

Figure 11 : Forward en demi-pont asymétrique

Le circuit au secondaire est identique à celui d'un forward (inductance  $L$ , diode de roue-libre  $D_4$ , diode d'isolement  $D_3$ ).

$D_1$  et  $D_2$  limitent la tension aux bornes des transistors à la valeur  $E$ . De la sorte, les inductances de fuite du transformateur ne peuvent pas donner lieu à des surtensions.

#### 4 – 3 – 2/ Fonctionnement

$T_1$  et  $T_2$  sont commandés en synchronisme. Le fonctionnement est celui du Forward :

- Pendant la conduction de  $T_1$  et  $T_2$ , l'énergie est envoyée au secondaire à travers le transformateur (transparent) et  $D_3$ . La tension au primaire est égale à  $E$ . Le courant magnétisant croît avec une pente  $di/dt = E / \mathcal{L} = E / L_1$ .

- Le blocage de  $T_1$  et  $T_2$  provoque l'inversion de la tension au primaire et au secondaire (blocage de  $D_3$ ). Le courant de l'inductance  $L$  se referme par  $D_4$ . En ce qui concerne le courant magnétisant, il n'y a pas besoin dans ce montage d'un troisième enroulement. En effet, le courant magnétisant trouve un chemin côté primaire, à travers les diodes  $D_1$  et  $D_2$ . L'énergie magnétisante est récupérée par la source  $E$ . Lorsque  $D_1$  et  $D_2$  s'amorcent, la tension au primaire devient  $-E$  et le courant magnétisant décroît, à travers  $D_1$  et  $D_2$ , avec une pente égale à  $-E / \mathcal{L} = -E / L_1$ .

Lorsque le courant magnétisant s'annule (courant nul au primaire), les diodes  $D_1$  et  $D_2$  cessent de conduire; la tension aux bornes des transistors tombe à  $E/2$ .

Les allures des courants et tensions, de même que la tension de sortie, sont les mêmes que pour le Forward, à l'exception de la tension aux bornes des transistors qui est divisée par deux ( $V_{ce} = E$  pendant la démagnétisation, puis  $E/2$ )

Les avantages de cette structure par rapport au forward à un seul transistor sont:

- tenue en tension des transistors limitée à  $E$ .
- pas de troisième enroulement transformateur pour la démagnétisation.

### 5/ CONVERTISSEURS C-C INDIRECTS : ASSOCIATION ONDULEUR-REDRESSEUR

#### 5-1/ Généralités

##### 5-1-1/ Principe

Les *onduleurs de tension* permettent d'obtenir une tension alternative à partir d'une source de tension continue. Cette tension alternative peut donc attaquer le primaire d'un transformateur (figure 12). En plaçant au secondaire un redresseur suivi d'un filtre on reconstitue une tension continue à la sortie (conversion tension continue-tension continue avec isolement).

La source de tension  $E$  est vue en alternatif, côté secondaire, à travers l'onduleur et le transformateur transparent, le secondaire se comporte donc comme une source de tension : une inductance  $L$  sera nécessaire côté charge. Le redresseur débite sur cette inductance, qui constitue avec le condensateur  $C$  le filtre de sortie  $LC$ .

### 5-1-2/ Réglage de la tension de sortie

Nous n'examinerons que le cas où on ne cherche pas à réaliser un convertisseur réversible. On peut alors se contenter d'un redresseur non contrôlé à diodes. Le réglage de la tension de sortie s'effectuant au niveau de l'onduleur. Pour cela, on introduit un *temps mort* de durée variable durant lequel aucun transistor ne conduit ; ce temps mort correspond approximativement, comme nous le verrons en étudiant le fonctionnement de la partie redresseur, à un *palier à tension nulle*.

On obtient ainsi à la sortie de l'onduleur une forme de tension "+E, 0, -E" pour attaquer le primaire du transformateur ; la tension au secondaire, une fois redressée et filtrée, donne une tension *continue* égale à la valeur moyenne de la tension redressée, réglable en agissant sur la durée du temps mort.

### 5-1-3/ Différentes structures

La structure de base de l'onduleur est constituée par quatre transistors en *pont* (figure 12a) ; c'est la structure qui, pour un dimensionnement donné des interrupteurs, autorise le maximum de puissance : la tension au primaire lorsque les deux transistors d'une diagonale conduisent, est égale à  $\pm E$ .

Pour des puissances plus faibles, il est possible de n'utiliser qu'une moitié du pont pour économiser deux interrupteurs en introduisant un point milieu, soit capacitif, soit inductif (transformateur à point milieu) :

- en prenant une moitié "verticale" du pont (c'est-à-dire un "bras" d'onduleur) et en remplaçant l'autre moitié par un point milieu capacitif on obtient la structure appelée push-pull série (figure 12b). Les condensateurs constituant le pont diviseur capacitif fourniront un point milieu puisque le rapport cyclique est égal à 1/2. Ce potentiel reste pratiquement constant si les condensateurs ont une valeur suffisante. La tension aux bornes du primaire lorsqu'un des deux transistors conduit est égale à  $\pm E/2$ . Avec les mêmes transistors et la même tension d'alimentation E, on obtient une puissance moitié de celle du pont complet.

- en prenant une moitié "horizontale" (les deux interrupteurs du bas) et en remplaçant l'autre moitié par un transformateur à point milieu, on obtient le push-pull parallèle (figure 12c). Nous verrons qu'ici encore, la puissance obtenue est moitié de celle du pont complet.

Les structures de base du redresseur sont représentées sur les figures 12d, 12e et 12f. Elles correspondent à des structures de redresseurs de tension débitant sur une source de courant.

Toutes les combinaisons sont possibles entre l'un de ces onduleurs et l'un de ces redresseurs mais on notera que les montages 12e et 12f fonctionnent de manière identique

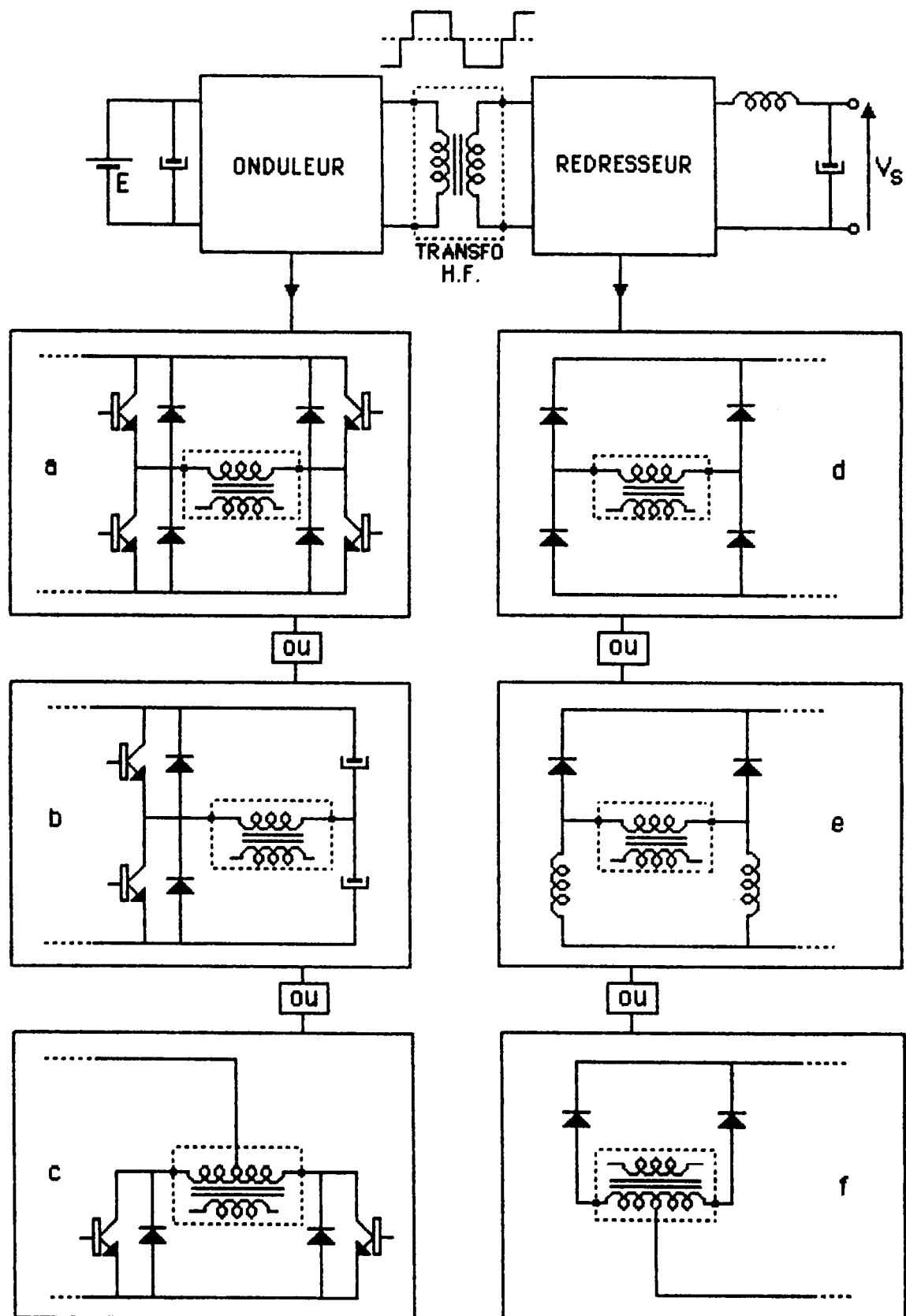


Figure 12

Le choix se fera en fonction de la puissance et des tensions d'entrée et de sortie, en notant que la structure série est bien adaptée à des applications sous tension élevée, tandis que la structure parallèle est intéressante en basse tension.

A titre d'exemple, un convertisseur 300V/5V de 1kW pourra avantageusement être constitué d'un onduleur série (chaque transistor n'a à supporter que la tension  $E$ , contre deux fois  $E$  dans le push-pull parallèle) et d'un redresseur à point milieu (une seule chute de tension de diode, contre deux pour le redresseur en pont).

Pratiquement on trouve aussi des structures d'alimentations continu-continu utilisant un redresseur série à point milieu capacitif (figure 13). A cause des condensateurs ce redresseur ne peut pas, théoriquement, être connecté à la sortie d'un onduleur de tension. Cette structure est malgré tout utilisée couramment dans le redressement sinusoïdal 50 hertz où, étant donné l'absence de  $dv/dt$  violents, l'inductance de fuite du transformateur suffit à limiter les appels de courant.

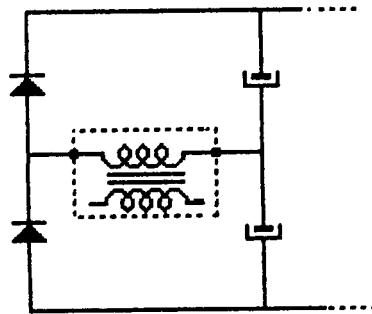


Figure 13 : redresseur doubleur de tension

#### 5-1-4/ Résistance équivalente d'un redresseur à diodes

A l'entrée d'un redresseur à diodes, par suite de l'amorçage spontané des diodes, le courant est en phase avec la tension, quelle que soit la nature de la charge connectée à la sortie de ce redresseur ; le redresseur se comporte donc pour la source qui l'attaque, comme une résistance. On peut donc considérer que la charge au secondaire du transformateur est une simple résistance. Toutefois l'onduleur verra, en série avec cette résistance ramenée au primaire, l'inductance de fuite du transformateur (inductance de fuite totale ramenée au primaire) ; la charge de l'onduleur est donc légèrement inductive (branche "courant").

#### 5-1-5/ Diodes en antiparallèle sur les transistors

Ces diodes ont un double rôle :

- d'une part, elles empêchent toute tension inverse d'apparaître aux bornes des transistors et dans

le cas d'un bras vertical elles éliminent les surtensions.

- d'autre part, si pour une raison quelconque, le courant magnétisant ne pouvait pas se refermer côté secondaire au moment où on bloque les transistors côté primaire, il apparaîtrait aux bornes des transistors une tension en inverse entraînant leur destruction. La récupération de l'énergie magnétisante se ferait alors grâce aux diodes, sur la source E (en fait sur le condensateur d'entrée).

## 5-2/ Les structures de redresseurs

Pour les raisons exposées plus haut, nous n'étudierons pas ici le cas du redresseur "doubleur de tension", et n'examinerons que le cas du redresseur en pont et du redresseur "à point milieu" inductif.

Le fonctionnement du redresseur réagissant de façon notable sur celui de l'onduleur, nous allons l'étudier tout d'abord, en particulier durant le temps mort.

Durant le temps mort, tous les transistors sont bloqués : l'enroulement primaire du transformateur est ouvert et c'est le *redresseur* au secondaire qui impose le fonctionnement, d'une manière assez particulière que nous allons examiner.

Au moment où on bloque le ou les transistors qui conduisaient, le primaire se retrouve "en l'air". A cet instant, on doit impérativement avoir :

- continuité du courant  $I_L$  dans L
- continuité du flux (du transformateur) c'est-à-dire des ampères-tours magnétisants.

### 5 - 2 - 1/ Redresseur en pont

Considérons l'instant juste avant le temps mort : le secondaire débite à travers deux des diodes (D1+D3 ou D2+D4) et un courant circule dans l'inductance de filtrage L (figure 14).

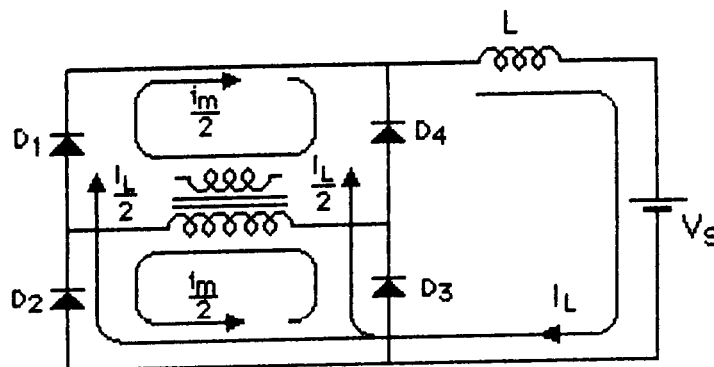


Figure 14 : redresseur en pont

Le courant de l'inductance  $I_L$ , juste après le blocage des transistors, trouve un chemin à travers les diodes du pont qui vont alors conduire *toutes les quatre simultanément* : D1 et D2 en série, D3 et D4 en série, ces deux groupes conduisant en parallèle, chaque groupe assurant le passage de la moitié du courant  $I_L$ , par raison de symétrie.

*La tension aux bornes de l'enroulement secondaire est donc nulle* (en admettant des chutes de tension égales dans les diodes) ; la tension au primaire est nulle également ; on a, grâce au redresseur, un palier à tension nulle permettant le réglage de la valeur moyenne de la tension redressée.

Que devient le flux ? La réponse est très simple si on se souvient que le courant "magnétisant", correspondant au flux qui circule dans le circuit magnétique du transformateur, peut être représenté indifféremment côté primaire ou côté secondaire, au rapport de transformation  $k$  près. En raisonnant côté secondaire, on voit que le courant magnétisant vu au secondaire peut assurer sa continuité en circulant par les quatre diodes où il se superpose au courant  $I_L$ , s'ajoutant à  $I_L$  dans deux diodes, se retranchant dans les deux autres. La tension aux bornes du secondaire étant nulle, ce courant reste constant pendant le temps mort (le flux reste constant).

### 5-2-2/ Redresseur à point milieu

La méthode la plus simple consiste ici à raisonner sur le flux, ou ce qui revient au même sur les ampères-tours magnétisants. On peut également raisonner sur l'énergie magnétisante

#### Conditions initiales

Supposons le demi-secondaire  $N_2$  conducteur, avec le courant sortant par l'extrémité repérée par le point : un courant  $i_2$  croissant circule dans  $L$ , à travers  $D_1$  (figure 15).

Le flux  $\Phi$  imposé par la différence des ampères-tours primaire et secondaire correspond à un courant magnétisant vu au primaire  $i_{m1}$ , croissant, rentrant par le point et tel que :

$$N_1 i_{m1} = N_1 i_1 - N_2 i_2 = \mathcal{R} \Phi$$

#### Amorçage des diodes $D_1$ et $D_2$

Au moment où le primaire cesse de conduire, il faut assurer la continuité du courant dans  $L$  et la continuité du flux  $\Phi$  (donc des ampères-tours magnétisants). Que se passe-t-il, côté secondaire, lorsque le primaire s'ouvre ? La question est notamment de savoir si  $D_1$  ou  $D_2$  ou les deux conduisent ?

a/ Supposons que  $D_1$  continue à conduire et que  $D_2$  ne s'amorce pas. Dans ce cas, seul le demi-secondaire  $N_2$  conduirait et deviendrait brusquement une inductance  $L_2$ . Le courant  $I_L$  s'installant soudain dans  $L_2$  provoquerait l'apparition aux bornes de  $N_2$  d'une forte tension, positive du côté non pointé de  $N_2$ .

Par effet transformateur, cette tension apparaissant aux bornes de l'autre demi-enroulement  $N'_2$ , provoquerait l'amorçage de  $D_2$ .

Le même raisonnement repris en supposant que  $D_2$  serait seule à conduire aboutirait à la conclusion que  $D_1$  s'amorcerait.

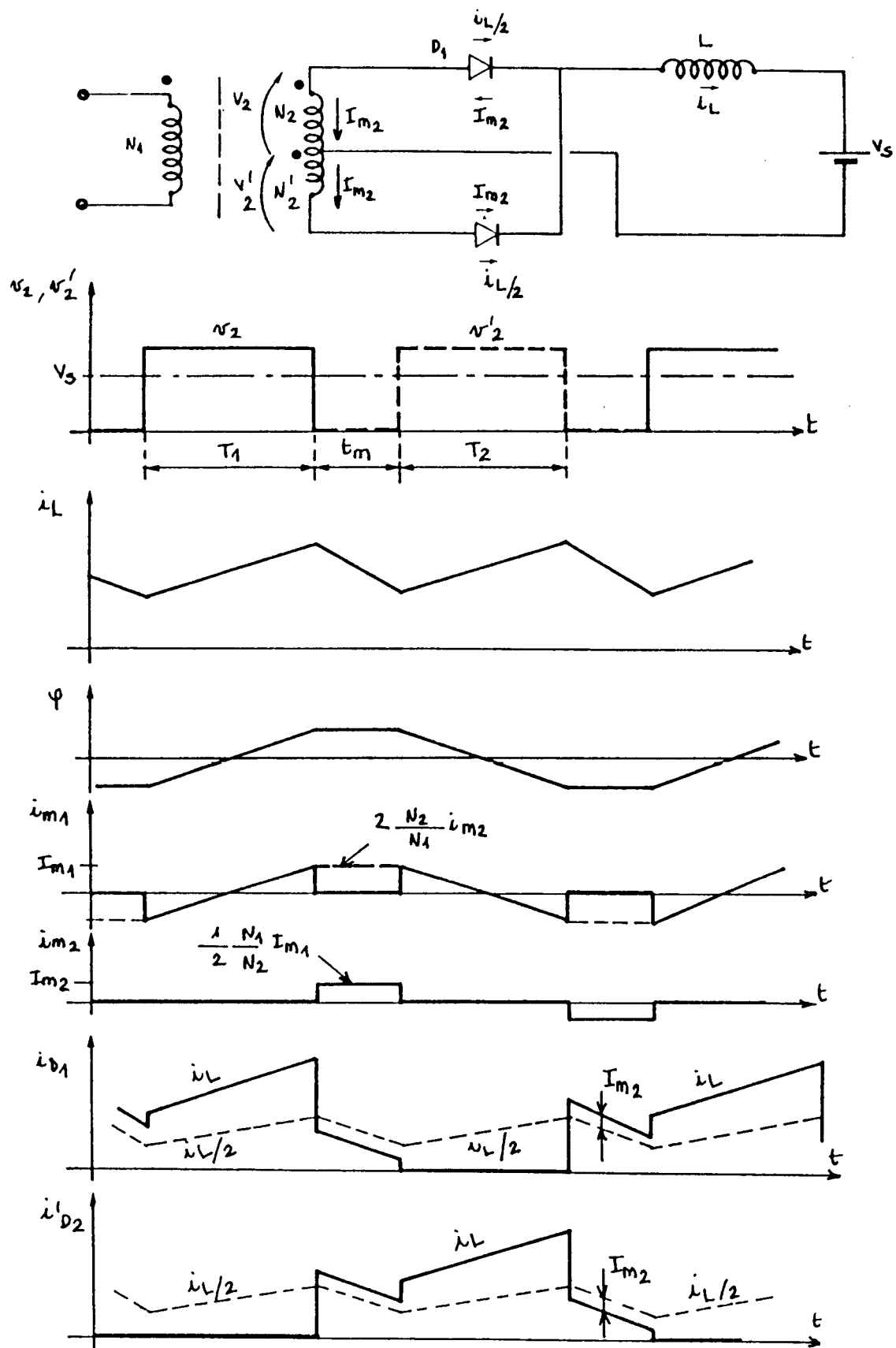


Figure 15 : Fonctionnement du redresseur à point milieu



On en conclut donc que les deux diodes  $D_1$  et  $D_2$  deviennent conductrices lorsqu'on bloque  $T_1$ .

Les deux demi-secondaires fonctionnent alors en transformateur de rapport 1 ( $N'_2 = N_2$ ) et le courant  $i_L$  se partage moitié-moitié entre les deux si on néglige la réluctance du circuit magnétique.

b/ On peut aussi retrouver ces résultats par un autre raisonnement.

Si l'on néglige la réluctance du circuit magnétique, on peut écrire :

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 \approx 0 \quad \text{avec } i_2 = i_L$$

Lorsqu'on annule brusquement  $i_1$ , pour que  $\mathcal{R}\phi$  reste  $\approx 0$  il est nécessaire qu'apparaisse un courant  $i'_2$  dans le deuxième secondaire  $N'_2$  tel que

$$N_2 i'_2 - N_2 i_2 \approx 0 \quad \text{avec } i'_2 + i_2 = i_L$$

(Il faut noter que les deux valeurs de  $i_2$  avant et après le blocage de  $T_1$  sont différentes)

Ceci entraîne que les deux demi-secondaires  $N_2$  et  $N'_2$  et par conséquent les diodes  $D_1$  et  $D_2$  doivent conduire.

### Courant magnétisant

Appelons  $i_{m1}$  la valeur du courant magnétisant au primaire au moment où l'on bloque  $T_1$ . Pour assurer la continuité du flux, la disparition de  $i_{m1}$  doit être compensée par l'apparition, côté secondaire de courants  $i_{m2}$  tels que la somme algébrique des ampères-tours reste égale à  $N_1 i_{m1}$

L'identité des rapports de transformation  $N_2/N_1$  et  $N'_2/N_1$  implique que les deux courants qui apparaissent dans  $N_2$  et  $N'_2$  soient initialement égaux. Il en résulte que, les deux enroulements étant identiques et soumis à des tensions égales, ils sont parcourus par des courants magnétisants  $i_{m2}$  égaux, d'où :

$$2 N_2 i_{m2} = N_1 i_{m1}$$

soit : 
$$i_{m2} = N_1 i_{m1} / 2 N_2$$

Comme  $i_{m1}$  rentrait par le point, les courants  $i_{m2}$  doivent rentrer par le point et l'on a donc

$$i_{D1} = i_L / 2 - i_{m2}$$

et 
$$i_{D2} = i_L / 2 + i_{m2}$$

### Tension aux bornes des demi-secondaires

$D_1$  et  $D_2$  étant conductrices, on a :  $V_2 = -V'_2$

D'autre part, par effet transformateur, on a  $V_2 = V'_2$

Il en résulte que  $V_2 = V'_2 = 0$  : les tensions secondaires sont nulles

Les courants magnétisants dans les deux demi-secondaires sont donc constants et restent égaux à

$$N_1 i_{m1} / 2 N_2, \text{ durant tout le temps mort } t_m$$

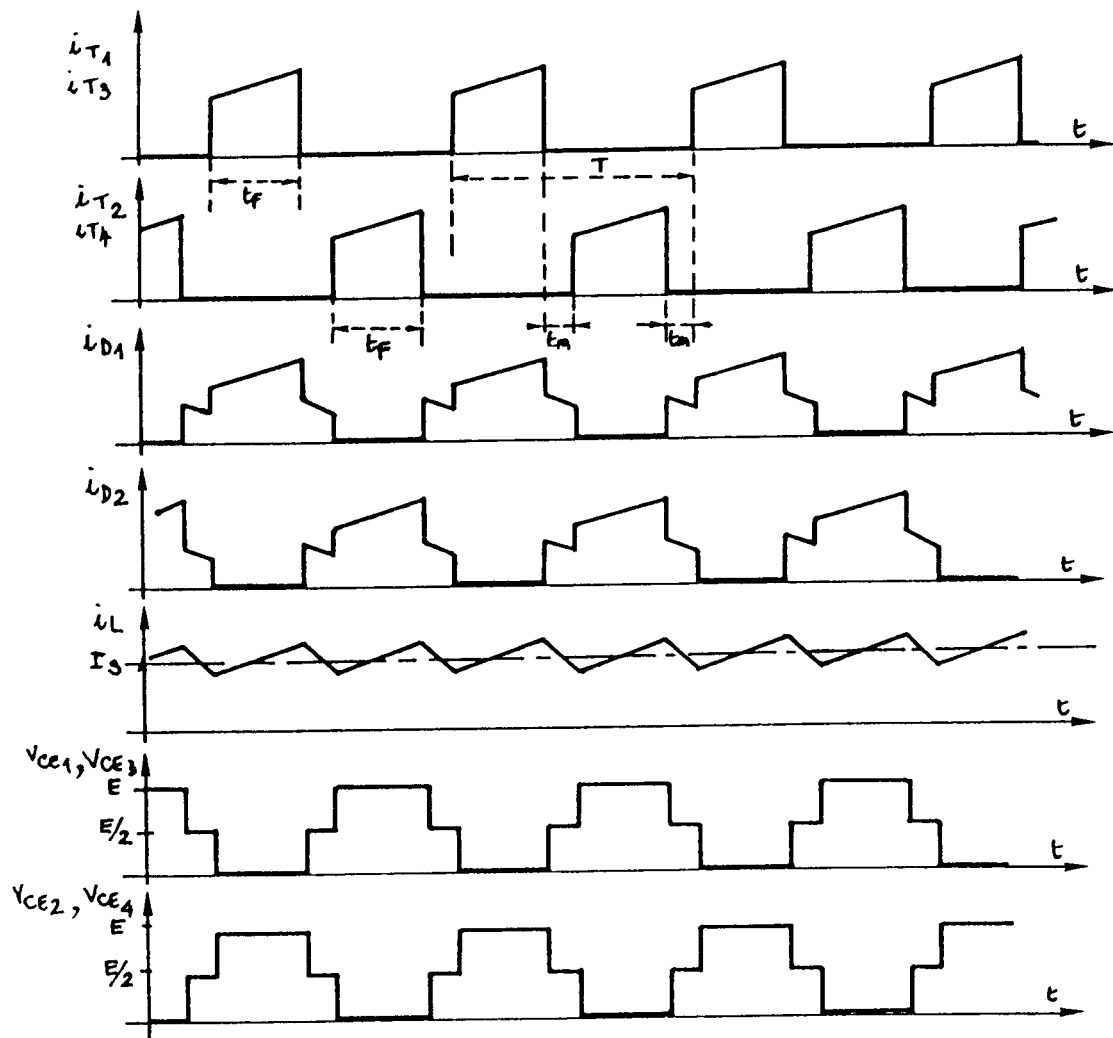
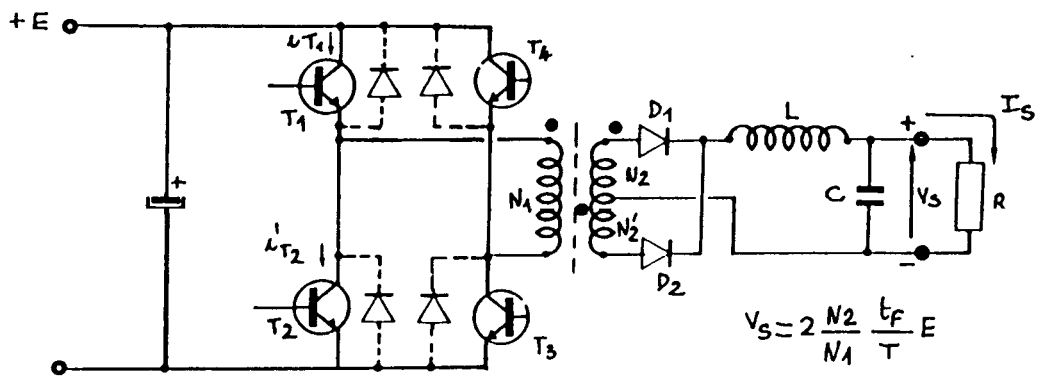


Figure 16 : convertisseur en pont

On a bien au secondaire, un palier de tension nulle permettant le réglage de  $V_s$  (moy)

Côté primaire, l'enroulement  $N_1$  est ouvert, mais par effet transformateur on a :  $V_1 = 0$

### 5-3/ Les structures d'onduleurs

Les figures illustrant le fonctionnement des différentes structures d'onduleurs ont été tracées dans le cas, fréquent en pratique, où le redresseur au secondaire utilise un enroulement à point milieu.

#### 5-3-1/ Convertisseur en pont

Les transistors  $T_1$  à  $T_4$  constituent une structure en pont complet (figure 16).

Les transistors d'une diagonale sont commandés en synchronisme :  $T_1$  et  $T_3$  conduisent en même temps, puis, après un temps mort,  $T_2$  et  $T_4$ . Ceci permet d'alimenter le primaire sous la pleine tension  $E$ .

Lorsque  $T_1+T_3$  ou  $T_2+T_4$  conduisent, le transformateur transmet de la puissance au secondaire ; la tension au primaire est  $\pm E$  ; la tension côté secondaire, après redressement est  $kE$  ( $k = N_2/N_1$ ).

Lorsque tous les transistors sont bloqués, l'enroulement  $N_1$  est ouvert, mais la tension à ses bornes, imposée par le secondaire, est nulle.

N.B. On peut considérer cette structure comme résultant de l'association de deux push-pull série (voir paragraphe suivant) mais le primaire du transformateur voit  $\pm E$  alors qu'il ne voit que  $\pm E/2$  dans le push-pull série, ce qui permet de doubler la puissance, pour une tenue en tension donnée des transistors (égale à  $E$ ).

#### 5 - 3 -2 / Push-Pull série

Deux transistors  $T_1$  et  $T_2$ , connectés en série, constituent un bras d'ondeur (ondeur "demi-pont" ou "push-pull série"), alimentant le primaire du transformateur qui est par ailleurs relié à un point milieu capacitif imposant une tension constante  $E/2$  (figure 17).

Les deux transistors sont rendus conducteurs alternativement, d'où le nom de ce montage : push-pull, littéralement : pousse-tire, avec un temps mort entre les deux (la conduction simultanée entraînerait un court-circuit de branche).

Le réglage de la tension de sortie s'effectue grâce au temps mort

- lorsqu'un des deux transistors conduit, le transformateur transmet la puissance au secondaire ; la tension au primaire est  $\pm E/2$  ; la tension côté secondaire, après redressement, est  $kE/2$  ( $k = N_2/N_1$ ).

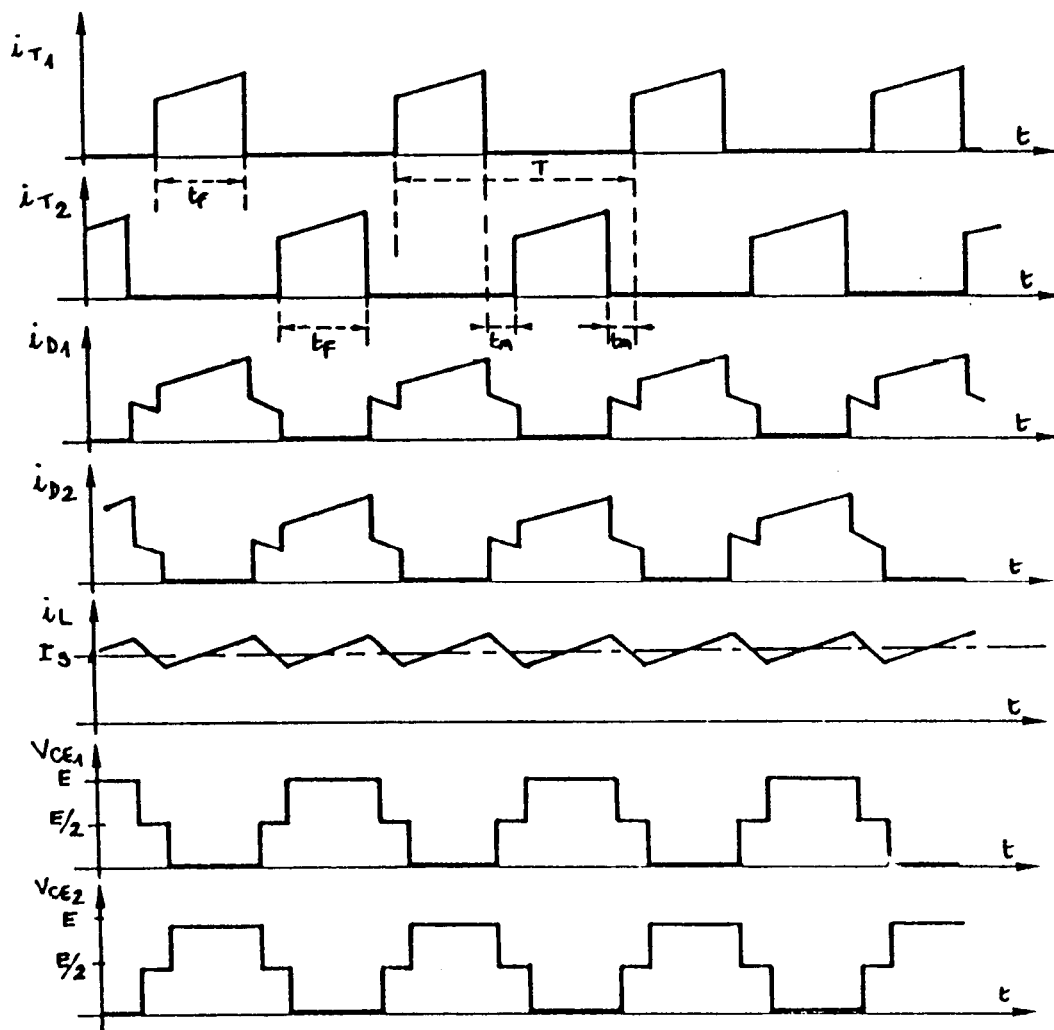
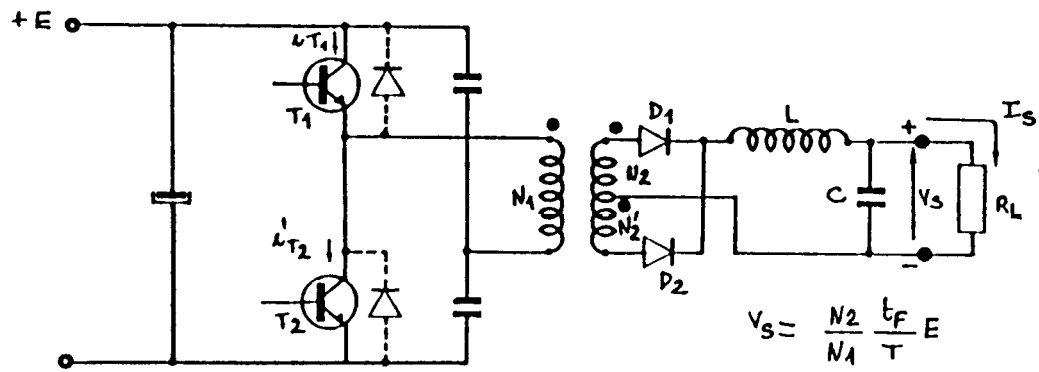


Figure 17 : Push-Pull série

- lorsque les deux transistors sont bloqués, l'enroulement primaire  $N_1$  est ouvert ; la tension au primaire, image de la tension secondaire, est nulle par suite de la présence du redresseur à point milieu au secondaire.

### Remarques

Noter que le primaire n'est alimenté que sous la moitié de la tension  $E$ , mais que les transistors doivent avoir une tenue en tension égale à  $E$  (quand  $T_1$  est saturé, le collecteur de  $T_2$  est au potentiel  $E$ ).

Dans cette structure, les transistors peuvent fonctionner, moyennant certaines précautions, sous leur tension  $V_{ceX}$  (double de  $V_{ce0}$  pour les transistors modernes) ce qui compense l'inconvénient précédent.

Notons encore qu'une dissymétrie de commande sera sans effet grave, le potentiel du point milieu se décalant légèrement de la valeur  $E/2$ , de sorte que la valeur moyenne de la tension au primaire soit nulle.

### 5- 3 - 3 / Push-Pull parallèle

Cette structure utilise également le principe d'un onduleur suivi d'un redresseur, mais le point milieu capacitif est ici remplacé par un point milieu au primaire (figure 18).

Le fonctionnement est analogue à celui du push-pull série, les deux transistors conduisant alternativement avec un temps mort servant au réglage de la tension de sortie.

Le problème de ce type de circuit concerne la symétrie du montage afin de ne pas risquer la saturation du noyau.

Chaque transistor doit supporter 2 fois  $E$  (lorsqu'un des deux transistors est conducteur, la tension aux bornes du demi-primaire correspondant est égale à  $E$  ; par effet transformateur, l'autre demi-primaire voit également une tension égale à  $E$ , soit  $2 E$  aux bornes du transistor bloqué).

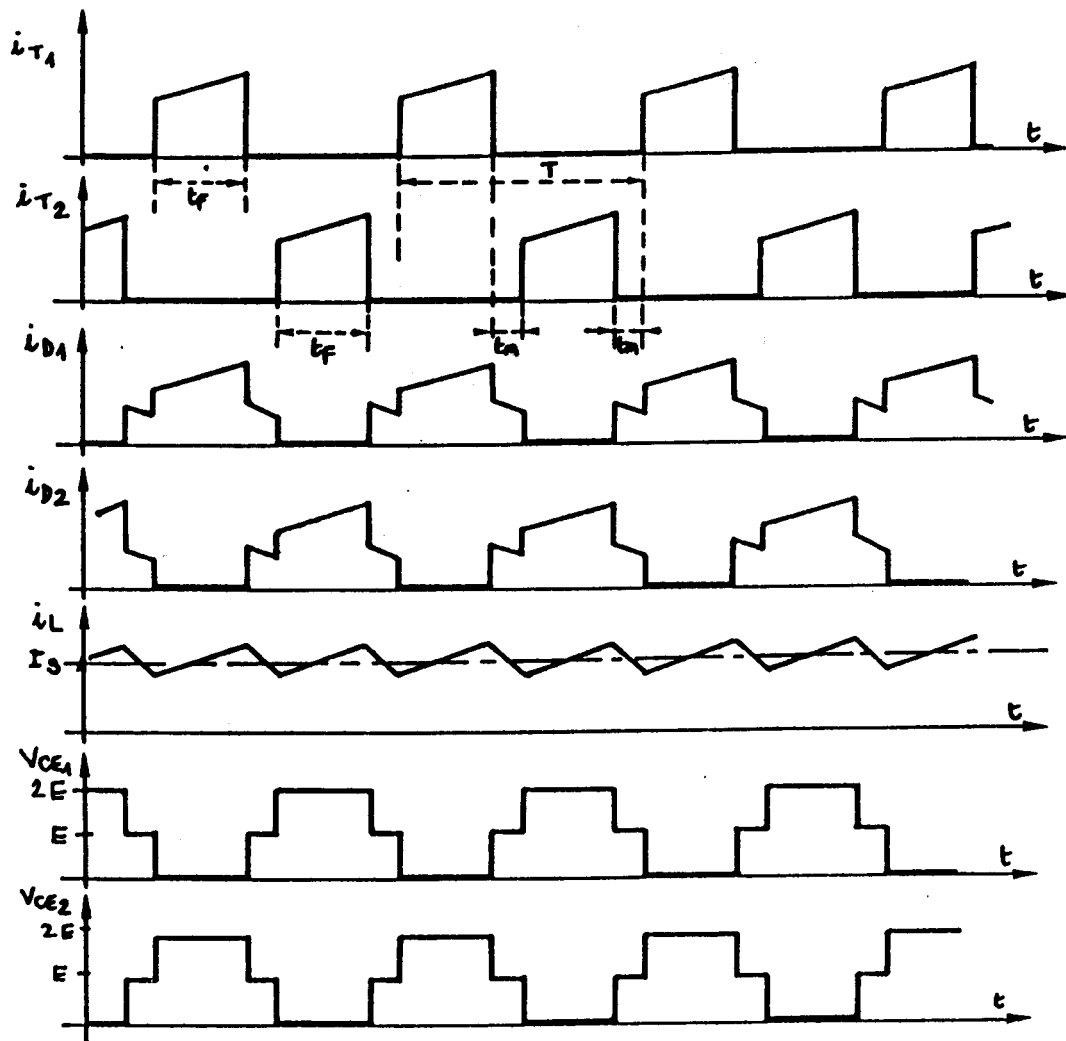
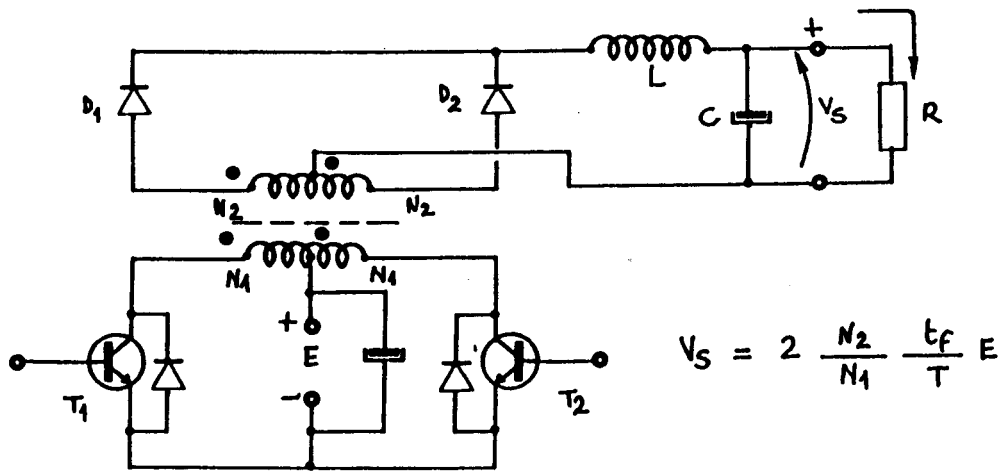


Figure 18 : Push-Pull parallèle