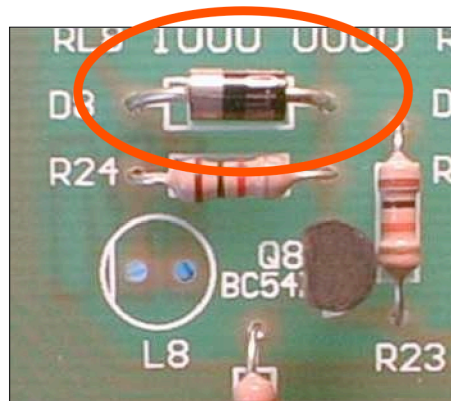


Chapitre 5: Les diodes

5.1 - Introduction

La diode est le semi-conducteur le plus "simple"



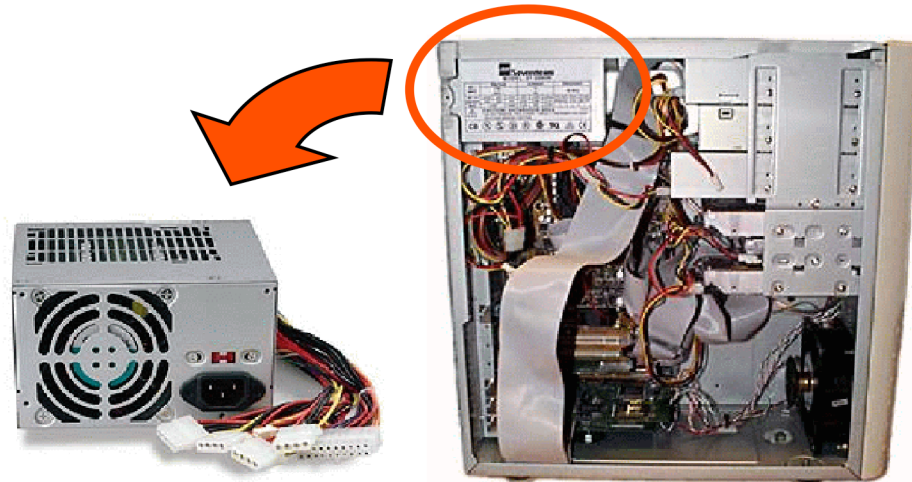
3

La diode est le semi-conducteur le plus "simple"

La diode est généralement le premier composant semi-conducteur présenté dans tous les cours d'électronique. Ceci vient du fait que parmi les différents composants semi-conducteurs, la diode possède la structure interne la plus simple.

Comme nous le verrons, le comportement externe d'une diode n'est par contre pas trivial à appréhender. En particulier, résoudre un circuit à diodes est une opération délicate.

Les diodes sont surtout utilisées pour *redresser* une tension...



4

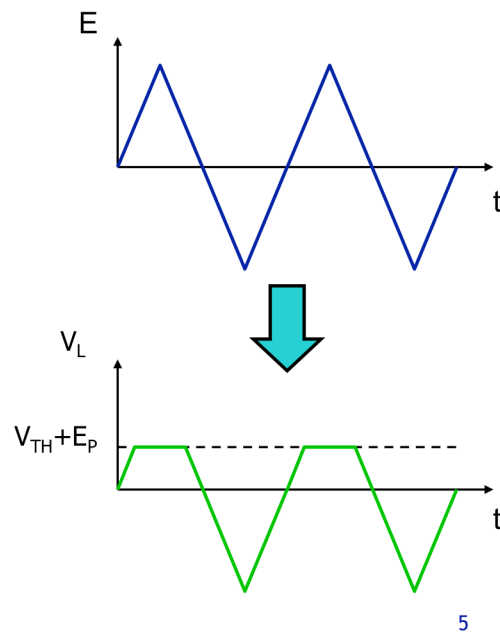
Les diodes sont surtout utilisées pour redresser une tension...

La première fonction de base d'une diode, c'est de redresser une grandeur électrique (tension ou courant), c'est-à-dire de convertir une grandeur alternative (=successivement positive et négative) en une grandeur exclusivement positive.

Cette fonction est notamment essentielle dans les alimentations électriques. Or tout dispositif électronique a besoin d'être alimenté pour fonctionner...

Le redressement est également utilisé pour démoduler des signaux, par exemple pour la radio en modulation d'amplitude (gamme AM). Ce cas sera expliqué plus loin dans ce chapitre.

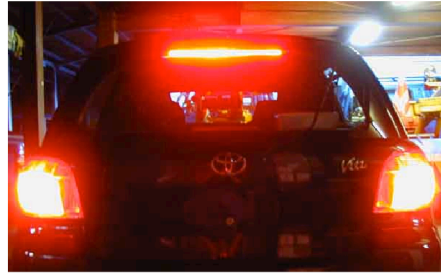
...ou pour *limiter* une tension (écrêtage)



...ou pour limiter une tension

La deuxième fonction de base que peut remplir une diode, c'est de limiter la tension sur d'autres composants, ce qu'on appelle "écrêtage". Cette limitation de tension peut par exemple servir à protéger ces autres composants de surtensions éventuelles ou encore à maintenir une tension constante à leurs bornes (régulation de tension).

Les diodes sont également très présentes sous forme de *LEDs*



6

Les diodes sont également très présentes sous forme de *LEDs*

Une toute autre application des diodes, c'est celle de témoin lumineux. Certaines diodes (appelées "LEDs" pour Light Emitting Diode = diode émettrice de lumière ou encore "diode électroluminescente") émettent en effet de la lumière lorsqu'elles sont traversées par un courant.

De très nombreux témoins lumineux autour de nous sont en fait des LEDs, donc des diodes (mais n'en concluez pas que tout ce qui s'allume est une LED!).

Chapitre 5: Les diodes

5.2 - La diode à jonction PN (idéale)

7

Il existe plusieurs types de diodes. La diode la plus classique est la "diodé à jonction PN", qui sera l'objet des sections 5.2 à 5.6.

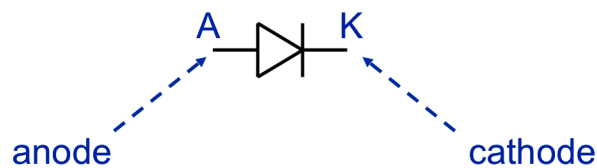
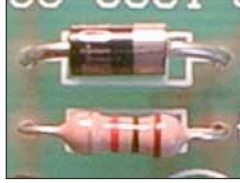
Dans un premier temps (sections 5.2 à 5.5), nous envisagerons une diode à jonction PN idéalisée.

Quelques propriétés supplémentaires des diodes réelles seront présentées à la section 5.6

Enfin nous verrons d'autres types de diodes à la section 5.7.

La diode est un composant à deux bornes, appelées anode et cathode

diode ----->



8

La première chose à retenir est que... **La diode est un composant à deux bornes** ("di-ode" ne signifie d'ailleurs rien d'autre que "composant à deux bornes".)

Le symbole de la diode est celui montré ci-dessus:

- la borne qui se trouve du côté du "triangle" est appelée **anode**. Elle est généralement désignée par la lettre "A"
- la borne qui se trouve du côté de la "barre" est appelée **cathode**. Elle est généralement désignée par la lettre "K"

Au contraire des résistances, les diodes possèdent donc un sens (les deux côtés ne sont pas interchangeables!).

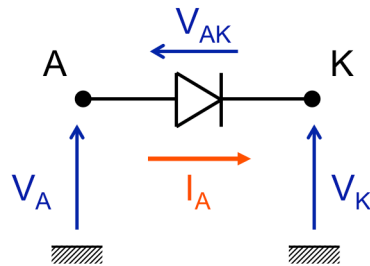
Sur les diodes réelles est imprimé un anneau (à droite sur la photo ci-dessus) qui correspond à la "barre" du symbole, donc à la cathode.

N.B.: De manière générale en électricité ou en électronique...

- Le terme "cathode" désigne une borne qui "émet" des électrons
- Le terme "anode" désigne une borne qui "capte" des électrons

C'est bien le cas de la diode: comme expliqué dans la dia suivante, dans une diode le courant va toujours de l'anode vers la cathode (or les électrons vont dans le sens inverse du courant conventionnel).

La diode est un composant passif et n'admet de courant que dans le sens A->K



9

Décrivons maintenant les principales propriétés de la diode idéale:

1) La diode n'admet de courant que dans le sens A->K

Le courant ne peut traverser une diode que de l'anode vers la cathode (*), c'est-à-dire dans le sens indiqué par le symbole de la diode lui-même.

Lorsqu'on définit un courant dans une diode, il est donc logique d'orienter la flèche correspondante de A vers K (car alors ce courant est positif).

2) La diode est un composant passif

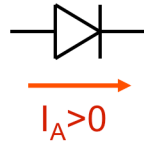
C'est-à-dire que la diode peut uniquement consommer de l'énergie.

Puisque la diode est un dipôle passif, il est donc logique d'orienter la flèche de tension (ddp) dans le sens opposé à celui de la flèche de courant, c'est-à-dire de K vers A ($V_{AK} = V_A - V_K$).

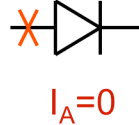
(*) Cette affirmation n'est vraie que pour une diode idéalisée. La réalité est un peu plus complexe comme nous le verrons dans le chapitre sur les diodes réelles.

La diode (idéale) possède deux états

diode *passante*



diode *bloquante*



10

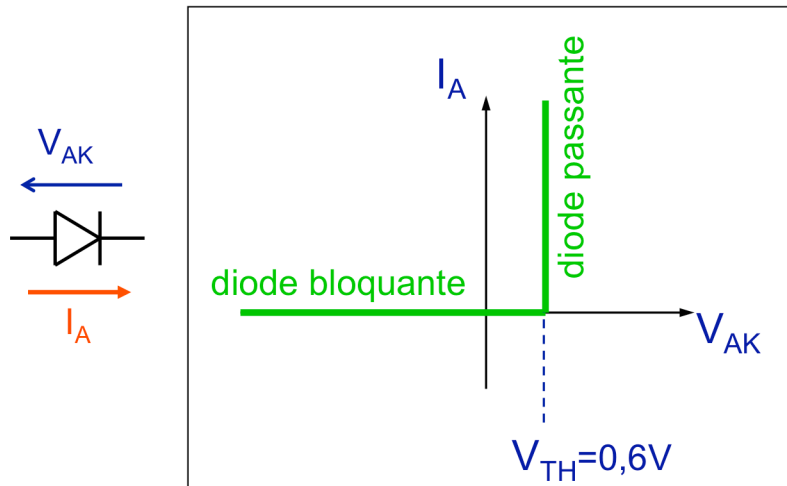
Troisième propriété, qui résume à elle seule ce qu'est une diode: **la diode possède deux états.**

Plus exactement, une diode idéale est à tout instant dans un des deux états suivants (mutuellement exclusifs):

- soit elle est "passante", c'est-à-dire qu'elle laisse passer le courant (uniquement de A vers K)
- soit elle est "bloquante" (ou "coupée"), c'est-à-dire qu'elle ne laisse pas passer de courant

La diode possède donc un comportement en "tout ou rien" (raison pour laquelle nous avons utilisé ci-dessus le symbole d'une ampoule allumée ou éteinte).

La caractéristique d'une diode idéale est "en angle droit"



11

Précisons encore davantage le comportement de la diode en examinant sa caractéristique. Celle-ci se trace dans le plan (I, V) , I étant le courant traversant la diode et V la ddp sur cette diode. Dans ce plan, **la caractéristique d'une diode idéale est "en angle droit"**:

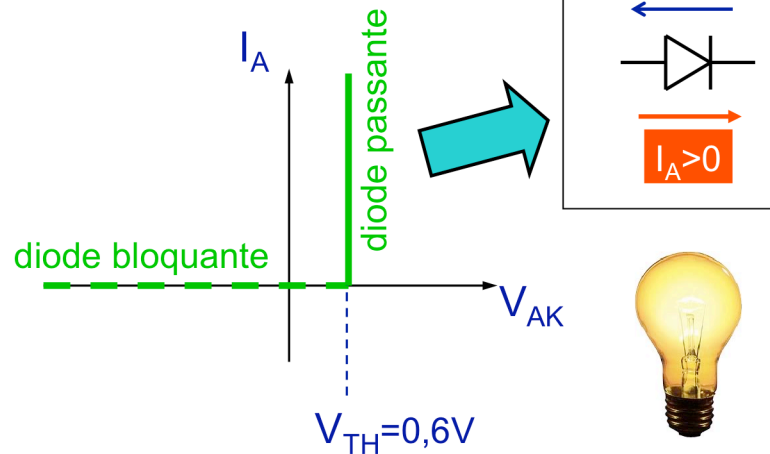
Chaque côté de l'angle correspond en fait à un des deux états de la diode:

- La partie horizontale de la caractéristique représente l'état bloquant de la diode (en effet: le courant y est nul)
- La partie verticale de la caractéristique représente l'état passant de la diode (en effet: le courant y est positif)

La valeur V_{TH} est appelée **tension de seuil** de la diode. Dans la plupart des cas (en tous cas pour les diodes PN), on peut considérer qu'elle vaut 0,6V.

Cette valeur représente la ddp à laquelle la diode passe de l'état passant à l'état bloquant ou inversement (TH signifiant "threshold" = "seuil").

Lorsque la diode est passante...



12

Analysons la caractéristique un peu plus en détail...

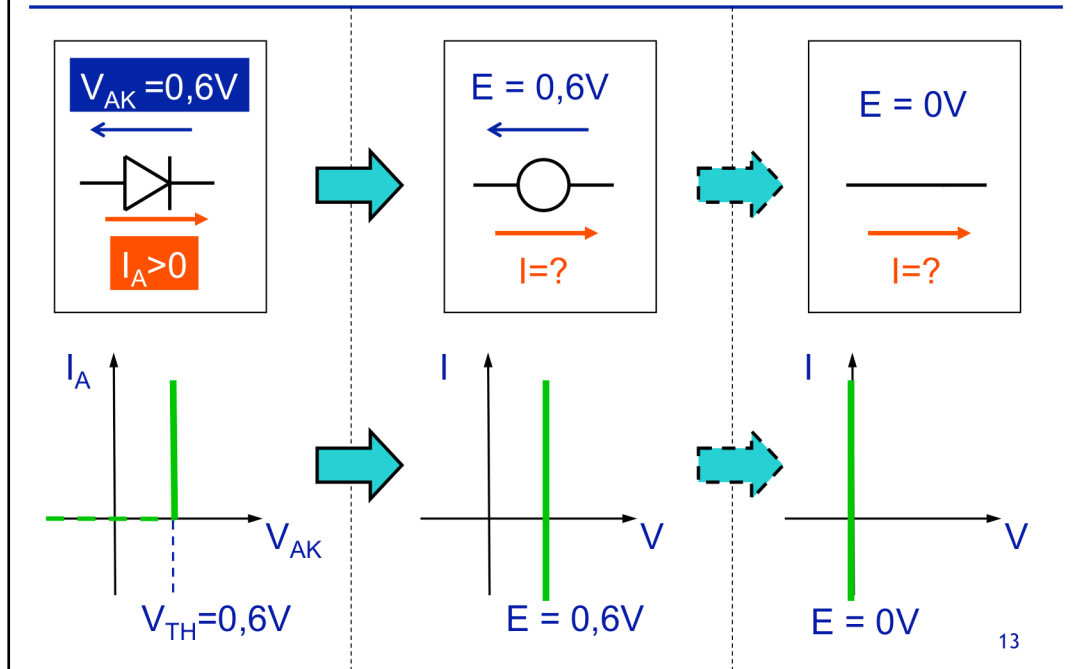
Lorsque la diode est passante... la caractéristique nous apprend que:

- 1) Le courant est positif (ça nous le savions déjà)
- 2) la ddp sur la diode vaut V_{TH} ($=0.6V$)

Nous pouvons résumer ces conditions sous forme de deux relations mathématiques (une égalité et une inégalité: voir encadré en haut à droite) qui, ensemble, sont équivalentes à la demi-droite verticale de la caractéristique. Cette paire de relations représente donc en quelque sorte "l'équation" de la diode *lorsqu'elle est passante*.

Pour rappel: les valeurs exactes de I et de V vues par la diode à un instant donné seront fixées par le circuit extérieur.

Une diode passante peut être assimilée à une source de tension idéale (V_{TH})



Pour une meilleure compréhension (et aussi parce que cela nous sera utile au moment de résoudre des circuits contenant des diodes), il est intéressant d'essayer de "raccrocher" le comportement de la diode à quelque chose de déjà connu.

On se rend compte qu'**une diode passante peut être assimilée à une source de tension idéale de valeur V_{TH}** .

En d'autres termes, la diode, lorsqu'elle est passante, se comporte électriquement (vu de l'extérieur) comme une telle source de tension. En effet:

- 1) La caractéristique d'une source de tension idéale de valeur E est une droite verticale située à l'abscisse E
- 2) Une telle source impose la ddp à ses bornes, mais pas le courant, tout comme le fait la diode lorsqu'elle est passante.

La seule différence entre la diode et la source de tension est le fait que le courant dans la source de tension peut être négatif (la caractéristique s'étend dans le demi-plan inférieur).

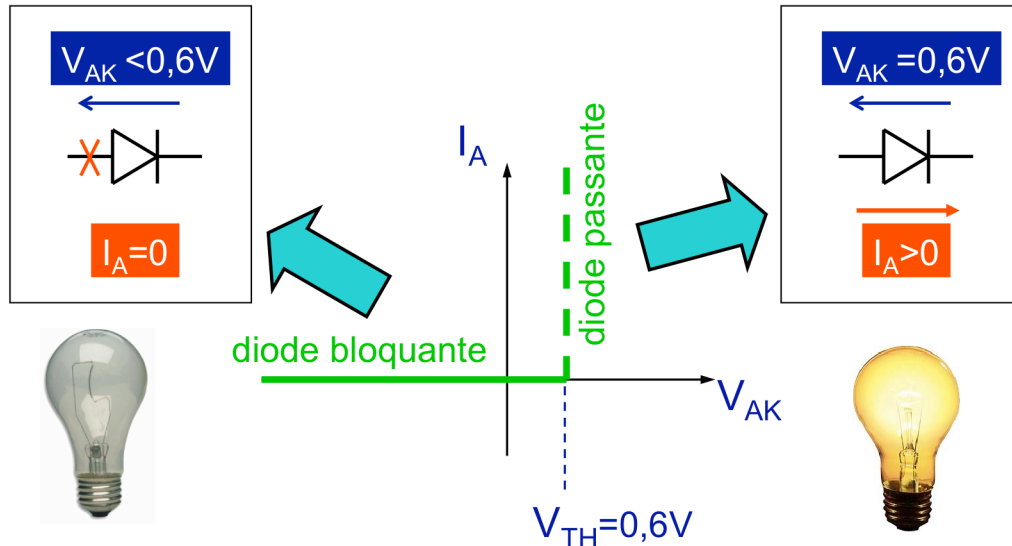
Lorsque nous rencontrerons une diode passante dans un schéma, nous pourrons donc la remplacer par une source de tension de 0,6V !

On peut même aller plus loin (à droite):

Si toutes les tensions présentes dans le circuit sont nettement supérieures à 0,6V, on peut faire l'approximation que V_{TH} vaut 0V. Dans ce cas, la diode peut être assimilée à une source de tension de valeur nulle, c'est-à-dire... à un court-circuit. Rappelons qu'un court-circuit impose une tension nulle à ses bornes sans imposer de condition sur le courant: la caractéristique d'un court-circuit est une droite confondue avec l'axe vertical des courants.

Lorsque nous rencontrerons une diode passante dans un schéma et que l'on peut faire l'approximation que V_{TH} est nulle, nous pourrons donc remplacer cette diode par un court-circuit!

Lorsque la diode est bloquante...



14

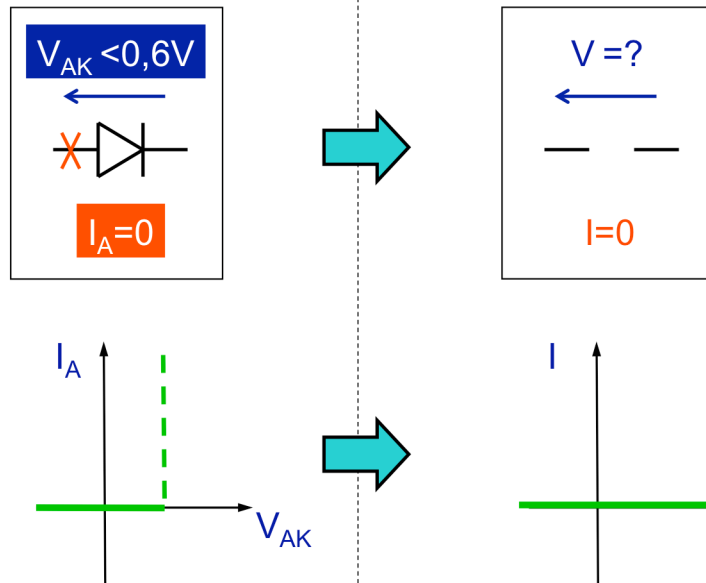
Voyons maintenant la seconde partie de la caractéristique.

Lorsque la diode est bloquante... la caractéristique nous apprend que:

- 1) Le courant est nul (ça nous le savions déjà)
- 2) la ddp sur la diode est inférieure à V_{TH} ($=0,6V$)

Nous pouvons résumer ces conditions sous forme de deux relations mathématiques (une égalité et une inégalité: voir encadré en haut à gauche) qui, ensemble, sont équivalentes à la demi-droite horizontale de la caractéristique. Cette paire de relations représente donc en quelque sorte "l'équation" de la diode *lorsqu'elle est bloquante*.

Une diode bloquante peut être assimilée à un circuit ouvert



15

Une diode bloquante peut être assimilée à un circuit ouvert.

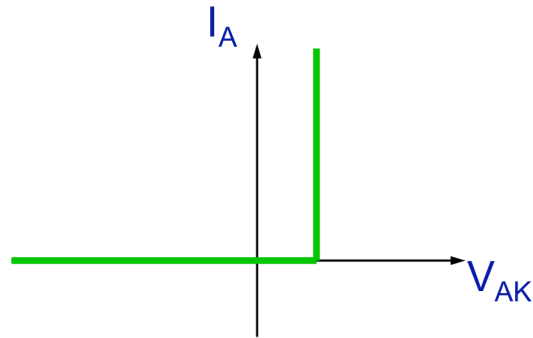
En d'autres termes, la diode, lorsqu'elle est bloquante, *se comporte électriquement* (vu de l'extérieur) comme un circuit ouvert. En effet:

- 1) La caractéristique d'un circuit ouvert est une droite horizontale qui se confond avec l'axe des tensions
- 2) Une telle source impose un courant nul, mais pas la ddp à ses bornes, tout comme le fait la diode lorsqu'elle est bloquante.

La seule différence entre la diode et le circuit ouvert est le fait que la tension peut être supérieure à V_{TH} pour le circuit ouvert (la caractéristique s'étend sur tout l'axe des tensions).

Lorsque nous rencontrerons une diode bloquante dans un schéma, nous pourrons donc remplacer cette diode par un circuit ouvert!

La diode est un composant *non-linéaire*



16

Enfin **la diode est un composant non-linéaire** puisque sa caractéristique n'est pas une droite. Cette propriété est directement liée au comportement électrique en "tout ou rien" de la diode.

Conséquence importante: on ne peut pas résoudre un circuit à diodes en utilisant le principe de superposition.

Synthèse

- La diode (idéale) est un composant...
 - ...semiconducteur
 - ...à deux bornes (anode et cathode)
 - ...non symétrique (courant unidirectionnel)
 - ...passif
 - ...à deux états (passante ou bloquante)
 - ...non linéaire
 - ...possédant une caractéristique en angle droit dont chaque côté est assimilable à un dipôle bien connu

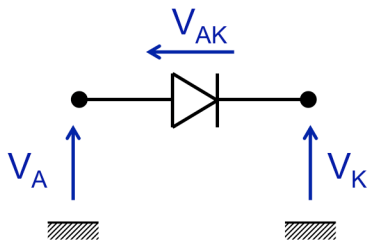
Chapitre 5: Les diodes

5.3 - Résoudre un circuit à diodes

18

Après avoir vu les principales propriétés de la diode idéale, voyons comment, de manière générale, on peut résoudre un circuit à diodes.

Ne confondez pas potentiel et ddp !



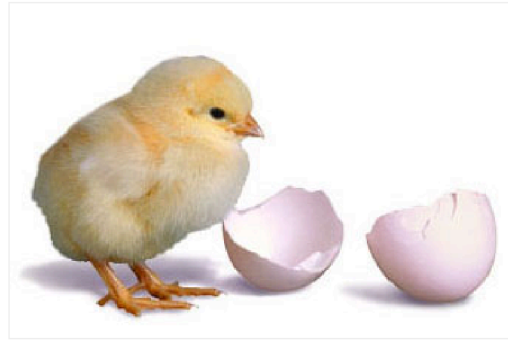
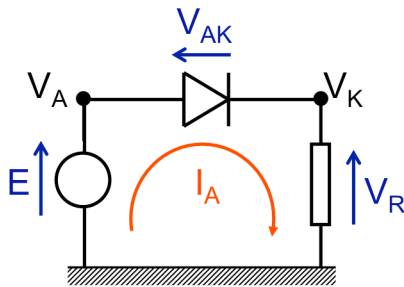
19

Une erreur courante est susceptible de vous engager dans une résolution complètement erronée:
Ne confondez pas potentiel et ddp

Comme pour les autres dipôles, il est crucial de ne pas confondre la tension *sur l'une des bornes de la diode* (c'est-à-dire V_A ou V_K , deux potentiels définis par rapport à la masse 0V) avec la tension *sur la diode*, c'est-à-dire la ddp $V_{AK} = V_A - V_K$.
C'est bien la ddp V_{AK} qui figure sur l'axe horizontal de la caractéristique (et qui par exemple vaut V_{TH} si la diode est passante).

Résoudre un schéma à diodes par la méthode canonique pose problème...

"écrire la loi du dipôle"???



20

Essayons maintenant de résoudre un circuit contenant une diode en appliquant la méthode classique de résolution présentée dans le vademecum.

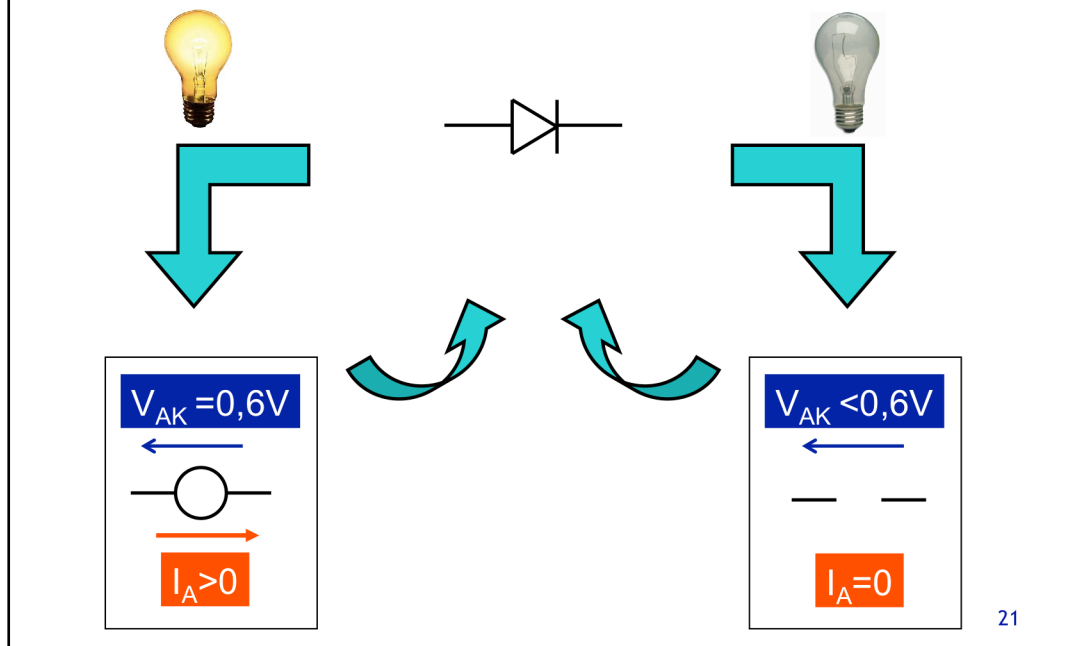
Ayant défini les signes des tensions (V_{AK} et V_R) et des courants (I_A) comme dans la di ci-dessus, on voit que:

- Il y a 3 inconnues: V_{AK} , V_R et I_A

Il nous faut donc 3 équations:

- Une première relation est donnée par: $E = V_{AK} + V_R$ (loi des mailles)
- Une deuxième relation est donnée par la loi de la résistance: $V_R = R \cdot I_A$
- La troisième relation devrait être la loi de la diode, liant V_{AK} à I_A (ou donnant la valeur d'une de ces deux grandeurs). Le problème est que cette loi n'est pas exprimable en une seule équation puisque la diode se comporte en "tout ou rien": il y a en fait deux lois différentes suivant que la diode est passante (loi: $V_{AK} = 0,6V$) ou bloquante (loi: $I_A = 0$). Pour savoir quelle loi prendre, il faut connaître l'état de la diode. Or l'état d'une diode dépend précisément des valeurs de tension et de courant qui lui sont appliquées. On tourne donc en rond: sans connaître l'état de la diode on ne sait pas résoudre le circuit et sans avoir résolu le circuit, on ne connaît pas l'état de la diode...

Il faut utiliser un raisonnement par hypothèse



Pour casser le cercle vicieux décrit à la page précédent, il faut utiliser un raisonnement par hypothèse.

Pour rappel, un tel raisonnement consiste à:

- 1) poser une hypothèse
- 2) raisonner comme si cette hypothèse était exacte
- 3) vérifier si le résultat obtenu au terme de ce raisonnement est compatible avec l'hypothèse de départ. Si le résultat n'est pas compatible, l'hypothèse doit être rejetée et on recommence avec une autre hypothèse.

Dans le cas des schémas à diodes, ce principe s'applique de la manière suivante:

- 1) Pour chaque diode, il n'y a que deux hypothèses possibles (et qui s'excluent mutuellement): soit la diode est passante soit elle est bloquante

1bis) Chacun de ces états correspond à des conditions électriques bien précises:

- Si la diode est passante, $V_{AK} = 0,6V$ et $I_A > 0$
- Si la diode est bloquante, $I_A = 0$ et $V_{AK} < 0,6V$

Comme on l'a déjà signalé, il y a dans chaque cas deux relations: une égalité et une inégalité (représentant chaque fois une demi-droite dans le plan de la caractéristique).

- 2) Une fois l'état de la diode fixé (par hypothèse), il est donc possible d'imposer la loi correspondante (et en particulier l'égalité: soit $V_{AK} = 0,6V$ soit $I_A = 0V$) dans le circuit. A ce stade, le circuit peut alors être résolu.

N.B.: Pour plus de facilité, on peut à ce stade réécrire le schéma initial en remplaçant la diode par le dipôle auquel elle peut être assimilée (source de tension pour la diode passante / circuit ouvert pour la diode bloquante)

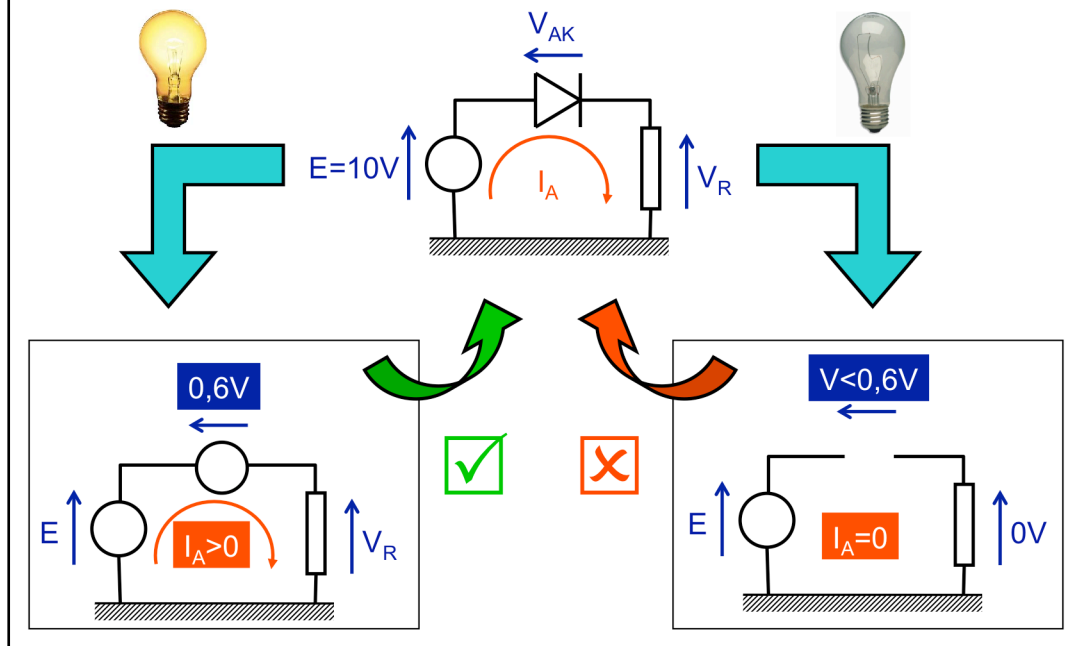
- 3) Une fois le circuit résolu, il faut vérifier la compatibilité du résultat obtenu avec l'hypothèse qui avait été faite. En particulier, il s'agit de vérifier la condition qui n'a pas encore été utilisée dans le raisonnement (et qui est en fait l'inégalité), c'est-à-dire:

- que $I_A > 0$ si on a choisi en 1) l'hypothèse d'une diode passante
- que $V_{AK} < 0,6V$ si on a choisi en 1) l'hypothèse d'une diode bloquante

Pour résoudre un circuit à diodes, il faut donc:

- a) bien maîtriser le raisonnement par hypothèse
- b) bien connaître les propriétés électriques d'une diode dans les états passant et bloquant

Ex1: circuit simple redresseur (E=+10V)



Voici un exemple dans le cas d'un circuit simple redresseur (circuit ci-dessus) pour lequel la source de tension est continue et vaut +10V.

1) Supposons que la diode est passante ("voie de gauche"):

1bis) Dans ce cas, on sait que V_{AK} vaut 0,6V et que le courant (défini de l'anode vers la cathode) doit être positif

2) Puisque la diode est passante, elle peut être remplacée par une source de tension de valeur 0,6V (attention au sens de cette source de tension).

2bis) Le schéma en bas à gauche (diode passante remplacée par une source de tension) peut être résolu très facilement:

- La tension sur la résistance vaut $E - 0,6V = 10V - 0,6V = 9,4V$

- Le courant vaut donc $I_A = V_R / R = 9,4mA$ (pour une résistance d' $1k\Omega$)

3) On vérifie si le résultat obtenu est conforme à l'hypothèse: la diode étant passante, elle doit observer l'inégalité $I_A > 0$. C'est bien le cas, donc l'hypothèse de la diode passante était correcte et tout le raisonnement ci-dessus est valable.

On peut vérifier que l'autre hypothèse menait à une contradiction:

1) Supposons que la diode est bloquante ("voie de droite")

1bis) Dans ce cas, on sait que le courant est nul et que V_{AK} doit être inférieur à 0,6V

2) Puisque la diode est bloquante, elle peut être remplacée par un circuit ouvert

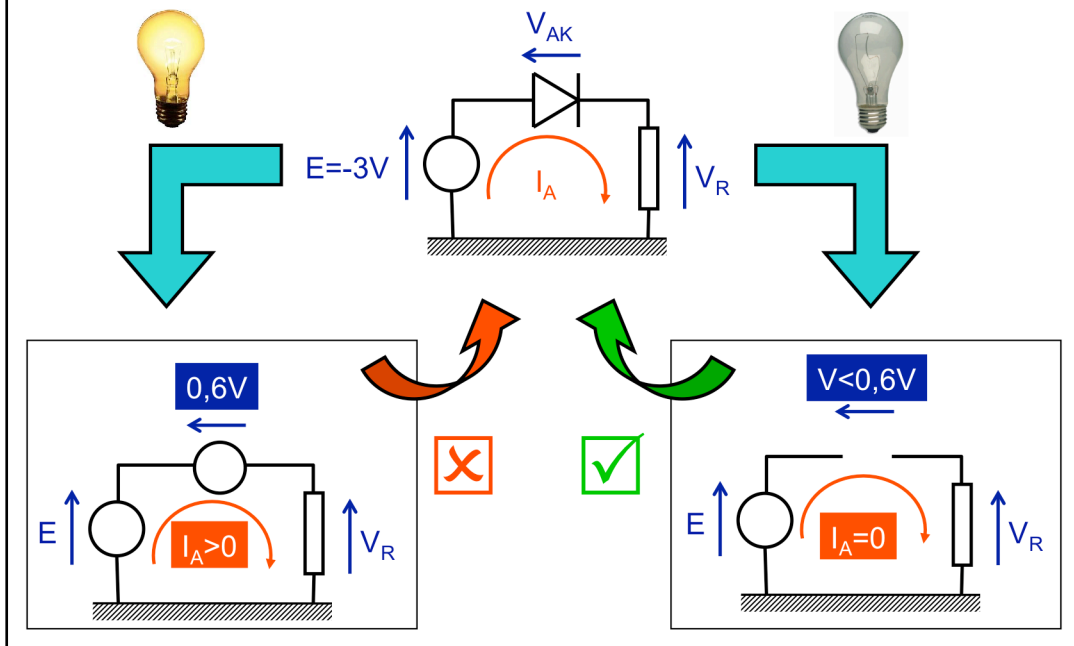
2bis) Le schéma en bas à droite (diode bloquante remplacée par un circuit ouvert) peut être résolu très facilement:

- Le courant étant nul, la ddp sur la résistance l'est également ($V = R \cdot I$): $V_K = V_R = 0V$

- D'autre part V_A vaut $E = 10V$. Donc $V_{AK} = V_A - V_K = 10V$

3) On vérifie si le résultat obtenu est conforme à l'hypothèse: la diode étant bloquante, elle doit observer l'inégalité $V_{AK} < 0,6V$. Or d'après notre raisonnement $V_{AK} = 10V$. L'hypothèse de la diode bloquante et le raisonnement ci-dessus doivent être rejetés.

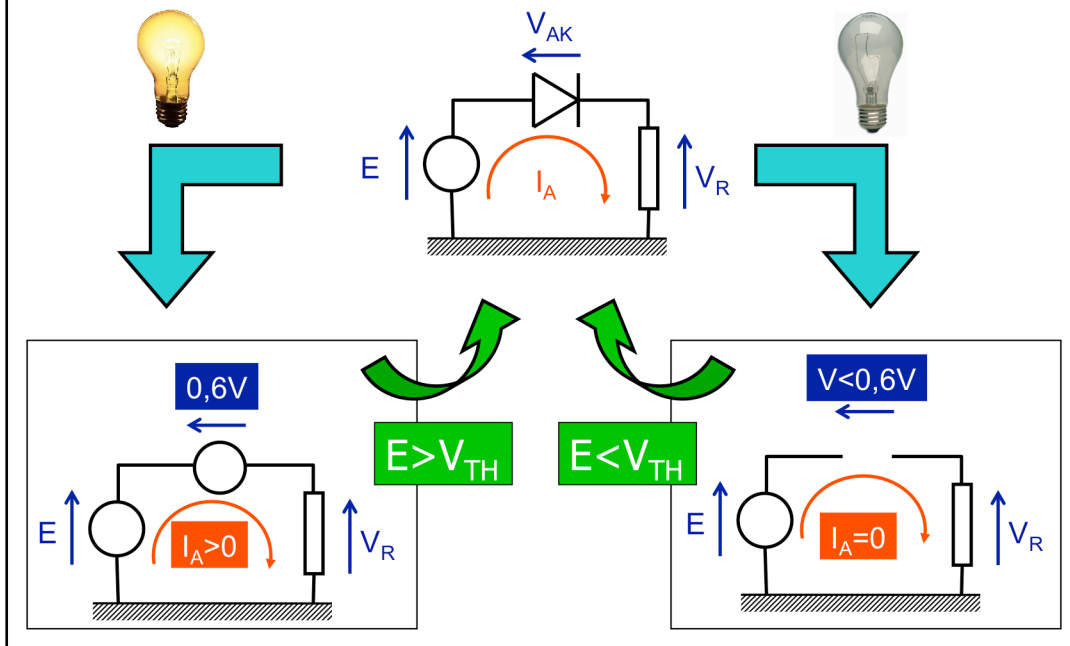
Ex2: circuit simple redresseur ($E = -3V$)



Considérons maintenant le même schéma, mais la valeur de la source a changé: E vaut maintenant $-3V$.

Exercice: En appliquant un raisonnement par hypothèse, vérifiez que pour la valeur $E = -3V$ la diode est bloquante.

Ex3: circuit simple redresseur (E = param)



Voyons maintenant le cas de figure où E n'est pas fixé: E est un paramètre. Ce cas de figure peut se présenter soit parce que E n'est pas connu soit simplement parce que E est une tension variable dans le temps. Notez que dans ce cas, on résoud d'un seul coup les deux exemples précédents ainsi que toutes les autres valeurs possibles de E .

Ici aussi on applique un raisonnement par hypothèse. La seule différence tient dans le fait qu'on doit résoudre le schéma de manière paramétrique, c'est-à-dire sans donner de valeur à E . La vérification du résultat final avec l'hypothèse de départ revient alors (pour la diode) à écrire une inégalité dans laquelle E intervient. Cette inégalité indique précisément pour quelles valeurs de E l'hypothèse choisie (diode passante ou bloquante) peut être retenue.

Ainsi pour l'hypothèse de la diode passante (voie de gauche), on obtient que la ddp sur la résistance vaut E moins la chute de tension sur la diode: $V_R = (E - V_{TH})$

Le courant dans le circuit vaut: donc $I = (E - V_{TH})/R$

Comme on l'a fait pour la résolution non paramétrique, on doit confronter ce résultat au fait que le courant doit être positif.

On peut donc écrire que l'hypothèse est correcte (diode passante) si $(E - V_{TH})/R > 0$, condition qui peut être simplifiée (puisque R est toujours positif) en: $E > V_{TH}$

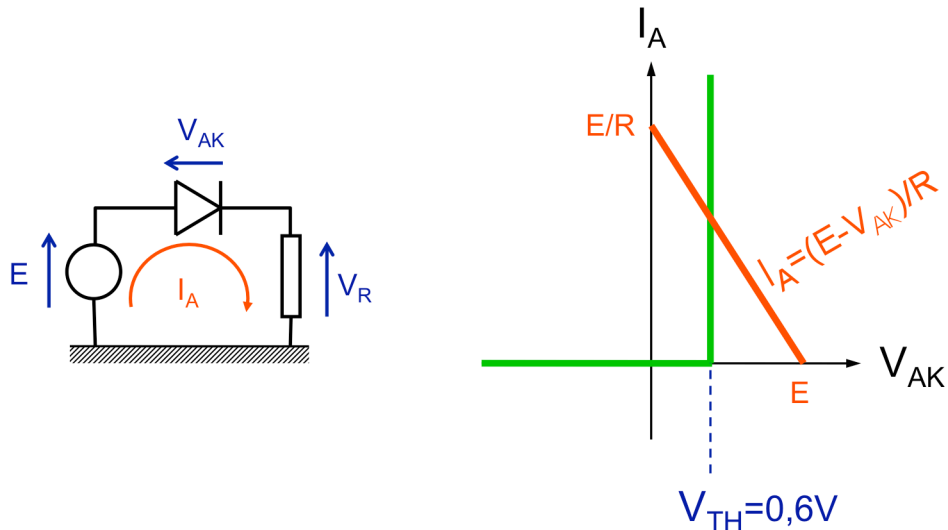
Pour la voie de gauche, le courant étant nul (par hypothèse de la diode bloquante), on obtient que la tension V_{AK} a précisément la même valeur que E .

Or pour que l'hypothèse puisse être retenue, il faut que V_{AK} soit inférieure à V_{TH} . On obtient donc la condition: $E < V_{TH}$

On voit que les deux solutions, étant exactement opposées l'une à l'autre, couvrent l'ensemble des valeurs possibles de E .

N.B.: Pour ce circuit, la valeur de la source pour laquelle la diode change d'état est précisément identique au seuil de conduction de la diode ($0,6V$). Il s'agit d'un cas particulier: pour un autre circuit, la "limite" peut être tout-à-fait différente.

Une résolution graphique est également possible



26

Comme alternative à une résolution analytique (=par équations), **une résolution graphique est également possible.**

Le fait que le schéma comporte une diode ne change rien à la méthode générale: il faut tracer sur un même graphe:

- la caractéristique de la diode
- la caractéristique du circuit extérieur

Le point d'intersection des deux caractéristiques donnera le point de fonctionnement (= valeurs de V et de I) auquel se trouve le circuit.

La caractéristique de la diode étant connue, il suffit en fait d'exprimer l'ensemble du schéma extérieur sous forme d'une relation $I_A = f(V_{AK})$, relation qu'il faut ensuite tracer dans le graphe.

Pour le schéma ci-dessus, on trouve $V_{AK} = V_A - V_K = E - V_R = E - R \cdot I_A$ qu'il suffit d'exprimer en fonction de I_A pour obtenir: $I_A = (E - V_{AK})/R$

Cette relation se traduit, dans le plan de la caractéristique de la diode, par une droite de pente $-1/R$ et d'ordonnée à l'origine E/R .

En fonction des valeurs de E et R , la droite coupera la partie "bloquante" ou la partie "passante" de la caractéristique.

La résolution graphique n'est cependant praticable que pour des schémas simples. Nous l'utiliserons surtout pour expliquer comment polariser une diode.

Synthèse

- Pour résoudre un circuit à diodes, sont à votre disposition:
 - Raisonnement par hypothèse
 - Valeurs connues
 - Résolution paramétrique
 - Résolution graphique
 - Pas la superposition!

Analogie: diode = soupape de sécurité



Chapitre 5: Les diodes

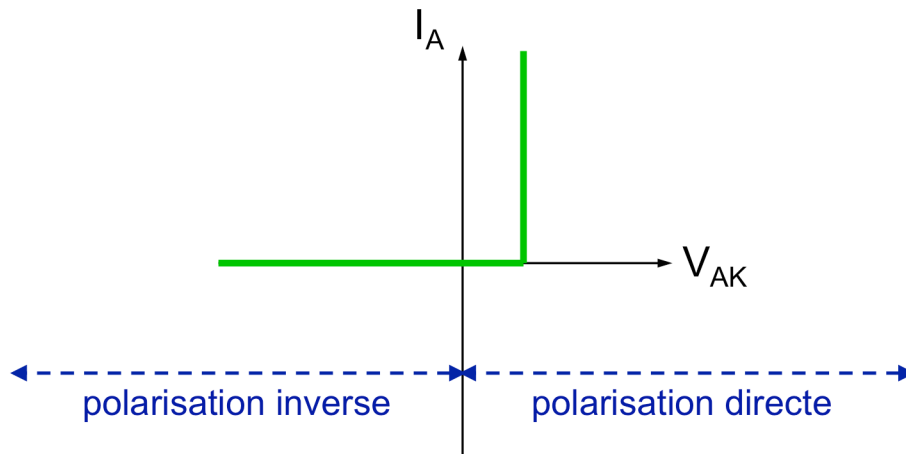
5.4 - Diodes et polarisation

29

De manière générale, polariser un composant, c'est l'amener dans une situation électrique donnée au moyen d'un circuit extérieur (le plus souvent des sources continues). Cette notion est généralement associée à des composants qui présentent plusieurs modes de fonctionnement différents comme la diode (passante ou bloquante) ou le transistor.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser aux circuits de base permettant de polariser une diode, c'est-à-dire de la mettre de manière contrôlée à l'état passant ou à l'état bloquant (ou plus généralement de contrôler les valeurs de tension et de courant qui lui sont appliquées).

Une diode est en *polarisation directe* ou *inverse* suivant le signe de la ddp V_{AK}



30

Avant d'étudier ce qu'il faut faire (ou ne pas faire!) pour polariser une diode, une précision de vocabulaire:

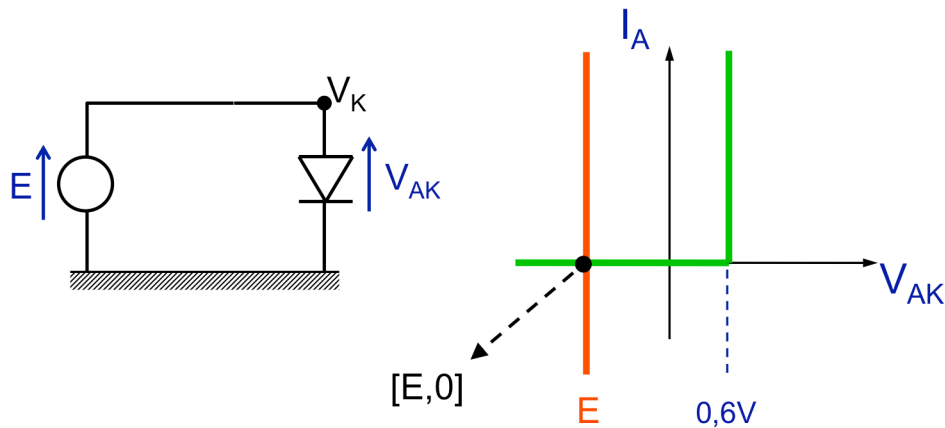
Une diode est en polarisation directe ou inverse suivant le signe de la ddp V_{AK}

Plus précisément:

- si $V_{AK} > 0$, la diode est dite en "polarisation directe"
- si $V_{AK} < 0$, la diode est dite en "polarisation inverse"

On en déduit que lorsqu'une diode est en polarisation inverse, elle est forcément bloquante. Si elle est polarisation directe, elle peut être passante ou bloquante suivant la valeur de V_{AK} .

Pour rendre une diode bloquante, il n'y a... rien à faire



31

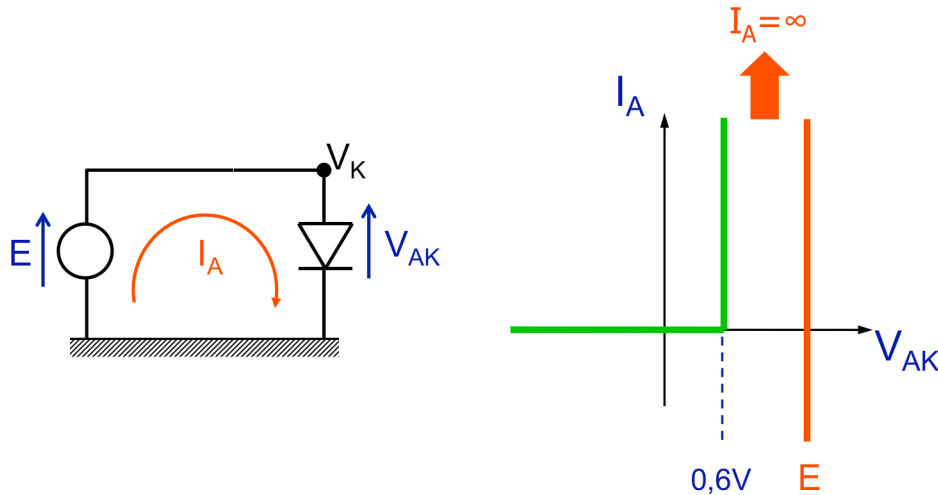
Envisageons d'abord le cas le plus facile: celui où on veut rendre une diode bloquante.

Pour rendre une diode bloquante, il n'y a... rien à faire. Ce qu'on veut dire par là, c'est qu'une diode, si on ne la connecte à aucun circuit extérieur, est spontanément bloquante. En effet: en l'absence de circuit extérieur, le point de fonctionnement se trouve au croisement des deux axes, où le courant et la tension sont nuls.

Si on applique directement sur la diode une source de tension dont la f.e.m. est négative, ou positive mais inférieure à $0,6V$ (*), le point de fonctionnement reste sur l'axe des abscisses et aucun courant ne passe dans la diode.

(*) en supposant que la source de tension est connectée à la diode comme dans le dessin ci-dessus (et non dans le sens contraire), c'est-à-dire que $V_{AK} = E$.

Pour rendre une diode passante, on ne lui applique jamais directement une fem!



32

Supposons maintenant qu'on veuille rendre cette diode passante. La première idée qui vient à l'esprit est de lui appliquer directement une fem de 0,6V ou plus élevée.

C'est une erreur: **pour rendre une diode passante, on ne lui applique jamais directement une fem!**

Sur base de la caractéristique, on voit en effet que:

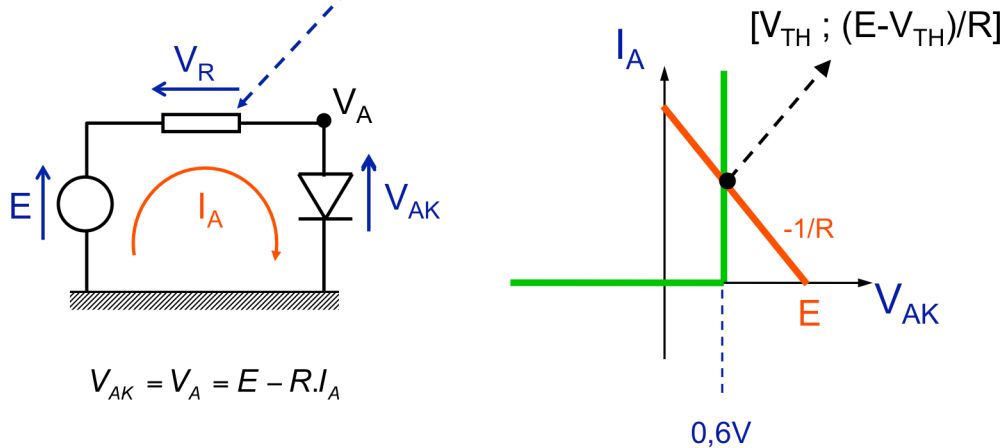
- si on applique une fem égale à V_{TH} , aucun point de fonctionnement n'est défini (car la caractéristique de la diode et celle de la source se superposent): la valeur du courant est indéterminée...
- si on applique une fem supérieure à V_{TH} , les caractéristiques ne se croisent pas: théoriquement la valeur du courant est infinie...

Ces deux conclusions aboutissent toutes les deux à une difficulté et ne correspondent pas exactement à ce qui se passe en réalité. Ce manque de réalisme découle du fait que nous avons utilisé un modèle idéal de diode (caractéristique en angle droit), qui s'avère ici trop limité. Nous verrons une version plus détaillée de ce qui se passe réellement plus tard dans le cours, mais la seconde conclusion reste valable:

Si on applique directement une fem supérieure à V_{TH} à une diode, le courant dans la diode risque d'être très élevé, ce qui entraînerait la destruction de la diode par échauffement (effet Joule).

Il faut donc en retenir qu'on n'applique jamais directement une source de tension aux bornes d'une diode.

Il faut ajouter une résistance de limitation de courant



33

Pour éviter d'envoyer un courant trop important dans une diode lorsqu'on la polarise par une source de tension, **il faut ajouter une résistance de limitation de courant**.

En pratique, il suffit d'intercaler une résistance en série avec la diode et la source de tension (on retombe en fait alors sur le schéma simple redresseur que nous avons déjà résolu). Cette résistance a pour effet d'incliner la caractéristique du circuit extérieur (source de tension + résistance) pour en faire une oblique. L'intersection des deux caractéristiques a donc lieu à un courant beaucoup plus faible.

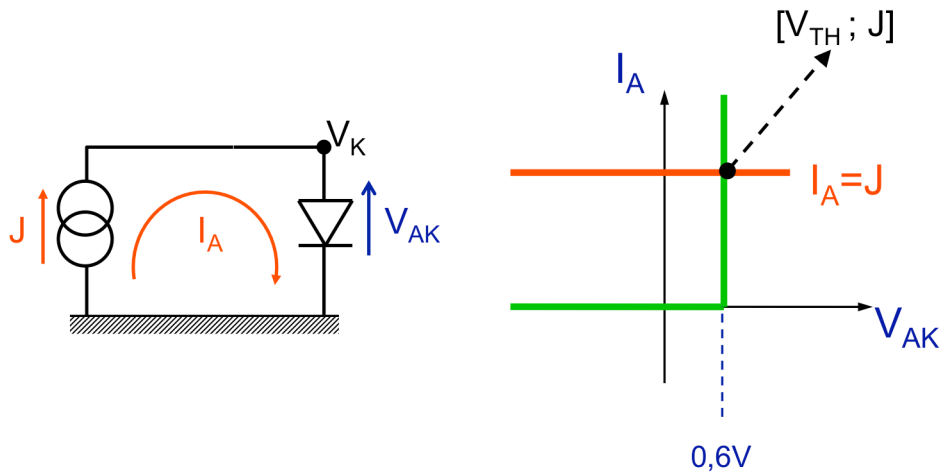
On peut en fait calculer que cette intersection a lieu aux valeurs suivantes (en supposant que la diode est passante):

$V_{AK} = V_{TH}$ (puisque la diode est passante)

Et donc $I = (E - V_{TH})/R$

En pratique, on dimensionne R de telle sorte que le courant ne soit pas trop important.

Pour rendre une diode passante, on peut aussi utiliser une source de courant



34

Il existe une autre possibilité: **pour rendre une diode passante, on peut aussi utiliser une source de courant**

Dans ce cas, la source de courant (par définition) fixe directement le courant traversant la diode, alors que la ddp sur la diode vaut une fois encore V_{TH} .

Attention à connecter la source de courant dans le bon sens!

Chapitre 5: Les diodes

5.5 - Principaux circuits à diodes

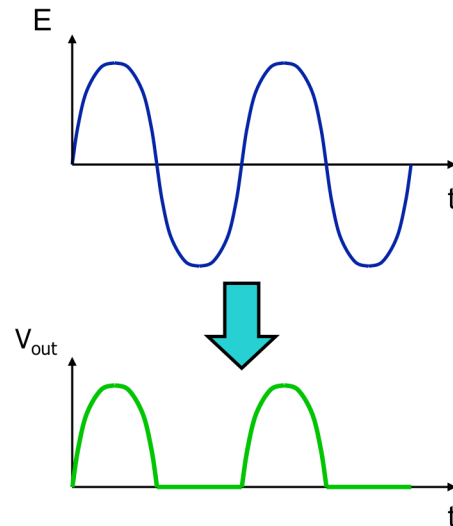
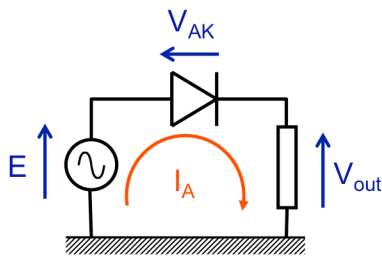
35

Maintenant que vous êtes armés pour résoudre n'importe quel circuit à diodes, voyons les principaux circuits de base qui utilisent ce composant.

Tous peuvent être expliqués en se basant sur le fonctionnement de la diode idéale (caractéristique en angle droit: la diode est soit un circuit ouvert soit une source de tension de valeur $V_{TH}=0,6V$). Dans la plupart des cas, le principe de fonctionnement du circuit peut même être compris en négligeant la tension de seuil ($V_{TH}=0V$).

A titre d'exercice, chacun de ces circuits peut être résolu en appliquant le raisonnement par l'absurde décrit précédemment. Nous utiliserons parfois des raisonnements un peu plus "directs" qui sont possibles une fois que l'on connaît les schémas de base.

Redresseur simple alternance



36

Revenons d'abord au circuit le plus simple qu'on puisse admettre: source de tension + diode + résistance.

Comme on l'a vu, ce circuit est le circuit de base utilisé pour polariser une diode (par exemple pour allumer une LED). Il possède également une autre utilisation fondamentale: celle de **redresseur simple alternance**.

Ce circuit a déjà été résolu, y compris de manière paramétrique. Nous avons conclu que:

- la diode est passante si $E > V_{TH}$
- la diode est bloquante si $E < V_{TH}$

Supposons maintenant que E soit une tension sinusoïdale (par exemple la tension 220V du réseau) et qu'on recueille en sortie la tension sur la résistance:

- Si $E > V_{TH}$, la diode est passante (et provoque une chute de tension de valeur V_{TH}): $V_{out} = E - V_{TH}$
- Si $E < V_{TH}$, la diode est bloquante: le courant est nul et donc V_{out} également

En conclusion, la diode "laisse passer" (à la chute de tension V_{TH} près) les valeurs positives de E et "bloque" les valeurs négatives de E.

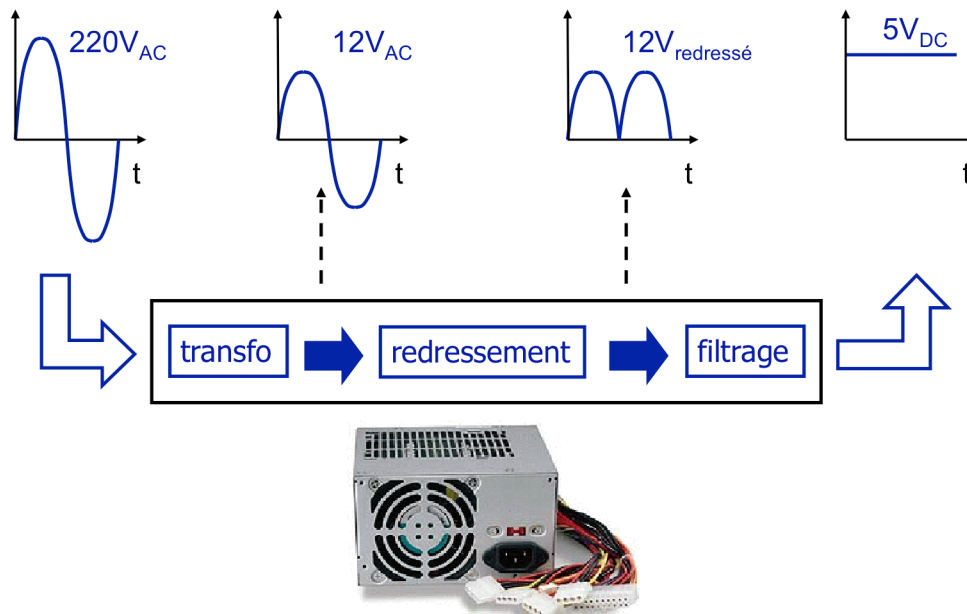
Si E est une tension alternative, on obtient donc les graphes de droite: la tension V_{out} reproduit les alternances positives –et uniquement celles-là– de E (d'où le nom de redresseur *simple alternance*).

Ce circuit est appelé redresseur car une tension alternative (E) est transformée en tension uniquement positive (V_{out}).

Cette fonction de redressement est une des fonctions fondamentales de l'électronique. Elle est notamment utilisée:

- Pour démoduler des signaux radios (en modulation AM)
- Dans les alimentations pour transformer une tension alternative en tension continue

Le redressement est une fonction indispensable dans les alimentations AC/DC



37

Le redressement est une fonction indispensable dans les alimentations AC/DC

La plupart des composants électroniques doivent être alimentés par une ou plusieurs tensions continues de faible valeur (ex: $5V_{DC}$ ou $12V_{DC}$). Or les prises de courant délivrent bien entendu une tension alternative beaucoup plus élevée ($220V_{AC}$).

Entre les deux, il est nécessaire d'intercaler une "alimentation", c'est-à-dire un équipement qui va convertir la tension alternative en tension continue de plus faible valeur.

On peut réaliser une alimentation simple en appliquant successivement les opérations suivantes:

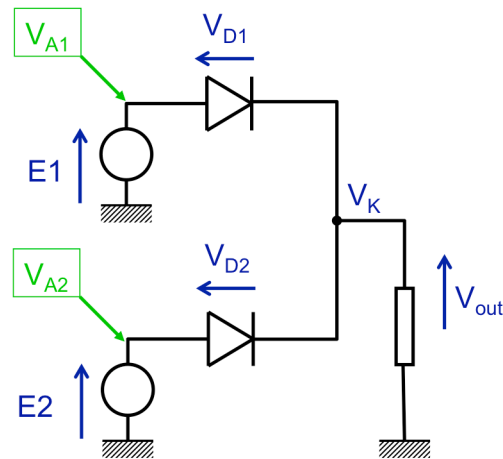
- abaisser le niveau de la tension alternative par un transformateur
- redresser la tension (=supprimer les alternances négatives ou les transformer en alternances positives)
- filtrer la tension redressée.

Le filtrage est fait au moyen d'éléments réactifs (condensateur et self).

Le redressement est assuré par une ou plusieurs diodes.

N.B.: Le schéma-bloc représenté ci-dessus reprend le principe de l'alimentation "linéaire", qui est la plus simple. Ce principe n'est plus beaucoup utilisé (sauf pour de très petites puissances) car une telle alimentation est encombrante et possède un mauvais rendement. La plupart des appareils (et notamment les PC) utilisent plutôt des alimentations "à découpage" dont le principe est plus complexe et sera vu plus tard dans le cours. Néanmoins, la fonction de redressement est nécessaire dans les deux types d'alimentation et elle est dans les deux cas assurée par une ou plusieurs diodes.

Sélecteur de maximum / minimum



38

Avant d'étudier d'autres types de redresseurs, considérons le petit circuit ci-dessus, qui peut être vu comme une variante du circuit simple redresseur.

Ce circuit comporte deux diodes (D1 et D2) alimentées par deux sources E1 et E2 (ici continues). Supposons que $E1 > E2 > 0$ (par exemple: $E1 = 10V$ et $E2 = 6V$). Que vaut la tension de sortie V_{out} ?

On sait qu'on doit raisonner par l'absurde: il y a en fait quatre possibilités puisque chacune des deux diodes peut être soit passante soit bloquante.

Si on n'a aucune idée du fonctionnement de ce circuit, on peut tester les quatre possibilités. Un des raisonnements possibles est le suivant:

- Supposons que D1 est passante. Dans ce cas, $V_K = E1 - 0,6V$

- Supposons que D2 est passante également. Dans ce cas, V_K doit aussi valoir $E2 - 0,6V$, ce qui est impossible simultanément. La situation "D1 et D2 passante" doit donc être exclue.

- Supposons que D2 est bloquante. Dans ce cas, on peut mentalement remplacer D2 par un circuit ouvert, ce qui "coupe" la source E2 du circuit (on retombe en fait sur un circuit simple redresseur). Le courant dans D1 est bien positif: D1 peut donc être passante. Par ailleurs, la ddp sur D2 vaut $V_{A2} - V_K = 6V - (10V - 0,6V)$, ce qui est bien négatif. D2 est donc bien en polarisation inverse, donc bloquante. La situation "D1 passante / D2 bloquante" est donc possible pour les deux diodes.

Par acquit de conscience, vérifions les autres hypothèses:

- Si D1 est bloquante, le courant est nul dans D1.

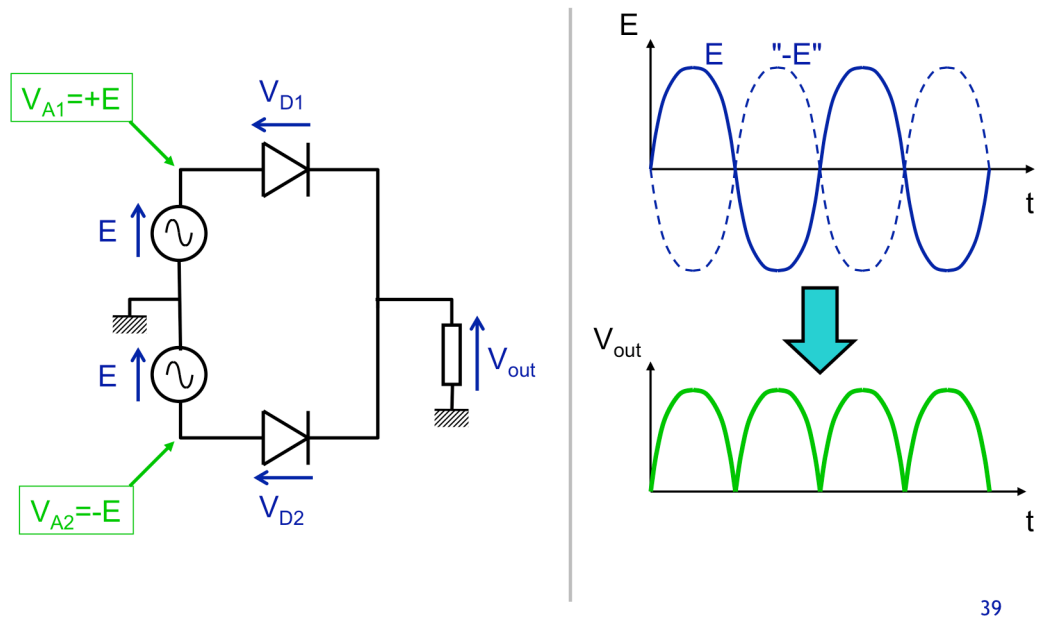
- Supposons D2 passante: V_K vaut $E2 - V_{TH}$. Le courant dans D2 est bien positif: D2 peut être passante. Par contre la ddp sur D1 vaut $10V - (6V - 0,6V) = 3,4V$ ce qui n'est pas négatif. Ceci contredit l'hypothèse D1 bloquante. Donc la situation "D1 bloquante / D2 passante" doit être rejetée.

- Pour des raisons identiques, la situation "D1 et D2 bloquantes" n'est pas possible: les deux diodes verraient alors respectivement une ddp positive de 10V et de 6V bien qu'étant bloquantes.

En conclusion, on peut observer que V_{out} reproduit (à la chute de tension V_{TH} près sur la diode passante) la plus grande des deux tensions. Ce circuit est donc un **sélecteur de maximum**.

N.B.: il ne faut pas perdre de vue que nous avons fait l'hypothèse que E1 et E2 étaient positives! En réalité, le circuit ci-dessus prend la tension maximum parmi trois tensions: E1, E2 et la masse (0V). En d'autres termes, si E1 et E2 sont négatives, V_{out} vaut 0V.

Redresseur double alternance (1): schéma à 2 diodes



Voyons maintenant un premier schéma de **redresseur double alternance**.

Un redresseur double alternance transforme *toutes* les alternances (positives et négatives) de la tension d'entrée en alternances *positives* de la tension de sortie.

Ce premier schéma comporte deux diodes seulement mais a l'inconvénient de nécessiter deux sources de tension identiques (ou plus exactement ce qu'on appelle une source de tension "à point milieu").

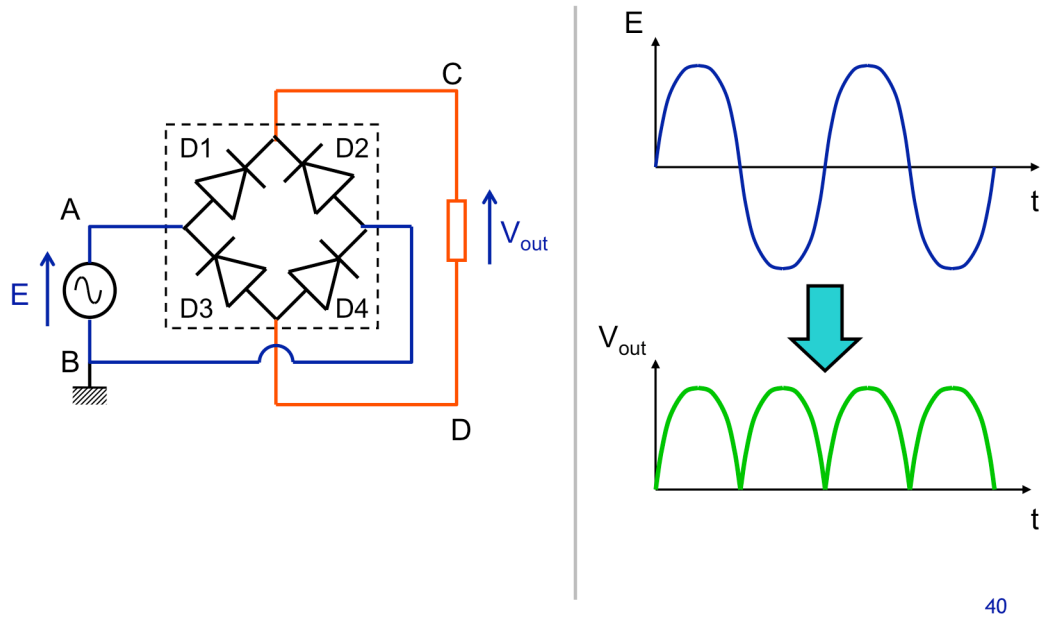
Pour vérifier que ce schéma redresse bien toutes les alternances de la tension d'entrée, il y a plusieurs solutions. La première solution consiste à faire une résolution par l'absurde en envisageant systématiquement les 4 cas possibles. Vous pouvez le faire à titre d'exercice.

Compte tenu de ce que nous savons déjà à propos du redresseur simple alternance, nous pouvons utiliser un raisonnement alternatif:

- L'anode de $D1$ est au potentiel: $V_{A1} = +E$ (sinusoïde en trait *continu* sur le graphe en haut à droite)
- L'anode de $D2$ est au potentiel: $V_{A2} = 0V(\text{masse}) - E = -E$ (sinusoïde en trait *interrompu* sur le graphe en haut à droite) [En fait on peut simultanément retourner la flèche et changer le sens de la source, ce qui est une autre manière d'arriver à la conclusion que la diode est alimentée par une source de valeur $-E$]

En examinant le schéma, on voit que le redresseur double alternance ci-dessus est en fait un sélecteur de maximum alimenté par deux sources qui sont l'opposé l'une de l'autre. A tout moment, une des deux sources présente une alternance positive de sinusoïde. C'est toujours cette alternance positive qui sera sélectionnée par le sélecteur de maximum.

Redresseur double alternance (2): pont à 4 diodes



Si l'on ne dispose que d'une seule source de tension alternative, on peut réaliser un double redressement en utilisant un **pont de diodes**. Un pont de diodes est un ensemble de 4 diodes connectées comme illustré ci-dessus.

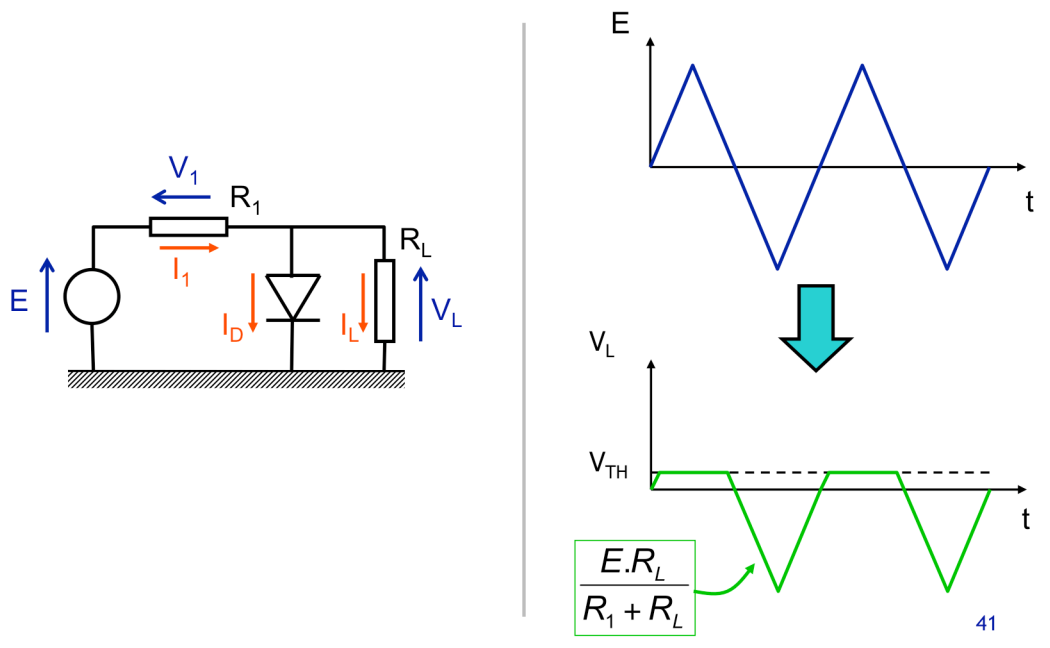
En profitant une nouvelle fois des propriétés déjà démontrées du sélecteur de maximum/minimum, voici un raisonnement possible pour expliquer le fonctionnement de ce schéma:

- Si E est positif, $V_A > V_B$
 - Or la paire de diodes D1/D2 sélectionne la tension la plus élevée parmi ces deux tensions, c'est-à-dire V_A . Donc $V_C = V_A$
 - De la même manière D3/D4 sélectionne la tension la moins élevée, c'est-à-dire V_B . Donc $V_D = V_B$
 - En finale: $V_{out} = V_C - V_D = V_A - V_B = E$
- Si E est négatif, $V_A < V_B$
 - D1/D2 sélectionne la tension la plus élevée, c'est-à-dire $V_B \Rightarrow V_C = V_B$
 - D3/D4 sélectionne la tension la moins élevée, c'est-à-dire $V_A \Rightarrow V_D = V_A$
 - En finale: $V_{out} = V_C - V_D = V_B - V_A = -E$. Cette tension est également positive puisque E est négative

Le rôle du pont de diodes est donc "d'inverser" les connexions entre la source et la charge lorsque la tension de la source est négative, de telle sorte que la charge voit en toutes circonstances une tension positive. La charge voit bien passer le courant dans le même sens pendant les deux alternances.

N.B.: en pratique, on peut acheter un pont de diodes sous la forme d'un composant unique à 4 bornes.

Limiteur de tension (écrêteur)



Voyons maintenant l'autre fonction fondamentale dans laquelle on utilise les diodes: **l'écrtage**.

Réolvons le circuit ci-dessus par l'absurde, et de manière paramétrique:

- Supposons la diode passante $\Rightarrow V_L = V_{AK} = 0,6V$

- Le courant dans R_L vaut (loi d'ohm): $I_L = 0,6V / R_L$
- Le courant dans R_1 vaut (loi d'ohm): $I_1 = (E - 0,6V) / R_1$
- Le courant dans D est la différence des deux: $I_D = I_1 - I_L$
- Ce courant doit être positif pour une diode passante $\Rightarrow$ il faut: $E \cdot R_L / (R_1 + R_L) > V_{TH}$

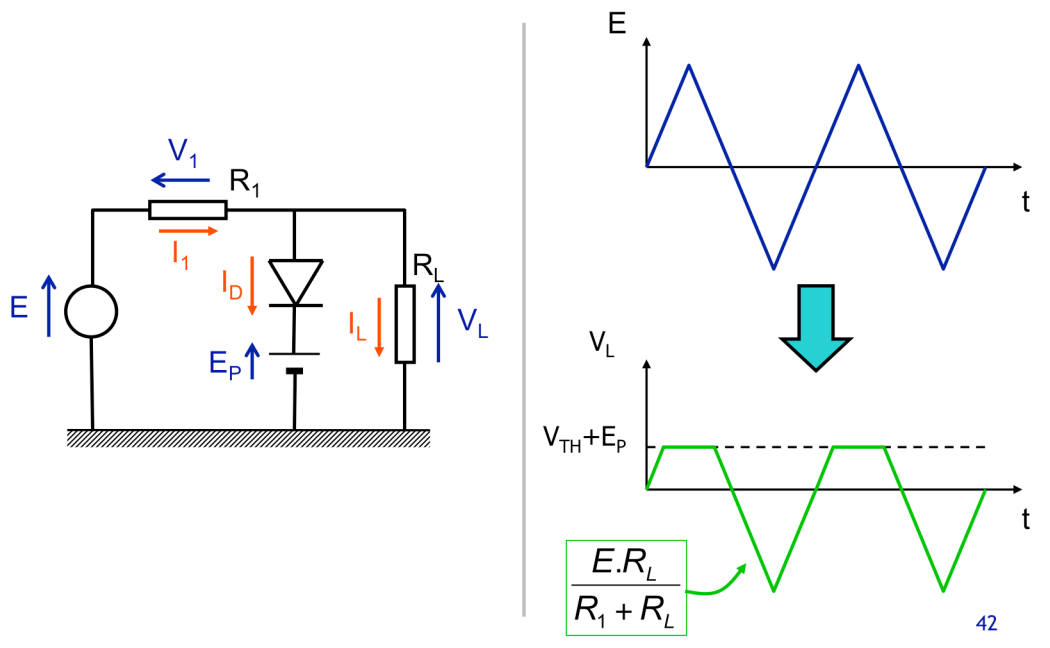
- Supposons la diode bloquante

- Dans ce cas, la diode peut être remplacée par un court-circuit et le circuit se réduit à un diviseur résistif: $V_{out} = E \cdot R_L / (R_1 + R_L)$
- Cette solution n'est valable que si la ddp sur la diode (qui est égale à V_{out}) est inférieure à V_{TH} , ce qui donne bien la condition inverse du cas passant: $E \cdot R_L / (R_1 + R_L) < V_{TH}$

On peut vérifier que la tension sur la charge (R_L) ne dépasse jamais V_{TH} grâce à la diode. On a donc réalisé un "**limiteur de tension**", encore appelé "écrêteur".

Lorsque la diode est coupée, la charge voit la tension E multipliée par le rapport du diviseur résistif.

Ecrêteur polarisé

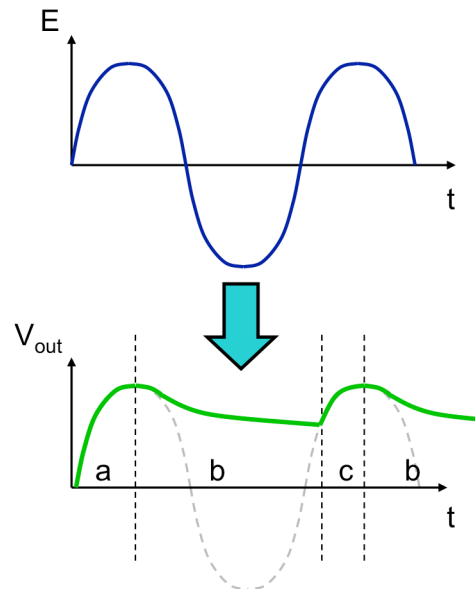
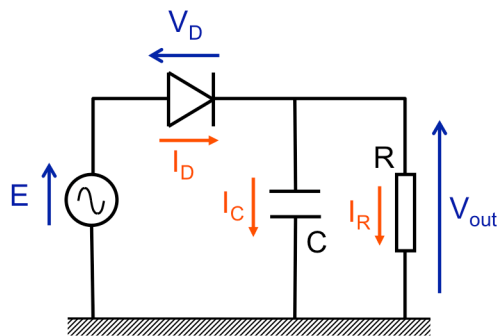


Dans le montage précédent, on ne peut pas choisir librement la valeur de tension à laquelle la tension sur la charge est écrêtée: c'est forcément V_{TH} .

Si cette valeur ne convient pas, on peut constituer un **écrêteur polarisé** (*) en ajoutant une source de tension continue E_p en série avec la diode. Ce montage se comporte comme le précédent, à la différence près que la valeur à laquelle a lieu l'écrêtage n'est plus V_{TH} mais $V_{TH} + E_p$.

(*) on retrouve ici la notion de "polarisation" qui consiste à ajuster le point de fonctionnement du montage au moyen d'une source continue.

Détecteur de crête



43

Enfin considérons un dernier circuit: le **détecteur de crête**.

Ce circuit peut être vu comme une variante du redresseur simple alternance où on place une capacité en parallèle sur la résistance de charge.

Un circuit détecteur de crête est typiquement alimenté par un signal en impulsions ou par un signal sinusoïdal (par exemple modulé en amplitude: voir slide suivant). Le circuit doit être dimensionné de telle sorte que la constante de temps (τ) du RC de sortie soit beaucoup plus grande que la période (ou la durée d'une impulsion) du signal d'entrée.

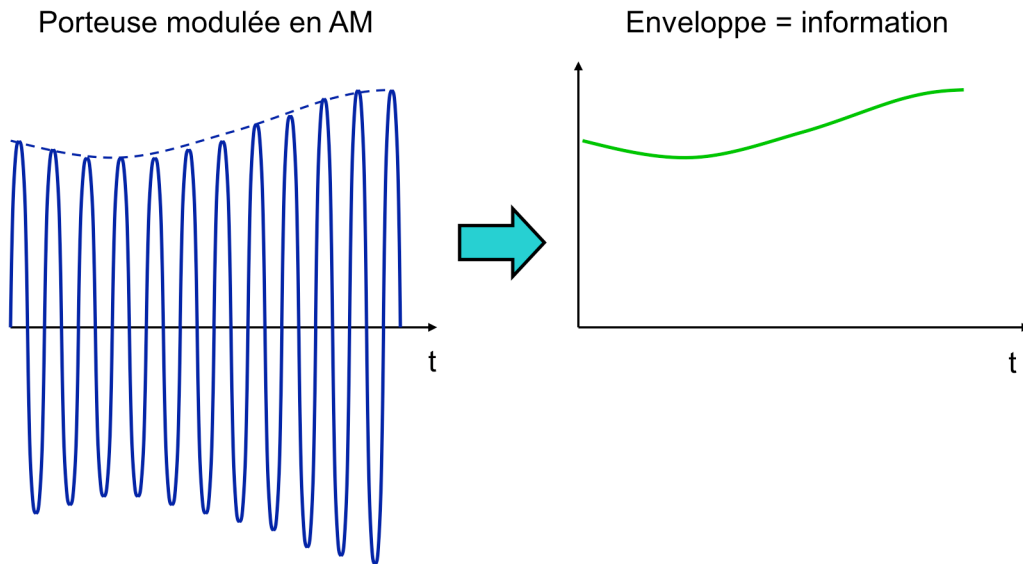
Supposons que le condensateur soit déchargé: $V_{out}=0V$.

Phase "a": Dès que la tension de la source devient positive, la diode devient passante et le condensateur se charge à travers celle-ci (le courant n'est limité que par la très faible impédance de la source de tension, non représentée ici). La tension sur la capa suit donc celle de la source (à la tension de seuil V_{TH} de la diode près).

Phase "b": Une fois que la tension de source a dépassé son maximum et redescend, le condensateur peut se décharger. Cette décharge ne peut cependant pas se faire par la diode, qui ne laisse pas passer de courant vers la source. La décharge a donc lieu au travers de la résistance. Vu la grande constante de temps du circuit RC, cette décharge est très lente (par rapport aux variations de la source) et on peut considérer, en première approximation, que la charge de la capacité reste constante sur une période, à la valeur de crête du signal de la source. (En fait, il y a une lente décharge du RC, de type exponentielle décroissante). Pendant cette décharge, la diode est bloquante car elle est polarisée en inverse (en effet: la tension d'anode (côté source) est plus faible que la tension de cathode (côté capa)), ce qui est cohérent avec le fait qu'elle ne laisse pas passer le courant de décharge de la capa.

La diode ne redeviendra passante que pendant le faible laps de temps où la tension de source est à nouveau supérieure à la tension sur le condensateur (parce qu'il s'est un tout petit peu déchargé), qui se rechargera de nouveau rapidement à la valeur de crête de la source (**phase "c"**).

Démodulation AM



44

Le montage précédent porte le nom de "détecteur de crête" puisqu'il fournit en sortie (sur la résistance) la valeur de crête du signal d'entrée (source). L'utilité de ce montage est :

- de pouvoir mesurer la valeur de crête d'un signal sans être synchronisé sur celui-ci, c'est-à-dire sans savoir quand se produit le maximum (nombreuses applications en instrumentation)
- de pouvoir détecter des impulsions très courtes (la capa joue le rôle de "mémoire")
- la démodulation d'une porteuse modulée en amplitude (radio AM); on choisit la constante de temps RC grande devant la période de porteuse, mais faible devant celle de la modulante.

Détaillons cette dernière application. Le principe de la modulation d'amplitude (AM), utilisée notamment pour la transmission des signaux radio, consiste à faire varier l'amplitude d'une sinusoïde de fréquence élevée (=porteuse) proportionnellement au signal qu'on veut coder (= la voix ou la musique en radio). C'est donc *l'enveloppe* du signal de gauche qui représente l'information utile, la sinusoïde ne servant que de support à cette information.

Lorsqu'un tel signal arrive au récepteur radio, il faut le démoduler, c'est-à-dire retrouver l'information de base. Le circuit détecteur de crête permet précisément de remplir cette fonction (voir page précédente), grâce au caractère fondamentalement non-linéaire (= en "tout ou rien") de la diode.

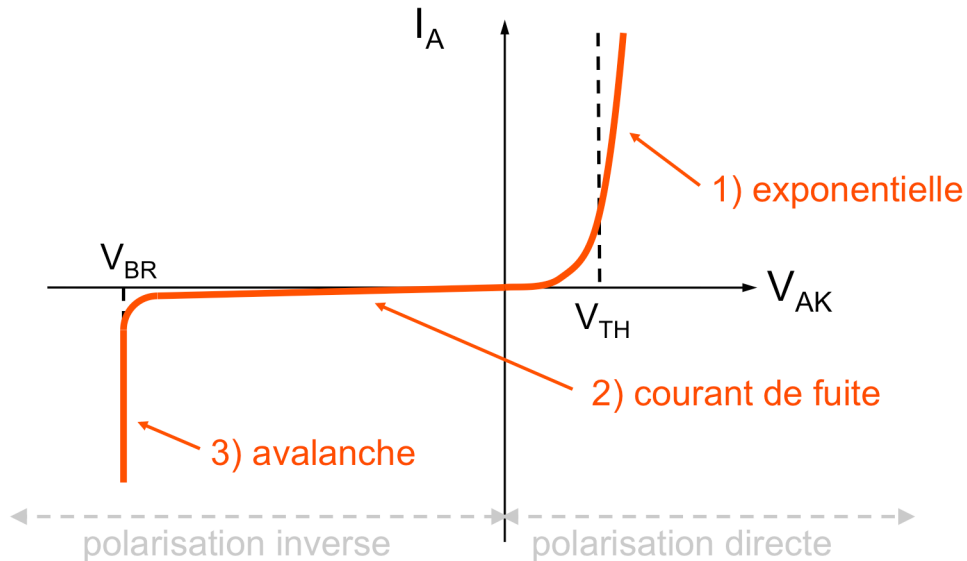
Chapitre 5: Les diodes

5.6 - La diode à jonction PN (réelle)

46

Allons maintenant un petit peu plus loin en examinant la caractéristique d'une diode réelle. Celle-ci présente quelques phénomènes supplémentaires par rapport à la diode idéale.

La caractéristique d'une diode à jonction PN réelle comporte trois zones



47

Dans la réalité, il est en fait impossible de fabriquer un composant qui ait les propriétés de la diode idéale, et en particulier une caractéristique exactement en angle droit.

La caractéristique d'une diode à jonction PN réelle comporte trois zones... qui sont autant de différences par rapport à la diode idéale:

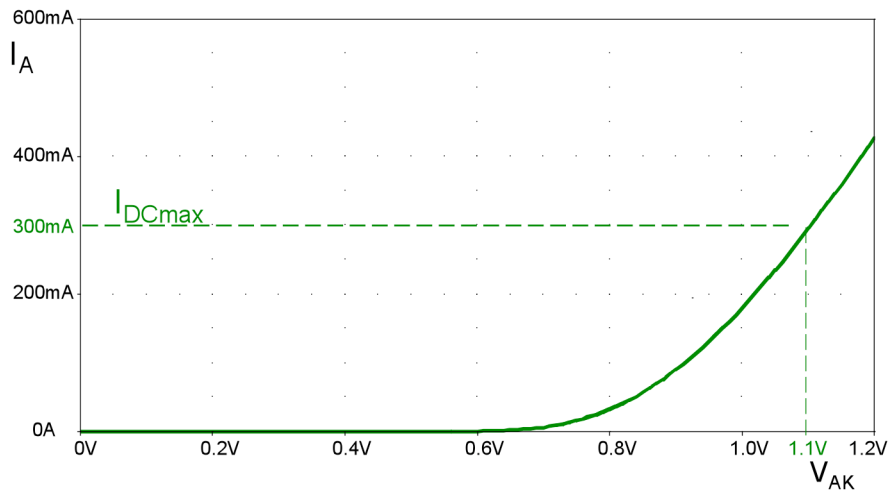
1) la transition brusque entre l'état passant et l'état bloquant (angle droit de la diode idéale) est remplacée par une courbe qui est en fait très proche d'une exponentielle.

2) à l'état bloquant, le courant n'est pas nul: il existe dans la diode un très faible courant négatif (allant donc de la cathode vers l'anode).

3) lorsqu'on applique une tension négative très élevée à la diode réelle, il arrive un moment où ce courant négatif augmente brutalement: on dit que la diode "entre en avalanche". Le seuil où la diode entre en avalanche est noté V_{BR} ("breakdown voltage").

Nous allons maintenant passer successivement en revue ces trois différences et leurs conséquences.

En polarisation directe, V_{AK} varie légèrement en fonction de I_A



48

On a tracé ci-dessus la moitié droite de la caractéristique (= zone de polarisation directe) d'une diode réelle assez courante (type 1N4148). On peut montrer que cette courbe est très proche d'une exponentielle.

Ceci amène plusieurs commentaires:

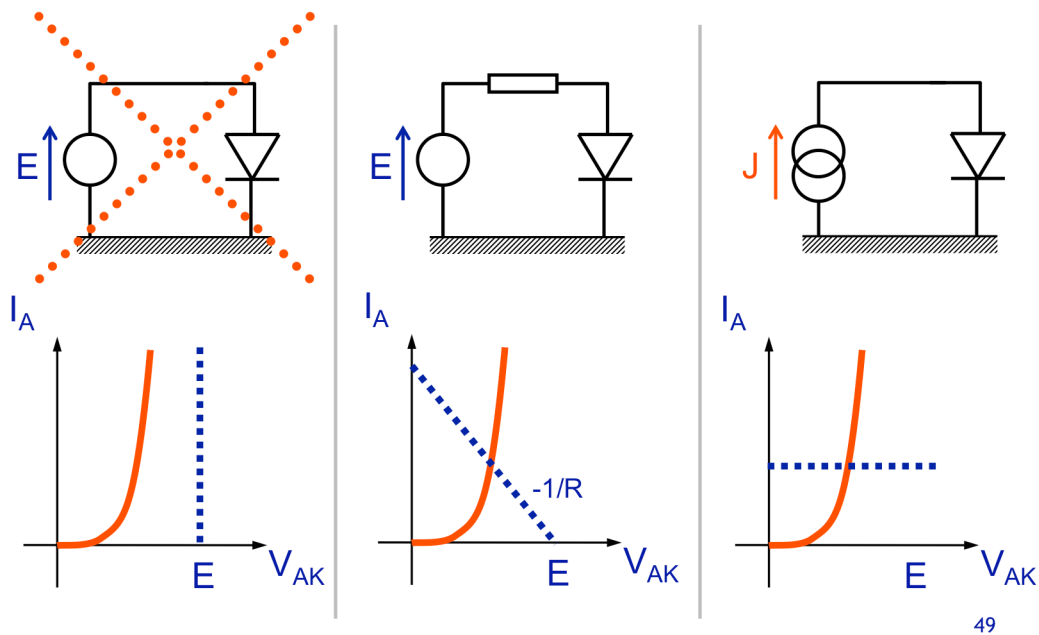
1) La transition entre les états passant et bloquant (ou inversement) est en fait progressive: lorsqu'on augmente la tension V_{AK} (depuis 0V) le courant augmente d'abord très lentement puis de plus en plus vite. Même si l'angle droit a disparu, la caractéristique reste fortement non-linéaire.

2) L'état passant n'a donc pas vraiment de limite bien définie mais correspond à la zone où le courant dans la diode est significatif: environ entre 0,6V et 1,1V pour la diode ci-dessus (*). V_{TH} désigne le début de cette zone (0,6V)

3) Au-delà de V_{TH} , une petite variation de la tension V_{AK} provoque une très grande variation du courant dans la diode: **V_{AK} varie légèrement en fonction de I_A** . La courbe est très raide, ce qui explique qu'on puisse l'approcher par une droite verticale (diode idéale). La tension V_{AK} n'est donc pas fixe mais varie légèrement en fonction du courant passant dans la diode.

(*) Au-delà de 1,1V, le courant dans cette diode devient très important et la diode peut être détruite.

Les circuits de polarisation déjà étudiés restent valables

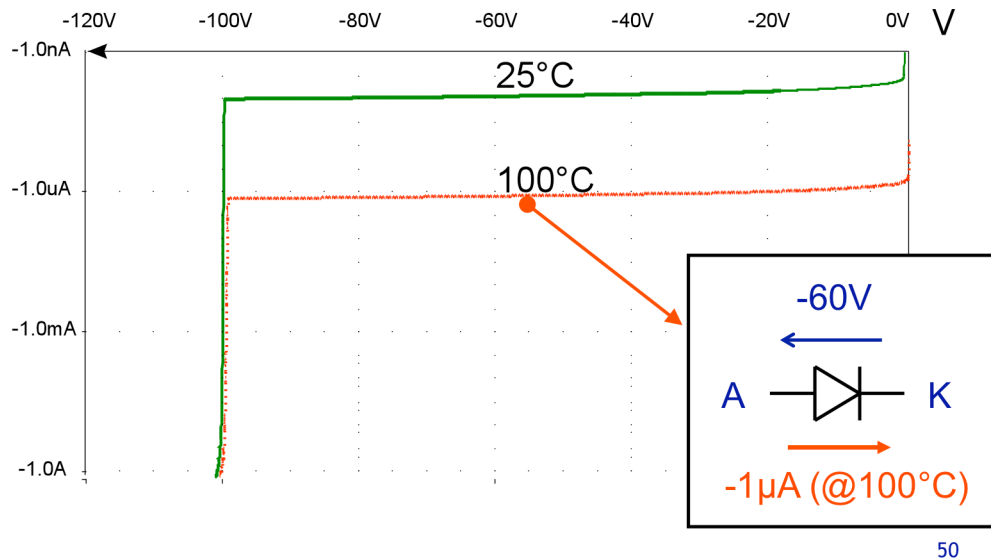


Quelles sont les conséquences sur les circuits à utiliser pour polariser une diode? Aucune: **les circuits de polarisation déjà étudiés restent valables.** La seule nouveauté est la légère variation de la tension V_{AK} en fonction du courant.

En particulier, pour rendre une diode passante:

- On peut toujours lui appliquer une source de courant (dessin de droite)
- On ne peut toujours pas lui appliquer directement une source de tension (dessin de gauche), sous peine de lui imposer un courant trop grand qui mènerait très rapidement à sa destruction
- Si on utilise une source de tension, il faut donc utiliser une résistance de limitation de courant (dessin du centre, qui correspond à la manière la plus courante de polariser une diode). La seule différence est que la ddp sur la diode va varier légèrement (quelques dixièmes de volts) en fonction du courant passant dans la diode.

En polarisation inverse, il existe un très léger "courant de fuite" inverse...

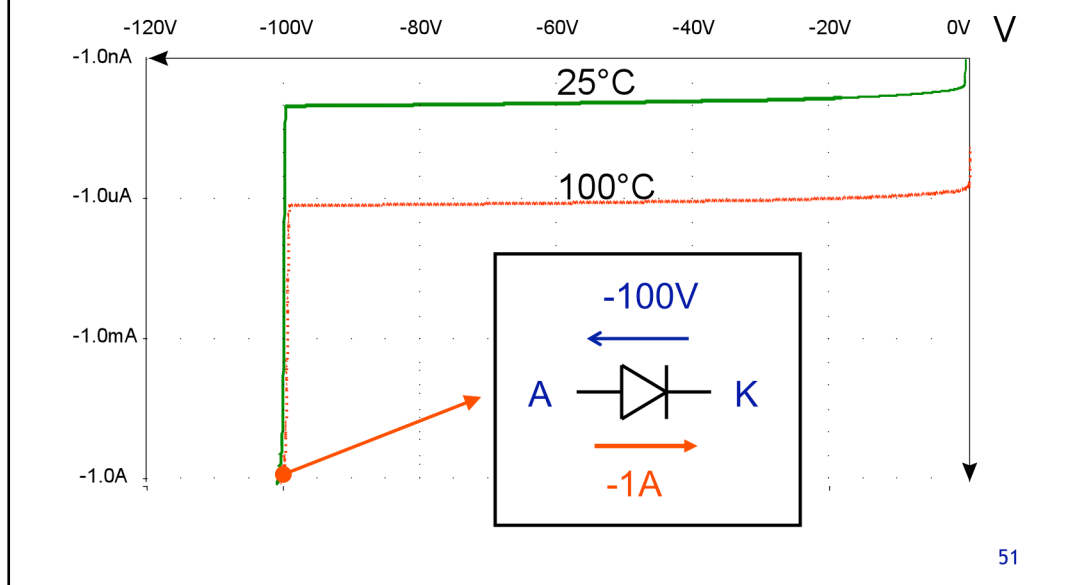


Voyons maintenant la moitié gauche du graphe: la **zone de polarisation inverse** ($V_{AK} < 0$)

En polarisation inverse, le courant dans la diode n'est pas strictement nul: **il existe un très léger "courant de fuite" inverse**. Ce courant est appelé inverse car il circule de la cathode vers l'anode, c'est-à-dire dans le sens inverse de ce qui a toujours été considéré jusqu'ici. Ce courant est néanmoins extrêmement faible (de l'ordre du nanoampère ou du microampère comme on peut le voir sur le graphe ci-dessus), ce qui le rend négligeable dans la plupart des applications.

N.B.: De manière générale, les propriétés des composants électroniques varient fortement en fonction de la température. Les composants peuvent notamment subir des variations sensibles suivant qu'ils sont froids (température ambiante: 20°C) ou chauds (max jusqu'à 170°C pour le silicium). En particulier, on voit ici que le courant de fuite varie fortement en fonction de la température, alors que la tension d'avalanche en est beaucoup moins dépendante.

...ainsi qu'une tension d'avalanche pour laquelle la diode est détruite

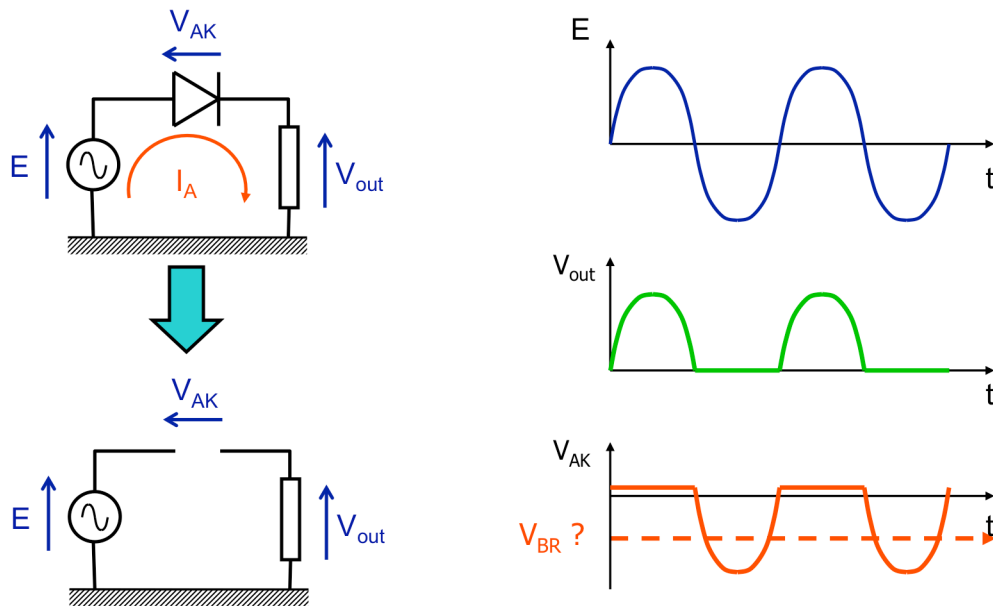


Si on applique une tension très négative à la diode (ici une centaine de volts, mais cette valeur varie en fonction de la diode considérée), **le courant inverse augmente brusquement: c'est l'avalanche**. La puissance dissipée sous forme de chaleur dans la diode devient alors importante puisque le courant et la tension prennent simultanément des valeurs élevées (*). Ceci mène en général à une destruction immédiate de la diode. Cette situation est donc clairement à éviter. Le seuil de tension (négatif) correspondant à l'avalanche est en général noté V_{BR} (pour "breakdown voltage")

(*) Remarque sur la puissance dissipée dans une diode:

La puissance est le produit de la tension et du courant. En fonctionnement normal, on peut remarquer que la puissance dissipée dans une diode est toujours faible: si elle est passante, le courant est élevé mais la tension est faible ($=V_{TH}$); si elle est bloquante, la tension peut être élevée mais le courant est nul. Le produit "tension.courant" correspond donc dans les deux cas à une valeur assez faible, par opposition à l'avalanche où les deux grandeurs sont simultanément élevées.

Lorsqu'une diode est coupée, il faut donc vérifier qu'elle supporte la tension inverse



52

La tension d'avalanche représente une contrainte supplémentaire dont il faut tenir compte dans les montages. En effet, pour une diode bloquante, la ddp V_{AK} doit être comprise entre V_{BR} et V_{TH} . V_{AK} possède donc maintenant une limite inférieure. Cette limite inférieure représente le fait que la diode ne peut "tenir" une tension inverse que dans certaines limites (au-delà desquelles elle est détruite).

A titre d'exemple, reprenons le montage simple redresseur (en haut à gauche).

On a reproduit à droite:

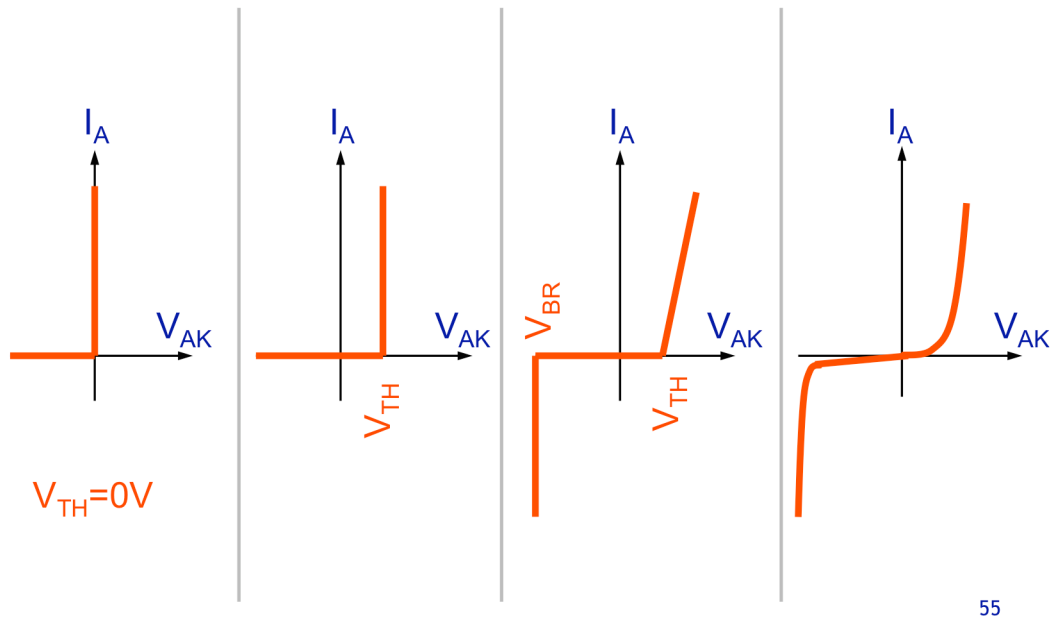
- La tension d'entrée (E)
- La tension de sortie sur la résistance (V_{out})
- La ddp sur la diode (V_{AK}) qui vaut V_{TH} lorsque la diode est passante et E lorsque la diode est bloquante.

Lorsqu'on dimensionne le montage, il est nécessaire de vérifier que la tension d'avalanche (V_{BR}) est inférieure aux valeurs les plus négatives de la tension V_{AK} .

Lecture d'une notice constructeur

- Voir notice de la diode 1N4148

Illustration de la notion de profondeur de modèle dans le cas de la diode



La diode est un très bon exemple pour illustrer le fait qu'un composant réel peut être représenté par différents modèles, plus ou moins complexes suivant les phénomènes qu'on veut prendre en compte.

La dia ci-dessus présente quatre modèles de complexité croissante. D'autres modèles sont possibles:

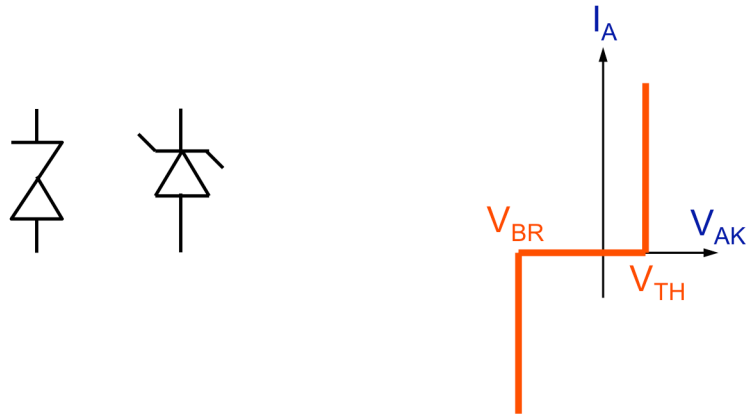
- 1) Le premier modèle est le plus élémentaire: il représente les deux états, avec une tension de seuil nulle
- 2) Dans le second modèle, la tension de seuil est non-nulle
- 3) Dans le troisième modèle, on a ajouté la tension d'avalanche et la faible variation de V_{AK} en fonction du courant lorsque la diode est passante (modélisé par une droite)
- 4) Dans le quatrième modèle, on a ajouté la variation exponentielle à l'état passant et le courant de fuite inverse à l'état bloquant

Aucun modèle n'est intrinsèquement meilleur que les autres: il faut prendre un modèle suffisamment simple pour accélérer autant que possible les calculs mais suffisamment complexe pour représenter les phénomènes pertinents pour l'application considérée.

Chapitre 5: Les diodes

5.7 - Les autres types de diodes

La diode Zener supporte l'avalanche

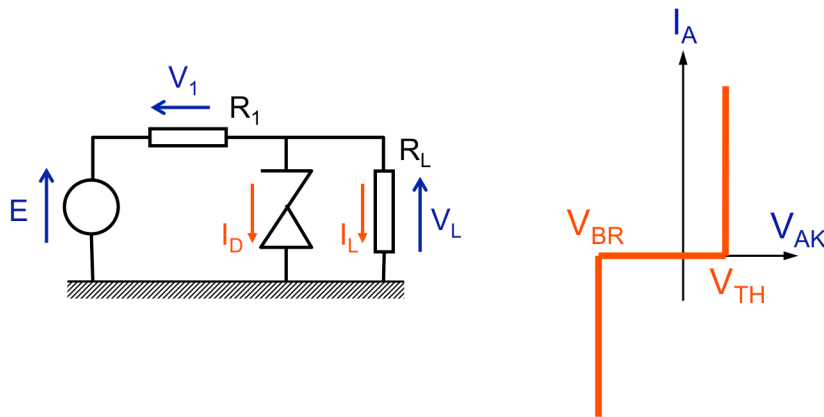


57

Remarque préliminaire: en principe, une diode qui entre en avalanche (suite à l'application d'une ddp négative très élevée) est détruite. L'avalanche a néanmoins ceci d'intéressant: une diode qui est en avalanche se comporte comme une source de tension presque parfaite (!): en effet, la zone de la caractéristique correspondant à l'avalanche est une (demi-)droite verticale.

La diode zener est un type de diode particulier qui supporte l'avalanche. De plus la valeur de la tension d'avalanche V_{BR} peut être choisie (au moment de la fabrication) dans une gamme assez large.

Elle s'emploie "à l'envers" pour limiter ou réguler une tension



58

Grâce à sa capacité de se comporter comme une source de tension, la diode zener peut être utilisée pour limiter ou réguler une tension sur un autre composant.

Dans le montage ci-dessus, la ddp sur la résistance ne peut dépasser $|V_{BR}|$, le seuil d'avalanche de la diode zener. Ce montage peut être exploité de deux façons:

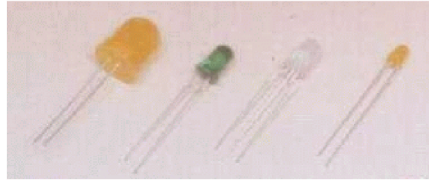
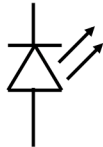
- Soit la diode est la plupart du temps coupée (donc pas en avalanche) et elle entre en avalanche occasionnellement, lors de pics de la tension E
- Soit la diode est tout le temps en avalanche: elle est alors utilisée pour réguler la tension V_L à la valeur V_{BR} .

On notera que puisque la diode zener est utilisée en avalanche, elle **doit être montée "à l'envers"** d'une diode classique. En d'autres termes, c'est pour y faire passer un courant *inverse* qu'on met une diode zener dans un circuit.

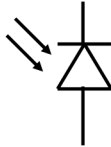
Remarques:

- Aux signes de tension et de courant près, le comportement de la diode zener en avalanche est le même qu'une diode PN passante: il s'agit chaque fois d'une demi-droite verticale (mais à 180° près dans le plan de la caractéristique). Le principal intérêt de la diode zener est qu'on peut choisir la valeur de V_{BR} à la fabrication alors que le seuil V_{TH} est toujours de l'ordre de 0,6V.
- Compte tenu du fait qu'on peut choisir V_{BR} dans une large gamme de valeur, le circuit ci-dessus remplit exactement la même fonction que l'écrêteur polarisé déjà présenté précédemment.

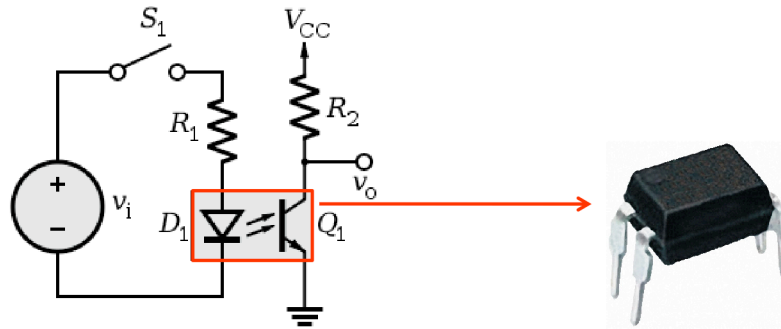
La *diode LED* émet de la lumière lorsqu'elle est passante



La *photodiode* devient passante lorsqu'elle reçoit de la lumière



L'optocoupleur (LED+photodiode) permet de réaliser une isolation galvanique



61

Un optocoupleur est un dispositif destiné à transmettre un signal électrique entre deux parties d'un montage isolées électriquement l'une de l'autre (typiquement deux montages portés à des potentiels différents ou utilisant des niveaux de tension très différents).

Un exemple extrême où une telle isolation est nécessaire est un examen médical où on place des électrodes sur le patient: les électrodes doivent être très sévèrement isolées pour éviter tout risque de brûlure ou d'électrocution du patient...

Un optocoupleur est constitué d'une diode LED suivie immédiatement d'un phototransistor (un phototransistor, comme une photodiode laisse également passer du courant lorsqu'il reçoit de la lumière. Le courant est simplement plus élevé).

La diode LED convertit le courant électrique en lumière puis cette lumière est reconvertie en courant dans le phototransistor. La lumière sert donc temporairement de support à l'information, ce qui permet d'isoler le courant d'entrée du courant de sortie (il n'y a aucun contact électrique entre ces deux courants).