

Alimentations continues

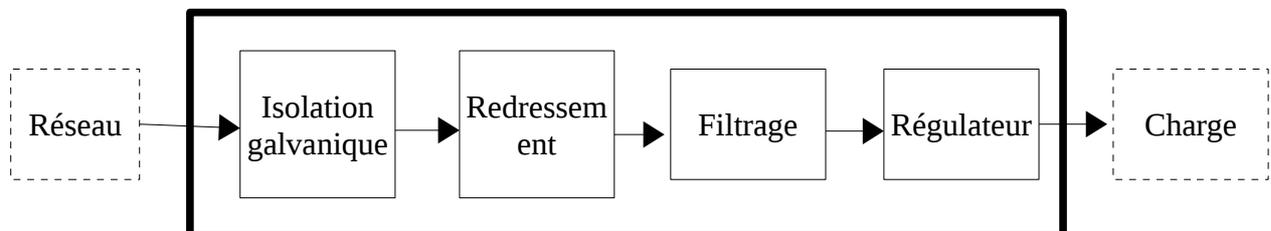
Objectifs du TP

- *Concepts à assimiler*
 - *Caractérisation d'une alimentation continue : le taux d'ondulation et le rendement*
 - *Interprétation des calculs simplifiés (validité) et confrontation à un abaque*
- *Mesures*
 - *Méthode de Thévenin pour la résistance équivalente à la sortie*
 - *Mesure d'une ondulation faible à composante continue importante*
- *Matériel et systèmes étudiés*
 - *redressement double alternance (pont de Graëtz) avec filtrage capacitif*
 - *Comparaison des caractéristiques et performances de différents régulateurs (linéaire à diode zéner seule, linéaire avec diode zéner et transistor ballast, à découpage)*

Introduction et généralités

Le but d'une alimentation continue est de délivrer à un dispositif électrique une ou plusieurs tensions continues. Dans les applications courantes de l'électronique, elle peut délivrer de quelques centaines de milliwatts à plusieurs centaines de watts.

Le schéma bloc classique d'une telle alimentation est le suivant :



Quelques définitions

Il existe deux types de régulateur : les régulateurs linéaires et les régulateurs à découpage. Ces blocs prennent pour entrée une tension redressée mais susceptible d'avoir des fluctuations. En sortie, ils fournissent une tension « parfaitement » continue, indépendantes des fluctuations de charge et de tension d'entrée.

Deux grandeurs caractéristiques permettent de caractériser la qualité d'un régulateur :

- **le rendement du bloc** $\eta = \frac{P_S}{P_E}$, où P_S et P_E désignent la puissance disponible en sortie, respectivement en entrée du bloc.
- **le taux d'ondulation de la tension de sortie** $\beta = \frac{\Delta V_{seff}}{\langle V_s \rangle}$.

I REDRESSEMENT ET FILTRAGE

I.1 Principe de fonctionnement

Le redresseur double alternance à 4 diodes (pont de Graëtz – voir Figure 1) est abordé en cours. Se reporter au polycopié pour des explications détaillées sur son fonctionnement.

L'allure de la tension de sortie V_2 du redresseur sans filtrage (i.e. lorsque la capacité de filtrage C_{alim} est non connectée – $C_{alim}=0$) est donnée Figure 2, courbe en pointillés. Si tous les éléments constitutifs sont supposés parfaits, la valeur moyenne de cette tension s'exprime de la façon suivante :

$$\langle V_2 \rangle = \frac{2 \hat{V}_1}{\pi} = \frac{2 \sqrt{2} V_{1,eff}}{\pi} \text{ où } \hat{V}_1 \text{ et } V_{1,eff} \text{ sont respectivement les valeurs crête et efficace de } V_1.$$

On pourra tenir compte de la chute de tension aux bornes des diodes lorsque celles-ci conduisent en remplaçant \hat{V}_1 par $\hat{V}_1 - 2 V_D$ où V_D est la tension seuil des diodes.

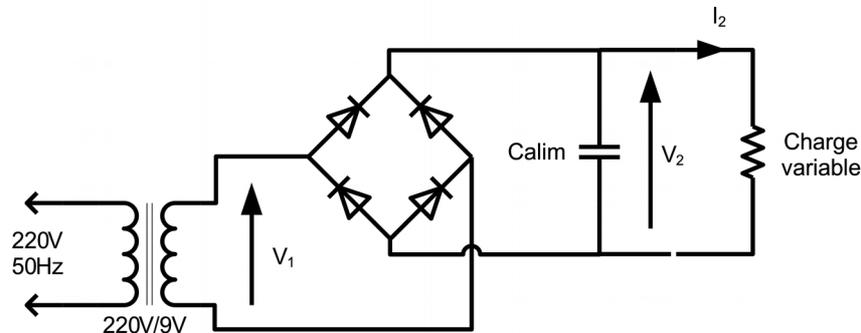


Figure 1: pont de Graëtz pour le redressement double alternance

La capacité C_{alim} permet de filtrer la tension de sortie V_2 . Lorsque l'ensemble débite dans une charge un courant I_2 , la tension de sortie ondule et peut être décomposée en une composante continue $\langle V_2 \rangle$ et une composante variable (ondulation ou « ripple » en anglais) : $V_2 = \langle V_2 \rangle + \Delta V_2$ (voir figure 2). Cette ondulation sera d'autant plus faible que la capacité de filtrage sera grande et le courant de charge faible.

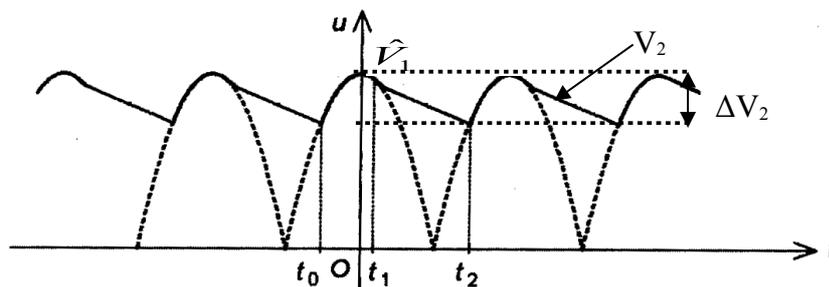


Figure 2: Redressement de tension

Pour calculer l'ondulation de tension en fonction de la valeur de la capacité de filtrage (et ainsi dimensionner la capacité nécessaire), un calcul exact est très compliqué.

Deux méthodes restent possibles : un calcul approché quand l'ondulation est faible ou l'utilisation d'abaques.

• Calcul approché lorsque l'ondulation de tension est faible

Lorsque l'ondulation de tension est faible (ce qui est généralement le cas), les instants t_0 et t_1 sont très proches de l'origine (voir Figure 2) alors que l'instant t_2 est proche de la demie période $T/2$. Si de plus le courant de charge est à peu près constant, on peut faire l'hypothèse d'une décharge à courant constant I_{CH} de la capacité de filtrage sur une demie période, soit :

$$I_2 \simeq C_{alim} \frac{\Delta V_2}{T/2} \text{ d'où } \Delta V_2 = \frac{I_2}{2 f C_{alim}} = \frac{\langle V_2 \rangle}{2 R_{CH} f C_{alim}} \text{ puisque } I_2 = \frac{\langle V_2 \rangle}{R_{CH}}$$

$$\text{De plus : } \langle V_2 \rangle \simeq \hat{V}_1 - 2 V_D - \frac{\Delta V_2}{2} \text{ d'où } \frac{\langle V_2 \rangle}{\hat{V}_1 - 2 V_D} = \frac{4 R_{CH} f C_{alim}}{1 + 4 R_{CH} f C_{alim}}$$

où V_D est la tension de seuil d'une diode et f la fréquence du signal d'entrée

$$\left(f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T} = 50 \text{ Hz} \right)$$

On peut définir le taux d'ondulation :

$$\beta = \frac{\Delta V_{2,eff}}{\langle V_2 \rangle} \simeq \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{\Delta V_2}{\langle V_2 \rangle} = \frac{1}{4\sqrt{3} R_{CH} C_{alim} f}$$

Attention : l'ondulation relative $\Delta V_2 = V_{2max} - V_{2min}$ est différente de la valeur efficace de cette ondulation qui sert à définir le taux d'ondulation, ici on fait l'hypothèse d'une ondulation de courant quasi triangulaire ce qui conduit à écrire que $\Delta V_{2,eff} \simeq \Delta V_2 / 2\sqrt{3}$.

• Utilisation d'abaques valable sans approximation

Il est plus rapide et plus précis d'utiliser des abaques qui ont été tracés sans approximation (ou d'utiliser un simulateur électrique qui donnerait les mêmes résultats). De tels abaques sont donnés en annexe 1.

Le premier graphe (Figure 9) permet de déterminer la valeur moyenne de V_2 ($\langle V_2 \rangle$) en fonction de C_{alim} à \hat{V}_1 et R_{CH} donnés. Le second graphe (Figure 10) précise le taux d'ondulation $\beta = \Delta V_{s,eff} / \langle V_s \rangle$ toujours en fonction de C_{alim} . A noter que dans ces abaques ρ désigne la résistance série de l'ensemble diodes-transformateur (on ajoute parfois volontairement une résistance de faible valeur supplémentaire en série afin de limiter le courant crête circulant dans les diodes).

Les deux abaques qui suivent (Figure 11 et 12) servent à estimer rapidement les courants crêtes et efficaces circulant dans les diodes (et permettent un choix rapide des diodes).

I.2 Travail de préparation (à faire avant la séance)

I.2.a : Cas d'une simple charge résistive (figure 5)

- Tracer sur l'abaque de la Figure 15 du document réponse donnée en fin de texte la courbe correspondant au calcul approché. Préciser pour quelles valeurs de $(R_{CH} C_{alim})$ le calcul approché reste valable. Rq : dans le calcul approché ρ est supposé nul !
- Tracer sur la Figure 16 le taux d'ondulation β_{app} correspondant au calcul approché. Conclure sur la validité de ce calcul approché.

I.3 Mesures à faire en séance : bloc de redressement et filtrage

On utilisera pour cette partie la maquette principale « Alimentations » nue. Alimenter la carte à l'aide du bloc transformateur (prise : sous la maquette).

Etude du redressement seul (Sans capacité de filtrage (Calim=0))

On cherche à caractériser le pont de Graëtz. Pour cela il faudra visualiser et caractériser les tension $v_1(t)$ et $v_2(t)$ pour différentes valeurs de la charge (par exemple pour $R_{CH} = \infty \leftrightarrow I_{CH} = 0$ puis pour $R_{CH} \neq \infty$ par exemple $\langle I_{CH} \rangle = 100mA$).

Quelle précaution faut-il prendre pour visualiser simultanément sur l'écran de l'oscilloscope V_1 et V_2 ? (Attention au risque de court-circuit ; demander à l'enseignant dans le doute!)
A vide (i.e. $R_{CH} = \infty$) visualiser à l'oscilloscope simultanément V_1 et V_2 (même échelle et même origine). En déduire une valeur de V_D .

Visualiser V_2 à vide puis en charge (prévoir un courant de charge élevé mais inférieur à 200mA). Estimer la valeur de la résistance ρ (résistance série de l'ensemble [transfo+diode+Ralim]).

Bien expliquer votre protocole expérimental à chaque fois.

Étude du filtrage (avec C_{alim})

On dispose de 3 cavaliers équipés de 3 valeurs différentes de C_{alim} et d'une charge variable permettant de fixer le courant de sortie (attention cette charge est polarisée, respecter le code couleur rouge pour Vs, noir pour la masse). **On cherche à caractériser l'effet de l'ajout d'une capacité sur la tension de sortie.** La tension $v_2(t)$ sera caractérisée par sa valeur moyenne $\langle V_2 \rangle$ et son ondulation $\Delta V_{2,eff}$ mesurée directement avec l'appareil adapté (pas d'approximation).

Observer $v_2(t)$ à R_{CH} fixé pour les 3 valeurs de C_{alim} disponibles (préciser les appareils utilisés et les réglages effectués). Estimer la valeur moyenne de la tension de sortie et le taux d'ondulation dans chaque cas (bien expliquer votre méthode de mesure). Reporter les points sur les abaques des figures 15 et 16 et conclure.

II REGULATEUR LINEAIRE

II.1 Rappels sur la diode zéner comme référence de tension

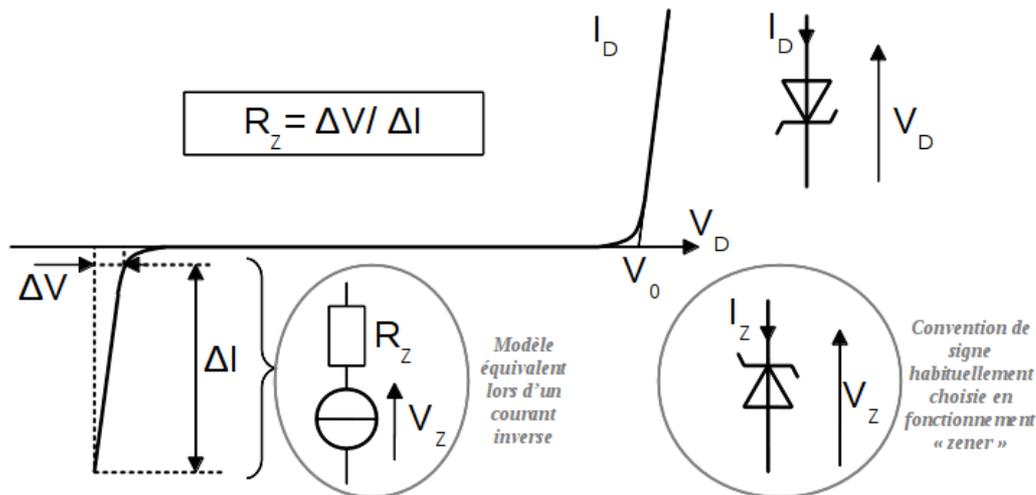


Figure 3: caractéristique d'une diode zéner

La diode zéner est une diode dont on utilise la caractéristique inverse. La tension zéner V_z est la tension inverse pour laquelle le courant inverse croît rapidement (figure 3).

La pente étant raide en polarisation inverse, on néglige souvent R_z . La diode zéner est alors modélisée en inverse par une source de tension parfaite V_z .

II.2 Régulateur élémentaire avec diode zéner seule

Le montage le plus simple pour fabriquer une référence de tension est donné figure 4. La résistance R_1 absorbe la chute de tension $V_2 - V_z$. Pour que ce type de régulateur fonctionne, **il faut que la diode soit polarisée dans sa zone zéner, donc que le courant dans la diode zéner ne s'annule pas quelque soit I_s .**

Le courant maximal que peut débiter ce régulateur est donc limité par $I_{smax} = I_{zmax}$.

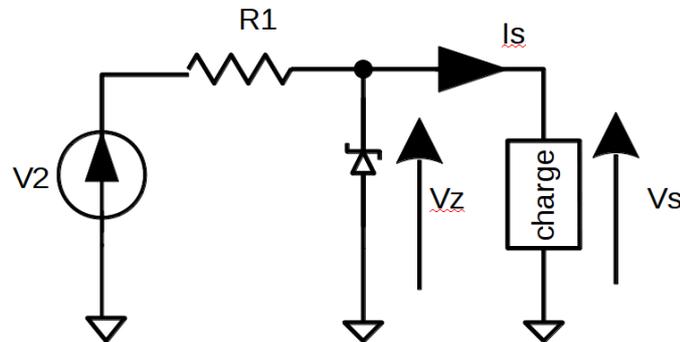


Figure 4: Régulateur linéair avec diode Zéner seule

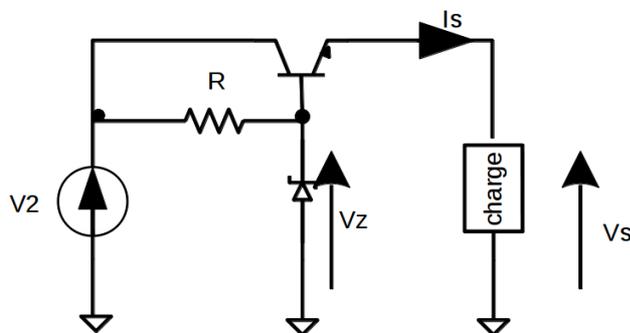


Figure 5: Régulateur linéair avec diode Zéner et transistor ballast

II.3 Régulateur élémentaire avec diode et transistor ballast

Pour augmenter les performances en courant tout en améliorant le rendement du système lorsque le courant de sortie n'est pas maximum, on peut ajouter un transistor « ballast » au montage précédent (voir figure 5). Le transistor est un composant actif dont vous découvrirez le fonctionnement détaillé plus tard en cours.

Il existe également des régulateurs linéaires intégrés.

II.5 Travail de préparation (à faire avant la séance)

Régulateur à diode zéner simple

- Faire un schéma de montage complet (avec appareil de mesure) permettant de mesurer le rendement du régulateur.

On considérera que le courant maximal autorisé pour la diode zéner est $I_{z,max} = 50\text{mA}$. Sa tension zéner est de $5,6\text{V}$. On supposera que la tension V_2 est une tension continue telle que $V_2 = 15\text{V}$.

- Calculer la valeur de R minimale autorisée dans ce montage.

- Calculer le rendement global en pleine charge $I_s = I_{z,max}$
- Quelle est la valeur minimale de VE permettant de garantir une tension stable en sortie ?

II.6 Mesures à faire en séance :

caractérisation et comparaison de régulateurs linéaires

L'objectif est de comprendre le principe de la régulation et de caractériser et de comparer différents régulateurs.

Régulateur simple à diode zéner

On dispose d'une charge variable. On dispose également d'un module à diode zéner qui peut être connecté à la carte mère précédente. Il suffit de le placer dans les plots pourvus à cet effet (attention, ces plots servent également aux contacts électriques entre la carte mère et le module de régulation). Une entrée a été prévue pour connecter un ampèremètre en entrée (présence obligatoire).

Attention à ne pas faire claquer le fusible en diminuant trop R_{CH} (respecter les 200mA max dans la charge) !

On cherche à caractériser le fonctionnement de ce régulateur. Faire quelques essais et expliquer qualitativement quel est l'effet d'un changement de la charge à C_{alim} fixée ? Même question pour un changement de la capacité de filtrage si R_{CH} est fixé. Observer simultanément les tensions V_2 et V_S à l'oscilloscope (mêmes échelles, mêmes origines) et déterminer la tension d'entrée minimum garantissant une régulation de la tension de sortie (utiliser le travail de préparation ci-dessus pour interpréter).

Mesurer et tracer le rendement du régulateur et le taux d'ondulation de la tension de sortie en fonction du courant de charge (max 200mA) pour la valeur de C_{alim} maximum.

Conclure quant au rôle et aux limites de fonctionnement de ce premier régulateur.

Régulateur à transistor ballast

On dispose de la même charge variable.

On dispose également d'un module à diode zéner et transistor ballast qui peut être connecté à la carte mère précédente.

On cherche à caractériser le fonctionnement de ce deuxième régulateur. Mêmes questions que pour le régulateur simple à diode zéner.

Conclure quant au rôle et aux limites de fonctionnement de ce deuxième régulateur.

Comparer les deux types de régulateurs.

III REGULATEUR A DECOUPAGE

III.1 Principe

Dans les alimentations à découpage on cherche à optimiser le rendement du convertisseur. Pour cela on utilise des éléments non dissipatifs : interrupteurs (ceux-ci sont en général des MOSFET et des diodes qui fonctionnent en commutation), inductances, capacités,

transformateurs. Si tous ces éléments sont parfaits, le rendement théorique du convertisseur est de 100%.

De nombreuses structures existent, le choix d'une structure dépend des besoins (montages élévateurs ou abaisseurs de tension, montages isolés ou non...). Les principales structures rencontrées dans les alimentations pour l'électronique sont les structures BUCK, BOOST, BUCK-BOOST, CUK, CETIP, FORWARD, FLYBACK. Nous analyserons ici seulement la structure la plus simple (BUCK) qui est un convertisseur abaisseur de tension non isolé.

III.2 Rappel sur le fonctionnement du hacheur abaisseur (« BUCK ») ou hacheur série

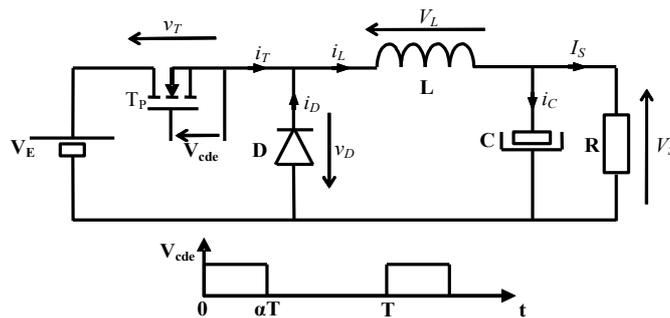


Figure 6: circuit équivalent du hacheur abaisseur

On se reportera à l'annexe 2 pour les détails du fonctionnement dans chacune des deux phases (interrupteur T_p ouvert ou fermé). Il est important de bien comprendre les hypothèses retenues ; celles-ci peuvent toujours être prises en compte et permettent à chaque fois de simplifier beaucoup l'étude en rendant les équations de fonctionnement dans chaque phase très simples.

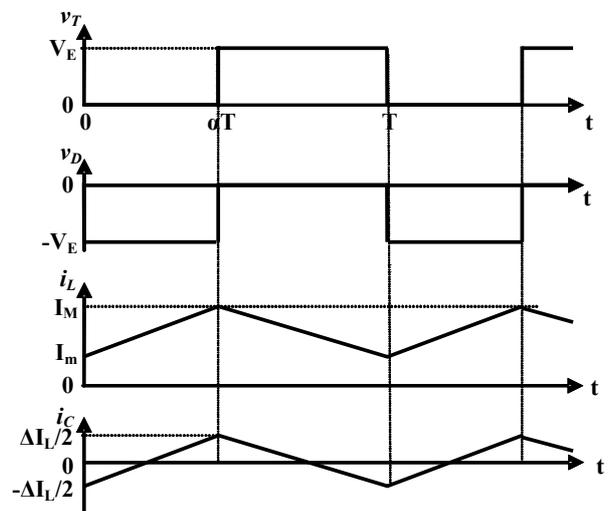


Figure 7: chronogrammes pour le circuit en Figure 6

Hypothèses :

Tous les éléments sont parfaits, le régime est établi (i.e. toutes les grandeurs électrique sont sinusoïdales), la tension de sortie est parfaitement filtrée (V_s supposée constante car C très grande) et la conduction est continue (le courant dans l'inductance ne s'annule jamais).

Les chronogrammes théoriques sont donnés figure 8.

Remarque sur le courant $i_C(t)$:

Le courant circulant dans la capacité de filtrage correspond à la composante variable de i_L car C est supposée assez grande pour que V_S soit supposée constante ($\tilde{v}_S \ll V_S$).

Bilan : $V_S/V_E = \alpha$, $\Delta i_L = \frac{V_E}{L} \alpha (1 - \alpha) T$ et $V_{Tmax} = V_E$.

Limite de conduction continue :

L'hypothèse de conduction continue est vérifiée si $I_m > 0$ ou encore si $I_S > \frac{\Delta i_L}{2}$. En effet,

$I_S = \langle i_L \rangle = \frac{I_M + I_m}{2}$ puisque $\langle i_C \rangle = 0$. Donc la limite de conduction continue correspondant à

$I_m = 0$ s'exprime par $I_S = \frac{I_M}{2} = \frac{\Delta i_L}{2}$.

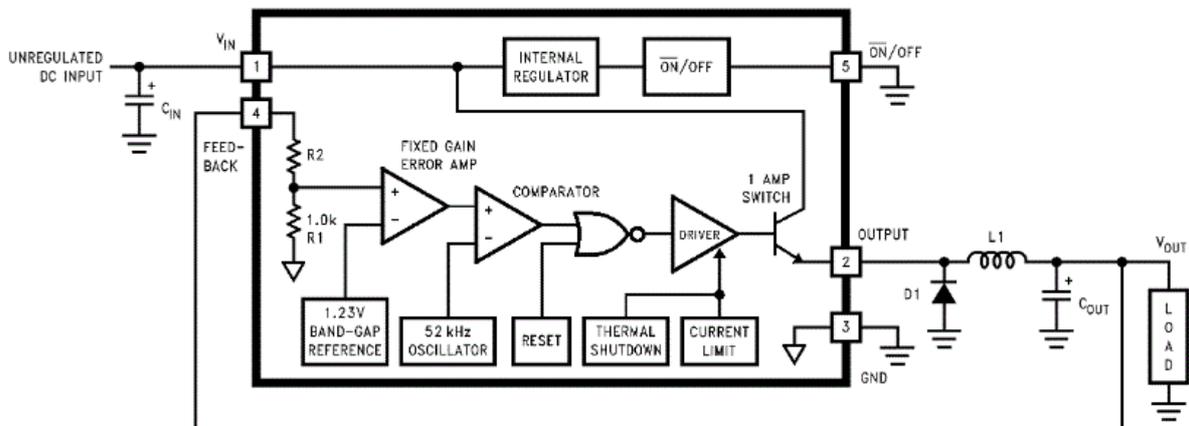
III.3 Mesures

On dispose d'un module alimentation à découpage (le schéma de ce module est donné figure 9). Les branchements sont compatibles avec ceux des précédents modules. On pourra conserver le même câblage externe pour ce qui concerne les mesures des courants et tensions moyens et la charge. Il sera possible sur cette carte de visualiser un certain nombre de grandeurs à l'oscilloscope et en particulier de visualiser les courants i_D et i_C en mesurant la tension aux bornes de résistances de faibles valeurs (1Ω) placées respectivement en série avec la diode et le condensateur de sortie.

Régler la charge de façon à obtenir un courant I_S proche de 100mA (on conservera $C_{lim} = 220 \mu F$).

- Mesurer les tensions et courants moyens en entrée et sortie et en déduire le rendement de l'alimentation pour ce point de fonctionnement. Comparer aux résultats de l'alimentation linéaire et conclure.*
- Mesurer l'ondulation résiduelle de sortie et estimer le taux d'ondulation du montage pour ce réglage ($I_S = 100mA$). Comparer aux taux d'ondulation mesurés dans les montages précédents.*
- Visualiser à l'oscilloscope et tracer les chronogrammes de $i_D(t)$, $i_C(t)$ et $v_D(t)$. Expliquer succinctement les différentes phases observées et déduire des pentes des courants la valeur de l'inductance du montage. Préciser la valeur de α .*
- Vérifier la relation de Δi_L pour ce point de fonctionnement.*

Block Diagram and Typical Application



3.3V, R2 = 1.7k
 5V, R2 = 3.1k
 12V, R2 = 8.84k
 15V, R2 = 11.3k
 For ADJ. Version
 R1 = Open, R2 = 0Ω
 Pin numbers are for the TO-220 package.

Figure 8: Schéma du montage étudié, tiré de la notice constructeur du circuit LM2575. Des résistances de 1Ω ont été placées en série avec la diode D1 (D sur la figure 7) et la capacité COUT (C sur la figure 7) afin de pouvoir visualiser les courants correspondants à l'oscilloscope

Annexe 1

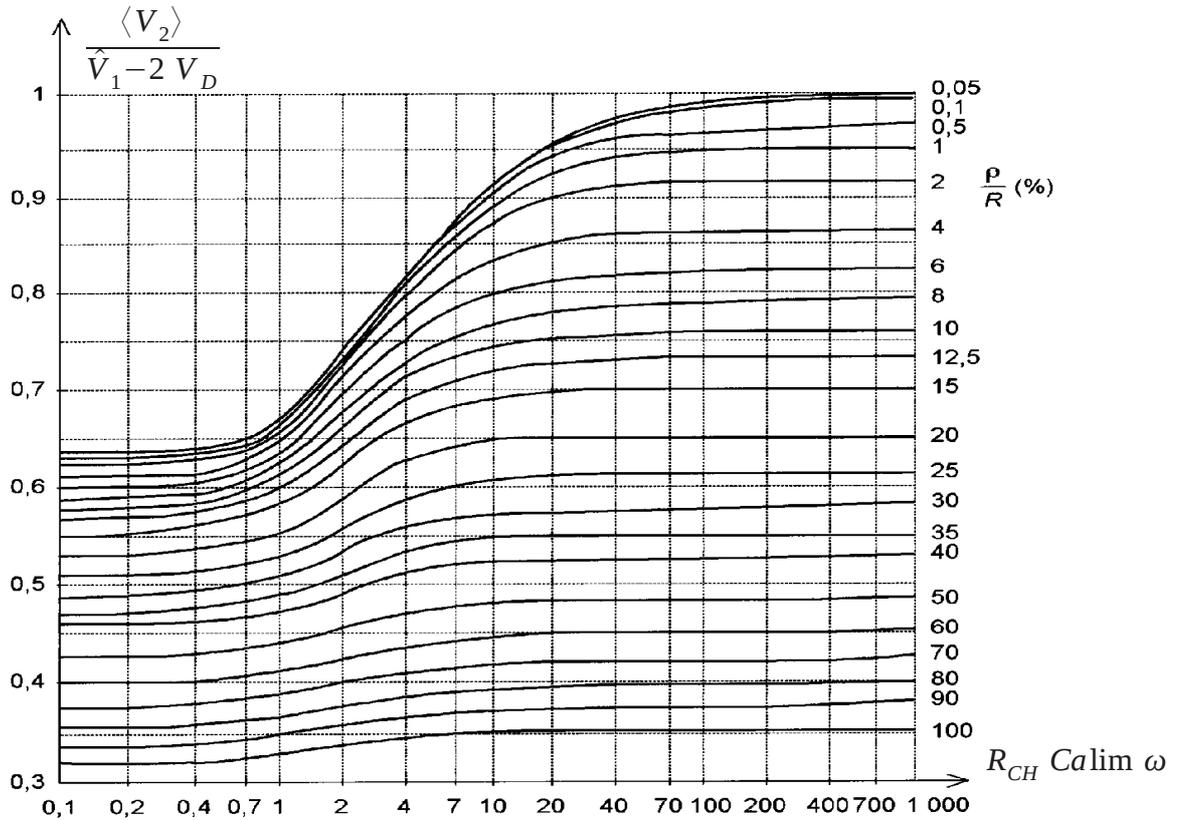


Figure 9: Rapport tension moyenne de sortie sur amplitude d'entrée diminuée des tensions de seuil des diodes (cas du pont simple ou du pont double) en fonction de $R_{CH} C_{alim} \omega$ paramétré en ρ/R_{CH}

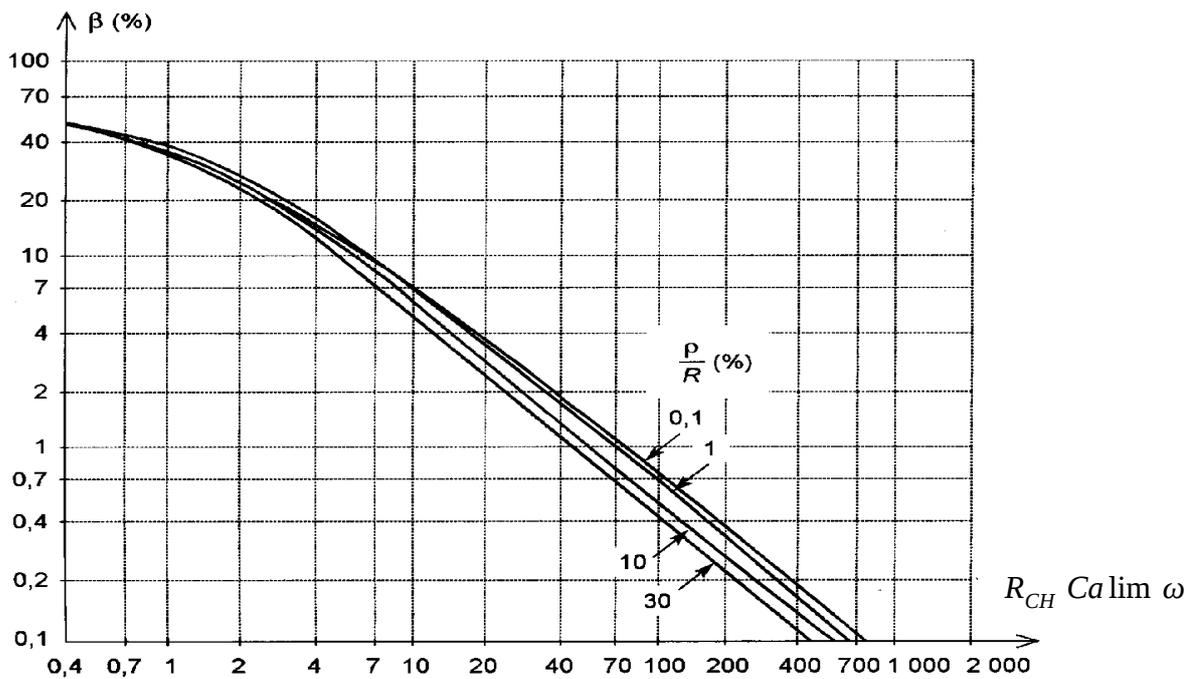


Figure 10: Taux d'ondulation en fonction de en fonction de $R_{CH} C_{alim} \omega$ paramétré en ρ/R_{CH}

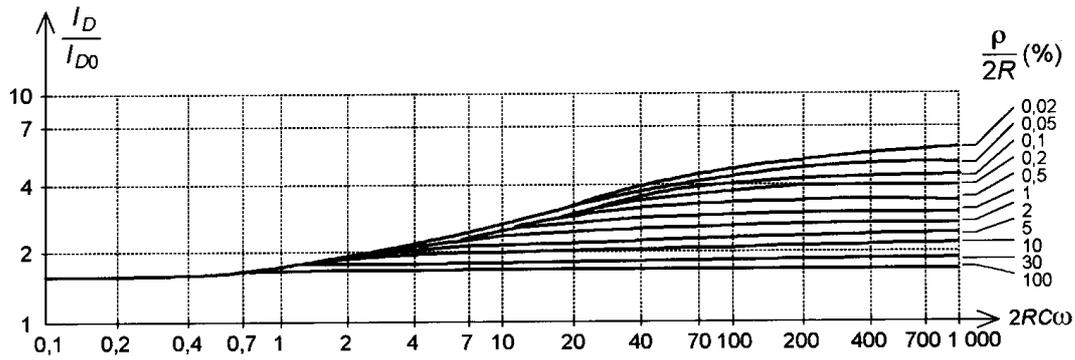


Figure 11: Rapport de l'intensité efficace à l'intensité moyenne dans une diode en fonction de $RC\omega$ paramétré en $\rho/2 R_{CH}$ [extrait de « Les alimentations électroniques » de Pierre Mayé - DONOD]

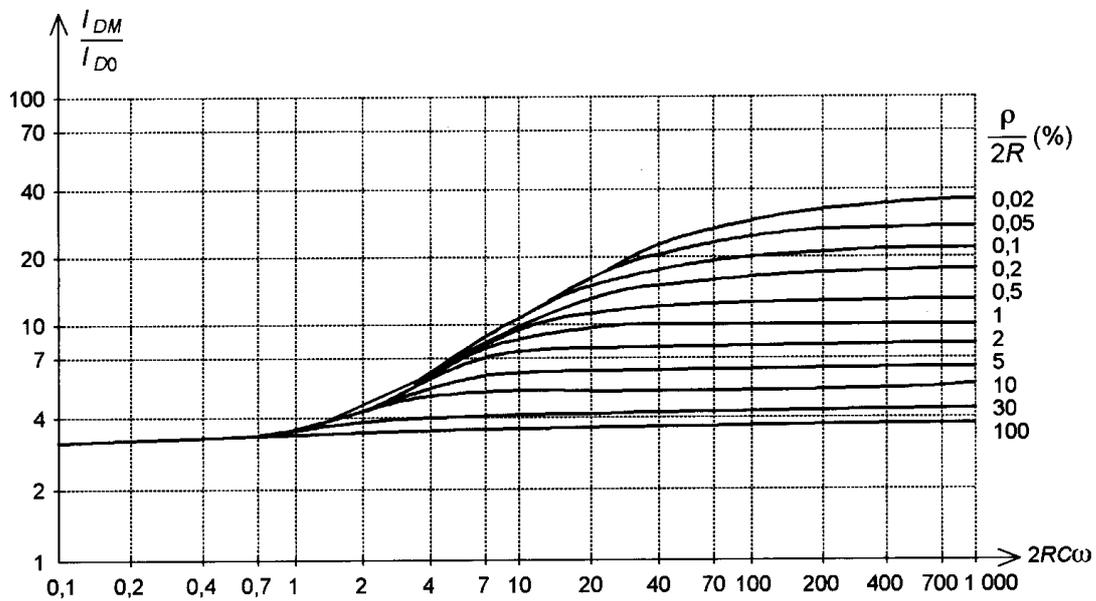


Figure 12: Rapport du courant crête répétitif à l'intensité moyenne dans une diode en fonction de $RC\omega$ paramétré en $\rho/2 R_{CH}$ [extrait de « Les alimentations électroniques » de Pierre Mayé - DONOD]

Annexe 2

Détails sur la régulation à découpage

Détails des deux phases en conduction continue

Hypothèses : tous les éléments sont parfaits, le régime établi (i.e. toutes les grandeurs électrique sont sinusoïdales), la tension de sortie parfaitement filtrée ($V_S = \text{constante}$) et la conduction continue (le courant dans l'inductance ne s'annule jamais).

Deux phases :

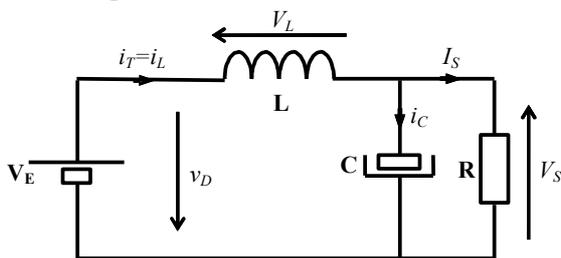


Figure 13: T_P fermé

○ entre $[0, \alpha T]$: T_P fermé donc D bloquée (car $v_D = -V_E < 0$) d'où $v_T = 0$ et $i_D = 0$

$$i_L = \frac{V_E - V_S}{L} t + I_m$$

$$\text{À } t = \alpha T, i_L(\alpha T) = I_M = \frac{V_E - V_S}{L} \alpha T + I_m$$

$$\text{D'où } \Delta i_L = I_M - I_m = \frac{V_E - V_S}{L} \alpha T$$

○ entre $[\alpha T, T]$: T_P ouvert donc D passante (car I_M positive et la diode D de roue libre assure la continuité du courant dans l'inductance) d'où $i_T = 0$ et $v_D = 0$

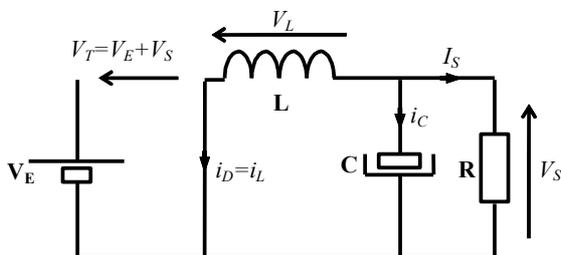


Figure 14: T_P ouvert

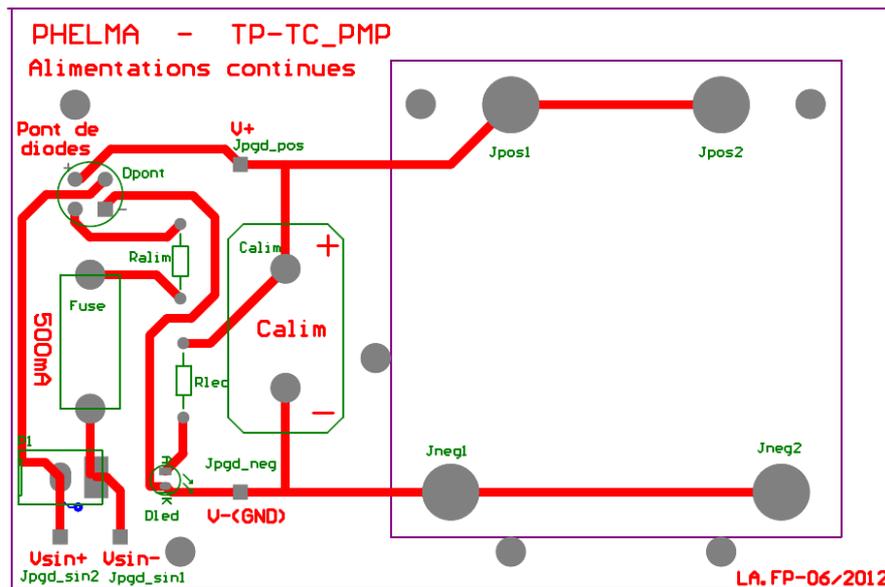
$$i_L = \frac{-V_S}{L} (t - \alpha T) + I_M$$

$$\text{À } t = T, i_L(T) = I_m = \frac{-V_S}{L} (1 - \alpha) T + I_M$$

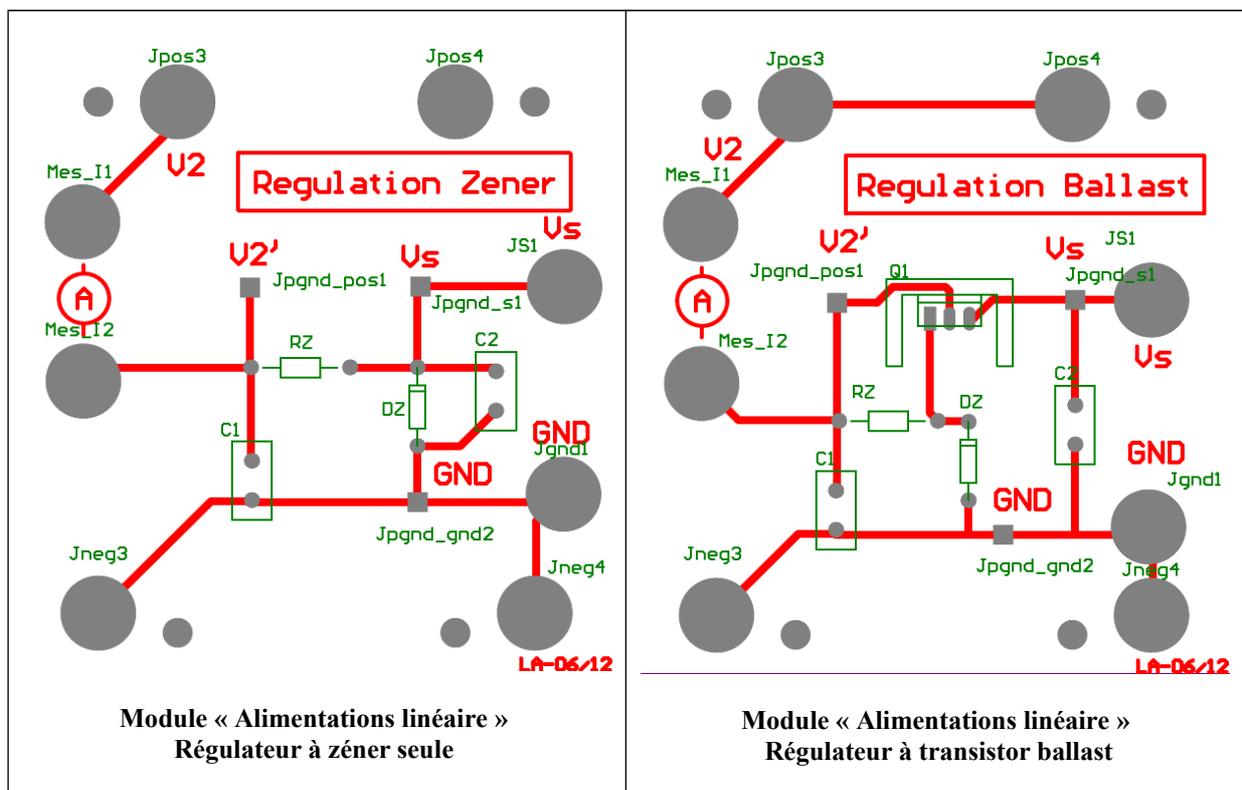
$$\text{D'où } \Delta i_L = I_M - I_m = \frac{V_S}{L} (1 - \alpha) T$$

Annexe 3 PCB des cartes utilisées

Maquette de la partie I : Carte mère (étude du redresseur + filtrage)



Maquettes de la partie II : Régulateurs linéaires



Document réponse

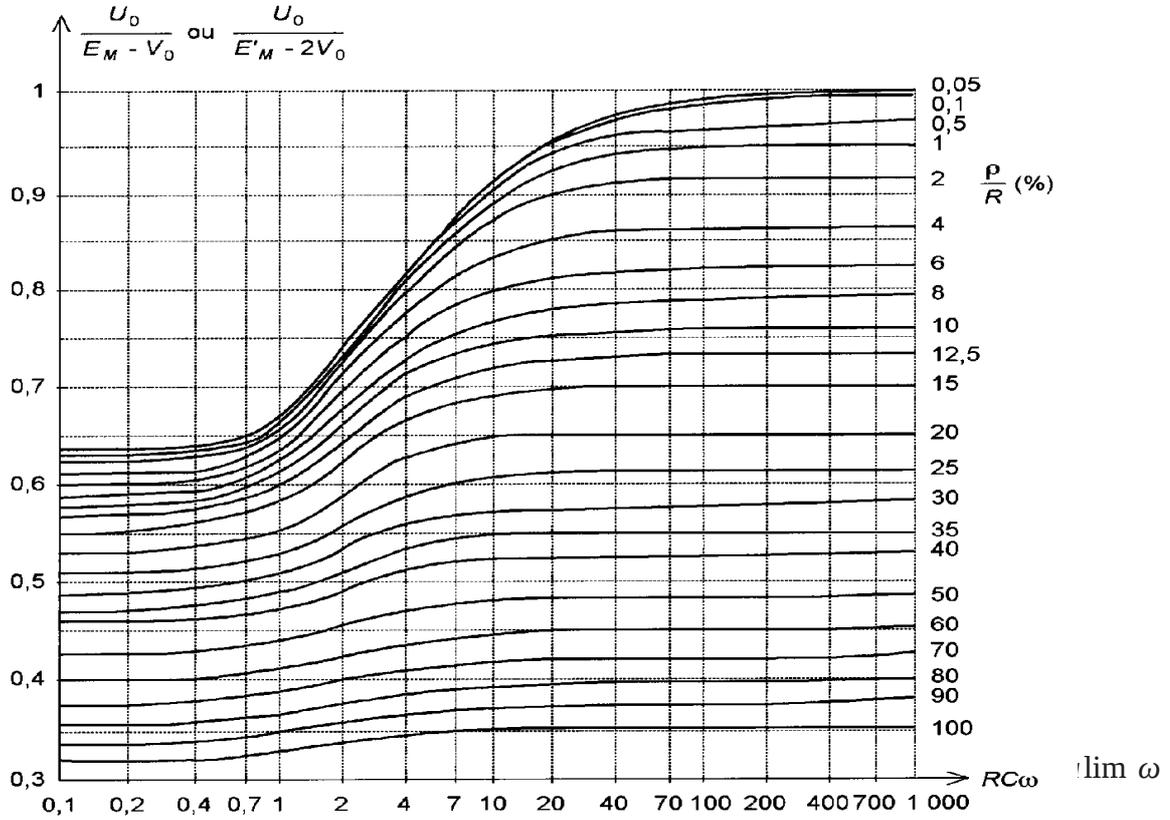


Figure 15: Rapport tension moyenne de sortie sur amplitude d'entrée diminuée des tensions de seuil des diodes (cas du pont simple ou du pont double) en fonction de $R_{CH} \text{ Calim } \omega$ paramétré en p/R_{CH}

Document réponse

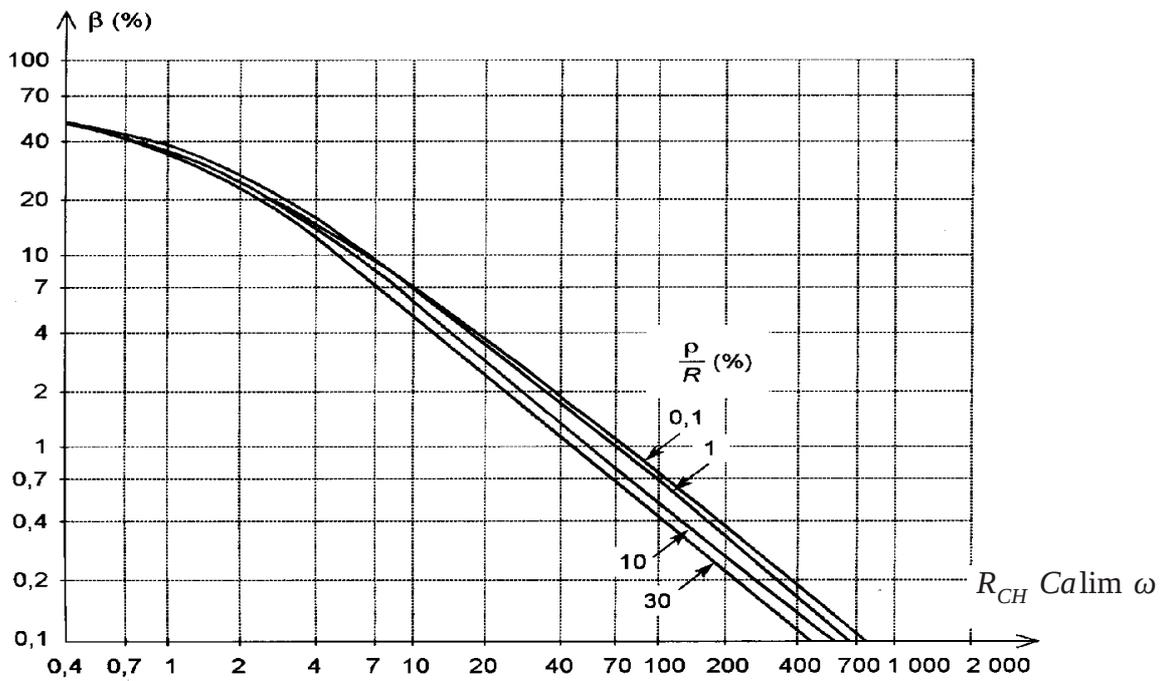


Figure 16: Taux d'ondulation en fonction de en fonction de $R_{CH} C_{alim} \omega$ paramétré en ρ/R_{CH}