

# MODELISATION DES ALIMENTATIONS A DECOUPAGE PAR LA METHODE DE VORPERIAN

## Sommaire :

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>2</b>
<b>APPLICATION A L'ALIMENTATION FLYBACK.....</b>	<b>2</b>
<b>REGIME ETABLI.....</b>	<b>4</b>
<b>REGIME VARIABLE .....</b>	<b>4</b>
<b>MODELISATION DES PERTES ET DES VARIATIONS DE CHARGE.....</b>	<b>5</b>
<b>REGIME ETABLI.....</b>	<b>5</b>
<b>REGIME VARIABLE .....</b>	<b>5</b>
<b>GENERALISATION .....</b>	<b>7</b>
<b>EXEMPLE D'UTILISATION DU COMPOSANT "ALIMDEC".....</b>	<b>9</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>10</b>

**INTRODUCTION**

Les alimentations à découpage sont généralement équipées d'asservissements, en particulier pour leur tension de sortie. Le dimensionnement de ceux-ci nécessite une connaissance du comportement dynamique des alimentations vis à vis de sollicitations comme la tension d'entrée, le rapport cyclique ou encore la variation de la charge.

Les simulations temporelles ou même les expérimentations ne permettent qu'une détermination très approximative des différentes fonctions de transfert. Il est donc nécessaire de pouvoir modéliser ces alimentations. C'est ce que permet la méthode exposée ici.

Cette méthode, suivant les sources, est connue sous différents noms, modélisation dite "*méthode des schémas équivalents moyens*" (ouvrage de J.-P. FERRIEUX et F. FOREST de chez MASSON) ou dite "*Average Model Techniques*" (Manuel d'utilisation de PSPICE) ou encore "*Modélisation de VORPERIAN*" (PSPICE 5.3 de RIVAT et référence bibliographique du manuel de PSPICE).

La méthode consiste à étudier le comportement de la valeur moyenne sur une période des différentes grandeurs électriques. Pour ceci, on assimile les interrupteurs (transistors et diodes) à des sources de tension ou courant dont la valeur est la valeur moyenne de la tension ou du courant relative à l'interrupteur concerné.

La simplicité de mise en oeuvre de cette méthode repose sur le fait que la période de découpage est généralement très faible devant les vitesses de variations des valeurs moyennes, les constantes de temps des filtres présents dans les montages étant grandes.

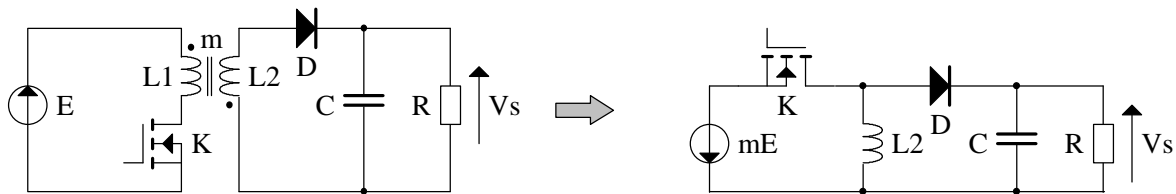
- On se propose, à titre d'illustration, d'appliquer cette méthode au cas d'une alimentation Flyback.
- On verra par la suite que la méthode peut se généraliser aux autres types d'alimentations à découpage à conduction continue (non annulation du courant circulant dans l'élément inductif). Une méthode voisine, décrite dans les ouvrages cités précédemment, peut être utilisée pour les alimentations à conduction discontinue .
- Enfin, on découvrira que cette méthode est bien adapté à l'utilisation avec des outils de simulation. Ceux-ci permettent d'élargir le champ des études possibles.

**APPLICATION A L'ALIMENTATION FLYBACK**

L'alimentation Flyback fonctionne suivant le principe de l'alimentation de type *Inverseuse* à laquelle on aurait ajouté une isolation galvanique par un transformateur.

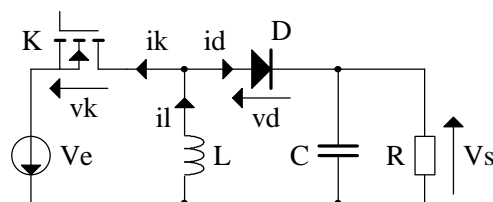
Ces deux types d'alimentation auront donc un comportement dynamique identique.

On peut donc, d'un point de vue du comportement, considérer que les deux montages ci-dessous sont équivalents.



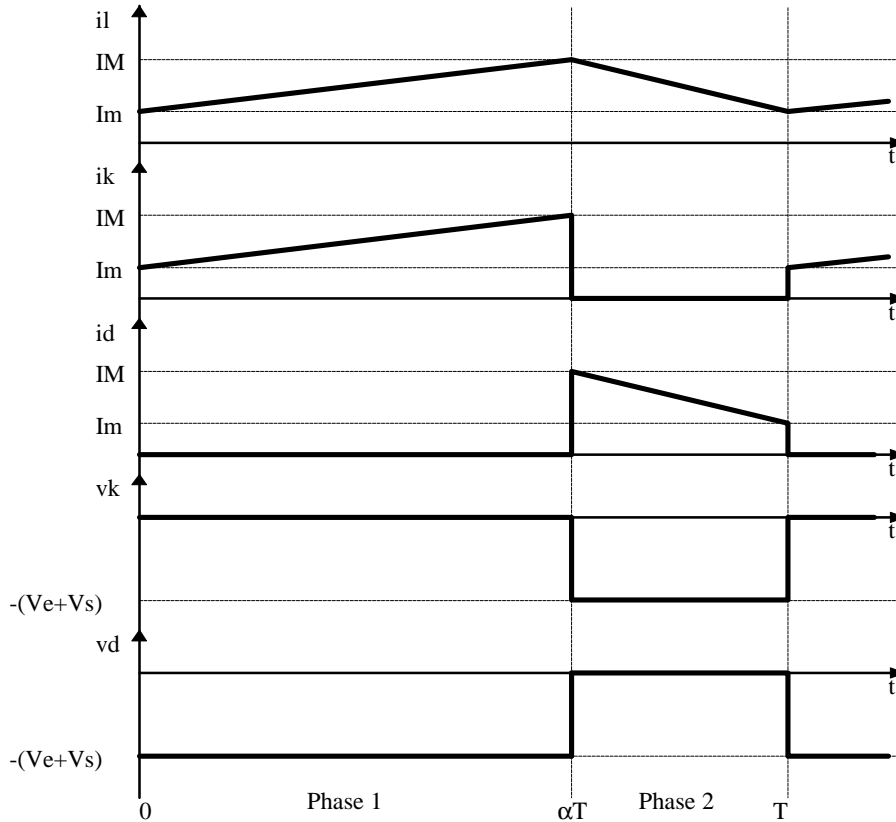
Afin de simplifier l'écriture, on pose  $L = L2$ ,  $Ve = mE$ .

Le schéma de l'étude devient :



L'étude temporelle de ce montage conduit aux chronogrammes donnés ci-dessous qui permettent de déterminer les valeurs moyennes des grandeurs électriques caractérisant les "interrupteurs" (K et D), en fonction :

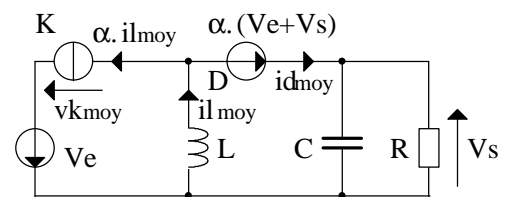
- du rapport cyclique  $\alpha$ ,
- du courant moyen dans la bobine ( $i_{lmoy} = (I_M + I_m)/2$ ),
- de la tension d'entrée  $V_e$  et
- de la tension de sortie  $V_s$ .



- La valeur moyenne du courant circulant dans l'interrupteur K est  $i_{kmoy} = \alpha \cdot i_{lmoy}$ .
- La valeur moyenne du courant circulant dans la diode D est  $i_{dmoy} = (1 - \alpha) \cdot i_{lmoy}$ .
- La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'interrupteur K est  $v_{kmoy} = - (1 - \alpha) \cdot (V_e + V_s)$ .
- La valeur moyenne de la tension aux bornes de la diode D est  $v_{dmoy} = - \alpha \cdot (V_e + V_s)$ .

Si l'on remplace le transistor et la diode par les sources de tension ou de courant adéquates, on peut établir un schéma équivalent moyen tel que celui qui est dessiné ci-contre.

Le calcul des valeurs de  $v_{kmoy}$  et  $i_{dmoy}$ , à partir de ce schéma, donne les mêmes résultats que ceux qui ont été déterminées lors de l'étude temporelle. On aurait donc aussi pu établir un schéma dans lequel l'interrupteur K aurait été remplacé par une source de tension  $(1 - \alpha) \cdot (V_e + V_s)$  et la diode D par une source de courant  $(1 - \alpha) \cdot i_{lmoy}$ .

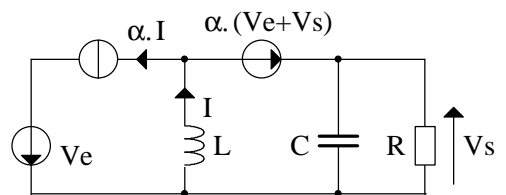


On peut remarquer que le schéma dessiné est celui de la phase 1 dans lequel les interrupteurs fermés (K) sont remplacés par une source de courant d'intensité égale à  $\alpha \cdot i_{lmoy}$  (courant moyen dans la bobine) et les interrupteurs ouverts par une source de tension de valeur égale à  $\alpha \cdot (V_e + V_s)$  (tension aux bornes de l'ensemble formé par K et D).

Ce schéma va donc permettre l'étude de l'évolution de la valeur moyenne des différentes grandeurs électriques du montage.

Pour alléger l'écriture, on pose  $I = i_{lmoy}$ .

Le schéma utilisé devient alors celui qui est donné ci-contre.



**REGIME ETABLI**

Si l'on se place en régime établi (pour le schéma ci-dessus qui ne représente que des valeurs moyennes), la tension aux bornes de la bobine est nulle ainsi que le courant dans le condensateur.

On peut alors écrire que  $V_s = \alpha \cdot (V_e + V_s)$  et donc  $V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot V_e$ . De même  $V_s = R \cdot (I - \alpha I)$  et donc  $I = \frac{\alpha}{R \cdot (1-\alpha)^2} \cdot V_e$

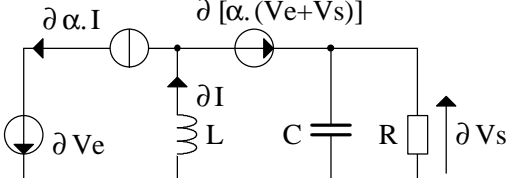
**REGIME VARIABLE**

L'intérêt de ce schéma n'est pas tellement l'étude en régime établi mais surtout l'étude en régime variable autour du point de fonctionnement du régime établi.

Les variations de la tension de sortie dépendent de plusieurs grandeurs. Pour chacune d'entre elles, il faut établir une fonction de transfert. Par exemple, on s'intéresse aux variations de  $V_s$  en fonctions des variations de  $V_e$  puis aux variations de  $V_s$  en fonction des variations de  $\alpha$ .

Le schéma aux variations est donné ci-contre.

On en tire le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \partial V_s = [\partial I - \partial(\alpha \cdot I)] \cdot \frac{1}{\frac{1}{R} + C_p} \\ \partial V_s + L_p \cdot \partial I = \partial[\alpha \cdot (V_e + V_s)] \end{cases}$$


→ Détermination de la fonction de transfert  $\frac{\partial V_s}{\partial V_e}$  :

$\alpha$  est donc constant en fonction de  $V_e$  mais pas  $I$  donc  $\partial(\alpha \cdot I) = \alpha \cdot \partial I$  ( $\alpha$  est constant) et  $\partial[\alpha \cdot (V_e + V_s)] = \alpha \cdot (\partial V_e + \partial V_s)$ .

Le système d'équation devient :

$$\begin{cases} \partial V_s = (\partial I - \alpha \partial I) \cdot \frac{1}{\frac{1}{R} + C_p} \\ \partial V_s + L_p \cdot \partial I = \alpha \cdot \partial V_e + \alpha \cdot \partial V_s \end{cases}$$

L'élimination de  $\partial I$  entre les 2 équations permet d'obtenir  $\frac{\partial V_s}{\partial V_e} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L_p}{R \cdot (1-\alpha)^2} + \frac{L C_p^2}{(1-\alpha)^2}}$

→ Détermination de la fonction de transfert  $\frac{\partial V_s}{\partial \alpha}$  :

$V_e$  est donc constant en fonction de  $\alpha$  mais pas  $I$  donc  $\partial(\alpha \cdot I) = \alpha \cdot \partial I + I \cdot \partial \alpha$  et  $\partial[\alpha \cdot (V_e + V_s)] = (V_e + V_s) \cdot \partial \alpha + \alpha \cdot \partial V_s$ .

Le système d'équation devient :

$$\begin{cases} \partial V_s = (\partial I - \alpha \partial I - I \cdot \partial \alpha) \cdot \frac{1}{\frac{1}{R} + C_p} \\ \partial V_s + L_p \cdot \partial I = (V_e + V_s) \cdot \partial \alpha + \alpha \cdot \partial V_s \end{cases}$$

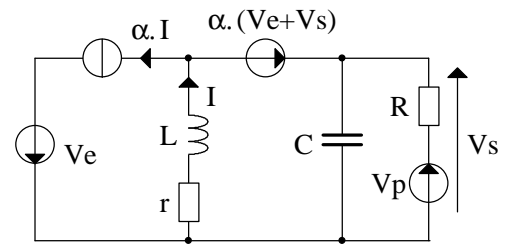
Dans ce système, on voit apparaître les grandeurs  $V_e$ ,  $V_s$ ,  $I$  qui sont des constantes représentatives du point de fonctionnement du montage. On remplace  $V_s$  et  $I$  par leur expression en fonction de  $V_e$  :  $V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot V_e$  et

$$I = \frac{\alpha}{R \cdot (1-\alpha)^2} \cdot V_e.$$

L'élimination de  $\partial I$  entre les 2 équations permet alors d'obtenir  $\frac{\partial V_s}{\partial \alpha} = \frac{V_e}{(1-\alpha)^2} \cdot \frac{1 - \frac{\alpha \cdot L_p}{R \cdot (1-\alpha)^2}}{1 + \frac{L_p}{R \cdot (1-\alpha)^2} + \frac{L C_p^2}{(1-\alpha)^2}}$

**MODELISATION DES PERTES ET DES VARIATIONS DE CHARGE**

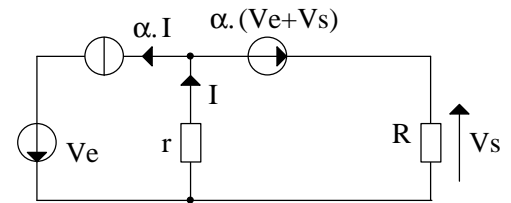
Si l'on souhaite mener une étude encore plus fine, il faut tenir compte des pertes qui ont généralement un effet "d'amortissement".  
 On modélise celles-ci par une résistance "r" en série avec la bobine. La valeur de cette résistance dépend du point de fonctionnement et donc les calculs qui seront fait ne donneront des résultats valables qu'au voisinage de ce point de fonctionnement.  
 Les variations de charge seront modélisées par une source de tension Vp en série avec la résistance de charge.  
 Le schéma de l'étude est alors donné ci-contre.



**REGIME ETABLI**

L'étude statique conduit au schéma simplifié ci-contre.

On obtient alors :  $V_s = \frac{\alpha}{(1-\alpha) + \frac{r}{R \cdot (1-\alpha)^2 + r}} \cdot V_e$  et  $I = \frac{\alpha}{R \cdot (1-\alpha)^2 + r} \cdot V_e$



**REGIME VARIABLE**

L'étude aux variations donne le schéma dessiné ci-contre.

On en tire le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} C_p \cdot \partial V_s + \frac{\partial V_s - \partial V_p}{R} = \partial I - \partial(\alpha \cdot I) \\ \partial V_s + (L_p + r) \cdot \partial I = \partial[\alpha \cdot (V_e + V_s)] \end{cases}$$

→ Détermination de la fonction de transfert  $\frac{\partial V_s}{\partial V_e}$  :

$\alpha$  et  $V_p$  sont donc constants en fonction de  $V_e$  mais pas  $I$  donc  $\partial V_p = 0$ ,  $\partial(\alpha \cdot I) = \alpha \cdot \partial I$  ( $\alpha$  est constant) et  $\partial[\alpha \cdot (V_e + V_s)] = \alpha \cdot (\partial V_e + \partial V_s)$ .

Le système d'équation devient :

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R} + C_p\right) \cdot \partial V_s = (\partial I - \alpha \cdot \partial I) \\ \partial V_s + (L_p + r) \cdot \partial I = \alpha \cdot \partial V_e + \alpha \cdot \partial V_s \end{cases}$$

L'élimination de  $\partial I$  entre les 2 équations permet d'obtenir

$$\frac{\partial V_s}{\partial V_e} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot \frac{1}{1 + \frac{r}{R(1-\alpha)^2}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{(rC + L/R) \cdot p}{(1-\alpha)^2 + \frac{r}{R}} + \frac{LC \cdot p^2}{(1-\alpha)^2 + \frac{r}{R}}}; [1]$$

→ Détermination de la fonction de transfert  $\frac{\partial V_s}{\partial \alpha}$  :

$V_e$  et  $V_p$  sont donc constants en fonction de  $\alpha$  mais pas  $I$  donc  $\partial V_p = 0$ ,  $\partial(\alpha \cdot I) = \alpha \cdot \partial I + I \cdot \partial \alpha$  et  $\partial[\alpha \cdot (V_e + V_s)] = (V_e + V_s) \cdot \partial \alpha + \alpha \cdot \partial V_s$ .

Le système d'équation devient :

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R} + C_p\right) \cdot \partial V_s = (\partial I - \alpha \cdot \partial I - I \cdot \partial \alpha) \\ \partial V_s + (L_p + r) \cdot \partial I = (V_e + V_s) \cdot \partial \alpha + \alpha \cdot \partial V_s \end{cases}$$

Après avoir éliminer  $\partial I$  entre les équations, on remplace  $V_s$  et  $I$  par leur expression en fonction de  $V_e$  et on obtient

$$\frac{\partial V_s}{\partial \alpha} = V_e \cdot R \cdot \frac{r \cdot (1-2\alpha) + R \cdot (1-\alpha)^2}{(r + R \cdot (1-\alpha)^2)^2} \cdot \frac{1 - \frac{\alpha \cdot L \cdot p}{r \cdot (1-2\alpha) + R \cdot (1-\alpha)^2}}{1 + \frac{(rC + L/R) \cdot p}{(1-\alpha)^2 + \frac{r}{R}} + \frac{LC \cdot p^2}{(1-\alpha)^2 + \frac{r}{R}}}; [2]$$

→ Détermination de la fonction de transfert  $\frac{\partial V_s}{\partial V_p}$  :

$\alpha$  et  $V_e$  sont donc constants en fonction de  $V_p$  mais pas  $I$  donc  $\partial V_e = 0$ ,  $\partial(\alpha \cdot I) = \alpha \cdot \partial I$  ( $\alpha$  est constant) et  $\partial[\alpha \cdot (V_e + V_s)] = \alpha \cdot \partial V_s$ .

Le système d'équation devient :

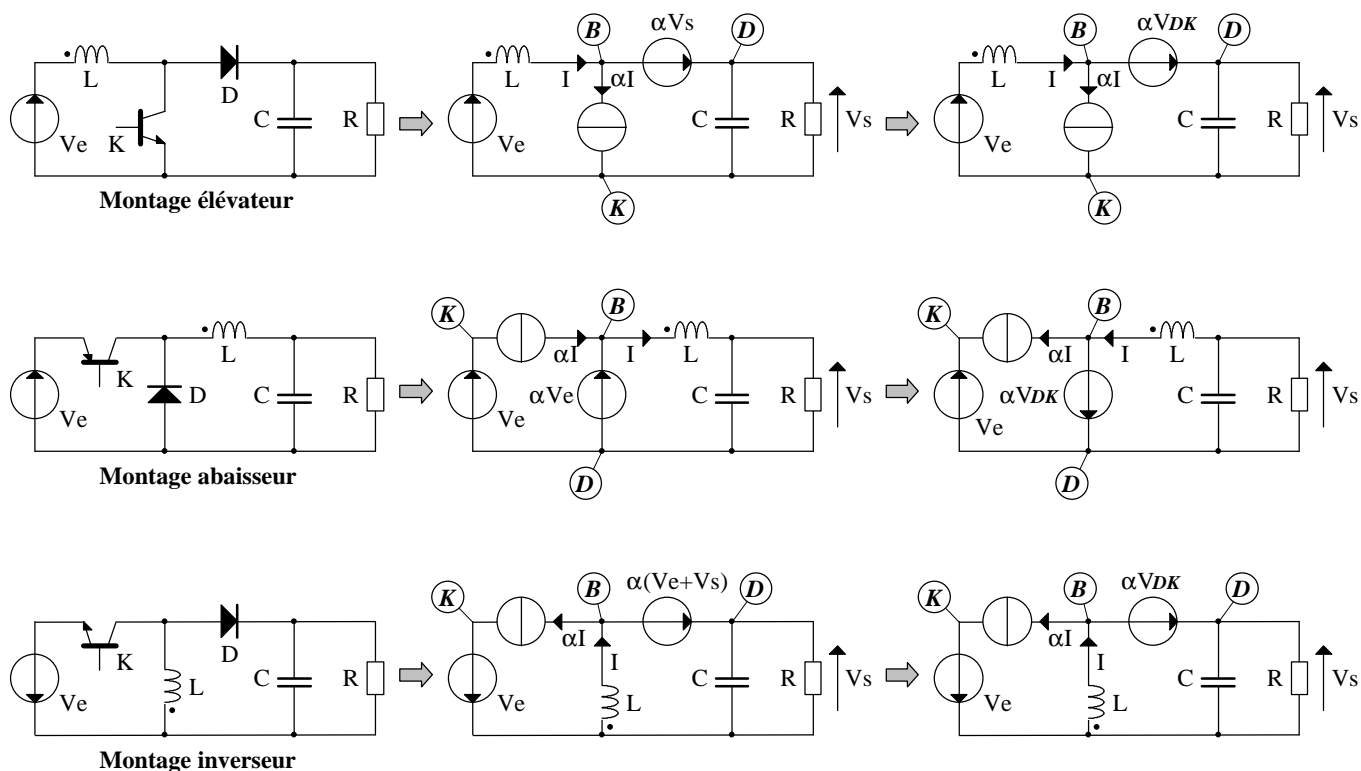
$$\begin{cases} \left( \frac{1}{R} + Cp \right) \cdot \partial V_s - \frac{\partial V_p}{R} = (\partial I - \alpha \cdot \partial I) \\ \partial V_s + (Lp + r) \cdot \partial I = \alpha \cdot \partial V_s \end{cases}$$

L'élimination de  $\partial I$  entre les 2 équations permet d'obtenir  $\frac{\partial V_s}{\partial V_p} = \frac{1}{\frac{R}{r}(1-\alpha)^2 + 1} \cdot \frac{1 + \frac{L}{r} \cdot p}{1 + \frac{(rC + L/R) \cdot p}{(1-\alpha)^2 + \frac{r}{R}} + \frac{LC \cdot p^2}{(1-\alpha)^2 + \frac{r}{R}}}$ ; [3]

**GENERALISATION**

La plupart des alimentations à découpage ont un fonctionnement issu de l'un des 3 montages de base (élevateur, abaisseur, inverseur). L'étude de leur comportement sera donc généralement l'étude d'un de ces 3 montages.

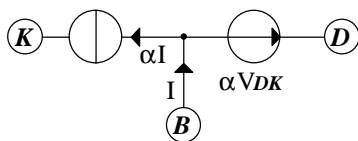
Dans chacun de ces montages on retrouve un ensemble formé d'un interrupteur à commutation commandée (transistor) et d'un interrupteur à commutation spontanée (diode). La figure ci-dessous montre le branchement de cet ensemble ainsi que les valeurs attribuées aux sources de courant et de tension pour chacun des 3 montages.



La dernière transformation fait apparaître pour les 3 montages, exactement le même ensemble, formé d'une source de courant  $\alpha I$  et d'une source de tension  $\alpha V_{DK}$  branchées de la même manière.

Dans le cas d'une étude des montages par le calcul "à la main", les schémas issus de la première transformation sont parfaitement adaptés.

Dans le cas de l'utilisation d'un outil de simulation, on peut créer un composant formé de l'ensemble KDB qui sera valide quel que soit le montage (pour une conduction continue). C'est le modèle que l'on propose ci-dessous.



En plus des 3 bornes  $K$ ,  $B$ ,  $D$  du composant, il faut un moyen d'accéder au réglage de la valeur de  $\alpha$ .

Afin d'offrir le maximum de souplesse dans l'élaboration des schémas de simulation, le paramètre  $\alpha$  est généré à partir d'une tension appliquée sur une quatrième borne ( $C$ ).

Deux paramètres ( $MAX$  et  $MIN$ ) permettent de ramener cette tension de commande à une tension ( $E_{alpha}$ ) comprise entre

$$0V \text{ et } 1V \text{ par l'opération : } E_{alpha} = \frac{V(C) - MIN}{MAX - MIN}$$

$E_{alpha}$  est donc une tension image du rapport cyclique  $\alpha$ .

La description de ce modèle, fournie dans le fichier librairie ALIMDEC.LIB (pour PSPICE) ou ALIMDEC.MOD (pour Viewlogic), est donnée ci-dessous.

```

*-----
*$
**** ALIMDEC ****
*
* Modele des commutateurs des alimentations a decoupage
* a conduction continue par la methode de Vorperian.
* Le modele integre une conversion Tension de commande -> Rapport cyclique
* realisee par une mise a l'echelle. Si MIN=0 et MAX=1 alors
* la tension de commande represente le rapport cyclique.
*
* Params: MIN -> Tension de commande correspondant a un rapport cyclique = 0
*          MAX -> Tension de commande correspondant a un rapport cyclique = 1
*
*
*          |-----Borne relie au transistor
*          |      |----- Borne relie a la diode
*          |      |      |----- Borne relie a la bobine
*          |      |      |      |-- Tension de commande
*          |      |      |
*
.subckt ALIMDEC K D B C Params: MIN=0 MAX=1
  ealpha N 0 table {(v(C)-MIN)/(MAX-MIN)} = (0,0) (1,1)
  galpha M K value {v(N)*i(vil)}
  ekd D M value={v(N)*v(D,K)}
  vil B M 0
  Ralpha N 0 1g
.ends
*-----

```

Le schéma associé à ce modèle, est dans le fichier librairie de schémas de symbole ALIMDEC.SLB pour PSPICE 6.2 version d'évaluation et dans le fichier ALIMDEC.1 pour Viewlogic.

**EXEMPLE D'UTILISATION DU COMPOSANT "ALIMDEC"**

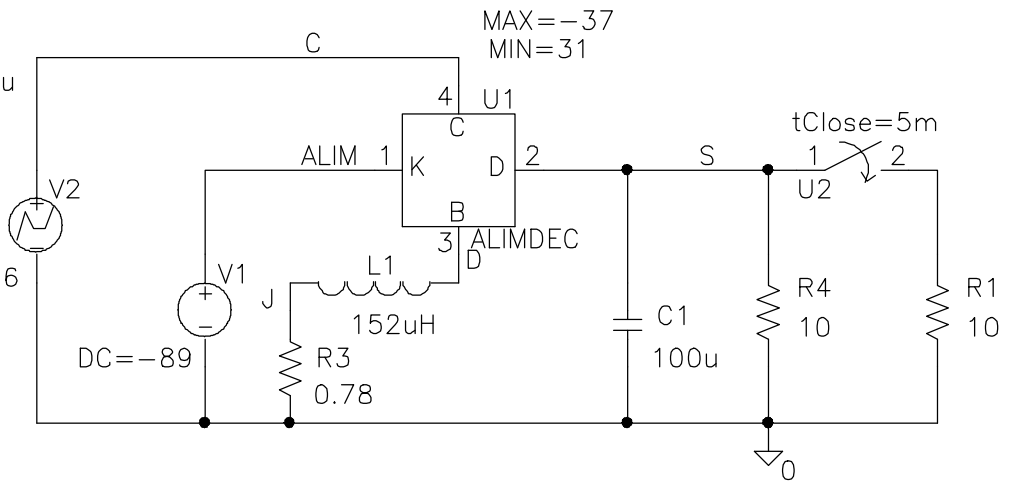
On donne ci-dessous la copie d'un schéma sous PSPICE permettant de simuler le comportement d'un montage Flyback muni de son circuit de commande du rapport cyclique (alimentation secteur d'une imprimante : projet BTS 96-98, Ile de France) en utilisant le composant ALIMDEC.

```

** Analysis setup **
.ac DEC 101 1 100K
.tran 20ns 10m 0 10u
    
```

```

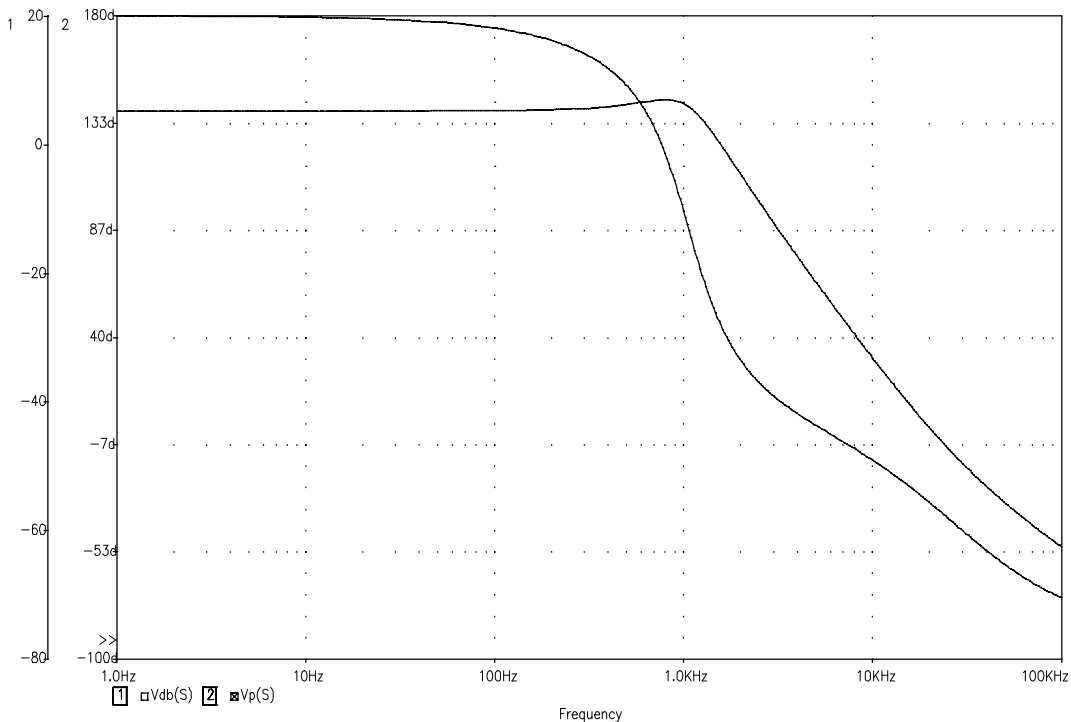
DC=15.36 AC=1
T1=0 V1=17
T2=1m V2=17
T3=1.001m V3=15.36
    
```

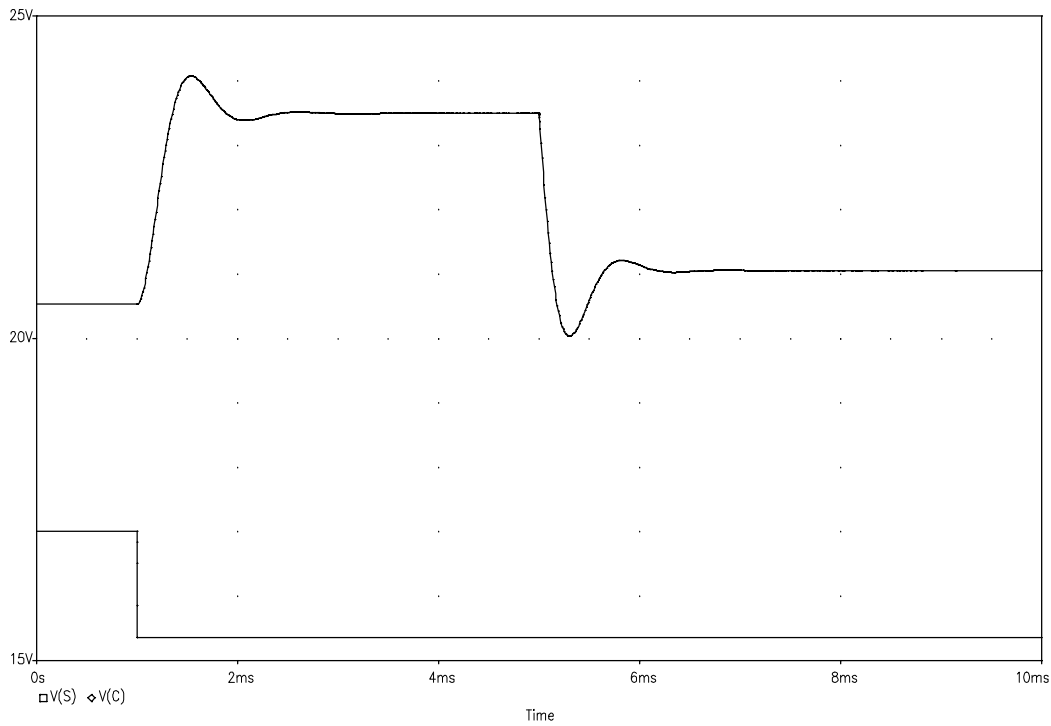


Deux analyses sont demandées :

- une analyse fréquentielle qui permet d'obtenir la fonction de transfert (gain et phase) pour une sollicitation sinusoïdale de la commande du rapport cyclique.
- une analyse transitoire qui fournit la réponse à un échelon de la tension de commande puis la réponse à une variation instantanée de la charge.

On donne ci-dessous les résultats de ces analyses.





**CONCLUSION**

La présentation de la méthode de modélisation des alimentations à découpage à conduction continue qui vient d'être faite, montre qu'il est relativement aisé de déterminer par le calcul les différentes fonctions de transfert tant que leurs composants ont des caractéristiques presque idéales (faible résistance des bobinages, faible tension à l'état fermé et faible temps de commutation des interrupteurs, etc..).

Lorsque l'on souhaite tenir compte des imperfections des composants, la simulation offre une alternative aux calculs qui deviennent très vite fastidieux.

De plus, la simulation permet de simuler le comportement complet de l'alimentation avec sa régulation. Cette dernière peut être représentée aussi bien par sa fonction de transfert (composant LAPLACE) que par son schéma "réel" et elle peut même être de type non linéaire.

Dans tous les cas, l'utilisation de la modélisation de l'alimentation à découpage par le simulateur diminue considérablement les temps de calcul.