

# Diodes rapides: la mise en conduction

par A. MARQUES (\*)

*Les utilisateurs de redresseurs rapides destinés à des applications associées à des transistors ont besoin de connaître les phénomènes de retard, sursensions et pertes entraînées par les diodes. Nous allons, dans ce document, essayer de montrer le comportement de nos diodes à l'établissement du courant et de chiffrer les sursensions et les pertes d'énergie correspondantes.*

## Comportement des diodes à l'établissement

Un phénomène transitoire se produit quand on applique à une diode initialement bloquée une rampe de courant.

Ceci se caractérise par deux paramètres : le temps de recouvrement direct  $t_{fr}$  et l'amplitude de la surtension  $V_{FP}$ . La réponse à une rampe de courant linéaire  $di_F/dt$  est une surtension d'amplitude  $V_{FP}$  supérieure à la chute de tension statique  $V_F$  et qui se rétablit au bout du temps noté  $t_{fr}$  qui est le temps d'établissement du courant direct (voir figure 1).

## Paramètres définissant l'établissement du courant direct

### Conditions de mesure

On applique à la diode initialement bloquée une rampe de courant  $di_F/dt$  dont l'amplitude est limitée à  $I_F = I_0$ . La vitesse de montée du courant est imposée par le circuit extérieur.

### Surtension de recouvrement direct $V_{FP}$

(\*) Thomson-CSF, Division semi-conducteurs, Laboratoire d'applications d'Aix-en-Provence.

La tension transitoire directe qui apparaît aux bornes de la diode passe par une valeur maximale notée  $V_{FP}$  puis décroît vers la valeur de la chute de tension directe statique  $V_F$  (voir figure 1).

### Temps d'établissement direct $t_{fr}$

C'est le temps où la diode ne « réagit pas » c'est-à-dire, le temps que met la surtension transitoire  $V_{FP}$  pour décroître jusqu'à une tension de référence ( $V_{ref}$ ) fixée arbitrairement.

La surtension  $V_{FP}$  et le temps d'établissement  $t_{fr}$  sont donc les deux paramètres qui vont caractériser la rapidité de la mise en conduction d'une diode.

## Explication physique

A l'établissement du courant, la chute de tension directe n'atteint pas immédiatement sa valeur statique  $V_F$  mais passe par une valeur transitoire  $V_{FP}$  bien plus élevée.

Ce phénomène peut au premier ordre être assimilé à un mécanisme d'aspect résistif. Durant la période d'établissement, l'accroissement des concentrations de porteurs minoritaires injectés dans la zone centrale modifie le processus de conduction, le courant étant de plus

en plus véhiculé par ces porteurs. La résistance apparente de la zone centrale décroît donc avec le temps jusqu'à rejoindre la valeur statique  $R_0$  (Figure 2). La surtension  $V_{FP}$  sera donc directement liée à l'épaisseur de la zone centrale de la diode, à sa résistivité et à la surface de la diode.

## Résultats de mesure

Différentes mesures ont été faites sur plusieurs familles de diodes rapides :

- « haut rendement FRED » BYW77 - BYW78 - BYW81,
- diodes très rapides SUPER-SWITCH 2 - BYT12 - BYT30,
- diodes rapides haute tension - BYT61 - BYT65.

pour mieux connaître les variations des paramètres  $V_{FP}$  et  $t_{fr}$  à  $T_{vj} = 25^\circ\text{C}$  en fonction de la pente  $di_F/dt$ .

## Schéma de principe du circuit de mesure $V_{FP}$ , $t_{fr}$ utilisé

Nous avons utilisé le circuit représenté figure 3. Il permet de réaliser un générateur délivrant un courant  $I_0$  (réglable entre 5 et 60 A) croissant avec une pente  $di_F/dt$  (réglable de 10 à 300 A/ $\mu\text{s}$ ).

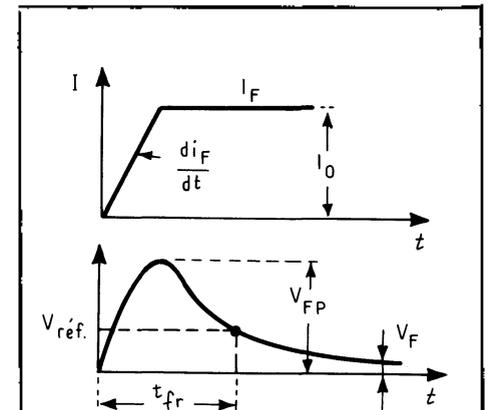


Fig. 1. - Commutation à la mise en conduction d'une diode.

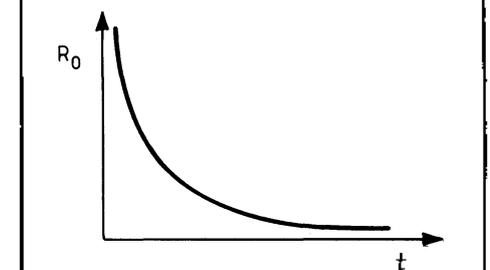


Fig. 2. - Variation de la résistance apparente avec le temps.

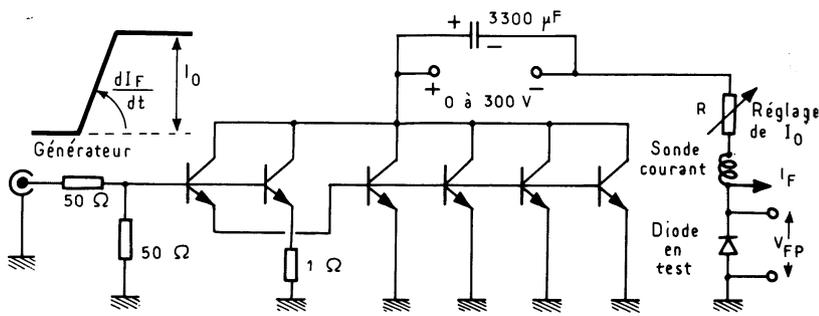


Fig. 3. - Schéma du circuit de mesure  $V_{FP}$ ,  $t_{fr}$ .

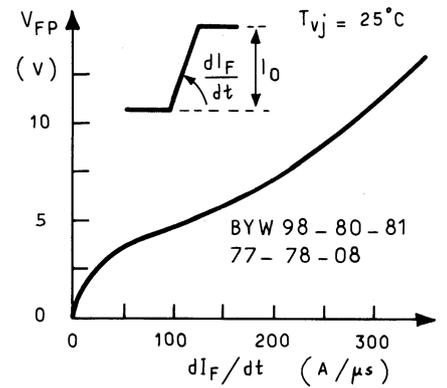


Fig. 4. - Variation de la surtension  $V_{FP}$  en fonction du  $dI_F/dt$  pour des diodes « FRED » (valeur).

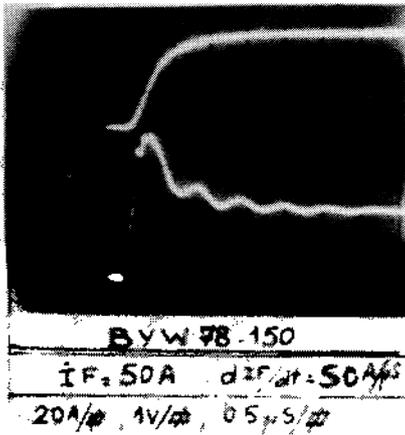
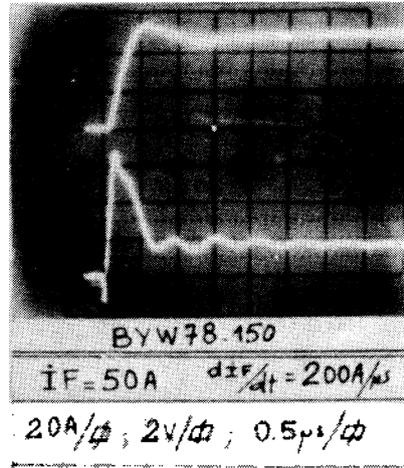


Fig. 5. - Oscillogramme sur redresseurs haut rendement FRED BYW 78 - 150. En haut, établissement du courant. En bas, tension aux bornes de la diode.



### Mesures de la tension $V_{FP}$

#### Redresseurs rapides à haut rendement « FRED »

Le comportement des trois types de diodes choisies dans la famille haut rendement FRED est voisin quel que soit le courant nominal.

#### Redresseurs rapides Superswitch 2 (400 V), BYT08 - BYT12 - BYT30 - BYT60.

Ces diodes ont un comportement en  $V_{FP}$  sensiblement équivalent. Par exemple à une vitesse de 300 A/s la surtension  $V_{FP}$  se situe entre 10,5 V et 12 V.

#### Redresseurs rapides haute tension, BYT61-65

La surtension  $V_{FP}$  étant principalement liée à l'épaisseur de la zone centrale de la diode, ces deux types de diodes haute tension qui ont une zone centrale épaisse ont donc des surtensions  $V_{FP}$  plus élevées que les séries plus rapides basse tension.

#### Redresseurs standard haute tension

Pour comparaison avec les séries rapides, il est intéressant de voir le comportement à l'établissement des diodes standard de redressement haute tension.

La mesure des paramètres  $V_{FP}$  et  $t_{fr}$  sur des diodes standard montre des valeurs plus élevées par rapport aux diodes rapides, mais surtout une très grande dispersion de ces valeurs.

Cette dispersion est due aux technologies (différentes et variées) des diodes standard qui négligent les impératifs physiques nécessaires aux diodes rapides.

#### Mesure du temps d'établissement $t_{fr}$

La figure 10 regroupe les mesures du temps d'établissement  $t_{fr}$  sur six diodes rapides de types différents.

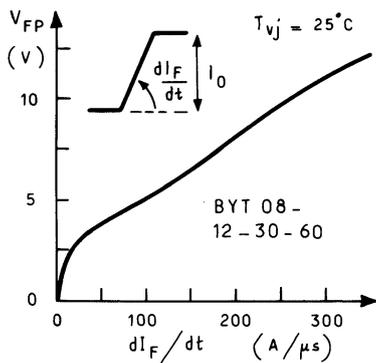


Fig. 6. - Variation de la surtension  $V_{FP}$  en fonction du  $dI_F/dt$  pour des diodes Superswitch 2 (valeur typique).

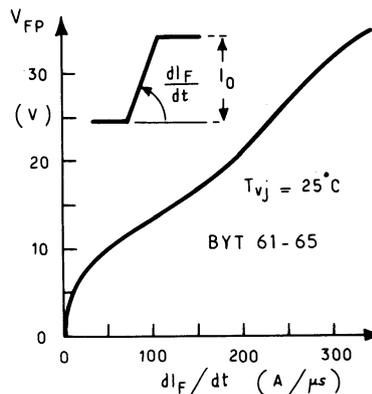


Fig. 8. - Variation de la surtension  $V_{FP}$  en fonction du  $dI_F/dt$  pour des diodes « haute tension » (valeur typique).

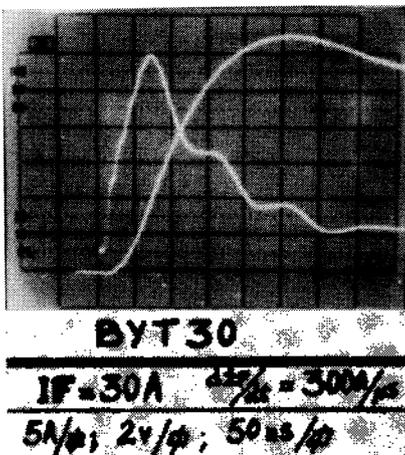


Fig. 7. - Oscillogramme sur redresseur BYT 30.

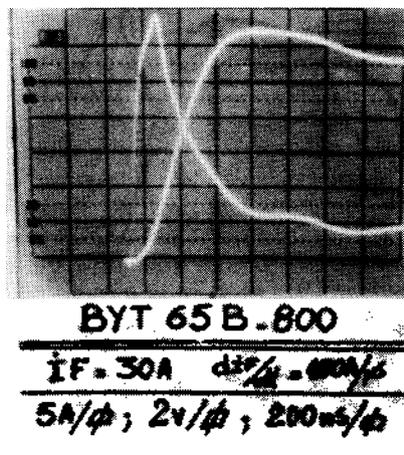


Fig. 9. - Oscillogramme sur diode BYT65B-800.

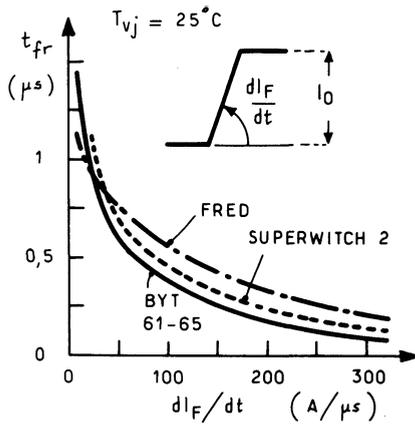


Fig. 10. - Variation du temps d'établissement  $t_{fr}$  en fonction du  $dI_F/dt$  (valeur typique).

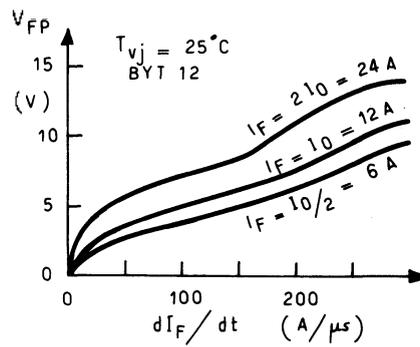


Fig. 11. - Variation de la surtension  $V_{FP}$  avec  $I_0$ .

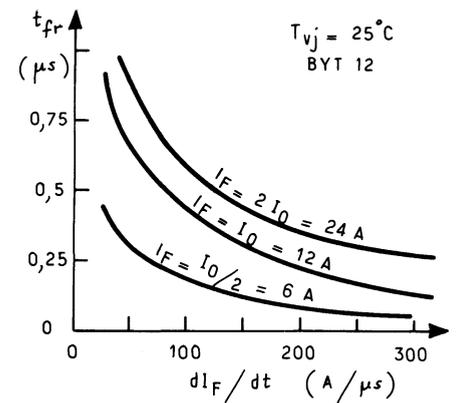


Fig. 12. - Variation du temps d'établissement  $t_{fr}$  avec  $I_0$ .

### Influence de la température sur le temps d'établissement $t_{fr}$ et la surtension $V_{FP}$

**Variation du temps d'établissement  $t_{fr}$  avec la température**  
 Les mesures effectuées à la température boîtier de 100 °C sur des diodes haut rendement FRED montrent que le temps d'établissement  $t_{fr}$  est majoré d'environ 15 à 20 % par rapport aux temps mesurés à 25 °C. De la même façon, les mesures à 100 °C sur les diodes rapides Superswitch 2 montrent une majoration d'environ 20 % par rapport à 25 °C.

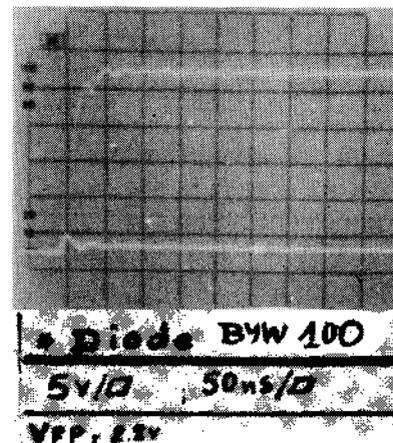
### Variation de la surtension $V_{FP}$ et du temps d'établissement $t_{fr}$ avec $I_0$

**Variation de la surtension  $V_{FP}$  avec  $I_0$**   
 Exemple :  $V_{FP}$  sur BYT12 à  $I_0$ ,  $I_0/2$ ,  $2 I_0$   
 La figure 11 montre comment varie la surtension  $V_{FP}$  avec  $I_0$  pour un même type de diode. Dans notre exemple, la BYT12 a un  $I_0 = 12 A$ . Ainsi pour  $I_F = I_0/2$  la surtension  $V_{FP}$  diminue d'environ 25 % par rapport à celui correspondant à  $I_F = I_0$  et augmente d'environ 40 % pour  $I_F = 2 I_0$ .

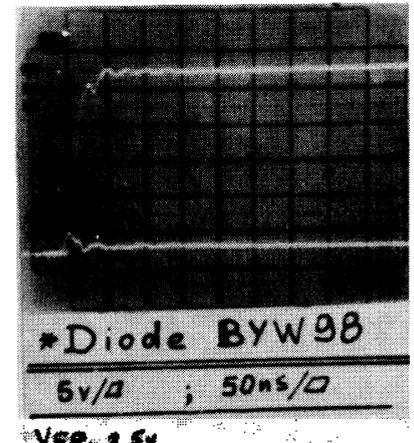
**Variation du temps d'établissement  $t_{fr}$  avec  $I_0$**   
 Exemple :  $t_{fr}$  sur BYT12 à  $I_0$ ,  $I_0/2$ ,  $2 I_0$   
 La figure 12 montre la variation d'établissement  $t_{fr}$  avec  $I_0$ . Là encore, on constate que le temps d'établissement  $t_{fr}$  augmente beaucoup avec le niveau de courant.

### Cas des basses tensions

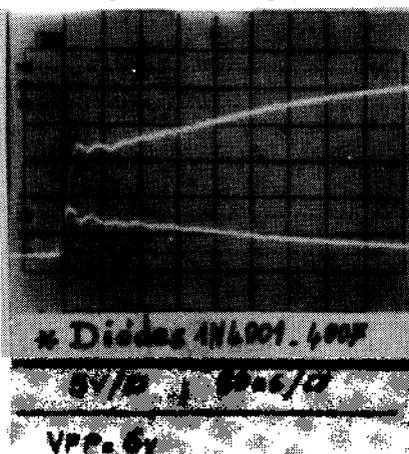
Les études du comportement des diodes à l'établissement ont été faites avec un circuit que l'on peut considérer comme un générateur de courant. Dans certaines applications, la tension disponible est rela-



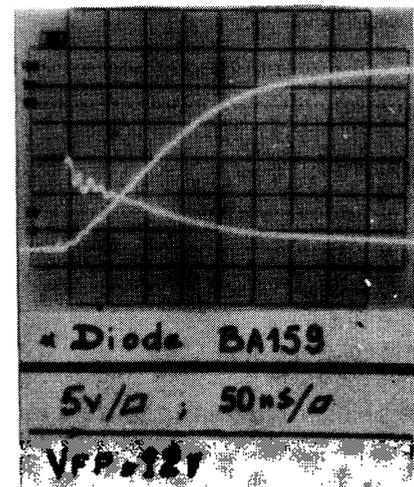
a) Oscillogramme diode rapide BYW 100.



b) Oscillogramme diode rapide à haut rendement BYW 98-200.



c) Oscillogramme diode de redressement IN4007-400 (50 à 1000 V).



d) Oscillogramme de redressement rapide (300 ns) et haute tension (1000 V).

tivement faible. Pour étudier le phénomène, nous avons fait des mesures spéciales à partir d'un circuit basse tension (figure 13).

On constate sur ces oscillogrammes,  
 - Qu'avec des diodes « haute tension (exemple : diode rapide BA159, diode standard 1N4001 - 4007) le courant monte avec un retard considérable,  
 - Qu'avec des diodes très rapides « basse tension » (exemple BYW100 et BYW98 (FRED) le courant monte avec un retard négligeable.

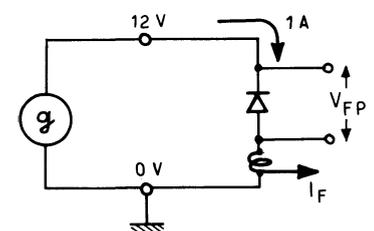


Fig. 13. - Montage de mesure. En haut courant. En basse tension.

Autrement dit, lorsque le générateur de tension du circuit d'établissement (monté en série avec la diode) a une faible tension, la plupart des diodes, qu'elles soient rapides ou standard, introduisent une perturbation dans le circuit. En effet, la tension du générateur n'est pas suffisante pour mettre la diode en conduction rapidement, et ceci se traduit par un retard notable du courant.

En conclusion, lorsqu'un circuit fonctionne en basse tension, il est indispensable d'utiliser les diodes très rapides (technologie FRED) si on veut éviter des retards importants à la mise en conduction.

### Pertes de puissance à la mise en conduction

#### Exemple de calcul des pertes sur un redresseur haut rendement « FRED »

Soit une BYW78 établissant un courant  $I_O = 50 \text{ A}$  à la vitesse de  $300 \text{ A}/\mu\text{s}$  et à une fréquence de  $40 \text{ kHz}$  (avec  $\delta = 0,8$ ), on obtient dans ces conditions une surtension  $V_{FP}$  de  $11 \text{ V}$  (figure 5) et un temps d'établissement  $t_{fr}$  de  $220 \text{ ns}$ . La chute de tension statique d'une BYW78 est de l'ordre de  $0,85 \text{ V}$  pour  $I_O = 50 \text{ A}$ .

Energie perdue à chaque mise en conduction :

$$W \approx 1/2 (V_{FP} - V_F) \cdot I_O \cdot t_{fr} = 55 \mu\text{J}$$

A  $20 \text{ kHz}$ , la puissance perdue est de l'ordre de  $2,2 \text{ W}$ , donc très faible devant les pertes de conduction ( $\sim 34 \text{ W}$ ).

#### Exemple de calcul des pertes sur un redresseur rapide haute tension (BYT65B-800)

Soit une BYT65B-800 établissant un courant  $I_O = 30 \text{ A}$  à la vitesse de  $300 \text{ A}/\mu\text{s}$  et à une fréquence de  $20 \text{ kHz}$  ( $\delta = 0,5$ ), on obtient dans ces conditions une surtension  $V_{FP}$  de  $32 \text{ V}$  (figure 9) et un temps d'établissement  $t_{fr}$  de  $120 \text{ ns}$ . La chute de tension statique d'une BYT65B-800 est de l'ordre de  $1,4 \text{ V}$  pour  $I_O = 30 \text{ A}$ .

Energie perdue à chaque mise en conduction :

$$W \approx 1/2 (32 - 1,4) \cdot 30 \cdot 120 \cdot 10^{-9} = 55 \mu\text{J}$$

A  $20 \text{ kHz}$ , la puissance perdue est de l'ordre de  $1,1 \text{ W}$ , donc encore faible devant les pertes de conduction ( $21 \text{ W}$ ).

#### Conséquences

On voit que même en choisissant les conditions extrêmes ( $di/dt =$

$300 \text{ A}/\mu\text{s}$ ) les pertes de commutation d'une diode rapide à la mise en conduction restent faibles devant les pertes de conduction (ou de blocage), dans la gamme de fréquence  $0 - 40 \text{ kHz}$ .

Dans le cas où la fréquence dépasserait  $50 \text{ kHz}$ , ces pertes ne peuvent plus être négligées. Pour les réduire, le concepteur pourra avoir intérêt à surdimensionner la diode, c'est-à-dire à la faire fonctionner à plus faible densité de courant.

### Conclusion

Une diode de puissance rapide (sous-entendu rapide au blocage) présente par construction de faibles surtensions  $V_{FP}$  et de faibles temps d'établissement  $t_{fr}$ . Dans la plupart des applications, on pourra négliger les surtensions de mise en conduction et les pertes correspondantes. Ces surtensions sont en effet souvent faibles devant celles qui sont dues aux inductances parasites du câblage. Dans les cas particuliers où les surtensions perturberaient le circuit, le concepteur pourra toujours les réduire, d'une part en utilisant la diode la plus rapide (celle qui est conçue pour une tension maximale peu élevée), d'autre part en surdimensionnant la diode, c'est-à-dire en la faisant fonctionner à faible densité de courant.

Dans le cas particulier où le circuit utilise un générateur de tension de faible valeur ( $< 50 \text{ V}$ ) l'utilisation d'une diode rapide mal adaptée pourra perturber le fonctionnement du circuit en introduisant un retard. Dans ce cas, les diodes « haut rendement » FRED n'introduisent pas de retard.

A.M.

**Toute l'Electronique**

**Première  
Revue Technique**

**de**

**Langue française**