - \alpha) \times \frac{V_{in}}{L f}$$



La source V_{in} ne fournit du courant que lorsque le transistor est fermé (de 0 à αT).

$$I_{in-DC} = \alpha I_{DC} \geq 0$$



5.3 - CONDUCTION DISCONTINUE.

Le hacheur série ne permet pas d'avoir $i < 0$.

Or les conditions de fonctionnement peuvent entraîner une ondulation $\Delta I \geq 2I_{DC}$ et

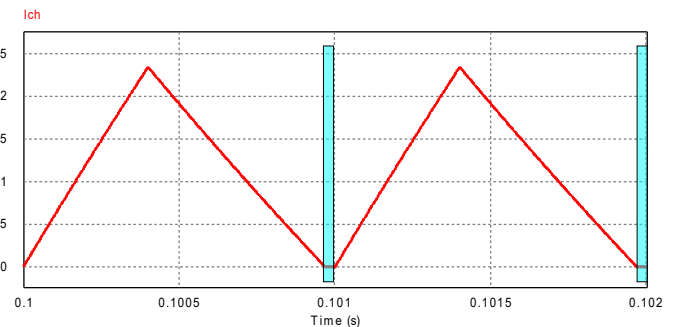
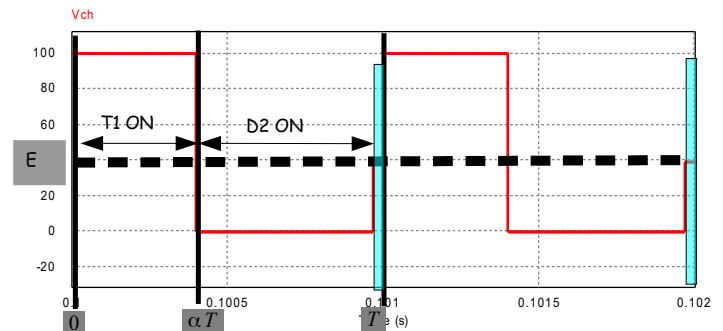
donc $I_{min} \leq 0$: le hacheur fonctionne alors en **conduction discontinue**.

Lorsque le hacheur est en conduction discontinue, **il apparaît une 3ème phase où $i=0$** :

- il n'y a plus de courant qui circule dans le hacheur : $i=0$,
- alors $V_{out}=E$.

Les relations établies précédemment ne sont plus valides en conduction discontinue : on ne sait pas contrôler la charge.

L'ondulation du courant est plus forte encore : la charge est moins bien alimentée.



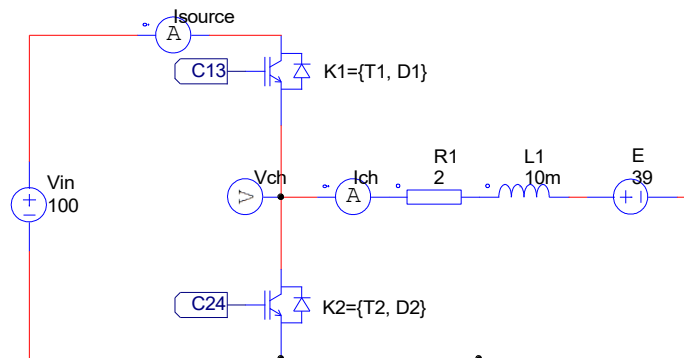
Pour ne pas être en conduction discontinue, il faut s'assurer que $\Delta I_{max} \leq 2I_{DC}$.

Pour cela, on peut rajouter une inductance en série L , ou augmenter la fréquence de hachage f , si les transistors le supportent.

6 - HACHEUR 2Q-1.

6.1 - STRUCTURE.

Le hacheur 2quadrants réversible en courant comporte un bras de pont à transistors (2 transistors).



Les 2 interrupteurs sont commandés de façon complémentaire (K2 OFF lorsque K1 ON et vice versa).

Les diodes en anti parallèle aux transistors assurent la réversibilité en courant ($i < 0$).

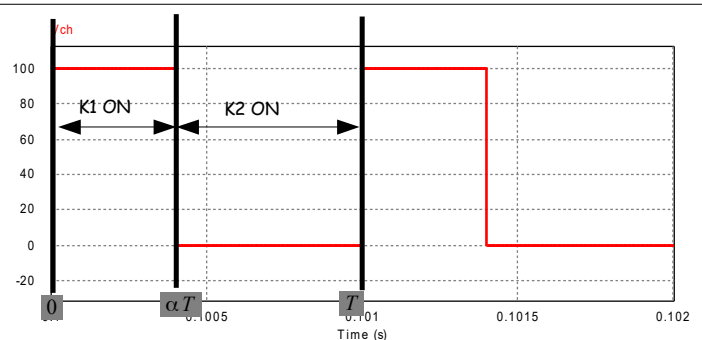
Dans l'association Transistor+diode, le sens du courant détermine lequel de ces composants est passant lorsqu'on ferme l'interrupteur K : si la tension a le même signe que le courant, c'est le transistor qui conduit, sinon c'est la diode.

6.2 - FORMES D'ONDE ET RELATIONS E/S.

La tension de sortie est rectangulaire et comprise entre 0 et V_{in} .

$$V_{out-DC} = \alpha V_{in} \geq 0$$

$$\Delta U = V_{in}$$



Le courant dans la charge peut être <0 , il n'y a plus de problème de conduction discontinue.

Le signe de i détermine qui du transistor ou de la diode est effectivement passant lorsqu'on ferme l'interrupteur K .

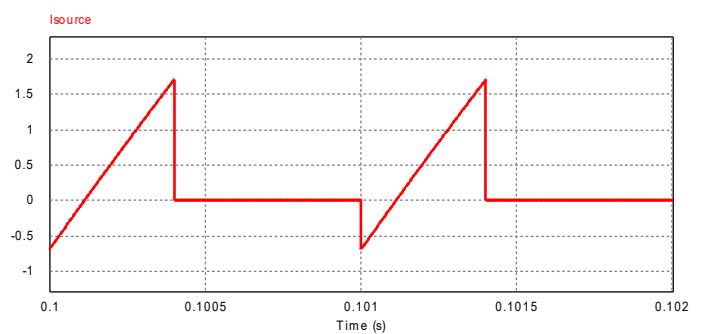
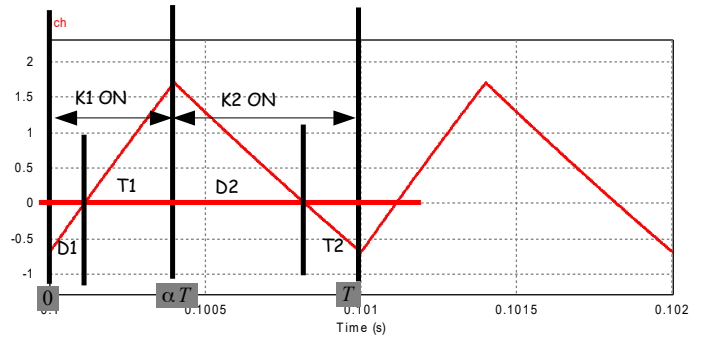
$$I_{DC} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} \geq 0$$

$$\Delta I = \alpha \times (1 - \alpha) \times \frac{V_{in}}{L f}$$

La source V_{in} n'alimente le montage que lorsque $K1$ est fermé.

Elle doit accepter un retour de courant (quand $D1$ conduit - $i < 0$).

$$I_{in_{DC}} = \alpha I_{DC}$$



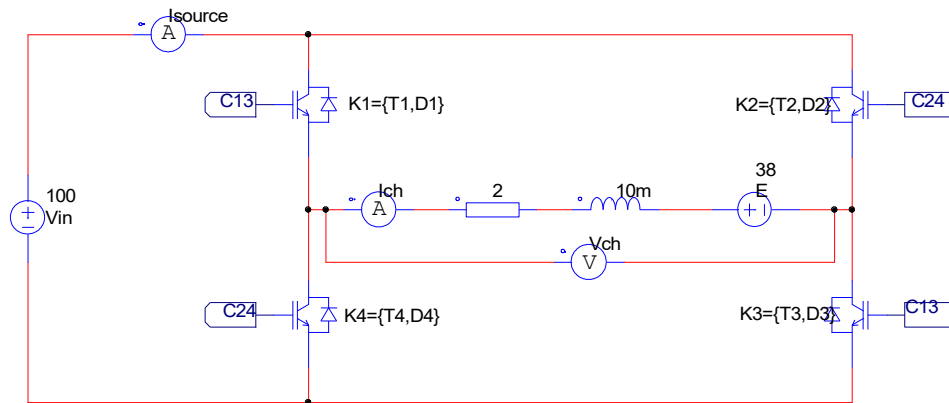
Par rapport au hacheur série, le hacheur 2Q-I :

- supprime le problème de la conduction discontinue : on contrôle tout le temps la charge,
- doit être alimenté par une source DC acceptant un retour de courant :
 - source réversible type batterie
 - ou module de freinage (hacheur charge R),
- est technologiquement plus compliqué à réaliser :
 - 2 transistors à commander de façon complémentaire,
 - une voie haute (potentiel flottant) et une voie basse,
 - s'assurer que les temps d'ouverture et de fermeture n'entraînent pas un chevauchement des transistors (mise en court circuit de la source).

7 - HACHEUR 4Q.

7.1 - STRUCTURE.

Le hacheur 4Q est un pont en H avec 2 bras de pont à transistors et la charge entre ces bras (potentiel flottant).



La réversibilité en courant est là encore assurée par l'association transistor + diode en anti parallèle.

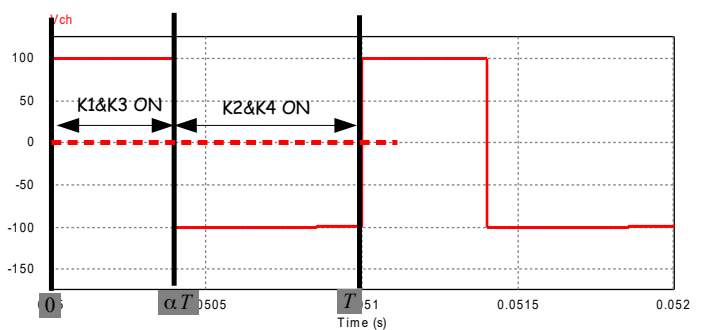
La réversibilité en tension est rendue possible en fermant simultanément K1 et K3 ($V_{ch}=+V_{in}$) puis en fermant K2 et K4 ($V_{ch}=-V_{in}$).

7.2 - FORMES D'ONDE ET RELATIONS E/S.

La tension de sortie est rectangulaire et comprise entre $-V_{in}$ et $+V_{in}$.

$$V_{out-DC} = (2\alpha - 1) V_{in} \geq 0$$

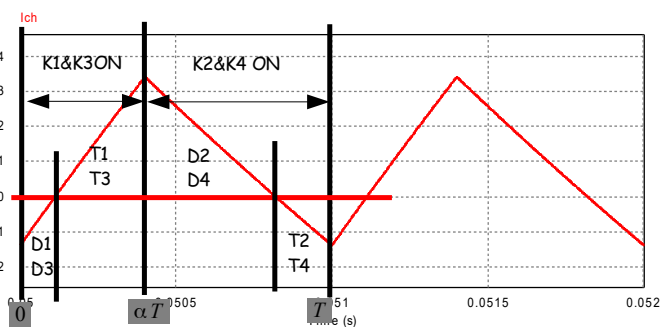
$$\Delta U = 2 V_{in}$$



Le courant dans la charge peut être <0 , il n'y a pas de problème de conduction discontinue.

Le signe de i détermine qui du transistor ou de la diode est effectivement passant lorsqu'on ferme l'interrupteur K.

$$I_{DC} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} \geq 0$$



$\Delta I = \alpha \times (1 - \alpha) \times \frac{2V_{in}}{Lf}$	
La source V_{in} alimente le montage lorsque K1&K3 sont fermés ($i_{in} = i_{ch}$) Elle reçoit du courant lorsque K2&K4 sont fermés ($i_{in} = -i_{ch}$). $I_{in_{DC}} = \alpha I_{DC} - (1 - \alpha) I_{DC} = (2\alpha - 1) I_{DC}$	

Comme pour le hacheur 2Q-I :

- il n'y a pas de problème de conduction discontinue : on contrôle tout le temps la charge,
- la source DC doit accepter un retour de courant :
 - module de freinage (hacheur charge R),
 - source réversible,
- La commande est encore plus compliquée à réaliser :
 - 2 transistors à commander simultanément (voie haute et basse)
 - 2 transistors à commander de façon complémentaire (voie haute et basse)
 - prise en compte des temps d'ouverture et de fermeture
 - pour s'assurer que les transistors soient fermés ensemble
 - pour éviter un chevauchement des transistors complémentaires.