

Chapitre 1

La diode

1.1 Caractérisation du composant

1.1.1 Dipôle

La diode est un composant constitué de deux broches : c'est un dipôle. Il est caractérisé par un courant et une tension a ses bornes. C'est un composant ayant un degré de liberté : l'application d'une tension fixe le courant et réciproquement. On se placera dans ce chapitre en convention récepteur.

Nous allons voir que ce composant est non-linéaire ¹. Mais sous certaines conditions, on peut se ramener à un composant linéaire. Les deux utilisations sont donc possibles, ce qui en fait un composant largement utilisé dans l'électronique.

1.1.2 Les différentes diodes

On peut recenser 6 grands composants de type diode ². La figure 1.1 montre les symboles associés et la représentation au niveau de la physique des composants.

- (a) La jonction PN est de loin la diode la plus courante. Elle est constituée de deux barreaux semiconducteurs accolés, de type différents (P et N). Il faut remarquer que les semiconducteurs peuvent être différents. Ces diodes sont utilisées en diodes de signal ³.
- (b) La diode Zener. Il s'agit d'une variante de la jonction PN, pour laquelle on surdope les matériaux. L'effet Zener ⁴ est utilisé pour stabiliser les tensions (seule utilisation).

¹on rappelle qu'un système est linéaire si la réponse r à une combinaison linéaire $e_1 + \lambda e_2$ des grandeurs d'entrée e_1 et e_2 est égale à la combinaison linéaire des réponses des grandeurs d'entrées : $r(e_1 + \lambda e_2) = r(e_1) + \lambda r(e_2)$. Une conséquence importante est qu'un signal sinusoïdal en entrée d'un dispositif doit rester sinusoïdal en sortie.

²il faut noter qu'il en existe quelques autres types de diodes non détaillées ici. Citons entre autre, les diodes IMPATT ou les diodes tunnel et les diodes laser

³c'est à dire intervenant dans le transport de l'information, sous entendu signal "utile".

⁴la zone de charge d'espace est alors étroite, en polarisation inverse, et le champ va augmenter dans cette petite zone. Pour un champ de l'ordre de grandeur de 10^6 V.cm^{-1} , il est alors possible d'arracher des électrons de la bande de valence côté P. L'électron peut passer par effet tunnel, qui est possible en raison de la zone de charge étroite.

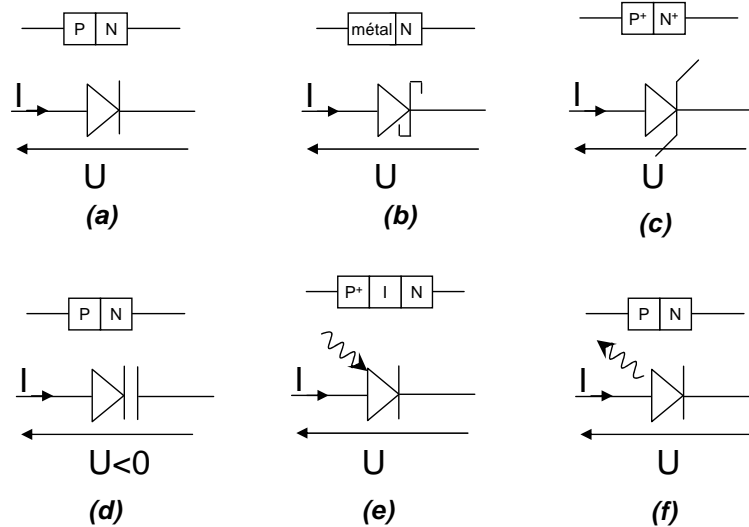


FIG. 1.1 – Les différentes sortes de diodes (constitution physique et symbole associé) : **(a)** jonction PN ; **(b)** diode Schottky ; **(c)** diode Zener ; **(d)** diode Varicap ; **(e)** photodiode ; **(f)** diode électroluminescente (LED)

- (c)** La diode Schottky est constituée par un assemblage d'un métal et d'un semiconducteur (généralement de type N). Ce type de diode est utilisé en diode de signal (électronique haute fréquence) et en photodiode dans l'UV.
- (d)** La diode varicap. C'est généralement une diode PN polarisée en inverse (ou une diode Schottky selon le domaine fréquentiel d'étude). Elle présente alors les caractéristiques d'un condensateur dont la valeur de sa capacité peut être ajustée à l'aide de la tension inverse. Cette capacité variable est utilisée dans les oscillateurs. Nous l'inclurons dans les jonctions PN dans la suite.
- (e)** La photodiode. Elle est souvent constituée d'une couche de semiconducteur intrinsèque (non dopé) prise en sandwich entre deux semiconducteurs de types différents (P et N). Elle permet de convertir un signal lumineux en un signal électrique.
- (f)** La diode électroluminescente. Il s'agit d'une jonction PN qui émet une onde dans le domaine optique (visible et proche infrarouge).

1.1.3 Caractéristiques statiques

Chaque diode est caractérisée par la relation courant-tension $I(V)$, ces grandeurs étant constantes dans le temps.

Jonction PN

La caractéristique courant-tension est donnée par la relation :

$$I = I_s \left(e^{U/U_T} - 1 \right) \quad (1.1)$$

où $U_T = \frac{k_b T}{q}$. La caractéristique de la diode est représentée sur la figure 1.2(a). I_s

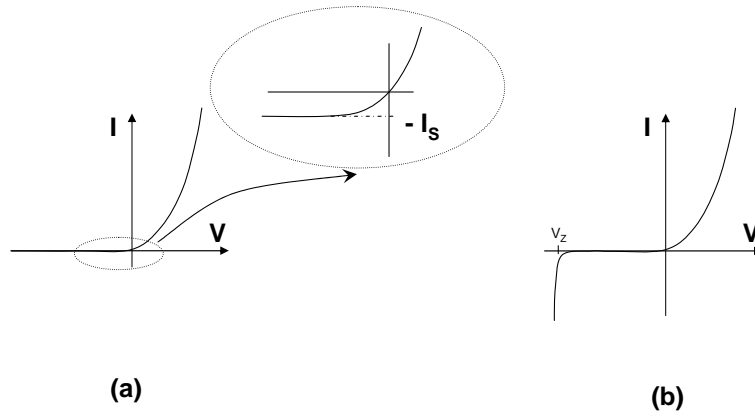


FIG. 1.2 – Caractéristique d’une diode PN. (a) sans prendre en compte la zone de claquage. (b) avec la tension de claquage.

est le courant de saturation de la diode (courant inverse). Ce courant est très faible : le schéma ne tient pas compte de ces ordres de grandeurs. Ainsi :

- Pour $U < 0$: $I \approx -I_s \approx 0$. La diode est bloquée (seul un très faible courant circule).
- Pour $U > 0$: $I = I_s e^{U/U_T}$. La diode est passante : un courant positif (important) circule.

D’où l’appellation de jonction redresseuse : seul un courant positif significatif peut circuler dans ce composant. On définit la tension de seuil de la diode, la tension pour laquelle le courant en direct vaut 1 mA . La tension de seuil ⁵, notée V_T d’une diode PN vaut $V_T = 0.6$ à 0.7 V . Pour affiner le modèle, la loi courant-tension peut faire intervenir le facteur d’idéalité η de la diode, $1 \leq \eta < 2$:

$$I = I_s \left(e^{U/\eta U_T} - 1 \right) \quad (1.2)$$

Enfin, lorsque la tension est très négative, un phénomène d’avalanche se produit ⁶ : le courant inverse augmente exponentiellement (en valeur absolue). Il y a risque de claquage de la diode. La tension limite, en inverse, est appelée tension de claquage (V_c), et est typiquement supérieure à 10 V pour une diode de signal (faible courant). Ceci est représenté par la figure 1.2(b). Ce phénomène d’avalanche peut être utilisé dans certains systèmes pour augmenter le courant (utilisation en optoélectronique par exemple).

Enfin, la diode PN est caractérisée par une fréquence de coupure basse ⁷ : son usage

⁵attention : il ne faut pas confondre cette tension de seuil, qui est uniquement conventionnelle, avec la tension $k_B T/q$, souvent notée U_T , qui est un paramètre physique de la jonction.

⁶La tension accélère les porteurs. Des collisions de ces derniers avec les atomes du réseau cristallin permettent de créer de nouvelles paires électrons-trous. On assiste ainsi à une augmentation du courant. Ce phénomène, qui n’a lieu que dans la zone de charge d’espace (seule zone où règne un champ), ne peut se produire que si cette dernière est suffisamment longue. Ce phénomène existe essentiellement dans des diodes dont le dopage est peu élevé. Cet effet peut détruire le composant ... mais il peut aussi être mis à profit pour amplifier des signaux.

⁷cette basse fréquence de coupure est due aux capacités de la diode. Dans un tel composant, les porteurs minoritaires sont responsables du courant (par diffusion) : la capacité de diffusion est ainsi élevée. En outre, la mobilité des trous est faible ...

est limité aux circuits basses fréquences, comme nous le verrons ultérieurement.

Diodes Schottky

La caractéristique courant-tension a la même allure et obéit à une loi analogue. La fréquence de coupure est élevée ⁸ (jusqu'à quelques 100 GHz!). La tension de seuil est plus faible : $V_T \approx 0.3V$ et le courant de saturation (inverse) beaucoup plus élevé. Ce composant est réservé à l'utilisation haute fréquence (seul le paramètre de fréquence de coupure présente un avantage) ou en tant que photodiode dans le domaine UV.

La diode Zener

La diode Zener est une diode PN caractérisée par un effet analogue à l'effet d'avalanche et qui intervient à des tensions inverses plus faibles en valeur absolue : c'est l'effet Zener. Cet effet permet de stabiliser la tension aux bornes de la diode. La tension Zener est typiquement comprise entre -1 V et -15 V. Attention, pour ce type de diode, il est courant d'inverser les conventions de courant et de tension.

La photodiode

La photodiode est une jonction caractérisée à l'obscurité par une relation courant-tension analogue à celle d'une diode PN. Sous illumination, cette caractéristique se translate vers le bas : un photocourant I_{ph} , proportionnel au flux incident, apparaît (cf figure 1.3). Ce courant est un courant inverse. Il faut remarquer qu'à $V = 0V$, il n'y a pas de courant d'obscurité : le courant traversant la diode est exclusivement dû au courant généré par le flux lumineux incident.

Enfin, il existe une zone pour laquelle la puissance est négative (zone hachurée du graphique) : la photodiode fournit une puissance au système connecté à ses bornes. Elle peut donc fonctionner en générateur et alimenter un circuit (fonctionnement en photopile).

Il existe différentes photodiodes pour couvrir le domaine optique. Chaque photodiode est caractérisée par sa réponse en longueur d'onde (réponse spectrale).

La LED

Les diodes électroluminescentes, DEL, (ou LED : Light Emitted Diode) sont des jonctions PN (ou des structures plus complexes) ayant une caractéristique courant-tension analogue à celle d'une jonction PN de signal (cf figure 1.3 b). Le flux émis est directement proportionnel au courant traversant la diode. Les tensions de seuil varient selon la longueur d'onde d'émission.

⁸c'est un composant unipolaire : le courant principal n'est pas dû à la diffusion de porteurs minoritaires mais aux porteurs majoritaires. Seule la capacité de transition intervient : la capacité globale est donc beaucoup plus faible que pour une jonction PN et la fréquence de coupure plus élevée.

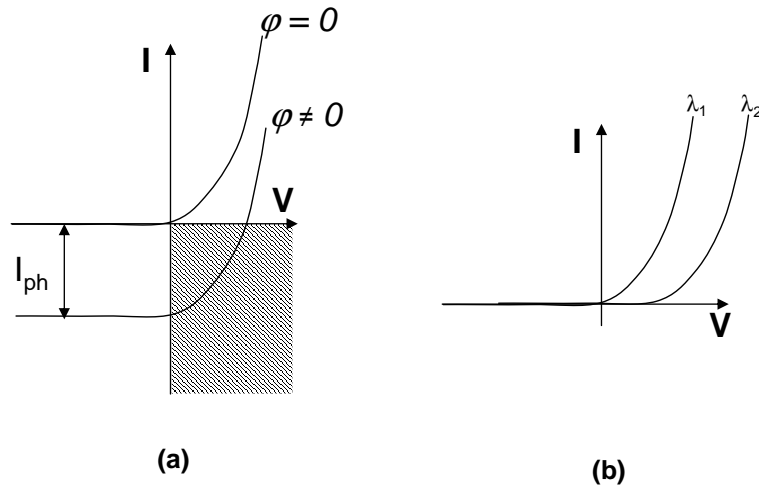


FIG. 1.3 – Caractéristiques courant-tension : **(a)** d'une photodiode (la partie hachurée correspond à la zone de fonctionnement en générateur); **(b)** d'une diode électroluminescente.

1.1.4 Les modèles

Nous ne nous intéresserons dans la suite qu'à une jonction PN classique (diode de signal) : les autres types de diodes fonctionnant sur des principes analogues peuvent être modélisés de la même manière.

Il existe 3 grands modèles pour l'étude d'une jonction PN en régime statique (signaux constants), représentés sur la figure 1.4. Ces modèles permettent de résoudre analytiquement la détermination des différents courants et tensions d'un circuit. Il faut remarquer que la loi de variation exponentielle introduit de sérieuses difficultés pour une résolution théorique ...

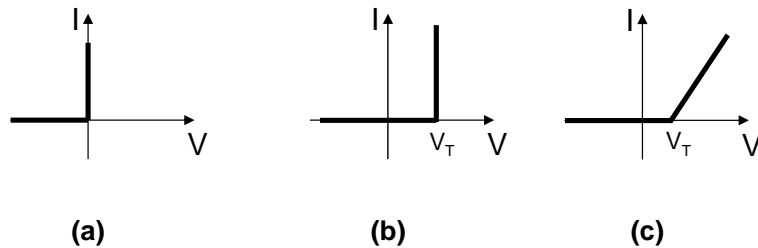


FIG. 1.4 – Les différents modèles grands signaux de la diode : **(a)** modèle sans seuil; **(b)** modèle avec seuil; **(c)** modèle avec seuil et avec pente.

- (a) Modèle sans seuil. C'est le modèle le plus simple. Il est très commode pour comprendre les montages non-linéaires rapidement.
- (b) Modèle avec seuil. Il permet de prendre en compte la tension de seuil et est donc plus précis que le modèle précédent. C'est le modèle le plus utilisé pour les montages non-linéaires à diodes.
- (c) Modèle avec seuil et avec pente. Il permet de tenir compte de manière simple

de la pente de la caractéristique. Il est utilisé aussi bien pour les montages linéaires que non linéaires.

1.1.5 Les différents régimes

Dans les circuits de l'électronique, on peut rencontrer deux types de signaux : les signaux constants (continus) et les signaux variables (alternatifs). Les signaux constants permettent de définir un point d'équilibre des montages et fournissent l'énergie nécessaire au fonctionnement des circuits actifs. Le second type peut être étudié en ne considérant que le signal élémentaire variable : le signal sinusoïdal ⁹. Ce sont les signaux variables qui transportent l'information utile à transmettre.

Vocabulaire : l'étude des signaux constants est appelée étude de la **polarisation** et le régime variable est appelé **régime dynamique**.

1.2 Polarisation d'une diode

Connectons la diode à un circuit (figure 1.5(a)). La diode est caractérisée par sa relation courant-tension $I(V)$ vue précédemment. Le circuit est aussi caractérisé par une relation courant-tension $I(V)$, qui lui est propre (par application du théorème de Thévenin). Il s'agit du même courant et de la même tension. Lorsque la diode est isolée, on a une infinité de couple (I,V) possible (de même pour le circuit).

En connectant la diode au circuit, le système global va arriver à un point d'équilibre : le couple (I,V) sera parfaitement déterminé ¹⁰. Ce point d'équilibre s'appelle le point de polarisation ou point de fonctionnement.

Supposons que le circuit externe soit linéaire. Il peut se mettre sous la forme d'un

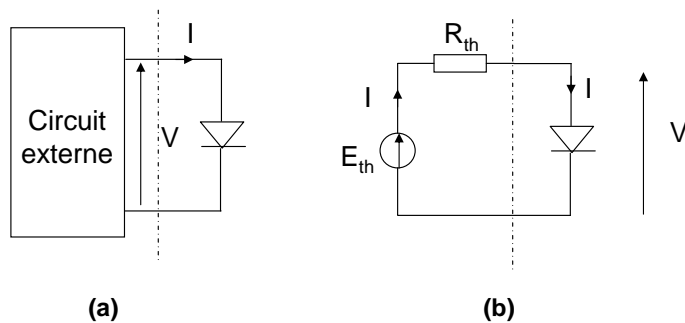


FIG. 1.5 – (a) Connexion d'une diode à un circuit ; (b) Connexion d'une diode à un circuit linéaire.

générateur de Thévenin équivalent E_{th} et d'une résistance R_{th} (cf figure 1.5(b)). Il existe deux approches pour mieux comprendre cette notion de polarisation.

⁹Rappelons que tout signal peut être décomposé sur une base d'exponentielle complexe (via la transformée de Fourier) : le signal élémentaire est donc le signal sinusoïdal.

¹⁰dans certains cas particulier, on peut avoir plusieurs points de fonctionnement. Il n'y a alors pas unicité du couple (I,V) . Mais il s'agit de cas marginaux ... qui conduisent le plus souvent à des régimes de fonctionnement instables

Approche mathématique : Ce circuit est caractérisé par la relation courant-tension suivante : $V = E_{th} - R_{th}I$. Le couple (I, V) , initialement indéterminé, doit satisfaire les deux caractéristiques courant-tension :

$$\begin{cases} I = I_s \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \\ V = E_{th} - R_{th}I \end{cases}$$

On a deux inconnues (I, V) et deux équations. Il existe donc un unique couple (I_0, V_0) solution de ce système : c'est le point de polarisation ou point de fonctionnement (ou de repos). Les paramètres du système {circuit externe+diode} sont totalement définis.

Approche graphique : graphiquement, les deux parties du système (circuit externe et diode) correspondent à deux courbes $I(V)$, comme cela est représenté sur la figure 1.6. L'intersection de ces deux courbes définit un unique point (I_0, V_0) , que l'on peut évaluer d'après les graphiques : c'est le point de fonctionnement (ou de polarisation).

Remarque : la résolution graphique peut être faite sur des modèles de diodes plus

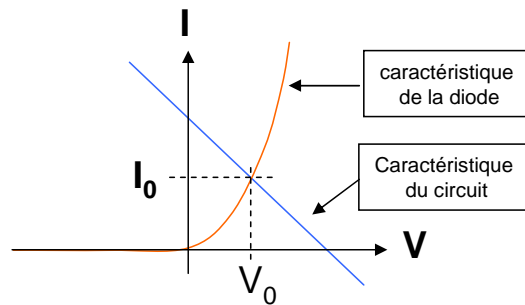


FIG. 1.6 – Principe de la résolution graphique

simples (sans seuil, avec seuil etc ...) plutôt que sur la caractéristique exponentielle.

1.3 Régime dynamique

1.3.1 Introduction

Supposons que nous superposions aux grandeurs continues des signaux variables et plus précisément des signaux sinusoïdaux (on suppose que le circuit reste globalement linéaire, c'est à dire que les signaux variables restent sinusoïdaux, de même fréquence en tout point du circuit). Chaque grandeur (E_{th}, I, V) est alors la somme d'une composante continue (E_0, I_0, V_0) de polarisation et d'une composante alternative (e, i, v) :

$$\begin{aligned} E_{th} &= E_0 + e \\ I &= I_0 + i \\ V &= V_0 + v \end{aligned}$$

Afin de rester linéaire, on va supposer que ces signaux variables sont de faible amplitude (on justifiera plus tard cette hypothèse). On les qualifie alors de **”petits signaux”**.

On a donc des fluctuations du point de polarisation précédent autour d’un point fixe (ie autour du point de repos déterminé précédemment : (I_0, V_0)). La caractéristique imposée par le générateur va se traduire verticalement : l’ordonnée à l’origine fluctue autour d’une valeur moyenne E_{th}/R . D’un point de vue graphique, on peut représenter la situation dans le repère (I, V) , comme le montre la figure 1.7 ou dans le repère lié aux petits signaux (ayant pour origine le point de polarisation). De petites variations de la tension de la diode autour d’une valeur moyenne engendrent de petites variations du courant autour de la valeur moyenne. On voit bien un déplacement du point de fonctionnement autour de sa valeur moyenne (point de polarisation ou de repos), résultant de la translation de la caractéristique courant-tension (qui est une droite) du générateur et de la résistance.

Cette approche graphique permet de constater l’influence du point de polarisation :

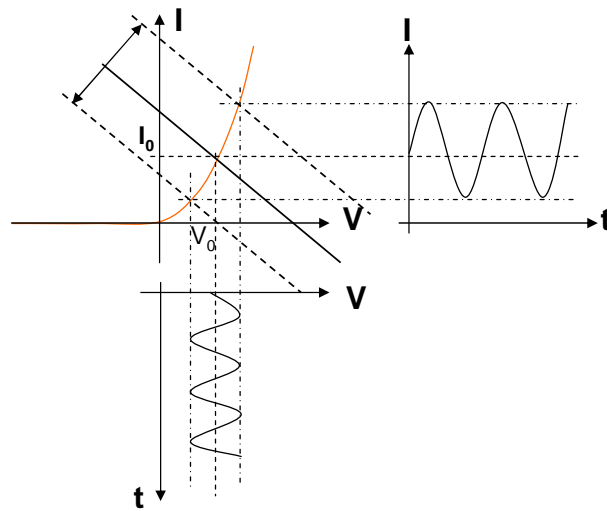


FIG. 1.7 – Régime dynamique : variations autour du point de polarisation.

- l’amplitude des variations du courant dépend de la position du point de polarisation sur la caractéristique de la diode. Autour de $V = 0V$, les amplitudes seront faibles tandis qu’elles seront plus importantes pour un point de polarisation $V_0 > 0$.
- la déformation éventuelle des variations du courant est fonction du point de polarisation : proche de $0 V$, les signaux seront soumis à des déformations plus importantes que loin de $0 V$.

1.3.2 Modélisation du régime dynamique

Développons au premier ordre la caractéristique de la diode :

$$I = I_0 + i \tag{1.3}$$

$$= I_s e^{\frac{V}{V_T}} \tag{1.4}$$

$$= I_s e^{\frac{V_0+v}{U_T}} \quad (1.5)$$

$$= I_s e^{\frac{V_0}{U_T}} e^{\frac{v}{U_T}} \quad (1.6)$$

$$= I_s e^{\frac{V_0}{U_T}} \left(1 + \frac{v}{U_T}\right) \quad (1.7)$$

$$= I_0 \left(1 + \frac{v}{U_T}\right) \quad (1.8)$$

D'où la relation :

$$i = I_0 \frac{v}{U_T} \quad (1.9)$$

En écrivant $v = V - V_0$, l'équation 1.8 peut se mettre sous la forme :

$$I = I_0 \left(1 - \frac{V_0}{U_T}\right) + I_0 \frac{V}{U_T} \quad (1.10)$$

Cette caractéristique courant-tension de la diode est une droite passant par le point (I_0, V_0) (point de polarisation) et qui a pour pente :

$$g = \frac{1}{r_d} = \frac{i}{v} = \frac{I_0}{U_T}$$

On dit que l'on a linéarisé la caractéristique courant-tension de la diode autour du point de polarisation du montage : on a assimilé la caractéristique courant-tension de la diode à sa tangente au point de polarisation.

r_d est la résistance dynamique de la diode. L'inverse correspond à la pente de la tangente, c'est à dire la dérivée :

$$\frac{1}{r_d} = \left. \frac{\partial I}{\partial V} \right|_{(I_0, V_0)} = \frac{I_s e^{V/U_T}}{U_T} = \frac{I_0}{U_T} = \frac{i}{v}$$

En effet :

$$I = I_0 + \underbrace{dI}_i = I_0 + \left. \frac{\partial I}{\partial V} \right|_{(I_0, V_0)} \underbrace{dV}_v$$

La figure 1.8 montre la linéarisation de cette caractéristique.

Remarques :

1. on voit ici l'intérêt du point de polarisation. Il permet entre autre de fixer la résistance dynamique de la diode.
2. Ce raisonnement n'est valable que si le développement limité au premier ordre est justifié, c'est à dire que si les amplitudes des signaux variables sont faibles. La condition est la suivante : $v \ll U_T$. Si ce n'est pas le cas, il faut faire un développement limité à des ordres supérieurs : on perd alors toute notion de linéarité (des termes au carré ou au cube apparaissent). Les signaux ne seront plus sinusoïdaux, puisqu'il y a alors l'apparition d'harmoniques. Par exemple, graphiquement, une augmentation des amplitudes des tensions variables conduit à une déformation du courant : ce dernier ne sera plus sinusoïdal si les amplitudes sont trop fortes (on ne peut plus assimiler la caractéristique courant-tension de la diode à sa tangente : l'écart entre les deux devient trop important).

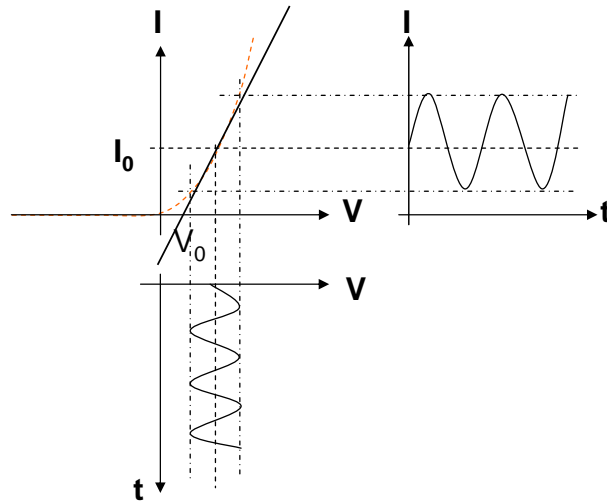


FIG. 1.8 – Linéarisation de la caractéristique courant-tension autour du point de polarisation.

1.3.3 Schéma petits signaux

L'équation 1.9 permet de montrer que les petits signaux ne voient qu'un effet de résistance. La diode peut être remplacée par une simple résistance pour ces petits signaux.

En outre, la caractéristique courant-tension du modèle de Thevenin équivalent, peut s'écrire, respectivement à l'équilibre (sans signaux variables) et avec les signaux variables :

$$\begin{cases} V_0 = E_0 - R_{th}I_0 \\ V_0 + v = E_0 + e - R_{th}(I_0 + i) \end{cases}$$

La dernière équation peut donc se simplifier :

$$v = e - R_{th}i \quad (1.11)$$

Ainsi, les petits signaux ne voient que la source variable et la résistance. En particulier, ils ne voient pas la source continue (qui est remplacée par un court-circuit, c'est à dire un fil). Les équations 1.9 et 1.11 permettent d'en déduire un schéma équivalent vu par les petits signaux. Le schéma de la figure 1.9 montre qu'un schéma global peut se décomposer en deux : un schéma concernant uniquement les signaux de polarisation (étude du paragraphe 1.2) et un schéma petits signaux. Dans la pratique, pour déterminer un schéma petits signaux, il suffit de partir du schéma initial global et de remplacer tous les éléments par leurs équivalents petits signaux. On retiendra les équivalents petit signaux suivants :

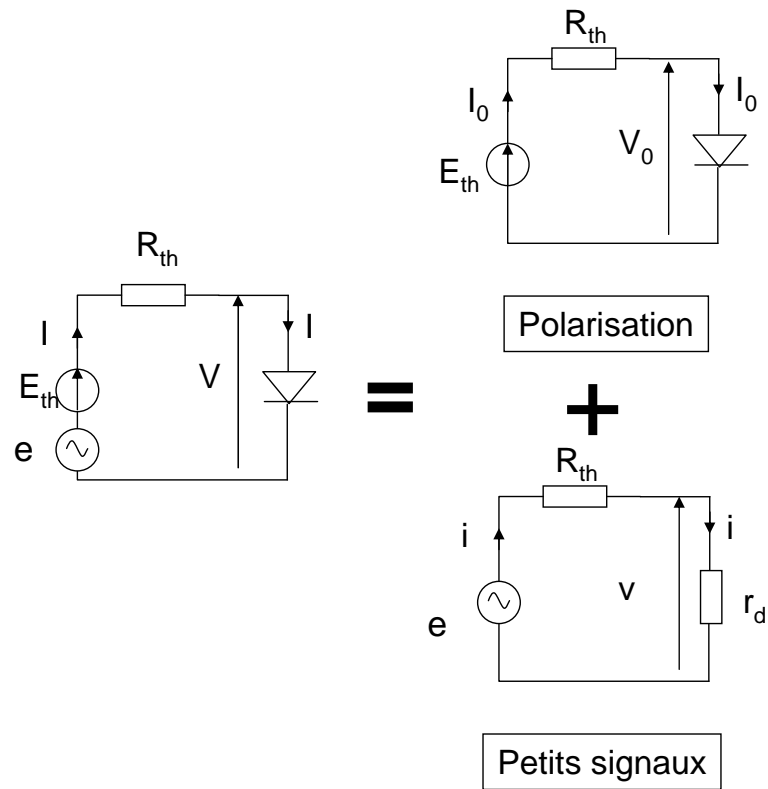


FIG. 1.9 – Décomposition d'un schéma en un schéma de polarisation et un schéma petits signaux.

Source de tension continue	: fil
Source de tension alternative	: source de tension alternative
Source de courant continu	: circuit ouvert
Source de courant alternatif	: source de courant alternatif
Résistance	: résistance
Condensateur	: condensateur
Inductance	: inductance
Diode	: résistance (résistance dynamique)

1.3.4 Schéma petits signaux hautes fréquences.

Polarisation directe

Considérons une jonction PN polarisée en directe et soumise à des petits signaux aux hautes fréquences. La diode est équivalente à une résistance dynamique (de faible valeur car la pente de la caractéristique I-V en polarisation directe est importante) d'après l'étude précédente.

La physique des composants nous apprend en outre que cette diode a un comportement capacitif qu'il faut prendre en compte lorsqu'on travaille aux hautes

fréquences : il s'agit de la capacité de diffusion ¹¹, notée C_D . Le schéma petits signaux doit tenir compte de cette capacité (cf figure 1.10(a)).

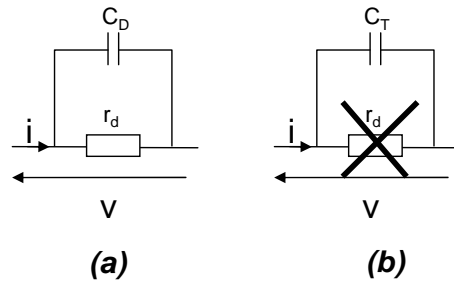


FIG. 1.10 – Schéma petits signaux d'une diode en haute fréquence : (a) Polarisation directe ; (b) Polarisation inverse.

Polarisation inverse

En polarisation inverse, la résistance dynamique est très grande (elle tend vers l'infini puisque la caractéristique I-V est parallèle à l'axe des abscisses). La diode est cette fois-ci caractérisée par une autre capacité, dite de transition et notée C_T ¹². Le schéma équivalent se résume donc à un seul condensateur (cf figure 1.10(b)).

Remarque : c'est cette capacité de transition qui est utilisée dans les diodes varicap. Il faut donc toujours utiliser les diodes varicap en inverse. La capacité dépend de la tension appliquée. La physique du composant nous apprend que cette capacité varie selon la loi suivante :

$$C_T = \frac{C_0}{\sqrt{1 - \frac{V}{V_d}}} \quad (1.12)$$

Ces capacités varient typiquement de quelques picofarad à quelques centaines de picofarad.

Jonction schottky

Une jonction Schottky ne fonctionne pas comme les diodes PN : les porteurs minoritaires n'interviennent pas. Il n'y a donc pas de capacité de diffusion, d'où une utilisation en plus haute fréquence possible.

¹¹rappelons que la capacité de diffusion correspond à une charge en excès de signe opposé de part et d'autre de la zone de charge d'espace, cet excès provenant de l'augmentation des porteurs minoritaires proche de la ZCE. Une charge supplémentaire par rapport à l'équilibre est donc stockée de chaque côté d'une zone dépourvue de charges (ZCE) : il y a donc un effet de capacité.

¹²La charge stockée précédente est très faible, puisque les porteurs majoritaires n'ont pas diffusés en raison de l'augmentation de la barrière de potentiel : la capacité de diffusion est donc négligeable. Par contre, la zone de charge d'espace est très importante (polarisation inverse) : elle va subir une variation importante de dimension lorsqu'on soumettra la diode à un régime variable haute fréquence (et toujours en inverse). Ces modulations de la ZCE entraînent des modulations des deux zones chargées de part et d'autre de la jonction (modulations des ZCE côté N et côté P, de charges opposées) : il en découle un effet capacitif.

Diode	Domaine fréquentiel	Utilisation	Tension de seuil
Jonction PN	basse fréquence	linéaire et non-linéaire, faible et fort courant	0.6 V
Zener	continu	non linéaire et faible courant	0.6 V en diode $V_Z < 0$ variable la diode
Schottky	Haute fréquence	linéaire et faible courant	0.3 V
LED	basse fréquence	optoélectronique (analogique ou numérique)	selon la longueur d'onde
Photodiode	basse et haute fréquence	optoélectronique (analogique et numérique)	-

