



**Troisième année CSA**

**CSA 5 C COSP**

**LES DIODES RAPIDES EN  
ELECTRONIQUE DE PUISSANCE**

Joël REDOUTEY

# LES DIODES RAPIDES

## EN ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

La plupart des circuits de conversion d'énergie utilisés en électronique de puissance font appel à une ou plusieurs diodes. Dans les utilisations à basse fréquence, il n'est généralement pas nécessaire d'employer des diodes rapides. Par contre dans les circuits à moyenne ou haute fréquence et dans la majorité des circuits transistorisés, l'utilisation de diodes rapides est impérative.

### 1 - QUELQUES RAPPELS CONCERNANT LES DIODES.

Un redresseur moderne est constitué d'une jonction PN, réalisée dans un matériau silicium. Cette jonction est montée dans un boîtier capable d'une part d'assurer la liaison électrique avec le circuit extérieur, et d'autre part, d'évacuer les calories générées dans le cristal.

On peut réaliser ainsi des diodes pouvant admettre des courants de quelques centaines de milliampères à plusieurs centaines d'ampères et capables de bloquer des tensions jusqu'à quelques milliers de volts.

Une diode de puissance est caractérisée au premier ordre par la tension inverse qu'elle peut supporter en régime répétitif  $V_{RRM}$  et par sa chute de tension à l'état passant  $V_F$ .

#### 1.1 TENSION INVERSE MAXIMALE

Lorsqu'une diode est polarisée en inverse, il s'établit dans le matériau, un champ électrique dont la valeur est maximale à la jonction. Si l'on augmente la tension inverse, le champ augmente et lorsqu'il atteint la valeur critique il se produit un effet d'avalanche qui peut conduire à la destruction du composant.

Le constructeur spécifie donc la tension d'utilisation maximale  $V_{RRM}$  à une valeur inférieure à la tension d'avalanche (fig.1).

L'utilisateur devra veiller à ce que la tension inverse appliquée à la diode dans le circuit ne dépasse jamais la valeur spécifiée.

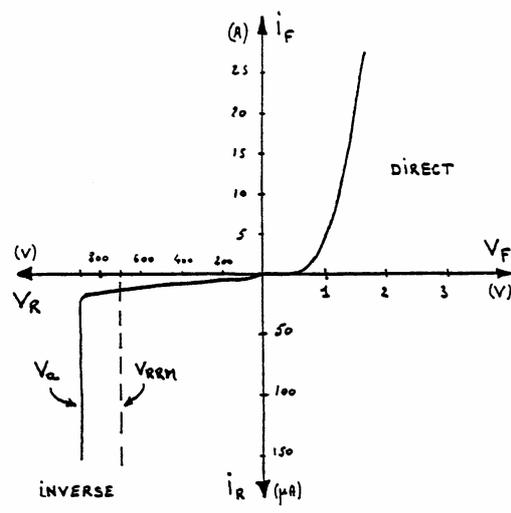


Figure 1 - Caractéristique tension - courant d'une diode

## 1.2 CHUTE DE TENSION DIRECTE

A l'état passant, la chute de tension dans une diode est due à deux facteurs :

- la hauteur de la barrière de potentiel
- la somme des résistances d'accès à la jonction

Le constructeur donne dans la notice une courbe d'évolution de la chute de tension directe  $V_F$  en fonction du courant dans la diode. Cette courbe donne une bonne précision sur la chute de tension directe mais n'est pas très commode d'emploi pour le calcul des pertes de conduction. Pour cette raison, on préfère utiliser dans ce cas un schéma équivalent de la diode constitué d'une force contre électromotrice  $E_0$  en série avec une résistance  $R_0$  (Fig.2). Dans ces conditions on peut écrire:

$$V_F = E_0 + R_0 I_F$$

ce qui permet une détermination aisée de la puissance dissipée dans la diode.

$$P_d = E_0 I_{F(AV)} + R_0 I_{F(RMS)}^2$$

$I_{F(AV)}$  = valeur moyenne du courant dans la diode.

$I_{F(RMS)}$  = valeur efficace du courant dans la diode.

Les paramètres  $E_0$  et  $R_0$  sont donnés à température de jonction élevée (en général  $T_J = 100^\circ\text{C}$ ) de manière à se rapprocher le plus possible des conditions d'utilisation réelles. On sait que les semi-conducteurs sont très sensibles à la température. Le paramètre  $E_0$  présente un coefficient de température négatif alors que celui de  $R_0$  est positif.

Compte tenu de l'importance relative des deux termes, le coefficient de température de la chute de tension directe  $V_F$  est négatif. Ce résultat est important pour la stabilité thermique des diodes dans les circuits (risque d'emballement thermique, mise en parallèle délicate...)

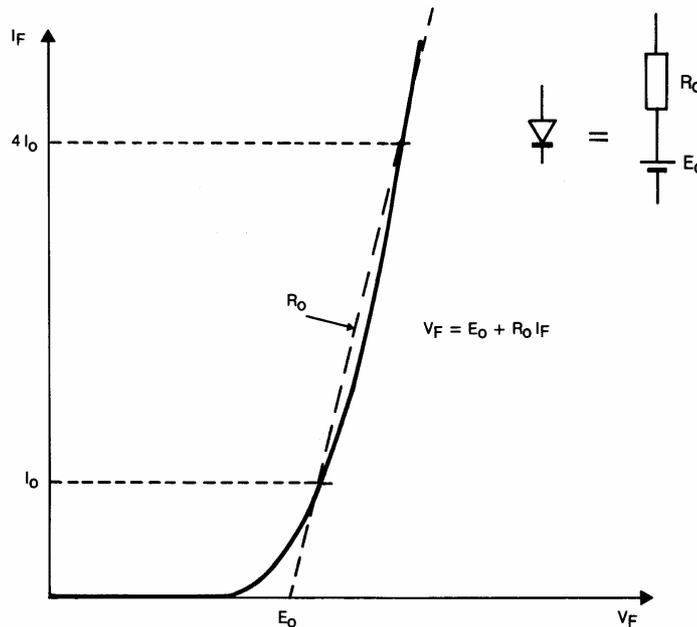


Figure 2 - Modélisation de la caractéristique directe d'une diode

## 2 - COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES DIODES

Dans la majorité des applications les diodes sont utilisées en redressement ou en commutation, c'est à dire qu'elles sont alternativement rendues conductrices ou bloquées. Il est donc important de connaître le comportement d'une diode lors de l'établissement du courant (passage de l'état bloqué à l'état conducteur) et du blocage (passage de l'état conducteur à l'état bloqué).

### 2.1 COMMUTATION A L'ETABLISSEMENT DU COURANT.

Lorsqu'on établit un courant à travers une diode initialement bloquée, sa chute de tension n'atteint pas immédiatement sa valeur statique  $V_F$ , mais passe par une valeur transitoire notablement plus élevée (fig. 3).

Ce phénomène, que l'on nomme recouvrement direct, peut au premier ordre, être assimilé à un mécanisme d'aspect résistif. Durant la période d'établissement, les concentrations de porteurs minoritaires injectés dans la zone centrale croissent. La résistance apparente de cette zone, très élevée au début de la phase d'établissement décroît donc avec le temps jusqu'à rejoindre la valeur statique. Il en résulte la forme de la chute de tension directe indiquée sur le fig. 3.

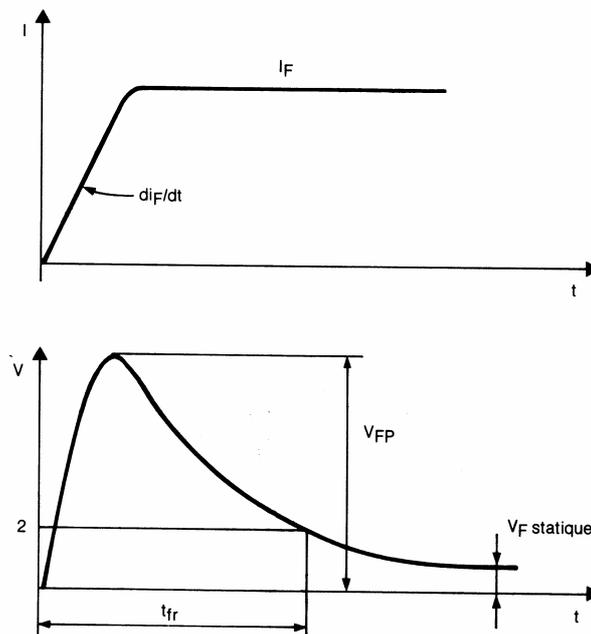


Figure 3 Commutation à l'établissement d'une diode

Type	tension d'avalanche	$V_{FP}$	$T_{fr}$
BAX12	120V	1,4V	8 ns
BYW 100	200 V	1,5V	12ns
BYV88	1250V	26V	200 ns
BA 159	1500 V	38 V	400 ns
1N 4007	> 1600 V	42 V	640 ns

Quelques ordres de grandeur de  $V_{FP}$  et  $t_{fr}$  pour différentes diodes.  
(Conditions de mesures :  $I_F = 0,5A$   $dI_F/dt = 50A/\mu S$   $E = 50V$ )

Le recouvrement direct peut être caractérisé à l'aide de deux paramètres :

- l'amplitude  $V_{FP}$  de la surtension aux bornes de la diode.
- la durée  $t_{fr}$  du phénomène.

Ces paramètres sont très dépendants des conditions extérieures. Ainsi, l'amplitude  $V_{FP}$  dépend essentiellement de la vitesse de variation du courant  $dI_F/dt$  et de l'amplitude de la source de tension qui génère le courant (fig. 4).

Lorsque la tension  $E$  du générateur est faible (inférieure à 10 V) le  $V_{FP}$  peut atteindre une valeur voisine de  $E$  et la vitesse de montée du courant  $dI_F/dt$  est alors imposée par la diode. C'est le cas le plus défavorable. Si par contre la tension  $E$  est grande, c'est le circuit qui impose le  $dI_F/dt$ . L'amplitude  $V_{FP}$  peut atteindre une valeur élevée (plusieurs dizaines de volts) mais le phénomène est de plus courte durée.

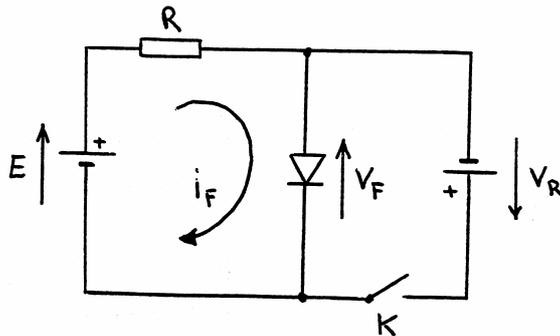


Figure 4 Circuit permettant de mettre en évidence le phénomène de recouvrement direct (commutation à l'établissement du courant).

La commutation à l'établissement est assez peu sensible à l'amplitude du courant mais évolue relativement vite avec la température (augmentation de l'ordre de 50 % de  $t_{fr}$  et  $V_{FP}$  pour une augmentation de 100°C de la température de jonction).

La surtension  $V_{FP}$  est principalement liée à l'épaisseur de la zone centrale de la diode. De ce fait, les diodes haute tension (qui possèdent une zone centrale épaisse de manière à pouvoir loger la charge d'espace) présentent un  $V_{FP}$  plus élevé que les diodes basse tension. Pour des raisons technologiques, les diodes rapides au recouvrement inverse (blocage) possèdent une zone centrale mince et de ce fait sont également rapides à l'établissement.

## 2.2 COMMUTATION AU BLOCAGE

Lorsqu'on applique brusquement une tension inverse aux bornes d'une diode en conduction (fig.5), on constate qu'elle ne se bloque pas instantanément. Il s'écoule en effet un certain temps avant qu'elle ne retrouve son pouvoir de blocage, c'est le temps de recouvrement inverse  $t_{rr}$ . Durant la majeure partie de ce temps, la diode peut être considérée comme un court circuit en inverse.

Ce phénomène est dû à la présence d'une certaine quantité de charges emmagasinées dans la diode durant la conduction, cette charge appelée charge stockée s'écrit :

$$Q_S = \tau I_F$$

$\tau$  : durée de vie des porteurs minoritaires

$I_F$  : courant direct traversant la diode.

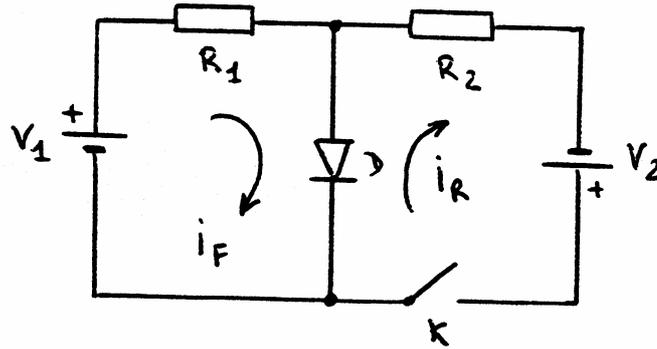


Figure 5 - Circuit permettant de mettre en évidence le phénomène de recouvrement inverse.

Pendant la commutation une partie de ces charges disparaît spontanément par recombinaison à l'intérieur du matériau. L'autre partie, appelée charge recouverte  $Q_R$  est évacuée par le courant inverse circulant dans la diode. C'est celle ci qui produit le courant inverse de recouvrement ainsi que toutes ses conséquences. Si la vitesse de variation du courant  $dI_F/dt$  pendant la commutation est extrêmement grande, la recombinaison interne est négligeable et la charge recouverte est très voisine de la charge stockée.

Le recouvrement inverse peut être décomposé en deux phases. (fig. 6)

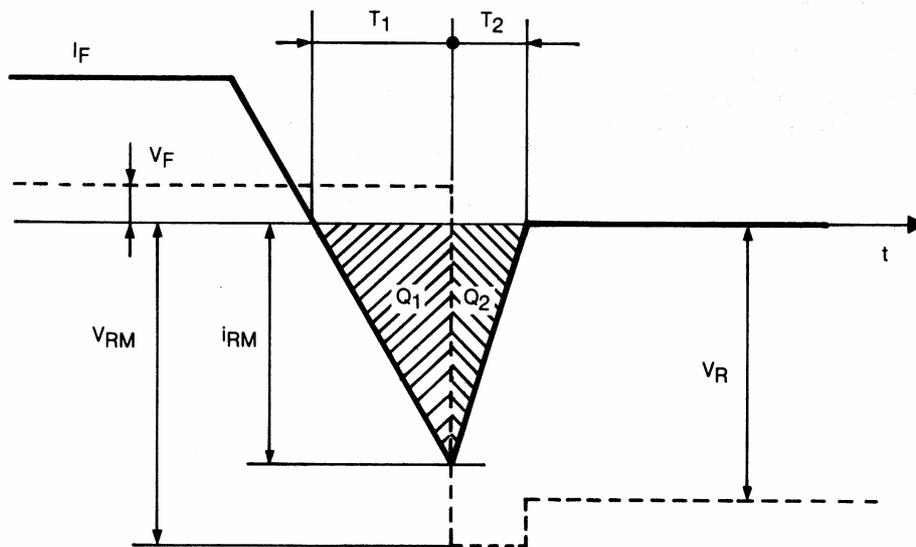


Figure 6 - Allures schématisées du courant et de la tension pendant le recouvrement.

Lorsqu'on ferme l'interrupteur K de la fig. 5, le courant direct s'annule et il s'établit un courant inverse  $I_{RR}$ . La vitesse de variation du courant  $dI_F/dt$  est imposée par le commutateur K ou plus généralement par le circuit extérieur.

A l'instant  $t_0$  le courant dans la diode change de sens. A l'instant  $t_1$  le courant inverse passe par son maximum  $I_{RM}$ . A cet instant la majorité de la charge recouverte a été évacuée et la diode commence à retrouver son pouvoir de blocage. Pendant cette première phase qui s'étend de  $t_0$  à  $t_1$  la charge  $Q_1$  a été évacuée.

La charge  $Q_2$  est évacuée pendant la deuxième phase qui s'étend de  $t_1$  à  $t_2$ . Elle est en général faible et se localise dans la partie de la zone centrale qui n'est pas occupée par la charge d'espace. Pendant cette phase la vitesse de remontée du courant de recouvrement  $dI_R/dt$  ne dépend donc que de la diode et de la tension inverse ré-appliquée. Elle sera d'autant plus grande que la charge  $Q_2$  sera faible et l'amplitude maximale  $I_{RM}$  grande.

On distinguera deux types de diodes selon l'allure de remontée du courant de recouvrement (fig. 7).

- les diodes à remontée brutale (snap off)
- les diodes à remontée progressive (soft recovery)

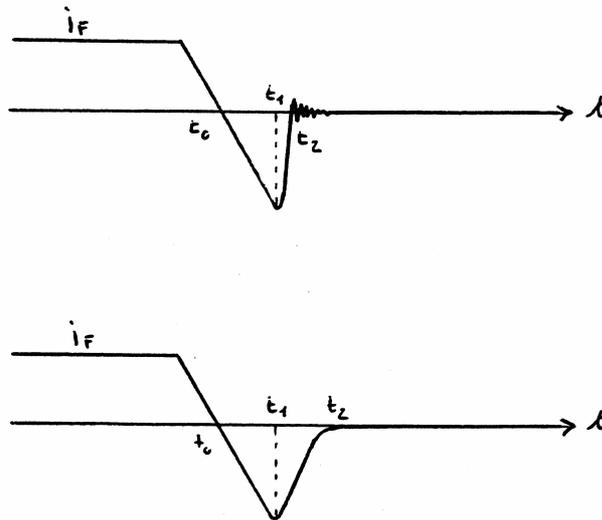


Figure 7 - Caractéristiques comparées d'une diode à remontée brutale (haut) et progressive (bas).

Dans les convertisseurs on évitera l'utilisation de diodes « snap off » qui sont génératrices de parasites difficiles à maîtriser (problèmes de CEM).

### 3 - LES DIODES RAPIDES.

On appelle diode rapide, une diode présentant un phénomène de recouvrement réduit par rapport à une diode ordinaire. Autrement dit, une diode rapide est une diode à blocage rapide. Cependant pour des raisons technologiques, la plupart des diodes rapides au blocage le sont également à l'établissement.

On caractérise la rapidité d'une diode à l'aide des paramètres suivants :

- La charge recouvrée  $Q_R$  qui dépend essentiellement de la charge stockée et de la vitesse de décroissance du courant  $dI_F/dt$ .
- Le temps de recouvrement inverse  $t_{rr}$  qui représente la durée du phénomène. Il dépend beaucoup des conditions extérieures.
- L'amplitude maximale du courant de recouvrement  $I_{RM}$

Ces paramètres sont évidemment dépendants du circuit dans lequel on les mesure. Le seul paramètre physique indépendant du circuit est la charge stockée qui nous l'avons vu s'exprime par :

$$Q_S = \tau I_F$$

C'est sur la durée de vie des porteurs minoritaires  $\tau$  que le constructeur va jouer pour réaliser des diodes rapides. En effet, en diminuant la durée de vie, on diminue la charge stockée et l'on augmente la vitesse de recombinaison. Il en résulte une forte diminution de la charge recouvrée.

Dans les notices de diodes rapides, les constructeurs spécifient les trois paramètres principaux  $Q_R$ ,  $t_{rr}$  et  $I_{RM}$  mais surtout ils donnent des courbes d'évolution de ces paramètres en fonction du courant direct  $I_F$ , de la vitesse de décroissance  $dI_F/dt$  et de la température. Ces informations permettent un calcul relativement précis des contraintes subies par la diode et appliquées aux autres composants du circuit.

Le tableau de la figure 8 donne un ordre de grandeur des paramètres principaux pour des diodes de même calibre mais de rapidités différentes.

Type	Catégorie	VRRM (V)	$di_F/dt = 60A/\mu s$			$di_F/dt = 150A/\mu s$		
			$Q_R (\mu C)$	$I_{RM} (A)$	$T_{rr} (ns)$	$Q_R (\mu C)$	$I_{RM} (A)$	$T_{rr} (ns)$
BYW88	Ordinaire	1200	20,4	34	1200	14,4	48	600
BYX66	Semi rapide	1000	3,6	16	450	4	25	320
BYX61	rapide	600	1,3	10	250	1,4	16	180
BYT12	Ultra rapide	400	0,025	1	50	0,045	2,6	35
BYW81	Ultra rapide	200	0,025	1	50	0,04	2	35

Figure 8 - Tableau comparatif de la rapidité de quelques diodes de même calibre en courant mais de technologies différentes. Conditions de mesure:  $I_F = 10A$   $V_R = 100V$   $T_j = 25^\circ C$

#### 4 - COMPORTEMENT DES DIODES RAPIDES DANS LES CIRCUITS

Selon la fonction remplie dans un circuit et donc selon l'environnement, une diode rapide peut avoir un comportement différent. Dans la pratique on doit considérer deux applications importantes :

- Les applications de type *redressement*.
- Les applications de type *roue libre*.

Ces deux cas sont assez différents et selon qu'il s'agit de l'un ou de l'autre type, les critères de choix de la diode la mieux adaptée, ne sont pas les mêmes.

##### 4.1 LES DIODES RAPIDES UTILISEES EN REDRESSEMENT

C'est le cas général des diodes de sortie des alimentations à découpage. Le fonctionnement de la diode dans ce cas peut se ramener à celui du schéma équivalent de la fig. 9.

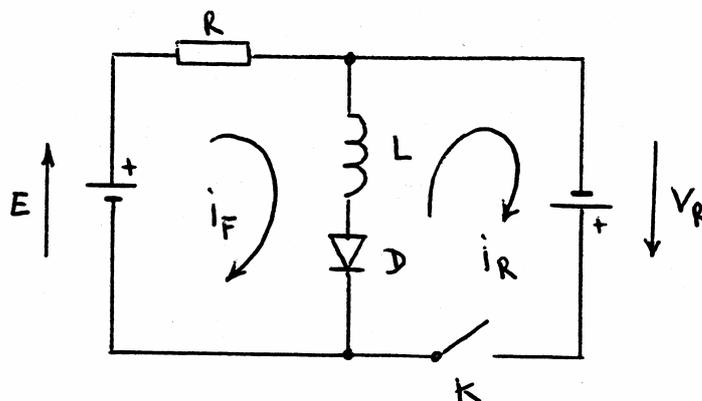


Figure 9 - Schéma équivalent d'un circuit de type redresseur. Ce circuit se caractérise par la présence d'une inductance  $L$  en série avec la diode.

Lorsqu'on ferme l'interrupteur  $K$ , le courant dans la diode décroît avec une pente  $dI_F/dt = -V_R/L$  imposée par l'inductance en série avec la diode.

Dans la pratique cette inductance représente la somme de l'inductance de fuite des transformateurs, de l'inductance parasite du câblage, etc.

La première phase  $T_1$  du recouvrement inverse est tout à fait classique (fig. 10), le courant de recouvrement inverse augmente et atteint son maximum  $I_{RM}$ . La pente  $dI_F/dt$  du courant s'annule et la tension aux bornes de la diode est égale à la tension  $V_R$  de la source. Durant la seconde phase  $T_2$ , la diode impose la vitesse de remontée  $dI_R/dt$ .

Il en résulte une surtension  $\Delta V = L \, dI_R/dt$  qui prend naissance dans l'inductance  $L$  et s'ajoute à la tension  $V_R$ . La diode est alors soumise à une tension inverse,

$$V_{RM} = V_R + \Delta V$$

qui dans certains cas peut dépasser la tension maximale  $V_{RRM}$  de la diode et même atteindre la tension d'avalanche.

On devra donc veiller à n'utiliser dans ce type de circuit que des diodes rapides à recouvrement progressif (Soft recovery).

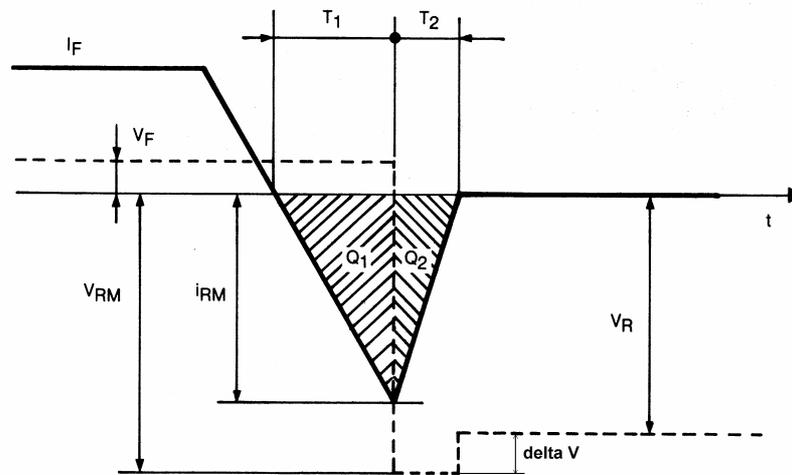


Figure 10 - Formes d'onde du courant et de la tension d'une diode dans un circuit de type redresseur

On démontre que dans ce circuit les pertes de commutation au recouvrement peuvent s'écrire:

$$P_C = Q_R V_R f$$

$Q_R$  : charge recouvrée.

$V_R$  : tension inverse ré-appliquée.

$f$  : fréquence de commutation.

En résumé, lorsqu'une diode rapide doit être utilisée dans une fonction de redressement, les critères principaux du choix de la rapidité sont :

- Une rapidité suffisante pour assurer des pertes faibles (donc une faible charge recouvrée  $Q_R$  )
- Une remontée progressive du courant de recouvrement (donc un  $dI_R/dt$  faible).

## 4.2 LES DIODES RAPIDES UTILISEES EN ROUE LIBRE

C'est le cas des diodes de roue libre dans les hacheurs.  
Le fonctionnement peut se ramener au circuit équivalent de la fig. 11.

Si l'interrupteur K est fermé, la diode est bloquée et vice versa. Lorsque l'on ferme l'interrupteur K, le courant qui traversait la diode décroît avec une vitesse  $dI_F/dt$  qui est imposée par le commutateur. A l'instant  $t_0$  (fig. 12), le courant s'annule dans la diode et le courant circulant dans la charge passe intégralement par le commutateur K.

Entre  $t_0$  et  $t_2$  un courant inverse circule dans la diode jusqu'à évacuation totale de la charge recouvrée  $Q_R$ . A l'instant  $t_1$  le courant de recouvrement inverse passe par son maximum  $I_{RM}$ .

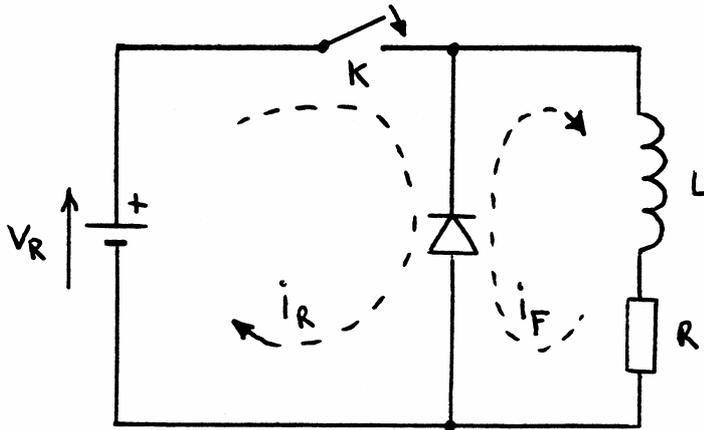


Figure 11 - Schéma équivalent d'un circuit de type roue libre (hacheur).

On remarquera que la tension inverse appliquée à la diode ne dépasse théoriquement pas la tension de la source. (En réalité, il y a toujours une petite surtension due à la présence de l'inductance du câblage). Les pertes de commutation dans la diode n'ont lieu que durant la remontée du courant de recouvrement et l'on a :

$$P_C = Q_2 V_R f$$

$Q_2$  : charge recouvrée pendant la remontée du courant de recouvrement.

$V_R$  : tension de la source d'alimentation.

$f$  : fréquence de découpage.

En général,  $Q_2$  est faible devant  $Q_1$  et si la diode est suffisamment rapide, ses pertes de commutation sont négligeables dans ce cas.

Il est important de noter que l'intégralité du courant de recouvrement traverse l'interrupteur K et la source, ce qui a deux conséquences immédiates :

- une surcharge en courant de l'interrupteur à la commutation à la fermeture.
- une baisse de rendement de l'équipement puisqu'une certaine puissance supplémentaire est perdue.

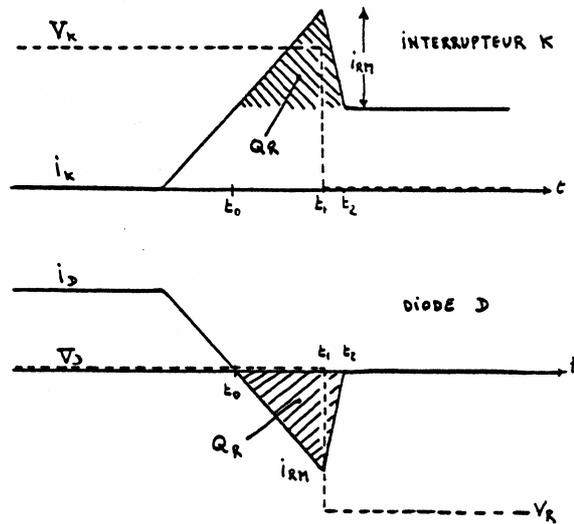


Figure 12 - Formes d'onde des courants et tension de la diode et de l'interrupteur dans le circuit hacheur de la figure 11.

En résumé, lorsqu'une diode rapide est utilisée en roue libre, le principal critère de choix est la rapidité. On devra sélectionner la diode la plus rapide compatible avec les autres paramètres du circuit.

## 5 - CONCLUSION.

On attache souvent peu d'importance au choix des diodes dans les circuits. C'est un tort, car un mauvais choix de diode peut avoir des conséquences désastreuses: surcharge de composants, mauvais rendement, fonctionnement perturbé...

Les phénomènes qui apparaissent à l'établissement du courant sont souvent mal connus. En particulier, lorsqu'une diode est mise en conduction à partir d'une source basse tension, sa réponse est telle que bien souvent c'est la diode elle-même qui impose la vitesse de montée du courant. Ceci explique par exemple, pourquoi on doit toujours utiliser des diodes rapides à l'établissement dans les commandes de base des transistors de puissance bipolaires.

Au blocage, le phénomène de recouvrement inverse peut avoir des conséquences graves dans certains circuits. Par exemple, dans les hacheurs à transistor, si la diode de roue libre n'est pas suffisamment rapide, le transistor est fortement surchargé à la commutation à la fermeture. Autre exemple, dans une alimentation à découpage de type Forward, si l'on n'utilise pas une diode à recouvrement progressif en redressement secondaire, on risque de générer des surtensions et des parasites difficiles à filtrer, sans compter une possible dégradation de la diode si la surtension générée dans l'inductance de fuite du transformateur atteint la tension d'avalanche.

Ces quelques exemples montrent l'importance du choix de la diode rapide adaptée à chaque fonction.