

ALIMENTATIONS A DECOUPAGE

- 1° Introduction
 - Alimentations linéaire et à découpage
 - Notions d'électronique de puissance
- 2° Découpage série (Buck)
 - Introduction
 - Débit Non Interrompu dans la bobine
 - Débit Interrompu
- 3° Découpage parallèle (Boost)
- 4° Accumulation inductive (Buck & Boost)
- 5° Accumulation isolée (Flyback)
- 6° Série isolée (Forward)
- 7° Commutation des diodes et transistors
- 8° Accumulation capacitive (Cuck)

Bibliographie et liens utiles

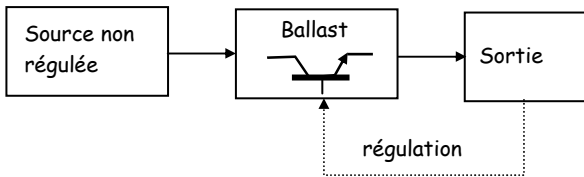
Annexes

Introduction

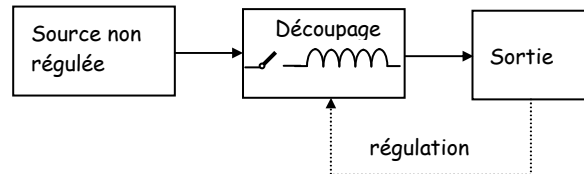
Une alimentation est un dispositif destiné à fournir en sortie une tension continue régulée à partir d'une source continue ou alternative. Deux technologies de régulation sont possibles :

- La régulation linéaire ou « ballast »,
- La régulation à découpage.

Dans la **régulation linéaire**, un transistor ballast maintient la tension de sortie constante en **dissipant de l'énergie** (classe A).

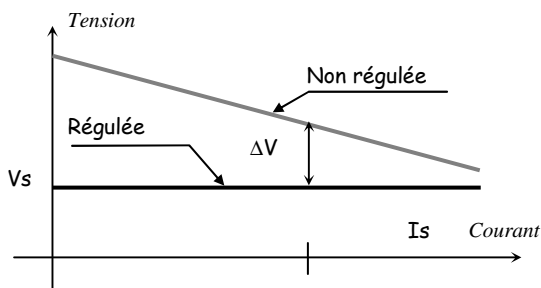
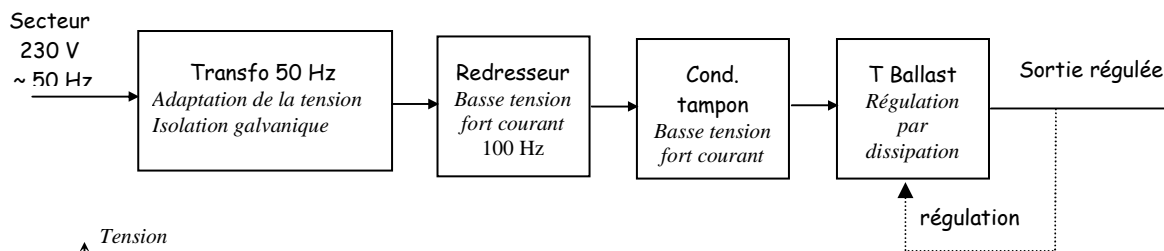


Dans une **régulation à découpage**, le transistor fonctionne en **tout ou rien** (bloqué-saturé) et transfère plus ou moins d'énergie à une bobine qui la stocke momentanément sous forme d'énergie magnétique.



Le **réglage** de la tension de sortie se fait en agissant sur le **rapport cyclique** (rapport de la durée de conduction sur la période de découpage). Il n'y a pas de puissance dissipée (aux pertes près), le rendement théorique maximum est de 100 % (classe D).

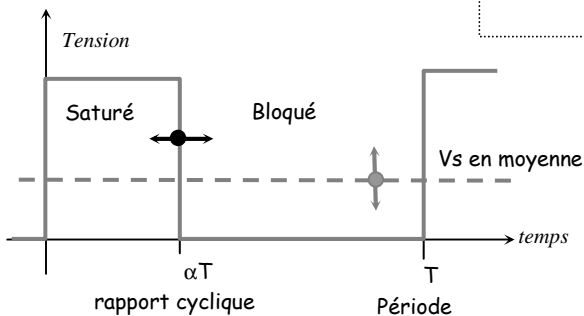
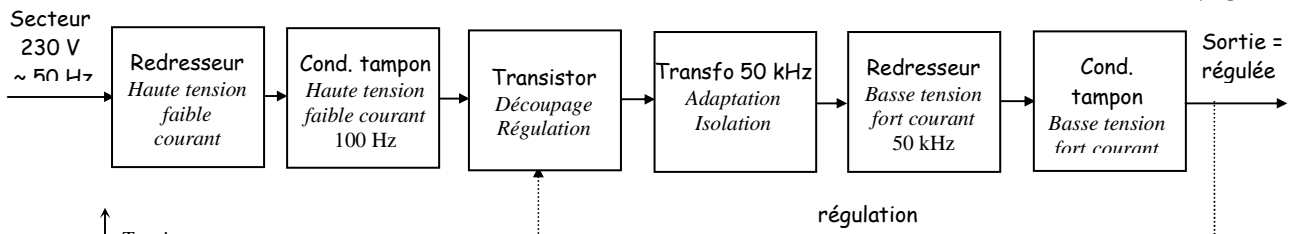
Si on compare la structure de deux alimentations "secteur" nous aurons:
Pour une alimentation "linéaire"



$$P_u = V_s \cdot I_s$$

$$P_{ballast} = \Delta V \cdot I_s$$

Pour une alimentation "à découpage"



Les deux systèmes présentent chacun des avantages et des inconvénients.

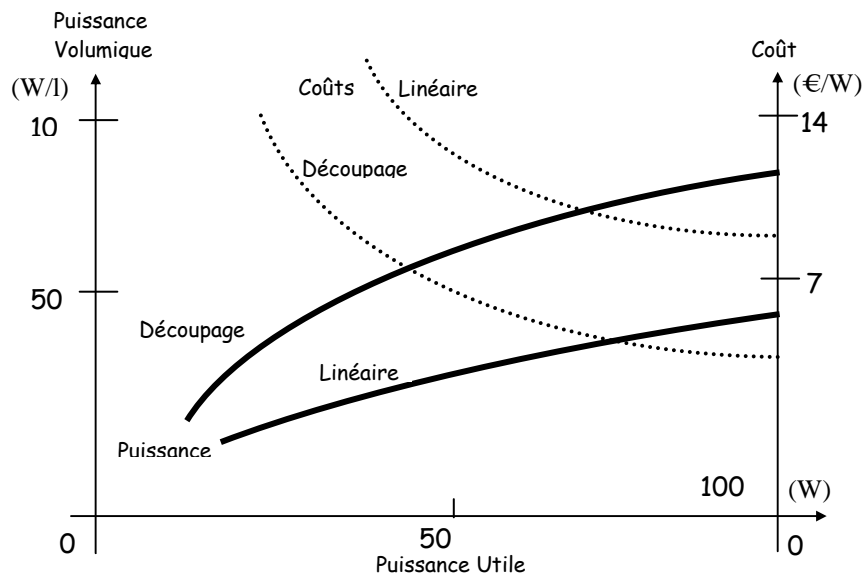
Caractéristiques	Découpage	Linéaire
Puissance massique	200 à 300 w/kg	10 à 30 w/kg
Puissance volumique	300 W/l	50 W/l
Rendement	60 à 90 %	35 à 55 %
Plage de tension d'entrée	0,5 à 1,2 U _N	0,9 à 1,1 U _N
Temps de maintien	10 à 100 ms	5 à 10 ms
Régulation dynamique (dépassement - durée)	5% - 1 ms	1% - 50 μs
Ondulation résiduelle CàC	1%	0,1%
Perturbations EMI RFI	Importantes	Négligeable
MTBF	60 000 h	100 000 h

Celui par découpage aura:

- un bon rendement;
- des puissances massiques et volumiques élevées;
- des parasites conduits et rayonnés importants;
- une ondulation résiduelle relativement grande.

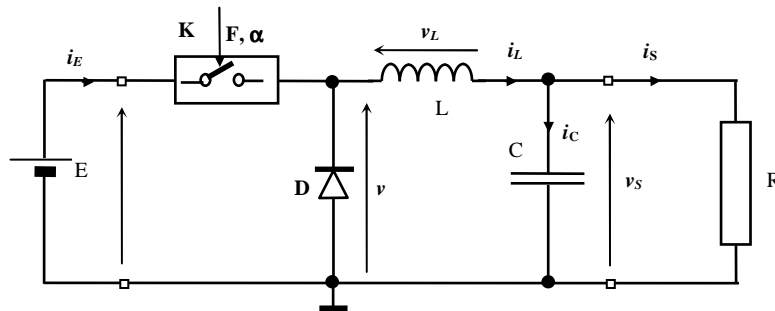
Le linéaire aura:

- une tension de sortie parfaitement continue;
- une régulation dynamique rapide.



Découpage série (Buck)

C'est le montage le plus simple¹. On le rencontre lorsqu'on veut remplacer un régulateur intégré (78xx) par un régulateur à découpage.



La source E est l'entrée à régler. Elle peut être constituée d'un transformateur, un pont de Graëtz et un condensateur tampon.

Le condensateur C a pour fonction de rendre la tension v_S parfaitement continue. (condensateur de nivelage). Nous supposons qu'il remplit parfaitement sa tâche et verrons par la suite comment le dimensionner.

La bobine L est l'élément de stockage de l'énergie.

L'interrupteur K est un transistor fonctionnant en TOR². Il est commandé à la fréquence $F = 1/T$ avec un rapport cyclique α . (K fermé pour $0 < t < \alpha T$)

La diode D, dite « diode de roue libre », permet la continuité du courant i_L lorsque K est ouvert.

La résistance R n'appartient pas au montage, elle est là pour simuler « l'utilisation »³.

Le montage possède deux régimes de fonctionnement :

- lorsque le courant d'utilisation I_S est suffisamment important, le courant dans la bobine ne s'interrompt jamais (DNI - Débit non interrompu dans L).
- lorsque le courant d'utilisation est trop faible, le courant dans la bobine s'arrête avant la fin de la période (DI - Débit interrompu dans L).

¹ C'est aussi le plus ancien. La version très forte puissance prend le nom de « Hacheur série ». C'est sur ce principe que fonctionne le réglage de vitesse des trains entraînés par des moteurs à courant continu.

² Tout Ou Rien

³ Le montage ne comporte aucun élément dissipatif, en supposant les composants parfaits, le rendement théorique est donc de 100%.

Notes personnelles

Pour le régime DNI, la période se décompose en deux « phases » :

- une phase active ($0 < t < \alpha T$) durant laquelle l'interrupteur est fermé. La bobine se charge en énergie.
- une phase de roue libre ($\alpha T < t < T$) durant laquelle l'interrupteur est ouvert mais, le débit dans la bobine n'étant pas nul, le courant circule dans la diode D (d'où son nom).

Pour le régime DI, la période se décompose en trois « phases » :

- une phase active ($0 < t < \alpha T$) durant laquelle l'interrupteur est fermé.
- une phase de roue libre ($\alpha T < t < \beta T$) durant laquelle l'interrupteur est ouvert et le courant circule dans la diode. Cependant l'énergie en réserve dans la bobine n'est pas suffisante pour maintenir le courant jusqu'à la fin de la période.
- une phase de repos ($\beta T < t < T$) durant laquelle l'interrupteur est ouvert et le courant dans la bobine nul. C'est le condensateur qui assure la totalité du courant I_S .⁴

Nous allons faire l'étude successive de ces deux régimes de fonctionnement.

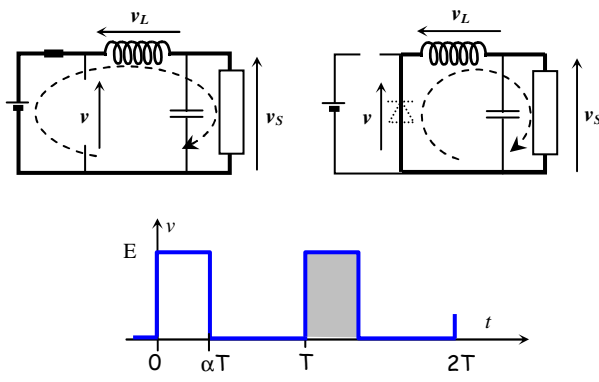
On commencera par le régime DNI.

L'exploitation des résultats nous permettra de déterminer les conditions limites de ce régime, puis nous étudierons le régime DI.

a) Débit Non Interrompu dans la bobine

Phase active : $0 < t < \alpha T$ K fermé
si K fermé, alors $v = E > 0$, donc D bloquée

Roue libre : $\alpha T < t < T$ K ouvert
si K ouvert mais $i_L \neq 0$, alors D passante, donc $v = 0$



⁴ la situation est comparable à celle d'un cycliste qui ne pédalerait qu'à intervalles de temps régulier et se ménagerait une phase de roue libre à chaque période. Si son « élan » est suffisant, la vitesse n'est jamais nulle entre deux phases de pédalage. Dans le cas contraire, à chaque période, il y aura une phase supplémentaire d'arrêt.

Calculons la valeur moyenne de v :

$$V_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt = \frac{1}{T} (\alpha T * E) = \alpha E$$

La loi des mailles donne par ailleurs :

$$v = v_L + v_S$$

Si nous calculons à nouveau la moyenne de v , en considérant que la moyenne d'une somme est la somme des moyennes et que la moyenne d'une constante est égale à cette constante :

$$(v)_{\text{moy}} = (v_L + v_S)_{\text{moy}} = (v_L)_{\text{moy}} + (v_S)_{\text{moy}}$$

$$V_{\text{moy}} = (v_L)_{\text{moy}} + V_S = 0 + V_S$$

La valeur moyenne de la tension aux bornes d'une bobine étant toujours nulle en régime périodique⁵.

En identifiant les résultats nous avons :

$$V_S = \alpha E$$

Comme α est réglable entre 0 et 1, la tension de sortie devient réglable entre 0 et E .

Le montage est abaisseur de tension.

Déterminons l'allure de v_L afin de calculer le courant dans la bobine.

Dans la phase active $v_L = E - V_S = (1 - \alpha) E$

C'est une constante positive. Le courant croît

linéairement avec une pente $\frac{(1 - \alpha) E}{L}$

En notant I_0 la valeur de i_L à $t = 0$ le courant sera régi par :

$$i_L = I_0 + \frac{(1 - \alpha) E}{L} t$$

A la fin de cette phase il atteint la valeur I_α

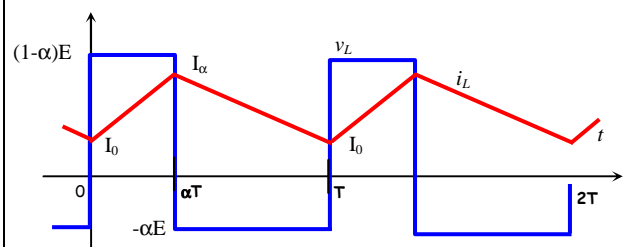
$$I_\alpha = I_0 + \frac{(1 - \alpha) E}{L} \alpha T$$

Dans la phase de roue libre $v_L = -V_S = -\alpha E$

C'est une constante négative. Le courant décroît

linéairement avec une pente $\frac{-\alpha E}{L}$

A la fin de cette phase il reprend la valeur I_0



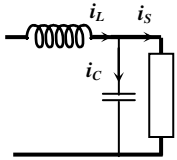
⁵ Si on retrouve à chaque période la même valeur de courant, c'est que « la somme des tensions » pour accroître le courant compense exactement celle qui l'on fait décroître. Ce qui fait zéro en moyenne.

Le courant dans la bobine fluctue entre I_0 et I_α , l'ondulation de courant vaut donc :

$$\Delta I = I_\alpha - I_0 = \frac{(1-\alpha)E}{L} \alpha T$$

Elle est nulle lorsque α vaut 0 ou 1 et elle est maximale lorsque $\alpha = 0,5$ ainsi :

$$\Delta I_M = \frac{ET}{4L}$$



La loi des nœuds en sortie donne :

$$i_L = i_S + i_C$$

si nous en calculons la valeur moyenne, avec $(i_C)_{moy} = 0$ en régime périodique⁶, nous aurons :

$$(i_L)_{moy} = (i_S)_{moy} + (i_C)_{moy} = (i_S)_{moy} + 0 = I_S$$

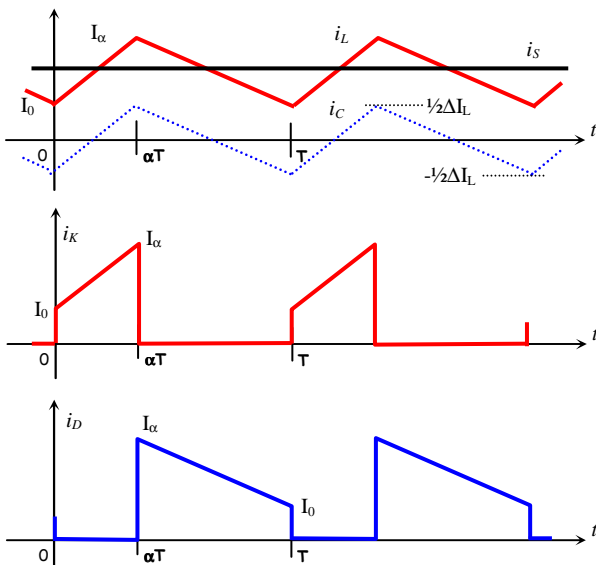
Comme par ailleurs, en observant le chronogramme de i_L , nous pouvons écrire :

$$(i_L)_{moy} = \frac{1}{2} (I_\alpha + I_0) \quad \text{En combinant les}$$

équations, cela donne en définitive :

$$I_\alpha = I_S + \frac{1}{2} \Delta I_L \quad I_0 = I_S - \frac{1}{2} \Delta I_L$$

Les chronogrammes des divers courants dans le montage s'obtiennent simplement⁷ (la loi des nœuds en entrée donnant $i_L = i_K + i_D$)



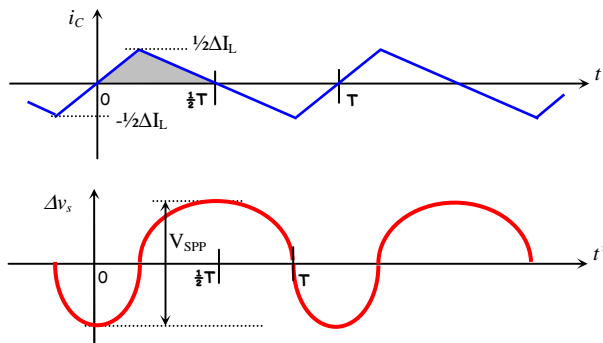
Plus le courant d'utilisation I_S est important plus I_α et I_0 augmentent, par contre l'écart ΔI , entre ces deux valeurs reste constant.

⁶ Si la tension reprend périodiquement la même valeur c'est que la quantité de charge qui l'a faite momentanément augmenter est compensée par la même quantité qui la faite diminuer, ce qui donne zéro en moyenne.

⁷ On suppose que la charge consomme un courant I_S constant, ce qui est le cas pour une charge R avec $V_S = cte$

Nous avons supposé que la tension de sortie était constante. Pour cela, il faut que l'ondulation résiduelle soit négligeable. Si nous observons le courant dans le condensateur, nous pouvons établir le chronogramme de la variation de v_s . puisque $i_C = C \frac{dv_s}{dt}$. En choisissant une

origine des temps convenable, i_C peut se mettre sous la forme $i_C = at'$ Ce qui donne, en intégrant, $v_s = \frac{1}{2} at'^2 + cte$ L'ondulation de v_s est donc une succession de paraboles dont la concavité change de sens suivant le signe de « a »



Durant une demi-période le courant i_C est positif, la tension v_s croît, pendant l'autre moitié de la période il est négatif et la tension décroît. La variation totale de la tension (entre le min et le max) correspond à la quantité d'électricité ajoutée dans le condensateur :

$$V_{SPP} = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} * (\frac{1}{2} T) * (\frac{1}{2} \Delta I_L) * \frac{1}{2}$$

L'ondulation crête à crête en sortie ne dépend pas de I_S mais de α au travers de ΔI_L . nous avons vu que le maximum correspond à $\alpha = \frac{1}{2}$ et vaut ΔI_M ce qui donne :

$$V_{SPP} \leq \frac{1}{8C} T \frac{ET}{4L} = \frac{ET^2}{32LC} = \frac{E}{32LCF^2}$$

Cette formule permet de dimensionner le condensateur en fonction de l'ondulation résiduelle souhaitée⁸.

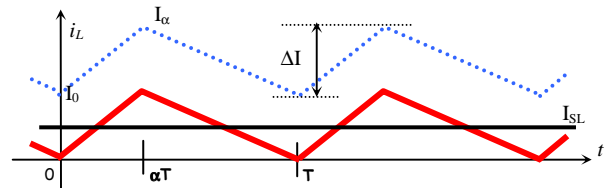
Nous voyons que plus la capacité et la fréquence sont importantes, plus l'ondulation résiduelle est faible.

Pour terminer ce paragraphe, il faut chercher la limite de validité de ces équations. Nous sommes dans le cas de débit non interrompu dans la

⁸ Hélas viennent se superposer à cette ondulation, des parasites HF de beaucoup plus grande amplitude (cf cours de CEM). Ils sont dus aux brusques variations de v et transmis par couplage capacitif parasite de la bobine
Garnero

bobine, c'est à dire que la valeur minimale I_0 doit être positive.

Si I_α et I_0 augmentent lorsque le courant d'utilisation augmente, ils diminuent lorsque ce dernier diminue. Le cas limite est obtenu lorsque $I_0 = 0$ (et $I_\alpha = \Delta I$)



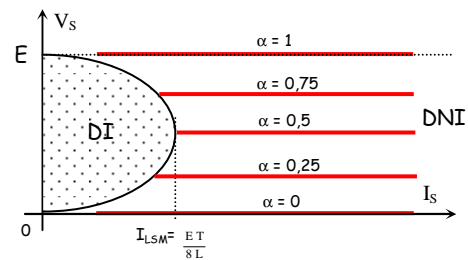
Dans ce cas, I_S vaut donc $\frac{1}{2} \Delta I$ soit donc :

$$I_{SL} = \frac{(1-\alpha)E}{2L} \alpha T$$

la plus grande valeur est obtenue lorsque $\alpha = 0,5$

et vaut :
$$I_{SLM} = \frac{ET}{8L}$$

Nous pouvons tracer l'évolution de V_s en fonction de I_S (courbes paramétrées par α)

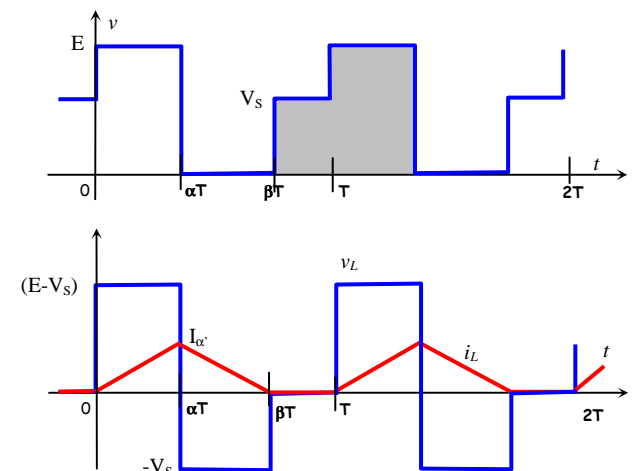


b) Débit Interrompu dans la bobine

Phase active : $0 < t < \alpha T$ K fermé
si K fermé, alors $v = E > 0$, donc D bloquée

Roue libre : $\alpha T < t < \beta T$ K ouvert
si K ouvert mais $i_L \neq 0$, alors D passante, donc $v = 0$

Repos : $\beta T < t < T$ K ouvert
si K ouvert et $i_L = 0 = cte$, alors D bloquée, et puisque $i_L = cte$ alors $v_L = 0$ et $v = V_s$



Comme dans le cas précédent calculons les valeurs moyennes :

$$V_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt = \frac{1}{T} ((T - \beta T) * V_S + \alpha T * E)$$

$$V_{\text{moy}} = V_S = ((1 - \beta) * V_S + \alpha * E) \quad (1)$$

$$I_{L\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_L(t) dt = \frac{1}{T} (\beta T) * I\alpha * \frac{1}{2}$$

$$I_{L\text{moy}} = I_S = \beta * \left(\frac{E - V_S}{L} * \alpha T \right) * \frac{1}{2} \quad (2)$$

En ordonnant l'équation (1) on obtient :

$$V_S = \frac{\alpha}{\beta} E \quad \text{ou encore} \quad \beta = \frac{\alpha E}{V_S}$$

on peut remarquer que $V_S > \alpha E$

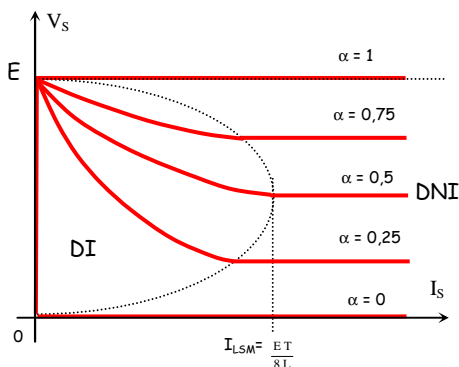
avec l'équation (2) et l'expression de β , en ordonnant nous obtenons :

$$V_S = \frac{E}{1 + \frac{2L}{\alpha^2 T E} I_S}$$

Contrairement au cas précédent, V_S dépend de I_S . Nous pouvons même observer que pour $I_S = 0$ la tension de sortie vaut E quelle que soit la valeur de α .

A circuit ouvert, la sortie n'est plus commandée⁹.

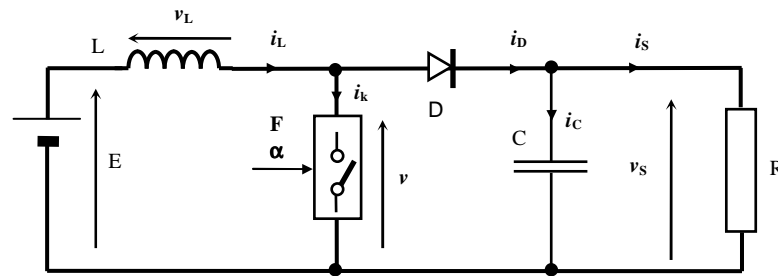
On peut compléter les courbes $V_S = f(I_S)$, ébauchées au paragraphe précédent.



La zone utile se situe au voisinage de $\alpha = 0,5$ en limite du débit non interrompu. Nous justifierons cette affirmation lors de l'étude du montage Flyback.

⁹ On peut toujours ajouter au montage une résistance de « saignée » qui empêche le courant d'être nul.

Découpage parallèle (Boost)



Les éléments constitutifs sont les identiques à ceux du montage précédent, mais la disposition est différente.

Le montage possède encore deux régimes de fonctionnement suivant que le courant s'interrompt ou non dans la bobine.

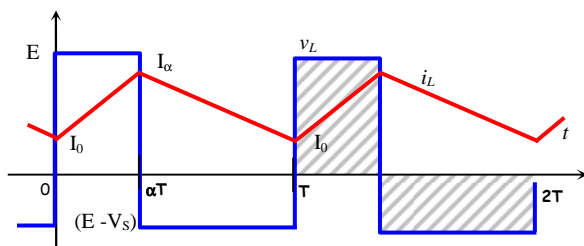
La période doit donc être décomposée en deux (ou trois) phases successives :

Phase d'accumulation, $0 < t < \alpha T$ l'interrupteur est fermé, la tension v est nulle et la diode D bloquée. C'est C qui assure le courant d'utilisation, la bobine est soumise à $v_L = E$

Phase active, $\alpha T < t < T$ (ou βT) l'interrupteur est ouvert, le courant dans la bobine n'est pas nul, la diode D est donc passante.

De ce fait, $v = V_S$ et $v_L = E - V_S$

Si l'énergie stockée dans la bobine lors de la première phase n'est pas suffisante pour maintenir le courant jusqu'à la fin de la période, il y a une troisième phase dite phase de repos. L'interrupteur est ouvert, la diode bloquée. Tous les courants sont nuls à l'exception de i_S qui vaut $-i_C$ (c'est C qui assure à nouveau le courant)



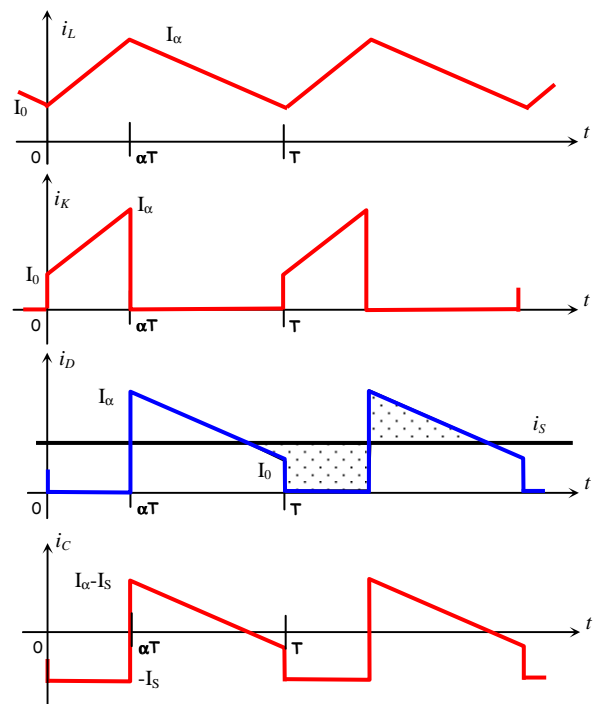
Pour obtenir la valeur de V_S il suffit d'exprimer que $(v_L)_{\text{moy}}$ doit être nulle, ainsi :

$$\alpha T * E = - (T - \alpha T) * (E - V_S)$$

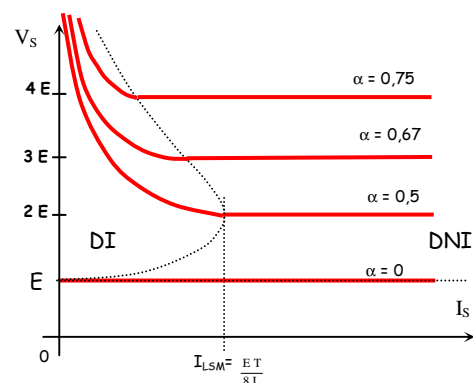
Ce qui donne en ordonnant :

$$V_S = \frac{1}{1 - \alpha} E$$

La tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée (elle tend même vers l'infini lorsque α tend vers 1).



Comme précédemment on peut tracer l'évolution de $V_S = f(I_S)$,



Pour le DI la tension de sortie tend vers l'infini quelle que soit la valeur de α lorsque I_S tend vers zéro. Une étude détaillée montre que V_S se met sous la forme :

$$V_S = E \left(1 + \frac{\alpha^2 T E}{2 L I_S} \right)$$

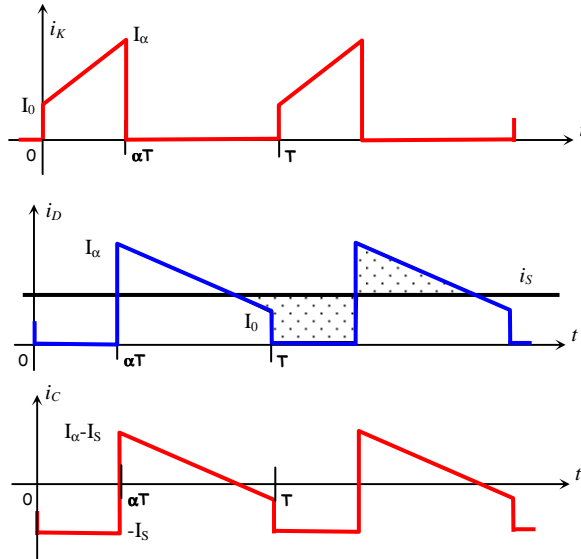
L'étude de la limite DI / DNI, fait apparaître une valeur I_{LSM} identique à la précédente.

Ce qui donne en ordonnant :

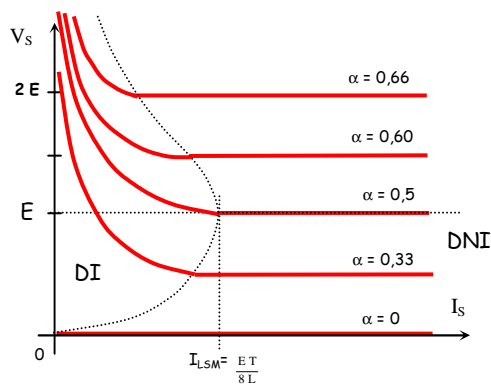
$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} E$$

La tension de sortie est inférieure à la tension d'entrée lorsque $\alpha < 0,5$ et elle est supérieure dans le cas contraire¹⁰

Les chronogrammes des courants en DNI sont donnés ci-dessous.

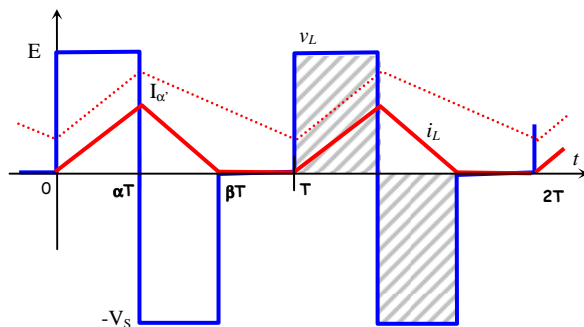


Comme pour les autres montages on peut tracer l'évolution de $V_s = f(I_S)$,



En DI, la tension de sortie s'écrit :

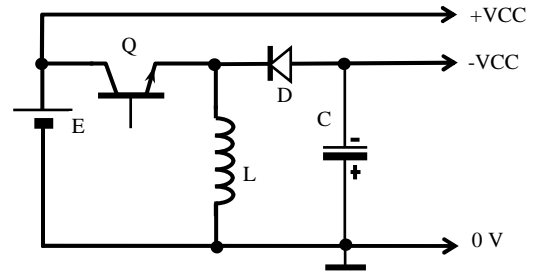
$$V_s = E \left(\frac{\alpha^2 T E}{2 L I_S} \right)$$



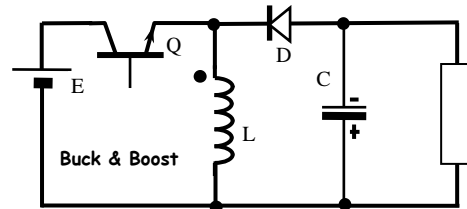
¹⁰ Elle tend même vers l'infini lorsque α tend vers 1.
Garnero

On observe là encore une tension qui tend vers l'infini à circuit ouvert ($I_S = 0$), d'où l'utilisation d'une éventuelle « résistance de saignée ».

On peut, avec ce montage réaliser une alimentation symétrique (split supply) à partir d'une alimentation simple : (avec $\alpha = 0,5$)

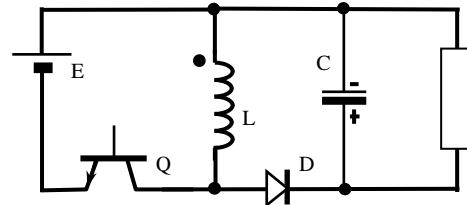


Voyons comment, avec une succession de transformations, on passe du buck & boost au montage Flyback

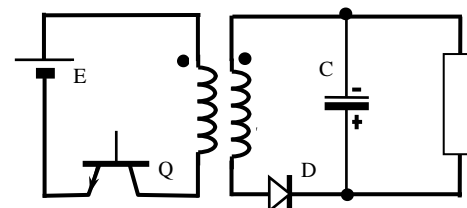


Le point indique la borne « d'entrée » de la bobine.

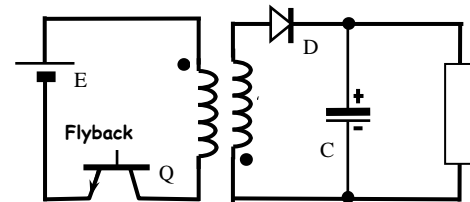
1° étape : déplacement de Q et D



2° étape : bobinage de L « 2 fils en main »

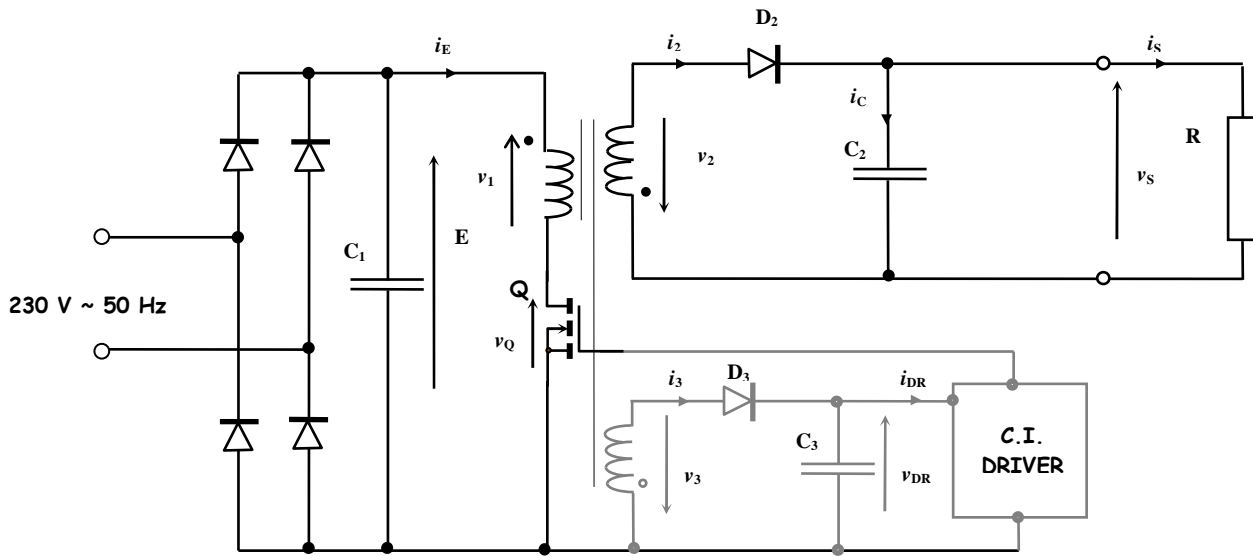


3° étape : renversement du schéma de la sortie

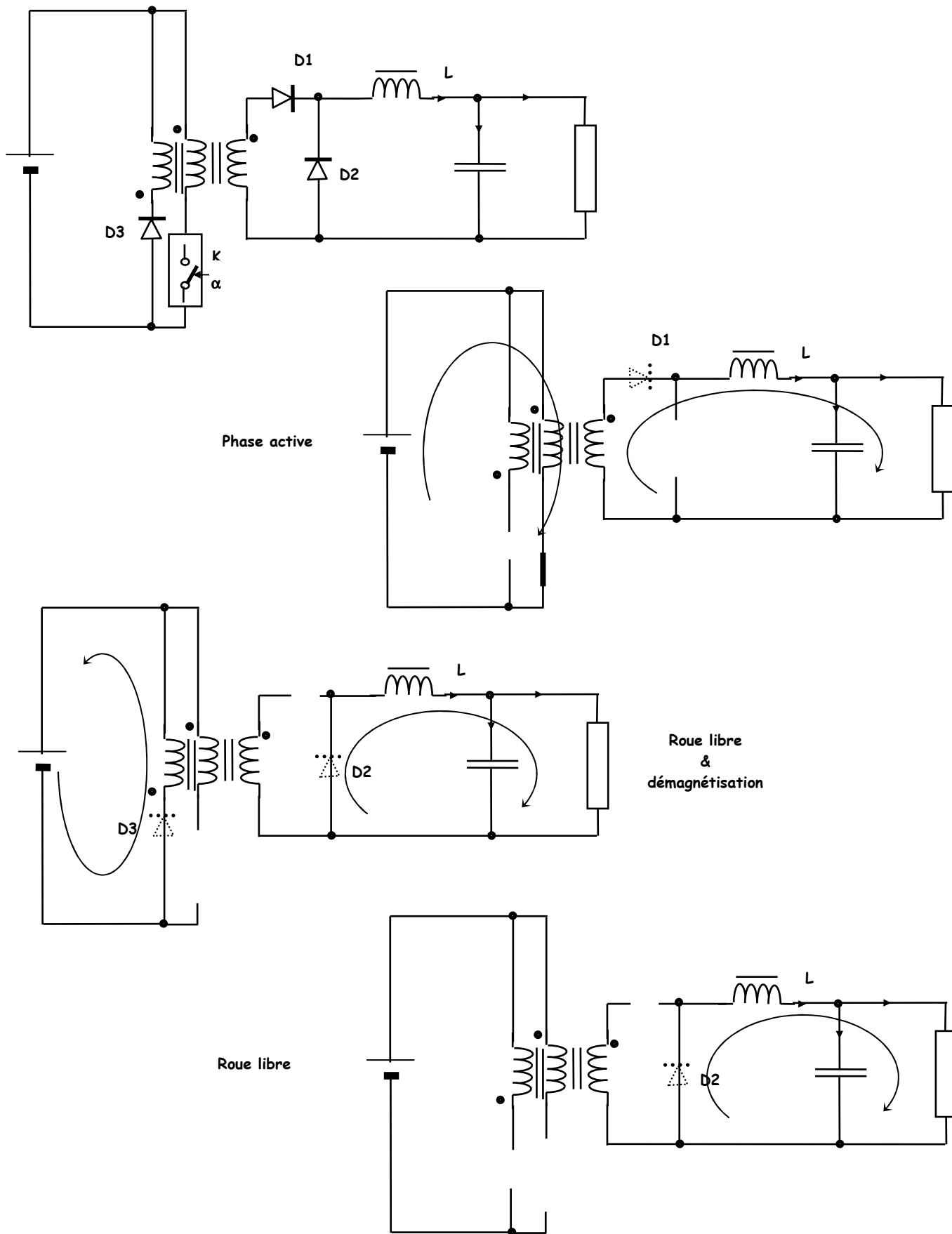


L'entrée et la sortie sont isolées galvaniquement, mais les résultats sont inchangés

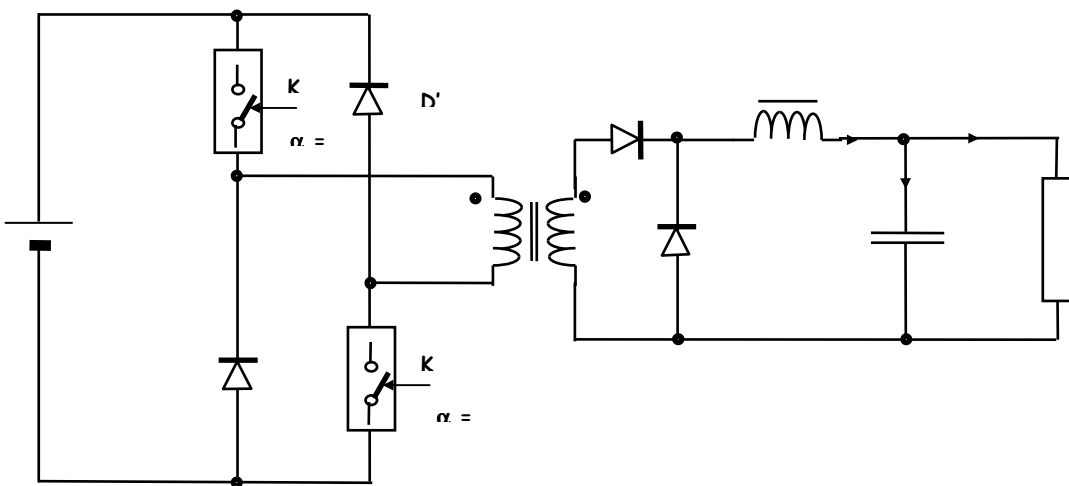
Accumulation isolée (Flyback)



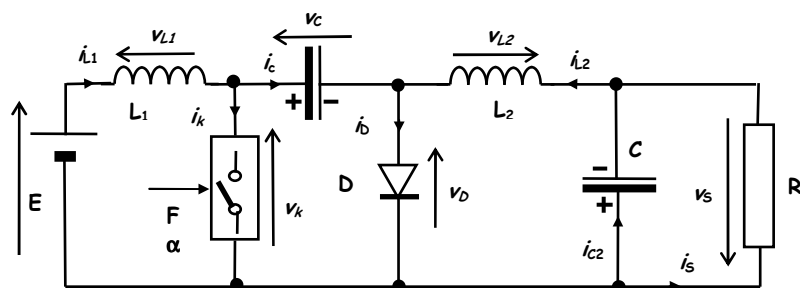
Série isolée (Forward)



Série isolée (Forward)



Accumulation capacitive (Cuck)



Bibliographie

Un ouvrage qui fait référence dans le domaine :

Collection Technologies

Alimentations à découpage

Convertisseurs à résonance

JP FERRIEUX et F FOREST

MASSON

Quelques adresses Internet concernant

les alimentations à découpage :

En « butinant » parmi ces adresses, vous ne manquez pas de trouver d'autres liens utiles.

Si vous désirez obtenir une version électronique de cette liste, n'hésitez pas à me joindre, je vous la transmettrai en retour :

garnero@univ-tln.fr

<http://astroccd.com/terre/audine/cisup1.htm>

http://intra3.crdp-poitiers.cndp.fr/bde/exos/99COU004/fic_alim/part1.htm

<http://www.cie-france.com/cie1909.html>

<http://www.darwind.com/index.htm>

http://www-leg.ensieg.inpg.fr/them_ep01.html

<http://www.interlinx.qc.ca/~aboivin/bca3.html>

<http://www.bmen.com/ref/meanwell/pd45schm.htm>

<http://perso.clubinternet.fr/lecab/depannage/index.html>

<http://ourworld.compuserve.com/homepages/jmichelet/alimpelt.htm>

http://artic.ac-besancon.fr/Sciences_Physiques/presentations/convertisseur_fly-back/fly-back.htm

<http://www.eudil.fr/forumsc/forumsc.htm>

<http://perso.cybercable.fr/tophe/tvht.html>

http://www.electron.cndp.fr/documents/Ressources/Contributions/alimdec/mod_vorp.pdf

<http://www.users.skynet.be/copperbenelux/electric5.htm>