

Introduction aux alimentations linéaires et aux alimentations à découpage

Par
Guillaume Bolbenes
Guillaume Chefi
Matthieu Tardivon

élèves ingénieurs à Télécom ParisTech
mars 2012

1. Principe des alimentations

- **Définition des notations :**

Dans tout le document, nous utiliserons les symboles définis ci-dessous.

V_s : Tension en sortie de l'alimentation

V_e ou V_g : Tension en entrée de l'alimentation

I : Courant débité par l'alimentation

- **Généralités sur les alimentations**

Un alimentation est un dispositif qui, à partir d'une source d'énergie, fournit une tension aussi indépendante que possible du courant débité [1]. L'alimentation doit avoir une impédance de sortie nulle et doit respecter $V_s=V_0$ quelque soit I , où V_0 est la tension de sortie souhaitée.

On a donc :

$$dV_s = \frac{\partial V_s}{\partial V_e} \cdot dV_e + \frac{\partial V_s}{\partial I} \cdot dI$$

Deux valeurs intéressantes apparaissent dans cette équation :

Un coefficient de stabilité : $\frac{\partial V_s}{\partial V_e}$

L'impédance de sortie : $\frac{\partial V_s}{\partial I}$

Une alimentation idéale a ces deux coefficients nuls.

Une alimentation doit faire face à de nombreuses contraintes et doit respecter ses obligations. Lors d'un pic de consommation, la tension de sortie doit être maintenue le plus stable possible. Dans un système embarqué, les alimentations ont un rôle critiques, elles doivent respecter entre autres des contraintes de stabilité, de précision, d'efficacité et de coût.

Dans la suite de ce document, nous ne nous intéresserons qu'aux alimentations en tension continue.

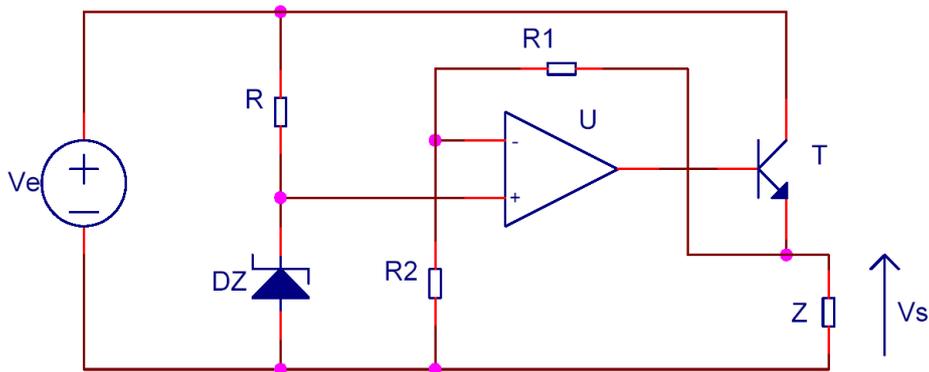
Les alimentations sont divisées en deux catégories :

- Les alimentations linéaires qui ont l'avantage d'être simples et relativement stables mais qui ont un faible rendement.
- Les alimentations à découpage qui ont un rendement élevé mais qui sont très complexes et dont la stabilité est difficile à obtenir, elle nécessite un asservissement.

2. Description et comparaison des deux types d'alimentation

- **Alimentations linéaires**

Le principe des alimentations linéaires est simple, la tension de sortie est obtenue en dissipant thermiquement une partie de la puissance d'entrée. Par conséquent, on a nécessairement $V_s < V_e$.



Alimentation linéaire.
Illustration issue du cours d'introduction aux alimentations d'Alexis Polti

Chacun des composants présents dans le schéma précédent possède un rôle bien défini. La résistance R permet la dissipation thermique de la puissance d'entrée alors que la diode Zener (DZ) permet de réguler la tension de sortie et permet d'avoir une protection contre les surtensions. Le transistor NPN T , quant à lui, permet de réduire l'impédance de sortie et d'augmenter le courant de sortie, on peut l'imaginer comme un « robinet », plus Z est faible, plus le circuit demande d'intensité, le transistor NPN fournit alors l'intensité nécessaire pour garder une tension constante. R_1 et R_2 forment un pont diviseur de tension sur V_s , donc les variations de V_s influent sur la sortie de l'amplificateur opérationnel qui contrôle T . De plus, l'amplificateur a pour tension de référence la tension régulée par DZ . C'est pourquoi on peut dire que la tension V_s est asservie.

Ce circuit est insuffisant, il faut lui rajouter une protection contre les courts-circuit et en cas d'oscillations, il faut rajouter une capacité en sortie afin de filtrer les petites oscillations de la tension de sortie.

- **Alimentations à découpage**

Contrairement aux alimentations linéaires où on dissipe la puissance d'entrée, les alimentations à découpage ont pour but de limiter les pertes en n'intégrant aucun élément dissipatif dans leur circuit.

Pour que ce type d'alimentation fonctionne, on procède en deux phases, une phase de charge des selfs ou des capacités et une phase de décharge. A l'aide d'un interrupteur, sur une période T , on va faire en sorte que la tension de sortie soit égale à V_e pendant un temps $D \cdot T$ et égale à 0 pendant un temps $(1-D) \cdot T$ avec $0 < D < 1$. D est appelé le rapport cyclique, c'est le facteur qui va déterminer quelle sera la tension de sortie.

On obtient donc le diagramme temporel ci-dessous.

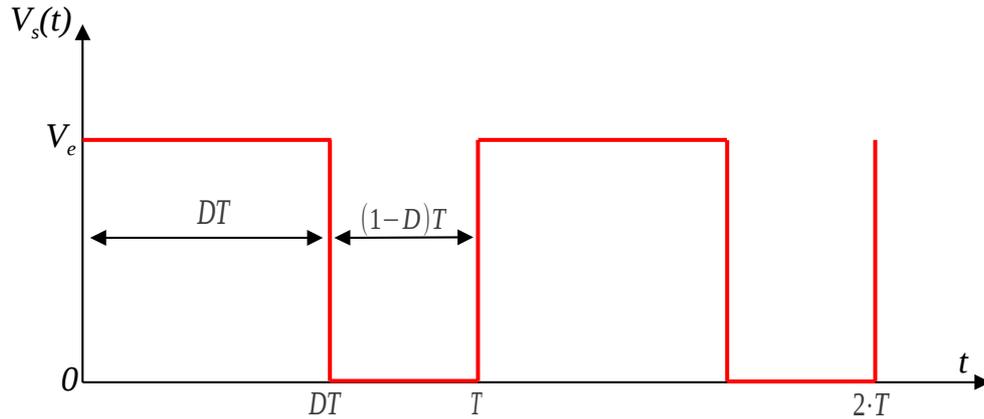


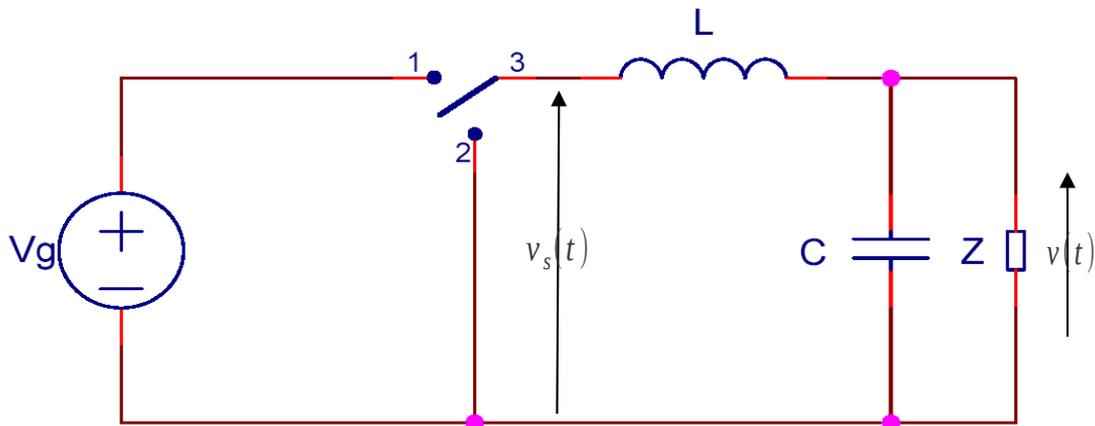
Diagramme temporel d'une alimentation à découpage en deux phases.
Illustration issue du cours d'introduction aux alimentations d'Alexis Polti.

La tension moyenne $\langle V_s \rangle$ est déterminé par le calcul suivant (cas du modèle Buck) :

$$\langle V_s \rangle = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_1}^{t_1+T} V_s(t) dt$$

$$\langle V_s \rangle = D \cdot V_e$$

Cependant, ce découpage en deux phases introduit des harmoniques (du à la fréquence de découpage). Afin d'obtenir la tension de sortie moyenne (ordre 0), un filtre passe bas est ajouté au circuit afin d'éliminer les harmoniques d'ordre supérieur. Ce filtre passe bas peut être uniquement composé d'une inductance et d'un condensateur. Les éléments du filtre ainsi que l'interrupteur étant des éléments non dissipatifs, on en conclut que le rendement théorique de l'alimentation à découpage est de 1.



$$v(t) \approx \langle v_s \rangle = D \cdot V_g$$

Alimentation à découpage, modèle Buck.
Illustration issue du cours d'introduction aux alimentations d'Alexis Polti

Tous ces avantages face aux alimentations linéaires cachent une forte complexité quand à l'obtention d'une tension de sortie stable. Afin de stabiliser la tension de sortie, on peut ajouter une boucle de contre-réaction qui modulerait la valeur de D en fonction de la tension $V(t)$. Cela implique d'étudier la stabilité de la boucle de contre-réaction, d'où la complexité du système. Nous nous intéresserons à cet asservissement dans une section ultérieure.

Bilan récapitulatif :

Caractéristiques	Alimentation linéaire	Alimentation à découpage
Taille et poids	Grosse et lourde, elle doit pouvoir dissiper la chaleur	Beaucoup plus léger et plus petit
Tension de sortie	$0 < V_s < V_e$	V_s peut être plus grand que V_e et peut même être négative
Stabilité et rendement	« Bonne stabilité » Rendement mauvais (de l'ordre de 40%)	Stabilité difficile à obtenir Rendement théorique de 1
Complexité	Simple	Complexe
Rayonnement	Faible	Important à cause des oscillations
Bruit acoustique	Généralement inaudible	Dépend de la fréquence de découpage et des oscillations de l'asservisseur. Peut être gênant.

3. Etude des alimentations BUCK, BOOST et BUCK-BOOST

Comme nous l'avons dit précédemment, le principe d'une alimentation à découpage consiste à contrôler la valeur moyenne d'un signal sur une période (que l'on note T_s), en maintenant le signal à une valeur (en l'occurrence, V_g) pendant un certain temps (par définition: $D \cdot T_s$) puis à 0 pendant le reste de la période ($(1-D) \cdot T_s$ donc). Reste donc à moyenner le signal obtenu. Étant donné qu'un signal peut se décomposer en la somme de ses harmoniques, et que sa valeur moyenne est l'harmonique d'ordre 0, on peut donc utiliser un filtre passe-bas afin de ne conserver que la valeur moyennée du signal. La méthode la plus simple pour réaliser un filtre passe-bas d'ordre 2 consiste à utiliser un circuit LC. La tension au borne de la capacité est alors celle au borne du générateur du circuit à laquelle on aurait appliqué un filtre passe-bas. Ceci impose donc de placer la capacité en parallèle du circuit alimenté.

Toutefois, étant données les caractéristiques particulières d'une alimentation à découpage, à savoir la présence d'un switch, il y a trois possibilités de placement de l'inductance. Ces trois variations correspondent aux montages BUCK, BOOST et BUCK-BOOST. Elles permettent de modifier l'intervalle de valeurs que peut prendre V_s et ainsi d'obtenir une sortie plus "souple" qu'avec par exemple une alimentation linéaire.

Considérons donc $v_s(t)$ la tension aux bornes de la capacité, $V_L(t)$ la tension aux bornes de l'inductance et V_g la tension aux bornes du générateur. Pour les calculs, qui vont suivre, nous allons supposer que $v_s(t)$ est constante. Ceci est pertinent à partir du moment où le circuit LC, qui agit comme filtre passe-bas, possède une fréquence de coupure suffisamment faible. Nous noterons donc dorénavant $v_s(t) = V_s$.

Définissons le rapport : $M(D) = V_s/V_g$.

C'est ce rapport qui est particulièrement important dans le cadre de nos trois montages car il s'agit de la fonction de transfert de notre alimentation. Nous remarquerons d'ailleurs au passage que ce **M ne dépend que de D**, et pas de la fréquence de découpage ou des composants (bien que ceux-ci aient une influence sur la valeur maximale que peut prendre M). En outre, on considérera que le montage fonctionne en régime permanent: l'intensité est donc constante d'une période à une autre, ce qui implique que $\langle V_L \rangle = 0$ (car $V_L(t) = L.d(i)/d(t)$).

Montage BUCK:

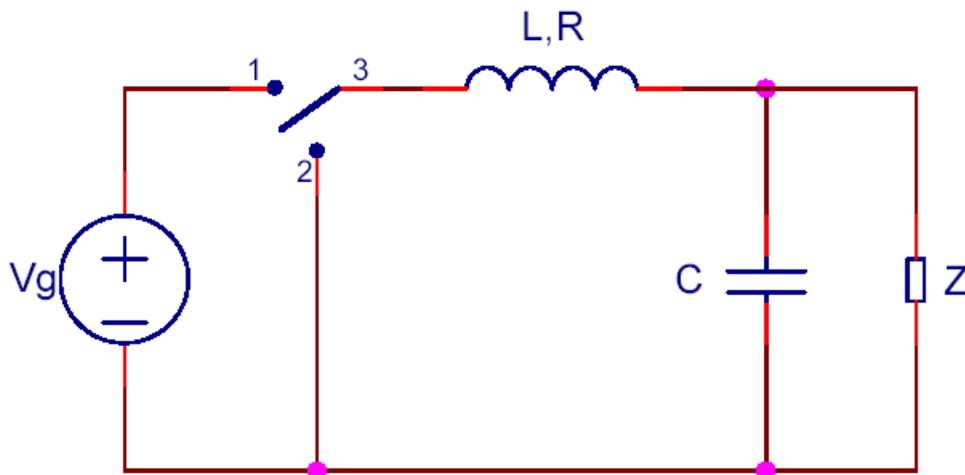


Illustration issue du cours d'introduction aux alimentations d'Alexis Polti

Le fonctionnement se déroule en deux phases.

- La première étape correspond à l'interrupteur dans l'état 1 pour une durée $D \cdot T_s$. Durant cette étape, la selfe et la capacité sont en charge. Elles emmagasine de l'énergie.
- La seconde étape correspond à l'interrupteur dans l'état 2 pour une durée $(1 - D) \cdot T_s$. Dans cette phase, la selfe et la capacité se décharge afin de s'opposer à la variation d'intensité. Elles maintiennent donc la tension constante.

$$\text{Phase 1 : } V_L = V_g - V_s$$

$$\text{Phase 2 : } V_L = -V_s$$

$$\text{En moyenne : } \langle V_L \rangle = D \cdot (V_g - V_s) + (1 - D) \cdot (-V_s) = 0$$

$$\text{d'où } M(D) = V_s/V_g = D.$$

On a donc $0 < V_s < V_g$ ce qui induit de ce point de vue un intervalle comparable à celui qu'on obtiendrait en régime linéaire. Toutefois, cette alimentation ne contient pas de composant dissipatif donc le rendement est largement supérieur à celui d'une alimentation linéaire.

C'est un exemple extrêmement simple d'alimentation à découpage.

Montage BOOST :

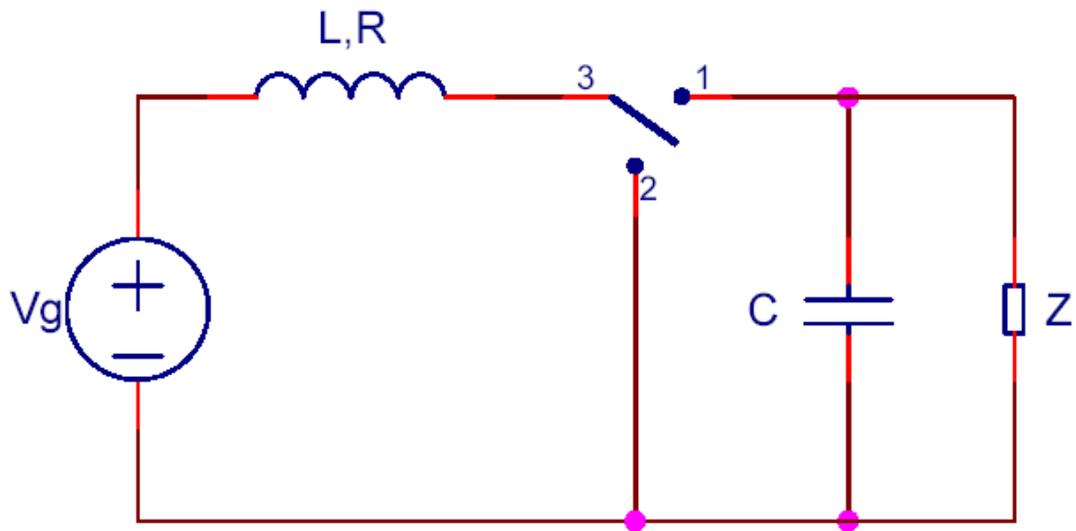


Illustration issue du cours d'introduction aux alimentations d'Alexis Polti

Ce montage fonctionne aussi en deux étapes :

- Durant la première étape, l'interrupteur est en position 2 pour une durée $D \cdot T_s$
- Durant la seconde, il passe en position 1.

Phase 1 : $V_L = V_g$

Phase 2 : $V_L = V_g - V_s$

En moyenne : $\langle V_L \rangle = D \cdot V_g + (1-D) \cdot (V_g - V_s) = 0$

D'où $M(D) = V_s/V_g = 1/(1-D)$

On constate qu'avec ce montage, on obtient une relation du type $V_g < V_s$. On est donc capable de fournir une tension de sortie plus grande que la tension d'entrée, ce dont une alimentation linéaire classique est incapable.

En pratique, cela se fait au détriment du rendement de l'alimentation.

Montage BUCK-BOOST :

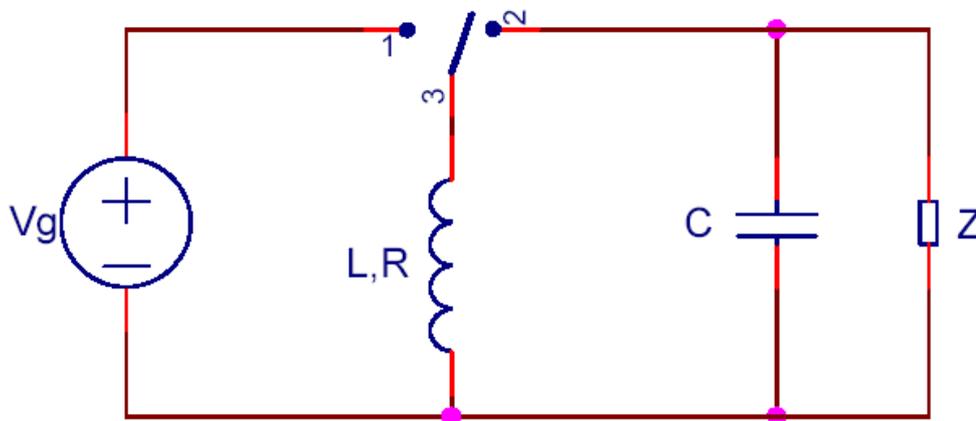


Illustration issue du cours d'introduction aux alimentations d'Alexis Polti

Le fonctionnement du BUCK-BOOST, comme les montages précédents, fonctionne en deux étapes.

- Durant la première étape, l'interrupteur est en position 1.
- Durant la seconde, il est en position 2.

Phase 1 : $V_L = V_g$

Phase 2 : $V_L = V_s$

En moyenne : $\langle V_L \rangle = D \cdot V_g + (1 - D) \cdot V_s = 0$

D'où $M(D) = V_s/V_g = -D/(1 - D)$

Ce montage présente la particularité de fournir une tension négative en sortie (comme si le circuit était muni d'une résistance négative) ce qui n'est pas possible avec une simple résistance (on peut toutefois parvenir à ce résultat ç l'aide d'un amplificateur opérationnel qui permet de jouer le rôle d'une résistance négative).

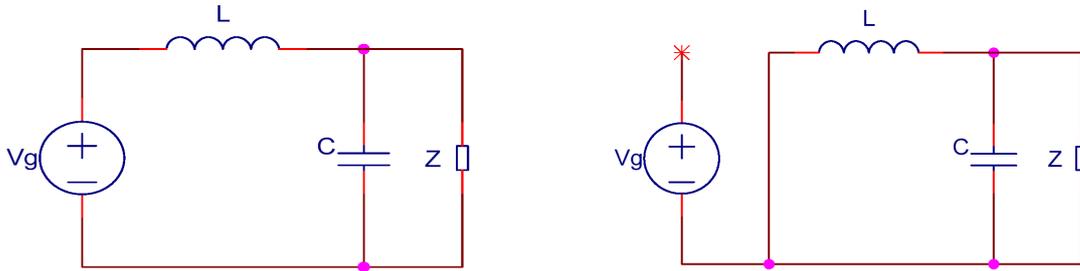
ATTENTION : Pour ces trois types de montage, le choix de la capacité est critique ! En effet, sa résistance interne induit des variations de tensions qui peuvent perturber l'ensemble du circuit. Or, la raison d'être d'une alimentation est de fournir une tension stable en sortie. Il faut donc faire très attention, et on utilise très souvent des condensateurs spéciaux dont la capacité n'a pas grande importance, mais dont la résistance interne est extrêmement faible.

4. mode Continu et mode Discret.

Les alimentations à découpage peuvent fonctionner sur deux modes, le mode continu et le mode discontinu. Cela dépend notamment de la charge de sortie (Z). Plus Z est grande plus le condensateur se décharge vite, s'il se décharge trop vite, nous sommes obligés d'intercaler une troisième phase entre la charge et la décharge afin de continuer à alimenter le système.

- **mode continu (CCM).**

Comme nous l'avons vu précédemment, le mode continu se décompose en deux phases, une phase de charge et une phase de décharge.



Illustrations issue du cours d'introduction aux alimentations d'Alexis Polti

Pendant la phase de charge la self et la capacité emmagasinent de l'énergie. Pendant la phase de décharge, elles libèrent cette énergie de manière progressive afin de limiter les variations de tension en sortie quelque soit l'intensité de sortie et donc quelque soit la charge Z (le condensateur joue le rôle d'un filtre passe bas). Nous noterons que le rapport :

$$M(D) = \frac{V}{V_g}$$

ne dépend que de D, rapport cyclique entre les temps de charge et de décharge.

Ici, le courant varie dans la selfe mais il n'est jamais nul et le condensateur lisse l'intensité de sortie.

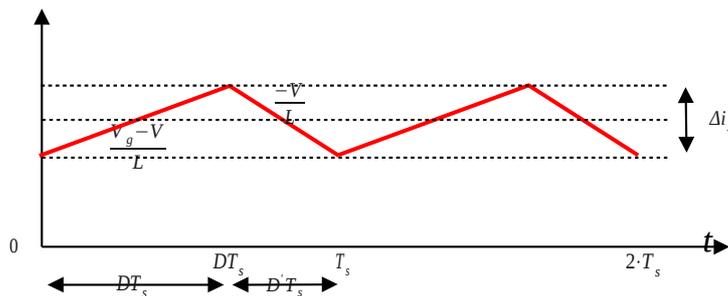


Illustration issue du cours d'introduction aux alimentations d'Alexis Polti

Ici, $i_L(t)$ correspond à l'intensité dans l'inductance, V_g la tension de sortie du générateur et V la tension de sortie supposée constante de l'alimentation.

- **Mode discontinu (DCM).**

Le mode discontinu est une dégénérescence du mode continu dans le sens où l'augmentation de la charge Z nous oblige à créer une troisième phase en plus de la charge et la décharge. Lorsque la charge Z devient trop grande, l'intensité de sortie I_s diminue. Or l'intensité I_s est le courant de sortie de $i_L(t)$ donc i_L s'annule si I_s devient trop faible.

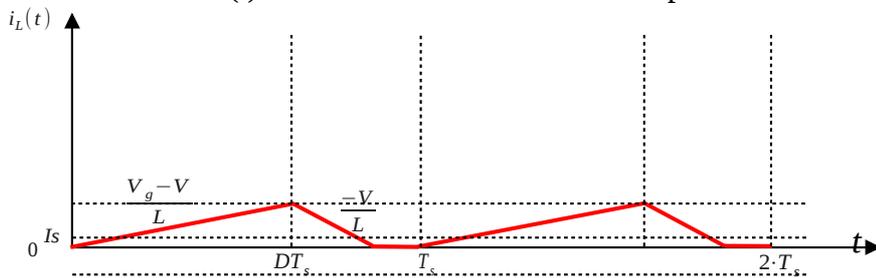
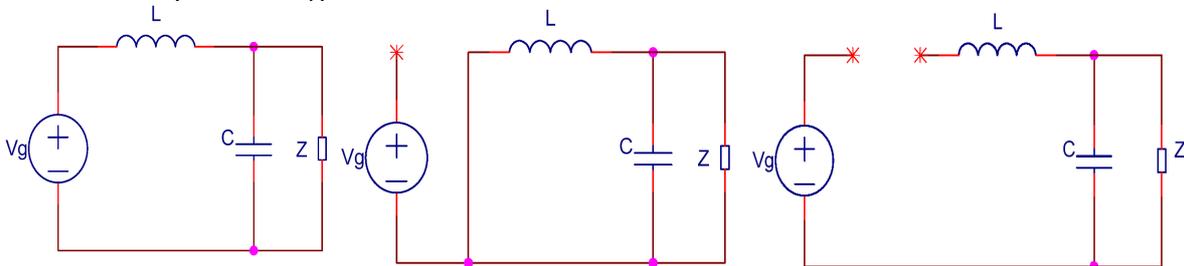


Illustration issue du cours d'introduction aux alimentations d'Alexis Polti

Donc on peut distinguer trois états différents :



Illustrations issue du cours d'introduction aux alimentations d'Alexis Polti

Le troisième état correspond au déplacement de l'interrupteur en position 3. Dans cette situation, le condensateur est le seul à fournir du courant. Car $v_L(t)$ et $i_L(t)$ sont nuls. Donc le système passe en mode DMC lorsque les ondulations de tension ou d'intensité sont trop importantes par rapport à l'intensité fournie, cela bloque l'interrupteur. C'est le cas lorsque I_s est faible. La limite dépend de D car c'est en fonction du rapport cyclique que l'on a une annulation ou non de l'intensité $i_L(t)$.

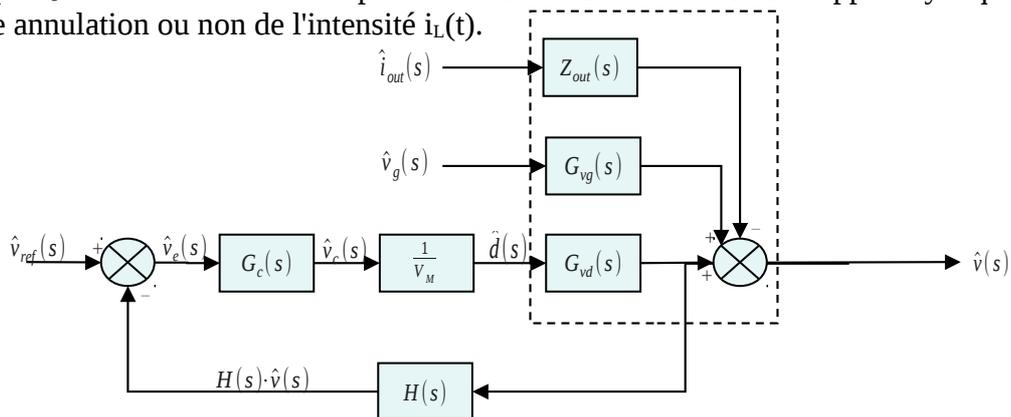


Illustration issue du cours d'introduction aux alimentations d'Alexis Polti

Le mode discontinu est en général moins précis au niveau de la régulation de la tension de sortie, la tension de sortie devient fonction de la tension d'entrée et l'impédance de sortie augmente. Toutefois, les caractéristiques de contrôle permettent un asservissement plus facile de la tension et les composants sont plus petits. De plus, les boost ne sont utilisés généralement qu'en DMC.

5. Asservissement de l'alimentation

- **Objectif de l'asservissement.**

L'objectif de cet asservissement est de rendre V_s (tension de sortie) indépendante de V_g (tension d'alimentation), de I_s (tension de sortie) et des variations des conditions extérieures. Pour cela, nous allons ajouter un module qui modifie D (rapport cyclique) en fonction de la tension de sortie V_s et d'une tension de consigne V_{ref} .

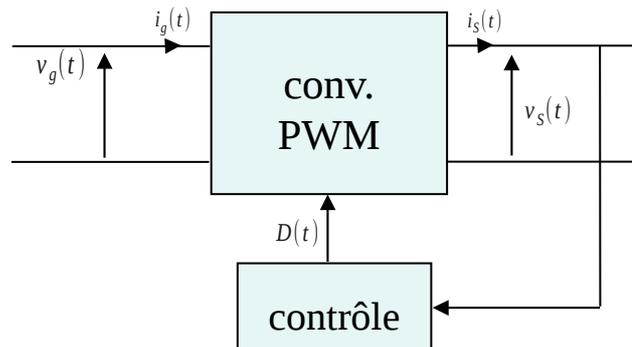


Illustration issue du cours d'introduction aux alimentations d'Alexis Polti

- **Mise en œuvre**

On entre une tension de consigne V_{ref} , cette tension est générée de manière très précise mais seulement pour une intensité très faible par un générateur particulier. C'est pourquoi l'on ne peut s'en servir que de tension de consigne. Ensuite, la valeur de $D(t)$ n'est modifiée qu'une fois par cycle afin d'éviter de suragir aux petites variations de tension durant un cycle, notamment au moment du changement de phase.

- **Fonctions de transfert.**

Nous allons déterminer la fonction de transfert de cet asservissement afin de déterminer V_s en fonction de V_{ref}

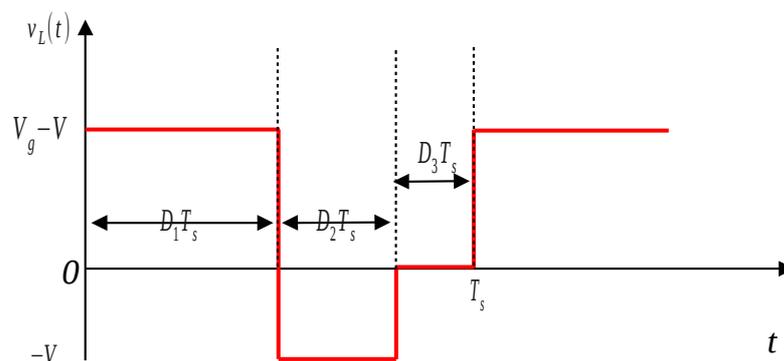


Illustration issue du cours d'introduction aux alimentations d'Alexis Polti

Les variables « v chapeau » et « i chapeau » représente les variations des tensions et des intensités autour de leur valeur moyenne. Ces variations doivent être lentes (on n'évalue la boucle qu'une fois par cycle et elles sont en général faibles). $G_{vd}(s)$, $G_{vg}(s)$, $Z_{out}(s)$ représentent les fonctions de transfert :

$$G_{vd}(s) = \frac{\hat{v}(s)}{\hat{d}(s)} \Big|_{\hat{v}_g(s)=0}$$

$$G_{vg}(s) = \frac{\hat{v}(s)}{\hat{v}_g(s)} \Big|_{\hat{d}(s)=0}$$

La fonction de transfert de la boucle :

$$T(s) = \frac{H(s) \cdot G_c(s) \cdot G_{vd}(s)}{V_M}$$

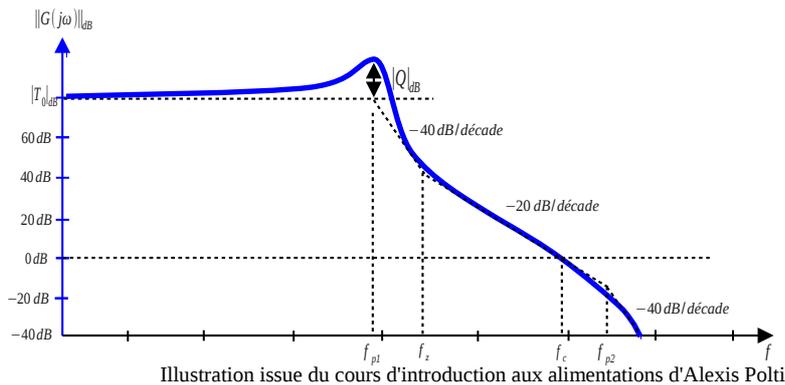
Cela nous permet de trouver des résultats sur la sortie V_s en fonction de V_{ref} , V_g et I_{out} . Donc nous pourrions déterminer dans quelle mesure la boucle limite l'influence des variations de I_{out} , V_g et V_{ref} sur la tension de sortie V_s . Dans ce cas, l'équation donnant V_s en fonctions de V_{ref} , V_g , I_{out} est :

$$\hat{v} = \frac{1}{H} \cdot \frac{T}{1+T} \cdot \hat{v}_{ref} + \frac{G_{vg}}{1+T} \cdot \hat{v}_g - \frac{Z_{out}}{1+T} \cdot \hat{i}_{out}$$

Donc, si T est suffisamment grand nous obtenons $\frac{\hat{v}}{\hat{v}_{ref}} \approx \frac{1}{H(s)}$

Donc les variations de notre tension de sortie ne dépendent que des variations de V_{ref} qui est une tension extrêmement stable et précise. Donc nous sommes parvenus à limiter considérablement les variations de V_s .

Toutefois, cette approximation n'est valable que si T est grand. Regardons l'évolution de la norme de T en fonction de la fréquence.



On constate que T est grand seulement si les fréquences sont basses. Donc plus T est grand, plus la boucle est efficace donc il faut que T soit le plus grand possible.

Remarque :

- Cet asservissement limite aussi bien l'influence de la charge (Z_{out}) aussi bien que l'influence des variations intempestives de V_g . Ainsi notre alimentation aura une tension de sortie fixe quelque soit l'intensité que l'on demande et elle sera de plus résistante aux variations de la tension d'entrée.
- Stabilité de la boucle
Le boucle est stable si et seulement si toute les racines de $T(s)$ sont à partie réelle négative. De plus, il faut que la marge de phase soit supérieure à 50 degrés.

Bibliographie :

- article wikipédia sur les alimentations à découpage :
http://fr.wikipedia.org/wiki/Alimentation_%C3%A0_d%C3%A9coupage
- Cours d'ELECINF 344 : Introduction aux alimentations, par Alexis Polti.
- Etude, choix et dimensionnement des alimentations à découpage usuelles, par Pierre Yves Lechedanec.
- Système électronique, par J Auvray : uniquement la partie sur les alimentations à découpage.