

Initiation à la pratique de l'électronique

LA DIODE ZENER

et ses applications

A PRES avoir parlé de la diode semi-conductrice et de ses principales applications, nous consacrons aujourd'hui un article à la diode Zener.

Cette diode d'un type particulier est tellement courante qu'il est intéressant de bien savoir comment l'utiliser.

Nous commençons donc par le relevé de sa caractéristique courant/tension et indiquons comment l'employer sans problème, c'est-à-dire sans danger ni pour la diode ni pour son circuit. Nous verrons ensuite que la diode Zener possède quatre caractéristiques principales : sa tension d'utilisation, sa puissance à ne pas dépasser, sa résistance dynamique et son coefficient de température.

Le lecteur apprendra ensuite à calculer un circuit de

régulation dont l'efficacité pourra être chiffrée.

Une diode Zener peut être employée non seulement pour réguler une tension continue, mais aussi pour limiter les surtensions, aussi bien en continu qu'en alternatif, et protéger ainsi des composants tels que relais ou galvanomètres.

Nous laisserons de côté, pour une autre fois, l'application des Zeners dans les circuits à transistor.

Qu'est-ce qu'une diode Zener ?

Lorsqu'une diode semi-conductrice est polarisée en inverse, sa jonction présente une résistance extrêmement élevée. Cette résistance est mesurable en appliquant aux bornes de la diode une ten-

sion continue dont la polarité négative est placée côté anode. En insérant un milliampèremètre en série, on s'aperçoit que le courant est vraiment infime, soit quelques microampères, ce qui laisse entendre que la résistance inverse de la diode est de l'ordre du mégohm.

Et si on augmentait la tension continue appliquée, on s'apercevrait que ce courant augmente petit à petit, puis très brusquement ensuite. Ce courant inverse est appelé « courant Zener ». Ce phénomène est très utilisé pour la régulation des tensions dans les alimentations.

Ce phénomène « Zener » a incité les chercheurs à créer des diodes spéciales dont le courant inverse augmente subitement pour une valeur bien précise de la tension inverse appliquée.

Une diode Zener est donc une diode au silicium dont on utilise la tension Zener pour stabiliser une tension ou encore comme référence de tension.

On conçoit que le courant Zener traversant la diode doit être limité par un circuit ou simplement par une seule résistance.

Suivant les types de diodes Zener, la tension inverse peut varier de 2 à 200 V, et le plus souvent on emploie des diodes dont la tension de référence V_Z est inférieure à 18 V.

Pour des tensions directes et des tensions inverses faibles, les diodes Zener ont un comportement identique à celui des diodes ordinaires. Une diode Zener de 20 V, par exemple, peut être utilisée sans danger pour redresser une tension alternative pas trop élevée, dont la valeur crête de l'alternance négative ne devra pas atteindre ces 20 V. Quant à la tension directe V_D , elle est de 0,7 V, comme les modèles du type standard silicium.

Relevé de caractéristiques

Nous avons choisi une diode Zener du type BZX85/6V2 pour commencer les manipulations avec ce composant.

Nous brancherons d'abord la diode dans le sens direct, comme indiqué sur la figure 1. Morphologiquement, cette diode Zener ressemble à une résistance (boîtier DO41, longueur 4,1 mm, dia-

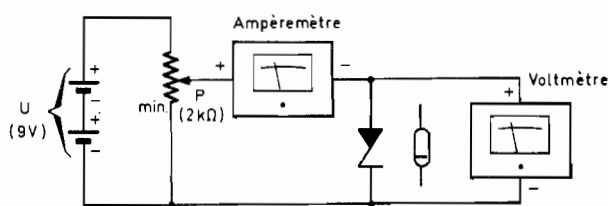


Fig. 1. — Relevé des caractéristiques d'une diode zener (sens direct).

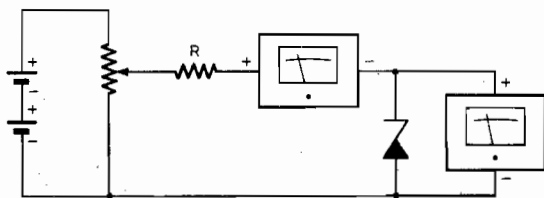


Fig. 3. — Relevé de la caractéristique d'une diode zener (sens inverse).

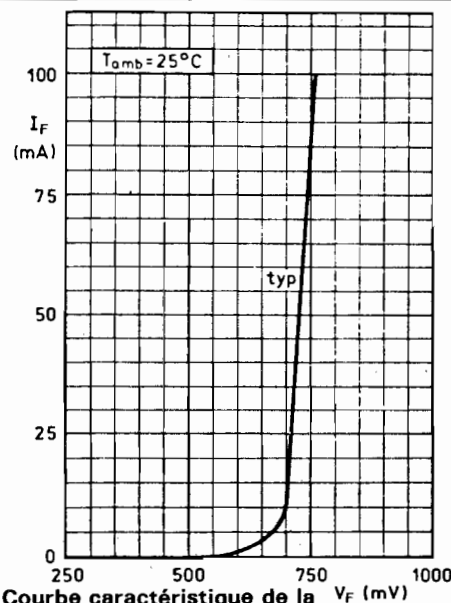


Fig. 2. — Courbe caractéristique de la diode zener dans le sens direct (documentation RTC).

mètre 2,5 mm) et, tout comme une résistance, elle ne doit pas dissiper plus qu'une certaine puissance. Pour ce type, la puissance maximale est de 1 W, ce qui veut dire qu'en direct le courant I_D doit être inférieur à $1\text{ W}/0,7\text{ V}$ soit 1,4 A environ. La cathode est repérée par un anneau.

En augmentant progressivement la tension, nous constatons que le courant est d'abord nul, puis il apparaît vers 0,4 V, il augmente ensuite progressivement pour croître très rapidement ensuite, lorsque la tension lue sur le voltmètre approche de 0,7 V (fig. 2). Ce n'est pas la peine d'atteindre le courant max., et il est plus intéressant maintenant de mesurer la caractéristique inverse.

En intervertissant la diode Zener, nous repartons avec le curseur du potentiomètre mis au minimum (fig. 3). Afin de ne pas détériorer la diode Zener, nous insérons une résistance R en série dans le circuit de mesure. En effet, la puissance dissipée à ne pas dépasser est de 1 W. Le courant inverse max. ne doit donc pas dépasser $1\text{ W}/6,2\text{ V}$, soit 160 mA (puissance max. divisée par la tension Zener). Dans le circuit de mesure, le courant max. pourrait être obtenu lorsque le curseur du potentiomètre se trouve sur la position haute, c'est-à-dire à + 9 V, la tension aux bornes de R serait égale à la tension d'alimentation (9 V) moins la tension Zener (6,2 V), ce qui donne une tension de 2,8 V aux bornes de R dans le cas le plus défavorable. Cette résistance de protection R, pour limiter le courant à 160 mA, doit avoir la valeur de :

$$\frac{2,8\text{ V}}{160\text{ mA}}$$

ce qui donne 18 Ω environ. Une résistance de valeur normalisée légèrement supé-

rieure fera l'affaire (22 ou 27 Ω , $\pm 10\%$, 1/2 W).

Commençons la manipulation. Le calibre des appareils de mesure est 10 V pour le voltmètre, et 100 mA pour le milliampèremètre. En tournant doucement l'axe du potentiomètre, nous constatons d'abord un courant nul. Il existe en réalité un courant, mais il est tellement faible qu'il n'est pas mesurable sur la gamme 100 mA du contrôleur. Ceci n'empêche pas qu'il faut tourner très lentement l'axe du potentiomètre, les yeux rivés sur l'écran du milliampèremètre. Ce n'est seulement qu'à partir de 6 V qu'apparaît un courant très faible. En continuant à tourner l'axe, le courant indiqué par l'appareil de me-

sure continue à croître, mais la tension lue sur le voltmètre se stabilise à 6,2 V.

Les caractéristiques principales d'une diode Zener

Il est nécessaire de faire quelques remarques sur les caractéristiques principales des diodes Zener afin de tirer parti au maximum des renseignements donnés dans les catalogues des constructeurs, et ensuite d'obtenir un meilleur résultat avec le montage que l'on aura réalisé soi-même. Ces caractéristiques sont au nombre de quatre. La première est évidemment la **tension Zener**. Pour chaque série de diode Zener, il existe

une grande quantité de tensions Zener (V_Z). Il y a 20 valeurs de V_Z entre 2,7 V et 20 V. Ces valeurs ont la même normalisation que les résistances. On sait que ces dernières ont une valeur égale, multiple ou sous-multiple de 270, 300, 330, 360,... pour les résistances de tolérance de $\pm 5\%$. De même pour les diodes Zener, dont certaines ont une tolérance de $\pm 6\%$ environ, les valeurs normalisées de V_Z sont : 2,7 V/ 3 V/3,3 V/ 3,6 V, etc. La plupart des Zeners du commerce ont une tolérance proche de $\pm 5\%$. La **puissance dissipée** d'une diode Zener a aussi son importance. Elle est égale au produit $V_Z \times I_Z$, et dépend en grande partie de son boîtier. Plus celui-ci est gros, plus élevée est la puissance dissipée par la diode, parce que l'échange de chaleur entre la diode et l'air ambiant se fait d'autant plus facilement que la surface du composant est grande. Les valeurs les plus courantes sont 1/2 et 1 W, mais il existe aussi des Zeners de plusieurs dizaines de watts, qui doivent être vissées sur une plaque de métal (aluminium) pour la dissipation de la chaleur. Le tableau I donne les dimensions

TABLEAU I

Puissance dissipée max.	Type du boîtier	l	Dimensions \varnothing
1/2 watt	DO 7 (verre)	7,2	2,6 cathode
1 watt	DO 35 (verre)	3,9	1,9
3 watts	DO 41 (verre)	4,1	2,5
	DO 13 (métal)	9	6
		(mm)	(mm)
10 à 50 watts	DO 4 à vis		

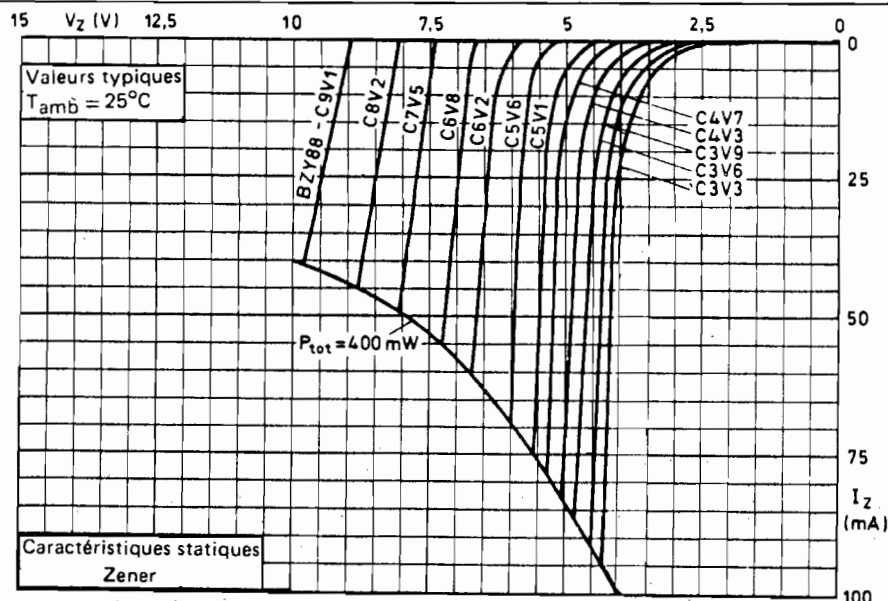


Fig. 4. - Courbe caractéristique de la diode zener BZY 88 dans le sens inverse (documentation RTC).

et la puissance dissipée pour les boîtiers les plus courants. La **résistance dynamique** est le rapport entre la variation de tension Zener (ΔV_z) et la variation correspondante du courant Zener (ΔI_z). La formule est :

$$r_z = \frac{\Delta V_z}{\Delta I_z}$$

Cette résistance dynamique doit être très faible, elle correspond à la pente abrupte du courant Zener. Si, aux bornes de la diode, il y a une variation de tension égale à 1,2 V entraînant une variation de courant de 80 mA, la résistance dynamique r_z est de :

$$\frac{1,2 \text{ V}}{0,08 \text{ A}}$$

c'est-à-dire 15 Ω . Cette valeur r_z n'est pas constante pour toutes les valeurs de V_z d'une même série. Elle est minimale pour $V_z = 7$ à 8 V (fig. 4). Pour la série BZY88, $r_z = 15 \Omega$ pour $V_z = 4,7 \text{ V}$. Cette résistance dynamique passe à 1,3 Ω pour les modèles 6,8 V, et remonte à 3,5 Ω pour $V_z = 12 \text{ V}$.

En conclusion, si on a besoin de réguler une tension de 20 V, on utilisera de préférence 3 diodes Zener BZY88 C6V8 en série au lieu d'une seule BZY88 C20, dont la résistance r_z est égale

à 15 Ω en moyenne (tableau II).

La dernière caractéristique importante est le **coefficient de température**. On doit y porter attention si le montage doit subir des variations importantes de température ambiante. Ce coefficient de température S_z est le rapport de la variation de la tension Zener ΔV_z par rapport à la variation de température ambiante. Ce coefficient est souvent donné en millivolt par degré Celsius ($\text{mV}/^\circ\text{C}$). Ce coefficient dépend aussi de la valeur de V_z . Il est négatif pour les tensions V_z inférieures à 6 V, et il est positif pour les tensions supérieures à 6 V. On dit que le coefficient est négatif parce que, si la température augmente, la tension V_z diminue. Pour une diode Zener de 3,9 V, $S_z = -2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Si la température ambiante passe de 25 $^\circ\text{C}$ à 75 $^\circ\text{C}$, soit une variation de + 50 $^\circ\text{C}$, la tension V_z va diminuer de $(-2 \text{ mV}) \times 50$ soit 100 mV. La tension V_z ne sera plus 3,9 V mais 3,9 - 0,1 c'est-à-dire 3,8 V.

Une diode Zener de 12 V a un coefficient de température positif $S_z = +9 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Pour une variation de + 50 $^\circ\text{C}$, la tension Zener passe de 12 V à 12,45 V. Les deux diodes (3,9 V et 12 V) en série, pour une même variation de température égale à 50 $^\circ\text{C}$, auront une variation de V_z moindre, les coefficients de température se compensent.

Calcul d'une régulation à diode Zener

Ce que nous avons dit le mois dernier au sujet du calcul d'un régulateur à diode reste valable. Dans une régulation à diode, il suffit de faire passer un courant dans la diode polarisée en direct pour obtenir à ses bornes une tension constante. Ce qui est

important, c'est la valeur de l'intensité traversant cette diode. Si ce courant est trop faible, la tension aux bornes de la diode n'atteint pas la valeur de 0,7 V. Il est donc indispensable, pour une bonne régulation, de bien choisir la résistance série afin que ce courant atteigne une certaine valeur, qui n'est d'ailleurs pas critique, mais qui ne doit quand même pas être trop élevée afin de ne pas échauffer inutilement la diode.

Dans une diode Zener, le problème est le même : le courant doit être supérieur à une certaine valeur, sinon la tension V_z n'apparaîtra pas aux bornes de ce composant.

Connaissant la tension continue à notre disposition, ainsi que la tension et l'intensité du circuit à stabiliser, il suffit de savoir choisir la diode Zener adéquate et de calculer la résistance à insérer dans le circuit.

Le montage est schématisé sur la figure 5. La tension d'alimentation U doit nécessairement être une tension continue, comme par exemple une tension redressée. Cette tension doit également être supérieure à la tension Zener V_z . Généralement, U

est égal à deux ou trois fois la valeur de V_z .

Voici un exemple concret. Il s'agit d'alimenter un circuit fonctionnant sous 6 V et consommant une puissance de 0,75 W, en partant d'une tension d'alimentation U de 15 V.

Nous pouvons utiliser notre diode Zener 6 V $1/4\text{W}$ de tout à l'heure pour faire cette régulation. En ce qui concerne le courant, nous savons que la valeur $I_{z \text{ max.}}$ de la Zener est 80 mA, et que l'intensité régulée est de 125 mA (0,75 W/6 V). Le point de fonctionnement de la diode Zener est ensuite choisi. Ce point correspond au courant I_z moyen situé sur la courbe caractéristique de la diode (fig. 6). Le plus souvent, il se trouve à mi-chemin entre les valeurs $I_{z \text{ max.}}$ et $I_{z \text{ min.}}$. On donne généralement à ce dernier la valeur :

$$\frac{I_{z \text{ max.}}}{10}$$

On considère que la plage est linéaire entre $I_{z \text{ min.}}$ et $I_{z \text{ max.}}$. Ainsi, pour notre exemple, $I_{z \text{ min.}}$ est égal à 8 mA et $I_{z \text{ moyen}}$ est proche de 35 mA :

$$\left(\frac{80 - 8}{2} \text{ mA} \right)$$

En pratique, si le courant d'utilisation ne varie pas trop,

TABLEAU II
Variation de la résistance dynamique suivant la tension Zener d'une même série, pour un courant $I_z = 20 \text{ mA}$ (diode Zener RTC : BZY88).

V_z (volt)	r_z (ohm)
3,3	20
4,7	15
5,1	7
5,6	4
6,8	1,3
10	2
12	3,5
16	10
20	15
30	35

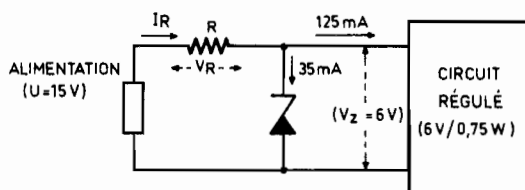


Fig. 5. - Régulateur à diode zener.

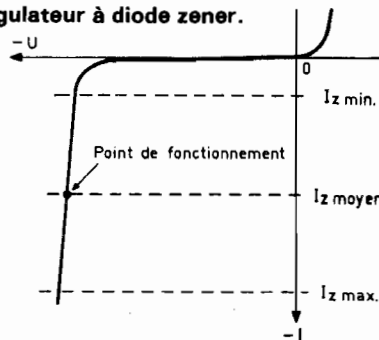


Fig. 6. - Le point de fonctionnement se trouve à égale distance des courants $I_{z \text{ max.}}$ et $I_{z \text{ min.}}$

on peut se rapprocher de la valeur $I_{Z \min.}$. Il faut en effet savoir que, si ce courant d'utilisation augmente, mettons de 10 mA, le courant dans la Zener diminue de cette même valeur, se rapprochant donc de $I_{Z \min.}$. Inversement, une diminution du courant dans le circuit augmente la valeur de I_Z , qui ne doit en aucun cas dépasser la valeur limite $I_{Z \max.}$.

Il ne reste ensuite qu'à calculer la résistance R (fig. 5). La tension à ses bornes est de 9 V (15 - 6) et le courant la traversant est 160 mA (35 + 125) soit :

$$R = 56 \Omega \left(\frac{9 \text{ V}}{0,16 \text{ A}} \right)$$

qui est une valeur normalisée. La puissance dissipée dans la résistance est : $9 \times 0,16 = 1,44 \text{ W}$. Cette valeur nous oblige à prendre une résistance du type 2 W (résistance carbone agglomérée, tolérance $\pm 10 \%$).

Le calcul que nous venons d'effectuer est résumé dans la formule :

$$R = \frac{U_{\text{source}} - U_{\text{utilisation}}}{I_{\text{utilisation}} + I_{Z \text{ moyen}}}$$

Droite de charge

Le procédé est le même que pour le tracé de la droite de charge d'une diode (voir article précédent), sauf qu'ici

on travaille dans la partie négative de la caractéristique ($I_{\text{inv.}}/V_{\text{inv.}}$). La droite de charge va de la tension d'alimentation de 18 V (point X) au point de courant maximal (point Y) :

$$\frac{18 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 18 \text{ mA}$$

La valeur de R choisie pour cet exemple est de 1 k Ω . Le point Z nous donne la tension régulée (6,3 V) et le courant $I_{Z \text{ moyen}}$ (11,9 mA).

Si jamais la tension d'alimentation vient à baisser, passant de 18 V à 13,5 V, la droite de charge se déplace (tracé en pointillé). La tension régulée (aux bornes de la Zener) passe de 6,3 V à 6,2 V et le courant $I_{Z \text{ moyen}}$ chute à 7,5 mA.

Efficacité de régulation

Nous constatons que si la tension d'alimentation varie dans de grosses proportions (25 % dans l'exemple ci-dessus), la variation de la tension régulée est de l'ordre du pour cent.

Il est intéressant de calculer avec plus de précision quelle est l'efficacité de régulation de notre montage. Le catalogue du constructeur indique que la résistance dynamique de la diode Zener em-

ployée est inférieure à 4 Ω pour un courant I_Z de 35 mA. On en déduit que si le courant Zener varie de 10 mA, la tension aux bornes de la diode est de 40 mV ($\Delta V_Z = \Delta I_Z \times r_Z$).

Le taux de régulation du montage, c'est-à-dire de l'ensemble résistance-diode Zener, est donné par la formule :

$$\frac{r_Z}{r_Z + R}$$

Dans l'exemple, R est égal à 56 Ω , et le taux de régulation est :

$$\frac{4}{4 + 56} \text{ soit } 6,7 \%$$

Imaginons que la tension d'alimentation U baisse subitement de 5 V, soit une chute de 33 %, la tension régulée ne chutera que de :

$$\frac{5 \times 6,7}{100} \text{ soit de } 0,33 \text{ V.}$$

La régulation sera d'autant plus efficace que R sera élevée. Si le courant du circuit d'utilisation varie peu, on diminuera le courant I_Z sans problème en augmentant la valeur de R. Si celle-ci est de 1 000 Ω , comme dans l'exemple de la droite de charge, le taux de régulation du montage est de 0,4 %, en supposant que la résistance dynamique de la diode Zener reste inférieure ou égale à 4 Ω pour ce courant I_Z plus faible.

Circuit limiteur à diode Zener

Pour la régulation d'une tension, nous avons dit que la tension appliquée U doit être une tension continue, ou tout au moins une tension redressée plus ou moins filtrée.

Pour un circuit limiteur ou écrêteur, la tension à l'entrée du circuit peut être une tension alternative. La tension de sortie du montage est limitée par la tension V_Z de la diode ou des diodes Zener utilisées.

Dans un circuit limiteur à une seule diode (fig. 8) recevant une tension alternative U_{\sim} , la diode Zener se comporte comme une diode standard pour l'alternance positive ; c'est-à-dire que la composante positive de tension, à la sortie, ne dépasse pas $0,7 \text{ V}$. Quant à l'alternance négative, elle est limitée par la tension V_Z . Ainsi la tension crête à crête en sortie ne dépasse pas $V_D + V_Z$. Une diode Zener de 12 V insérée dans ce circuit ne permet pas que la tension de sortie dépasse 12,7 V.

Avec un circuit limiteur à deux diodes Zener, la tension de sortie dépend de la somme des deux tensions V_Z (fig. 9). On remarque que ce montage très simple permet

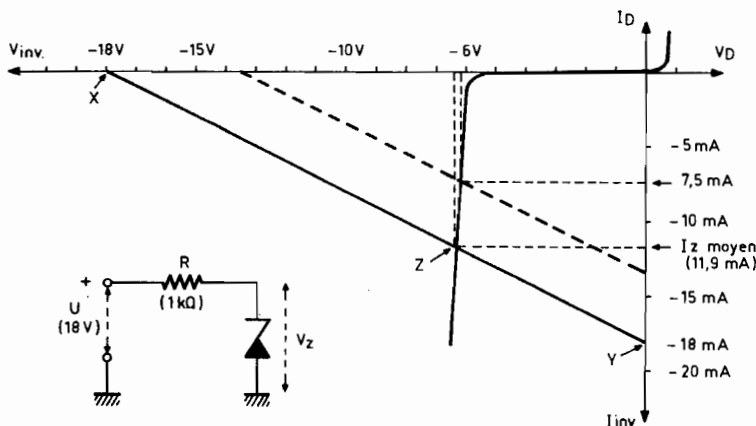


Fig. 7. - Droite de charge d'une diode zener.

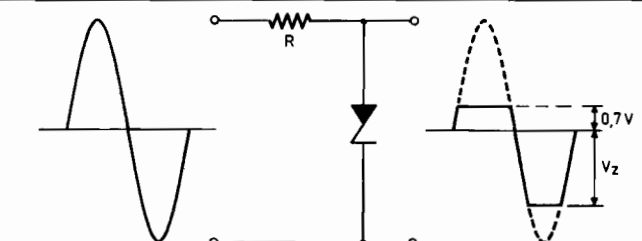


Fig. 8. - Circuit limiteur à une diode.

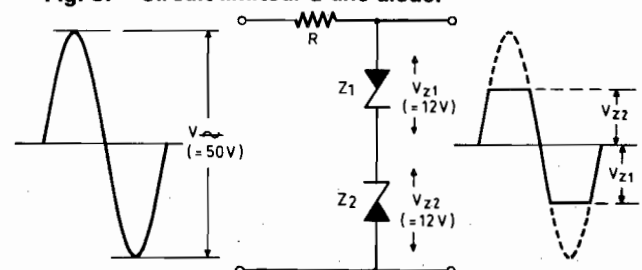


Fig. 9. - Circuit limiteur à deux diodes zener.

d'obtenir des signaux carrés. Ceux-ci seront d'autant plus à angles droits que la tension U_{\sim} sera élevée par rapport à la somme $V_{Z1} + V_{Z2}$.

Le calcul de la résistance R s'apparente à celui du régulateur, il suffit de remplacer U_{source} par U_{\sim} exprimée en valeur efficace.

Si la tension à l'entrée est de 50 V crête à crête, comme sur la figure, la valeur efficace de la tension est de $50/2 \times 0,707$ soit 18 V environ.

Pour la régulation d'une alimentation secteur, on rencontre parfois des diodes Zener à la place des diodes de redressement (fig. 10).

Pour stabiliser une tension faible, inférieure à la plus basse des valeurs normalisées, on peut employer deux diodes Zener placées dans un circuit en pont (fig. 11). La tension régulée aux bornes de R_3 , représentant la charge, est égale à $V_{Z2} - V_{Z1}$. Les résistances R_1 et R_2 sont les résistances séries habituelles, nécessaires à la régulation.

Circuits de protection

La diode Zener peut donc être utilisée pour limiter une tension à l'entrée d'un circuit. Placée aux bornes d'un composant tel qu'un relais ou un galvanomètre, elle protège efficacement ceux-ci contre les surtensions ou surintensités.

Nous donnons sur la figure 12 un schéma pour la

protection d'un galvanomètre. Ici, il s'agit d'un galvanomètre utilisé en voltmètre. Sa pleine déviation est donnée pour 200 μ A. La résistance série est de 60 k Ω sur la gamme 12 V (200μ A \times 60 k Ω = 12 V). Les résistances R_1 (10 k Ω) et R_2 (50 k Ω) sont montées en diviseur de tension pour la diode Zener de 12 V.

Les sorties A et B du voltmètre sont appliquées aux bornes de la tension à mesurer. Si celle-ci est inférieure ou égale à 12 V, la résistance de la Zener présente plusieurs mégohms et la mesure se passe normalement. Si la tension à mesurer dépasse 12 V, soit 15 V, la tension appliquée à la Zener, à travers le pont diviseur, est égale à :

$$15 \text{ V} \times \frac{50 \text{ k}\Omega}{50 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega}$$

c'est-à-dire 12,5 V. Pour cette valeur, la diode présente une résistance très faible et le galvanomètre se trouve protégé.

Comment reconnaître les diodes

Chaque type de diode possède son numéro d'immatriculation grâce auquel il est facile de savoir avec quel type de matériau il a été fabriqué (germanium, silicium...) et aussi quelle est son utilisation conseillée (détection, puissance, etc.). Ce code, donné sur le tableau III,

Tableau III

1 ^{re} lettre (matériau)	2 ^e lettre (fonction de la diode)	N ^o d'ordre
A = Germanium B = Silicium C = Arséniure de Gallium	A = détection B = varicap E = diode tunnel (Esaki) Y = puissance Z = Zener	3 chiffres (pour matériel « grand public ») ou 1 lettre (X, Y, Z) et 2 chiffres (pour équipements professionnels).

est celui des diodes les plus couramment utilisées.

On voit ainsi que la BY206 est une diode silicium de puissance, ou que la BB105 est une diode silicium « varicap ».

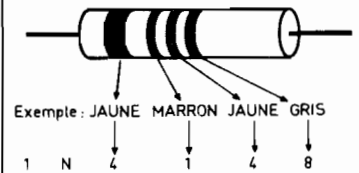
Hélas, beaucoup de constructeurs n'utilisent pas ce code, et on est obligé de consulter un lexique pour avoir des précisions. Il s'agit des diodes dont l'appellation commence par 1 N...

Ce numéro de code est inscrit sur la diode, soit en clair (exemple : « 1N4148 » ou « BZY93 »), soit en utilisant le code des couleurs utilisé déjà pour les résistances (code JEDEC donné sur le tableau IV). Exemple : la diode 1N4728 a des anneaux dont les couleurs sont : jaune, violet, rouge et gris. Un autre code, dit « Pro Electron », utilise aussi des couleurs sous forme de bandes dont deux d'entre elles sont plus larges que les autres (tableau V). Exemple : la diode BAX13 possède deux bandes

larges : rouge et noir, et deux bandes étroites : marron et orange.

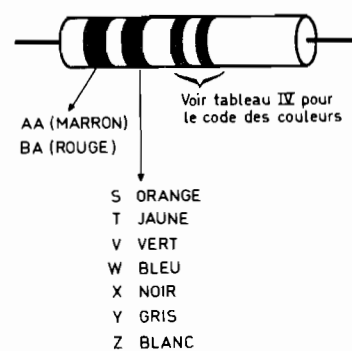
J.-B. P.

Tableau IV (Code JEDEC)



Couleur	Chiffre
NOIR	0
MARRON	1
ROUGE	2
ORANGE	3
JAUNE	4
VERT	5
BLEU	6
VIOLET	7
GRIS	8
BLANC	9

Tableau V (Code PRO-ELECTRON)



(Exemple : BAW 6 2 : Rouge, Bleu, Bleu, Rouge)

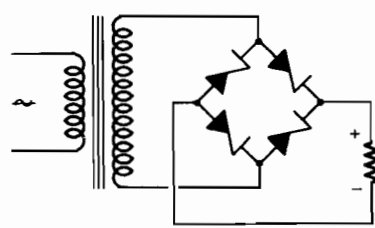


Fig. 10. - Les diodes zener redressent et régulent la tension d'utilisation.

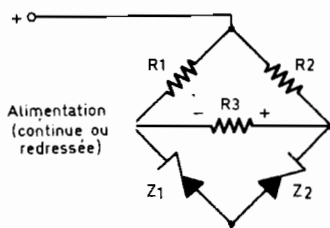


Fig. 11. - Pour obtenir une tension régulée très faible, on peut utiliser ce montage ($V_{régulée} = V_{Z2} - V_{Z1}$).

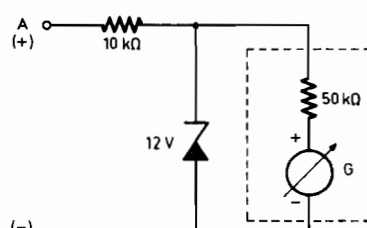


Fig. 12. - Protection d'un appareil de mesure à l'aide d'une diode zener.