

Chapitre 3

La diode à jonction : compléments

Diode

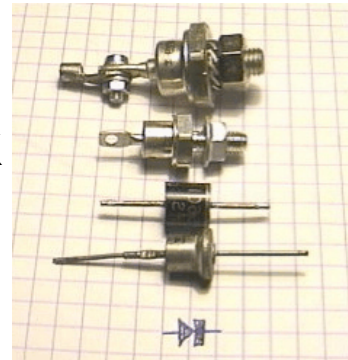
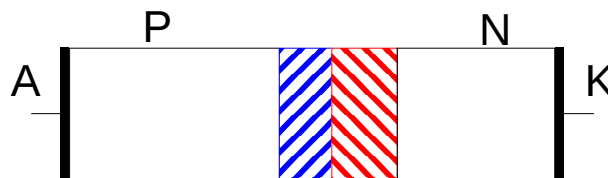
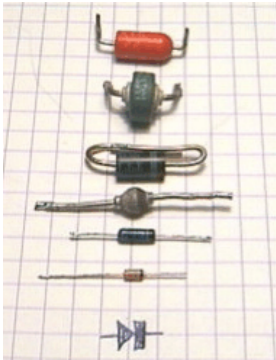
PLAN

- ▶ **introduction**
- ▶ caractéristique I,V
- ▶ montages à diodes
- ▶ conclusions

Diode

1 seul principe, beaucoup de variantes

- ▶ obtenue au départ d'une jonction PN dont on métallise les extrémités
- ▶ **di-ode**: semi-conducteur à **deux** électro**des**
 - ♦ anode : côté P
 - ♦ cathode : côté N



Ce chapitre est un complément au chapitre sur les diodes vu au cours ELEC-H301. Il convient donc de relire celui-ci attentivement avant de continuer.

La diode est le composant le plus simple de l'électronique : deux couches de semi-conducteurs formant une jonction PN. Les extrémités libres des deux semi-conducteurs reçoivent une métallisation sur laquelle on soude des fils dits "de *bonding*" aboutissant aux électrodes externes.

Le terme diode veut donc dire "composant à deux électrodes". Celles-ci sont nommées respectivement

- anode (A) du côté P
- cathode (K) du côté N

La figure nous montre plusieurs types de boîtiers typiques de diodes :

- à gauche, les diodes à faible courant (quelques dizaines à quelques centaines de mA), les électrodes servent à la fois à la conduction du courant et à la fixation, généralement par soudure
- à droite, des diodes de puissance véhiculent des courants de plusieurs ampères (il en existe jusqu'à plusieurs milliers d'ampères). Les boîtiers sont plus gros, pour pouvoir évacuer la puissance perdue en chaleur. La fixation mécanique ne se fait plus seulement via les électrodes, mais aussi par le boîtier (à l'aide de vis ou de clames)

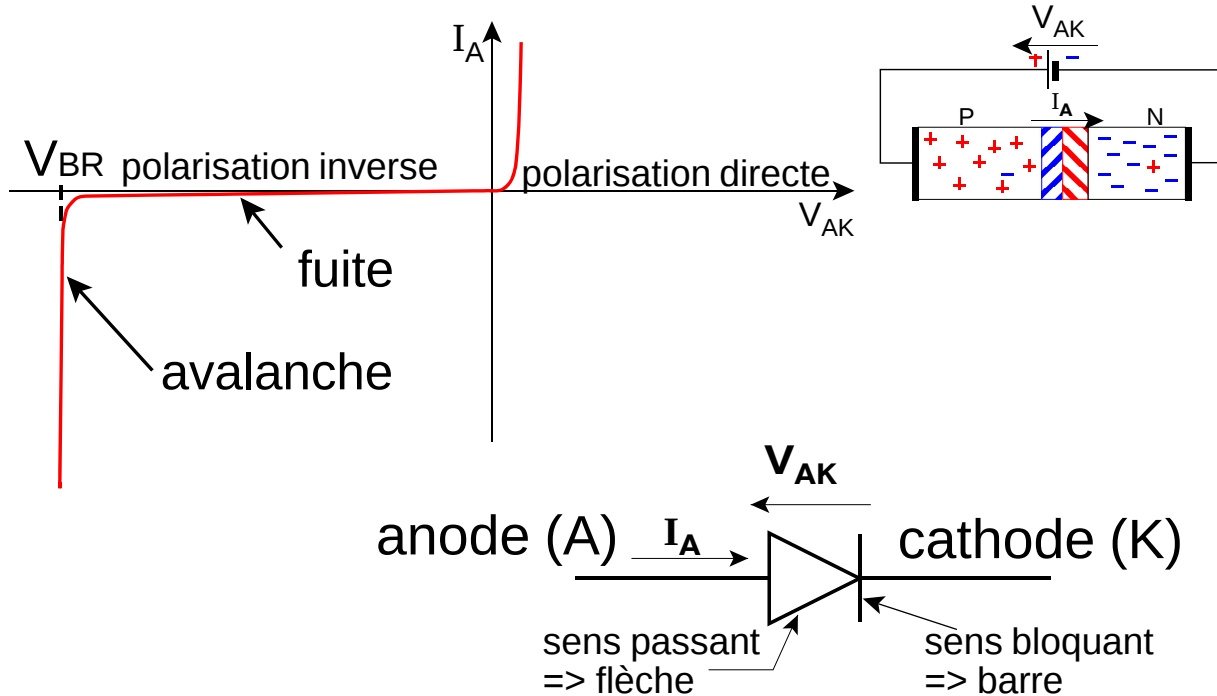
Diode

PLAN

- ▶ introduction
- ▶ **caractéristique I,V**
 - ◆ **complète**
 - ◆ **en polarisation directe**
 - ◆ **simplifiée**
- ▶ montages à diodes
- ▶ conclusions

Caractéristique $I_A(V_{AK})$

(1) 2 régions et 3 comportements différents



Raccordons la diode dans un circuit électrique comprenant une source de tension.

La tension aux bornes de la diode est notée $V_{AK} = V_A - V_K$. Le courant dans la diode est défini positif de l'anode vers la cathode; on l'appelle généralement **courant d'anode** I_A .

Si l'on trace la courbe $I_A(V_{AK})$ on distingue deux régions et trois comportements possibles :

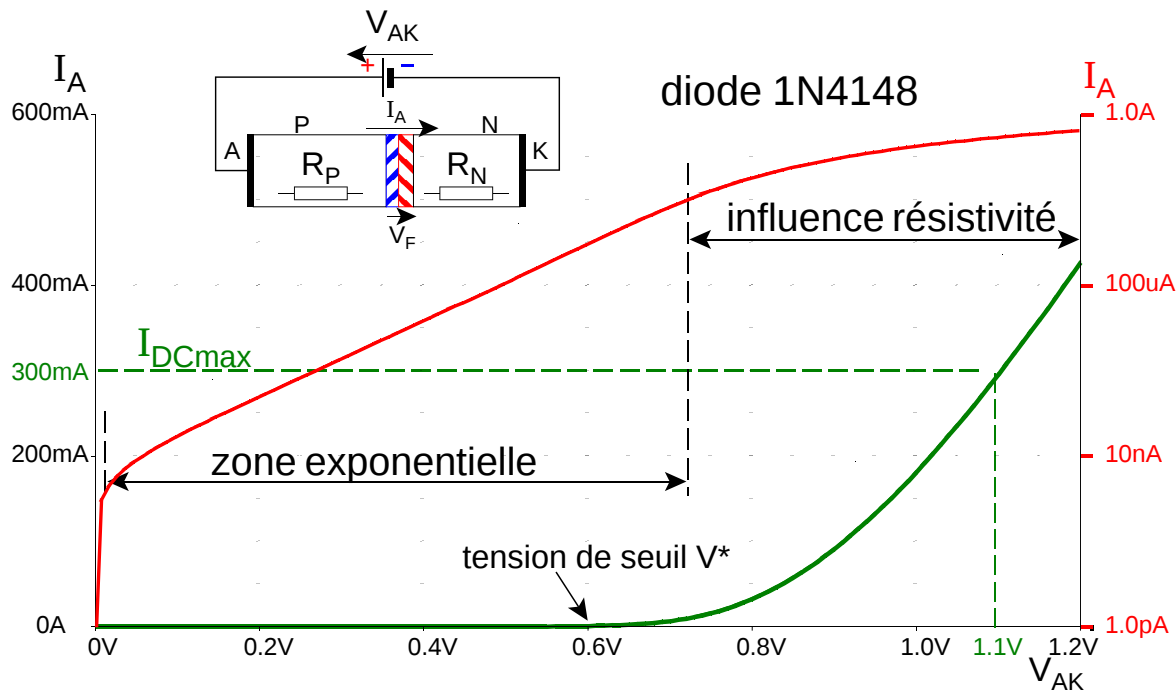
- lorsque la tension V_{AK} est négative, la région N est à un potentiel plus élevé que la région P et on parle de polarisation inverse ou en **sens bloquant**.
 - o pour une valeur de $|V_{AK}| < V_{BR}$ le 1^{er} comportement est un très faible courant inverse, dit courant de fuite, la diode est un **limiteur de courant**.
 - o une fois que l'on atteint la tension de claquage V_{BR} , on obtient un 2^{ème} comportement: l'avalanche; la diode ne limite plus le courant, elle se comporte comme une **chute de tension** V_{BR} , le courant croît très brutalement. V_{BR} peut valoir de quelques volts pour des circuits intégrés à quelques kV pour des semi-conducteurs de puissance
- lorsque la tension V_{AK} est positive, l'anode est portée à un potentiel plus élevé que la cathode et on parle de **polarisation directe** ou en **sens passant**. Le courant d'anode est caractérisé par une **montée exponentielle** du courant, avec une tension V_{AK} qui reste limitée par la barrière de potentiel, c'est-à-dire quelques dixièmes de Volt¹. La figure suivante illustrera mieux la zone de polarisation directe.

Le symbole de la diode comprend une flèche indiquant le sens du courant en polarisation directe.

¹ Nous verrons à la dia suivante que V_{AK} peut dépasser légèrement la barrière de potentiel

$I_A(V_{AK})$ en polarisation directe

le courant "décolle" à la tension de seuil



Le tracé de la caractéristique $I_A(V_{AK})$ d'une diode 1N4148 en polarisation directe est présenté ici en échelle linéaire (en vert) et semi-logarithmique (en rouge).
L'échelle linéaire montre la notion de **tension de seuil** V^* : c'est l'amplitude de la tension V_{AK} au-delà de laquelle le courant commence à être significatif. Pour une diode au silicium V^* vaut 0,6V à 0,7V.
L'échelle logarithmique confirme l'allure sensiblement exponentielle de la courbe jusqu'à un peu au-delà du seuil. En se référant aux conclusions du chapitre sur la jonction PN, le courant devrait être donné par

$$I_A = I_r \cdot [\exp(V_{AK} / V_T) - 1]$$

A tension plus élevée que le seuil, il reste 2 phénomènes que cette relation ne prend pas en compte :

- on assiste à un fléchissement du courant par rapport à l'exponentielle
- pour le courant maximum admissible dans cette diode (300mA), on atteint une tension V_{AK} de 1,1V supérieure à la hauteur de la barrière de potentiel interne sans polarisation V_0 (0,8V). A première vue, c'est paradoxal; en effet, nous avons vu que la hauteur de la barrière de potentiel V_p en polarisation directe valait :

$$V_p = V_0 - V_F \quad \text{où } V_F \text{ est la tension de polarisation directe au niveau de la jonction}$$

Physiquement, V_F ne peut pas dépasser V_0 , donc il faut trouver pourquoi $V_F < V_0$. La différence provient en fait de la chute de tension ohmique du courant d'anode sur la résistance R_P et R_N du silicium des régions P et N

$$V_F = V_{AK} - (R_P + R_N) \cdot I_A \quad \text{et l'on peut donc avoir } V_F < V_0 \text{ bien que } V_{AK} \text{ soit } > V_0$$

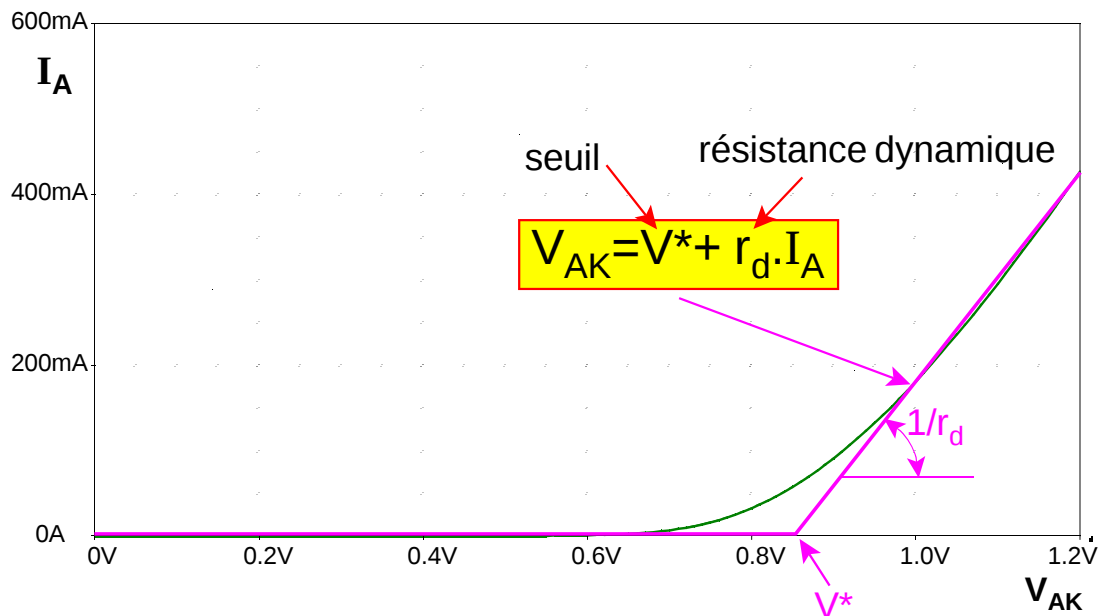
Le courant croît donc moins vite que l'exponentielle de V_{AK}

On retiendra que :

- les valeurs normales du courant passant d'une diode sont assez bien modélisées par une exponentielle de la tension V_{AK}
- appliquer à une diode une tension V_{AK} de quelques dixièmes de Volts de plus que le seuil conduit à une densité de courant très importante; on peut donc facilement endommager une diode de manière irréversible en lui imposant une tension V_{AK} **juste un peu trop élevée**. **Une diode passante doit être alimentée par un circuit qui limite le courant** (source de courant ou source de tension avec impédance de sortie suffisamment élevée)

$I_A(V_{AK})$: modélisation simplifiée

(1) linéarisation: seuil et résistance dynamique



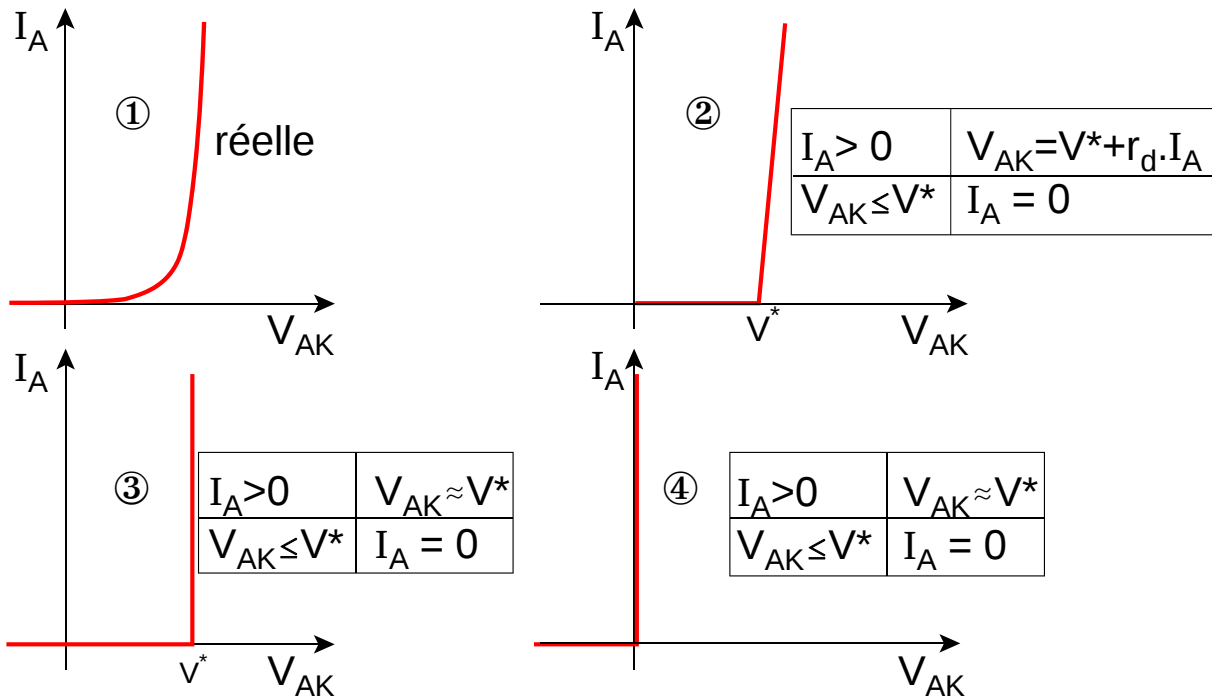
Un certain nombre de calculs, comme la détermination des pertes thermiques, s'accommodent bien d'une simplification de la caractéristique $I_A(V_{AK})$. On néglige le courant lorsque la tension est en dessous du seuil V^* et on linéarise la caractéristique autour du courant nominal. L'inverse de la pente a les dimensions d'une résistance r_d appelée **résistance dynamique**. L'expression de la tension aux bornes de la diode est alors simplement

$$V_{AK} = V^* + r_d \cdot I_A$$

Cette modélisation a aussi l'avantage d'être une linéarisation, qui peut considérablement simplifier les calculs de circuits comprenant des diodes.

$I_A(V_{AK})$: modélisation simplifiée

simplifications successives



On choisira toujours le modèle le plus simple capable de rendre compte du fonctionnement du montage étudié.

Partant du modèle analytique exponentiel le plus complet (en haut à gauche), on peut ainsi linéariser en plusieurs étapes :

- **tension de seuil et résistance dynamique** (en haut à droite). C'est le modèle linéaire le plus précis, surtout utilisé pour calculer les pertes thermiques
- **tension de seuil seule** (en bas à gauche) ; la résistance dynamique est négligée. Ce modèle est utile
 - si la tension de seuil n'est pas négligeable vis-à-vis des autres tensions du montage (comme l'alimentation). Il est clair que si l'on redresse une tension alternative de 3V d'amplitude, une tension de seuil de 0,7V ne peut pas être négligée
 - si la tension de seuil joue un rôle dans le fonctionnement, en permettant à de faibles tensions inférieures au seuil d'avoir peu d'effet sur le courant (exemple les logiques DTL où le seuil détermine l'immunité au bruit)
- **tout-ou-rien** (en bas à droite). C'est le modèle le plus couramment utilisé, notamment pour expliquer le fonctionnement de la plupart des montages à diodes (voir remarque 2). Le seuil de la diode est ici considéré comme négligeable, soit parce qu'il ne joue pas de rôle sur le **principe** du montage, soit parce que toutes les autres tensions du montage sont au moins un ordre de grandeur au-dessus.

REMARQUES

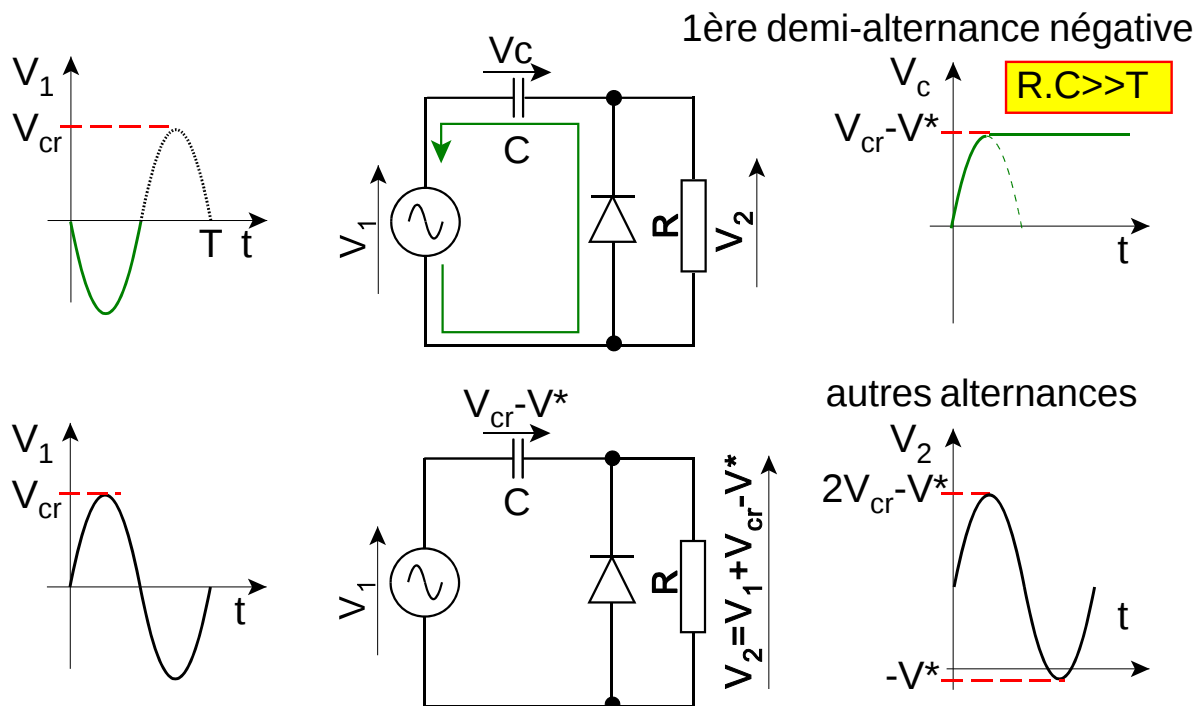
- 1) les simulateurs électriques (SPICE, ...) proposent des modèles très complets des diodes ; pour alléger les simulations, on peut envisager d'implanter des modèles linéaires, mais cela conduit souvent à des instabilités numériques en particulier avec le modèle tout-ou-rien
- 2) certains montages se basent précisément sur la dépendance exponentielle entre le courant et la tension ; dans ce cas toute linéarisation ou simplification masque complètement le fonctionnement
- 3) si la diode est **polarisée en inverse**, **vérifier** qu'elle n'entre pas en **avalanche**

Diode

PLAN

- ▶ introduction
- ▶ caractéristique I,V
- ▶ **montages à diodes**
 - ◆ **restaurateur**
 - ◆ **doublleur de tension**
 - ◆ **multiplieur**
- ▶ conclusions

Fixation de niveau ou restauration(1)



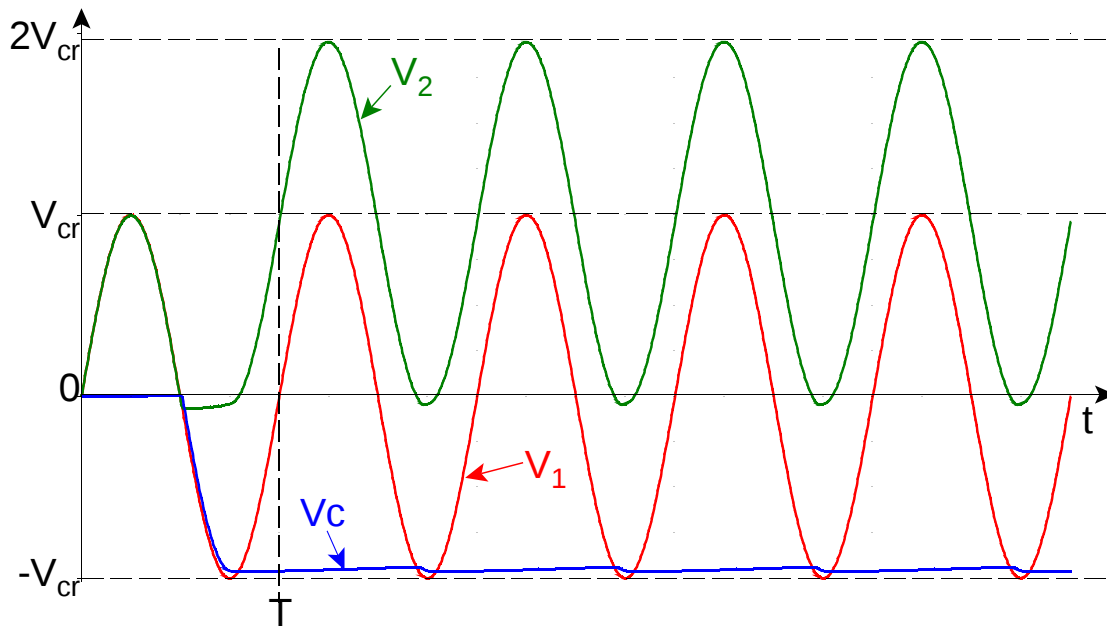
Le circuit de fixation de niveau ou "restaurateur" rajoute un niveau continu à un signal alternatif.

Commençons par la première demi-alternance négative. Le condensateur se charge positivement à une tension voisine de la crête du signal à travers la diode polarisée positivement.

Pour autant que la constante de temps RC soit largement supérieure (au moins 10x) à la période du signal le condensateur ne se déchargera que très peu pendant le reste de la période.

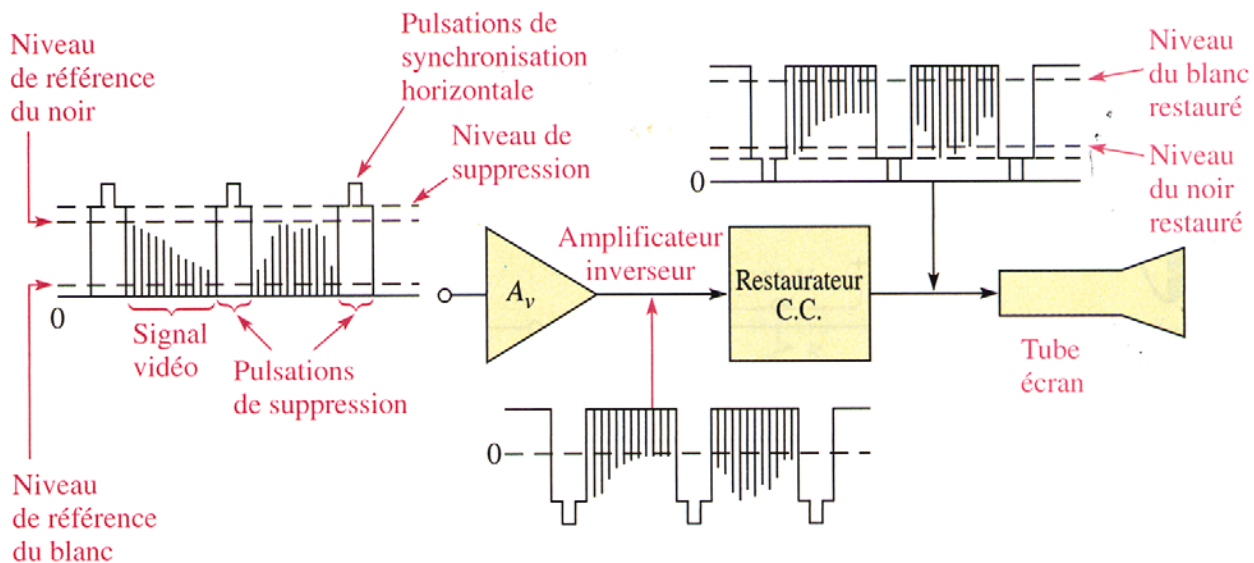
La tension continue du condensateur (voisine de tension de crête) vient donc se rajouter à la tension alternative de la source. La charge voit donc le signal d'entrée, mais décalé vers le haut d'une valeur presque égale à son amplitude.

Restauration (2)



On voit ici le démarrage du restaurateur et son fonctionnement sur quelques périodes. On remarquera la faible décharge du condensateur, qui est compensée à chaque période par une brève conduction de la diode, pendant le laps de temps où le signal d'entrée est supérieur en module à la tension sur le condensateur.

Restauration (3)

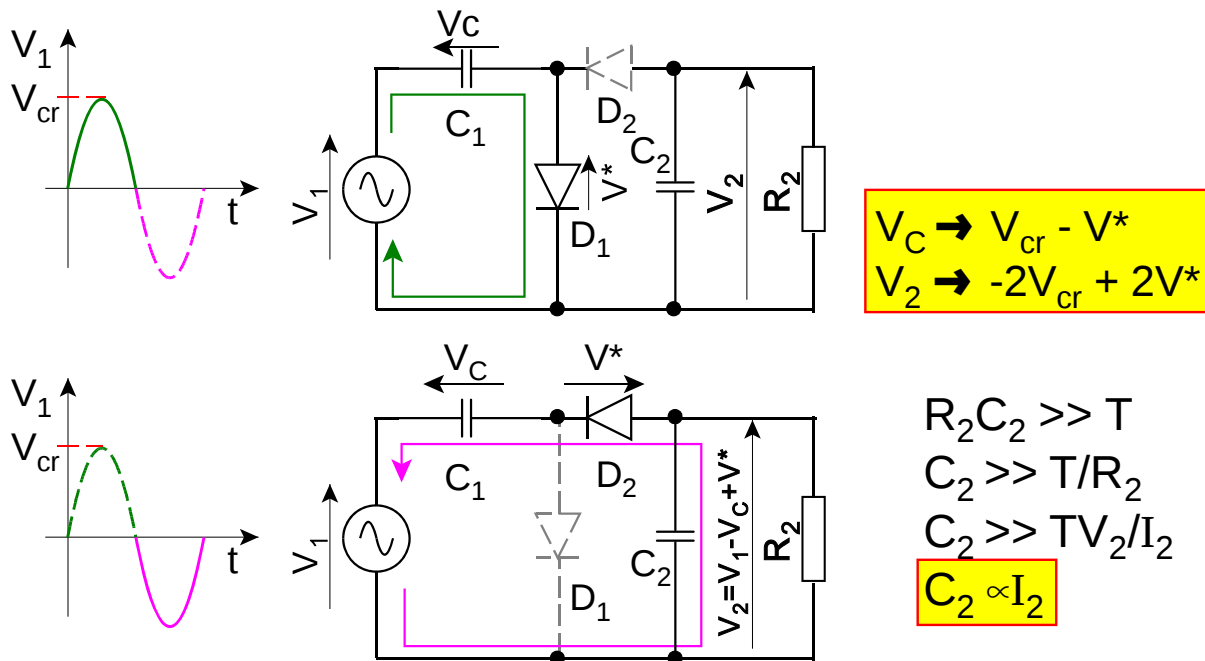


Le circuit restaurateur est utilisé dans les amplificateurs vidéo des téléviseurs analogiques. Le signal vidéo composite comprend des synchronisations horizontales et verticales, plus le signal de luminance. Ce signal passe par une série d'étages amplificateurs qui ne laissent pas passer sa composante continue. Or celle-ci est indispensable puisqu'elle code l'intensité lumineuse, du noir au blanc.

Avant le dernier étage qui attaque le tube cathodique, on place le circuit vu précédemment qui "restaure" la composante continue en calant le signal en positif, d'où le nom de "circuit restaurateur".

Doubleur de tension(1)

principe



Dans de nombreuses applications, on désire multiplier la tension de la source dont on dispose. Pour une tension de sortie alternative, le moyen le plus simple est un transformateur. Si l'on désire une tension continue, on utilisera un circuit à diodes et condensateurs connu sous le nom de "doubleur de tension".

Le fonctionnement simplifié du montage est le suivant :

Pendant l'alternance positive, D_1 est polarisée positivement, alors que D_2 est bloquée. Le condensateur se charge à la valeur de crête moins le seuil V^* de la diode, comme nous l'avons déjà vu dans les montages précédents.

Pendant l'alternance négative, c'est D_1 qui est polarisée en inverse et D_2 qui est passante. Comme dans le restaurateur, la tension du condensateur s'ajoute à celle de la source et le condensateur C_2 se charge en négatif à près du double de la tension de source et y reste. Après une période, il n'y a plus aucun courant prélevé à la source.

Si l'on connecte une résistance de charge R_2 en parallèle sur C_2 , avec $R_2 C_2 \gg T$, C_2 va se décharger faiblement pendant le reste de la période et sera remis à son niveau de crête pendant l'alternance négative suivante de la source.

Remarquons que la tension de sortie est négative et que chaque diode doit pouvoir supporter une tension inverse maximum de $2V_{cr}$ sans entrer en avalanche.

C'est la taille du condensateur de sortie C_2 qui va limiter le courant de sortie. En effet la condition

$$R_2 C_2 \gg T \text{ implique que } C_2 \gg T / R_2$$

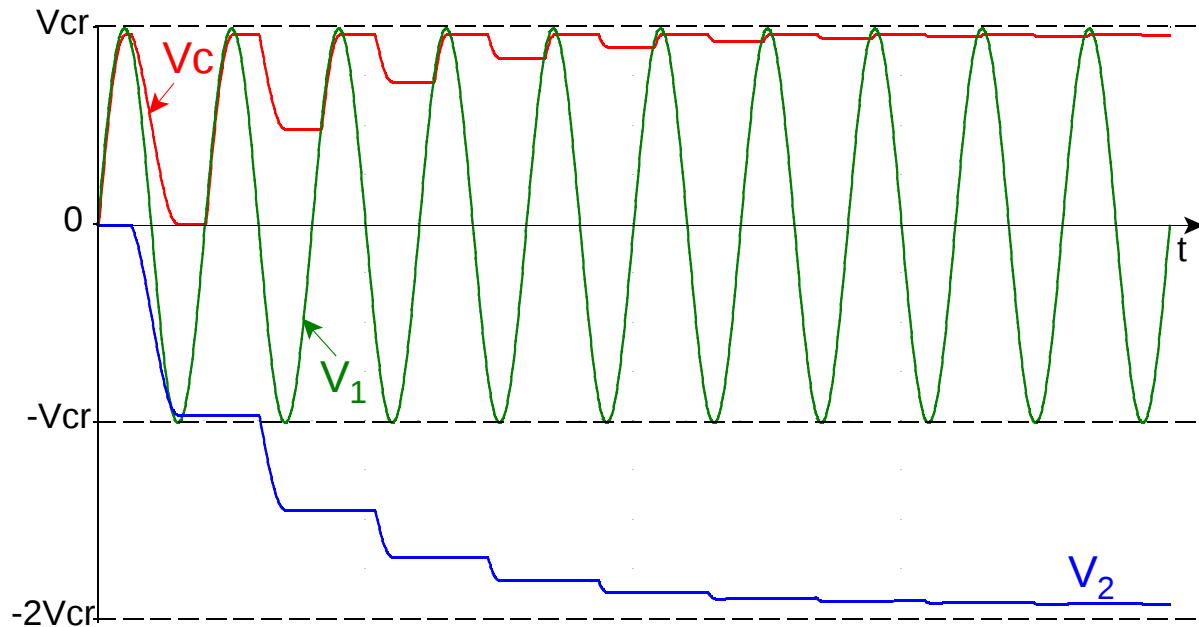
Si le condensateur est suffisamment gros, la tension à ses bornes varie peu et $I_2 \approx V_2 / R_2$

Donc $C_2 \gg T \cdot I_2 / V_2$ C_2 doit donc être proportionnel à I_2

En pratique, C_2 est limité à quelques centaines de μF , voire quelques mF , ce qui fixe la limite du courant I_2 .

Doubleur de tension(2)

transitoire de démarrage



En réalité, une fois passé le maximum de la première demi-alternance

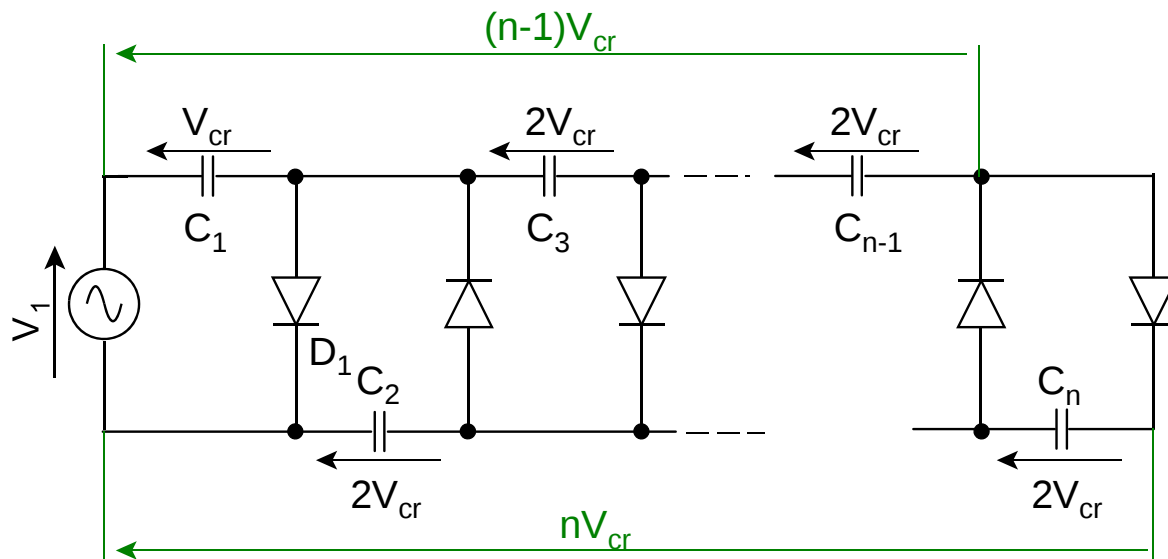
- l'armature de gauche de C_1 suit la tension de source;
- comme il n'y a pas de raison que le condensateur se décharge, l'armature de droite tend à suivre le mouvement et à prendre une tension négative; la diode D_1 se bloque
- C_2 n'étant pas chargé, la diode D_2 se met en conduction et un courant naît dans la maille source- C_2 - D_2 - C_1 , ce qui décharge C_1 et charge C_2 .

Dès que l'on a passé le maximum négatif de la source, D_2 se bloque et la source ne fournit plus de courant.

Au début de la deuxième période, C_1 se recharge à la tension de crête. Une fois passé le maximum positif, D_1 se bloque comme précédemment, mais D_2 ne se met pas à conduire immédiatement, car C_2 est déjà chargé presque à la tension de crête de la source. Il faut donc attendre la demi-alternance négative de la source pour que D_2 conduise. Comme précédemment C_1 se décharge dans C_2 , mais ici la décharge commence plus tard et la tension sur C_1 ne tombe plus à zéro.

De période en période, la tension de C_1 se rapproche de V_{cr} et celle de C_2 de $-2V_{cr}$.

Multiplieur de tension



Le montage précédent se généralise en ajoutant des échelons de D et C.

Dans le cas de la figure, on a placé un nombre pair n de diodes et de condensateurs; la tension de sortie est prélevée du côté des condensateurs d'indice pair et vaut nV_{cr} .

Remarquons que si l'on prélève la tension de sortie du côté des condensateurs d'indice impair, on obtient une multiplication par $(n-1)$, qui est un nombre impair. Dans ce cas, le condensateur C_n et la diode D_n sont évidemment superflus.

On vérifiera que chaque diode doit pouvoir tenir une tension inverse de $2V_{cr}$.

Diode

PLAN

- ▶ introduction
- ▶ caractéristique I,V
- ▶ montages à diodes
 - ◆ restaurateur
 - ◆ doubleur de tension
 - ◆ multiplieur
- ▶ **conclusions**

Diode

conclusions

- ▶ diode = composant de base très répandu
- ▶ nombreuses applications
- ▶ adapter le modèle que l'on utilise au montage
 - ◆ à priori modèle "tout-ou-rien" mais
 - vérifier si la tension de seuil joue un rôle
 - vérifier si la résistance dynamique peut apporter une information utile
 - ◆ certains montages à diodes ne peuvent pas être expliqués par un modèle linéarisé
- ▶ en polarisation inverse, vérifier le risque d'avalanche