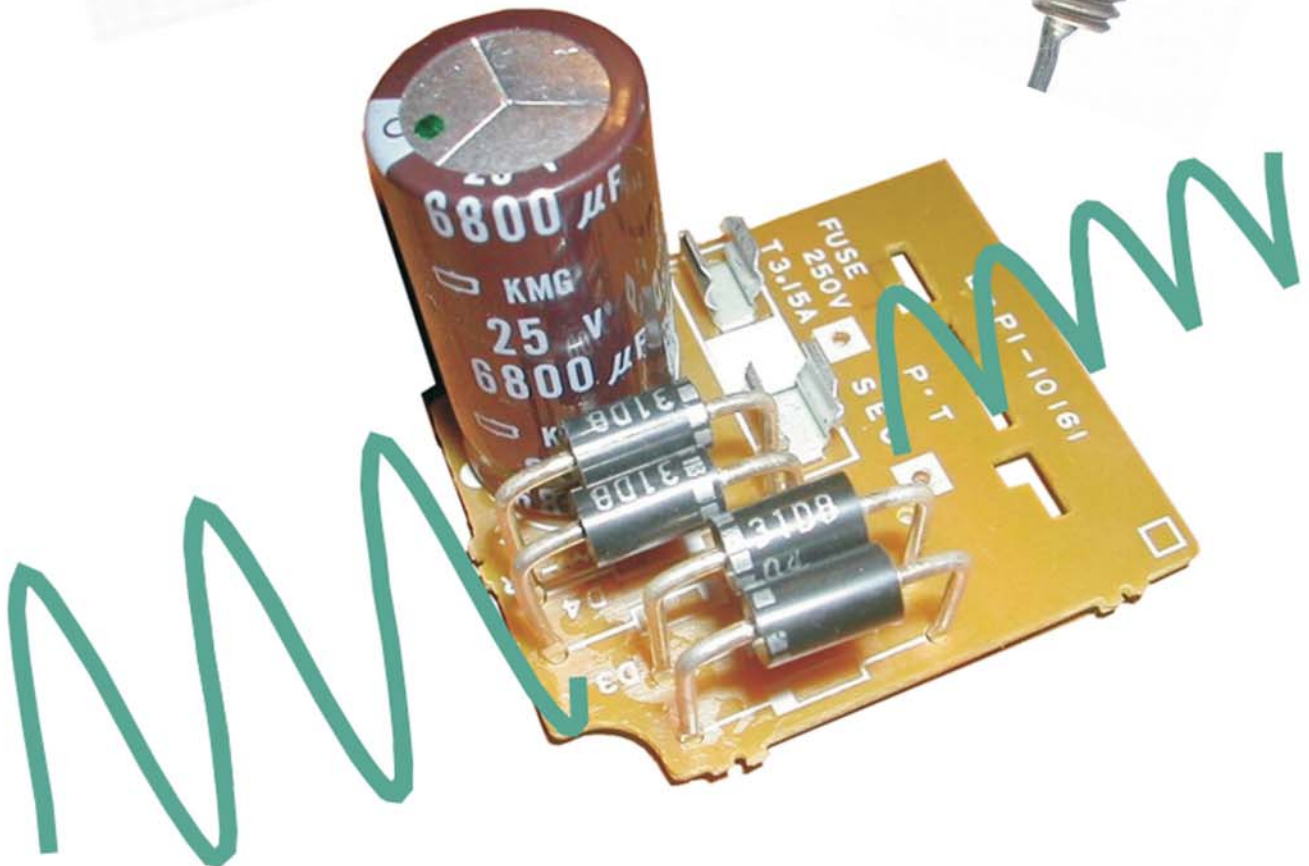


# Les diodes



## Licence de Libre Diffusion des Documents -- LLDD version 1

Ce document peut être librement lu, stocké, reproduit, diffusé, traduit et cité par tous moyens et sur tous supports aux conditions suivantes:

- tout lecteur ou utilisateur de ce document reconnaît avoir pris connaissance de ce qu'aucune garantie n'est donnée quant à son contenu, à tout point de vue, notamment véracité, précision et adéquation pour toute utilisation;
- il n'est procédé à aucune modification autre que cosmétique, changement de format de représentation, traduction, correction d'une erreur de syntaxe évidente, ou en accord avec les clauses ci-dessous;
- des commentaires ou additions peuvent être insérés à condition d'apparaître clairement comme tels; les traductions ou fragments doivent faire clairement référence à une copie originale complète, si possible à une copie facilement accessible.
- les traductions et les commentaires ou ajouts insérés doivent être datés et leur(s) auteur(s) doit(vent) être identifiable(s) (éventuellement au travers d'un alias);
- cette licence est préservée et s'applique à l'ensemble du document et des modifications et ajouts éventuels (sauf en cas de citation courte), quel qu'en soit le format de représentation;
- quel que soit le mode de stockage, reproduction ou diffusion, toute personne ayant accès à une version numérisée ce document doit pouvoir en faire une copie numérisée dans un format directement utilisable et si possible éditable, suivant les standards publics, et publiquement documentés, en usage.
- la transmission de ce document à un tiers se fait avec transmission de cette licence, sans modification, et en particulier sans addition de clause ou contrainte nouvelle, explicite ou implicite, liée ou non à cette transmission. En particulier, en cas d'inclusion dans une base de données ou une collection, le propriétaire ou l'exploitant de la base ou de la collection s'interdit tout droit de regard lié à ce stockage et concernant l'utilisation qui pourrait être faite du document après extraction de la base ou de la collection, seul ou en relation avec d'autres documents.

Toute incompatibilité des clauses ci-dessus avec des dispositions ou contraintes légales, contractuelles ou judiciaires implique une limitation correspondante du droit de lecture, utilisation ou redistribution verbatim ou modifiée du document.

<http://bat8.inria.fr/~lang/licence/>

# Table des matières

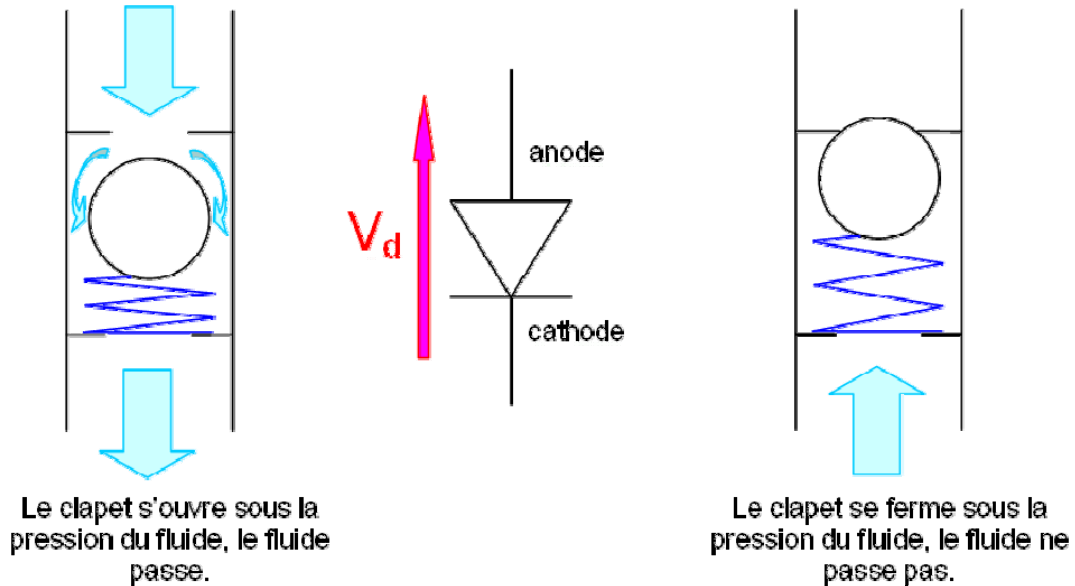
<b>Table des matières.....</b>	<b>1</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>Principe de fonctionnement.....</b>	<b>5</b>
La jonction PN .....	5
Équilibre sans générateur .....	6
Avec un générateur en sens direct.....	7
Avec un générateur en sens inverse .....	8
Caractéristiques électriques.....	9
Caractéristique électrique.....	9
Caractéristique directe ( $V_d > 0$ ).....	9
Autour de zéro : .....	11
Équation : .....	11
Effet de la température : .....	12
<b>Schéma équivalent.....</b>	<b>13</b>
Modélisation n°1 : la diode « idéale » .....	13
Modélisation n°2 : diode avec seuil .....	14
Modélisation n°3 : diode avec seuil et résistance.....	15
Exemple d'utilisation des 3 modèles de la diode .....	16
Premier cas : $E = 200 \text{ V}$ et $R = 1000 \Omega$ .....	17
Deuxième cas : $E = 2 \text{ V}$ et $R = 1000 \Omega$ .....	18
Troisième cas : $E = 2 \text{ V}$ et $R = 2 \Omega$ .....	20
Utilisation.....	22
Paramètres essentiels des diodes.....	22
Diodes de redressement.....	23
Caractéristiques physiques .....	23
Redressement simple alternance .....	24
Redressement double alternance .....	25
Avec transfo double enroulement ou transformateur à point milieu .....	25
Avec pont de Graëtz.....	26
Filtrage .....	27
Redressement simple alternance .....	27
Redressement double alternance .....	29
Fonctionnement des diodes et transformateurs .....	31
Alimentations doubles symétriques .....	31
Doubleur de tension .....	32
<b>Diodes Zener.....</b>	<b>33</b>
Caractéristique .....	33
Schéma équivalent : .....	34
Modèle hydraulique de la diode Zener.....	35
Régulation de tension.....	36
Diodes à avalanche contrôlée.....	39
Caractéristiques physiques .....	39
Protection contre les surtensions .....	39
Mise en série de diodes .....	39
Diodes de redressement rapides .....	40
Notions de charge recouvrée.....	40
Utilisation.....	40
Diodes de signal.....	41
Caractéristiques physiques .....	41
Décteur de crête.....	41
Détection AM.....	42
Écrêtage des surtensions .....	43
Diodes électroluminescentes .....	43

Caractéristique .....	43
Utilisation.....	43
Autres diodes.....	44
<b>Les symboles des différentes diodes.....</b>	<b>45</b>
<b>Exercices .....</b>	<b>46</b>
<b>Solutions.....</b>	<b>57</b>

## Introduction

La diode est le composant électronique de base : on ne peut pas combiner du silicium dopé plus simplement.

Son fonctionnement macroscopique est celui d'un interrupteur commandé par une tension ( $V_d$ ) qui ne laisse passer le courant que dans un seul sens.

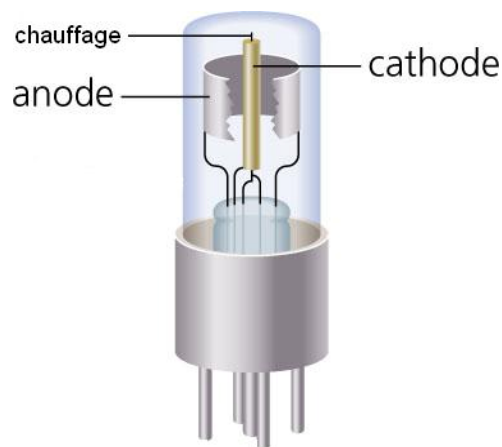


**Figure 1**  
Analogie hydraulique de la diode

Cette propriété lui ouvre un champ d'applications assez vaste en électronique dont les plus courantes sont :

- Le redressement du courant alternatif issu du secteur ;
- la régulation de tension à l'aide de diodes Zener, qui ont un comportement de source de tension quasi idéale.

La fonction diode a existé bien avant l'arrivée du silicium : on utilisait alors des diodes à vide (les lampes ou tubes, voir Figure 2) dont le fonctionnement était basé sur l'effet thermoélectronique. Le silicium a apporté une amélioration de la fiabilité du composant, une réduction de son encombrement, une plus grande simplicité d'utilisation et une réduction de prix.



**Figure 2**  
Diode « tube »

La jonction PN est un élément fondamental de l'électronique. En modifiant certains paramètres (concentration en impureté, géométrie de la jonction, etc.) on obtient des composants diversifiés utilisables dans de nombreux domaines dont le classement succinct est le suivant :

- Diodes de redressement et de l'électronique de puissance
  - Diodes de redressement classique,
  - Diodes à avalanche contrôlée,
  - Diodes rapides de commutation et de récupération,
  - Diodes haute tension, etc.
- Diodes de signal dans le domaine général
  - Diodes rapides<sup>1</sup>
  - Diodes à faible courant de fuite, etc.
- Diodes utilisées en avalanche inverse
  - Diodes stabilisatrices de tension (diodes « Zener »),
  - Diodes de référence,
  - Diodes de protection, etc.
- Diodes de l'électronique rapide
  - Diodes tunnel et backward,
  - Diodes Schottky,
  - Diodes varicap,
  - Diodes PIN,
  - Diodes gunn,
  - Diodes Impatt, etc.
- Diodes de l'optoélectronique
  - Diodes électroluminescentes LED,
  - Diodes laser,
  - Photodiodes,
  - Photopiles,
  - Cellules photovoltaïques, etc.
- Autres dispositifs
  - Thermistance,
  - Varistances,
  - Cellules photorésistantes,
  - Cellules de Hall, etc.

Dans les pages qui suivent, nous nous intéresserons seulement aux diodes de redressement et aux diodes Zener.

---

<sup>1</sup> Les diodes rapides de signal peuvent travailler à des fréquences élevées aussi bien en régime de petits signaux qu'en régime de commutation.

## Principe de fonctionnement

### La jonction PN

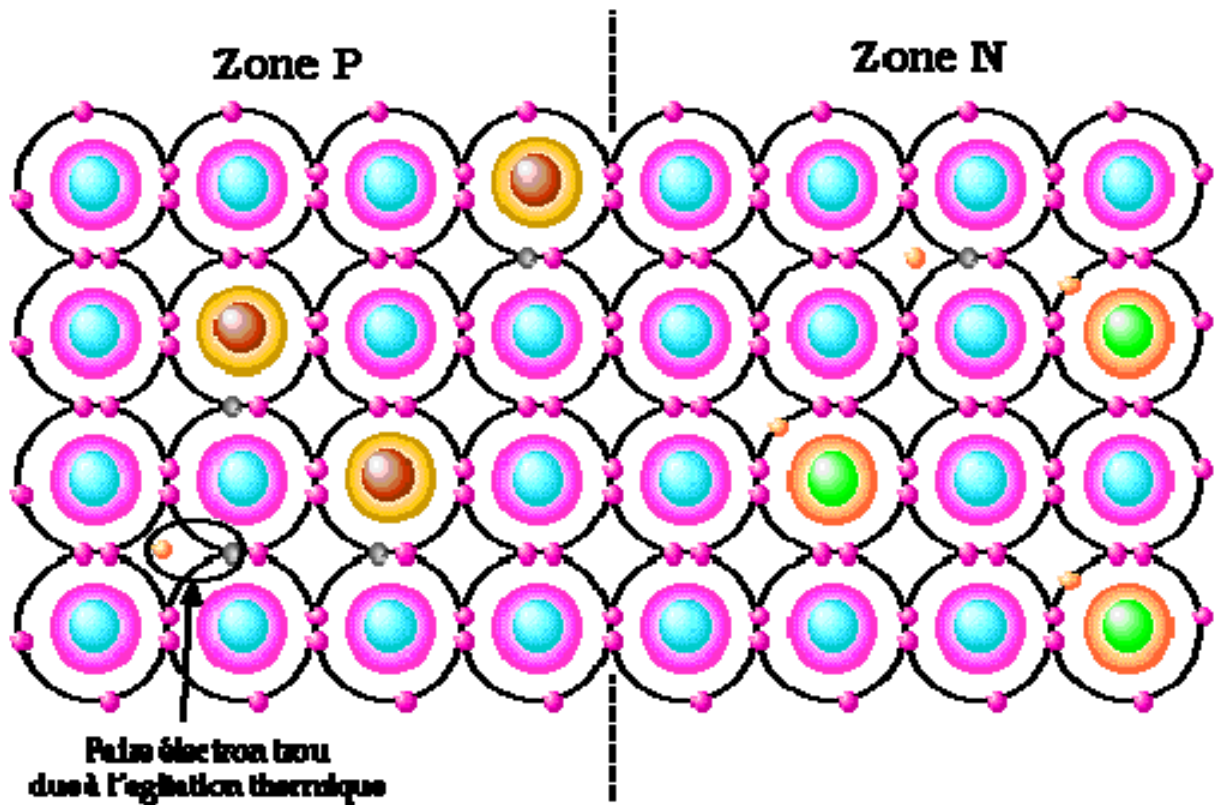


Figure 3  
Jonction PN

Un matériau semi conducteur est composé d'atomes qui possèdent 4 électrons sur la couche extérieure (atome quadrivalent). Le matériau semi conducteur le plus employé à l'heure actuelle est le silicium.

Considérons un petit morceau de silicium. Si on en dope une partie avec des atomes à 5 électrons périphériques, le semi conducteur devient de type N, c'est-à-dire que les des porteurs majoritairement présents dans la maille cristalline sont des électrons. Si l'on dope l'autre partie avec des atomes à 3 électrons périphériques, le silicium devient de type P, c'est-à-dire que les charges mobiles majoritaires sont des trous (positifs) dans cette région du silicium. On a crée une jonction PN, qui est la limite de séparation entre les deux parties.

Nous avons fabriqué une diode à jonction.

## Équilibre sans générateur

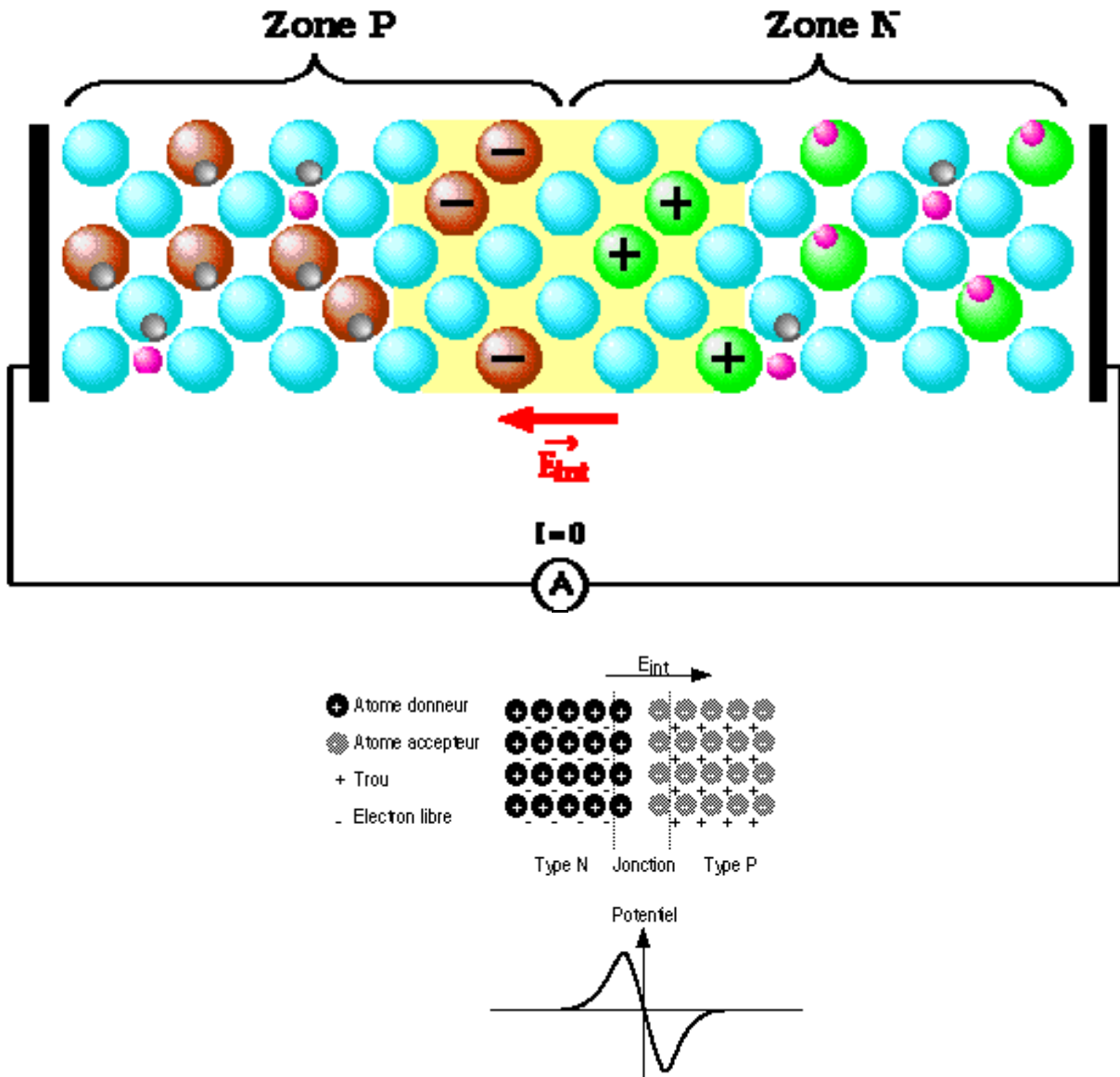


Figure 4

Équilibre au niveau de la jonction PN sans champ électrique extérieur.

**Au voisinage de la jonction**, les trous de la zone P vont neutraliser les électrons libres de la zone N (il y a diffusion des charges). Ce phénomène va s'arrêter quand le champ électrique  $E_{int}$  créé par les atomes donateurs ou accepteurs (qui vont devenir respectivement des charges + et -) va être suffisant pour contrarier le mouvement des charges mobiles. Ceci constitue une barrière de potentiel pour les porteurs majoritaires. Par contre, cette barrière de potentiel va favoriser le passage des porteurs minoritaires (conduction électrique).

Les deux courants antagonistes (diffusion des majoritaires et conduction des minoritaires) s'équilibrent et leur somme est nulle en régime permanent et en l'absence de champ électrique extérieur.



Avec un générateur en sens direct

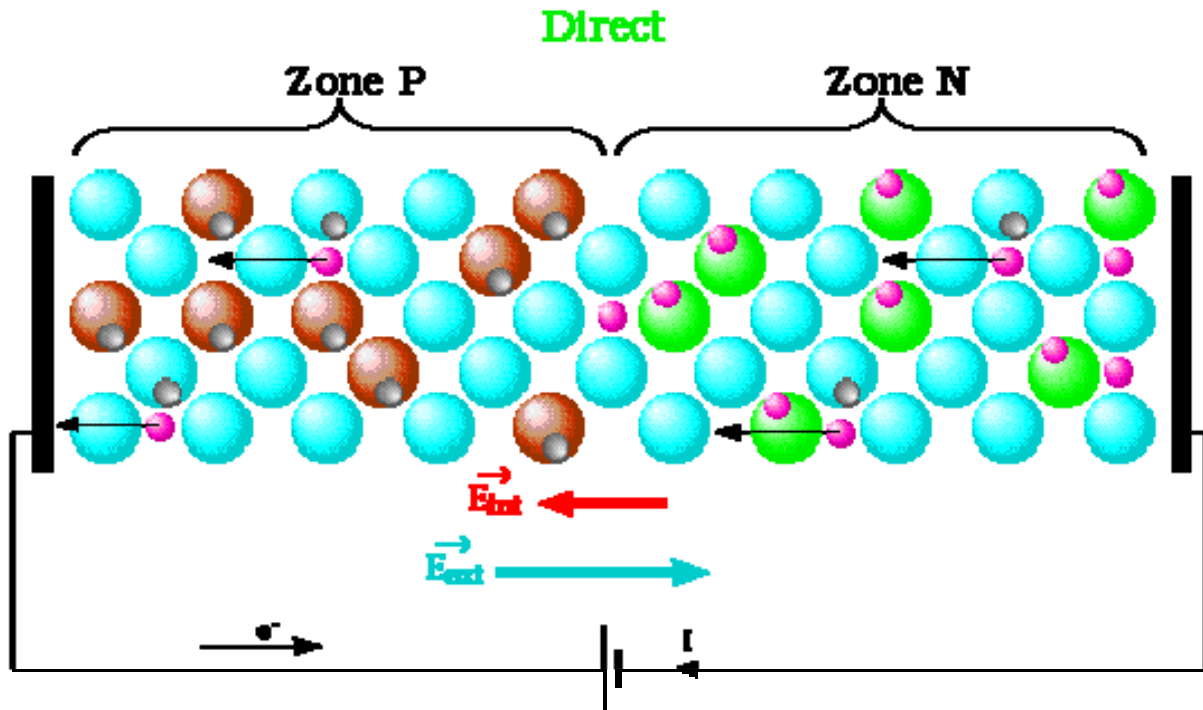


Figure 5

Jonction PN soumise à un champ électrique extérieur : passage du courant

La barrière de potentiel interne empêche donc toute circulation de courant. Si on applique un champ externe à l'aide d'un générateur en branchant le pôle + sur la zone P et le pôle - sur la zone N, on peut annuler les effets du champ interne et permettre au courant de circuler : le phénomène d'attraction des électrons libres de la partie N par les trous de la partie P (diffusion) n'est plus contrarié, et le générateur va pouvoir injecter des électrons dans la zone N et les repomper par la zone P.

Le courant de conduction constitué par les porteurs minoritaires prend une valeur  $I_f$  indépendante du champ extérieur.

Le courant total est la somme des deux courants, soit pratiquement le courant direct dû aux porteurs majoritaires dès que la tension atteint la centaine de mV.

La diode est alors polarisée dans le sens direct, et un courant relativement intense peut circuler : de quelques dizaines de milliampères pour des diodes de signal à quelques ampères pour des diodes de redressement standard, voire à des centaines d'ampères pour des diodes industrielles de très forte puissance.

Avec un générateur en sens inverse

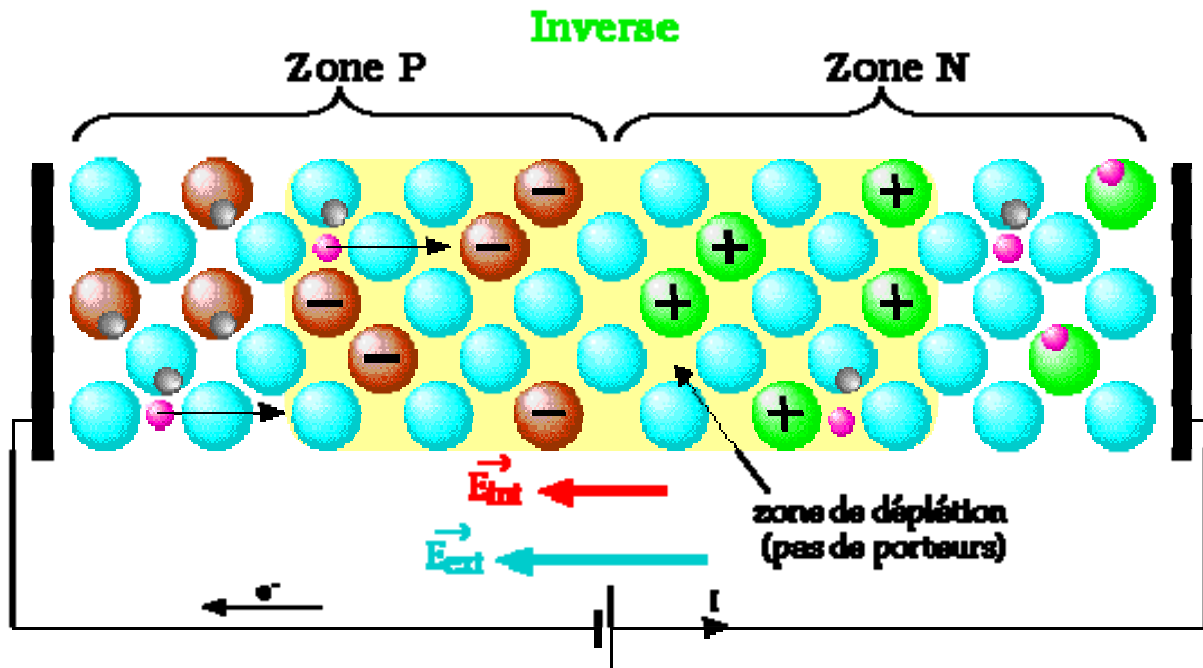


Figure 6

Jonction PN soumise à un champ extérieur : blocage

Si on branche le générateur dans le sens inverse du cas précédent, on renforce le champ électrique interne, et on empêche le passage des porteurs majoritaires : les électrons libres sont repoussés dans la zone N et les trous dans la zone P ; on accentue la séparation des charges (zone de déplétion). Par contre, les porteurs minoritaires (trous pour la zone N et électrons libres pour la zone P) peuvent traverser la jonction et reboucler par le générateur : ils forment le courant inverse  $I_f$  qui dépend essentiellement de la température.

Le champ extérieur repousse les charges qui vont se trouver à une distance sensiblement proportionnelle à  $|V|$ , créant ainsi une capacité proportionnelle à cette distance, donc à  $|V|$ . Cette capacité est inhérente à toute jonction de semi conducteurs, et va constituer la principale limitation (en régime linéaire tout du moins) au fonctionnement à haute fréquence des composants électroniques (diodes, transistors et circuits intégrés les employant).

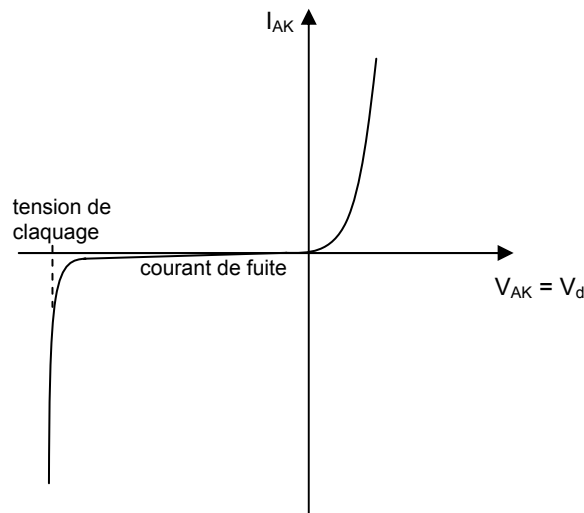
## Caractéristiques électriques

### Caractéristique électrique

C'est la caractéristique globale courant/tension. On a vu précédemment que le courant était négligeable pour une tension  $V_d = V_p - V_n$  négative (ceci est vrai jusqu'à une tension  $V_c$  dite tension de claquage). Au dessus d'un certain seuil  $V_0$  de tension  $V_d$  positive, le courant direct croit très rapidement avec  $V_d$ .

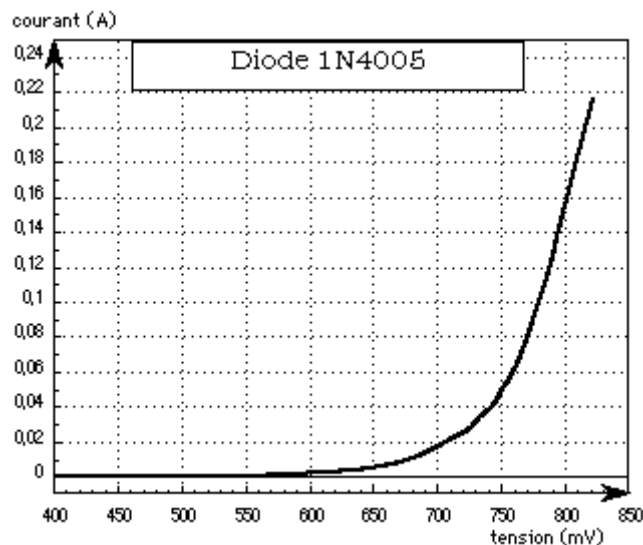
Le seuil  $V_0$  (barrière de potentiel) dépend du semi conducteur intrinsèque de base utilisé. Il est d'environ 0,2V pour le germanium et 0,6V pour le silicium.

La caractéristique a la forme suivante :



**Figure 7**  
Caractéristique complète

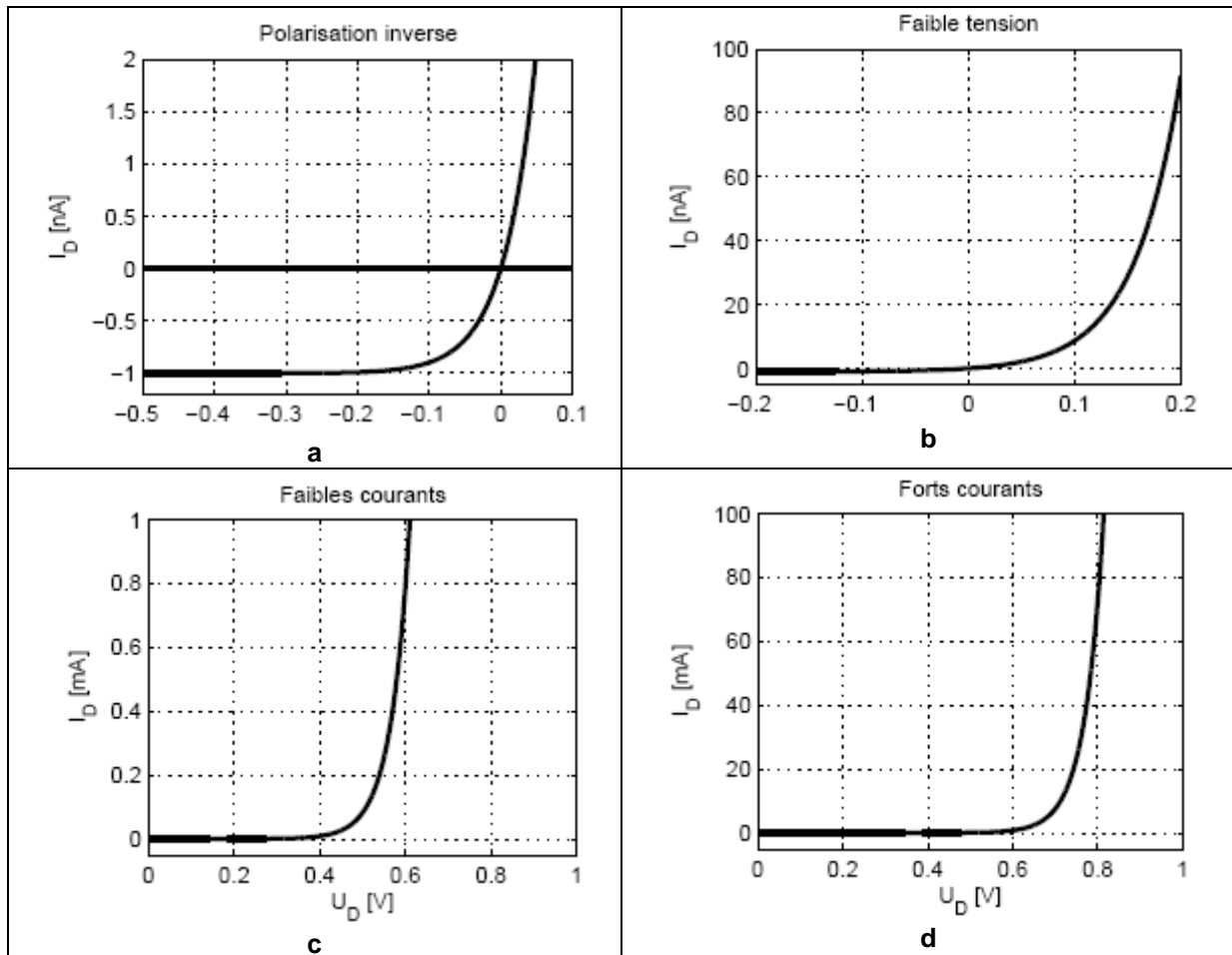
### Caractéristique directe ( $V_d > 0$ )



**Figure 8**  
Caractéristique directe d'une diode.

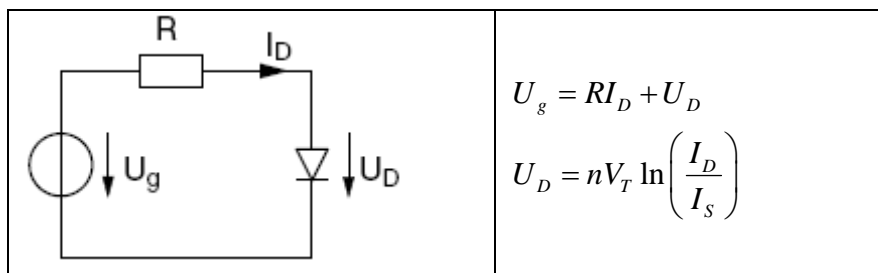
Sur ce type de diode au silicium, le courant croit assez rapidement au delà de 0,7V. C'est une diode de redressement supportant 1 A en direct et 600 V en tension inverse.

La caractéristique d'une diode semi-conductrice est illustrée par les courbes de la Figure 9. Afin de bien mettre en évidence la dépendance du courant par rapport à la tension appliquée, des échelles différentes ont été utilisées. On notera en particulier (Figure 9 c et d) que l'allure de la caractéristique est pratiquement la même pour des courants faibles ou élevés ; seule la tension a changé en passant d'environ 0.6 V pour  $I_D = 1\text{mA}$  à environ 0.8 V pour  $I_D = 100\text{ mA}$ .



**Figure 9**  
Caractéristiques d'une diode  
a) en polarisation inverse, b) pour de faibles tensions  
c) pour de faibles courants, d) pour de forts courants

La connaissance de cette caractéristique non linéaire, fondamentale pour décrire le comportement des diodes, ne nous permet malheureusement pas de résoudre analytiquement un circuit constitué simplement d'un générateur, une résistance et une diode. Les équations décrivant ce circuit sont en effet non linéaires et ne peuvent pas être résolues simplement :



Seule la donnée de *modèles linéaires* approchant aussi bien que possible la caractéristique de la diode permet de calculer le courant circulant dans le circuit.

## Autour de zéro :

La caractéristique passe par l'origine. Pour  $V_d$  négatif, le courant tend rapidement vers la limite  $-I_f$  (courant de fuite), car le courant de diffusion dû aux porteurs majoritaires va s'annuler.

Caractéristique inverse ( $V_d < 0$ ), phénomène de claquage :

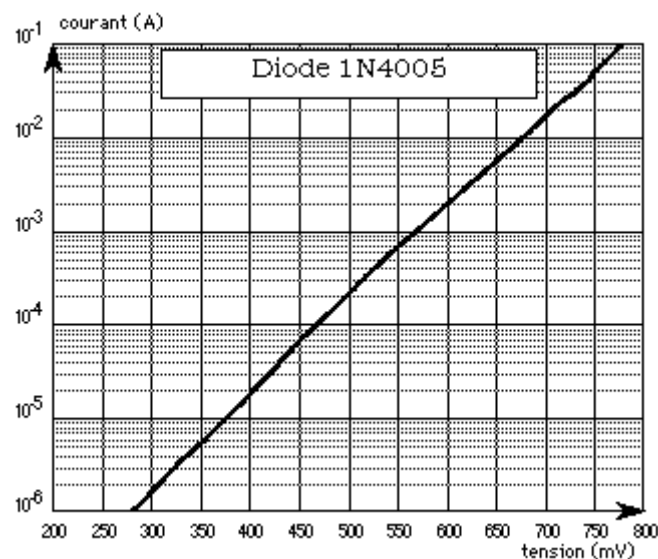
Quand la tension appliquée dépasse la valeur spécifiée par le fabricant, le courant décroît (attention : il est déjà négatif !) très rapidement. S'il n'est pas limité par des éléments externes, il y a destruction rapide de la diode due à deux phénomènes :

- phénomène d'avalanche : quand le champ électrique au niveau de la jonction devient trop intense, les électrons accélérés peuvent ioniser les atomes par chocs, ce qui libère d'autres électrons qui sont à leur tour accélérés Il y a divergence du phénomène, et le courant devient très important en un temps extrêmement court.
- phénomène Zener : les électrons sont arrachés aux atomes directement par le champ électrique dans la zone de transition et créent un courant qui devient vite intense quand la tension  $V_d$  atteint une valeur  $V_z$  dite tension Zener.

Si on construit la diode pour que le phénomène Zener l'emporte sur le phénomène d'avalanche (en s'arrangeant pour que la zone de transition soit étroite), on obtient une diode Zener.

On utilise alors cette diode en polarisation inverse. L'effet Zener n'est pas destructif dans ce cas. Ces diodes sont très utilisées pour la régulation de tension.

## Équation :



**Figure 10**  
Linéarité de Log(I) fonction de V.

La courbe de la Figure 7 (à l'exception de la zone de claquage) répond assez bien à la formule suivante, expliquée par la thermodynamique statistique :

$$I_d = I_f \left( e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) [1]$$

où :

- $I_f$  est le courant de fuite ;
- $q$  la charge de l'électron =  $1,6E-19C$  ;
- $k$  constante de Boltzman =  $1,38E-23 J/K$  ;
- $T$  température absolue (en degré Kelvin).

La loi logarithmique [1] est bien illustrée par : la Figure 8, la Figure 9, et la Figure 10. La courbe expérimentale s'éloigne toutefois de la théorie lorsque le courant anode cathode devient important car le modèle ne tient pas compte d'autres phénomènes dont les chutes de tension ohmiques dans le semi conducteur.

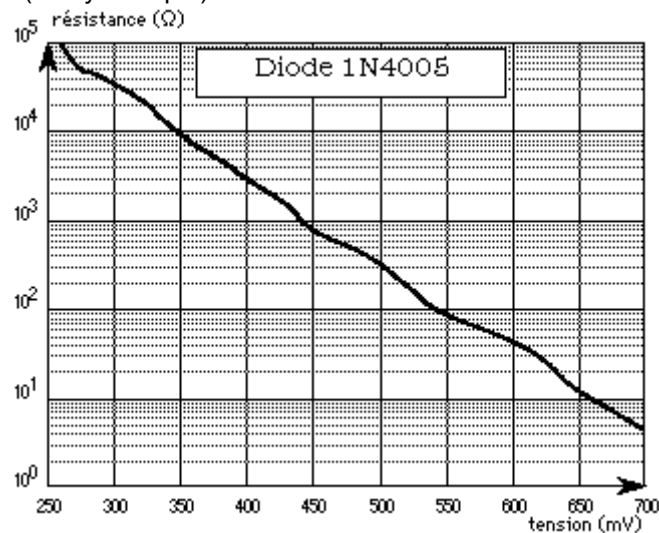
A noter que sur la Figure 10, le courant maximum représenté est égal au 1/10ème admissible par cette diode.

### Effet de la température :

Pour  $V_d$  positif, la diode a un coefficient de température négatif égal à  $-2\text{mV/K}$ . Cette dérive en température est suffisamment stable pour qu'on puisse utiliser des diodes comme thermomètres.

Pour  $V_d$  négatif, le courant de fuite  $I_f$  varie très rapidement avec la température. Il est plus important pour le germanium que pour le silicium, et croît plus vite, ce qui devient rapidement gênant. Dans le silicium, ce courant double tous les  $6^\circ\text{C}$ .

Résistance différentielle (ou dynamique).



**Figure 11**  
Résistance dynamique.

La résistance dynamique étant l'inverse de la pente de la caractéristique en un point donné, on peut la déduire par dérivation de la formule [1] :

$$r_d = \frac{k \cdot T}{q \cdot I_d} [2]$$

C'est la résistance dynamique au point de fonctionnement ( $V_d$ ,  $I_d$ ). Elle est fonction du courant de polarisation  $I_d$  au point étudié.

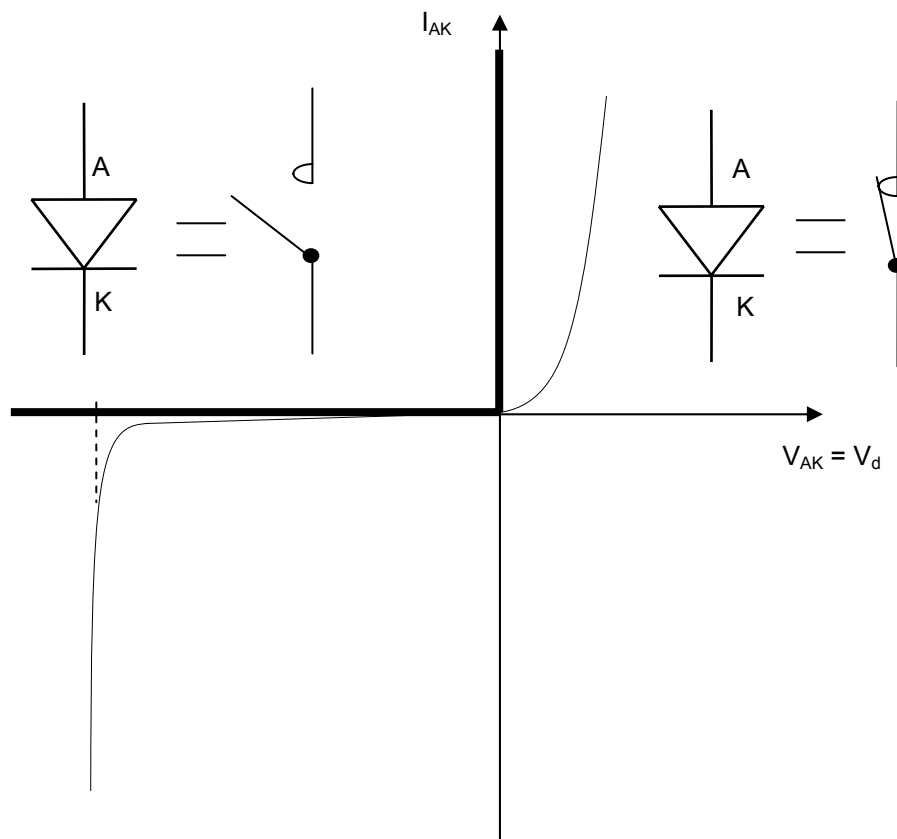
La Figure 11 donne la valeur de  $r_d$  en fonction de la tension de la diode : les variations sont très importantes.

## Schéma équivalent

La représentation de la diode par sa loi logarithmique est un peu complexe pour l'emploi de tous les jours. Plusieurs schémas équivalents simplifiés peuvent être employés en lieu et place avec profit. Pour établir ces schémas, on « linéarise » plus ou moins grossièrement la caractéristique électrique de la diode, puis on cherche quels composants permettent d'obtenir ces caractéristiques linéaires.

### Modélisation n°1 : la diode « idéale »

La modélisation d'un composant consiste à remplacer la caractéristique électrique réelle  $i = f(u)$  par des segments de droites. A chaque segment de droite correspond un schéma électrique équivalent. Dans ce cas, on néglige la tension de seuil (force du ressort qui maintient le clapet sur son siège) et la résistance interne de la diode (le petit étranglement du au siège du clapet qui rétrécit le tuyau augmentant ainsi sa « résistance »). La caractéristique est alors celle de la Figure 12.



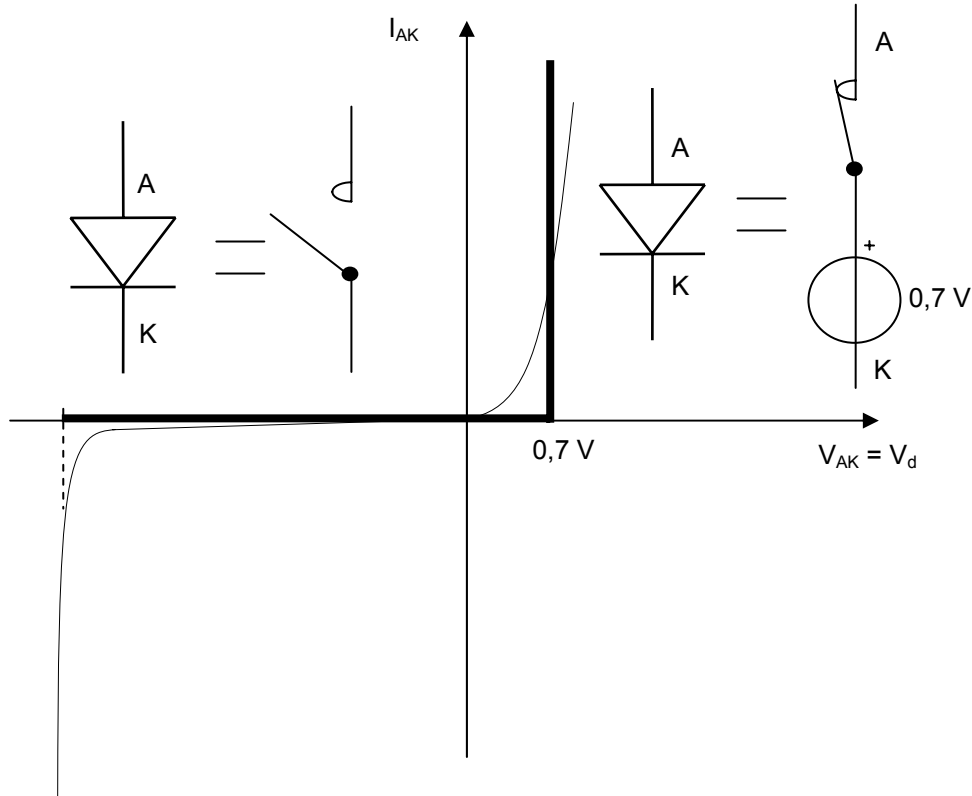
**Figure 12**  
Caractéristique idéale.

Cette modélisation consiste à effectuer une linéarisation « à la serpe » de la caractéristique électrique de la diode. Ainsi modélisée, la diode est un interrupteur commandé par la tension anode-cathode  $V_{AK}$  ( $V_d$ ). Si  $V_{AK} > 0$ , l'interrupteur est fermé et le courant anode-cathode passe. Si  $V_{AK} < 0$ , alors l'interrupteur est ouvert et le courant anode-cathode est nul (quelques pico ampères en réalité).

Ce schéma est utilisé pour expliquer le principe de fonctionnement des montages ainsi que dans le domaine du redressement ou de la commutation. Si les diodes sont employées dans des circuits où les tensions sont élevées (plus de 10 V) : la tension de coude (0,7 V pour les diodes au Si) est alors négligeable.

## Modélisation n°2 : diode avec seuil

On peut continuer à négliger la résistance interne, mais tenir compte du seuil de la diode. La caractéristique devient :



**Figure 13**  
Caractéristique avec seuil.

Du point de vue de l'analogie hydraulique de la diode, la force contre électromotrice du schéma équivalent correspond à la « contre pression » exercée par le ressort qui maintient le clapet sur son siège.

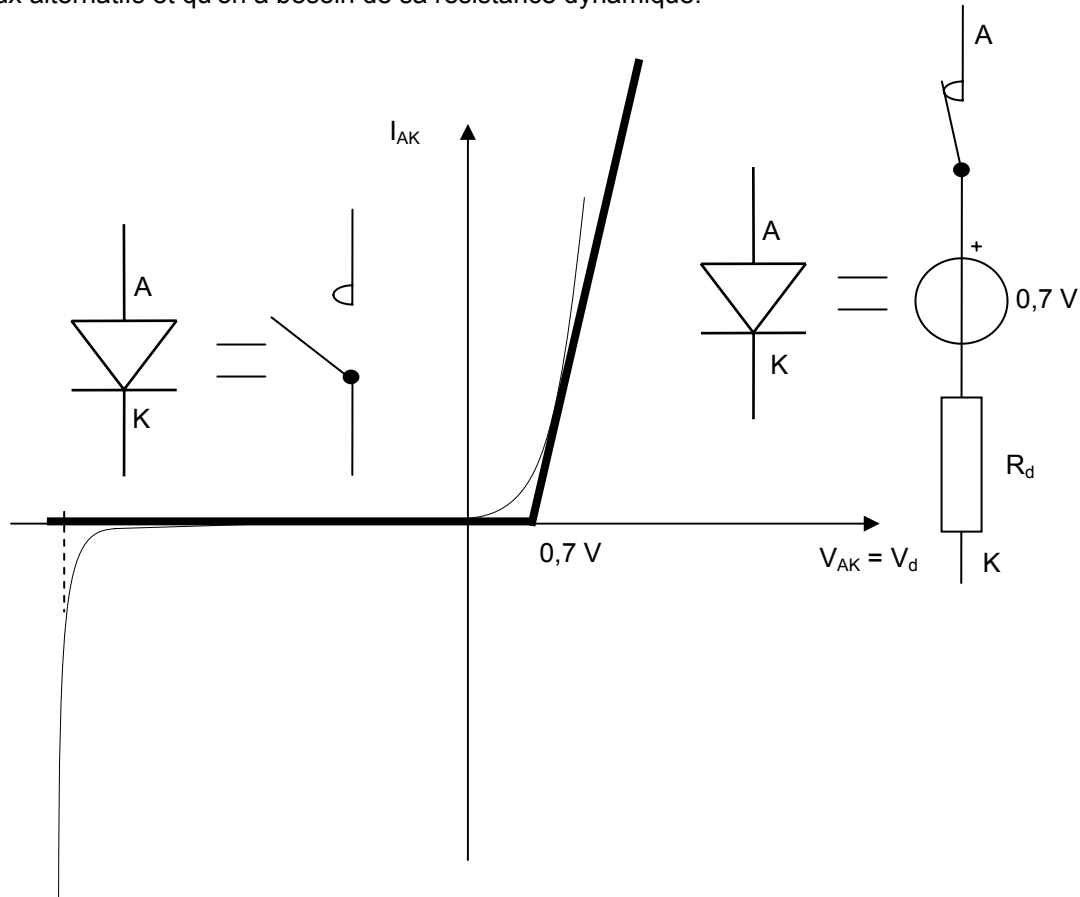
Cette f.c.é.m. est de 0,7 V (environ, elle est comprise entre 0,6 et 0,7 V) pour les diodes au silicium. Les diodes au germanium, qui sont rares, ont une f.c.é.m. de 0,3 V. Les diodes électroluminescentes ont des f.c.é.m. variables, avec la longueur d'onde émise, entre 1,3 et 3,8 V.

Ce schéma est le plus utilisé pour les calculs où l'on recherche une certaine précision. Il est donc à utiliser si la source délivre une tension inférieure à une dizaine de volts ou dans le domaine de l'électronique du signal lorsque le courant reste faible devant le courant maximum.



### Modélisation n°3 : diode avec seuil et résistance

Ici, on prend en compte la résistance de la diode. Ceci peut être utile si on utilise la diode en petits signaux alternatifs et qu'on a besoin de sa résistance dynamique.



**Figure 14**  
Caractéristique avec seuil et résistance.

La linéarisation de la caractéristique électrique est plus fine, les morceaux de droite épousent mieux la courbe.

Du point de vue de l'analogie hydraulique de la diode, en plus de prendre en compte la force contre électromotrice  $V_0 = 0,7 \text{ V}$  (« contre pression » exercée par le ressort qui maintient le clapet sur son siège), on prend en compte la résistance dynamique de la diode. Cette résistance dynamique peut être interprétée comme la résistance au passage du fluide introduite par le rétrécissement du tuyau du au siège du clapet.

Comme l'analogie hydraulique le laisse supposer, cette résistance est petite, au alentour de  $20 \Omega$ . On parle de résistance « dynamique » car elle varie avec l'intensité qui traverse la diode. La pente de la caractéristique électrique n'est pas constante comme dans le cas d'une résistance « ohmique ». La résistance dynamique est la dérivée de la caractéristique électrique en un point :

$$R_d = \frac{d(u = f(i))}{di} \simeq \frac{\Delta u}{\Delta i}$$

Attention : Dans le cas de la diode, on considère souvent que la résistance dynamique est constante. Cela n'est vrai que si la variation du signal alternatif est très petite autour du point de polarisation en continu.

Cette caractéristique est utilisée dans le domaine du redressement, lorsqu'on travaille avec de faibles tensions de source et des forts courants.

## Exemple d'utilisation des 3 modèles de la diode

Un générateur de tension  $e(t) = E \sin(\omega t)$  alimente un circuit constitué d'une diode 1N4006 et d'une résistance. La fréquence de fonctionnement correspond à celle du réseau industriel (50 Hz).

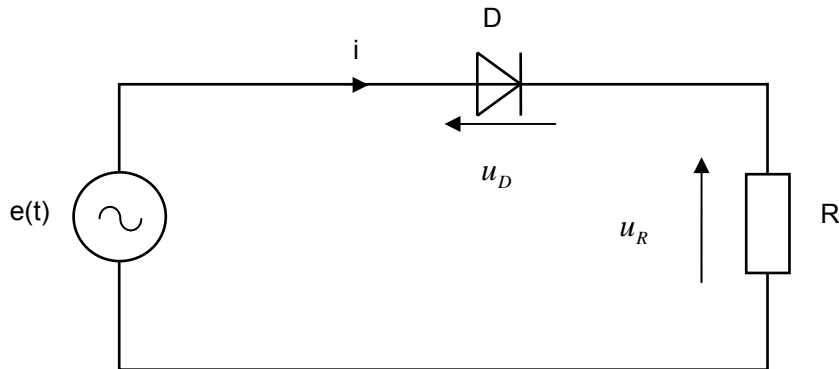


Figure 15

La diode 1N4006 a pour caractéristiques :

### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage	$V_{RRM}$	50	100	200	400	600	800	1000	V
Working Peak Reverse Voltage	$V_{RWM}$								
DC Blocking Voltage	$V_R$								
Non-Repetitive Peak Reverse Voltage (halfwave, single phase, 60 Hz)	$V_{RSM}$	60	120	240	480	720	1000	1200	V
RMS Reverse Voltage	$V_{R(RMS)}$	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectified Forward Current (single phase, resistive load, 60 Hz, $T_A = 75^\circ\text{C}$ )	$I_O$	1.0							A
Non-Repetitive Peak Surge Current (surge applied at rated load conditions)	$I_{FSM}$	30 (for 1 cycle)							A
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J$ $T_{stg}$	-65 to +175							$^\circ\text{C}$

Maximum ratings are those values beyond which device damage can occur. Maximum ratings applied to the device are individual stress limit values (not normal operating conditions) and are not valid simultaneously. If these limits are exceeded, device functional operation is not implied, damage may occur and reliability may be affected.

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Rating	Symbol	Typ	Max	Unit
Maximum Instantaneous Forward Voltage Drop, ( $I_F = 1.0$ Amp, $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	$v_F$	0.93	1.1	V
Maximum Full-Cycle Average Forward Voltage Drop, ( $I_O = 1.0$ Amp, $T_L = 75^\circ\text{C}$ , 1 inch leads)	$V_{F(AV)}$	-	0.8	V
Maximum Reverse Current (rated DC voltage) ( $T_J = 25^\circ\text{C}$ ) ( $T_J = 100^\circ\text{C}$ )	$I_R$	0.05 1.0	10 50	A
Maximum Full-Cycle Average Reverse Current, ( $I_O = 1.0$ Amp, $T_L = 75^\circ\text{C}$ , 1 inch leads)	$I_{R(AV)}$	-	30	A

Le tableau « ELECTRICAL CHARACTERISTICS » indique sur sa première ligne une chute de tension maximum de 1,1 V pour 1 A à 25°C.

La diode 1N4006 est une diode au silicium, on a donc une tension de seuil de 0,6 V à 25°C et la résistance dynamique peut être calculée par :  $R_d = \frac{1,1 - 0,6}{1} = 0,5 \Omega$ .

Afin d'illustrer l'utilisation des trois modèles de la diode, nous allons représenter les graphes de la tension  $u_D = f(t)$  et  $u_R = f(t)$  pour trois cas différents. Pour le circuit utilisé, la loi des mailles donne :

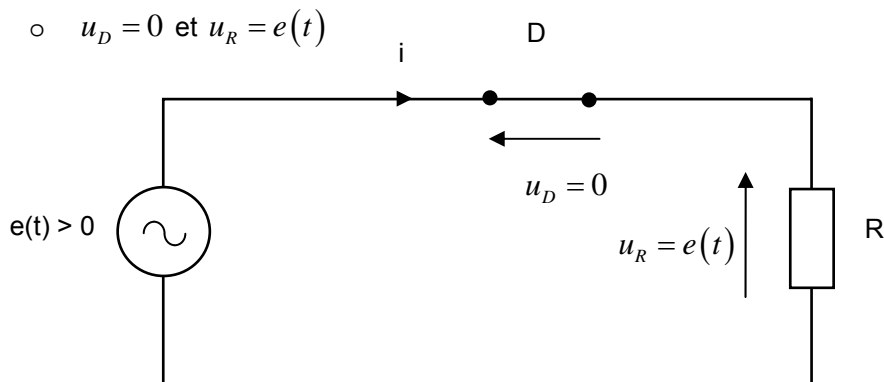
$$e(t) = u_D(t) + u_R(t)$$

**Premier cas :  $E_{\max} = 200 \text{ V}$  et  $R = 1000 \Omega$ .**

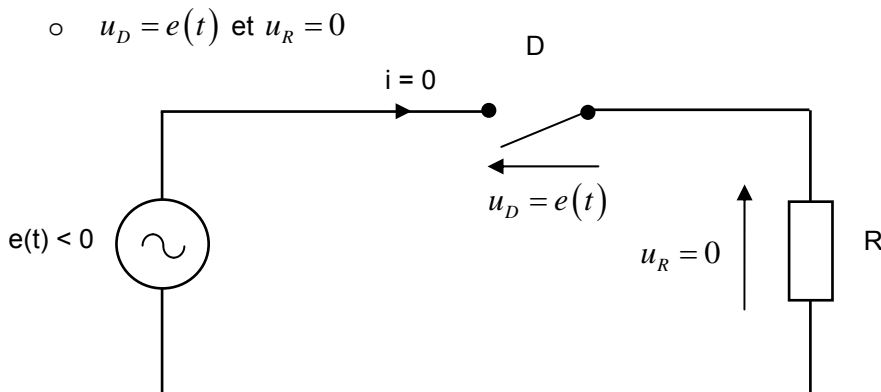
La diode permet ce fonctionnement car la tension inverse maximum est de 600 V (ici, nous aurons  $200 \text{ V} < 600 \text{ V}$ ) et le courant direct de crête ne sera que de  $\frac{200}{1000} = 0,2 \text{ A} < 1 \text{ A}$  (courant moyen maximum admissible).

La tension maximale de la source est de forte valeur, cela nous incite à choisir le modèle n°1. La diode est équivalente soit à un interrupteur fermé, soit à un interrupteur ouvert. Le passage de l'un à l'autre de ces deux modèles se fait lorsque  $e(t) = 0$  (voir Figure 16).

- $e(t) \geq 0$ , la diode conduit et est remplacé par un interrupteur fermé, nous obtenons :



- $e(t) \leq 0$ , la diode est bloquée et est remplacée par un interrupteur ouvert. Le courant est nul, nous avons :



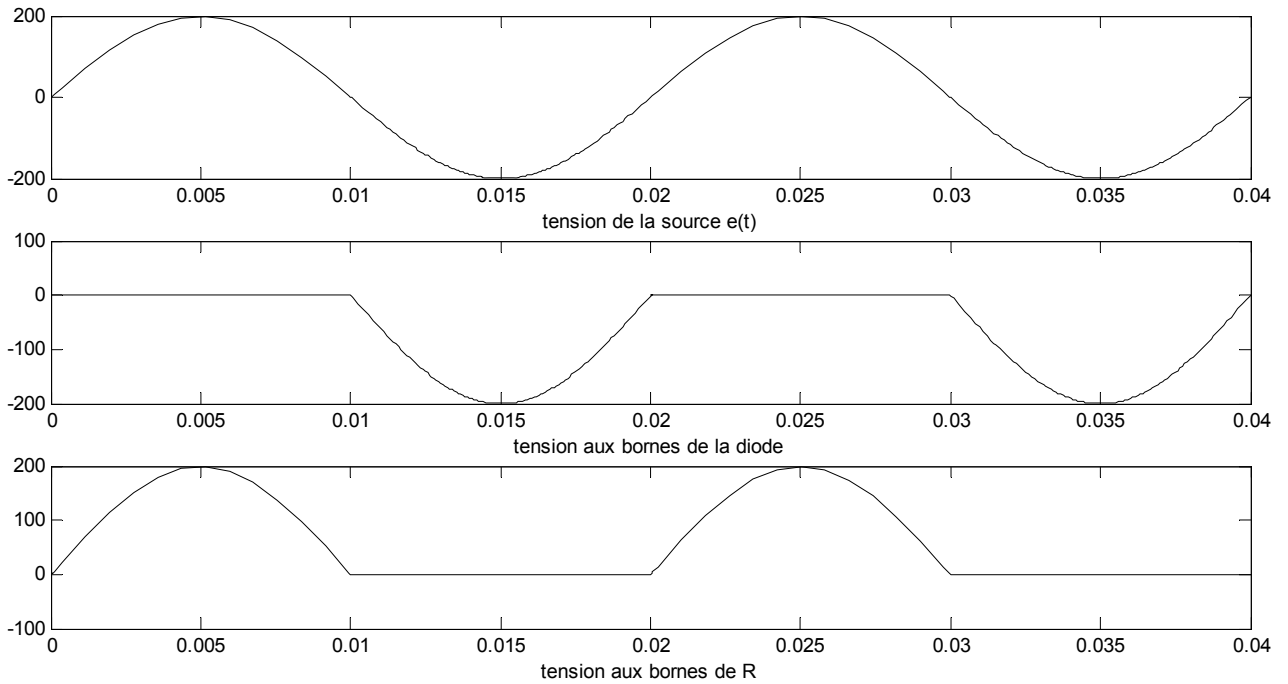
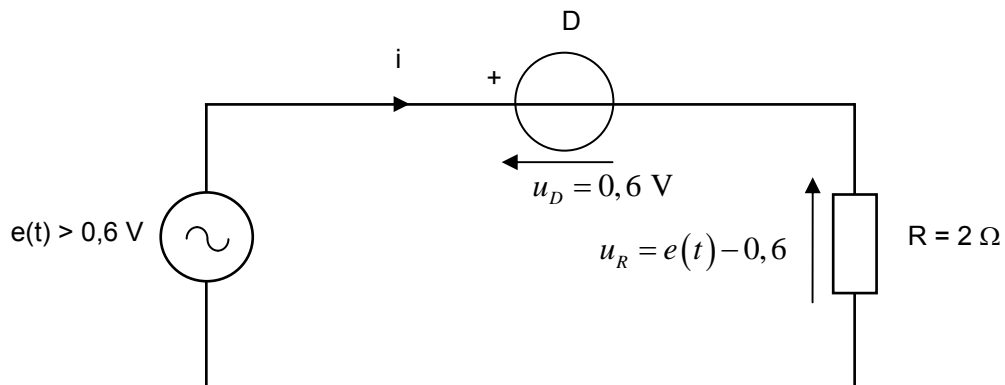


Figure 16

**Deuxième cas :  $E_{\max} = 2 \text{ V}$  et  $R = 1000 \Omega$ .**

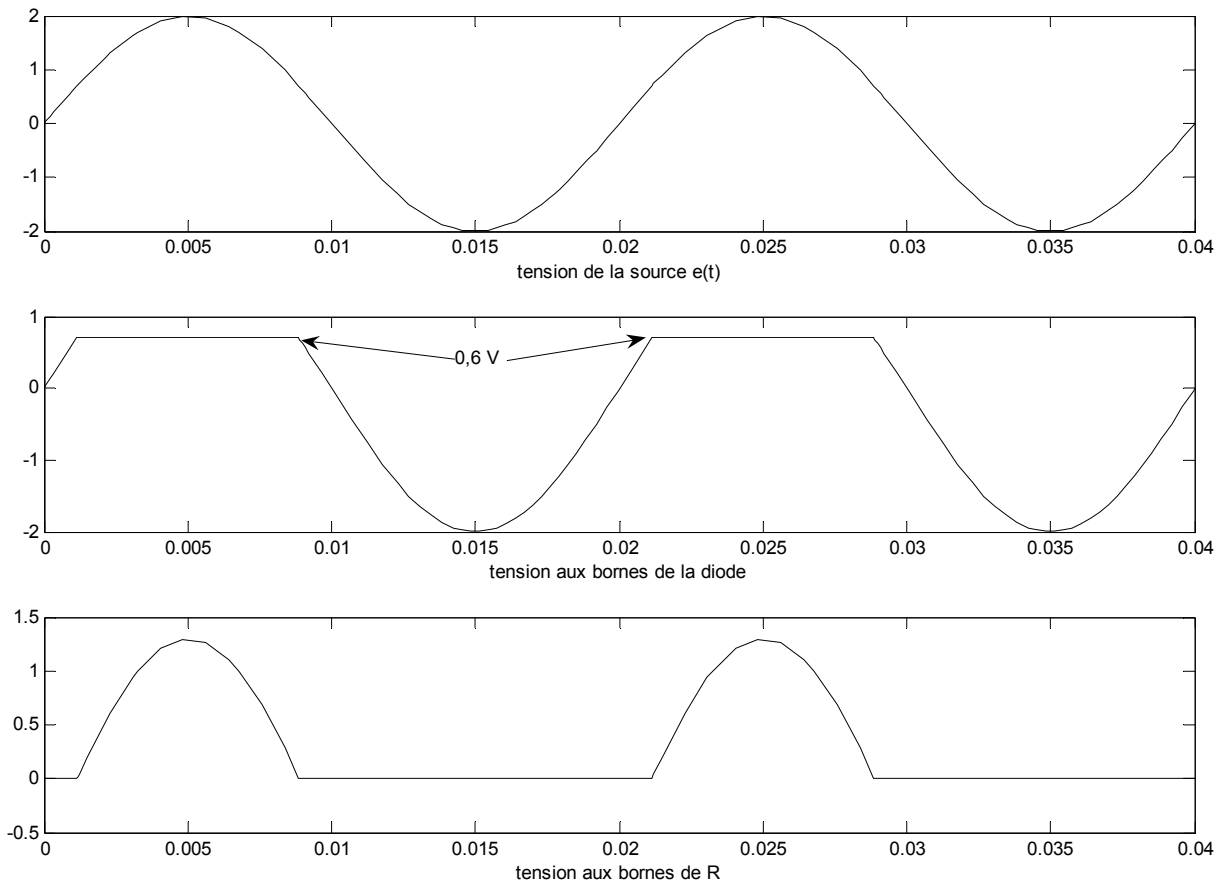
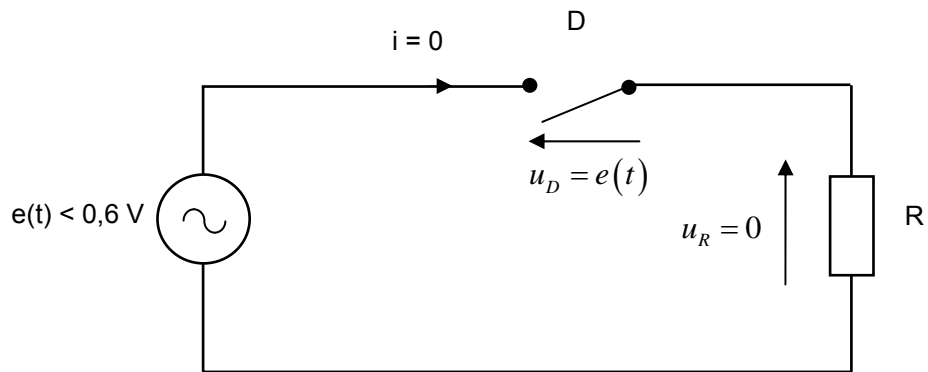
La tension délivrée par la source étant faible ( $\frac{E}{10} = \frac{2}{10} = 0,2 < 0,6$ , règle du dixième), on ne peut plus négliger la tension de seuil. Cependant, le courant restant faible, nous utiliserons le modèle n°2. La diode est équivalente, soit à un récepteur idéal de tension, soit à un interrupteur ouvert. Le passage d'un modèle à l'autre de ces deux modèles se fait pour  $e(t) = 0,6 \text{ V}$ . La Figure 17 donne les courbes obtenues pour les tensions aux bornes de la diode et de la résistance.

- $e(t) \geq 0,6 \text{ V}$ , la diode conduit et est remplacé par un récepteur idéal de tension  $0,6 \text{ V}$ , nous obtenons :
  - $u_D = 0,6 \text{ V}$  et  $u_R = e(t) - 0,6$



- $e(t) \leq 0,6 \text{ V}$ , la diode est bloquée et est remplacée par un interrupteur ouvert. Le courant est nul, nous avons :

- $u_D = e(t)$  et  $u_R = 0$



**Figure 17**

**Troisième cas :  $E_{\max} = 2 \text{ V}$  et  $R = 2 \Omega$ .**

Le courant devient important (le courant de crête est de 1 A soit égal au maximum du courant moyen admissible). Il s'agit dans ces conditions de tenir compte de la résistance dynamique de la diode (que nous supposons constante), l'utilisation du modèle n°3 s'impose donc.

La diode est équivalente, soit à un récepteur idéal de tension en série avec  $R_d$ , soit à un interrupteur ouvert. Le passage de l'un à l'autre de ces modèles s'effectue lorsque  $e(t) = 0,6 \text{ V}$ .

- $e(t) \geq 0,6 \text{ V}$ , la diode conduit et est remplacé par un récepteur idéal de tension 0,6 V en série avec la résistance directe  $R_d = 0,5 \Omega$ , nous obtenons :

$$i = \frac{e(t) - 0,6}{R_d + R} = \frac{2 \sin(\omega t) - 0,6}{2,5}$$

$$u_R = R \times i$$

$$u_D = R_d \times i + 0,6$$

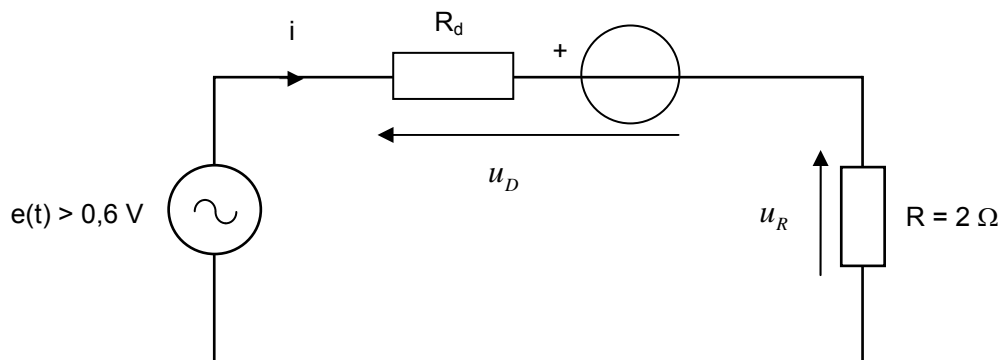
Les valeurs maximales obtenues sont :

$$i_{\max} = \frac{2 - 0,6}{2,5} = 0,56 \text{ A}$$

$$u_{R_{\max}} = 2 \times 0,56 = 1,12 \text{ V}$$

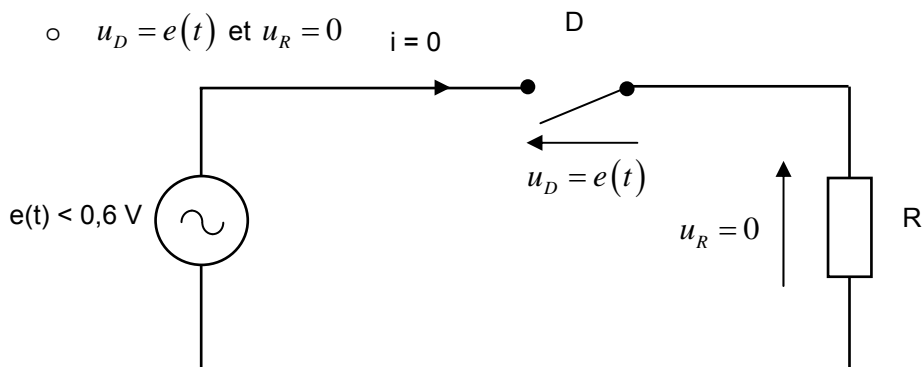
$$u_{D_{\max}} = 0,5 \times 0,56 + 0,6 = 2 - 1,12 = 0,88 \text{ V}$$

Diode



- $e(t) \leq 0,6 \text{ V}$ , la diode est bloquée et est remplacée par un interrupteur ouvert. Le courant est nul, nous avons :

- $u_D = e(t)$  et  $u_R = 0$   $i = 0$



La Figure 18 montre les tensions aux bornes de la diode et de la résistance R dans le cas n°3.

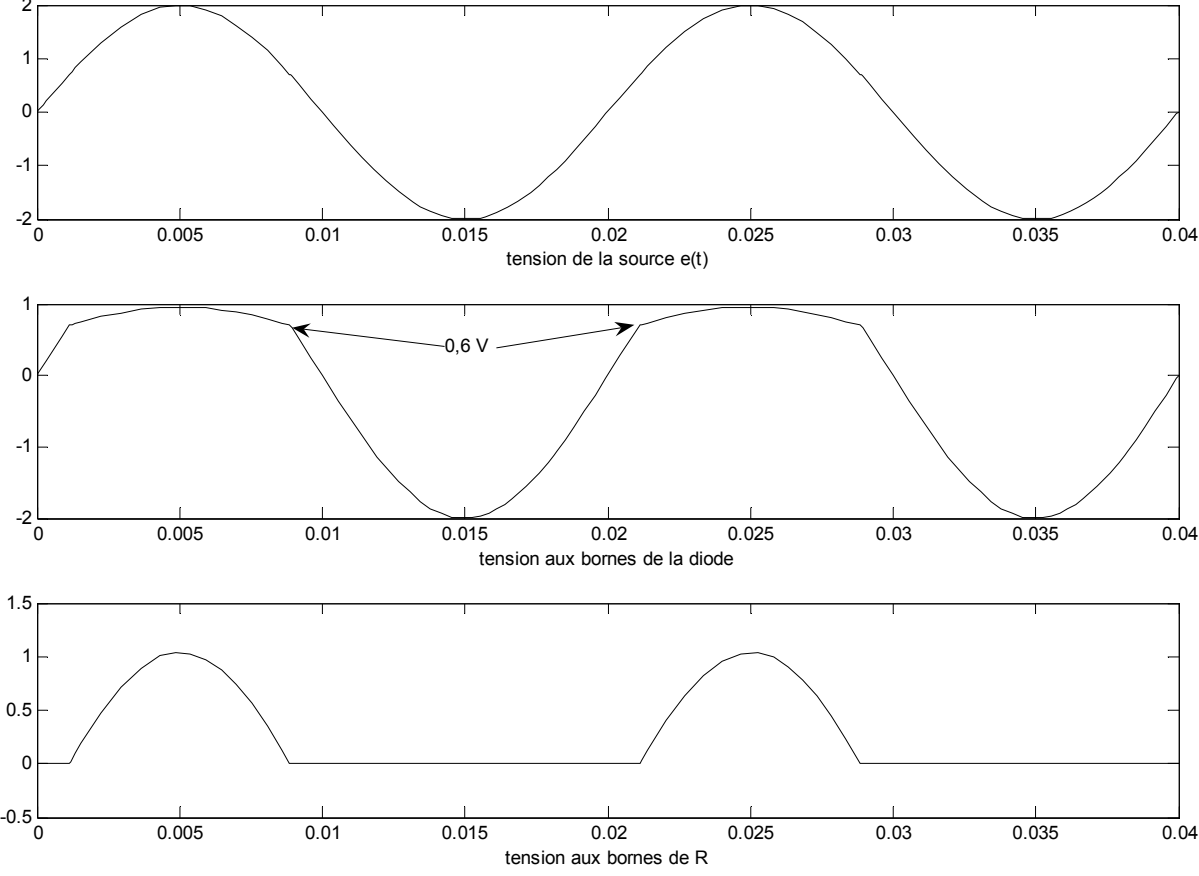


Figure 18

## Utilisation

Il existe divers types de diodes correspondant à des technologies différentes. Chaque technologie présente le meilleur compromis pour une utilisation donnée.

Nous allons balayer les applications des diodes en les classifiant par groupe technologique.

## Paramètres essentiels des diodes

En fonction de l'application considérée, on s'intéressera à certains paramètres des diodes plutôt qu'à d'autres. Certains paramètres ne sont pas spécifiés pour tous les types de diodes, sauf les suivants qui sont incontournables :

- $V_F$  : tension de coude de la diode spécifiée à un courant direct donné.
- $I_F$  : courant direct permanent admissible par la diode à la température maxi de fonctionnement.
- $I_{FSM}$  : courant temporaire de surcharge (régime impulsionnel). En général, pour un courant de surcharge donné, le constructeur spécifie l'amplitude des impulsions, leur durée, le rapport cyclique, et dans certains cas, le nombre maxi d'impulsions qu'on peut appliquer.
- $V_R$  : c'est la tension inverse maxi admissible par la diode (avant l'avalanche).
- $I_R$  : c'est le courant inverse de la diode. Il est spécifié à une tension inverse donnée, et pour plusieurs températures (généralement 25°C et Tmax). Ce courant n'est pas seulement celui dû aux porteurs minoritaires. Il provient aussi des courants parasites à la surface de la puce (le silicium est passivé par oxydation, et il peut subsister des impuretés qui vont permettre le passage de faibles courants). Le boîtier d'encapsulation de la puce de silicium est aussi source de fuites.

Ces symboles sont ceux généralement employés par les différents constructeurs, mais il peut y avoir des variantes, et il est toujours sage de se reporter à la documentation du constructeur pour savoir comment sont spécifiés les paramètres, et à quoi ils correspondent exactement.



## Diodes de redressement

Une des principales applications de la diode est le redressement de la tension alternative du secteur pour faire des générateurs de tension continue destinés à alimenter les montages électroniques (entre autres).

Il y a deux types principaux de diodes de redressement : la diode standard pour le redressement secteur classique, et la diode rapide pour les alimentations à découpage.

### Caractéristiques physiques

Les diodes de redressement standard sont les moins sophistiquées, et ne font l'objet d'aucun traitement particulier, les conditions d'utilisations étant peu contraignantes.

Elles ont des tensions  $V_R$  comprises entre 50 et 1000V environ, et les courants  $I_F$  vont de 1A à plusieurs centaines d'ampères.

Avant le système de redressement, on a presque toujours un transformateur qui sert à abaisser la tension secteur (les montages électroniques fonctionnent souvent sous des tensions de polarisation allant de quelques volts à quelques dizaines de volts), et qui sert aussi à isoler les montages du secteur.

Caractéristiques électriques :

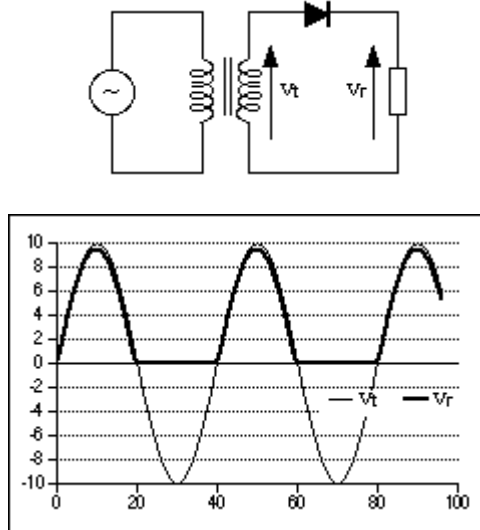
- courant : 1 à 10 A ;
- tension : 50 à 3 000 V ;
- temps de recouvrement : de l'ordre de 20  $\mu$ s.

Caractéristiques électriques des diodes de puissances :

- tension : 50 à 3 200 V ;
- courant : 5 à 800 A.

## Redressement simple alternance

C'est le redressement le plus simple qui soit : quand la tension aux bornes du transformateur  $V_t$  dépasse la tension de seuil de la diode, celle-ci conduit, laissant passer le courant direct dans la charge. La tension aux bornes de la charge  $V_r$  est alors égale à la tension aux bornes du transformateur moins la tension directe  $V_F$  de la diode.



**Figure 19**

Redressement avec une diode.

Quand la tension aux bornes du transformateur devient inférieure à la tension de seuil, la diode est bloquée ; il ne subsiste que le courant de fuite, qui est négligeable en comparaison du courant direct. La tension aux bornes de la diode est alors égale à celle aux bornes du transformateur : il faudra choisir une diode avec une tension  $V_R$  au minimum égale à la tension crête du secondaire du transformateur.

## Redressement double alternance

Avec transfo double enroulement ou transformateur à point milieu

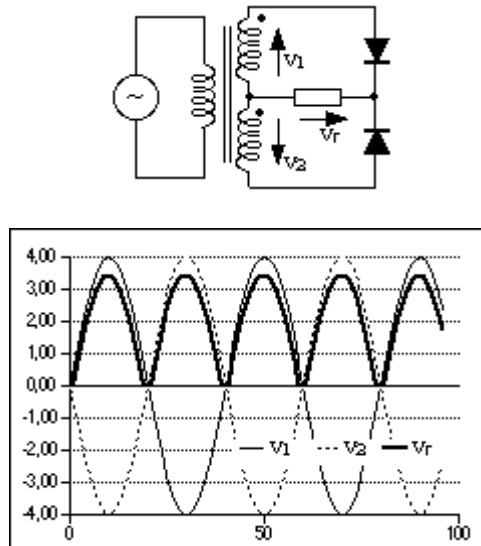


Figure 20

Redressement avec transfo double sortie.

Le montage précédent présente l'inconvénient de ne laisser passer que la moitié du courant que peut délivrer le transformateur. Pour remédier à cela, on utilise un transformateur avec deux enroulements secondaires que l'on connecte de manière à ce qu'ils délivrent des tensions en opposition de phase.

Dans ce cas, tout se passe comme si on avait deux montages identiques à celui de la Figure 19 qui fonctionnent l'un pour l'alternance positive, l'autre pour l'alternance négative. On vérifie bien (Figure 21 et Figure 22) que le courant dans la charge est toujours orienté dans le même sens.

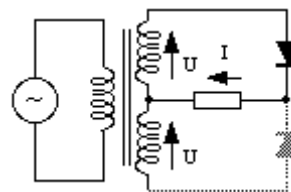


Figure 21

Alternance positive.

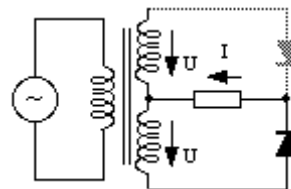


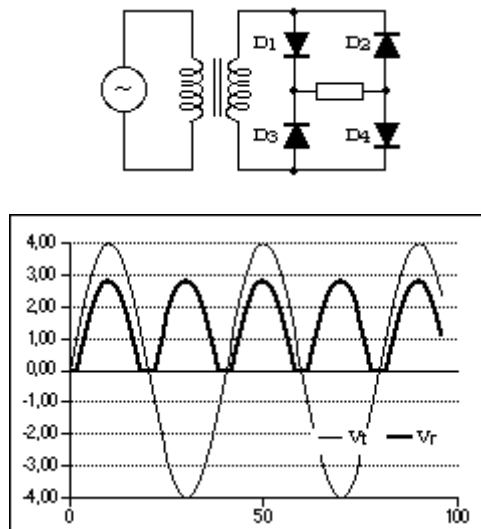
Figure 22

Alternance négative.

On notera la chute de tension dans les diodes : elle devient non négligeable quand les tensions alternatives sont faibles, en dessous d'une vingtaine de volts.

Les diodes sont plus sollicitées que pour le montage simple alternance : en effet, la diode qui ne conduit pas devra supporter en plus de la tension aux bornes de son secondaire de transformateur, la tension aux bornes de la résistance. Au total, elle devra supporter une tension  $V_R$  double de celle requise dans le montage à simple alternance, soit deux fois la tension crête présente sur chacun des secondaires.

### Avec pont de Graëtz

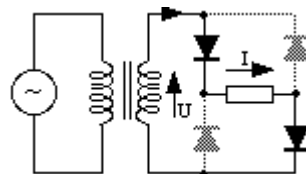


**Figure 23**

Fig.13. Redressement avec pont de diodes.

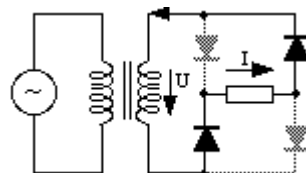
Il existe une autre manière de faire du redressement double alternance, ne nécessitant pas un transformateur à double enroulement : on utilise 4 diodes montées en pont, dit « pont de Graëtz ». Des ponts tous faits sont disponibles dans le commerce, permettant de réduire le nombre de composants du montage.

Lorsque la tension aux bornes du transformateur est positive, D1 et D4 conduisent, et quand elle est négative, D2 et D3 conduisent (Figure 24 et Figure 25).



**Figure 24**

Alternance positive.



**Figure 25**

Alternance négative.

Chaque diode n'a à supporter qu'une fois la tension crête du secondaire du transformateur (contre deux fois pour le montage précédent), mais en revanche, on a deux tensions directes de diode en série. La puissance totale dissipée dans les diodes est double par rapport à la solution précédente.

Quelle solution choisir ?

Quand on en aura la possibilité, on préférera la solution à transformateur à point milieu, pour plusieurs raisons :

- le transformateur n'est pas plus cher que celui à secondaire simple.
- avec un transformateur à un seul secondaire, on ne peut pas faire d'alimentation double symétrique en redressement double alternance. Ce type de transformateur est moins universel.
- le fait que les diodes aient à tenir une tension double n'est pas un problème dans la plupart des cas, car les tensions redressées sont très souvent bien inférieures aux tensions  $V_R$  minimum des diodes disponibles dans le commerce.
- dans le montage en pont, la charge est flottante par rapport au transformateur, ce qui peut être gênant dans certains cas.

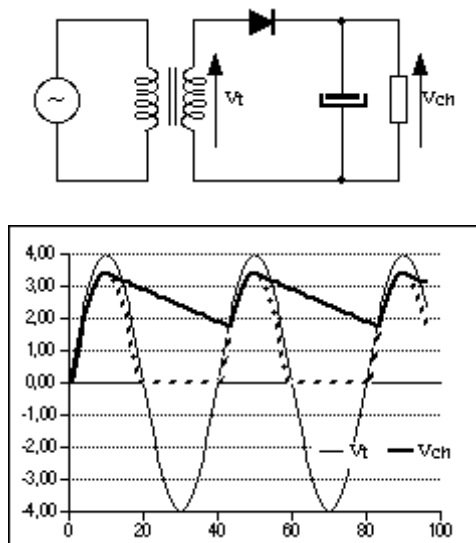
## Filtrage

Les montages précédents délivrent des tensions redressées continues mais ondulées.

Pour obtenir une tension quasiment lisse, il suffit de mettre un gros condensateur en parallèle avec la charge.

## Redressement simple alternance

Ici, la charge est absolument quelconque, et peut être un montage électronique complexe ayant une consommation en courant aléatoire.



**Figure 26**

Redressement simple alternance et filtrage.

Sur le graphique du bas de la Figure 26, on voit en pointillé la tension redressée telle qu'elle serait sans condensateur. En traits pleins épais, on voit la tension filtrée.

Sur ce graphe, le courant de décharge du condensateur est linéaire : il correspond à l'hypothèse de décharge à courant constant.

Le fonctionnement est simple : quand la tension aux bornes du transformateur est supérieure à la tension aux bornes du condensateur additionnée de la tension directe de la diode, la diode conduit. Le transformateur doit alors fournir le courant qui va alimenter la charge et le courant de recharge du condensateur.

Quand la tension du transformateur devient inférieure à celle du condensateur plus la tension de coude de la diode, la diode se bloque. L'ensemble condensateur-charge forme alors une boucle isolée du transformateur.

Le condensateur se comporte comme un générateur de tension, et il restitue l'énergie accumulée dans la phase précédente.

A noter que la tension aux bornes du condensateur étant en permanence voisine de la tension crête positive du transformateur, lorsque celui-ci fournit la tension de crête négative, la diode doit supporter deux fois la tension crête délivrée par le transformateur : on perd le seul avantage (hormis la simplicité) du montage à redressement simple alternance.

Calcul du condensateur : dans la littérature, on trouve classiquement le calcul du condensateur pour une charge résistive. La décharge est alors exponentielle et le calcul inutilement compliqué.

Ce calcul est assez éloigné des besoins réels : en général, on ne fait pas des alimentations continues pour les faire débiter dans des résistances !

Très souvent, ces alimentations redressées et filtrées sont suivies d'un régulateur de tension. La charge est fréquemment un montage complexe ayant une consommation variable au cours du temps. Pour faire le calcul du condensateur, on prendra donc une décharge à courant constant, le courant servant au calcul étant le maximum (moyenné sur une période du secteur) consommé par la charge. Le critère de choix ne sera pas un taux d'ondulation qui n'a souvent aucune utilité pratique, mais une chute de tension maximum autorisée sur le condensateur pour que le montage connecté en aval fonctionne correctement.

Avec ces hypothèses, le calcul du condensateur devient très simple : On considère que le condensateur C se décharge à courant  $I_{\max}$  constant pendant un temps  $\Delta T$  et que la chute de sa tension est inférieure à  $\Delta V$ .

On a alors la relation :

$$C \times \Delta V = I_{\max} \times \Delta T \quad [3]$$

Le temps  $\Delta T$  choisi va être la période du secteur. En pratique, le condensateur va se décharger moins longtemps (Figure 26), le calcul effectué conduit donc à le surdimensionner légèrement.

En fait, l'erreur commise est très faible comparée à la dispersion que l'on aura sur le résultat due à la dispersion de la valeur des composants, et notamment des condensateurs de filtrage : on utilise des condensateurs chimiques qui ont des tolérances très larges (-20% / +80% en général). Les transformateurs possèdent, eux aussi, des caractéristiques assez dispersées, ce qui fait qu'au final, mieux vaut prévoir large pour éviter les mauvaises surprises !

Pour un redressement simple alternance, on aura un  $\Delta T$  de 20ms, qui correspond à l'inverse de la fréquence secteur 50 Hz. La valeur du condensateur est alors :

$$C = \frac{I_{\max}}{f \cdot \Delta V} \quad [4]$$

Il faudra veiller à choisir un condensateur supportant au moins la tension crête du transformateur à vide (la tension sera plus faible en charge du fait des chutes de tensions diverses (impédance du transformateur, diode)).

## Redressement double alternance

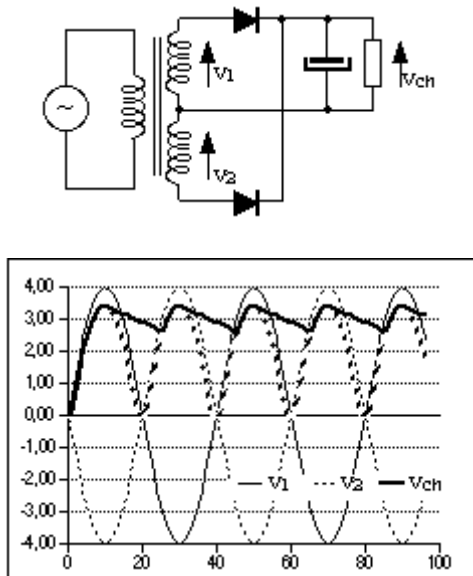
Les hypothèses seront les mêmes que précédemment. La seule différence viendra du temps  $\Delta T$  ; vu qu'on a un redressement double alternance, la fréquence du courant redressé est double de celle du secteur. La formule de calcul du condensateur devient donc :

$$C = \frac{I_{\max}}{2 \cdot f \cdot \Delta V} \quad [5]$$

Comme dans la formule [4],  $f$  est la fréquence secteur (50Hz en France).

A chute de tension égale, le condensateur sera donc deux fois plus petit que pour le redressement simple alternance, ce qui est intéressant, vu la taille importante de ces composants.

La diode aura à tenir deux fois la tension crête délivrée par chaque enroulement du transformateur.



**Figure 27**

Redressement double alternance et filtrage.

Exemple de calcul de condensateur :

On réalise une alimentation continue dont la tension de sortie est égale à 20 V. Elle peut délivrer un courant maximum de 100 mA. Son schéma est celui de la Figure 27. Déterminons la valeur du condensateur de filtrage afin d'obtenir une ondulation crête à crête de 1 V (aux bornes du condensateur).

Le courant fourni par le condensateur dans sa phase de décharge est voisin de  $I_{\max}$ . La formule [5]

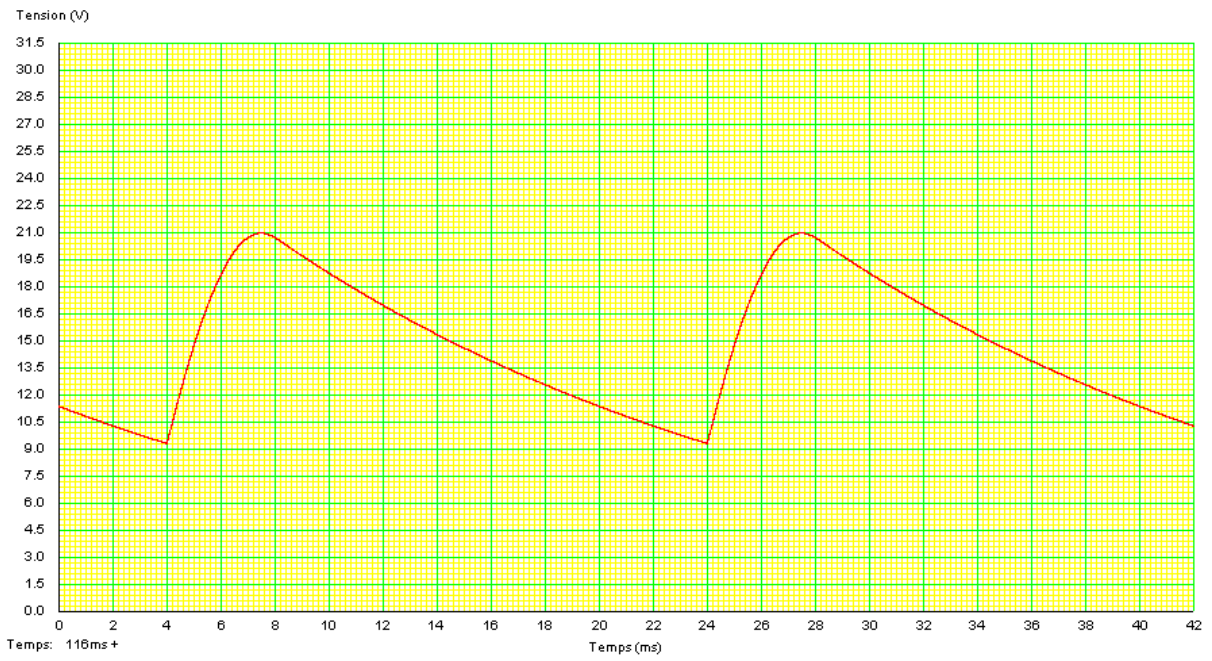
$$\text{permet d'écrire : } C = \frac{I_{\max}}{2 \cdot f \cdot \Delta V} = \frac{0,1}{2 \cdot 50 \cdot 1} = 1 \text{ mF} = 1000 \mu\text{F}.$$

La Figure 27 montre l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur pour une valeur trop faible de ce dernier et la Figure 28 montre le résultat correspondant au résultat du calcul ( $C = 1 \text{ mF}$ ).

Chaque secondaire du transformateur doit fournir une tension crête de  $20 + 1 + 0,7 = 21,7 \text{ V}$ .

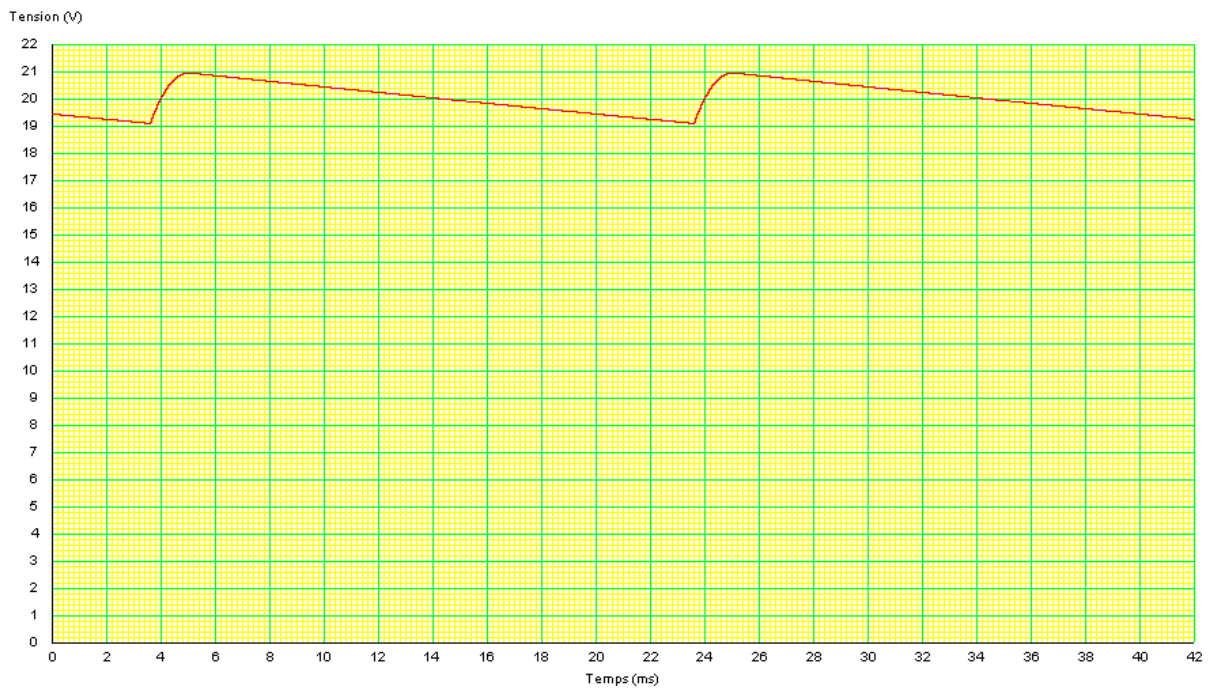
Le rapport de transformation (indispensable spécification du transformateur) peut être obtenu de manière approchée en faisant le quotient des valeurs crêtes :

$$m \approx \frac{\hat{V}_{\text{secondaire}}}{\hat{V}_{\text{primaire}}} = \frac{21,7}{220 \times \sqrt{2}} = 69,7 \cdot 10^{-3} \approx 0,07$$



**Figure 28**

Ondulation de la tension pour un condensateur de 100  $\mu\text{F}$



**Figure 29**

Ondulation de la tension pour un condensateur de 1000  $\mu\text{F}$



## Fonctionnement des diodes et transformateurs

On peut remarquer Figure 26 et Figure 27 que les diodes ne conduisent pas pendant toute l'alternance du secteur, mais seulement pendant un temps très court vis à vis de cette alternance. L'énergie qui est restituée par le condensateur dans la phase de roue libre doit être au préalable stockée pendant ce court temps de conduction des diodes.

La conséquence de ceci, c'est que pour assurer un certain courant moyen dans la charge, l'ensemble transformateur-diode devra débiter un courant de crête beaucoup plus intense que le courant moyen lors des phases de conduction des diodes (environ 15 fois le courant moyen).

La chute de tension dans les diodes sera alors importante (plus près d'1 V que de 0,6 V) ainsi que la chute de tension dans les impédances du transformateur.

Il ne faudra pas perdre ces considérations de vue quand on voudra calculer l'alimentation au plus juste !

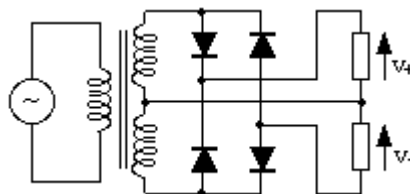
L'autre conséquence est le démarrage de l'alimentation : lorsqu'on branche le transformateur sur le secteur, on peut se trouver au maximum de tension de l'alternance secteur. La charge du transformateur, principalement constituée du condensateur de filtrage, sera l'équivalent d'un court-circuit. Le courant d'appel sera alors uniquement limité par l'impédance interne du transformateur (quelques dixièmes d'ohms à quelques ohms), et il sera très intense : les diodes devront supporter ce courant (paramètre  $I_{FSM}$ ).

## Alimentations doubles symétriques

Si on analyse le fonctionnement du redresseur double alternance à transformateur à point milieu, on s'aperçoit que chaque secondaire débite du courant seulement pendant une alternance. L'autre alternance serait susceptible de fournir un courant négatif.

Partant de cette constatation, on peut imaginer facilement une alimentation double symétrique, avec 4 diodes disposée en pont : deux diodes vont conduire les alternances positives des secondaires du transformateur, et les deux autres les alternances négatives.

Le point milieu du transformateur sera le potentiel commun des deux alimentations.



**Figure 30**

Alimentation double positive et négative.

On peut bien évidemment mettre un condensateur aux bornes de chacune des charges pour filtrer les tensions redressées obtenues.

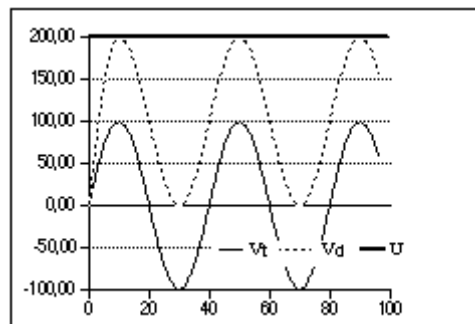
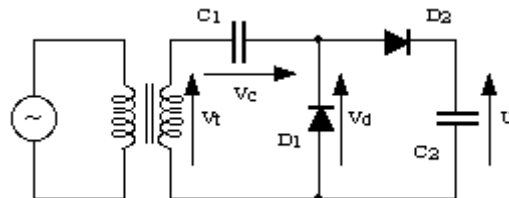
Ces alimentations sont incontournables dans les montages symétriques où il est nécessaire d'amplifier des tensions continues, et notamment dans les montages à amplificateurs opérationnels

## Doubleur de tension

Certaines applications nécessitent des tensions continues très élevées (quelques milliers de volts). On pourrait les obtenir avec un transformateur élévateur et un redressement / filtrage classique.

Il existe une solution moins onéreuse à base de diodes et de condensateurs : c'est le doubleur de tension.

Le montage de la Figure 31 se décompose en deux : redressement / filtrage par la cellule D1 / C1, puis détecteur de crête D2 / C2.



**Figure 31**

Doubleur de tension de Schenkel.

Aux bornes du condensateur C1, si la charge est infinie, la tension  $V_c$  restera constante et égale à la tension crête du transformateur.

La diode D1 verra à ses bornes la tension  $V_t + V_c$ , dont la valeur crête est égale à deux fois la tension crête du transformateur. Tout se passe comme si la tension du transformateur avait été traduite d'une fois la valeur de la tension crête.

Il suffit alors de filtrer cette tension à sa valeur de crête avec D2 et C2 : on obtient une tension continue égale à deux fois la tension crête du transformateur.

Il est possible de continuer ce raisonnement, et en ajoutant d'autres cellules semblables à celle du doubleur, on peut tripler, quadrupler ou plus les tensions.

Ces montages sont utilisés entre autres pour générer les tensions d'accélération des tubes d'oscilloscopes ou de télévision (2 à 5 kV). On remarquera qu'ils ne peuvent pas débiter beaucoup de courant (les tensions mises en jeu ne permettent pas d'utiliser des condensateurs de forte valeur), et donc, ils sont plutôt destinés à des applications quasi statiques.

# Diodes Zener

## Caractéristique

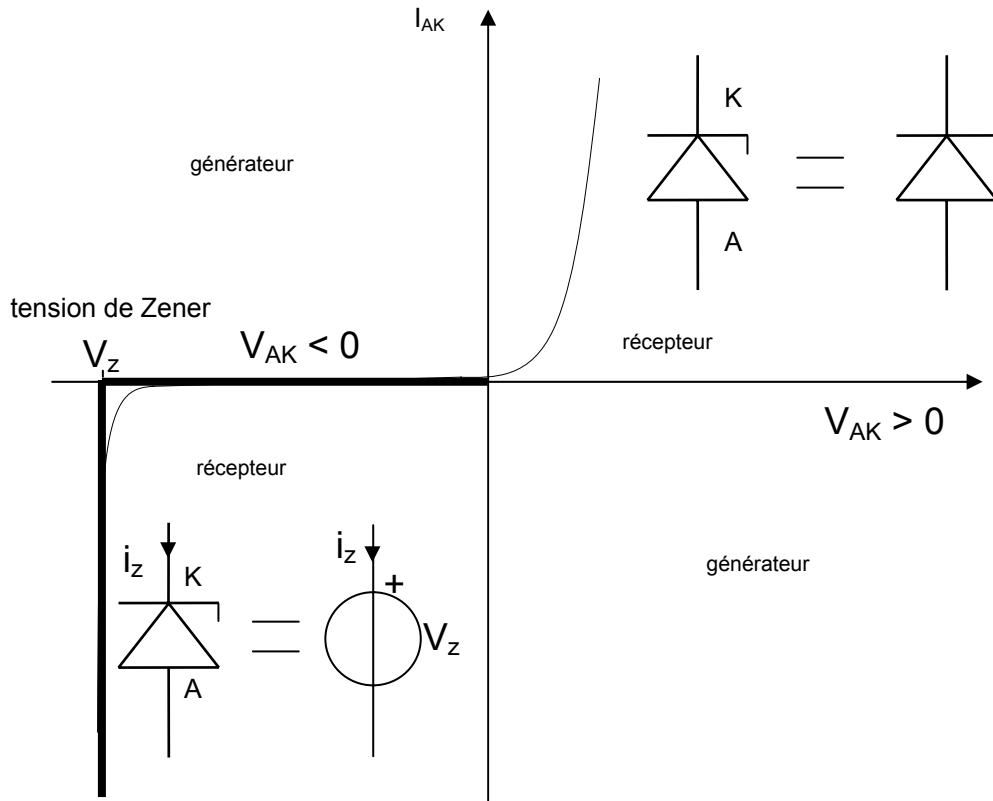


Figure 32

Caractéristique d'une diode Zener idéale et schéma équivalent.

Caractéristiques électriques :

- tension de régulation : 2 V à 300 V (par paliers de 0,2 à 0,5 V) ;
- puissance : 2 à 3,5 W.

L'effet Zener concerne la caractéristique inverse de la diode.

En direct, une diode Zener se comporte comme une diode normale.

En inverse, on fait en sorte que par construction l'effet Zener et / ou d'avalanche se produise à une tension bien déterminée, et ne soit pas destructif. La caractéristique inverse présente alors l'allure d'un générateur de tension à très faible résistance interne (quasiment idéal donc).

En général, les constructeurs spécifient :

- la tension d'avalanche  $V_{zt}$  pour un courant déterminé  $I_{zt}$  (les valeurs de tension sont normalisées) ;
- à ce point de fonctionnement  $V_{zt} / I_{zt}$ , on donne la résistance dynamique de la diode  $r_{zt}$  ;
- le courant  $I_{zm}$  pour lequel la puissance dissipée dans le composant sera le maximum admissible ;
- on indique aussi le coefficient de variation en température de la tension  $V_{zt}$ .

En dessous de  $V_{zt} = 5V$ , c'est l'effet Zener qui prédomine. Au dessus, c'est l'effet d'avalanche.

L'effet Zener est affecté d'un coefficient de température négatif ( $V_{zt}$  diminue quand la température augmente), et l'effet d'avalanche d'un coefficient positif. Les diodes ayant une tension  $V_{zt}$  d'environ 5V ont un coefficient de température nul, car les deux phénomènes se produisent de manière équilibrée, et leurs effets se compensent.

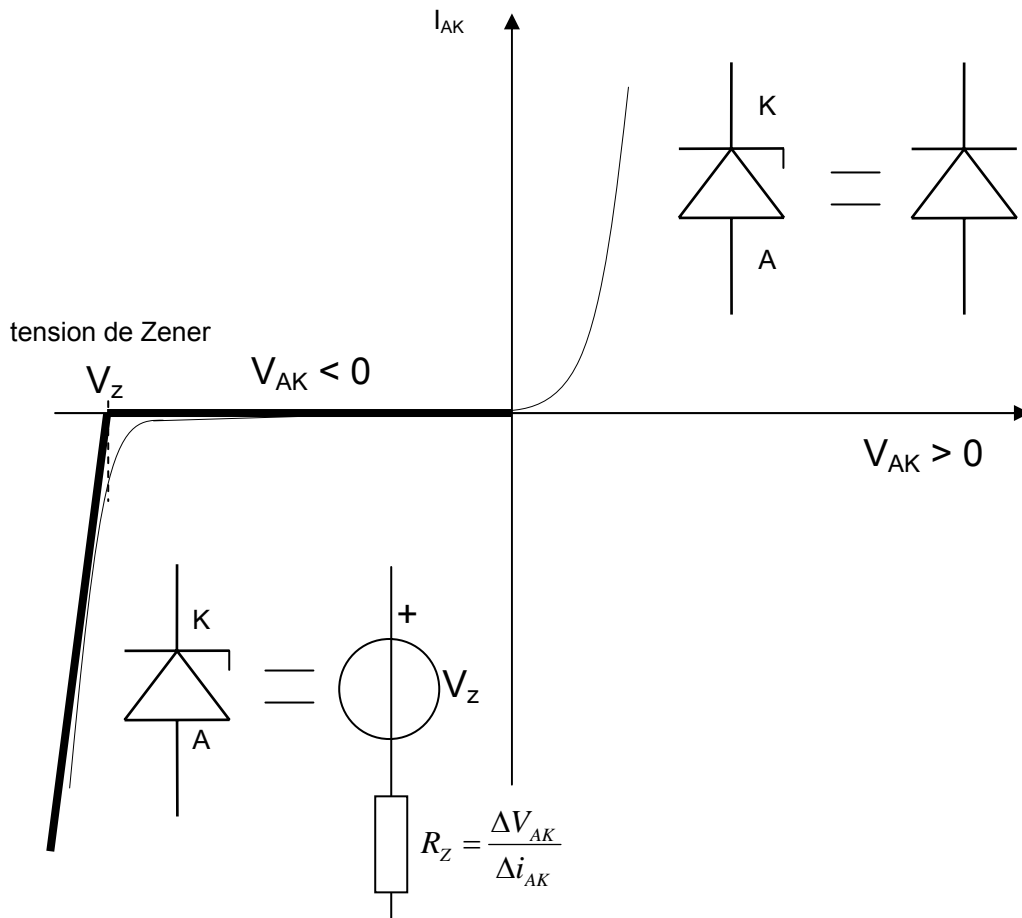
L'effet d'avalanche est plus franc que l'effet Zener, ce qui fait que le coude de tension inverse est plus arrondi pour les diodes Zener de faible tension.

Les diodes optimales en termes d'arrondi de coude et de résistance dynamique ont des tensions Zener voisines de 6 à 7V.

### Schéma équivalent :

Pour simplifier les calculs, et comme pour la diode, on va définir un schéma équivalent approchant la réalité.

Si on utilise le composant suffisamment loin du coude, le schéma suivant (Figure 33) modélise bien le comportement d'une diode Zener :



**Figure 33**  
Caractéristique d'une diode Zener réelle et schéma équivalent.

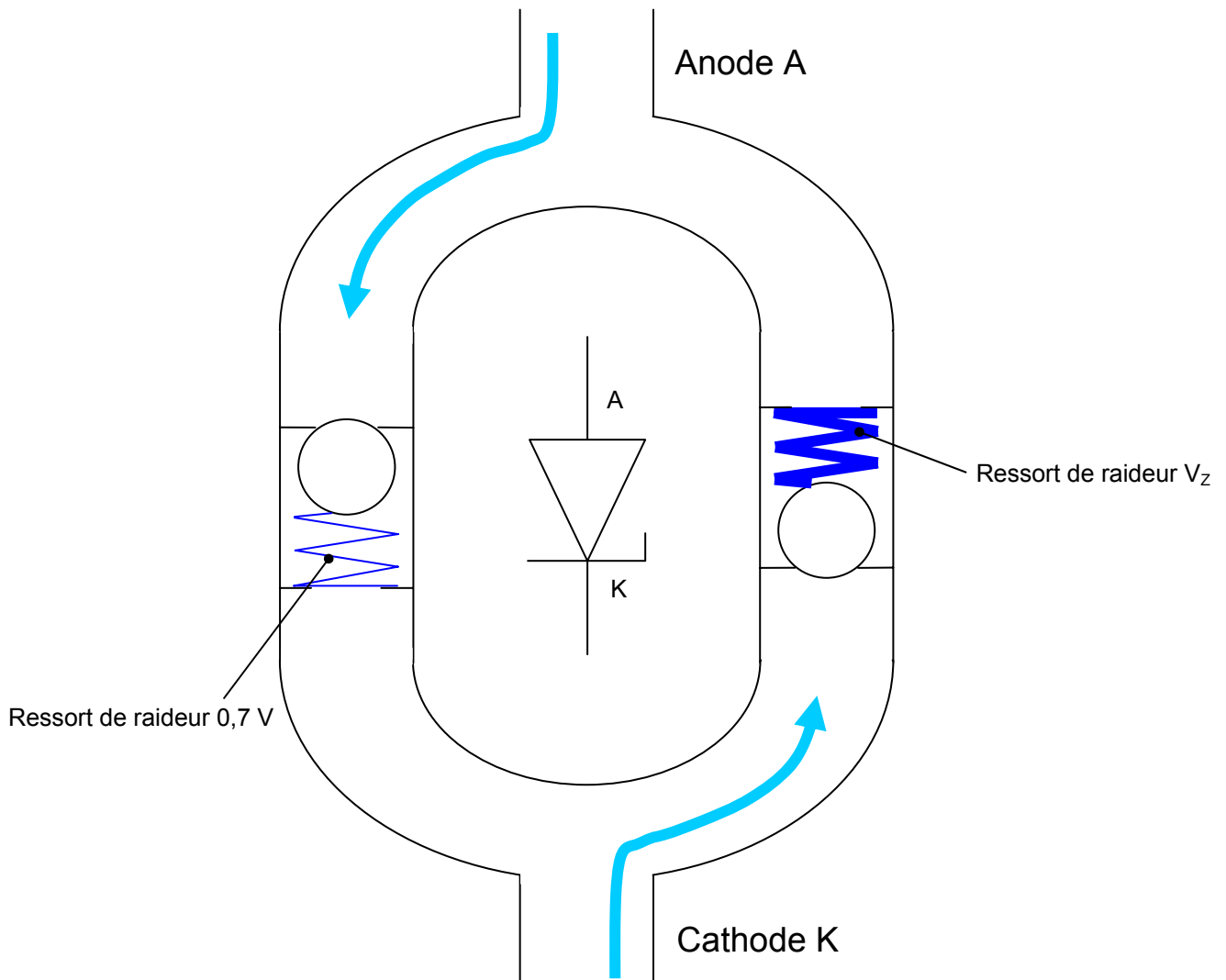
On définit une tension de coude  $V_{z0}$ , et une résistance interne constante  $R_z$ .

Ce schéma sera à utiliser avec beaucoup de prudence sur des Zeners de faible tension ( $< 5V$ ) : leur coude est très arrondi, et la résistance dynamique varie beaucoup avec le courant. Pour des tensions supérieures à 5V, il n'y aura en général pas de problèmes.

La puissance dissipée dans une diode Zener est la somme du produit  $V_Z \times i_z$  et du produit  $R_Z \times i_z$ . Si l'on utilise le modèle de la Figure 32, cette puissance vaut simplement :  $V_Z \times i_z$ .

Cette puissance est intégralement dissipée en chaleur, évidemment il ne faut pas franchir le seuil maximum correspondant à la destruction de la diode. Il faut donc que le courant traversant la diode Zener soit limité :  $i_z < I_{zmax}$ .

## Modèle hydraulique de la diode Zener

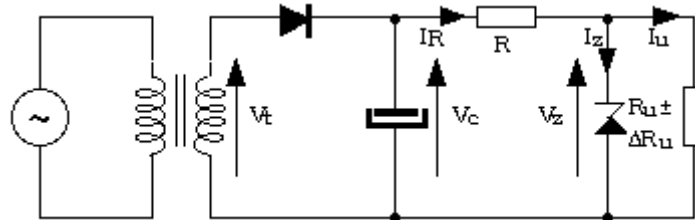


**Figure 34**  
Modèle hydraulique de la diode Zener

Le fluide peut passer dans les deux sens. Du haut vers le bas, le fluide peut passer par la branche de gauche ou il ne rencontrera qu'une « contre pression » de 0,7 V (diode ordinaire au silicium). Du bas vers le haut, le fluide ne peut passer que par la branche de droite. Il est soumis à une « contre pression » plus grande ( $2,4 \text{ V} < V_z < 270 \text{ V}$ ).

## Régulation de tension

De par leurs caractéristiques de générateur de tension, ces diodes sont idéales pour réguler des tensions continues ayant une ondulation résiduelle non négligeable (cas des tensions redressées filtrées).

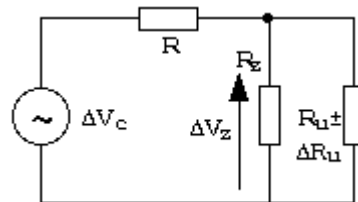


**Figure 35**  
Régulation de tension avec diode Zener.

Il est nécessaire d'intercaler une résistance (ou un générateur de courant) entre le générateur de tension filtrée et la Zener de régulation : ces deux éléments ayant des caractéristiques de générateurs de tension à faible résistance interne, on ne peut pas les brancher directement l'un sur l'autre sans les détruire.

Pour que la Zener fonctionne et assure son rôle de régulateur, il faut qu'un courant  $I_z$  non nul circule en permanence dans ce composant, et ce quelles que soient les variations de la tension d'entrée  $V_c$  et de la charge  $R_u$ .

La résistance  $R$  assure donc le rôle de polarisation de la Zener, et elle sera calculée pour que la condition énoncée ci-dessus soit remplie. Il faudra aussi veiller à ce que le courant  $I_z$  ne dépasse pas le courant  $I_{zm}$ , sous peine de détruire le régulateur.



**Figure 36**  
Schéma équivalent du régulateur

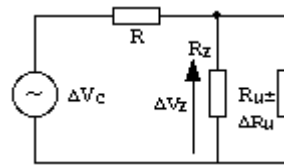
Lorsque la polarisation est correcte, on peut faire le schéma équivalent du montage. La tension d'entrée du régulateur a été scindée en une tension continue (la tension moyenne aux bornes du condensateur), et une tension alternative (l'ondulation).

On peut définir deux coefficients de stabilisation pour caractériser ce montage. En effet, il est loin d'être parfait, et la tension de sortie va varier lorsque la tension d'entrée et / ou la charge vont varier.

On distingue deux coefficients :

- Stabilisation amont : ce coefficient est représentatif de la sensibilité du montage aux variations de la tension non régulée, et ceci à charge constante . Si on utilise les notations de la Fig. 27, c'est le rapport  $(\Delta V_z / \Delta V_c)_{I_u = cte}$ .
- Stabilisation aval : ce coefficient est représentatif de la variation de la tension de sortie quand le courant dans la charge varie ( $R_u$  varie de  $\pm \Delta R_u$ ), et ceci à tension d'entrée constante. C'est le rapport  $(\Delta V_z / \Delta I_u)_{V_c = cte}$ , soit en fait, l'impédance de sortie du montage . Ce paramètre est très important dans tous les régulateurs de tension.

Il est plus simple pour calculer ces coefficients d'utiliser le schéma équivalent alternatif petits signaux. On retire alors toutes les sources de tension continues.



**Figure 37**

Schéma équivalent petits signaux.

Pour le coefficient de stabilisation amont, on a :

$$\frac{\Delta V_z}{\Delta V_c} = \frac{R_u // R_z}{R_u // R_z + R} [6]$$

Comme en général  $R_u \gg R_z$ , cette formule devient :

$$\frac{\Delta V_z}{\Delta V_c} \approx \frac{R_z}{R_z + R} [7]$$

On voit le dilemme : plus R est grand, plus la stabilisation amont est bonne, mais en contrepartie, quel gâchis ! Il faudrait prévoir des tensions filtrées très grandes par rapport aux tensions régulées pour avoir un bon coefficient de régulation. Cela ferait beaucoup d'énergie perdue dans R. Pour pallier cet inconvénient, on remplace R par un générateur de courant : la chute de tension à ses bornes pourra être petite, et par contre, sa résistance interne (celle qui va servir pour le calcul en remplacement de R) sera très grande : on a les deux avantages, une très bonne régulation et un bon rendement.

Le coefficient de stabilisation aval est égal à l'impédance de sortie du montage ; c'est la résistance du générateur de Thévenin équivalent, soit :

$$R_S = R // R_z [8]$$

R étant souvent très supérieur à  $R_z$ , on obtient :

$$R_S \approx R_z [9]$$

Dans ce cas, il n'y a pas grand chose à espérer d'un artifice quelconque pour améliorer cette valeur, sauf à rajouter d'autres composants actifs comme des transistors.

En général, on rajoute toutefois un condensateur en parallèle avec la Zener : son impédance vient diminuer celle du montage aux fréquences élevées. C'est avantageux si le montage alimenté a une consommation en courant avec des composantes à hautes fréquences. Ce condensateur diminue aussi le bruit interne de la Zener qui est assez important.

Ce type d'alimentation est appelé régulateur shunt, car le courant de régulation  $I_z$  est dérivé à la masse.

En pratique, ces régulateurs sont utilisés dans des montages simples nécessitant peu de puissance.

Exemple : Réaliser une alimentation stabilisée 12v - 30mA, à partir d'une source de tension constante 24v.

On choisit une diode Zener BZX 55 - C12, dont les caractéristiques techniques sont:  $V_z = 12v$ ,  $P_z = 500 \text{ mW}$ ,  $I_{z\text{maxi}} = 32 \text{ mA}$ . On suppose  $I_{z\text{mini}} = 0$  (diode parfaite).

1. Calculer la valeur de la résistance de protection (pour  $R \rightarrow \infty$  ).

$$R_p = \frac{24-12}{32 \cdot 10^{-3}} = 375 \Omega \text{ on choisira une valeur normalisée : } R_p = 390 \text{ W.}$$

2. Calculer, dans ces conditions, la puissance dissipée dans la résistance.

$$P = \frac{12^2}{390} = 0,37 \text{ W on prend: } P = 0,5 \text{ W.}$$

3. Quel est le courant que peut débiter l'alimentation?

$$I_z = 0 \Rightarrow I_r = \frac{24-12}{390} = 30,7 \text{ mA}$$

4. Quel est le courant maximal qui peut traverser  $R_p$ ?

$$R = 0 \Rightarrow I = \frac{24}{390} = 61,5 \text{ mA}$$

5. Calculer alors la puissance dissipée dans  $R_p$ .

$$P = \frac{24^2}{390} = 1,47 \text{ W on prend } 2\text{W}$$



## Diodes à avalanche contrôlée

Les diodes de redressement standard ne sont pas garanties pour fonctionner au delà de la tension  $V_R$  spécifiée. Si on utilise des diodes standard dans des milieux parasités, il se peut qu'on dépasse momentanément la tension inverse maxi et qu'on détruise la diode.

Certaines applications ont besoin de diodes qui ne soient pas détruites par une entrée en avalanche.

## Caractéristiques physiques

Les diodes à avalanche contrôlées sont fabriquées dans du silicium de meilleure qualité que les diodes standard : meilleure homogénéité du cristal, traitement de surface poussé limitant les courants de fuite. La résistivité du silicium est ainsi plus homogène, et lorsque le phénomène d'avalanche se produit, c'est dans tout le volume du cristal qui peut alors supporter des puissances très élevées pendant quelques dizaines de microsecondes.

Ces diodes sont sévèrement triées en fin de fabrication pour détecter les défauts éventuels.

On spécifie en plus des  $I_R$  et  $V_R$  standards une tension inverse maxi pour un courant inverse donné.

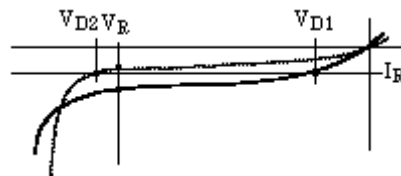
## Protection contre les surtensions

Une des applications est l'utilisation dans des milieux parasités : des surtensions brèves (quelques  $\mu s$ ) d'une amplitude très supérieure à la tension  $V_R$  de la diode peuvent apparaître : la diode va fonctionner en avalanche, et limiter la surtension parasite. Ce phénomène ne sera pas destructif car la diode est conçue pour fonctionner en avalanche sans être détruite.

## Mise en série de diodes

Lorsqu'on veut bloquer des fortes tensions sans faire appel à des diodes spéciales haute tension (chères et difficiles à se procurer), on peut mettre en série plusieurs diodes dont la somme des  $V_R$  sera supérieure à la tension à bloquer.

Si on met en série des diodes ordinaires, les tensions ne vont pas se répartir de façon égale pour toutes les diodes comme le montre la Figure 38.



**Figure 38**

Caractéristiques de deux diodes.

Si on met les deux diodes de cet exemple en série, sans autres composants en parallèle, le courant de fuite sera le même pour les deux diodes, et tel que  $V_{D1} + V_{D2} = U$ , tension totale à bloquer ;  $V_{D1}$  et  $V_{D2}$  sont les tensions aux bornes des diodes D1 et D2 pour le courant de fuite commun  $I_R$ .

La diode D1 qui fuit plus que l'autre à tension donnée va imposer un courant  $I_R$  entraînant une tension aux bornes de D2 supérieure à la tension de claquage  $V_R$  : D2 va être détruite par avalanche.

Dans le cas général où on met plusieurs diodes en série, la rupture de la première entraîne la destruction en chaîne de toutes les autres diodes.

La solution est dans les diodes à avalanche contrôlée : les courants de fuite (hors porteurs minoritaires) sont très réduits par construction, et une ou plusieurs diodes peuvent rentrer en avalanche sans problèmes. Le courant de fuite étant faible, la puissance dissipée restera dans les limites admissibles par le composant.

## **Diodes de redressement rapides**

### **Notions de charge recouvrée**

Nous avons déjà mentionné le phénomène de diffusion au travers de la jonction PN : les électrons majoritaires de la zone N franchissent la jonction et tendent à neutraliser les trous de la zone P et vice versa.

Quand la jonction est polarisée en direct, le champ électrique externe s'oppose au champ électrique interne créé par les ions dépossédés de leur électron (zone N) ou trou (zone P) libres, et permet ainsi une plus grande diffusion des porteurs majoritaires dans la région de type opposé où ils deviennent minoritaires. Ils se recombinaison alors avec une charge de signe opposé.

Ce phénomène de recombinaison n'est pas instantané : les porteurs ont une durée de vie  $\delta t$  égale à environ 1ms dans le silicium. Il existe donc dans le cristal des charges en excès de part et d'autre de la jonction, à la manière de charges présentes sur les armatures d'un condensateur.

On associe d'ailleurs à cette charge, appelée charge stockée, une capacité appelée capacité de diffusion.

Si on inverse brusquement la polarité aux bornes de la diode pour la bloquer, ces porteurs vont se comporter de la même manière que les porteurs minoritaires en régime inverse établi : ils vont être attirés de l'autre côté de la jonction par le champ électrique externe et vont former un courant intense qui va s'ajouter au courant de fuite  $I_s$ , jusqu'à ce que la charge stockée disparaisse.

Ce courant va décroître jusqu'à devenir nul pendant un temps  $t_{RR}$  appelé temps de recouvrement inverse.

La charge stockée est d'autant plus importante que le dopage est important. Le dopage intervenant directement dans la conductivité du cristal, il se pose le problème pour les diodes de puissance qui nécessitent une conductivité, et donc un dopage importants.

Pour diminuer la charge stockée dans ces composants, on utilise des pièges recombinants, qui sont souvent des atomes d'or. Ils diminuent la durée de vie des porteurs, ce qui induit une charge stockée plus faible.

### **Utilisation**

Ces diodes sont utilisées en électronique de puissance partout où l'on doit commuter très rapidement des courants importants. Elles sont le complément indispensable des transistors de puissance rapides.

Des diodes standard sont inutilisables dans ces cas là car elles sont trop lentes. Lors de la commutation des transistors, elles se comporteraient comme des courts circuits (pendant le temps de recouvrement inverse), ce qui entraînerait des surcourants dans les transistors, et leur destruction plus ou moins rapide.

## Diodes de signal

Les diodes précédemment étudiées font intervenir des courants et tensions non négligeables. Les diodes de signal sont utilisées dans des applications à bas niveaux de courants et tensions.

Caractéristiques électriques :

- courant direct : 75 à 500 mA ;
- tension de claquage inverse : 10 à 300 V ;
- temps de recouvrement : 2 à 2 000 ns.

## Caractéristiques physiques

Les diodes de signal n'ont pas besoin de tenir des fortes tensions inverses : par construction, elles pourront avoir une capacité parasite faible, et donc fonctionner à des fréquences élevées.

Ces caractéristiques sont obtenues grâce à une surface de jonction réduite et un faible dopage (diminution des charges stockées).

## Détecteur de crête

Ce dispositif permet de mémoriser la valeur crête d'un signal. Il est très utilisé en instrumentation. C'est, en fait, un redresseur simple alternance avec filtrage dont la charge est quasi nulle (aux courants de fuite près) : la constante de temps de décharge du condensateur est théoriquement infinie, (très grande en pratique).

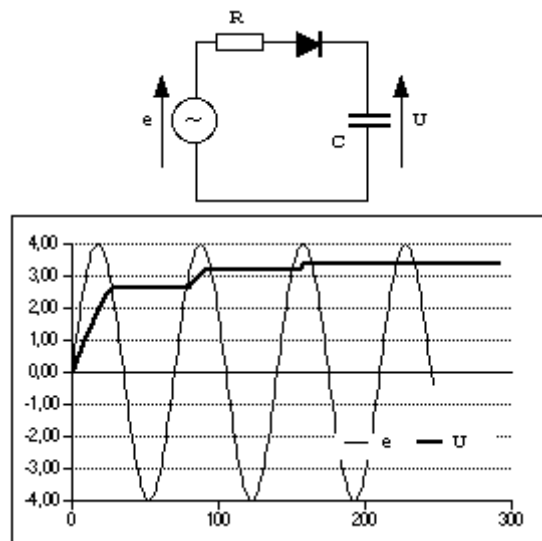
Il se charge donc à la valeur crête (moins la tension de seuil de la diode) et reste chargé à cette valeur.

La résistance R sert à limiter le courant de charge du condensateur à une valeur raisonnable pour le générateur d'attaque.

Lorsque la tension  $e$  est supérieure à la tension aux bornes du condensateur  $U$  plus la tension de seuil de la diode, celle-ci conduit et charge le condensateur à travers la résistance R.

A noter que tel quel, ce montage est inexploitable pour des petits signaux : la tension mémorisée par la diode et le condensateur est inférieure à la valeur crête du signal d'entrée de la tension de seuil de la diode.

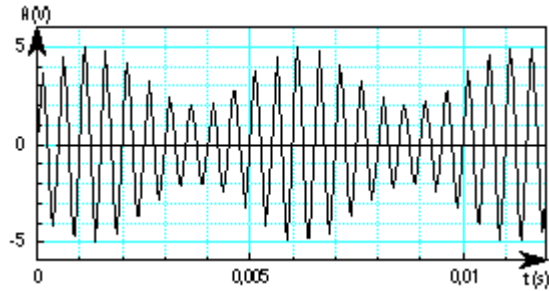
Il existe une version améliorée avec amplificateur opérationnel qui pallie cet inconvénient. Il faut aussi adjoindre à ce montage un système permettant de décharger le condensateur pour faire une nouvelle mesure.



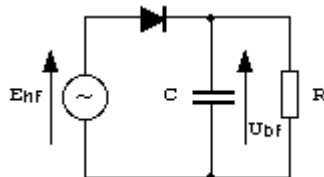
**Figure 39**  
Détecteur de crête.

## Détection AM

En radio diffusion, on ne peut pas émettre correctement un signal audible (20Hz-20kHz) directement sous forme d'une onde radio-électrique : il faut passer par un signal haute fréquence qui, lui, se propage (Figure 40).

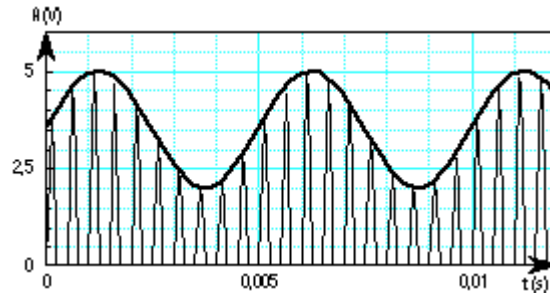


**Figure 40**  
Signal HF modulé en amplitude.



**Figure 41**  
Détecteur grandes ondes .

Le signal haute fréquence (quelques centaines de kHz), qu'on appelle la porteuse, est modulé en amplitude par le signal audio (basse fréquence) à émettre. A l'arrivée (dans le poste à transistors), on doit séparer les deux signaux. On le fait très simplement avec une diode et un condensateur (Figure 41).



**Figure 42**  
Signal démodulé.

Sans la résistance R, on aurait un détecteur de crête comme précédemment. On détermine cette résistance de manière à ce que la constante de temps RC soit petite devant la période de la porteuse, et grande devant la période du signal à émettre : on arrive ainsi à reconstituer le signal basse fréquence (BF) : c'est la courbe en gras de la Figure 42.

## Écrêtage des surtensions

De par leurs caractéristiques, les diodes Zener sont idéales pour écrêter des surtension (commutation de selfs ou autres) et sont donc toutes indiquées pour la protection d'autre semi-conducteurs sensibles à ces surtensions.

Certains composants comme les « transils » ont des caractéristiques similaires aux diodes Zener, mais peuvent supporter des puissances crête considérables pendant de courts instants. Ils sont utilisés pour protéger les installations coûteuse contre la foudre et les parasites d'équipements industriels (gros moteurs, relais de puissance, commutateurs statiques).

Thermomètres. Compensation thermique

C'est une utilisation importante des diodes. La tension directe des jonctions PN en silicium est affectée d'un coefficient de température négatif (environ  $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ ).

Certains montages à transistors nécessitent une dérive minimum en température. On peut arriver à compenser cette dérive à l'aide d'une diode couplée thermiquement au transistor et placée judicieusement dans son circuit de base (voir chapitre sur les transistors).

Cette dérive en température peut aussi être utilisée comme thermomètre sur un montage. Lorsque la diode détecte des températures trop élevées, elle peut commander un circuit qui va (par exemple) couper certaines fonctions du montage (autoprotection). Cette fonction est très utilisée dans les composants intégrés.

## Diodes électroluminescentes

### Caractéristique

Ces diodes spécifiques à base d'arséniure de gallium ont la propriété d'émettre de la lumière dans une bande de fréquence déterminée par les caractéristiques du matériau employé quand elles sont traversées par un courant direct.

Il en existe de diverses couleurs (jaune, orangé, rose, rouge, vert, infrarouges).

On les utilise avec un courant direct d'environ 10 à 20 mA.

La tension de coude de ces composants est plus élevée que celle des diodes ordinaires, et elle dépend de la couleur. Cette tension est comprise entre 1,2 et 3,8 V environ.

### Utilisation

On les rencontre partout où on a besoin de témoins lumineux, et de plus en plus, associées en matrices pour remplacer des grosses lampes (feux tricolores de circulation par exemple), ou pour faire des panneaux d'affichage électroniques (heure, température, publicités diverses ).

Les diodes à infrarouges servent beaucoup dans les télécommandes d'appareils TV / HIFI. On les utilise alors avec des forts courants pulsés.

Des diodes émettant une couleur assez proche du blanc ont fait leur apparition, elles possèdent un excellent rendement et leur durée de vie est considérablement plus élevée que celle des ampoules à incandescence. Malgré cela, la lumière « froide » qu'elles émettent n'en fait pas de redoutables concurrents des ampoules à incandescence.

## Autres diodes

Il existe encore beaucoup d'autres variétés de diodes. Citons entre autres :

Les **diodes Schottky**, à jonction métal / semi-conducteur : cette jonction hétérogène est caractérisée par l'absence de stockage des charges, elle est donc très rapide. Elle est très utilisée dans les circuits logiques rapides (TTL Schottky).

Les **diodes varicap** : on utilise la variation de la capacité de jonction avec la polarisation inverse dans des oscillateurs ou des circuits d'accord. On fait alors facilement varier la tension d'oscillation ou d'accord en modifiant la tension de polarisation.

Caractéristiques électriques :













- tension : 12 à 32 V ;
- courant : 10 à 200 mA ;
- capacité variable : 8 à 600 pF.

Les **diodes stabistor** : elles ont un fonctionnement et une utilisation semblable à celles des diodes Zener pour les très faibles tensions. Elles servent aussi à la polarisation des étages de sortie des amplificateurs en classe B.

Caractéristiques électriques :

- tension directe à 1 mA : 0,55 à 1,75 V ;
- courant direct : 0,2 à 2 A ;
- tension inverse : 5 à 40 V.

## Les symboles des différentes diodes

-  symbole de la diode classique
-  symbole, actuellement en vigueur, de la diode Zener
-  ancien symbole de la diode Zener
-  symbole de la diode Zener non normalisé, mais tout de même employé (cette diode est également appelée diode à effet de claquage)
-  Stabistor (sorte de diode Zener faible tension)
-  Diode Zener programmable
-  Double diode Zener (deux diodes Zener mises tête bêche)
-  Diode Schottky
-  Diode varicap (diode = condensateur variable)
-  Diode électro-luminescente ou DEL (L.E.D. en anglo saxon)
-  Pour une diode infrarouge réceptrice, les flèches sont inversées
-  Diode à effet tunnel

## Exercices

1. Une diode est utilisée dans le montage ci-dessous :

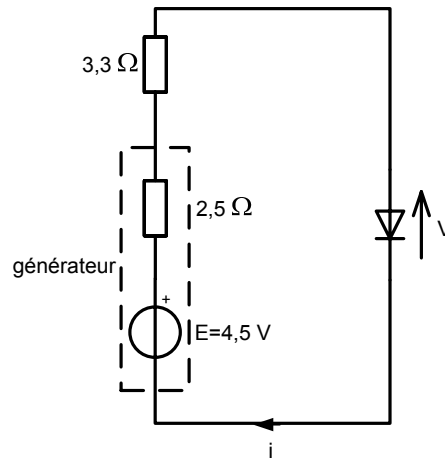


Figure 43

Des relevés effectués sur cette diode branchée en direct sont donnés dans le tableau ci-dessus :

v (V)	0	0,6	0,7	0,8	0,85	0,9	0,95	1
i (mA)	0	0	10	40	75	150	500	1000

- 1.1. Tracer la caractéristique directe tension-courant de la diode; échelle recommandées : 1 cm pour 0,1 V et 1 cm pour 100 mA.
- 1.2. Donner la tension de seuil  $V_0$  de la diode idéale équivalente à la diode étudiée et calculer sa résistance dynamique  $R_d$ . En déduire le modèle électrique (ou schéma équivalent) de la diode.
- 1.3. Calculer les coordonnées du point de fonctionnement et tracer la droite de charge pour vérifier graphiquement les résultats.
- 1.4. Le générateur précédent est remplacé par un générateur de résistance interne négligeable délivrant le signal  $e(t)$  représenté Figure 44.

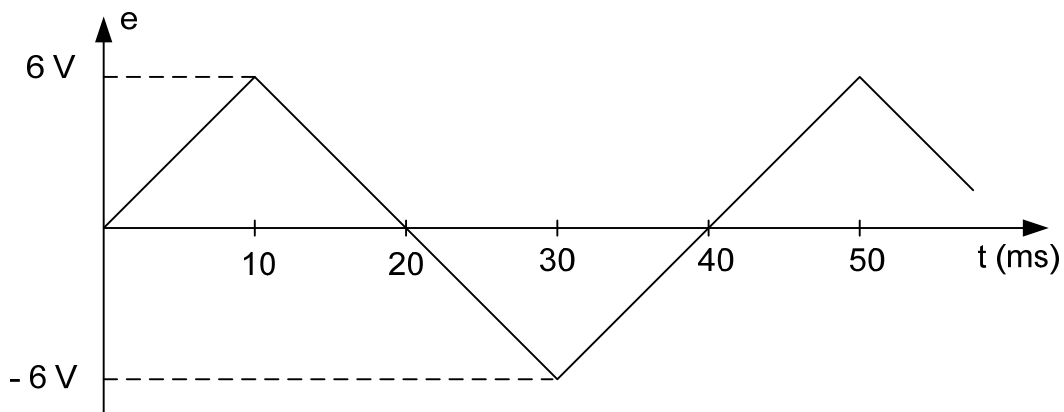


Figure 44

Tracer le chronogramme  $u(t)$  de la tension aux bornes de la résistance R en utilisant le modèle n°2 de la diode.



2. Le dispositif de la Figure 45 comprend quatre diodes, supposées idéales, deux interrupteurs A et B, deux ampoules X et Y, et une source idéale de tension alternative. On admettra que si une diode court-circuite une ampoule, celle-ci est éteinte, plus aucun courant électrique ne traversant le filament.

Etablir la table de vérité décrivant le fonctionnement du circuit. 1 représente un interrupteur fermé, 0 ouvert.

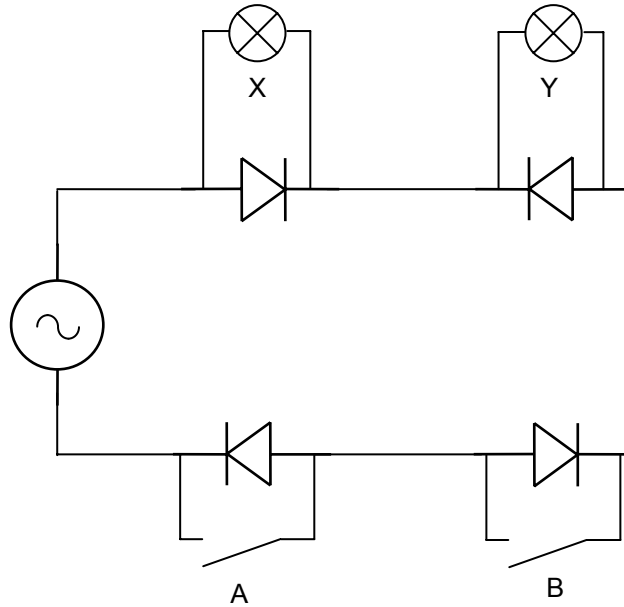


Figure 45

A	B	X	Y
0	0		
0	1		
1	0		
1	1		

3. Tracer l'onde de courant qui traverse la résistance de  $1\text{ k}\Omega$  dans le circuit de la Figure 46 en synchronisme avec l'onde de tension.

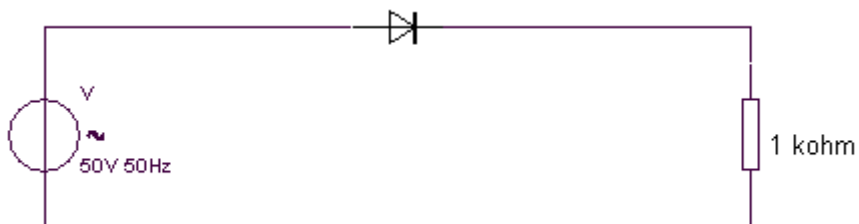


Figure 46

4. On considère le montage de la Figure 47 dans lequel les diodes ont pour caractéristique la courbe  $I_D = f(V_D)$  de la figure 2.

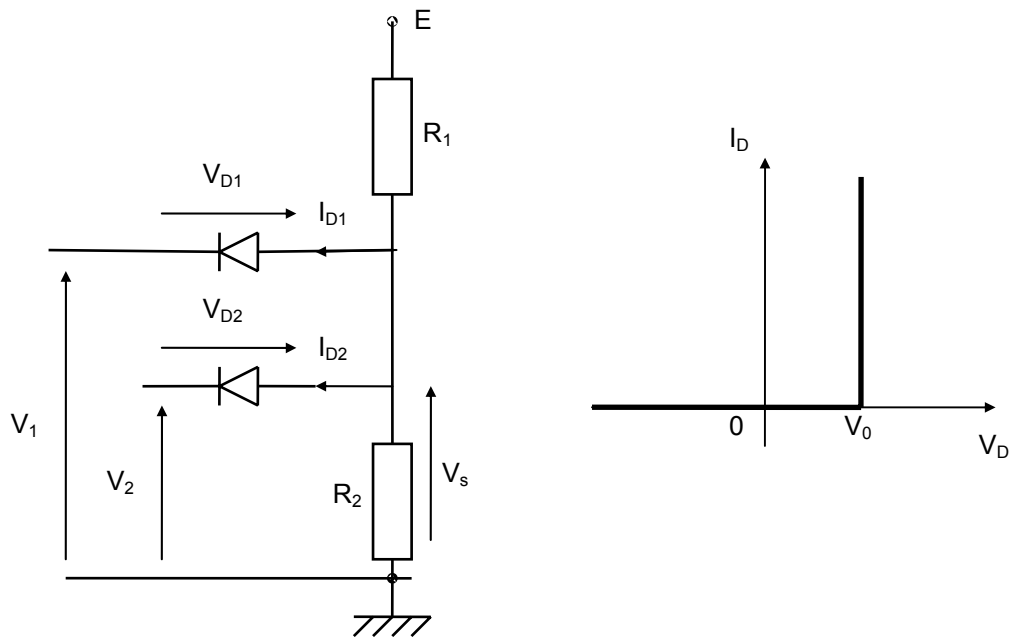


Figure 47

On donne  $E = 5V$ ,  $R_1 = 10k\Omega$ ,  $R_2 = 100k\Omega$  et  $V_0 = 0,7V$ .

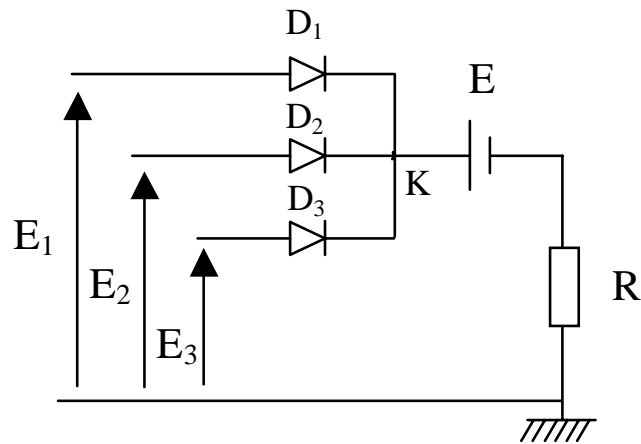
$V_1$  et  $V_2$  sont des tensions égales à  $0V$  ou  $5V$ .

Déterminer l'état des diodes et calculer les valeurs des tensions  $V_{D1}$ ,  $V_{D2}$ ,  $V_s$  dans chacun des cas suivants:

- a)  $V_1 = 0V$  et  $V_2 = 0V$
- b)  $V_1 = 5V$  et  $V_2 = 0V$
- c)  $V_1 = 0V$  et  $V_2 = 5V$
- d)  $V_1 = 5V$  et  $V_2 = 5V$

En supposant que l'on attribue le niveau logique 0 à des tensions comprises entre  $0V$  et  $0,8V$  et le niveau logique 1 à des tensions comprises entre  $3V$  et  $5V$ , donner la table de vérité de ce montage. Quelle est la fonction logique réalisée ?

5. Dans le montage de la Figure 48, les diodes sont supposées parfaites (tension de seuil et résistance dynamique négligeables).



**Figure 48**

$E_1=30\text{ V}$        $E_2=10\text{ V}$        $E_3=15\text{ V}$        $E=10\text{ V}$        $R=20\ \Omega$

- 5.1. Montrer qu'une seule des trois diodes est passante et préciser laquelle est passante.
- 5.2. Déterminer l'intensité dans la résistance  $R$  ainsi que les tensions  $U_{D1}$ ,  $U_{D2}$  et  $U_{D3}$  aux bornes des diodes.
- 5.3. Quelle sera la d.d.p. aux bornes de  $R$  et le courant qui la traverse ?

6. Dans le montage de la Figure 49 dans lequel les diodes sont supposées parfaites et les générateurs idéaux.

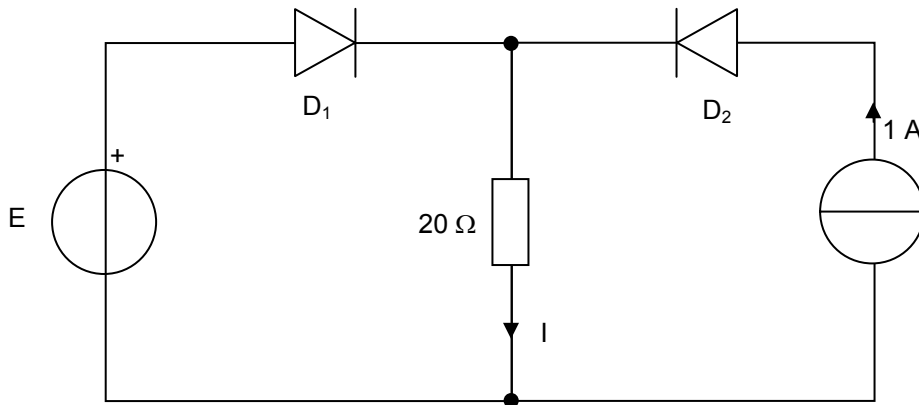


Figure 49

- 6.1. Quel est l'état de la diode  $D_2$ . Justifier.  
 6.2. Calculer l'intensité  $i$  dans les 2 cas suivants :
- $E = 10 \text{ V}$
  - $E = 30 \text{ V}$

7. On considère le montage de la Figure 50 dans lequel la diode  $D$  a une tension de seuil nulle et une résistance dynamique négligeable.

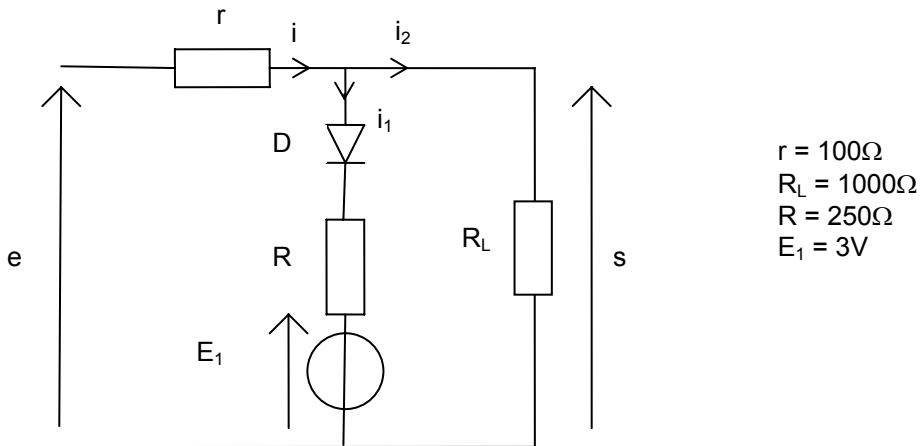


Figure 50

- 7.1. On considère la diode  $D$  bloquée.  
 7.1.1. Donner le schéma équivalent au montage.  
 7.1.2. Déterminer une relation entre  $e$ ,  $s$ ,  $r$  et  $R_L$  puis donner l'expression numérique de  $s$  en fonction de  $e$  (en remplaçant  $r$  et  $R_L$  par leurs valeurs numériques).  
 7.2. On considère la diode  $D$  passante.  
 7.2.1. Donner le schéma équivalent au montage.  
 7.2.2. Déterminer une relation entre  $e$ ,  $s$ ,  $r$ ,  $R_L$ ,  $R$  et  $E_1$  puis donner l'expression numérique de  $s$  en fonction de  $e$ .  
 7.3. Représenter la courbe  $s = f(e)$  pour  $-10\text{V} \leq e \leq +10\text{V}$  en indiquant les coordonnées des points remarquables (pour les valeurs extrêmes de  $e$  et pour le point de cassure de la courbe). Justifier l'allure de la courbe.

8. Soit le circuit à diode de la Figure 51. Calculer le courant  $I$  avec les trois approximations de la diode ('court-circuit', 'source de tension', 'source de tension et résistance'). On utilisera successivement les trois modèles de la diode avec considérer  $V_{AK} = 0.7V$  et  $R = 1\Omega$ .

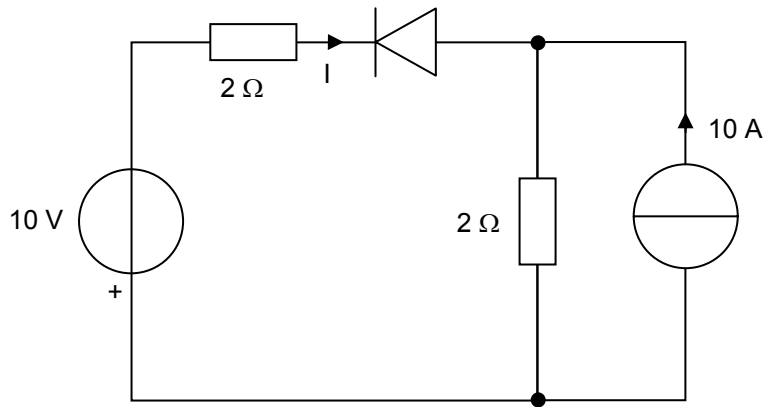


Figure 51

9. Le schéma de la Figure 52 représente un chargeur de batterie :

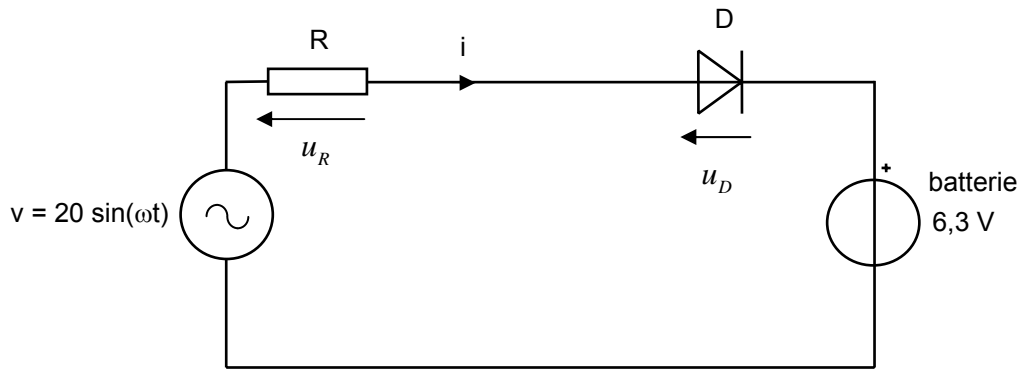


Figure 52

La tension délivrée par le générateur est:  $v = 20 \sin(\omega t)$ . La diode D est supposée idéale. La tension de la batterie, considérée comme constante, a pour valeur 6,3 V. La résistance R limite le courant i dans le circuit.

- 9.1. Représenter en fonction du temps les variations de  $v$ ,  $i$  et  $u_D$ .
- 9.2. Quelle valeur faut-il donner à R pour limiter à 5 A le courant de crête qui traverse la diode?
- 9.3. Dans ce montage, quelle est la tension inverse maximum aux bornes de la diode?
- 9.4. Calculer les valeurs de  $\omega t$  qui correspondent à un changement dans le comportement de la diode.
- 9.5. Établir l'expression du courant instantané, la résistance R ayant la valeur trouvée précédemment.
- 9.6. Calculer la valeur moyenne du courant fourni à la batterie.
- 9.7. Calculer:

- \* la puissance cédée à la batterie,
- \* la puissance dissipée dans la résistance R,
- \* la puissance fournie par le générateur.

10. La Figure 53 représente un chargeur de batterie :

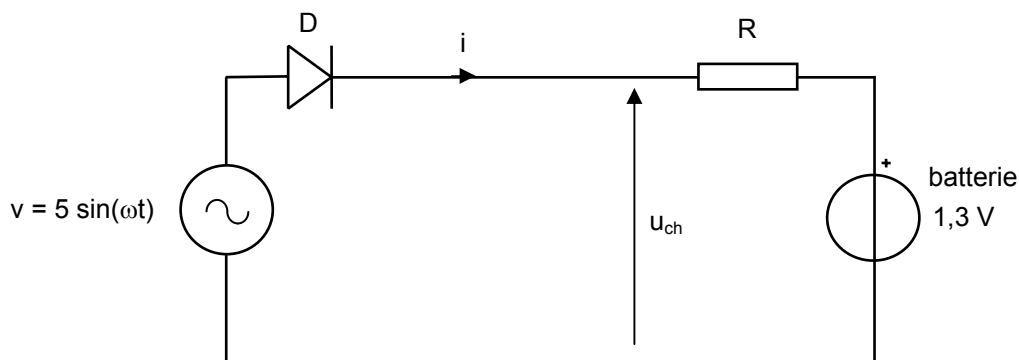


Figure 53

La tension délivrée par le générateur est :  $v = 5 \sin(\omega t)$ . La diode est en silicium, le "modèle n°2" sera utilisé.

La tension de la batterie, considérée comme constante, a pour valeur 1,3 V. La résistance R limite le courant i dans le circuit.

- 10.1. Quelle valeur faut-il donner à R pour limiter à 3 A le courant de crête qui traverse la diode ?
- 10.2. Dans ce montage, quelle est la tension inverse maximum aux bornes de la diode ?
- 10.3. Représenter l'évolution des grandeurs  $i$  et  $u_{ch}$  en fonction du temps. R possède la valeur trouvée à la question 10.1, aussi l'intensité maximum est de 3 A.

11. On considère la Figure 54 dans laquelle les diodes sont supposées parfaites. Le pont est alimenté par une tension alternative sinusoïdale :  $u(t) = 48 \cdot \sin(\omega t)$

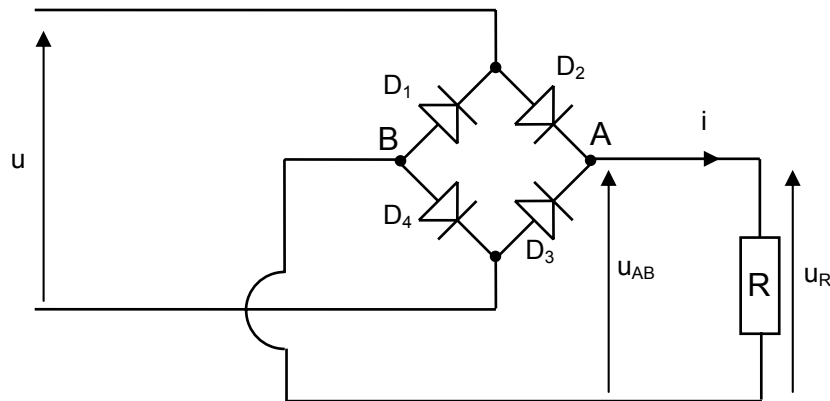


Figure 54

- 11.1.1. Représenter en concordance de temps sur une période les tensions  $u(t)$  et  $u_R(t)$  (tension aux bornes de R). Pour chaque demi-période, indiquer quelles sont les diodes passantes et les diodes bloquantes. Quel est l'intérêt de ce montage en pont ?
- 11.1.2. L'intensité maximale supportable par chaque diode est 6 A. Calculer la valeur minimale de la résistance R permettant d'assurer la protection des diodes.
- 11.1.3. Calculer la valeur moyenne  $I_{moy}$  de  $i(t)$ , si R a la valeur minimale déterminée au 10.1.2.

- 11.2. On utilise le montage précédent pour charger une batterie de f.c.é.m.  $E = 24 \text{ V}$  ; placée en série avec R (Figure 55).

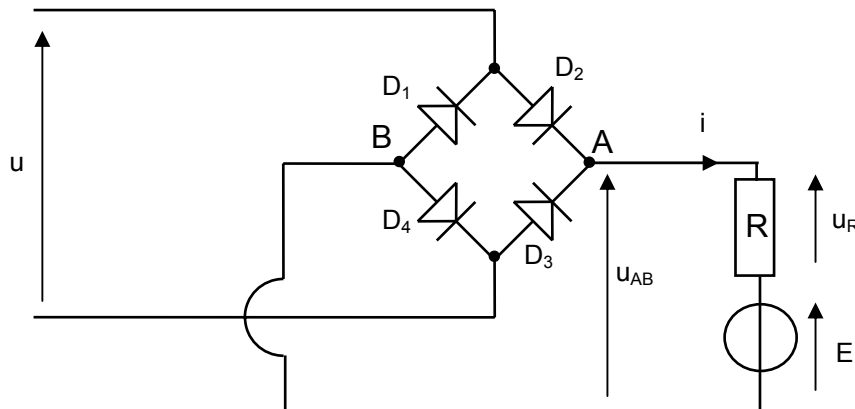


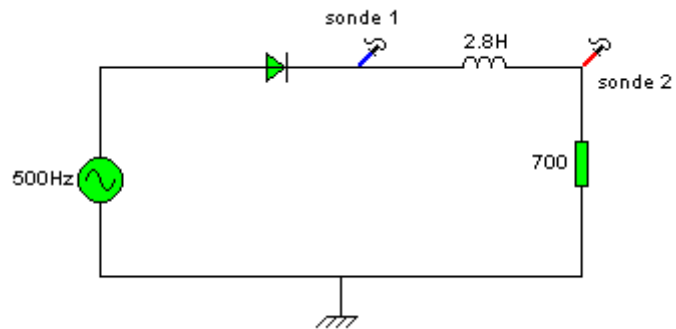
Figure 55

- 11.2.1. A quelle condition (portant sur  $u_{AB}$ ) le courant traversant la batterie est-il non nul ? Représenter en concordance de temps sur une période les tensions  $u(t)$ ,  $u_{AB}(t)$  et  $u_R(t)$  en justifiant.
- 11.2.2. Montrer que la protection des diodes est assurée en gardant la résistance dont la valeur a été calculée au 11.1.2.
- 11.2.3. Entre les instants 0 et  $T/2$ , exprimer en fonction de T les dates  $t_0$  et  $t'_0$  de début et de fin de conduction.
- 11.2.4. Donner l'expression de  $i(t)$  pour  $t_0 \leq t \leq t'_0$ .
- 11.2.5. Calculer la valeur moyenne  $I_{moy}$  de  $i(t)$

Solution :

1)  $I_{R\text{moyen}}=3.82\text{A}$  ; 2)c)  $t_0=\frac{T}{12}$  ,  $t'_0=\frac{5T}{12}$  ; d)  $i=6\sin(\omega t)-3$  ; e)  $i_{\text{moyen}}=1.31\text{A}$

12. Dans le schéma de la Figure 56, on demande d'esquisser le tracé des tensions données par les sondes figurant sur le schéma. Il n'est pas demandé de poser et encore moins de résoudre l'équation différentielle permettant de donner la forme d'onde exacte des tensions demandées. Quelle sonde donne la tension aux bornes du récepteur RL et quelle sonde donne l'image du courant qui traverse le dipôle RL ?

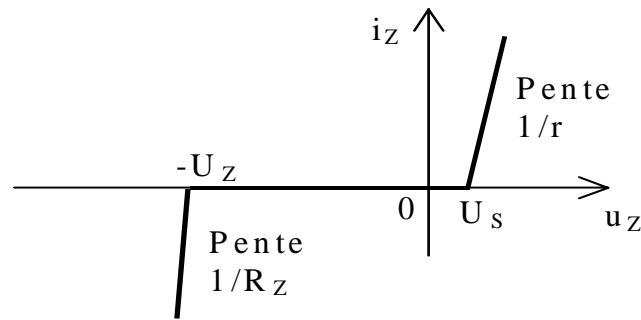


**Figure 56**



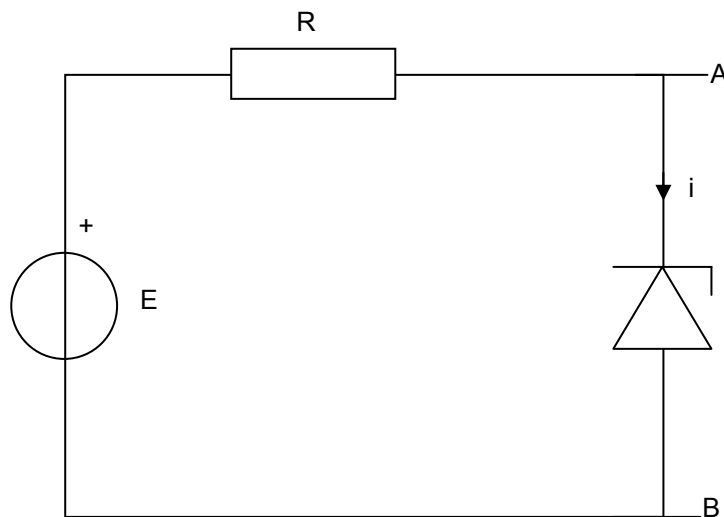
### 13. Etude d'une diode Zener

On considère la caractéristique  $i(u)$  d'une diode Zener à la Figure 57 :



**Figure 57**

La diode Zener est incluse dans le montage de la Figure 58 :



**Figure 58**

Où,  $E = 12 \text{ V}$ ;  $R_Z = 10 \Omega$ ;  $U_Z = 7,5 \text{ V}$ .

- 13.1. Calculer  $R$  pour que l'intensité  $i$  circulant dans la Zener soit égale à  $5 \text{ mA}$ .
- 13.2. Exprimer, en fonction de  $E$ ,  $R$ ,  $U_Z$  et  $R_Z$ , les 2 éléments  $E_{Th}$  et  $R_{Th}$  du générateur de Thévenin équivalent compris entre  $A$  et  $B$ .
- 13.3. Exprimer, en fonction de  $R$  et  $R_Z$ , la quantité  $dE_{Th}/dE$ . De combien varie  $E_{Th}$  lorsque  $E$  varie de  $2 \text{ V}$ ? Utilité de la diode Zener.

On connecte aux bornes  $A$  et  $B$  du circuit précédent une résistance  $X$ .

- 13.4. Calculer en fonction de  $E$ ,  $U_Z$ ,  $R$ ,  $R_Z$  et  $X$  le courant circulant dans cette résistance (A.N. pour  $X = 2000 \Omega$ ).
- 13.5. Calculer la valeur limite  $X_m$  de  $X$  en dessous de laquelle la diode Zener ne joue plus son rôle.

14. La diode Zener utilisée dans le circuit représenté Figure 59 est supposée idéale; sa tension de Zener est de 5 V.

14.1. La tension  $V_{AB}$  étant de 8 V, calculer :

14.1.1. le courant dans la diode Zener ;

14.1.2. la puissance dissipée dans la diode Zener.

14.2. On branche une résistance variable  $R_C$  entre C et D.

14.2.1. La résistance ayant pour valeur  $1\text{ k}\Omega$  et la tension  $V_{AB}$  étant de 8 V, calculer l'intensité des courants dans la résistance  $R = 200\ \Omega$  et dans la diode Zener.

14.2.2. La tension  $V_{AB}$  étant de 8 V, quelle valeur minimale peut-on donner à la résistance  $R_C$  pour que la diode Zener stabilise la tension  $V_{CD}$  ?

14.2.3. La résistance  $R_C$  ayant pour valeur  $1\text{ k}\Omega$ , quelle valeur minimale peut-on donner à la tension  $V_{AB}$  pour que la diode Zener stabilise la tension  $V_{CD}$  ?

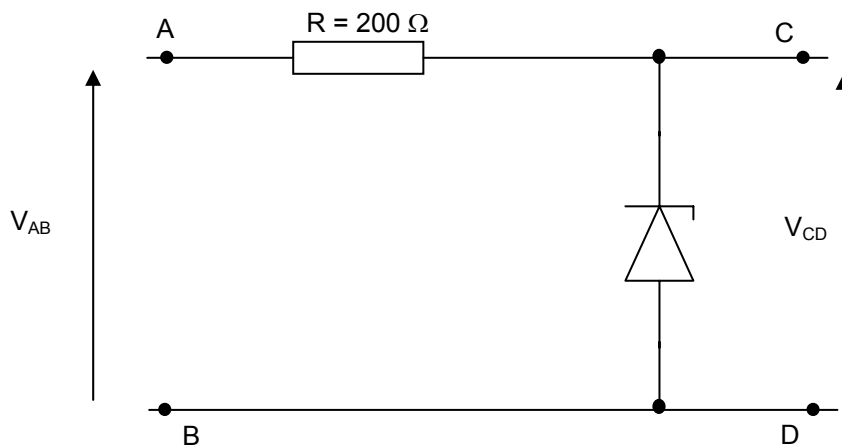


Figure 59

15. Dans le montage de la Figure 60, la diode Zener est supposée parfaite. Sa tension Zener  $U_Z$  est égale à 6,2V et sa puissance maximale est de 1,3W.

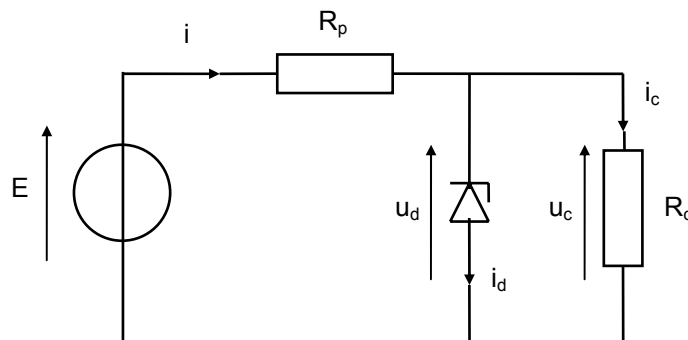


Figure 60

15.1. Déterminer le courant maximal qui peut traverser la diode.

15.2. On fixe  $R_c = R_p = 100\ \Omega$ . Entre quelles limites peut varier E pour qu'il y ait stabilisation de la tension  $u_c$  ?

On fixe  $E = 24\text{V}$  et  $R_p = 100\ \Omega$ . Entre quelles limites peut varier  $R_c$  pour qu'il y ait stabilisation de la tension  $u_c$  ?

Solution :

1)  $i_{d_{\max}} = 0.21\text{A}$  ; 2) Stabilisation si  $12.4\text{V} \leq E \leq 33.4\text{V}$  ; 3)  $R_c > 34.8\ \Omega$

## Solutions

1.1 On obtient la courbe ci-dessous :

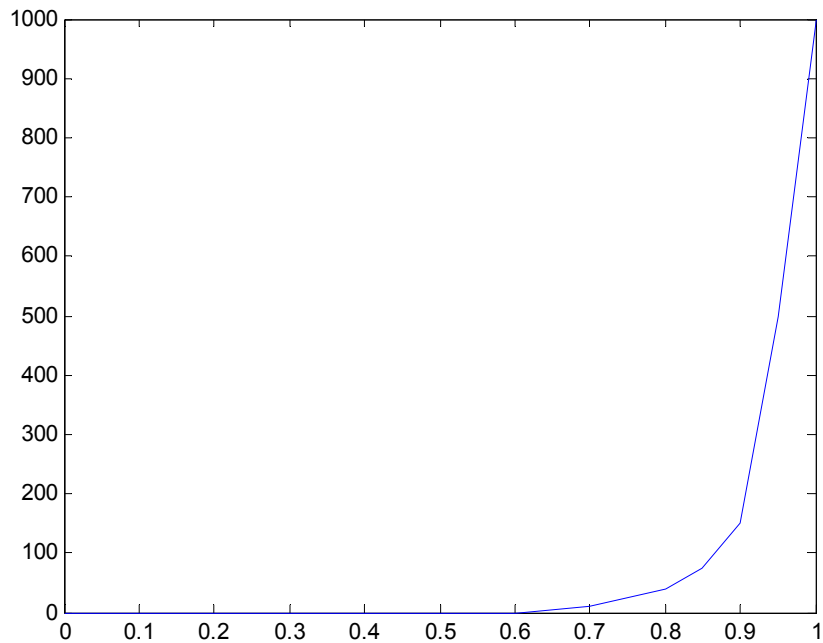


Figure 61

1.2 On trace les deux segments de droite (en pointillé) afin de "linéariser" la caractéristique électrique de la diode. La jonction des deux segments au point  $V_0 = 0,9$  V et  $i = 0$  A donne l'information demandée, à savoir la tension de seuil de la diode.

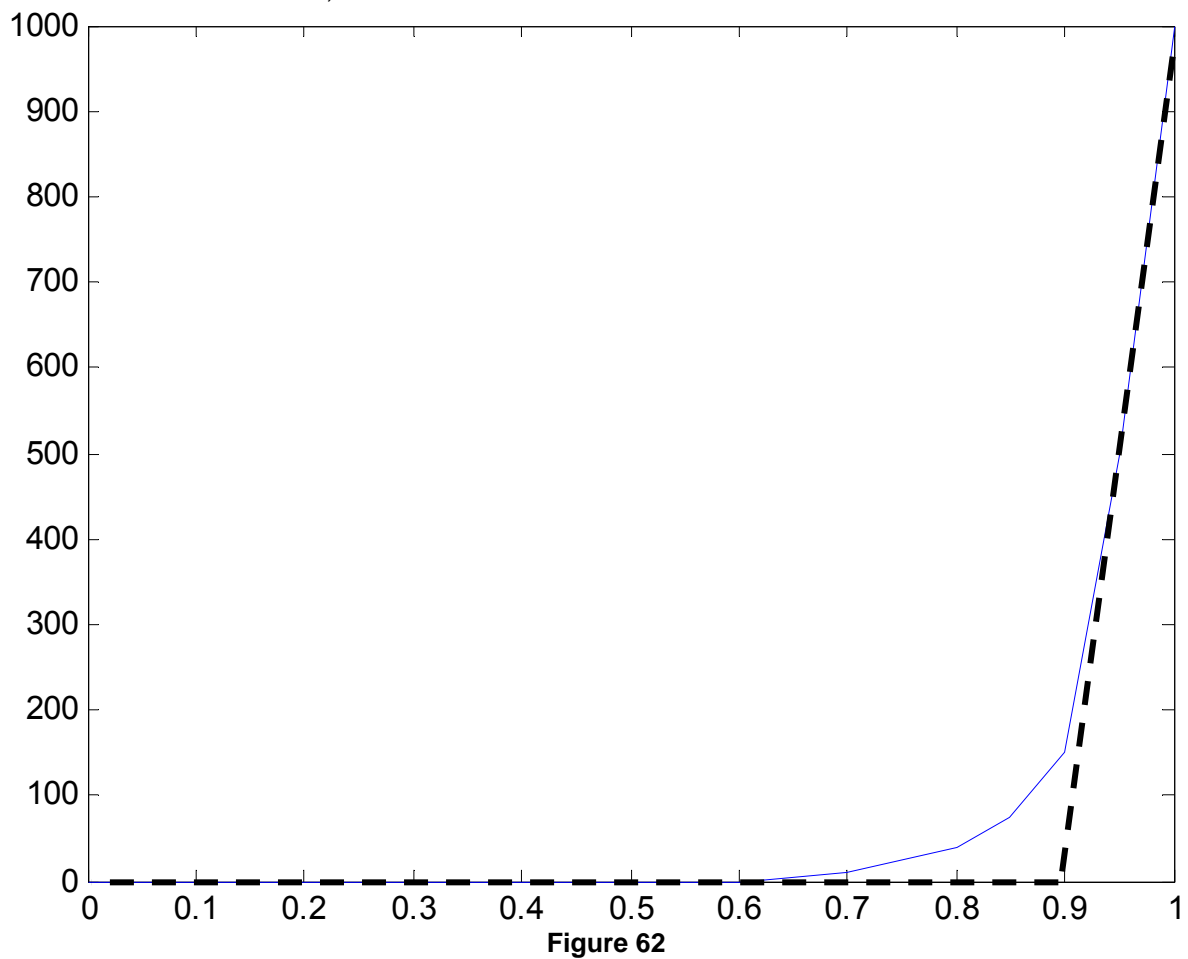


Figure 62

La résistance dynamique sur la partie linéaire se détermine par :

$$r_d = \frac{\Delta v_{AK}}{\Delta i_{AK}} = \frac{(1-0,9)}{(1000 \cdot 10^{-3} - 0)} = \frac{0,1}{1} = 0,1 \Omega$$

1.3 La diode est donc équivalente au schéma électrique suivant, lorsque le courant passe à travers elle :

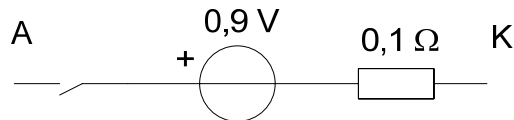


Figure 63

Le schéma équivalent électrique du circuit est le suivant :

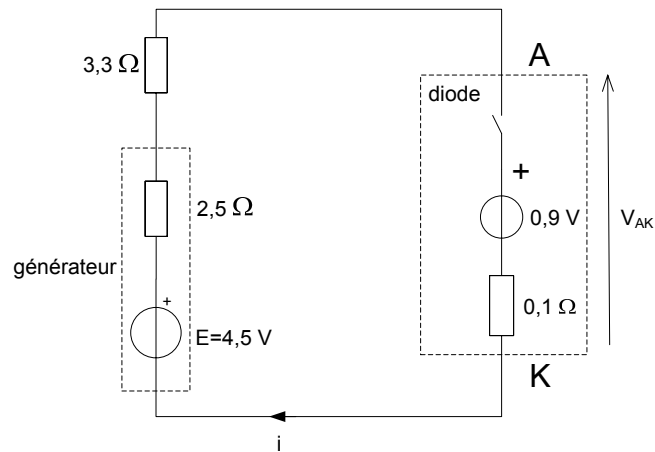


Figure 64

On a donc  $i = \frac{4,5 - 0,9}{2,5 + 3,3 + 0,1} = 0,61 \text{ A}$  (Pouillet) et donc :  $v_{AK} = 0,9 + 0,1 \times 0,61 = 0,96 \text{ V}$

Ce résultat peut être obtenu graphiquement par le tracé de la caractéristique électrique du dipôle branché aux bornes de la diode, à savoir :

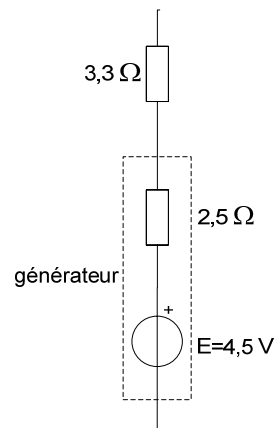


Figure 65

Cherchons l'équation de la caractéristique électrique :

Les points d'intersection de la caractéristique avec les axes sont :  $(V_{\text{vide}}; 0)$  et  $(0; I_{\text{cc}})$ .

Soit :  $(4,5; 0)$  et  $(0; 775 \cdot 10^{-3})$

La pente de la caractéristique électrique est  $a = \frac{0 - 0,775}{4,5 - 0} = -0,172 \text{ A} \cdot \text{V}^{-1}$

$$i = -0,172 \cdot v + 0,775$$

Pour  $v = 1 \text{ V}$ ,  $i = 603 \text{ mA}$

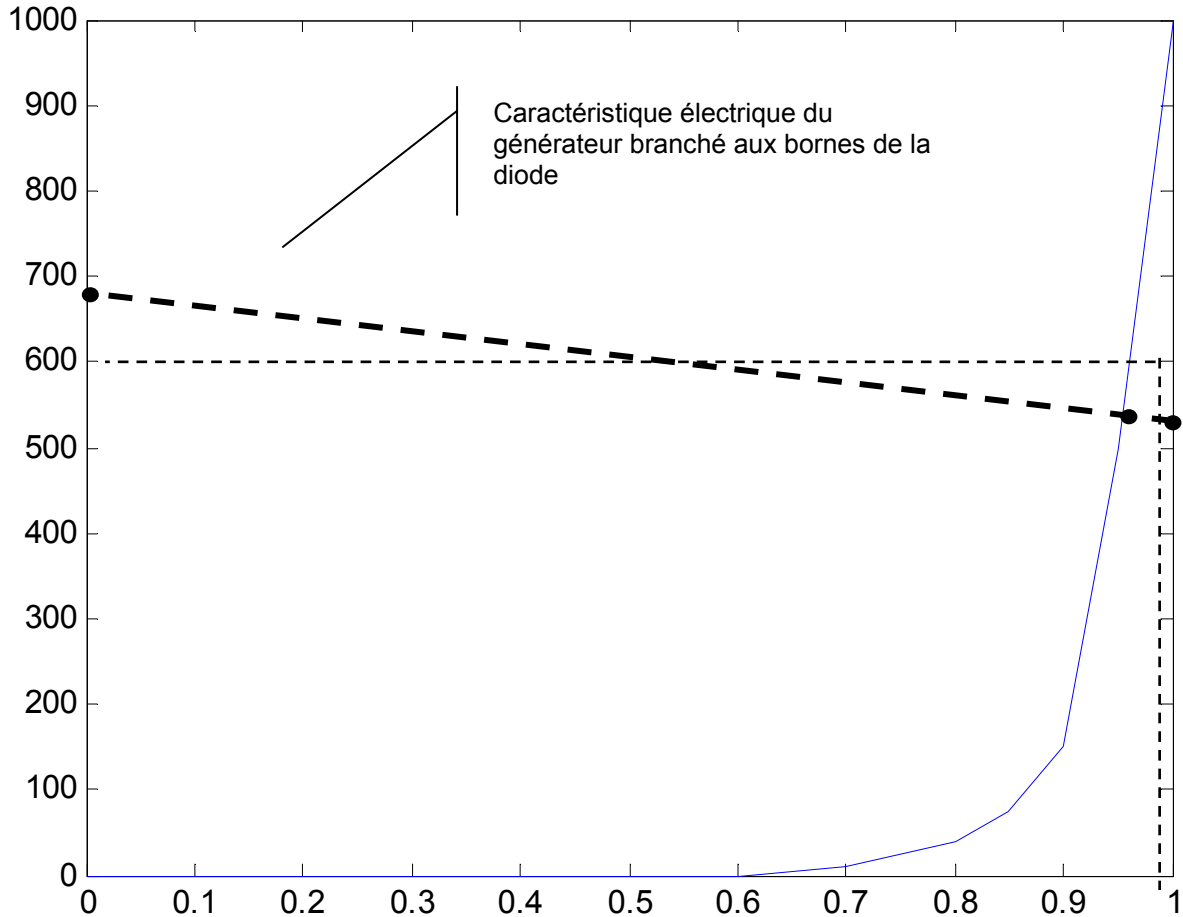


Figure 66

On lit  $v = 0,96$  ou  $0,97 \text{ V}$  et  $i = 600 \text{ mA}$ . Valeurs proches de celles obtenues par le calcul.

La tension aux bornes de la résistance est due au courant qui la traverse. Celui-ci n'est différent de 0 que lorsque la d.d.p. du générateur de tension en dents de scie atteint et dépasse la f.c.é.m. de la diode, soit  $0,9 \text{ V}$ . La valeur maximale de la d.d.p. aux bornes de  $R$  est atteinte lorsque le courant  $y$  est maximale, soit lorsque le générateur de tension en dents de scie fournit  $6 \text{ V}$ .

On a alors :  $i_{\text{max}} = \frac{6 - 0,9}{3,3 + 0,1} = 1,5 \text{ A} \Rightarrow v_{\text{max}} = 3,3 \times 1,5 = 4,95 \text{ V}$ .

1.4

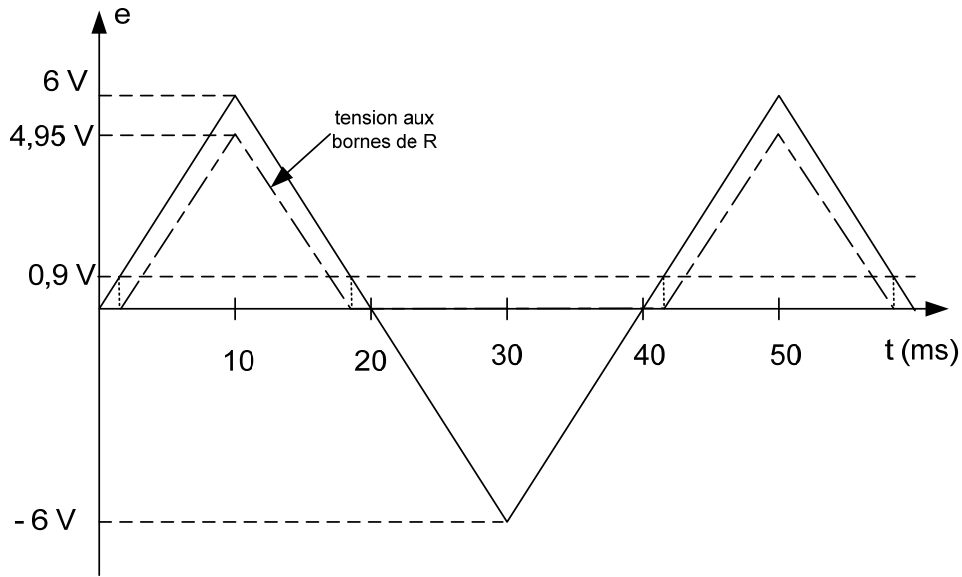


Figure 67

2.

A	B	X	Y
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	1	1

3 Voir Figure 19.

4 Fonction logique ET

La première question à se poser est : quel est le régime de fonctionnement des diodes ou quel est leur modèle équivalent. Pour répondre à cette question, il faut « enlever » les diodes et calculer le potentiel à leur anode (extrémité supérieure de  $R_2$ ).

$$V_{R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times E = \frac{100}{110} \times 5 = 4,54 \text{ V}$$

Si on remplace une diode en maintenant sa cathode à 5 V, celle-ci ne conduira pas (équivalente à un interrupteur ouvert) car  $V_{AK} < 0$ .

Si on remet une diode en maintenant sa cathode à 0 V, on aura  $V_{AK} > 0$ , la diode conduira (équivalente à un interrupteur fermé modèle n°1 de la diode). L'interrupteur fermé diode va court-circuiter la résistance  $R_2$  aux bornes de laquelle la tension ne vaudra plus qu'environ 0,7 V (modèle n°2 de la diode).

On peut donc remplir la table de vérité :

$V_1$	$V_2$	$V_S$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

On reconnaît une fonction logique ET

5.1. L'intuition nous conduit à penser que  $D_1$  qui possède la tension anode-cathode la plus importante conduira. Supposons néanmoins que l'on ne se fie pas à cette hypothèse et que nous supposons que c'est  $D_3$  qui conduit. En prenant le modèle numéro 1 (diode = simple interrupteur automatique), on en déduit que le potentiel du point K sera égal à  $E_3$ .

Pour  $D_1$  on aura :  $V_{AK} = E_1 - E_3 = 30 - 15 = 15 \text{ V} > 0 \Rightarrow D_1$  passante. Quelle sera le potentiel du point K ? Le plus élevé, donc 30 V.

Dès lors, pour  $D_3$ , on aura  $V_{AK} = 15 - 30 = -15 \text{ V} < 0 \Rightarrow D_3$  bloquée.

Un raisonnement identique conduit à conclure que  $D_2$  ne peut pas non plus être passante.

On a donc  $D_1$  passante et  $U_{D1} = 0$ .

$D_2$  bloquée et  $U_{D2} = 10 - 30 = -20 \text{ V}$ .

$D_3$  bloquée et  $U_{D3} = 15 - 30 = -15 \text{ V}$ .

5.2. La d.d.p. aux bornes de R sera la différence entre le potentiel de K et le potentiel de E, soit :

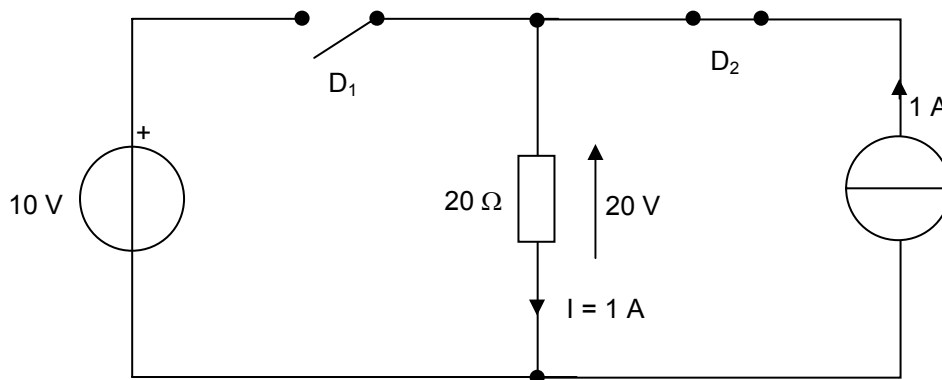
$$V_R = V_K - E = 30 - 10 = 20 \text{ V}.$$

Le courant qui la traverse sera donc :  $I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{20}{20} = 1 \text{ A}$

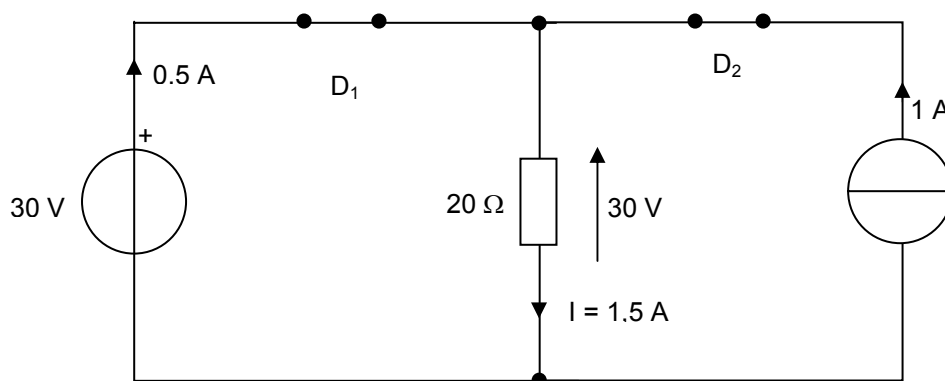
6. Il faut faire très attention à l'information « générateurs idéaux ».

Le générateur de courant (pompe volumétrique qui fait circuler un fluide hydraulique quoiqu'il arrive) maintiendra la diode  $D_2$  à l'état passant. Il y aura donc au moins 1 A circulant du haut vers le bas dans la résistance de  $20 \Omega$ , y créant une d.d.p. de 20 V.

- Si  $E = 10 \text{ V}$ , la f.é.m. de E est trop faible pour vaincre la f.c.é.m. de 20 V,  $V_{AK} = 10 - 20 = -10 \text{ V} < 0 \Rightarrow D_2$  est bloquée ; E n'arrive pas à faire circuler un courant. Seul 1 A parcourt la résistance  $R = 20 \Omega$ . Sans la présence de  $D_1$ , le générateur E serait récepteur idéal de tension traversé par un courant de 0,5 A, pouvez vous le prouver ?



- Si  $E = 30 \text{ V}$ , la f.é.m. de E est supérieure à la f.c.é.m. de 20 V,  $V_{AK} = 30 - 20 = +10 \text{ V} > 0$ , le courant passe et la d.d.p.  $V_{AK}$  devient nulle car la diode est parfaite. La d.d.p. aux bornes de R s'élève à 30 V, le courant totale est de  $30/20 = 1,5 \text{ A}$ . Le courant débité par le générateur E sera de  $1,5 - 1 = 0,5 \text{ A}$ .





7.1.1

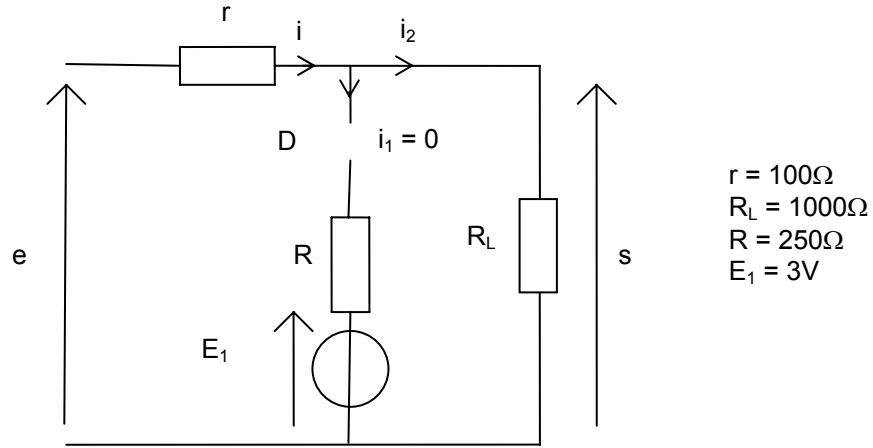


Figure 68

7.1.2 On a un simple diviseur de tension :  $s = e \times \frac{R_L}{r + R_L} = e \times \frac{1000}{100 + 1000} = 0,909 \times e$

On remplace  $e$ ,  $r$  et  $R_L$  par un générateur de Thévenin équivalent (la question précédente nous a permis de déterminer la f.é.m. de ce générateur). La résistance de ce générateur de Thévenin vaut :

$$R_{th} = r // R_L = \frac{100 \times 1000}{100 + 1000} = 90,9 \Omega$$

7.2.2

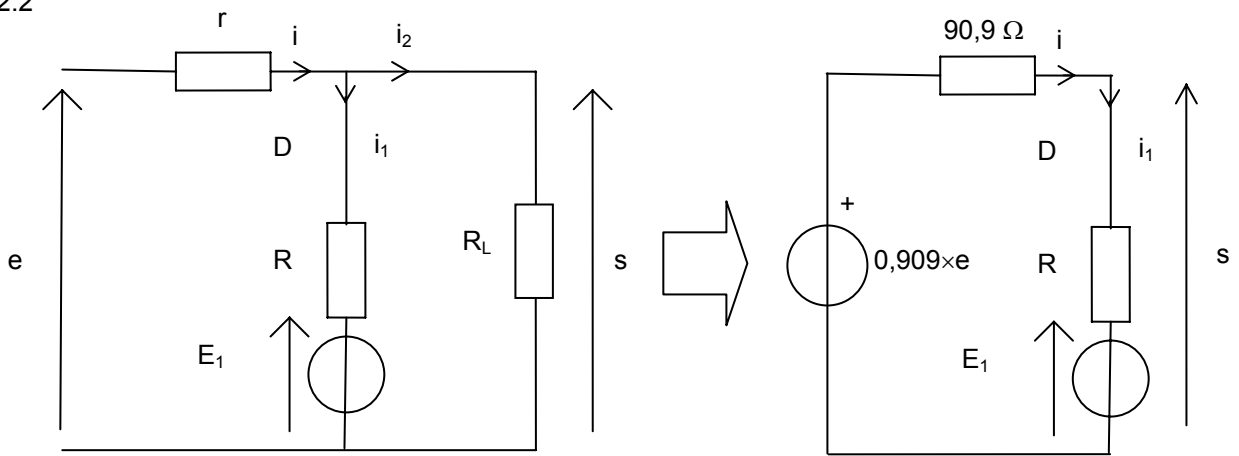


Figure 69

$s$  est la somme de la tension aux bornes de  $R$  et de la f.é.m.  $E_1$ . La tension aux bornes de  $R$  est le produit de  $R$  par le courant  $i_1$  qui passe dans  $R$ . L'équation de la maille permet de déterminer  $i_1$  :

$$0,909 \times e - 90,9 \times i_1 - R \times i_1 - E_1 = 0 \Rightarrow i_1 = \frac{0,909 \times e - E_1}{90,9 + R}$$

$$s = R \times i_1 + E_1 = R \times \frac{0,909 \times e - E_1}{90,9 + R} + E_1 = e \times \frac{0,909 \times R}{90,9 + R} + E_1 \times \left(1 - \frac{R}{90,9 + R}\right)$$

$$s = e \times 0,666 + 0,8$$

8 On peut remplacer la source idéale de courant (10 A) en parallèle avec la résistance de  $2\ \Omega$  par une source de tension équivalente (Figure 70). La résistance interne est identique, soit  $2\ \Omega$ . La tension fournie par la source égale au produit du courant par la résistance soit :  $2 \times 10 = 20\ \text{V}$ .

Attention à la position de la borne + pour la source de tension équivalente : lorsque la source de courant et la résistance sont isolées, le courant traverse la résistance du haut vers le bas. Le + est donc sur le haut de la source de tension équivalente.

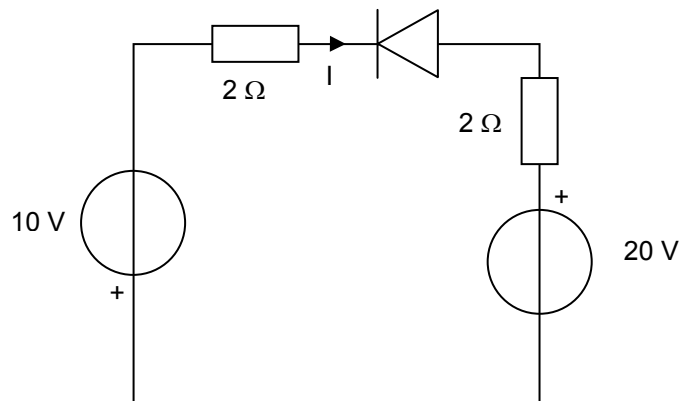


Figure 70

- Schéma équivalent n°1 de la diode :

La diode est passante, c'est un simple interrupteur fermé. Une équation de maille donne :

$$10 + 20 + 2 \times i + 2 \times i = 0 \Rightarrow i = \frac{30}{4} = 7,5\ \text{A}$$

Il est à noter que  $i$  circule dans le sens contraire de  $I$ .

On a donc  $I_1 = -7,5\ \text{A}$ .

- Schéma équivalent n°2 de la diode :

Il faut prendre en compte une f.c.é.m. de  $0,7\ \text{V}$  pour la diode. L'équation de maille se modifie en :

$$10 + 20 + 2 \times i - 0,7 + 2 \times i = 0 \Rightarrow i = \frac{30 - 0,7}{4} = 7,32\ \text{A} \text{ et } I_2 = -7,32\ \text{A}.$$

- Schéma équivalent n°3 de la diode :

Il faut prendre en compte la f.c.é.m. et la résistance dynamique de  $1\ \Omega$ . Cela modifie encore l'équation de maille :

$$10 + 20 + 2 \times i - 0,7 + 1 \times 1 + 2 \times i = 0 \Rightarrow i = \frac{30 - 0,7}{5} = 5,86\ \text{A} \text{ et } I_2 = -5,86\ \text{A}$$

9.1

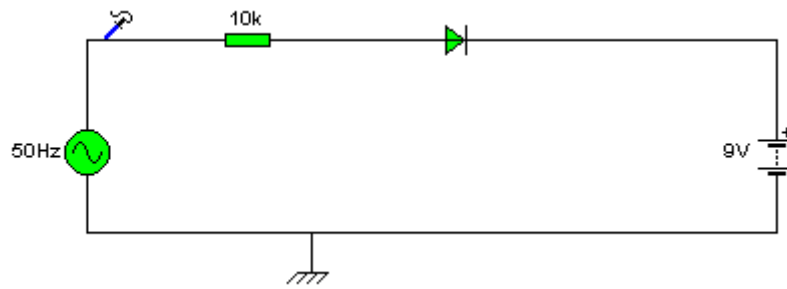


Figure 71

La Figure 72 montre la tension  $v$  donnée par la sonde 1.



Figure 72

La tension aux bornes de la diode,  $u_d$ , est donnée par la Figure 73. Il faut se souvenir que cette tension vaut 0,7 V pour une diode au silicium dans l'état passant (interrupteur fermé). Lorsque la diode est bloquée, la tension anode cathode est au maximum égale à  $20 + 6,3 = 26,3$  V.

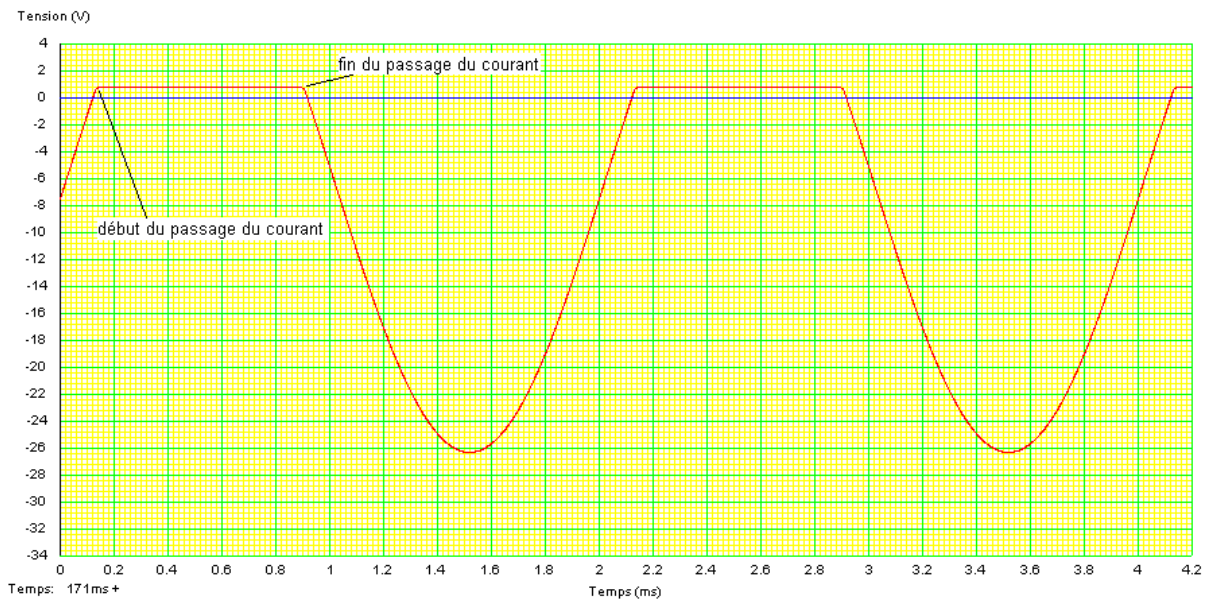
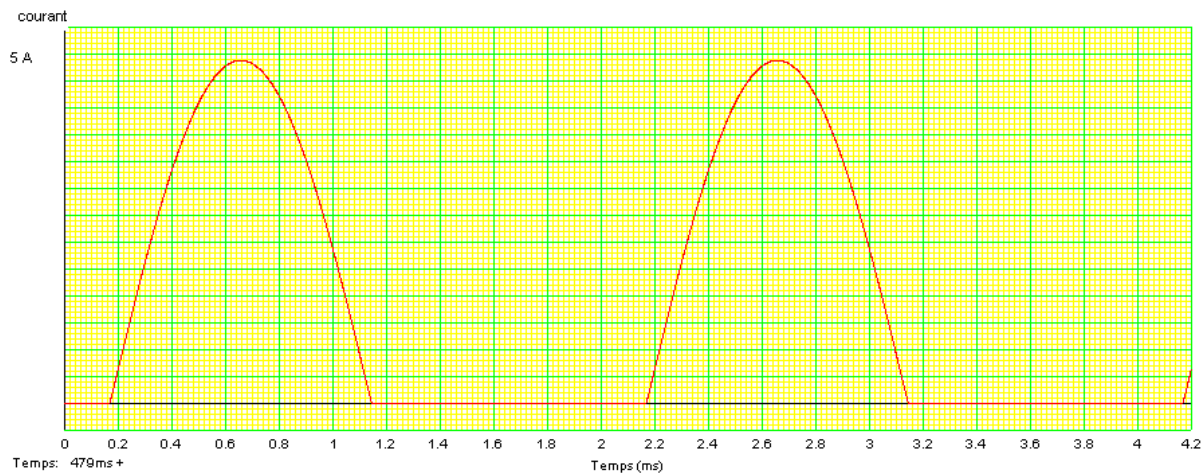


Figure 73

La Figure 74 montre l'allure du courant dans le circuit. Le courant ne circule que lorsque la diode conduit. Avec Crocodile Clips, on peut se servir de la fonction « mesure de tension différentielle, trace rouge = rouge – sonde bleue », disponible une fois que l'on a cliqué sur le bouton « oscilloscope » afin d'obtenir le tracé du courant.



**Figure 74**  
Courant dans la diode en fonction du temps

9.2 La résistance R s'obtient par : 
$$R = \frac{(v - e)}{i_{\max}} = \frac{20 - 6,3}{5} = 2,74 \Omega$$

9.3 La tension inverse maximum aux bornes de la diode a lieu lorsque la source de tension alternative produit sa tension maximum tout en polarisant la cathode positivement par rapport à l'anode (diode bloquée). Dans ces conditions, l'équation de maille donne :  $u_{mv\max} = 20 + 6,3 = 26,3 \text{ V}$

Ou encore :  $v_{AK} = -26,3 \text{ V}$  (la d.d.p. aux bornes de la résistance est nulle puisqu'il ne passe aucun courant).

9.4 La diode se met à conduire si  $V_{AK} > 0$  ou elle se bloque si  $V_{AK} < 0$ . Il faut résoudre l'équation :

$20 \cdot \sin(\omega t) = R \cdot i + 0,7 + 6,3$ . Si l'on se place aux instants où la diode commute,  $i = 0$ . L'équation devient :  $20 \cdot \sin(\omega t) = 0,7 + 6,3 \Rightarrow \omega t = \arcsin\left(\frac{0,7 + 6,3}{20}\right) = 20,5^\circ = 0,357 \text{ rad}$

Cette solution correspond à la mise en conduction de la diode, celle-ci cessera de conduire pour un angle symétrique par rapport à  $90^\circ$ , soit  $180^\circ - 20,5^\circ = 159,5^\circ$ .

Si  $f = 50 \text{ Hz}$ , cela donne pour le temps :

$$t_{on} = \frac{(20,5 \times \pi / 180)}{314} = 1,13 \text{ ms} \text{ et } t_{off} = \frac{(159,5 \times \pi / 180)}{314} = 8,86 \text{ ms}$$

En  $50 \text{ Hz}$ , une période vaut  $1/50 = 20 \text{ ms}$  et donc la demi période vaut  $10 \text{ ms}$  ; il n'aurait pas fallu trouver des valeurs supérieures à la durée de la demi période pour un tel montage sans inductance, cela aurait indiqué clairement une erreur de calcul.

### 9.5 Expression du courant :

On choisit comme origine des temps l'origine des temps de la tension  $v(t) = V_{\max} \sin(\omega t)$

$$0 < \omega t < \omega t = 0,357 \text{ rad} \quad i(t) = 0$$

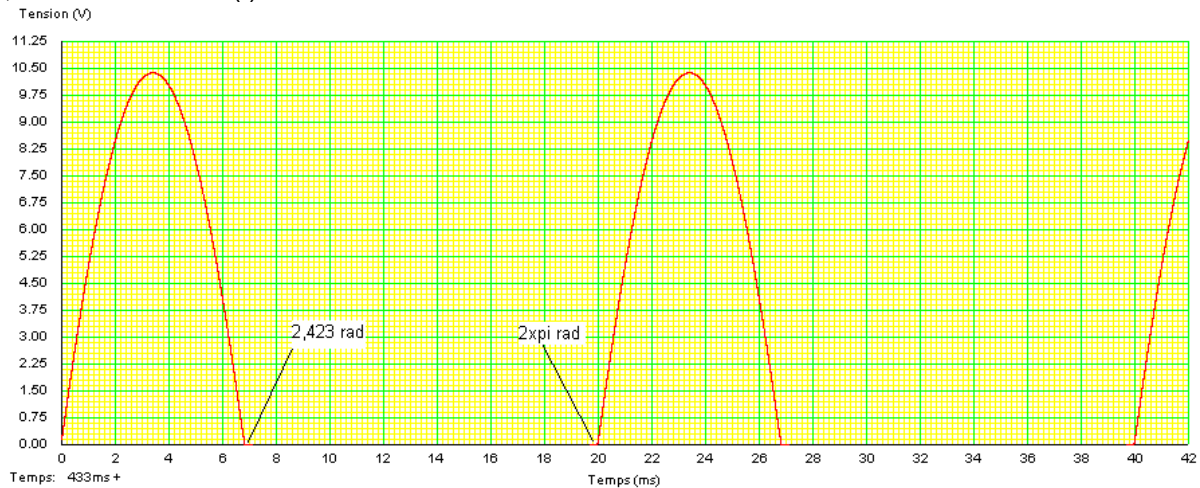
$$0,357 \text{ rad} < \omega t < 2,78 \text{ rad} \quad i = 5 \sin(\omega t - 0,357).$$

$$2,78 \text{ rad} < \omega t < 2\pi \quad i(t) = 0$$

On peut aussi changer l'origine afin de la faire coïncider avec le passage par 0 de l'intensité lorsqu'elle croît :

$$0 < \omega t < 2,423 \text{ rad} (= 2,78 - 0,357) \quad i = 5 \sin(\omega t)$$

$$2,423 \text{ rad} < \omega t < 2\pi \quad i(t) = 0$$



**Figure 75**

Courant dans la diode en fonction du temps, changement d'origine

### 9.6 Calcul du courant moyen :

$$\bar{i} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2,423} 5 \cdot \sin(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{5}{2\pi} [-\cos(\omega t)]_0^{2,423} = \frac{5}{2\pi} [-\cos(2,423) + \cos(0)] \approx 1,4 \text{ A}$$

### 9.7

La puissance moyenne fournie à la batterie est le produit de la f.c.é.m. moyenne de la batterie (6,3 V) par le courant moyen qui la traverse, soit :

$$P_{\text{batterie}} = 6,3 \times 1,4 = 8,82 \text{ W}$$

La puissance moyenne fournie à la résistance R est le produit de la résistance par le carré du courant moyen :

$$P_R = R \times i_{\text{moyen}}^2 = 2,74 \times 1,4^2 = 5,37 \text{ W}$$

Le générateur de tension alternative fournit la somme de ces puissances, soit :

$$P_{\text{gén}} = P_R + P_{\text{batterie}} = 5,37 + 8,82 \approx 14,2 \text{ W}$$

$$10.1. R = \frac{5 - 0,7 - 1,3}{3} = 1 \Omega$$

10.2

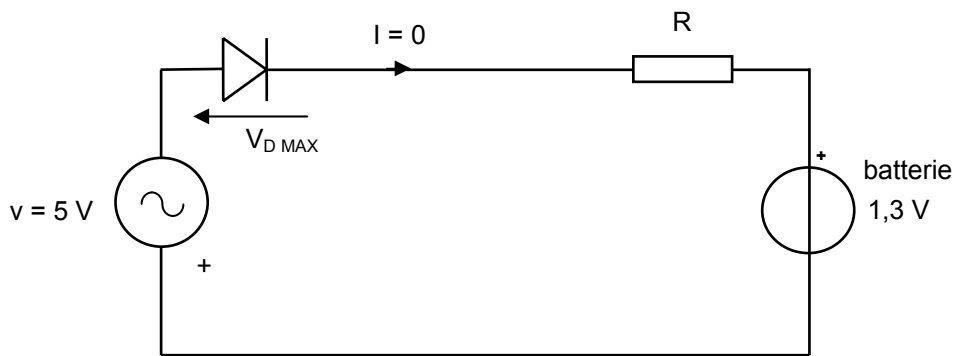


Figure 76

Tension inverse maximale :  $5 + 1,3 = 6,3 \text{ V}$

10.3

Figure 77 :  $u_{ch} = f(t)$  ; amplitude maximum :  $5 - 0,7 = 4,3 \text{ V}$

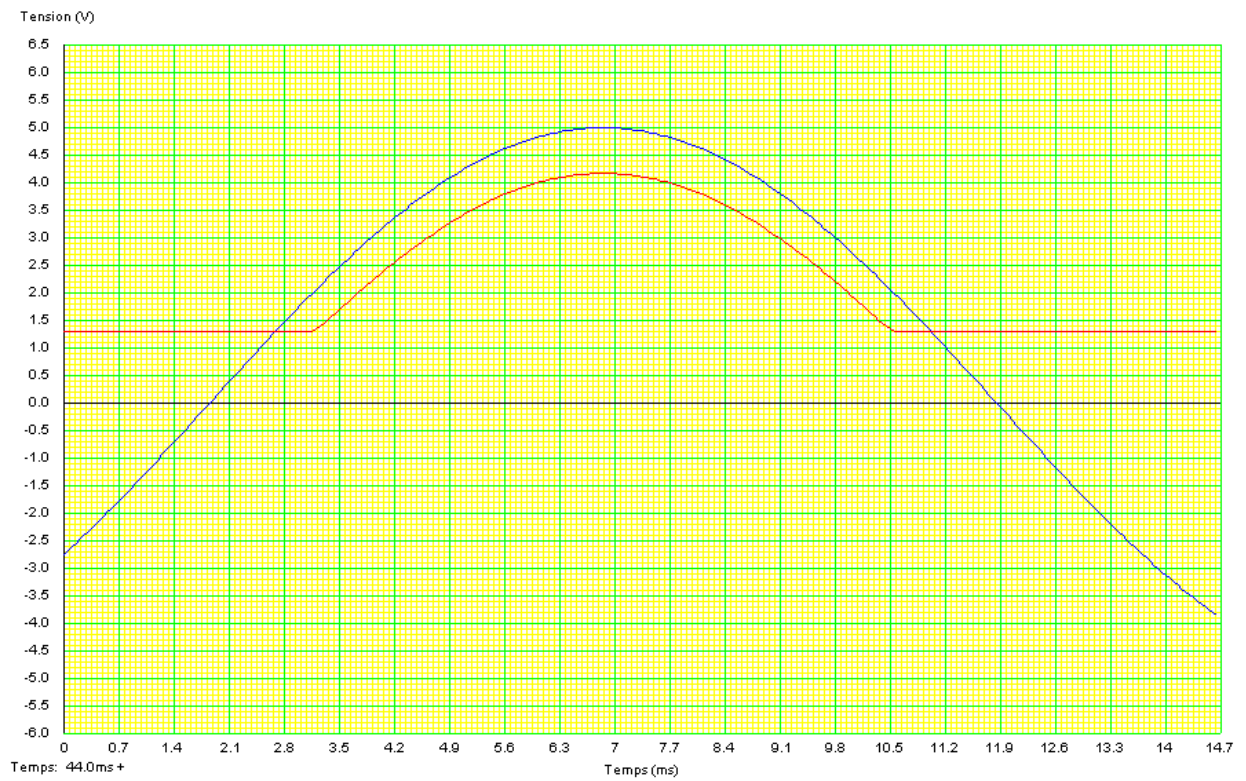


Figure 77

Figure 78 :  $u_{ch} = f(t)$

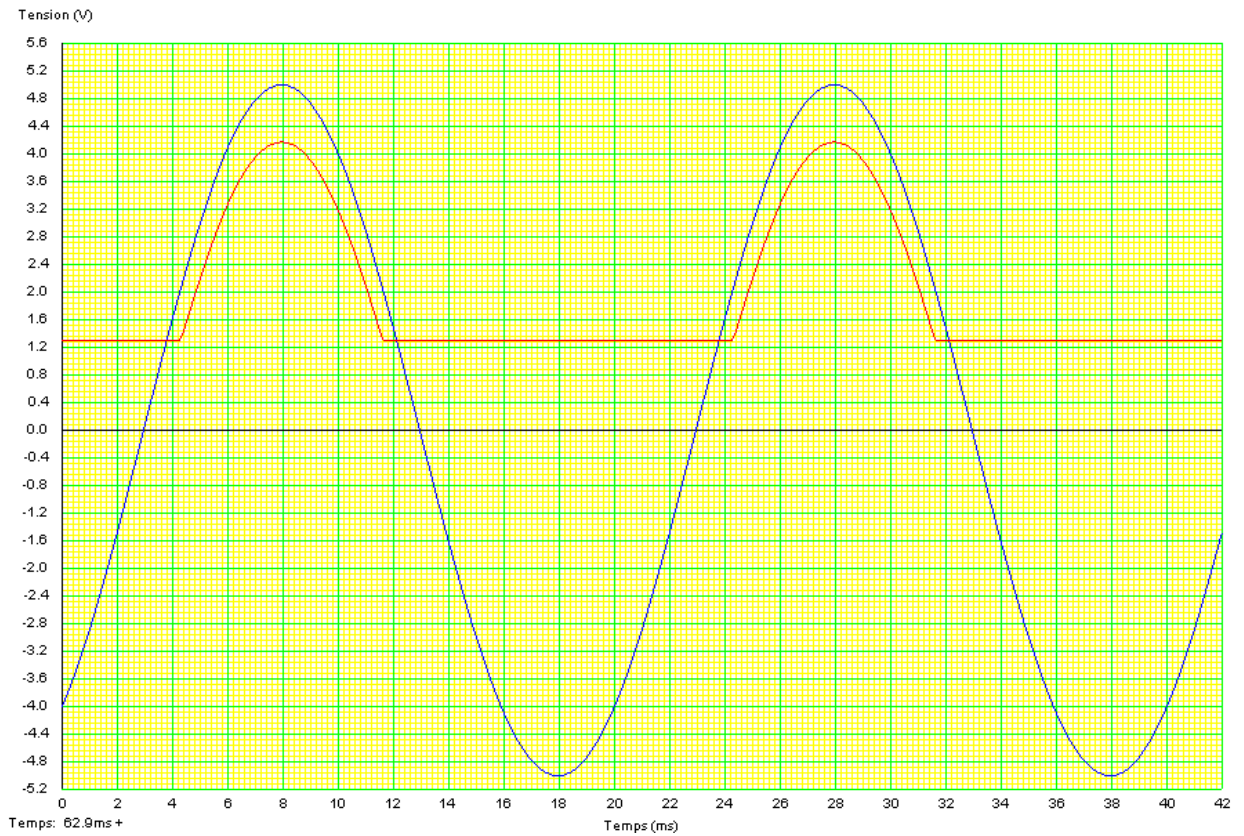


Figure 78

Figure 79 :  $i = f(t)$  ;  $i$  possède une amplitude maximum de 3 A,  $i$  ne devient non nulle que lorsque  $v(t) > 2$  V

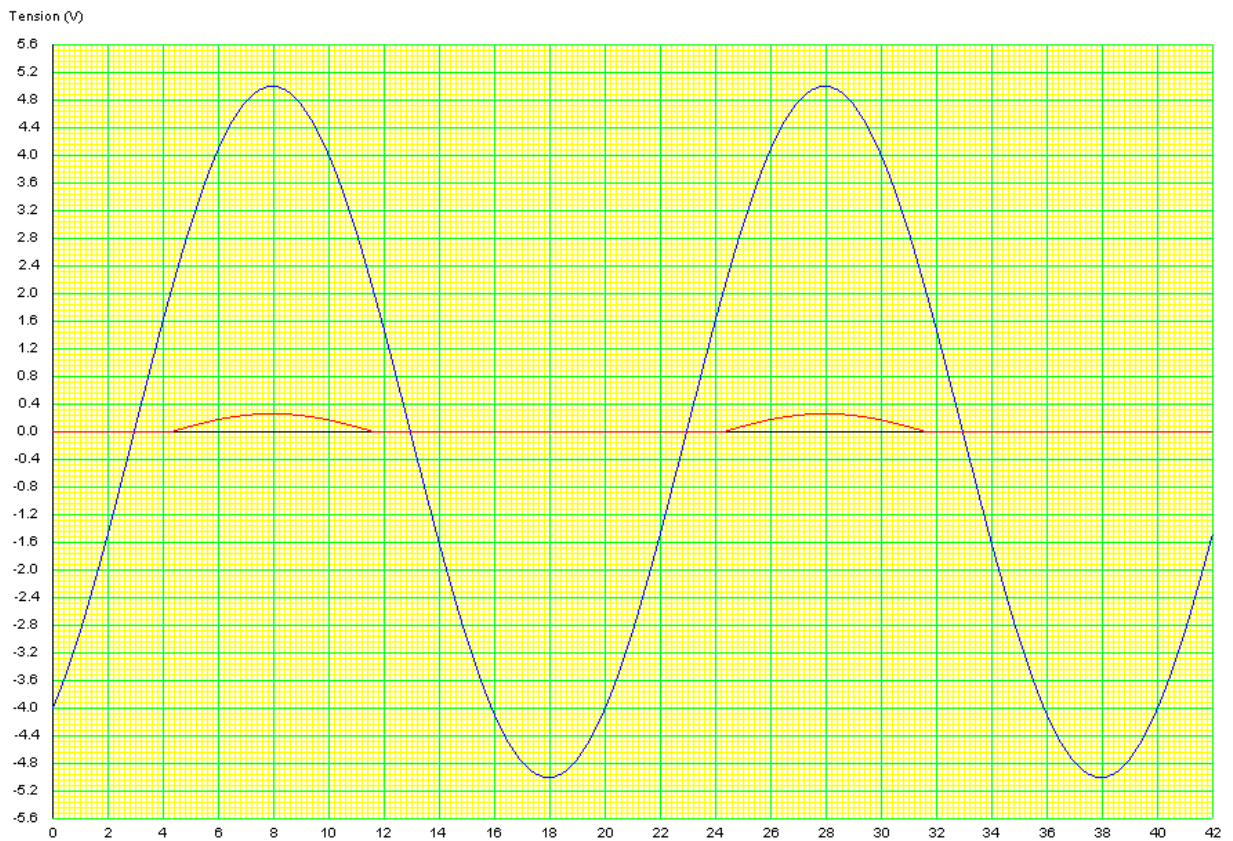


Figure 79

11

11.1.3  $I_{R\text{moyen}}=3.82\text{A}$

11.2.3  $t_0=\frac{T}{12}$  et  $t'_0=\frac{5T}{12}$

11.2.4  $i=6\sin(\omega t)-3$

11.2.5  $i_{\text{moyen}}=1.31\text{A}$

12 On peut se servir de la relation  $e = L \frac{di}{dt} \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{e}{L}$  pour esquisser l'évolution du courant. Tant que la tension  $e$  est positive,  $i$  est croissant.

Lorsque  $e$  devient négative,  $i$  décroît jusqu'à ce que l'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L$  s'annule.

Le maximum de l'intensité  $i$  coïncide à peu de chose près avec le passage par 0 de  $e$ .

La forme exacte de la tension (morceau de sinusoïde Figure 80) et du courant est donné par une simulation effectuée à l'aide de Crocodile Clips.

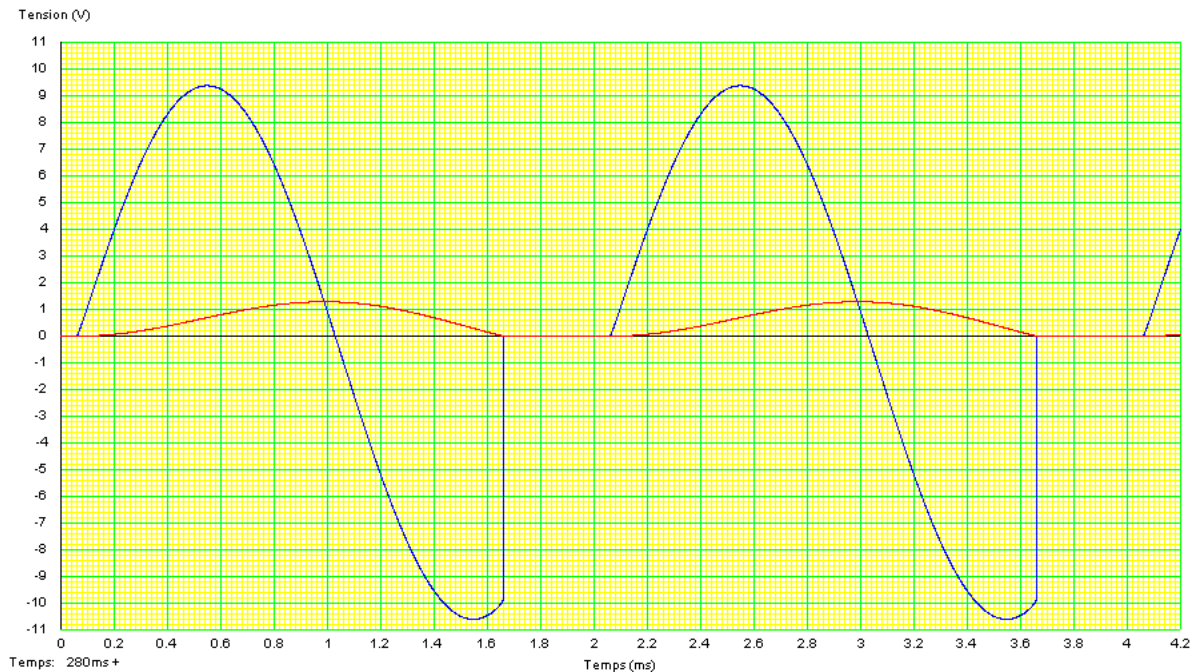


Figure 80



13

$$13.1 \quad R = \frac{12 - 7,5}{5 \cdot 10^{-3}} = 900 \, \Omega$$

13.2

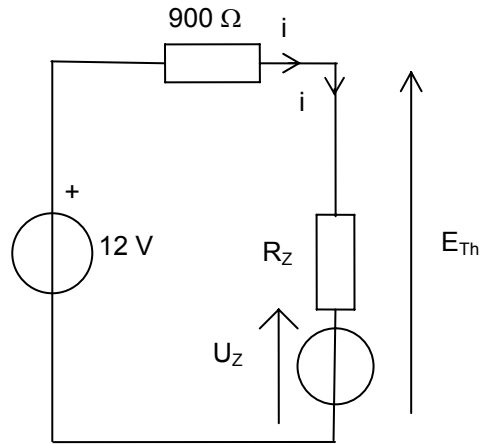


Figure 81

Equation de maille du circuit de la Figure 81 :

$$E - R \times i - R_Z \times i - U_Z = 0 \Rightarrow i = \frac{E - U_Z}{R + R_Z} = \frac{12 - 7,5}{900 + 10} = 4,94 \text{ mA}$$

$$E_{Th} = U_Z + R_Z \times i = U_Z + R_Z \times \frac{E - U_Z}{R + R_Z} = 7,549 \text{ V} \approx 7,55 \text{ V}$$

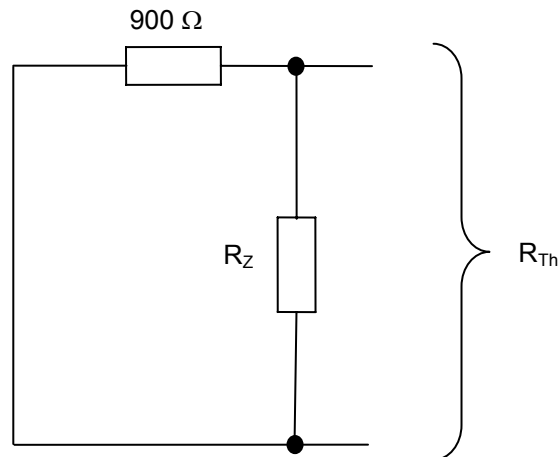


Figure 82

Selon la Figure 82, la résistance du générateur équivalent de Thévenin est :

$$R_{Th} = R // R_Z = \frac{R \times R_Z}{R + R_Z} = \frac{900 \times 10}{900 + 10} = 9,89 \, \Omega$$

Le générateur de Thévenin cherché est donc :

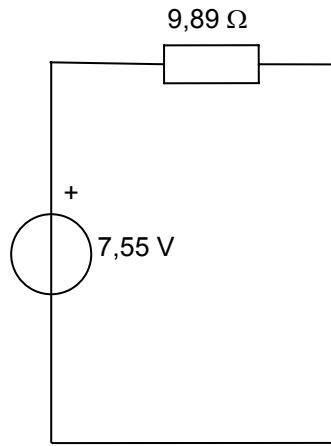


Figure 83

$$13.3 \quad \frac{\partial E_{Th}}{\partial E} = \frac{\partial \left( U_Z + R_Z \times \frac{E - U_Z}{R + R_Z} \right)}{\partial E} = \frac{R_Z}{R + R_Z} = \frac{10}{900 + 10} = 10,98 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{\partial E_{Th}}{\partial E} = k \Rightarrow \Delta E_{Th} \approx k \cdot \Delta E \text{ d'où : } \Delta E_{Th} \approx 10,98 \cdot 10^{-3} \times 2 \approx 22 \text{ mV}$$

L'utilité de ce montage apparaît ici, une variation de la tension d'entrée de 2 V produit une variation de seulement 22 mV en sortie !

13.4

$$\frac{R \times R_Z}{R + R_Z} = 9,89 \Omega$$

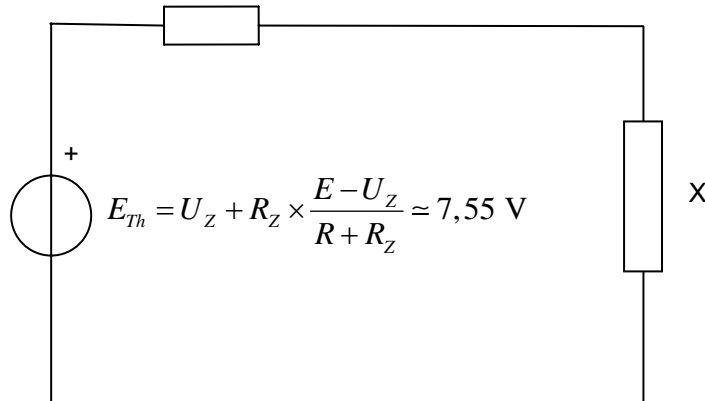


Figure 84

$$i = \frac{E_{Th}}{R_{Th} + X} = \frac{7,55}{9,89 + 2000} = 3,75 \text{ mA}$$

13.5

Si la résistance X diminue, le courant qui la traverse augmente.  
 Or, le courant qui traverse la résistance de  $900 \Omega$  est constant tant que la Zener joue son rôle de récepteur idéal de tension et qu'elle maintient  $7,5 \text{ V}$  à ses bornes.  
 Ainsi, si le courant dans X augmente, le courant dans la Zener diminue.  
 Le point de fonctionnement de la Zener se rapproche donc du point limite où la Zener passe du générateur idéal à l'interrupteur ouvert. Lorsque le point de fonctionnement est juste à cette position, le schéma équivalent est celui de la Figure 85.

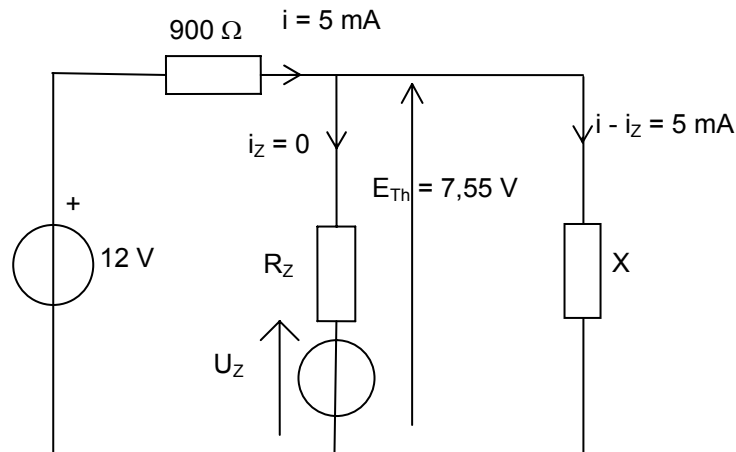


Figure 85

X ne doit donc pas descendre en dessous de :  $X_{\min i} = \frac{7,55}{5 \cdot 10^{-3}} = 1510 \Omega$

14.1.1 Le courant dans la diode Zener est celui qui traverse la résistance R, on a donc :

$$i_Z = \frac{V_{AB} - V_Z}{R} = \frac{8 - 5}{200} = 15 \text{ mA}$$

14.1.2 La puissance dissipée dans la diode Zener est :  $P_Z = V_Z \times i_Z = 5 \times 15 \cdot 10^{-3} = 75 \text{ mW}$

14.2.1 La première question à se poser est : quel est le modèle électrique représentant l'état de la Zener ?

Pour répondre à cette question, on débranche la Zener (en pointillés sur la Figure 86).

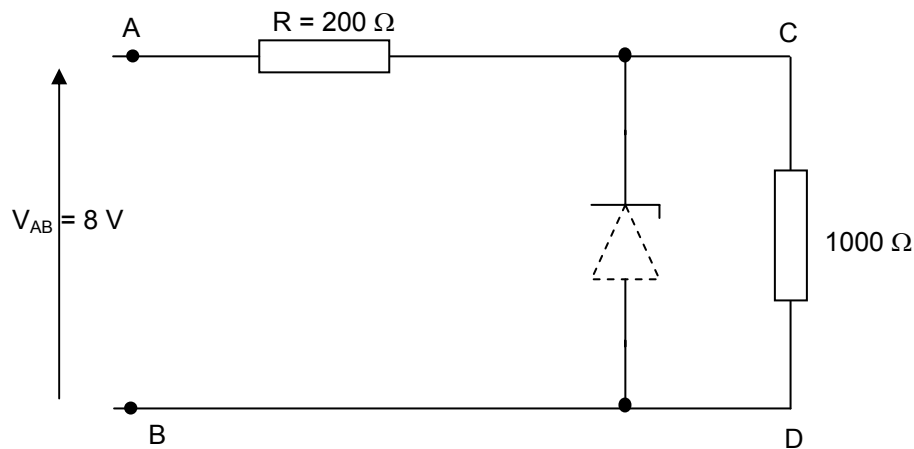


Figure 86

Puis, on calcule la tension  $V_{CD}$  (R et la résistance de  $1000\ \Omega$  constitue un simple diviseur de tension) :

$$V_{CD} = V_{AB} \times \frac{1000}{1000 + 200} = 6,66\text{ V}$$

$V_{CD} > V_Z$ , cela implique qu'une fois rebranchée, la Zener se comportera comme un récepteur idéal de tension et maintiendra  $5\text{ V}$  entre les points C et D.

L'intensité dans la résistance de  $200\ \Omega$  vaut :  $i_{200} = \frac{8-5}{200} = 15\text{ mA}$ .

L'intensité dans la résistance de  $1000\ \Omega$  est tout simplement donnée par la loi d'Ohm :

$$i_{1000} = \frac{5}{1000} = 5\text{ mA}$$

L'intensité passant dans la diode Zener est trouvée en appliquant la loi des nœuds :

$$i_Z = i_{200} - i_{1000} = 15 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3} = 10\text{ mA}$$

14.2.2 Lorsque  $R_c$  diminue, le courant dans  $R_c$  augmente au détriment de celui qui passe dans la Zener. En effet, tant que la Zener se comporte en récepteur idéal de tension, le courant dans la résistance  $R$  de  $200 \Omega$  reste constant et égal à  $15 \text{ mA}$ . Ainsi, la somme du courant dans la Zener et du courant dans la résistance de  $1000 \Omega$  est constante égale à  $15 \text{ mA}$ .

Si le courant dans la Zener diminue, le point de fonctionnement de celle-ci se rapproche de la position limite pour laquelle  $i_z = 0 \text{ A}$  et  $V_z = 5 \text{ V}$ . Au-delà de cette position, la diode est équivalente à un interrupteur ouvert, elle ne régule plus la tension.

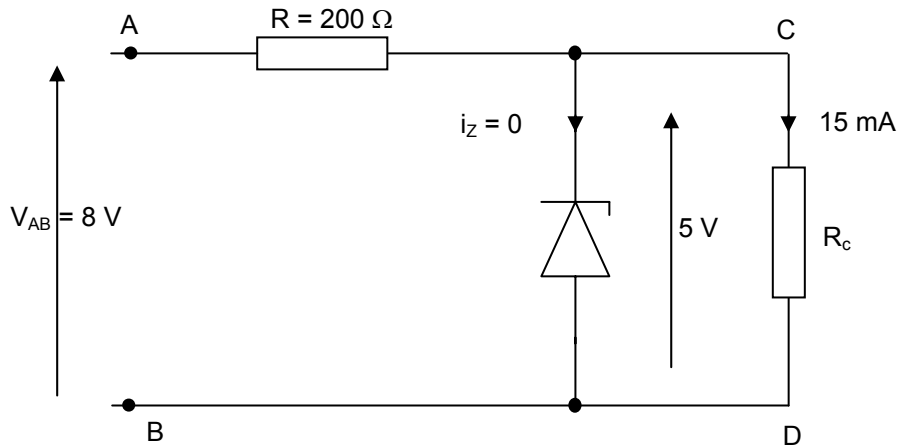


Figure 87

Supposons que nous ayons atteint ce point limite en réduisant  $R_c$  (Figure 87). La loi d'Ohm suffit à déterminer  $R_c$ :

$R_c = \frac{5}{15 \cdot 10^{-3}} = 333,3 \Omega$ . En dessous de cette valeur, la Zener ne stabilise plus la tension. Cette question illustre la régulation de tension vis-à-vis des perturbations aval.

14.2.3 Dans cette question, nous étudions la régulation vis-à-vis des perturbations amont. Ici aussi, lorsque la tension  $V_{AB}$  diminue, le courant dans la Zener diminue. L'intensité dans  $R_c$  reste constante tant que la tension à ses bornes reste constante et donc tant que la Zener reste équivalente à un récepteur idéal de tension. Là aussi, l'étude des grandeurs électriques au point limite  $i_z = 0 \text{ A}$  et  $V_z = 5 \text{ V}$  nous permettra de déterminer la plus petite valeur possible de  $V_{AB}$ .

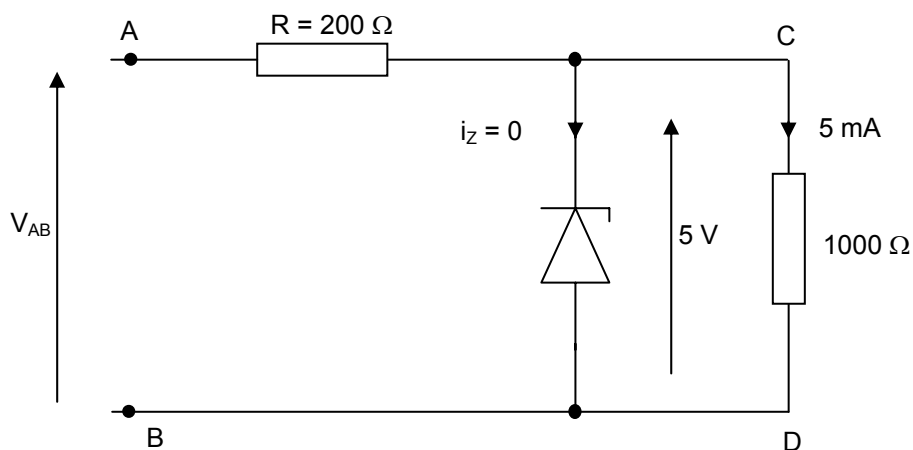


Figure 88

La Figure 88 montre que, pour cette question, l'intensité dans la résistance  $R_c$  est de  $\frac{5}{1000} = 5 \text{ mA}$ .

La d.d.p. aux bornes de la résistance  $R$  est donc de :  $5 \cdot 10^{-3} \times 200 = 1 \text{ V}$ .

Une équation de maille fournit la valeur de  $V_{AB}$  :  $V_{AB} = V_{CD} + V_R = 5 + 1 = 6 \text{ V}$ .

La plus petite valeur possible de  $V_{AB}$  est donc de 6 V, en-dessous de cette valeur limite, la diode Zener ne régule plus la tension  $V_{CD}$ .

$$15.1 \quad P_{\max} = U_Z \times i_Z \Rightarrow i_{Z\max} = \frac{P_{\max}}{U_Z} = \frac{1,3}{6,2} \approx 210 \text{ mA}$$

15.2 Suivant le même raisonnement que pour la question 14.2.3, un courant de 62 mA traverse la résistance  $R_c$  lorsque l'on arrive au point limite entre la Zener récepteur de tension idéal et la Zener interrupteur ouvert (voir Figure 89).

Cette intensité produit une d.d.p. de :  $100 \times 62 \cdot 10^{-3} = 6,2 \text{ V}$  aux bornes de  $R_p$ .

Ainsi :  $E_{\min i} = U_{R_c} + U_Z = 6,2 + 6,2 = 12,4 \text{ V}$ .

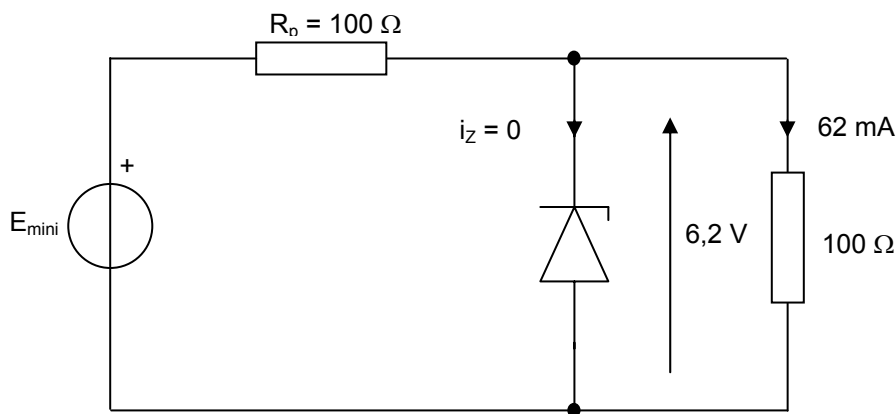


Figure 89

Lorsque l'on maintient  $E$  à 24 V et que l'on diminue  $R_c$ , un raisonnement analogue à celui de la résolution de la question 14.2.2

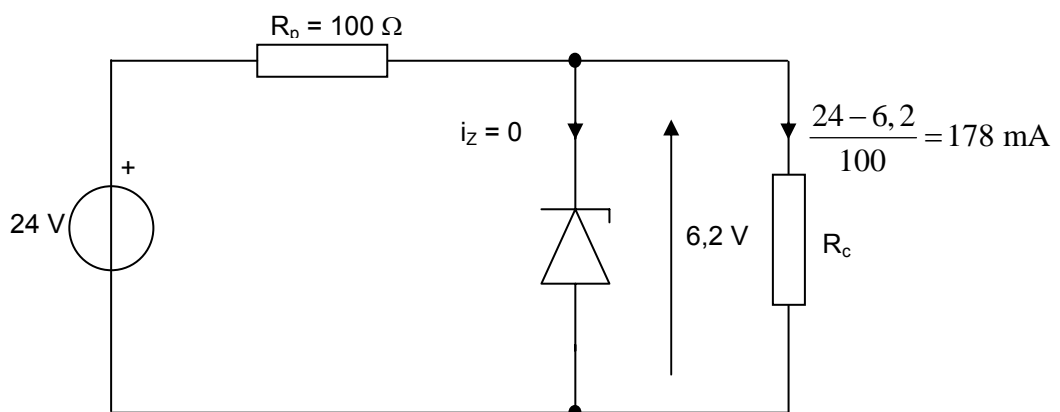


Figure 90

La Figure 90 permet d'écrire :  $R_{c\min i} = \frac{6,2}{178 \cdot 10^{-3}} = 34,83 \text{ V}$







