

Quelques remarques concernant le redressement à double alternance avec filtrage par inductance en tête

Claude Frantz

Résumé—Dans les récepteurs de radiodiffusion et dans beaucoup d'amplificateurs BF destinés au grand public, il est d'usage de rencontrer des circuits redresseurs ayant une capacité à l'entrée du filtre. Ce n'est que lorsque la puissance à fournir devient plus importante, que l'on rencontre un montage redresseur à inductance en tête. De ce fait, ce montage est bien moins connu et ses avantages et inconvénients sont même souvent plus ou moins méconnus. Le but de cet article est d'examiner quelque peu ce circuit, surtout en comparaison avec le montage plus courant, avec capacité en tête.

I. INTRODUCTION

L'ALIMENTATION d'appareils électroniques à partir du secteur à courant alternatif sinusoïdal, se fait principalement par le redressement dit à double alternance, en se servant donc des alternances positives et négatives, de la même manière. Deux variantes de montage sont connues : La première se sert de deux diodes et d'un transformateur à prise médiane. La seconde, dite «en pont» se sert de 4 diodes. Dans la suite de l'exposé, la première variante sera utilisée pour l'explication, mais les choses restent les mêmes dans le cas du montage «en pont», sauf qu'à la place d'une seule diode, il faudrait écrire deux diodes, car la conduction et le blocage se font alors toujours par paire de diodes au lieu d'une seule diode. Par «diode» nous entendrons n'importe quel type de diode, à vide, à gaz ou à semi-conducteur solide. La figure 1 montre un circuit redresseur à double alternance très classique. Le condensateur C2 n'est présent, que dans le cas du montage avec capacité en tête, bien entendu.

II. LES DIFFÉRENTES CHARGES

Tant que la charge du système reste purement résistive, les choses restent assez simples. À chaque instant, l'une des diodes conduit et une seule, jamais les deux à la fois. Un tel montage se rencontre assez rarement dans le domaine qui nous intéresse ici, car il ne fournit pas de courant quasiment continu. Il sera donc nécessaire de le faire suivre d'un filtre, ce qui changera fondamentalement la charge, qui ne sera alors plus résistive. Avec une telle charge non résistive, le redresseur se comportera de façon sensiblement différente. Avec une charge sensiblement capacitive (filtre avec capacité en tête), à chaque moment de l'alternance, l'une des diodes, au plus, sera conductive. Jamais les deux, et souvent aucune.

Ce travail a été entièrement réalisé et composé en utilisant des logiciels libres, entre autre spice3, xcircuit, GNU octave, gnuplot et L^AT_EX. L'auteur encourage le développement et l'utilisation de logiciels libres.

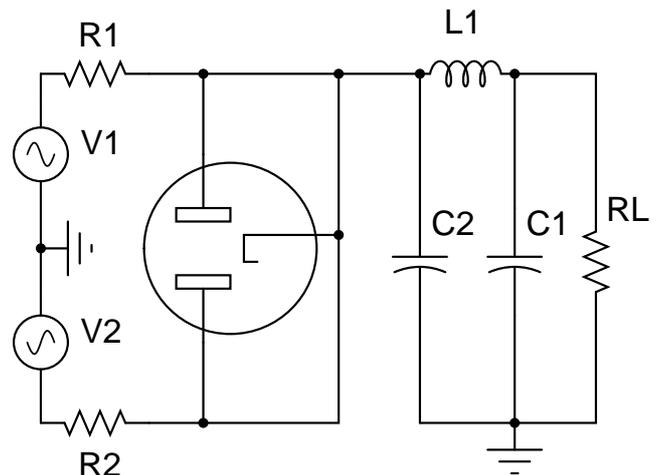


FIG. 1. Le schéma du circuit redresseur considéré ici

Pendant la durée, souvent assez courte, pendant laquelle les diodes conduisent, toute la puissance destinée à la charge devra traverser les diodes, ce qui conduira à un courant de pointe souvent fort important et d'autant plus grand que la durée de conduction sera plus courte. Plus la capacité de la charge sera forte et la résistance interne de source faible, plus la durée de conduction sera courte et plus fort sera le courant de pointe que les diodes auront à supporter. En pratique, toute diode impose des limites à respecter, faute de dégâts sérieux à plus ou moins longue échéance. Le rendement s'en ressentira aussi, car durant les courtes périodes de conduction à courant fort, la dissipation sera également forte. Tant que la puissance à redresser ne devient pas trop forte, le montage dit «à capacité en tête» est celui, qui est le plus souvent utilisé. Dans les autres cas, le montage à inductance en tête est généralement préféré, surtout avec des valves à gaz ou à vapeur de mercure. C'est lui qui sera examiné outre ici.

III. LE REDRESSEUR À CHARGE INDUCTIVE

A. Généralités

Lorsque la charge est sensiblement inductive, à chaque moment de l'alternance, l'une des diodes conduit, parfois les deux, parfois aucune, selon le cas. On comprendra instinctivement, que les pointes à fort courant durant une courte période et la forte dissipation qui s'en suit, n'existent pas ici. La durée de conduction des diodes est assez longue, souvent les deux diodes se partagent le travail, la puissance à transmettre est

répartie dans le temps, ce qui conduit à des courants de pointe bien plus faibles que dans le cas de la charge capacitive. Les diodes ont moins de puissance à dissiper. L'usage de diodes ayant un rapport «courant de pointe par courant moyen» admissible assez faible, est possible ici. Ceci est souvent le cas des valves à gaz et à vapeur de mercure. Ces tubes-là ont, en outre, une résistance interne assez faible durant la conduction, ce qui réduit encore la puissance que ces tubes ont à dissiper dans le cas d'un redresseur à inductance en tête, d'où leur intérêt pour les montages redresseurs pour forte puissance.

Comme disait déjà Sempé : Rien n'est simple ! En effet, les choses se compliquent ici, car un montage redresseur à inductance en tête est généralement suivi de cellules de filtrage RC ou LC. Ainsi, la charge vue par le redresseur n'est plus nécessairement inductive et peut très bien se rapprocher du modèle capacitif, selon le courant à redresser. Pour compliquer encore les choses, une faible capacité est parfois utilisée en tête de filtres dits «à inductance en tête», les transformant quelque peu en filtres «à capacité en tête», mais un peu seulement, car la capacité utilisée est fort faible. Nous rencontrons ainsi deux zones de comportement pour de tels circuits. Dans la zone correspondant au courant redressé important, le comportement est typique pour la charge inductive. Le courant, traversant l'inductance, ne tombe jamais à zéro. La tension redressée est relativement faible, vu la tension d'alimentation, et elle varie bien peu en fonction du courant. Dans la zone correspondant au courant redressé faible, le comportement se rapproche quelque peu de celui de la charge capacitive. Le courant, traversant l'inductance, tombe à zéro pendant une partie de l'alternance. Certes, les courants de pointe importants n'existent pas, car le courant à redresser est faible et la durée de conduction est quand-même encore assez longue, mais la tension redressée devient bien plus importante et varie davantage en fonction du courant, que dans l'autre zone, rendant le comportement plus proche de celui rencontré dans le cas de la charge capacitive. Plus l'inductance d'entrée aura une valeur élevée, plus large sera la zone typiquement «inductive». Des considérations d'ordre pratique conduisent à ce qu'on ne peut pas choisir l'inductance délibérément.

B. Différents cas en pratique

Tant que le courant redressé ne devient jamais si faible pour que le montage quitte la zone typiquement inductive, les choses restent encore assez simples, l'autre zone n'ayant alors aucune importance pratique. Selon le cas, il faudra veiller à prendre des mesures adéquates, si le courant ne s'établit pas encore au moment de l'enclenchement, ce qui est souvent le cas avec les tubes, surtout s'ils ont une cathode à chauffage indirect.

Si le courant peut devenir si faible, qu'il quitte la zone typiquement inductive, un moyen brutal et fort simple consiste à utiliser une résistance «bleeder» additionnelle, en tant que charge, qui aura à dissiper autant de courant qu'il sera nécessaire pour que le montage reste dans la zone typiquement inductive. Inutile de préciser, que la puissance dissipée par cette résistance n'a pas d'autre but, ce qui rend cette «solution» peu recommandable et plutôt réservée aux cas marginaux.

La zone typiquement inductive étant d'autant plus large que l'inductance à l'entrée du filtre est plus forte, une idée initialement saugrenue pourrait être d'augmenter la valeur de cette inductance dans le cas d'un courant faible. Si l'on se rappelle en mémoire comment est construite une telle inductance de filtrage, on remarquera qu'on utilise un entrefer dans le but d'éviter, autant que possible, la saturation du noyau par le courant continu, ce qui aurait comme conséquence de réduire la valeur de l'inductance pour les courants forts. Ainsi donc, cette inductance a déjà le comportement recherché, sans que l'on ait à y changer quoi que ce soit. On peut même forcer les choses en supprimant ou en réduisant tout simplement l'entrefer, ce qui conduira à avoir une inductance variant beaucoup en fonction du courant. Par une conception judicieuse de cette inductance, on peut arriver à une valeur fort élevée pour les courants faibles, tout en ayant encore une valeur suffisante pour les courants forts. En anglais, on appelle cela «swinging choke». Il semble, qu'il n'existe pas de terme français pour désigner cela. Pourtant, il serait fort naïf de croire, qu'il suffit de supprimer l'entrefer de l'inductance, sur un montage existant, pour que le comportement aux courants faibles, s'en trouve amélioré, toutes choses restant inchangées par ailleurs. Une inductance «swinging choke» ne peut être utilisée que dans un montage conçu pour cela.

C. Circuits plus complexes

Une autre possibilité consiste à ajouter une capacité en parallèle sur l'inductance à l'entrée du filtre. Là, les choses se compliquent vraiment car le comportement du circuit est difficilement prévisible. En outre, le comportement est dépendant de la fréquence du secteur. La conception de tels circuits est forcément fastidieuse et fait bien plus usage de simulation et d'essais pratiques, que de calculs, car il y a tellement de variables. De tels circuits se rencontrent assez peu en pratique et leurs avantages ne sont pas vraiment évidents, quoi qu'ils aient leurs défenseurs. Le but du condensateur additionnel n'est pas de former un filtre résonnant sur la fréquence double de celle du secteur. Cette manière de faire conduirait d'ailleurs à des déboires car la valeur de l'inductance varie sensiblement avec le courant qui la traverse. Le but de ce condensateur est plutôt d'emmagasiner de l'énergie au moment opportun du cycle afin de pouvoir refournir celle-ci à l'inductance, au moment où le courant dans cette dernière risque de tomber à zéro. Bien que fort différentes, toutes ces méthodes tendent pourtant vers le même but : éviter que le courant dans l'inductance ne tombe à zéro durant une partie du cycle.

IV. UN EXEMPLE PRATIQUE

A. Le circuit

Notre exemple est adapté d'un cas pratique réel, le schéma est celui de la figure 1. C2 est absent, la valve est une GZ34, L1 a une valeur de 10 H, C1 a une capacité de 50 μ F. V1 et V2 représentent le transformateur comme source, R1 et R2, de 50 Ω chacune, représentent la somme des résistances vues par la valve. Pour simplifier, L1 est considérée comme linéaire, c'est à dire que sa valeur ne varie pas en fonction du courant qui la traverse, sa résistance en courant continu est nulle. RL représente la charge du circuit.

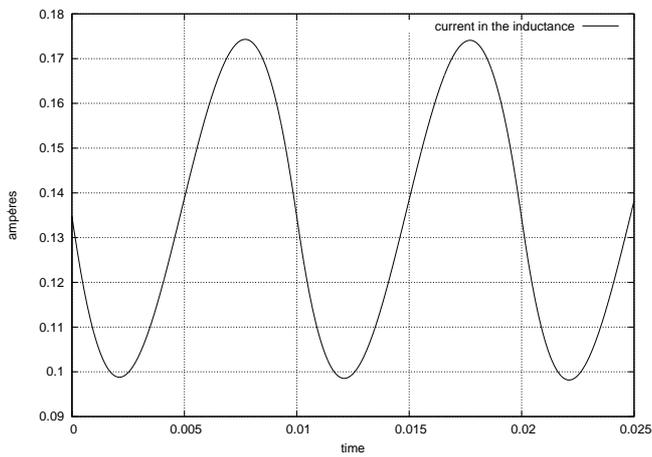


FIG. 2. Le courant dans l'inductance du circuit redresseur à inductance en tête, à pleine charge

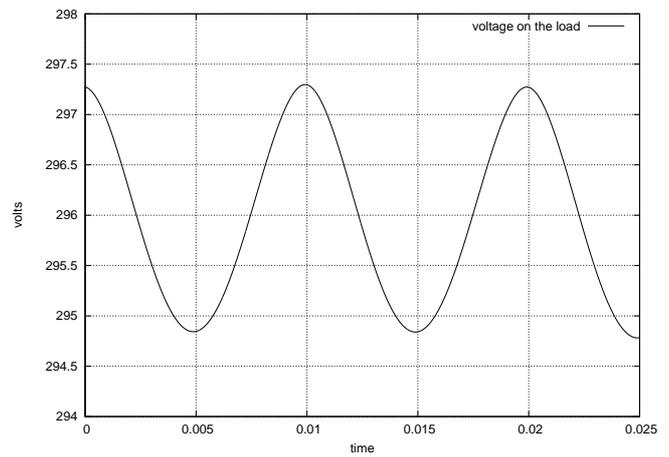


FIG. 4. La tension sur la charge du circuit redresseur à inductance en tête, à pleine charge

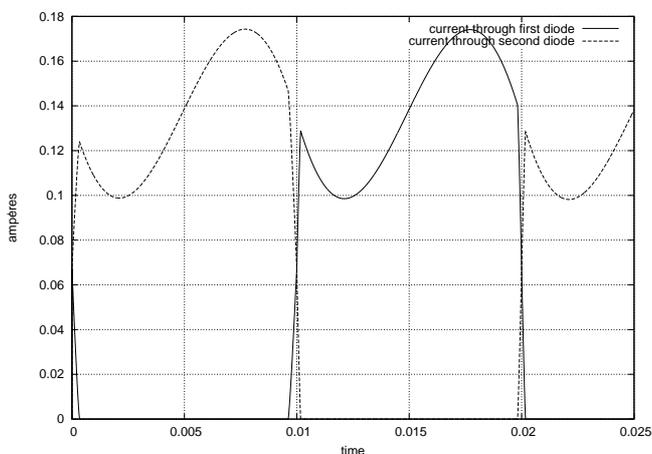


FIG. 3. Le courant dans les diodes du circuit redresseur à inductance en tête, à pleine charge

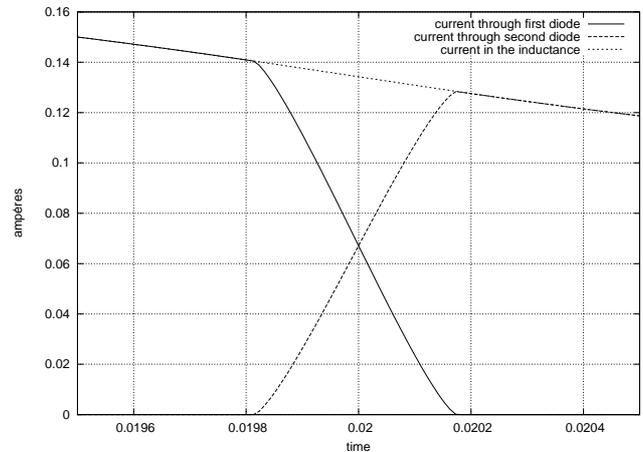


FIG. 5. En agrandissement : Le courant dans les diodes et dans l'inductance du circuit redresseur à inductance en tête, à pleine charge

B. Le circuit à pleine charge

La résistance de charge est fixée à 2165Ω , la tension d'alimentation $V1$ et $V2$ est fixée à $565 V_{\text{p}}$ soit $399,5 V_{\text{eff}}$. Après stabilisation, la tension sur la charge se fixe à $296 V$, ce qui correspond à un courant de $136,8 \text{ mA}$ dans la charge. Le ronflement est de $0,823 \text{ \%pp}$. La figure 2 montre le courant dans l'inductance $L1$. Nous remarquons que le courant ne tombe jamais à zéro, à aucun moment du cycle. La figure 3 montre le courant traversant les diodes. Nous remarquons qu'à tout moment, au moins l'une des diodes est conductive, sinon les deux à la fois. Si, considéré seul, le courant dans l'une des diodes peut paraître un peu surprenant, en considérant les deux diodes on remarquera vite que ce courant correspond, bien entendu, à celui traversant l'inductance. Car c'est bien là le rôle de diodes que de fournir le courant à l'inductance de filtrage. Notons ici le courant de pointe traversant les diodes. Il est d'environ $174,2 \text{ mA}$, ce qui correspond à $1,27$ fois celui traversant la charge. Chacune des deux diodes doit dissiper environ 4 W . Il est très intéressant de noter comment les deux diodes se relaient. Tandis que le courant dans la diode, qui s'appête à se bloquer, diminue, la deuxième diode, qui

va se mettre à conduire commence déjà à conduire pendant ce temps-là, si bien que la somme du courant traversant les deux diodes permet à l'inductance de garder son courant. C'est justement cette façon très élégante des diodes de se relayer, qui fait le charme et l'intérêt de ce circuit. La figure 5 montre un agrandissement de cette zone auquel est encore ajouté le courant dans l'inductance, afin de mieux montrer ce qui vient d'être expliqué. La figure 4 montre encore la tension sur la charge RL .

C. Le circuit à inductance en tête, sous charge réduite

Sans changer rien d'autre que la charge RL , qui va prendre la valeur de 12500Ω , nous allons examiner le même circuit sous une charge sensiblement réduite. Dans ces conditions, la tension sur la charge va atteindre $362,2 V$ et le ronflement passera à $0,59 \text{ \%pp}$. Le courant dans la charge correspond maintenant à $28,98 \text{ mA}$. Examinons à nouveau les courants. La figure 6 nous montre le courant traversant les diodes d'où nous pouvons déduire celui traversant l'inductance, comme auparavant. Les choses ont maintenant changé. Le courant traversant l'inductance ne se maintient pas durant tout le cycle.

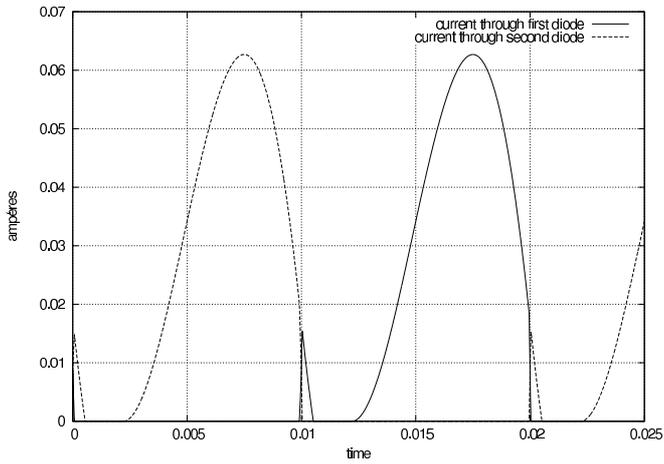


FIG. 6. Le courant dans les diodes du circuit redresseur à inductance en tête, à charge réduite

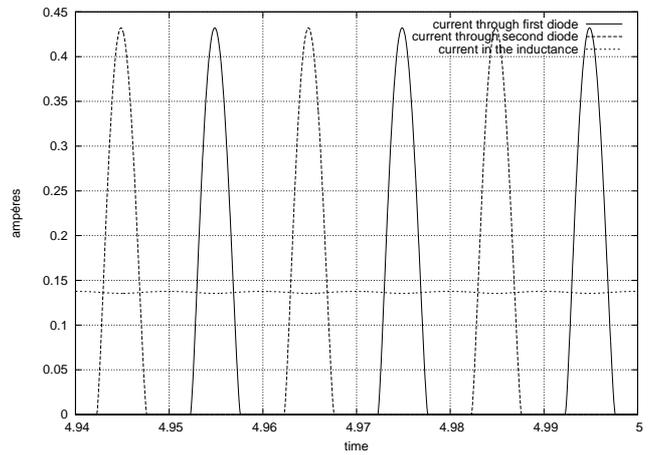


FIG. 9. Le courant dans les diodes et l'inductance du circuit redresseur à capacité en tête, à pleine charge

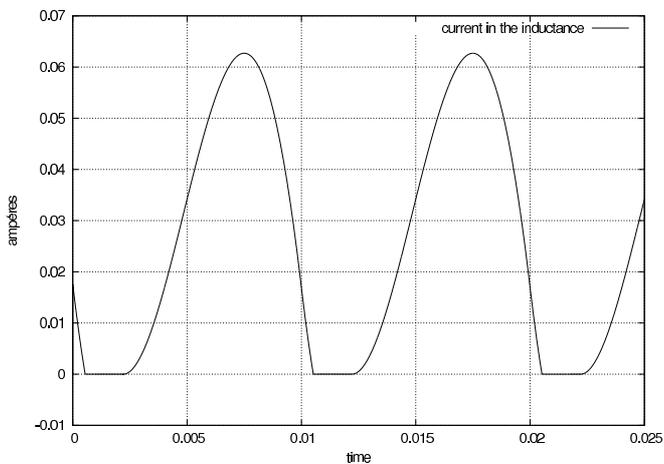


FIG. 7. Le courant dans l'inductance du circuit redresseur à inductance en tête, à charge réduite

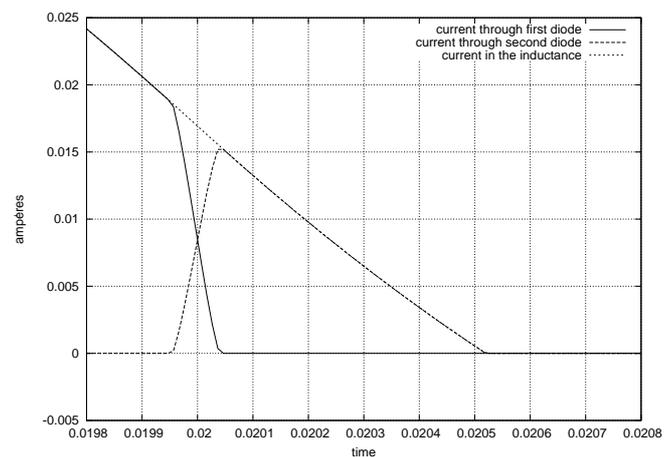


FIG. 8. En agrandissement : Le courant dans les diodes et dans l'inductance du circuit redresseur à inductance en tête, à charge réduite

À certains moments de celui-ci, l'une seule des diodes conduit, parfois les deux, parfois aucune. La figure 8 montre à nouveau un agrandissement dans lequel est aussi inclus le courant traversant l'inductance. Il est très intéressant de noter, que les

diodes se relaient comme dans le cas de la pleine charge, les deux diodes sont alors conductives au même moment. Pourtant, après avoir pris le relais, la diode est incapable de maintenir assez de courant dans l'inductance, car la valeur de celle-ci est trop faible. Ainsi donc, le courant traverse les diodes par impulsions. Certes, celles-ci sont bien plus larges que si la charge était capacitive à l'entrée du filtre, mais le courant de pointe des diodes s'en ressent en conséquence. Il est maintenant de 62,74 mA, ce qui correspond à 2,17 fois celui traversant la charge. Chaque diode doit dissiper environ 410 mW.

D. Comparaison avec un circuit à capacité en tête

Il est quelque peu difficile de définir un montage à capacité en tête correspondant à celui à inductance en tête. Nous le définirons ici simplement en ajoutant C2 de 50 μF dans le circuit de la figure 1 et en réduisant la tension de la source V1 et V2 à 442,5 Vpte (soit 312,89 Veff) afin d'arriver à peu près à la même tension sur la charge. Certes, le ronflement deviendra bien plus faible (0,0237 %pp) en raison de cette capacité additionnelle, mais nous voulons surtout examiner les courants et cette manière de faire restera ainsi assez légitime. La figure 9 nous montre le courant traversant les diodes et l'inductance. La tension sur la charge est presque la même, que dans le cas du circuit à inductance en tête, à pleine charge. Le courant ne traverse les diodes, que durant une partie bien plus courte de la période, que dans le cas du filtrage à inductance en tête. Pour cette raison, la puissance doit être transmise à la charge en un temps plus réduit, d'où résulte nécessairement un courant de pointe plus important. Il est de 432,16 mA ici, soit 3,16 fois celui traversant la charge. De ce courant de pointe supérieur résulte aussi une dissipation supérieure des diodes, qui monte maintenant à 7,11 W par diode. La dissipation dans le transformateur alimentant le circuit (représentée par R1 et R2 sur la figure 1) est également plus grande, pour ces mêmes raisons.

V. CONCLUSION

De tous les circuits redresseurs considérés ici, le montage à inductance en tête est le plus complexe, mais c'est celui qui offre la meilleure utilisation des caractéristiques des diodes, du transformateur et qui offre aussi, en conséquence, le meilleur rendement. Ainsi, lui donne-t-on la préférence pour les circuits à puissance élevée. Il offre aussi une tension de sortie fort stable, sans circuits de stabilisation additionnels. Ceci est intéressant lorsque la charge tire un courant variant beaucoup, comme dans le cas d'amplificateurs en classe AB ou B. Du côté des inconvénients, il convient de citer une augmentation du poids, du volume et du prix de revient en raison des inductances.