

# Les circuits magnétiques en régime impulsionnel

« Tout fini afin que tout recommence, tout meurt afin que tout vive. »  
Jean Henry Fabre in « Souvenirs entomologiques »

## Résumé

L'association de plusieurs enroulements autour d'un circuit magnétique parfait permet de réaliser une première machine électromagnétique statique appelée **transformateur**. Le premier des deux enroulements, le primaire, est alimenté par une source de tension. En raison de la loi de Faraday, cette **tension doit être variable dans le temps** afin de permettre un flux variable dans le circuit magnétique. Dans ces conditions une tension variable apparaît aux bornes du deuxième enroulement (secondaire). La connexion d'une charge permet alors d'effectuer un **transfert d'énergie** au travers d'un support magnétique.

Le transformateur est ici étudié en **régime impulsionnel**, correspondant à une tension d'entrée en échelon. Cette étude est simplifiée par une série d'hypothèses basées sur celles des circuits magnétiques parfaits : les résistances des enroulements sont supposées nulles ; le circuit magnétique est dans un premier temps linéaire, puis saturé et les inductances liées aux fuites sont supposées nulles.

**Dans le domaine linéaire**, la mise en équation du fonctionnement conduit à définir le modèle équivalent du transformateur. Il est fondé sur un transformateur parfait, défini par son rapport de transformation et une inductance primaire de magnétisation qui traduit la création d'une induction dans le matériau du circuit magnétique.

La croissance du flux dans le circuit magnétique conduit inévitablement à la saturation du matériau. Dans ce **comportement non linéaire**, la tension ne peut plus être variable, ce qui conduit à un dysfonctionnement de l'ensemble. Des précautions sont alors nécessaires pour éviter cet état : **limitation de la durée et de l'amplitude de l'impulsion de tension primaire**.

Dans le cadre d'un **fonctionnement périodique**, une **démagnétisation** du circuit magnétique doit **avoir lieu** avant la **remagnétisation** par le primaire pour s'affranchir du risque d'un régime saturé. Une période de fonctionnement se décompose en une première phase de magnétisation de durée fixée. La démagnétisation est envisagée au travers de deux solutions permettant de diminuer la durée de cette phase dans le but d'accélérer le transfert d'énergie du primaire au secondaire.

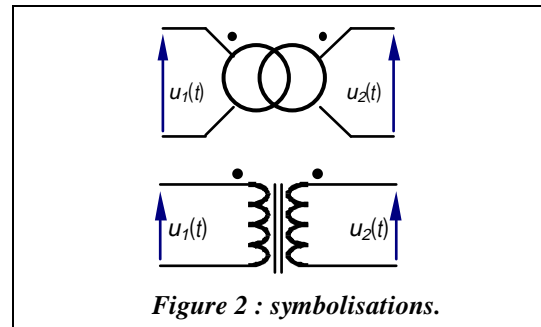
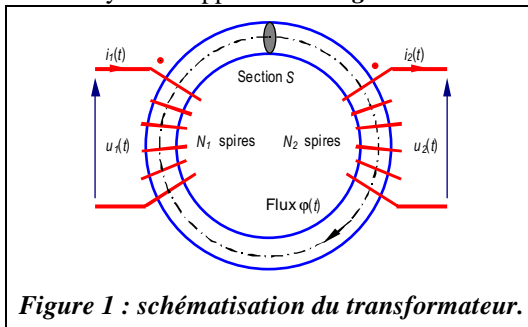
Une série d'applications de tels transformateurs est proposée en dernier lieu afin de présenter leur emploi dans la commande de semi-conducteurs (transformateur d'impulsions) ou la conversion d'énergie (alimentations à découpage).

## Sommaire

|  |          |
|--|----------|
| <b>I. Introduction</b> .....   | <b>2</b> |
| <b>II. Hypothèses de travail</b> .....                                   | <b>2</b> |
| II.1. Résistance des enroulements.....                                   | 2        |
| II.2. Matériau du circuit magnétique.....                                | 2        |
| II.3. Aspect énergétique.....  | 2        |
| II.4. Détermination des coefficients d'auto-induction (inductances)..... | 2        |
| II.5. Inductances de fuite.....  | 3        |
| <b>III. Mise en équation du transformateur</b> .....                     | <b>3</b> |
| III.1. Fonctionnement dans le domaine linéaire.....                      | 3        |
| III.2. Incidence de la saturation.....                                   | 4        |
| <b>IV. Caractéristiques et comportement du transformateur</b> .....      | <b>5</b> |
| IV.1. Produit $E \cdot \tau$ .....                                       | 5        |
| IV.2. Démagnétisation du circuit magnétique.....                         | 5        |
| IV.2.1. Montage de base.....   | 5        |
| IV.2.2. Remagnétisation prématurée.....                                  | 6        |
| IV.2.3. Fréquence de fonctionnement limite — Remèdes.....                | 6        |
| IV.2.4. Diode Zener de démagnétisation.....                              | 6        |
| IV.2.5. Transformateur avec enroulement de démagnétisation.....          | 7        |
| <b>V. Principales applications</b> .....                                 | <b>8</b> |
| V.1. Commande de thyristor.....  | 8        |
| V.2. Alimentations à découpage.....                                      | 8        |

## I. Introduction

Le circuit magnétique de la **Figure 1** a une longueur moyenne  $l$  et une section  $S$  constante. Il est muni d'un bobinage primaire de  $N_1$  spires et secondaire de  $N_2$  spires. Cet ensemble constitue un transformateur dont le symbole apparaît à la **Figure 2**.



Si on se réfère à la loi de Faraday, un tel ensemble n'offre un intérêt technologique que si le flux dans le circuit magnétique est variable dans le temps. Le transformateur sera donc étudié lorsqu'il est alimenté par des grandeurs primaires transitoires. Dans ces conditions, les grandeurs instantanées sont seules capables de reproduire les phénomènes électriques et magnétiques notables.

## II. Hypothèses de travail

L'étude du transformateur est fondée sur les hypothèses relatives aux circuits magnétiques parfaits auxquelles s'ajoutent quelques simplifications électriques.

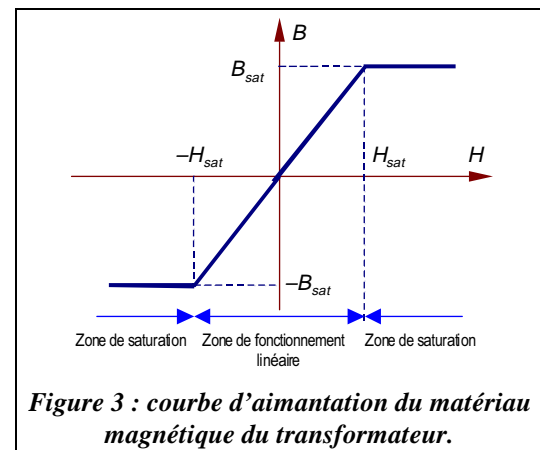
### II.1. Résistance des enroulements

Les résistances propres des enroulements constituent les résistances primaire  $r_1$  et secondaire  $r_2$ . Dans le cas de cette étude, ces résistances sont supposées nulles :  $r_1 = r_2 = 0$ .

### II.2. Matériau du circuit magnétique

Par extension du comportement strictement linéaire, ici le matériau magnétique est saturable : sa courbe d'aimantation est donnée à la **Figure 3**.

1. C'est uniquement dans la zone linéaire que la réluctance  $\mathcal{R}$  est définie.
2. Dans la partie saturée, du fait de l'invariance des grandeurs, on peut considérer que la perméabilité relative est nulle. Ceci correspond à une réluctance infinie.



### II.3. Aspect énergétique

Sur le plan énergétique, l'emploi de circuits magnétiques essentiellement en ferrite permet de considérer qu'aucune puissance n'est dissipée dans le matériau : le transfert d'énergie est total entre le primaire et le secondaire. Le rendement est unitaire. On dit du transformateur qu'il est sans pertes.

### II.4. Détermination des coefficients d'auto-induction (inductances)

Dans la partie linéaire du matériau, la perméabilité relative  $\mu_r$  est constante, donc  $B = \mu_0 \mu_r H$ . [1]

Dans ces conditions, on peut définir la réluctance du circuit magnétique :  $\mathcal{R} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l}{S}$ . [2]

Aucun courant ne parcourt le secondaire (il est à vide), la relation d'Hopkinson relie le flux dans le circuit magnétique  $\phi$  au courant  $i_1$  :  $N_1 i_1(t) = \mathcal{R} \phi(t)$ . [3]

Le flux total à travers toutes les spires du primaire est alors :  $\phi_T(t) = N_1\phi(t) = N_1SB(t)$  . [4]

En combinant les relations [3] et [4], on obtient :  $\phi_T(t) = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}} i_1(t)$  .

On définit le coefficient d'auto-induction au primaire :  $L_1 = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}}$  et au secondaire  $L_2 = \frac{N_2^2}{\mathcal{R}}$  .

## II.5. Inductances de fuite

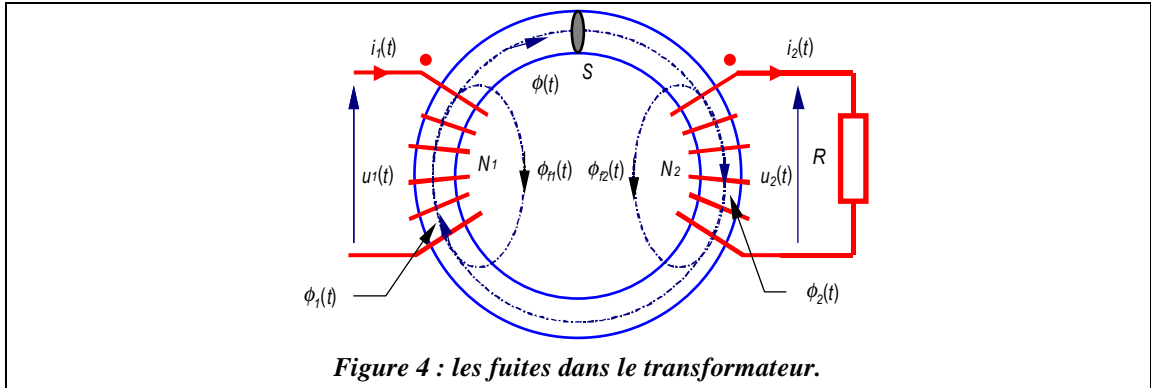


Figure 4 : les fuites dans le transformateur.

A partir de la **Figure 4**, on écrit le flux dans le primaire et dans le secondaire :

$$\phi_1(t) = \phi(t) + \phi_{f1}(t) \text{ et } \phi_2(t) = \phi(t) - \phi_{f2}(t)$$

Par la loi de Faraday, les tensions primaire et secondaire sont :

$$u_1(t) = N_1 \frac{d\phi_1(t)}{dt} = N_1 \frac{d\phi(t)}{dt} + N_1 \frac{d\phi_{f1}(t)}{dt} \text{ et } u_2(t) = N_2 \frac{d\phi_2(t)}{dt} = N_2 \frac{d\phi(t)}{dt} - N_2 \frac{d\phi_{f2}(t)}{dt}$$

Le milieu où apparaissent les fuites est linéaire puisque amagnétique (air).

On définit donc l'inductance de fuite au primaire  $L_{f1} = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_{f1}}$  et au secondaire  $L_{f2} = \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_{f2}}$  .

### Hypothèses simplificatrices

En régime impulsionnel, les **inductances de fuite du transformateur** sont supposées **nulles**. Cette conclusion reprend celle relative aux circuits magnétiques parfaits supposant que les flux de fuite sont nuls.

## III. Mise en équation du transformateur

### III.1. Fonctionnement dans le domaine linéaire

Les relations en tension et la loi d'Ampère de la partie précédente (**Figure 4**) donnent :

$$u_1(t) = N_1 \frac{d\phi(t)}{dt} ; u_2(t) = N_2 \frac{d\phi(t)}{dt} \text{ et } N_1 i_1(t) - N_2 i_2(t) = \mathcal{R}\phi(t)$$

La réluctance  $\mathcal{R}$  s'exprime par :  $\mathcal{R} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l}{S}$  .

Pour caractériser le circuit magnétique, on définit l'**inductance spécifique** :  $AL = \frac{1}{\mathcal{R}}$  (en H).

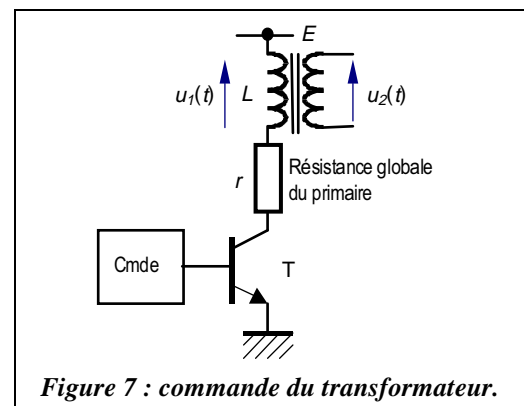
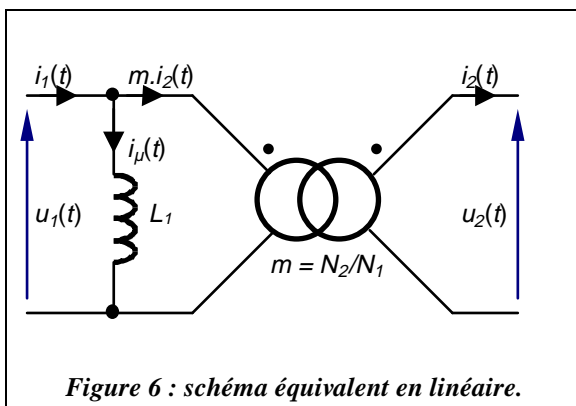
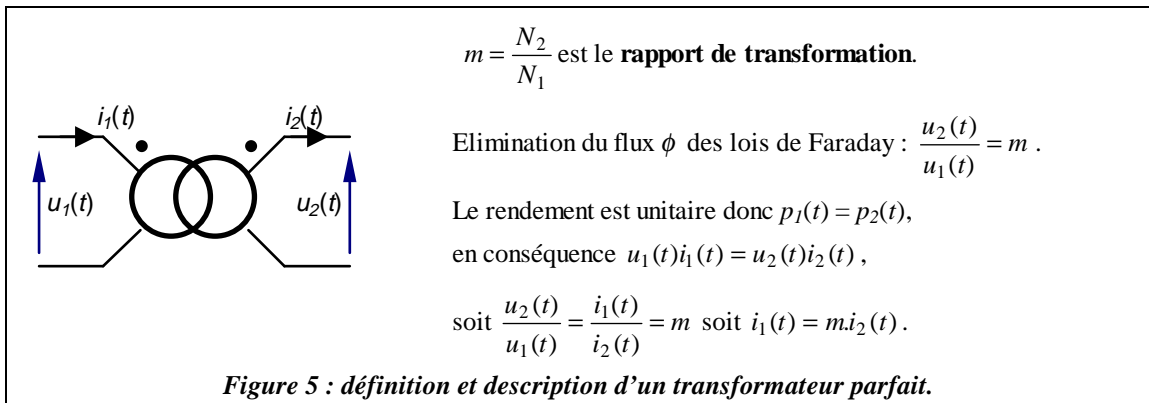
Ce qui conduit aux deux relations essentielles :

$$\begin{cases} i_1(t) - \frac{N_2}{N_1} i_2(t) = \frac{\phi(t)}{N_1 \cdot AL} = i_\mu(t) \\ u_1(t) = N_1 \frac{d\phi(t)}{dt} = N_1^2 \cdot AL \frac{di_\mu(t)}{dt} = L_1 \frac{di_\mu(t)}{dt} \end{cases}$$

Le courant  $i_\mu(t) = \frac{\phi(t)}{N_1 \cdot AL}$  est appelé **courant de magnétisation** du transformateur. C'est aussi le courant apparaissant au primaire lorsque le transformateur est à vide.

L'inductance  $L_1 = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}} = N_1^2 AL$  est appelée **inductance de magnétisation**.

En tenant compte des hypothèses et de ces équations, le modèle retenu apparaît à la **Figure 6**. L'élément central est un **transformateur parfait** décrit à la **Figure 5**.



**Remarque :** le flux  $\phi$  intervient sous forme dérivée, si bien qu'il est représenté par une fonction continue du temps. C'est un comportement similaire au courant dans une inductance (forme intégrale de la tension) ou à la tension aux bornes d'un condensateur (forme intégrale du courant).

### III.2. Incidence de la saturation

Lorsque la saturation est atteinte, l'induction  $B(t) = B_{sat}$  donc  $\phi(t) = \phi_{sat}$  (= cte), donc :

$$u_1(t) = N_1 \frac{d\phi_{sat}}{dt} = 0 \text{ et de même } u_2(t) = 0$$

Ceci ne pose pas de problème au secondaire : en l'absence de variations, la tension aux bornes de la charge est nulle. Par contre, au primaire (**Figure 7**), l'annulation de la tension  $u_1(t)$  conduit à une augmentation de la tension aux bornes de la résistance équivalente du circuit primaire. Cette dernière est plutôt faible si bien que le courant primaire est important. Ce courant dépasse bien souvent le courant nominal de collecteur du transistor T pouvant entraîner sa détérioration.

**En pratique, il faut prendre toutes les précautions nécessaires afin de ne pas atteindre la saturation.** Cette remarque nous incite à définir une caractéristique limite du transformateur (Cf. §IV.1).

## IV. Caractéristiques et comportement du transformateur

### IV.1. Produit $E.\tau$

Le transformateur est inséré dans un montage permettant d'alimenter son primaire (*Figure 8*) par un échelon de tension (*Figure 9*) en saturant le transistor T à l'instant  $t = 0$ .

La tension  $u_2(t)$  est dans le rapport de transformation donc  $u_2(t) = m.u_1(t) = m.E$ .

Le flux  $\phi$  s'exprime par :  $\phi(t) - \phi(0) = \frac{1}{N_1} \int_0^t u_1(t) dt$

La démagnétisation initiale,  $\phi(0) = 0$ , entraîne  $\phi(t) = \frac{E}{N_1} t$ .

La tension  $u_2(t)$  s'annule dès que la saturation est atteinte.

On définit le **produit  $E.\tau$** , de manière à ne pas atteindre la saturation :

$$\phi \text{ atteint } \phi_{sat} \text{ à l'instant } t = \tau \text{ d'où } \phi_{sat} = \frac{E\tau}{N_1}.$$

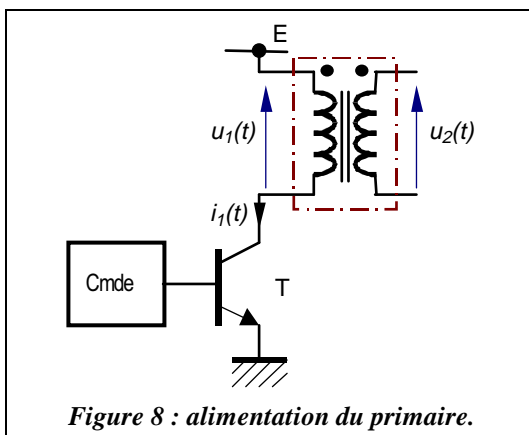


Figure 8 : alimentation du primaire.

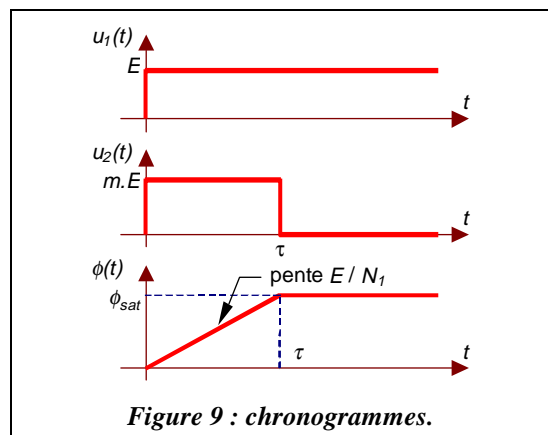


Figure 9 : chronogrammes.

### IV.2. Démagnétisation du circuit magnétique

Une fois magnétisé et après avoir délivré l'impulsion de tension  $u_2(t)$ , il faut replacer le circuit magnétique dans un état initial non magnétisé : c'est l'opération de démagnétisation.

#### IV.2.1. Montage de base

Pour assurer la continuité du courant dans le primaire du transformateur au moment où le commutateur s'ouvre, on place une diode antiparallèle D (tension de seuil  $V_{D0}$ ) avec le primaire (*Figure 10*). Cette solution permet aussi de protéger le transistor qui réalise le commutateur.

Résultat de la magnétisation de durée  $T_1$  de durée inférieure à  $\tau$  pour éviter la saturation, le flux atteint

$$\phi_{T1} = \frac{E}{N_1} T_1.$$

L'origine temporelle est alors choisie à  $t = t_0 + T_1$ . A cet instant, le transistor est bloqué : le courant  $i_1$  force la diode D à conduire, donc  $u_1(t) = -V_{D0}$ .

Le flux s'exprime par :  $\phi(t) = \int \frac{(-V_{D0})}{N_1} dt + \phi_{T1} = \phi_{T1} - \frac{V_{D0}}{N_1} t$ .

On observe que le flux décroît. Son annulation entraîne celle du courant  $i_D$ .

D se bloque au bout de  $T_d = \frac{N_1}{V_{D0}} \phi_{T1} = \frac{E}{V_{D0}} T_1$ .

Les chronogrammes illustrant ce fonctionnement sont indiqués à la *Figure 11*.

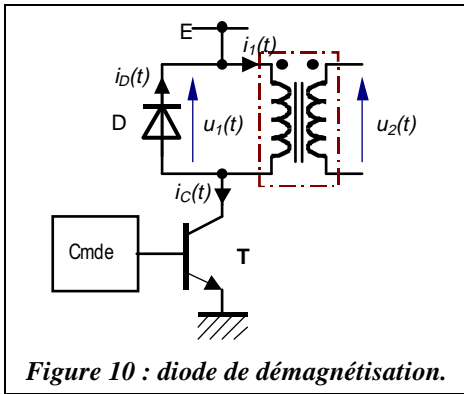


Figure 10 : diode de démagnétisation.

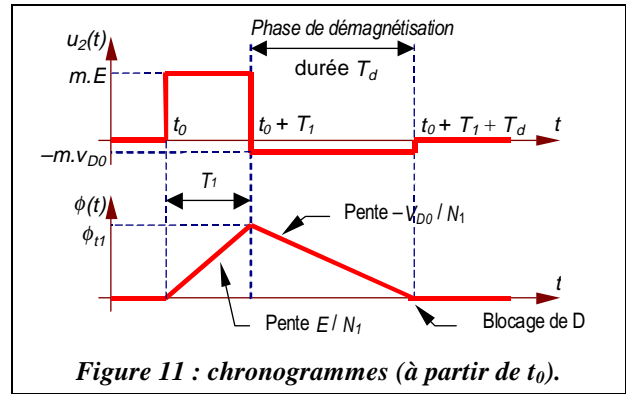


Figure 11 : chronogrammes (à partir de  $t_0$ ).

## IV.2.2. Remagnétisation prématurée

Que se produit-il si on remagnétise le circuit avant sa démagnétisation complète ? Dans ce cas, la condition initiale sur le flux n'est pas nulle si bien qu'au blocage de T, le flux dépasse le flux maximal de la phase de magnétisation précédente. Au-delà de quelques périodes de commande du commutateur, le flux de saturation est atteint. On retrouve les inconvénients décrits au §III.2. Le phénomène est illustré à la Figure 12.

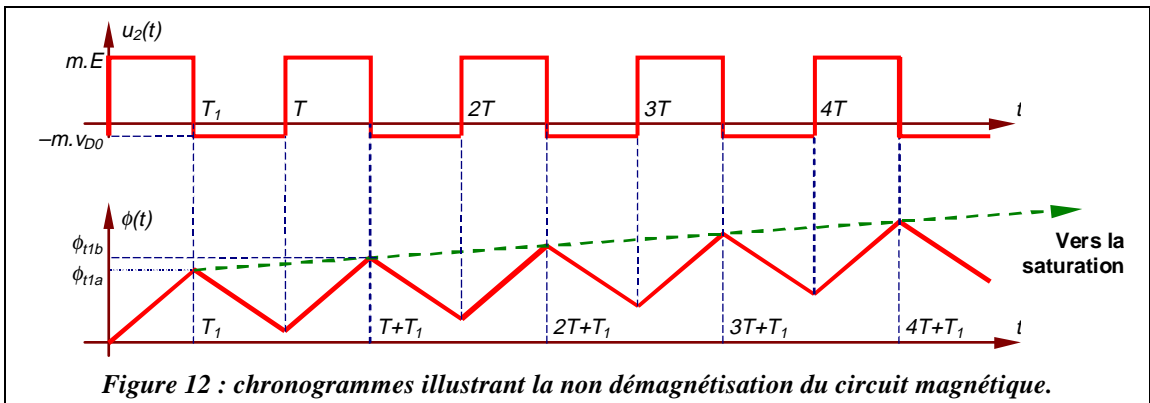


Figure 12 : chronogrammes illustrant la non démagnétisation du circuit magnétique.

## IV.2.3. Fréquence de fonctionnement limite — Remèdes

Il est la nécessaire de remagnétiser le circuit après une période de « récupération »  $T_d$  suffisante. Cette durée a l'inconvénient d'augmenter la période de commande du commutateur et donc de limiter la fréquence de fonctionnement :

$$f_{\max} = \frac{1}{T_1 + T_d}$$

Pour augmenter la fréquence de fonctionnement, il faut diminuer la durée de démagnétisation  $T_d$ . Deux solutions sont proposées et étudiées.

## IV.2.4. Diode Zener de démagnétisation

La première solution consiste à placer une diode Zener  $DZ$  en série avec la diode  $D$  (Figure 13). Ces diodes sont supposées idéales : tensions de seuil nulles et tension Zener  $V_Z$  (comptée positivement).

Durant la phase de magnétisation, les diodes sont bloquées, le fonctionnement est similaire à celui du montage de base.

L'origine temporelle est choisie à l'instant d'ouverture de T. Le courant forcé dans les diodes les rend passantes :  $u_1(t) = -V_Z$  donc  $u_2(t) = -m.V_Z$ .

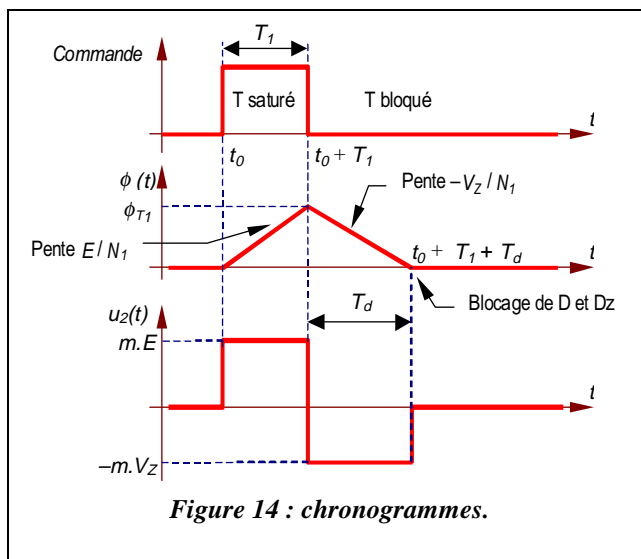
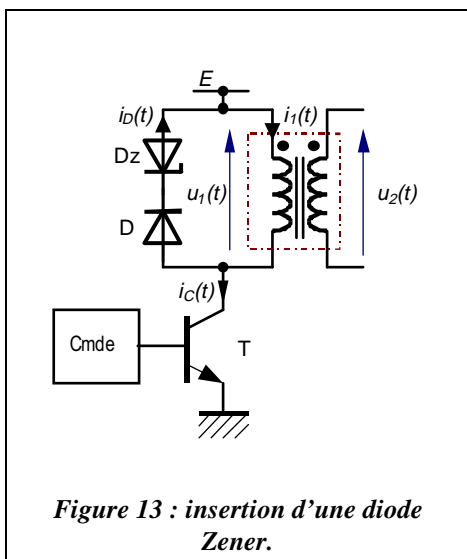
$$\text{Le flux s'exprime par : } \phi(t) = \int \frac{(-V_Z)}{N_1} dt + \phi_{T1} = \phi_{T1} - \frac{V_Z}{N_1} t \text{ avec } \phi_{T1} = \frac{E}{N_1} T_1 \text{ (fin de magnétisation).}$$

Le flux décroît. Son annulation entraîne celle du courant  $i_D$ .

$$D \text{ se bloque au bout de } T_d = \frac{N_1}{V_Z} \phi(T_1) = \frac{E}{V_Z} T_1 \text{ marquant la fin de la démagnétisation.}$$

Le temps de démagnétisation est inversement proportionnel à la tension Zener. Cette tension est supérieure à la tension de seuil d'une simple diode, ce qui rend ce procédé plus performant que le montage de base.

Les chronogrammes illustrant ce fonctionnement sont indiqués à la **Figure 14**.



#### IV.2.5. Transformateur avec enroulement de démagnétisation

Une seconde solution consiste à placer un troisième enroulement de  $N_3$  spires sur le circuit magnétique (**Figure 15**).

Pour simplifier, l'étude sera menée en fonctionnement à vide :  $i_2(t) = 0$ .

##### Phase de magnétisation (origine en $t_0$ )

Durant cette phase :  $u_1(t) = E$ ,  $u_2(t) = \frac{N_2}{N_1} E$  et  $u_3(t) = \frac{N_3}{N_1} E$ .

Le flux s'exprime par :  $\phi(t) = \int \frac{E}{N_1} dt + \phi(t_0) = \frac{E}{N_1} t$  (circuit initialement démagnétisé :  $\phi(t_0) = 0$ ).

La tension  $u_D(t) = -(1 + \frac{N_3}{N_1})E$  est négative : la diode D est bloquée et  $i_3(t) = 0$ .

A l'issue de cette phase  $\phi(t_0 + T_1) = \frac{E}{N_1} T_1 = \phi_{T_1}$ .

##### Phase de démagnétisation (origine en $t_0 + T_1$ )

A l'instant  $t = t_0 + T_1$ , nouvelle origine temporelle, T bloqué force le courant  $i_1$  à s'annuler.

La relation d'Hopkinson s'écrit :  $N_1 i_1(t) - N_2 i_2(t) + N_3 i_3(t) = \mathcal{R} \phi(t)$ ,

en conséquence, le courant  $i_3(t) = \frac{\mathcal{R}}{N_3} \phi(t)$  force la conduction de la diode D.

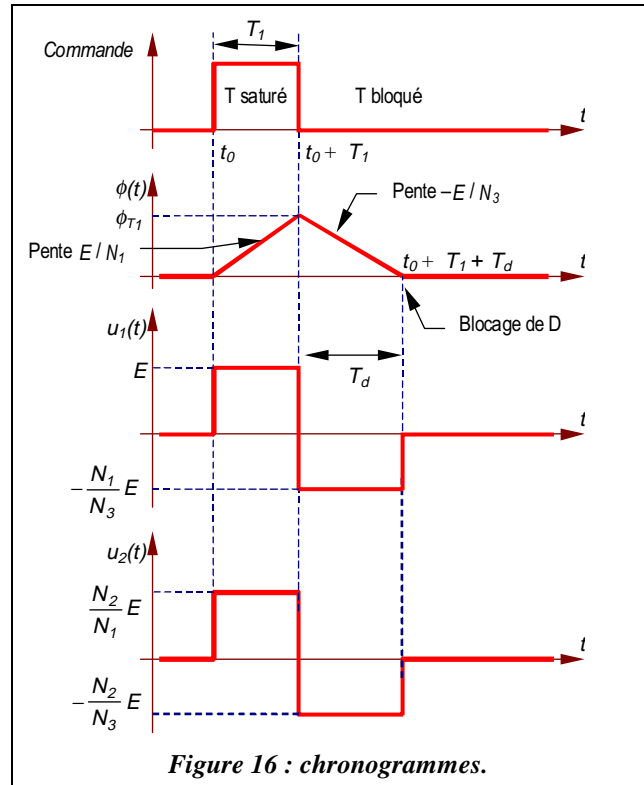
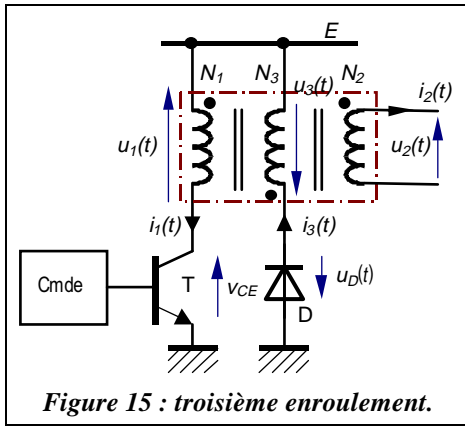
La tension  $u_D$  est nulle, donc  $u_3(t) = -E = N_3 \frac{d\phi(t)}{dt}$ , donc  $\phi(t) = \int \frac{-E}{N_3} dt + \phi_{T_1} = \phi_{T_1} - \frac{E}{N_3} t$

Les tensions  $u_1(t)$  et  $u_2(t)$  sont le reflet de la tension  $u_3(t)$  :  $u_2(t) = -\frac{N_2}{N_3} E$  et  $u_1(t) = -\frac{N_1}{N_3} E$ .

Le flux décroît et s'annule au blocage de D :  $T_d = \frac{N_3}{E} \phi_{T_1} = \frac{N_3}{N_1} T_1$ .

Le temps de démagnétisation est proportionnel au nombre de spires du troisième enroulement.

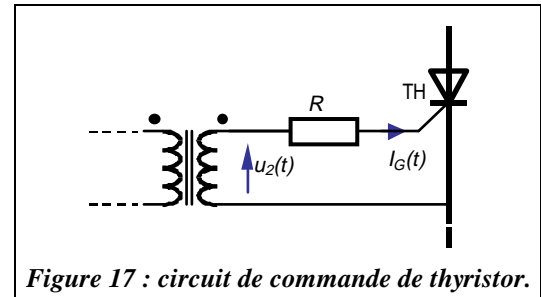
Les chronogrammes illustrant ce fonctionnement sont indiqués à la **Figure 16**.



## V. Principales applications

### V.1. Commande de thyristor

Pour être amorcé, le thyristor a besoin d'une impulsion de courant à travers sa gâchette. Cette dernière est donc reliée au secondaire d'un transformateur d'impulsions. Ce dernier assure aussi l'isolation galvanique entre la commande et la puissance (Figure 17).



### V.2. Alimentations à découpage

Pour améliorer le rendement des alimentations continues on utilise des alimentations à découpage. La tension continue de départ (éventuellement le réseau alternatif redressé et filtré) est découpee et transmise à travers un transformateur en régime impulsionnel pour être redressée, filtrée et régulée.

L'intérêt d'un tel procédé provient :

- de la possibilité d'élever la tension ;
- du rendement favorable de l'alimentation obtenue ;
- du volume limité du circuit magnétique si la fréquence de découpage est élevée (au delà de la plus haute fréquence audible pour un meilleur confort des utilisateurs). Les signaux de fréquence élevée entraînent des pertes par courants de Foucault accrues. L'usage d'un matériau magnétique à forte résistivité électrique tel que les ferrites est particulièrement recommandé ;
- des éléments de filtrage ( $C$  et  $L$ ) de taille limitée (car la fréquence est élevée) ;
- de l'isolation galvanique.