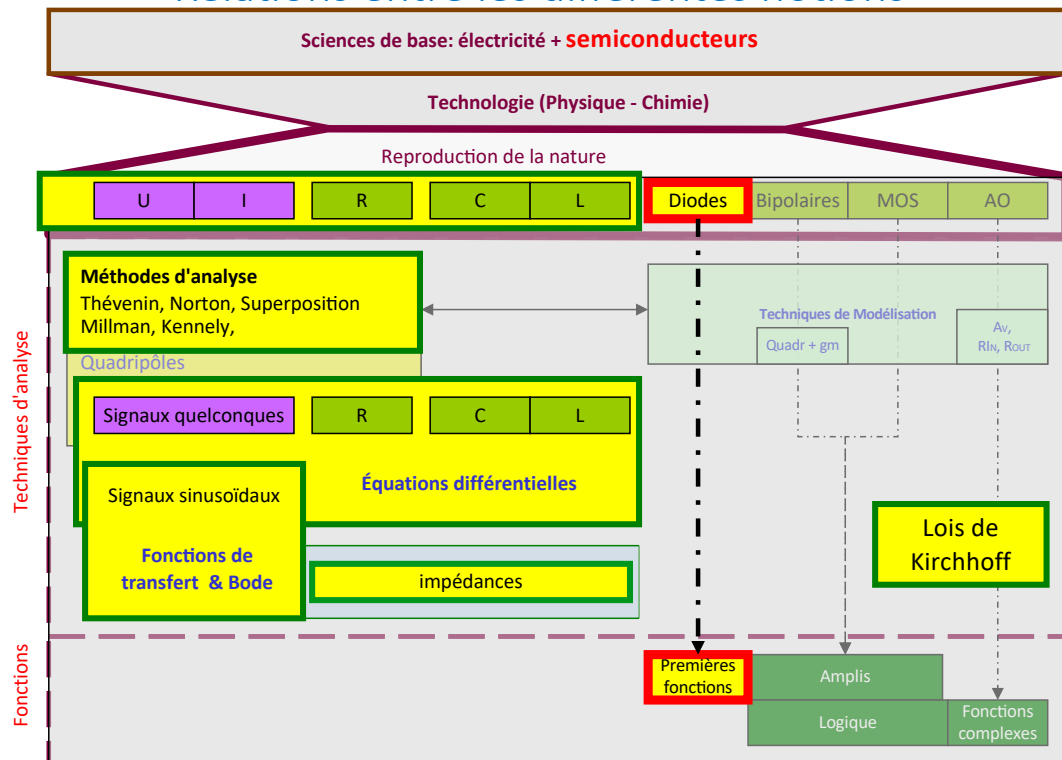


Relations entre les différentes notions

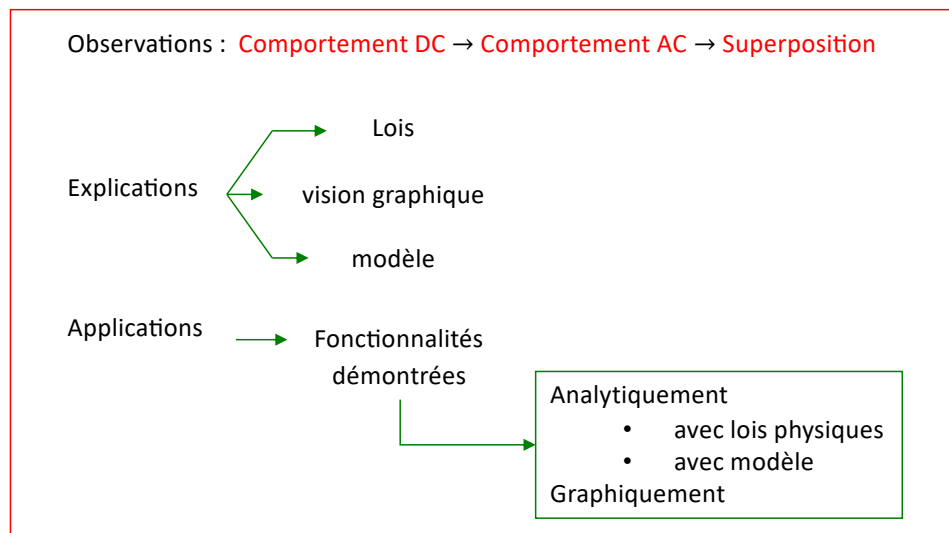


1

Les diodes correspondent au premier chapitre des dispositifs à semi conducteur. Ces dispositifs donnent lieu à des composants passifs (qui ne font que dissiper de l'énergie) et des composants actifs (les transistors: qui peuvent amplifier des signaux)

L'analyse de la diode est très importante dans la perspective de l'étude des transistors, en particulier la méthodologie que nous exploiterons lorsque les composants seront soumis à un mélange de signaux continus et alternatifs.

Partie 1: Introduction sur les diodes



2

L'analyse des diodes suppose une méthodologie un peu différente des composants R et C, la phénoménologie étant un peu plus complexe avec les éléments non linéaires.

Ce comportement intrinsèque sera d'abord observé afin de mettre en évidence les ordres de grandeurs électriques (relation entre courant et tension).

Plusieurs explications pourront être formulées selon que l'on travaille sur le composant isolé ou à partir d'un circuit permettant de le caractériser. Les principales méthodes sont :

analytique (loi exponentielle)

physique (physique des semiconducteurs et jonction PN). Cette partie longue et complexe ne sera pas abordée dans ce cours.

graphique. Ici le composant sera intégré dans un circuit permettant de le caractériser. On évoquera la notion de droite de charge qui permet une interprétation aisée.

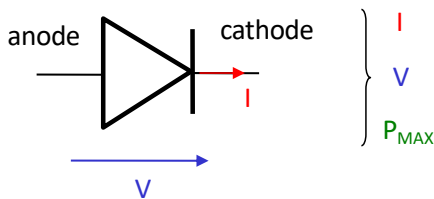
La modélisation. Pour les composants non linéaires, il est utile d'approximer un comportement complexe à maîtriser par un comportement plus simple. La qualité de la modélisation dépendra de la précision des valeurs obtenues et de la facilité de prévoir le comportement du circuit.

Une fois le dispositif maîtrisé, il est alors possible de développer de nombreuses fonctionnalités et de prévoir leurs comportements.

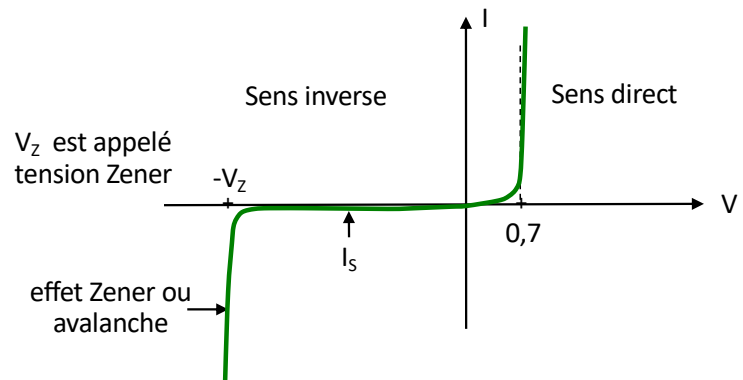
Notre étude sépare d'abord les comportements en DC et AC. La modélisation et le théorème de superposition nous permettront d'exploiter les types de signaux à la fois.

Les diodes

Symbole



Comportement non linéaire



3

Lorsqu'une tension est appliquée aux bornes d'une diode, il est possible de mettre en évidence trois zones de comportement spécifiques :

1. vers 0.7 V pour la diode au silicium, le courant grimpe très rapidement pour le moindre accroissement de tension.
2. Lorsque la tension est inférieure à 0.7 V jusqu'à une tension négative limite (qui dépend de sa construction), on constate qu'il n'y a quasiment pas de courant, en tout cas, très peu significatif pour son exploitation en électronique.
3. Lorsque la tension atteint le seuil négatif, on constate que le courant devient très important à nouveau, mais circulant en sens inverse. La nature du courant dépend aussi de la construction du dispositif. Elle exploite généralement une combinaison d'effets physiques (effet tunnel, effet avalanche,...) qui peuvent avoir un caractère destructeur ou pas pour le dispositif. Si le phénomène est prévisible, il sera donc exploitable. C'est le cas pour des diodes particulières, appelées Zener. Le comportement pour ces diodes n'est pas destructif (donc réversible).

Le symbole représentant la diode est comparable à une flèche et indique le sens naturel du courant. L'entrée de la flèche s'appelle l'anode et la sortie la cathode. La suite va nous indiquer la relation analytique (non-linéaire) entre le courant et la tension d'une diode. La puissance ($P = UI$) que peut dissiper une diode est une des caractéristiques données par le constructeur. Elle limite le courant que pourrait véhiculer la diode. Quelle que soit le type de diode, si le courant qui circule est trop élevé, la diode serait détruite.

Petite parenthèse : semi-conducteurs si vous avez envie d'en savoir plus

L'atome et le cristal de silicium

Les bandes d'énergie:

- changement de niveau d'énergie,
- génération d'une paire électron-trou
- durée de vie porteurs libres

Quantité de charges insuffisante pour des courants significatifs

Dopage (N et P)

- donneurs et accepteurs d'électrons
- augmentation des porteurs libres
- porteurs minoritaires
- constante de charge fixe

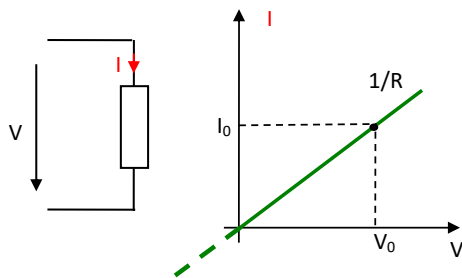
La jonction

- courant de diffusion
- courant de conduction
- équilibre – barrière de potentiel

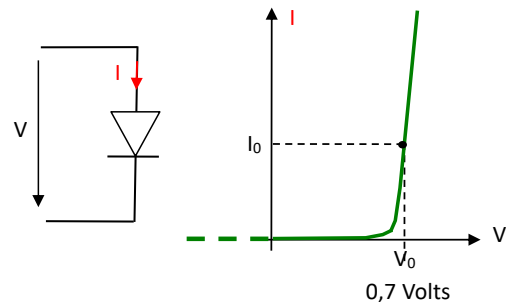
4

La physique des semiconducteurs est une matière à part entière. Cependant une petite introduction phénoménologique et intuitive est utile, en particulier dans la perspective de l'étude sur les transistors (bipolaires et MOS).

Comparaison Diode résistance



Avec la résistance: $I_0 = \frac{V_0}{R}$



Avec la Diode: $I_0 = I_S \cdot \left(e^{\frac{V_0}{nU_T}} - 1 \right)$

- I_S le "courant inverse de saturation" : $10^{-15} < I_S < 10^{-10}$ A dans les exercices!!!
- $U_T = \frac{kT}{q} = 26 \cdot 10^{-3}$ V à 27° ($k = 1,380\,649 \times 10^{-23}$ J K $^{-1}$)
- $1 < n < 2$

Première approximation : $I_0 = I_S \cdot e^{\frac{V_0}{nU_T}}$

5

Faisons une première comparaison entre le composant le plus simple (la résistance) et la diode.

Dans le cas de la résistance, on constate que le courant grimpe linéairement en fonction de la tension appliquée à ses bornes. La loi d'ohm confirme cette vision.

Dans le cas de la diode, celle-ci semble bloquée (pas de courant) jusqu'à 0.7 V environ. A partir de 0.7 V, le courant croît de manière très brutale. La loi associée à ce comportement est d'une forme exponentielle. Elle met en évidence 4 paramètres :

I_S est le courant de saturation en inverse qui dépend de la technologie et des conditions d'emploi (sensible à l'agitation thermodynamique). Ce paramètre présente une très forte dispersion de valeurs (de 10^{-6} à 10^{-20} A). Typiquement dans les exercices nous prendrons des valeurs de 10^{-15} A à 10^{-10} A.

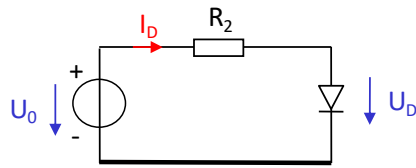
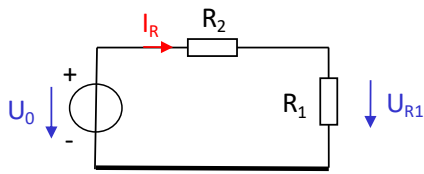
V_0 ou V_D , qui est la tension appliquée aux bornes du dispositif. Lorsque le courant sera significatif, la tension vaudra environ 0.7 V

U_T est exprimée en mV et marque l'agitation thermodynamique dans le milieu. Elle-même dépend de plusieurs paramètres dont la température. A 27° C, U_T vaudra 26 mV.

n est un facteur dont la valeur est comprise entre 1 et 2. On l'appelle facteur d'idéalité et il traduit la prépondérance en pourcentage des différents phénomènes physiques impliqués dans son comportement.

Le terme -1 sera généralement négligé lorsque la diode fonctionnera vers 0.7V. Il devient significatif lorsque l'on travaille à des tensions très faibles (proches de 0V).

Circuit de base



$$I_R = \frac{U_{R1}}{R_1}$$

$$U_{R1} = U_0 - R_2 \cdot I_R = U_0 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$I_D = I_S e^{\frac{U_D}{nU_T}}$$

$$U_D = U_0 - R_2 \cdot I_D = U_0 - R_2 \cdot I_S e^{\frac{U_D}{nU_T}}$$

Comment analyser de tels circuits ? ? ?

- Résolution mathématique: Impossible à calculer!!!!
- Résolution graphique
- Utilisation de modèles

6

Nous allons procéder à une nouvelle comparaison entre la diode et la résistance, lorsqu'elles sont incluses dans un circuit élémentaire.

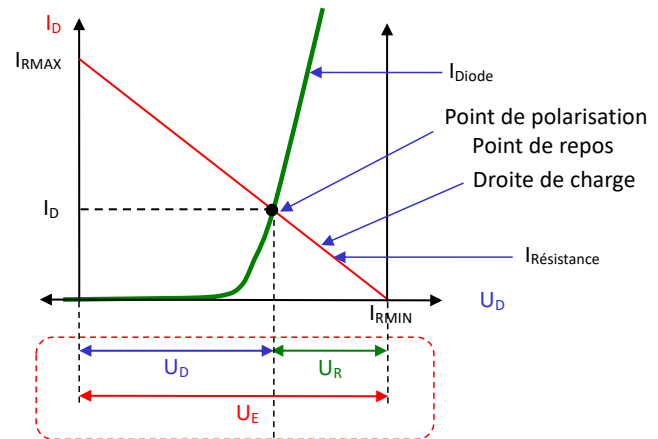
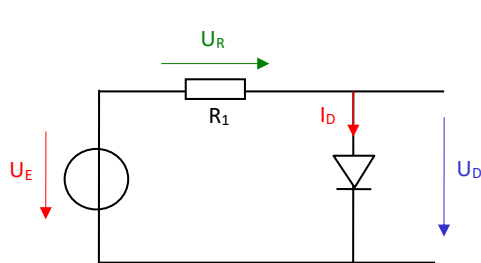
Il est extrêmement simple d'analyser un circuit à deux résistances (appelé diviseur résistif). Le courant commun aux deux résistances et chacune des tensions aux bornes des résistances sont très simples à calculer.

Dans le cas de la diode, le calcul est tout simplement impossible. Nous développons en effet des équations appelées transcendantes qui n'admettent pas de résolution analytique. Il faut faire appel à des méthodes d'algorithmique numérique pour résoudre de telles équations.

Nous allons cependant proposer d'autres méthodes qualitatives (vision graphique) ou quantitatives (usage de modèles) pour effectuer les prévisions.

Résolution graphique

Approche très intuitive



7

La résolution graphique qui sera développée à outrance pour les petits signaux (diodes et transistors) est probablement l'outil d'analyse le plus intuitif.

L'analyse graphique est basée sur la notion de droite de charge. Les deux composants qui interviennent sont la diode exprimée avec la loi exponentielle, et la résistance exprimée avec la loi d'ohm.

Si la tension appliquée aux bornes de la diode augmente, la tension appliquée aux bornes de la résistance diminue.

La tension aux bornes de la résistance est maximale lorsque $V_D = 0$, et le courant qui traverse la résistance est maximal ($I_{RMAX} = U_E/R$)

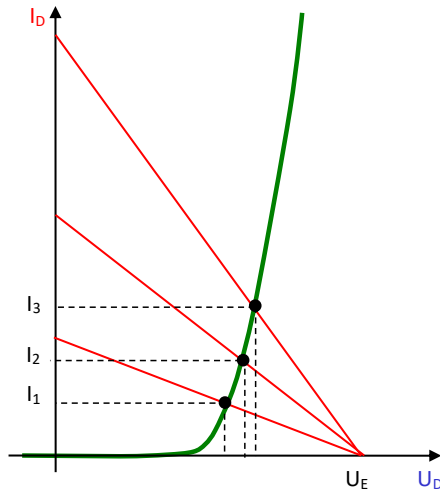
La tension aux bornes de la résistance est minimale lorsque $V_D = U_E$ (il ne reste rien aux bornes de la résistance) et le courant qui traverse la résistance est minimal ($I_{RMIN} = 0$)

Le courant qui circule dans la boucle est le même pour la résistance et la diode. Il s'observe au point d'intersection de la loi exponentielle et de la droite de charge. A ce point d'intersection nous pouvons aussi déterminer la tension de diode (U_D) et ce qui « reste » aux bornes de R (U_R).

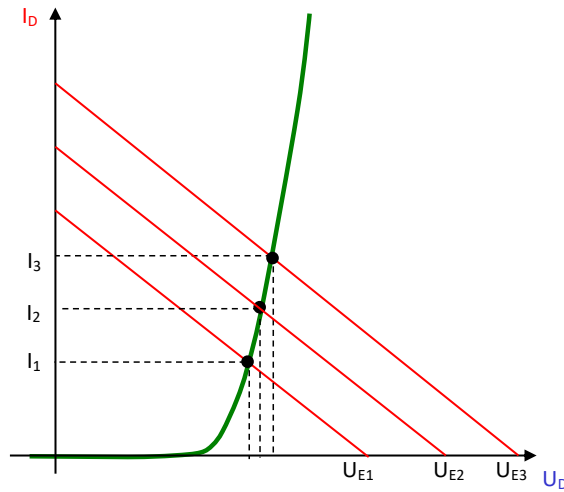
On note que ce point d'intersection pour des grandeurs continues (U et I) et aussi appelé **point de repos**.

Remarque

Courant évolue vite & Tension évolue lentement



Changement de résistances



Changement de tensions d'entrée

8

L'analyse précédente peut s'étendre à deux séries d'observations

1. Changement de résistances:

Une observation intéressante réalisée lorsqu'une diode est associée avec des résistances de valeurs différentes.

Si la résistance est petite, la droite de charge est plus abrupte et le courant qui circule dans les composants sera élevé.

Si la résistance est moyenne, la droite de charge est moins abrupte et le courant qui circule dans les composants sera moyennement élevé.

Si la résistance est grande, la droite de charge est faible et le courant qui circule dans les composants sera faible.

On remarque donc que le courant évolue très vite en fonction des résistances, en revanche la tension évolue très peu (toujours autour de 0.7 V).

2. Changement de tensions d'entrée:

Lorsque la tension d'entrée change, le courant va évoluer.

La droite de charge ne change pas de pente mais se décale vers la droite au fur et à mesure que la tension monte. Ce décalage se traduit par un point d'intersection qui monte rapidement en courant et peu significativement en tension (toujours proche de 0.7V)

Justification des modèles

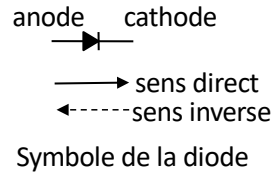
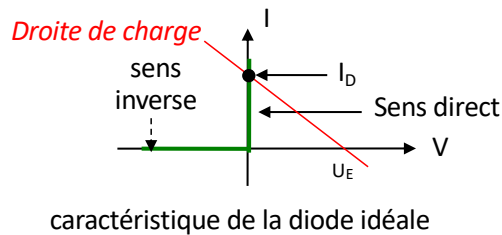
1. Simplifier les calculs
2. Sentir les ordres de grandeur (démarche plus qualitative que quantitative)
3. Introduire des éléments linéaires qui approximent la réalité

9

Nous allons introduire la notion de modèle pour plusieurs raisons :

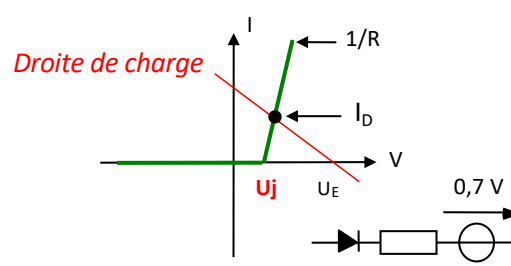
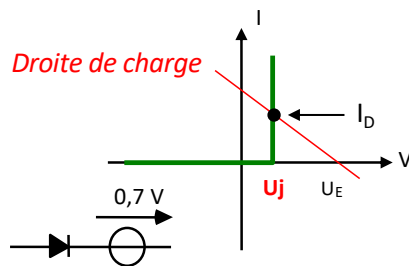
- Les calculs étant impossibles avec la loi physique, il faut néanmoins disposer d'un outil analytique permettant de réaliser des prévisions.
- Souvent en électronique, l'ingénieur doit avoir conscience des ordres de grandeurs. Une erreur de 10% est acceptable, car la précision sera obtenue avec une simulation du circuit. Le simulateur utilisé dispose de modèles approxinant mieux les dispositifs étudiés.
- Si les modèles utilisés sont de natures linéaires, alors la panoplie de méthodes étudiées auparavant sera facilement exploitée.

Utilisation de Modèles pour la diode



Dans certains cas d'utilisation de la diode, l'exponentielle peut être approximée par le modèle à chute de tension suivant :

Modèle le plus commun



10

Nous proposons trois modèles qui seront exploités convenablement dans des applications bien spécifiques

Le premier modèle nous indique que la diode conduit dès que la tension appliquée à ses bornes est positive. La diode ne conduit pas pour des tensions négatives. Ce type de modèle est valable en logique ou pour des fonctionnalités analogiques ne nécessitant pas de précision (détection de seuil, redressement, ... voir ultérieurement). On note aussi que le courant qui circule dans la diode est quelconque. En fait il sera imposé par l'environnement auquel est connectée la diode.

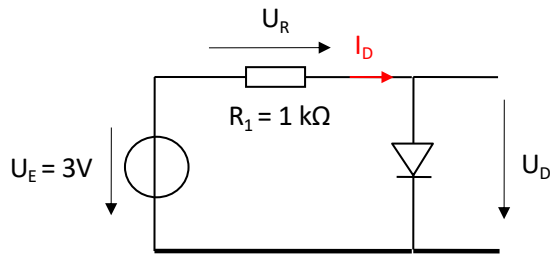
Le second modèle est le plus utilisé. Nous avons vu auparavant que la diode au silicium conduisait lorsque la tension à ses bornes valait environ $0,7\text{ V}$

Nous considérons alors cette tension de $0,7\text{ V}$ quasi constante. On dira que lorsque la diode conduit, la tension à ses bornes vaut $U_j = 0,7\text{ V}$

Ici aussi le courant qui traversera la diode dépendra de l'environnement.

Le troisième modèle sera utilisé lorsque l'on superposera des signaux DC et AC. C'est en fait la combinaison de deux modèles, U_j pour le DC et une résistance de faible valeur pour AC (si faibles variations) que nous apprendrons à évaluer ultérieurement.

Usage du Modèle $U_D = U_j$: DANGER !!!!



Prenons $U_D = U_j$

Comparons $I_{D1} = \frac{U_E - U_j}{R_1}$ et $I_{D2} = I_S e^{\frac{U_j}{nU_T}}$

Erreur sur la tension: Imaginons que $U_{D\text{réel}} = 0.674\text{ V} \Rightarrow$
 U_j correspond en tension à une erreur de l'ordre de 3%

Erreur sur I_{D1} = 1 % (diminue si U_E augmente)

Erreur sur I_{D2} = 270 %

11

Si nous substituons la loi exponentielle par le modèle, nous allons obtenir des prévisions tout à fait correctes à supposer que l'on utilise une loi linéaire comme celle de la loi d'ohm

$$I_D = [U_E - U_j]/R$$

Avec l'exemple proposé ($U_E = 3V$ et $R = 1K$), nous proposons d'évaluer l'erreur provoquée sur le courant si nous substituons le modèle $U_j = 0.7V$ à la valeur réelle.

Si cette valeur réelle vaut $0.674V$, le modèle induit 3% d'erreur sur la tension, mais plus que 1% d'erreur sur le courant.

Remarque 1 : Ne jamais prendre le modèle U_j pour exploiter la loi exponentielle. Avec 3% d'erreur sur U_j , la loi exponentielle donne 270% d'erreur sur le courant !!!!!

Remarque 2 : Le modèle est d'autant plus fiable que la tension U_E est plus élevée que $0.7V$ (limite de conduction de la diode).

Si $U_E = 3V$ et $R = 1K$, une erreur de 3% sur U_j induit déjà près de 9% d'erreur sur le courant et cela empire au fur et à mesure que l'on se rapproche des $0.7V$

Deux méthodes de calcul avec le modèle U_j

Calcul du courant via la loi exponentielle

$$I_{D2R\acute{e}el} = I_S e^{\frac{0.674}{0.026}} \text{ et } I_{D2Mod\grave{e}le} = I_S e^{\frac{0.700}{0.026}}$$

Erreur monstrueuse

$$\frac{I_{D2Mod\grave{e}le}}{I_{D2R\acute{e}el}} = \frac{e^{\frac{0.700}{0.026}}}{e^{\frac{0.674}{0.026}}} = e^{\frac{0.700-0.674}{0.026}} = e$$

Calcul du courant via la loi d'ohm (linéaire)

$$I_{D1Mod\grave{e}le} = \frac{U_E - U_j}{R_1} = \frac{3 - 0.7}{1000} = 2.3 \text{ mA}$$

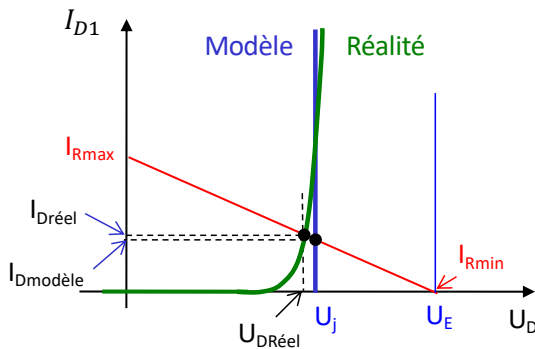
Erreur faible

$$I_{D1R\acute{e}el} = \frac{U_E - U_{Dr\acute{e}el}}{R_1} = \frac{3 - 0.674}{1000} = 2.326 \text{ mA}$$

12

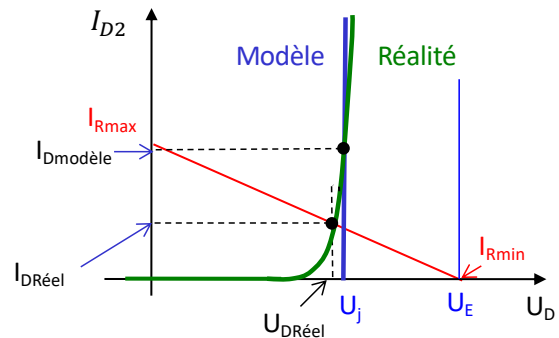
Les chiffres parlent d'eux-mêmes

Vérification graphique



Exploitation:

- Loi d'ohm
- Droite de charge
- Et $I_{D1} = \frac{U_E - U_j}{R_1}$



Exploitation

- Loi exponentielle
- $I_{D2} = I_s e^{\frac{U_D}{nU_T}}$

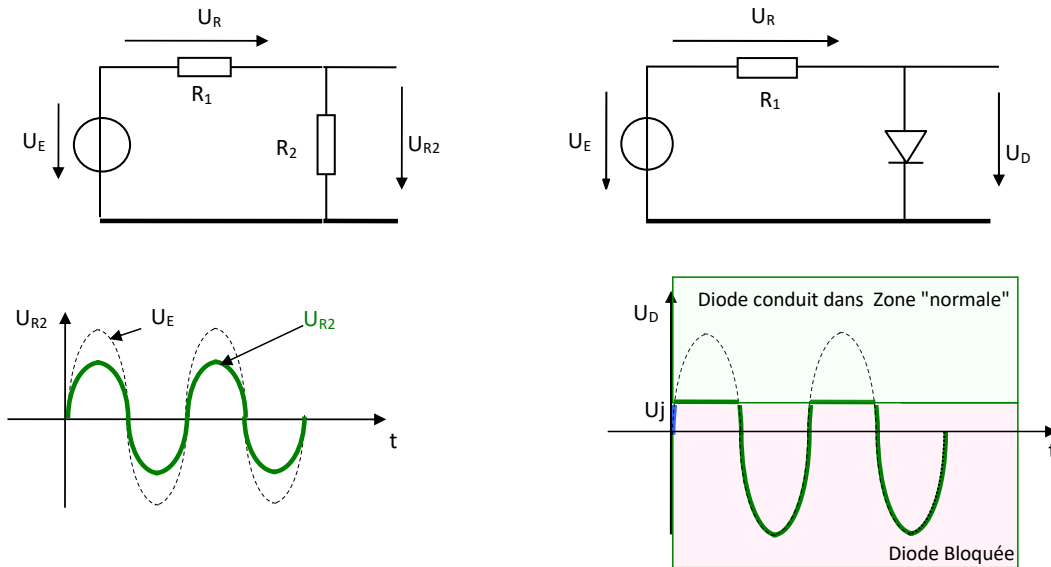
13

Nous pouvons vérifier graphiquement que les erreurs obtenues sont négligeables.

En utilisant le modèle et la loi d'ohm, l'intersection entre la droite de charge et le modèle nous donne un point de repos valant $(U_j, I_{Modèle})$ très proche de la réalité

En revanche, le calcul du courant via le modèle associé à la loi exponentielle donne une erreur significative par rapport à la réalité (comme si on disposait d'une charge fictive beaucoup plus petite, donc pente plus grande, dans cet exemple - en pointillés)

Comparaison Résistances - Diodes: Pour les grands signaux - Sens Normal



14

Nous poursuivons nos comparaisons entre diode et résistance, mais pour des signaux de grandes amplitudes (analyse grands signaux).

Dans le cas du diviseur résistif, la tension entre R_2 est toujours exprimée en fonction de U_E et du rapport $R_2/(R_1+R_2)$

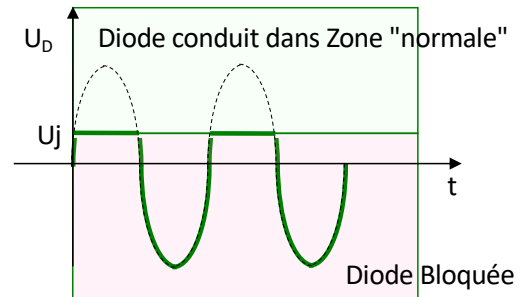
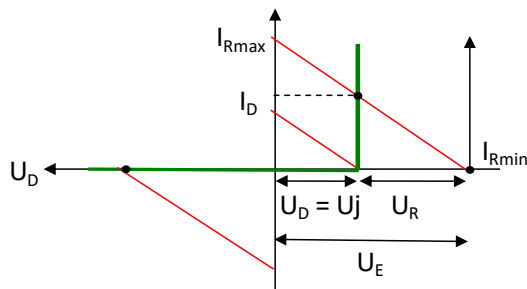
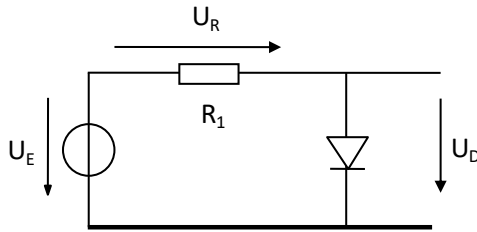
Dans le cas de la diode, tout dépend si celle-ci conduit ou pas.

Quand la diode est bloquée (si la tension $U_E < 0.7V$ selon le modèle), alors aucun courant ne circule dans la diode, ni évidemment dans la résistance. Dans ce cas il n'y a aucune chute de potentielle due à R et la tension à la sortie vaut donc U_E .

Quand la diode conduit (la tension $U_E > 0.7V$), alors la tension à ses bornes ne bouge pratiquement pas et vaut $0.7V$. On dit que la diode écrête la tension de sortie à $0.7V$

Cette explication peut facilement être déduite du graphe et de la droite de charge..

Explication pour les grands signaux



Les courbes réelles sont un peu différentes!

15

La pente de la droite de charge est constante quelle que soit la tension appliquée en U_E . Normal puisque la valeur de la résistance ne bouge pas.

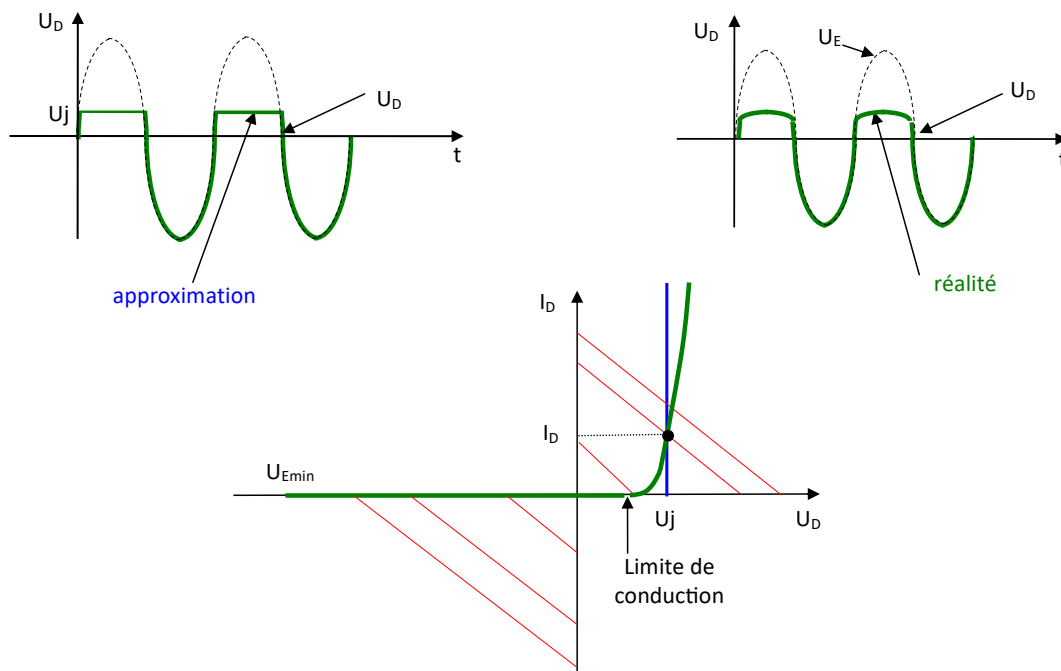
Cependant la position de cette droite de charge dépend de la tension U_E . Il y a une infinité de positions entre les tensions U_{EMAX} et U_{EMIN} .

Les droites de charge issues des tensions comprises entre U_j et U_{EMAX} intersecte la caractéristique verticale du modèle de la diode. Dans tous ces cas la diode conduit et impose 0.7V à ses bornes, donc à la sortie.

Les droites de charge issues des tensions comprises entre U_{EMIN} et U_j n'intersecte pas la caractéristique verticale du modèle de la diode.

Dans tous ces cas la diode ne conduit pas et la sortie a la même valeur que l'entrée.

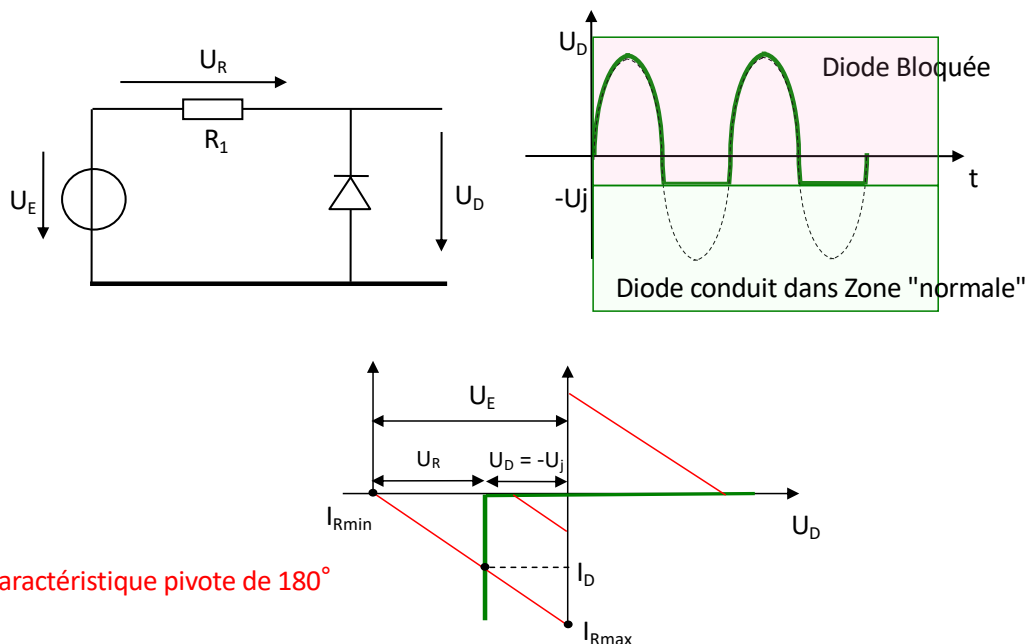
La réalité



16

Si l'on observe la réalité, on constate que l'écrêtage n'est pas si net, mais qu'il est plutôt bombé. Ceci provient du fait que dans la réalité les droites de charges n'intersectent pas la caractéristique verticale du modèle, mais la loi exponentielle de la diode réelle.

Grands signaux: Montage diode en inverse



17

Si l'on inverse la diode dans le montage, on obtient un écrêtage des tensions inférieures à 0.7V

En revanche pour les tensions supérieures à 0.7V, la diode est bloquée et la sortie vaut l'entrée pour les mêmes raisons que précédemment.

Travailler « la tête en bas » est plus complexe. En effet la tension de sortie U_D est opposée au sens passant de la diode. Si la diode conduit (du bas vers le haut, cela signifie que la tension de la cathode vaut 0.7V de moins que celle de l'anode. Or cette dernière vaut 0V, aussi U_D (tension de la cathode) vaut $-U_j = -0.7V$

L'observation de la droite de charge reste une méthode d'analyse tout aussi valable dans cet exemple.

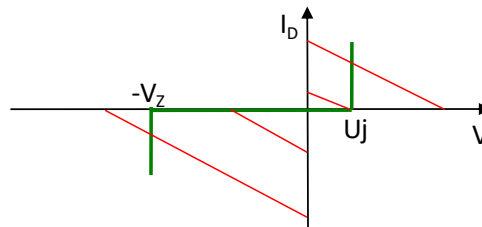
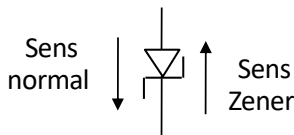
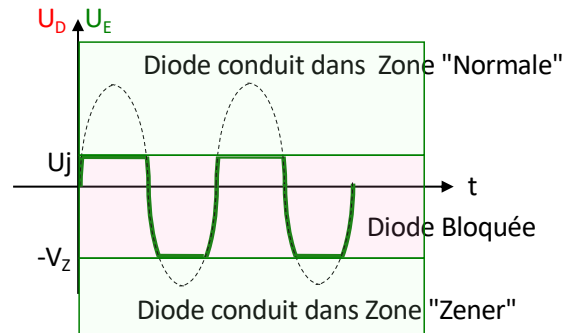
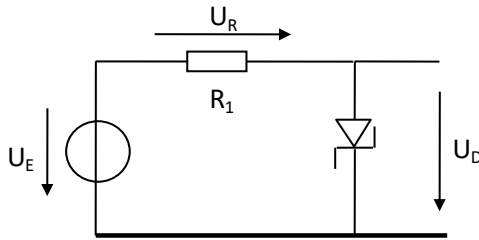
Les droites de charge issues des tensions comprises entre U_{EMIN} et $-U_j$ intersecte la caractéristique verticale du modèle de la diode.

Dans tous ces cas la diode conduit et impose -0.7V à ses bornes, donc à la sortie.

Les droites de charge issues des tensions comprises entre $-U_j$ et U_{EMAX} n'intersecte pas la caractéristique verticale du modèle de la diode. Dans tous ces cas la diode ne conduit pas et la sortie a la même valeur que l'entrée.

Diode Zener dans le sens normal

Limitation de tension avec une zener



18

Si l'on substitue une diode normale par une diode Zener, on s'intéresse à la fois à la caractéristique verticale U_j , mais aussi à la caractéristique négative $-V_z$ (tension Zener).

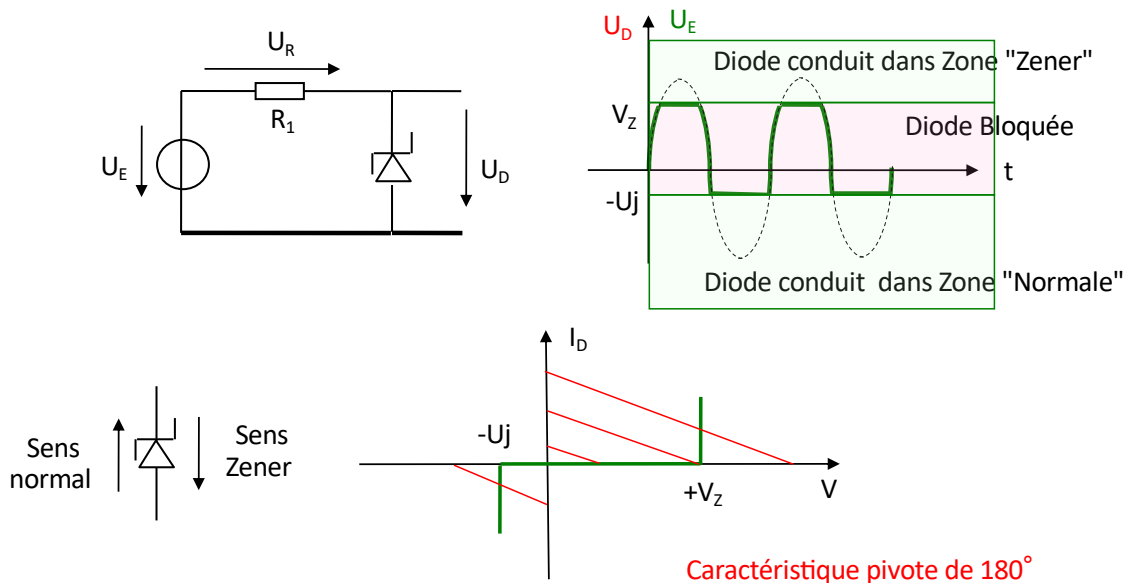
Il y a donc trois zones dont l'étude nous intéresse.

Zone 1 : Tensions comprises entre U_j et U_{EMAX} . La tension à la sortie est écrêtée à U_j comme nous pouvons aussi le vérifier sur le graphique intégrant la droite de charge

Zone 2 : Tensions comprises entre $-V_z$ et U_j . La tension à la sortie correspond à la tension d'entrée car la diode ne fonctionne pas, bloquée dans le sens normal et bloquée dans le sens Zener.

Zone 3 : Tensions comprises entre U_{EMIN} et $-V_z$. La tension à la sortie est écrêtée à $-V_z$ comme nous pouvons aussi le vérifier sur le graphique intégrant la droite de charge.

Diode Zener dans le sens inverse



19

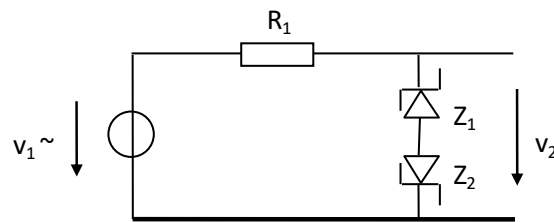
Si on retourne la Zener, nous obtenons une caractéristique duale de la précédente.

Zone 1 : Tensions comprises entre U_{EMIN} et $-U_j$. La tension à la sortie est écrêtée à $-U_j$ comme nous pouvons aussi le vérifier sur le graphique intégrant la droite de charge.

Zone 2 : Tensions comprises entre $-U_j$ et $+V_Z$. La tension à la sortie correspond à la tension d'entrée car la diode ne fonctionne pas, bloquée dans le sens normal et bloquée dans le sens Zener.

Zone 3 : Tensions comprises entre $+V_Z$ et U_{EMAX} . La tension à la sortie est écrêtée à $+V_Z$ comme nous pouvons aussi le vérifier sur le graphique intégrant la droite de charge

Exemple



v_1 est une source de tension alternative sinusoïdale de 12 V, $V_{Z1} = 4.3\text{V}$, $V_{Z2} = 6.3\text{V}$.

1. Dessiner le signal de sortie $v_2(t)$.
2. Calculer R_1 pour que le courant maximal $I_{\max}$ traversant les diodes ne dépasse pas 50 mA.
3. Dessiner le signal de sortie $v_2(t)$ lorsqu'une résistance de charge $R_L = 100\ \Omega$ est appliquée aux bornes du montage.

20

Si on dispose de deux zeners tête-bêche, il est possible que les deux conduisent en même temps.

Par exemple que la Zener 1 conduise sous l'effet Zener et la Zener 2 comme une diode normale, ou alors que la zener 1 conduise comme une diode normale (mais vers le haut) et la Zener 2 dans le sens Zener.

Lorsque les deux diodes conduisent, alors la tension à la sortie vaut la somme des tensions à leurs bornes.

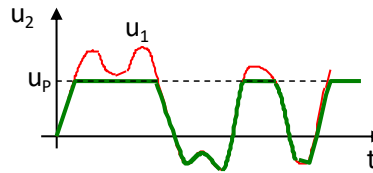
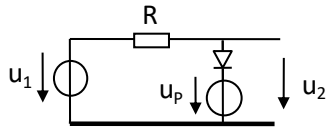
Soit $V_{Z1} + U_j$, possible si $v_1 > V_{Z1} + U_j$

Soit $-V_{Z2} - U_j$, possible si $v_1 < -V_{Z2} - U_j$

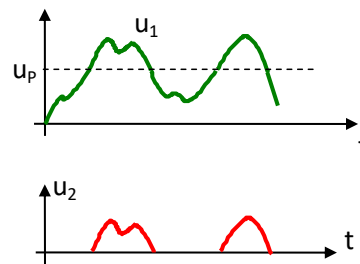
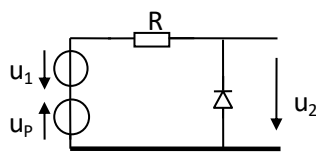
Dans tous les autres cas $-V_{Z2} - U_j < v_1 < V_{Z1} + U_j$, la tension à la sortie vaut la tension v_1 à l'entrée car les diodes sont bloquées-

Montages spéciaux

Limiteur



Détecteur à seuil



21

En exploitant l'analyse des diodes montées en inverse ou dans le sens normal, il est possible de créer des fonctions particulières, comme le limiteur de tension et le détecteur de seuil.

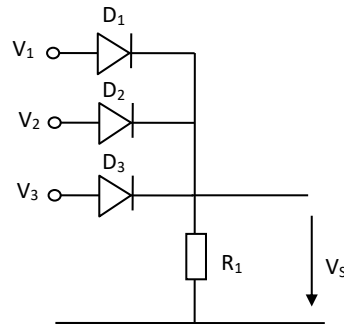
Le limiteur rappelle l'écèlement à 0.7 V. Mais la diode étant reliée à une tension U_p , cet écèlement est décalé de U_p .

Le Détecteur de seuil rappelle l'écèlement à $-U_j$.

La tension v_1 analysée est comparée à $-U_p$. Donc l'écèlement à $-U_j$ s'effectuera si $v_1 - U_p < -U_j$ ou si $v_1 < U_p - U_j$

Pour simplifier l'analyse des deux courbes, nous avons opté pour le modèle où $U_j = 0V$

Détecteur de tension la plus élevée



Raisonner par l'absurde

22

Avec ce montage il est facile de vérifier que la tension à la sortie correspond (à U_j près) à la tension la plus élevée.

En effet il faut se rappeler que lorsqu'une diode fonctionne la tension à ses bornes est limitée à environ 0.7V

Imaginons que $v_1 = 1V$, $v_2 = 2V$ et $V_3 = 3V$

Si la diode D_1 fonctionnait, il y aurait 2.7V aux bornes de la diode D_3 , car la sortie $V_s = v_1 - U_j = 0.3V$. Ceci est impossible. Moins dramatique, mais tout aussi impossible, si la diode D_2 fonctionnait. Il y aurait encore 1.7 V aux bornes de D_3