

EN2
Modélisation de composants
Diode
Diode zéner
Transistor bipolaire

Concept

● Pourquoi modéliser un composant?

- *Permet de comprendre son comportement*
 - *En régime continu notamment ou*
 - *En régime alternatif*

- *La compréhension du comportement permet de faire des choix de structures*
 - *Conception de dispositif électronique*
 - *Pourquoi ce composant plutôt qu'un autre ...*
 - *Assemblage de fonctions*

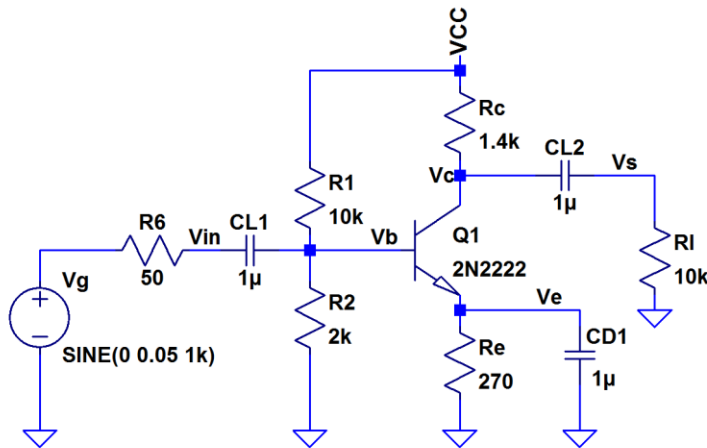
- *Permet de séparer l'étude du fonctionnement STATIQUE et DYNAMIQUE*
 - *STATIQUE= CONTINU= POLARISATION d'un composant= fonction particulière attendue*
 - *DYNAMIQUE= signal ALTERNATIF= signal utile à traiter*

- *Permet de faire des calculs simples sans l'aide de simulateur*

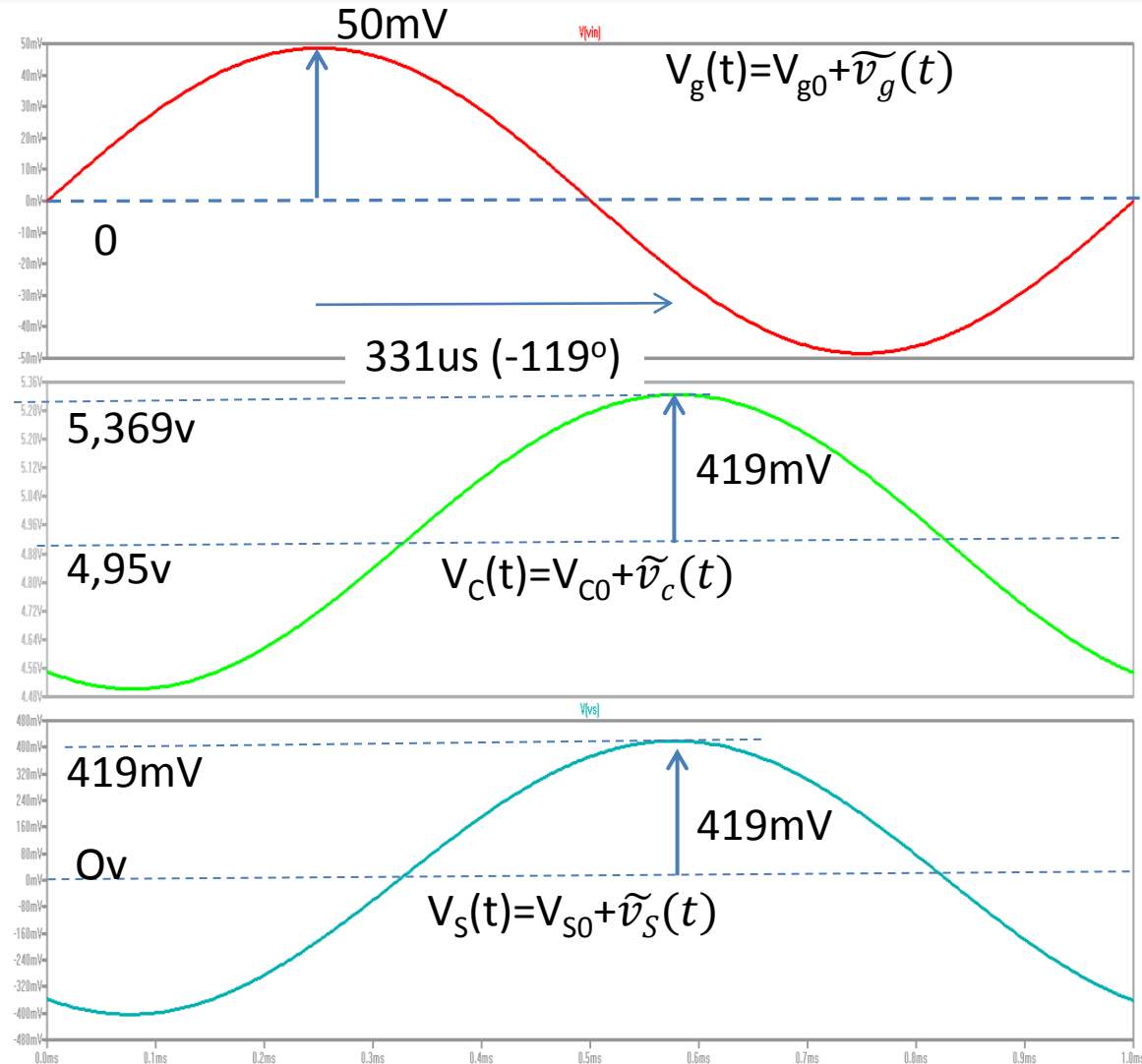
Compréhension des signaux obtenus

Point de fonctionnement

- Statique
- Dynamique
- Instantané

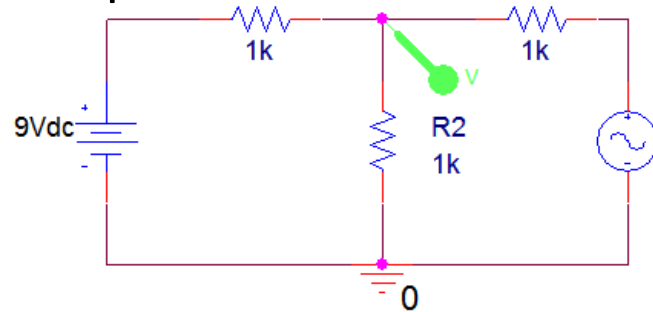


;op
.tran 0 3ms 1ms

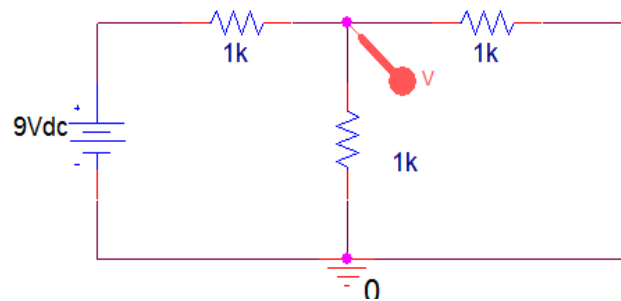
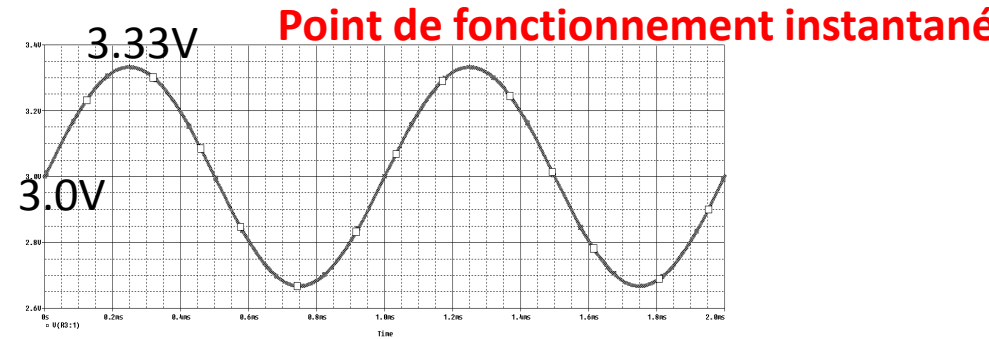


Théorème de superposition

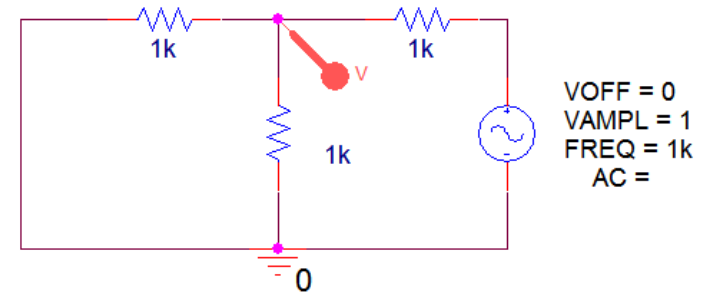
Un exemple



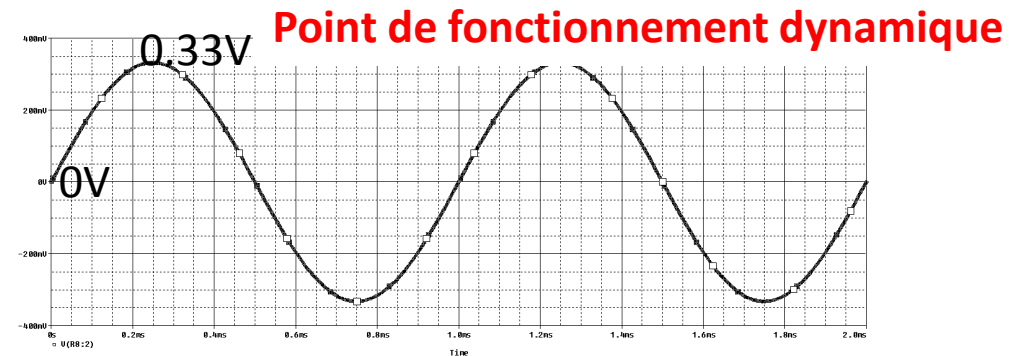
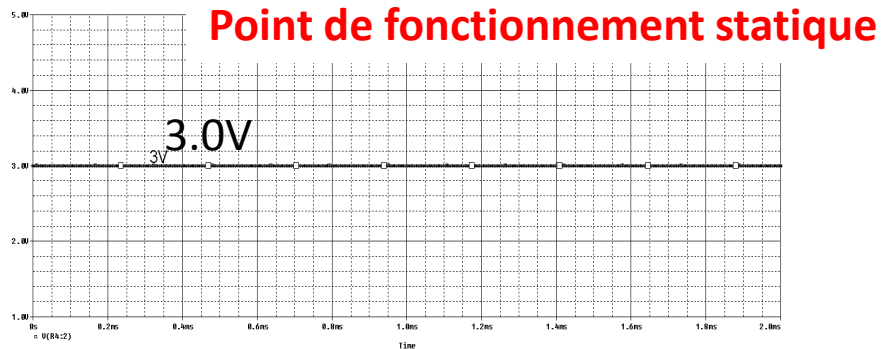
VOFF = 0
VAMPL = 1
FREQ = 1k
AC =



+

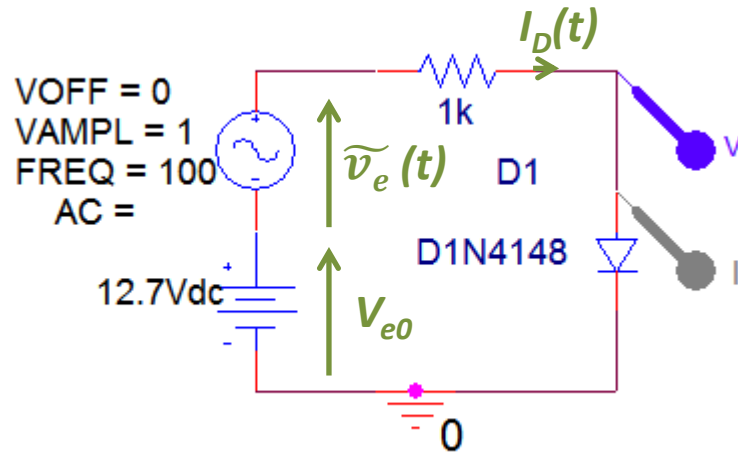


VOFF = 0
VAMPL = 1
FREQ = 1k
AC =



Point de fonctionnement (diode)

Expérience 1



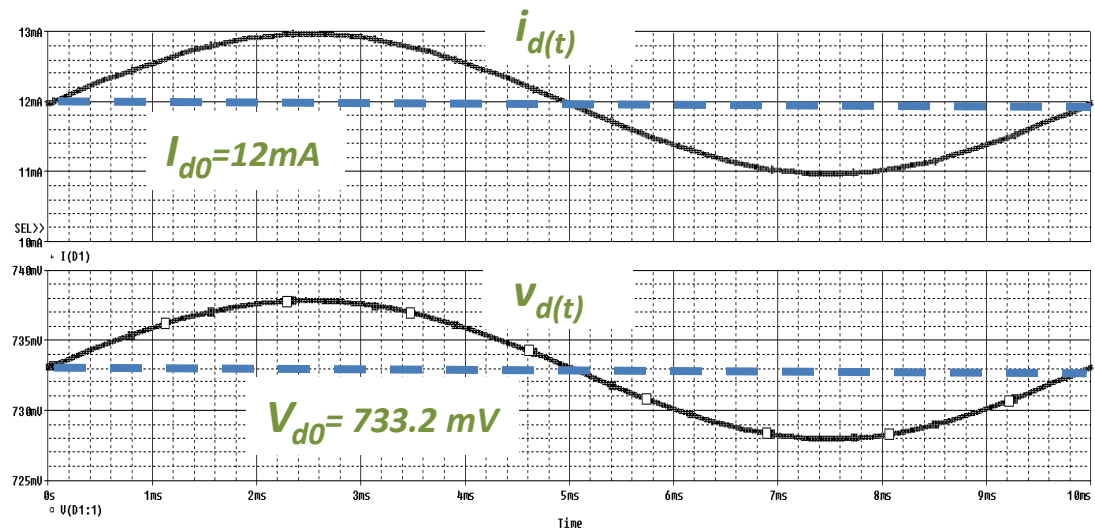
La solution du problème ($I_D(t), V_D(t)$) est donnée par la résolution du système de 2 équations à 2 inconnues suivant

$$\begin{cases} I_D(t) = \frac{V_{e0} + v_e(t)}{R_1} - \frac{1}{R_1} V_D = \frac{V_E(t)}{R_1} - \frac{1}{R_1} V_D \\ I_D = f(V_D) = I_s (e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1) \quad \text{avec } \eta = 2 \end{cases}$$



En observant les courbes obtenues en simulation nous constatons un comportement quasi-linéaire de la diode car le courant $I_D(t)$ peut-être décomposé comme la somme de:

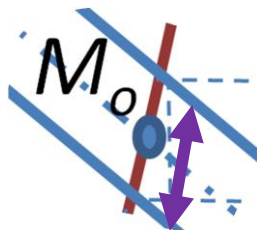
- I_{d0} : courant constant qui est la réponse à V_{e0}
- $\tilde{i}_d(t)$: courant alternative qui est la réponse à $\tilde{v}_e(t)$



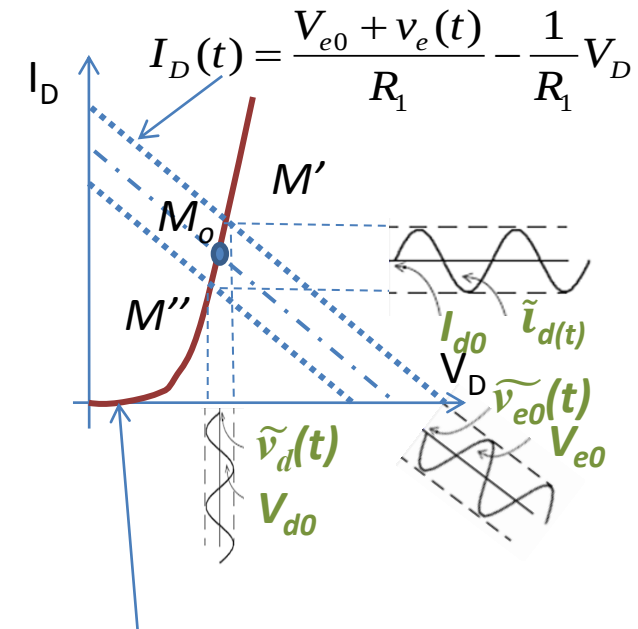
Point de fonctionnement instantané

● Expérience 1: résolution graphique

- La solution $M(V_D, I_D)$ est l'intersection de la droite de commande avec la caractéristique de charge
- La droite de commande se déplace au rythme de $\tilde{v}_e(t)$ **autour d'un point de symétrie M_o**
 - *le point M se déplace en fonction du temps entre M' et M''*
- $M(t)$ est appelé point de fonctionnement instantané
- M_o , solution du système pour $v_e(t)=0$, est appelé point de fonctionnement statique
- La trajectoire de M , pratiquement en ligne droite, justifie le fonctionnement quasi-linéaire du montage



$M(t)$ parcourt
cette portion
de courbe



$$I_D = I_s \left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right) \quad \text{avec } \eta = 2$$

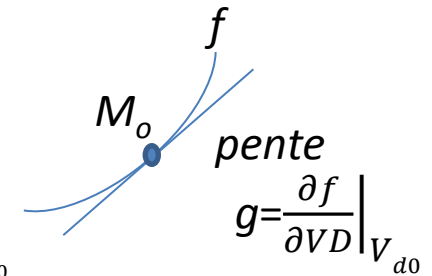
Linéarisation autour d'un point de repos

● Expérience 2 : calculs préalables

- Autour du point de repos (I_{d0}, V_{d0}) précédent nous assimilerons la trajectoire du point instantané à une droite

- Cette droite passe par $M_o(I_{d0}, V_{d0})$
- La pente g de cette droite correspond à la tangente de f en $M_o(I_{d0}, V_{d0})$
 - Elle est homogène ici à une conductance

- La valeur de cette pente est la dérivée de $I_D = f(V_D)$ en $M(V_{d0}, I_{d0})$: $g = \frac{\partial I_D}{\partial V_D} \Big|_{V_{d0}}$



- Comment calculer la pente (homogène à une conductance) autour de M_o

- Valeur expérimentale

$$M_o(11,97\text{mA}, 733\text{mV}) \quad M'(12,9\text{mA}, 737,8\text{mV}) \quad M''(10,97\text{mA}, 727,97\text{mV})$$

$$\Rightarrow g = \frac{\Delta I}{\Delta V} \approx 0,19 \text{ [S]} \quad \text{soit } r_{\text{dyn}} = \frac{1}{g} \approx 5,26\Omega$$

- Valeur théorique

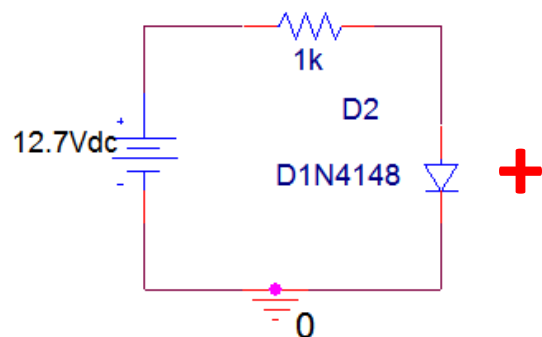
$$I_D = f(V_D) = I_s(e^{\frac{V_D}{2V_T}} - 1) \approx I_s e^{\frac{V_D}{2V_T}} \quad \text{car } V_D \gg 2V_T = 50\text{mV}$$

$$g = \frac{\partial I_D}{\partial V_D} = \frac{I_s}{\eta V_T} e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} = \frac{I_D}{\eta V_T} \Rightarrow g_0 = \frac{\partial I_D}{\partial V_D} \Big|_{(I_{D0}, V_{D0})} = \frac{I_{D0}}{2V_T} = \frac{11,97\text{mA}}{2 \times 25\text{mV}} = 0,24 \text{ [S]}$$

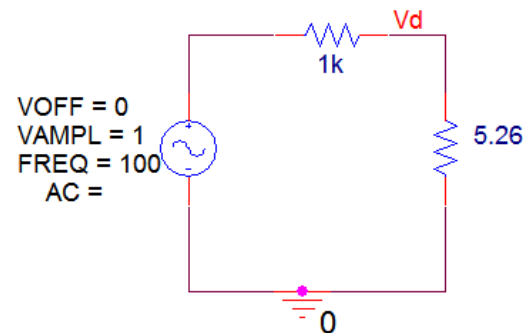
Obtention d'un modèle équivalent

Expérience 2 : un schéma équivalent

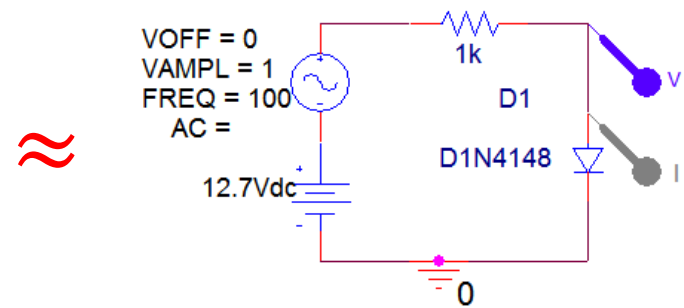
- La diode se comporte autour de M_o , vis-à-vis de $\tilde{v}_e(t)$, comme une résistance $r_d = \frac{1}{g} \approx 5,26\Omega$
- On distingue donc deux modèles équivalents:
 - Un **équivalent statique** : obtention du **point de fonctionnement statique**
 - Un **équivalent dynamique**: **variations** autour du point M_o



Modèle éq. statique



Modèle éq. dynamique

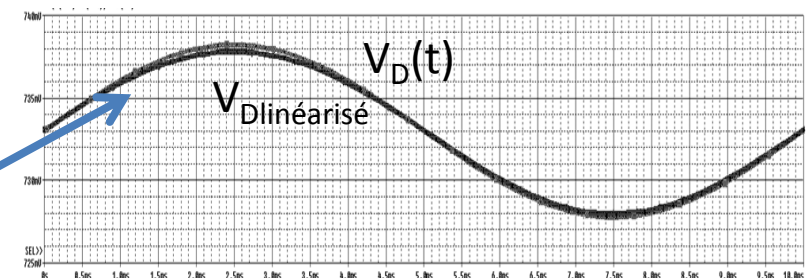


Modèle 'réel'

Plusieurs modèles statiques possibles

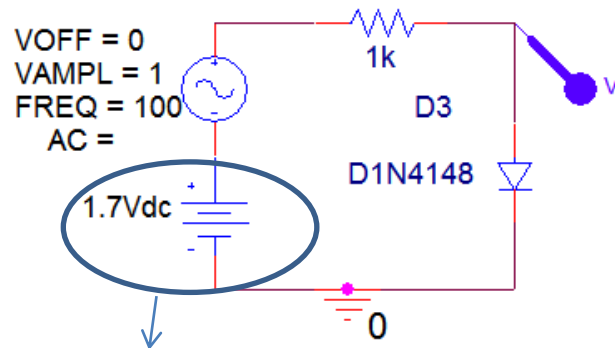
- $I_d = f(V_d)$: résolution graphique ou analytique
- Approximations (exemple $V_{d0} = 0,6V$)

*On constate
que l'erreur est
très faible!!*

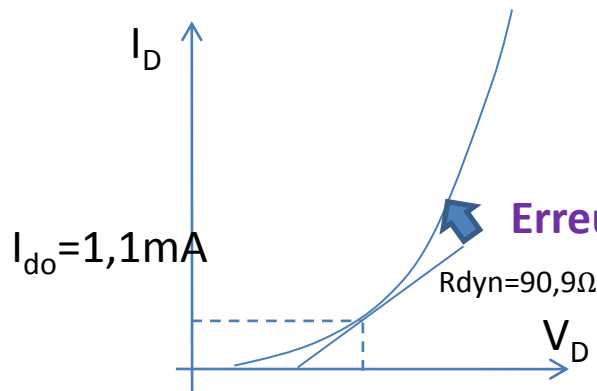


Limites de la linéarisation

Expérience 3:

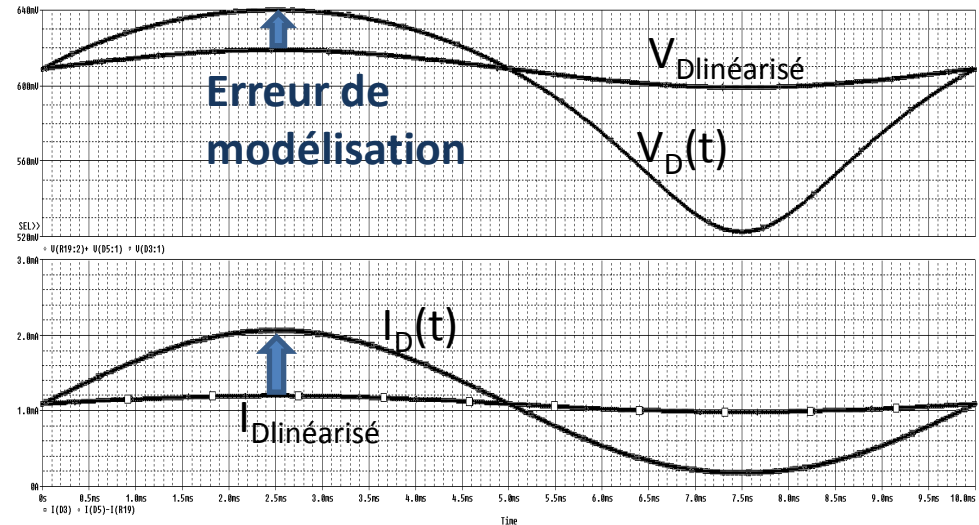


On ramène le point M_o proche du coude de la diode



Erreur de linéarisation commise très importante: notre belle théorie tombe à l'eau

$$g_0 = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_D} \right|_{(I_{D0}, V_{D0})} = \frac{1.1mA}{2.25mV} = 0.011 \text{ [S]} \quad \text{Soit } r_{dyn} = 90.9\Omega$$



Les courbes ne sont plus sinusoïdales. Le système est fortement non linéaire!
L'erreur entre le modèle linéarisé et simulé (« vrai ») est important

Modélisation petit signal

● Les conclusions

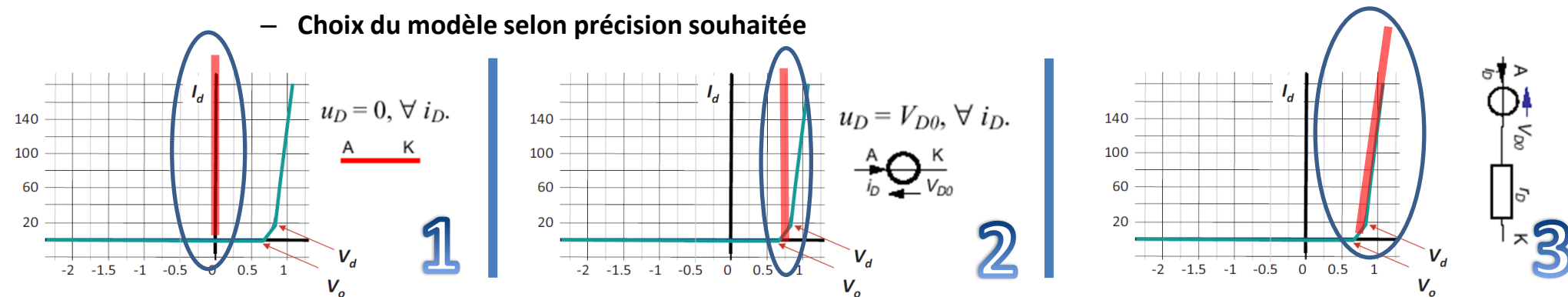
- **La linéarisation permet de remplacer le composant par une résistance équivalente dynamique**
- La linéarisation ne **fonctionne qu'en petit signal alternatif**
 - On s'assure que $v_{\text{emax}} \ll V_{\text{E0}}$ (amplitude des signaux suffisamment faible)
- **Les étapes pour l'étude d'un dispositif**
 - Je dessine un schéma équivalent statique
 - J'éteinds les sources alternatives et je remplace les condensateurs par un circuit ouvert
 - Je remplace les composants par le modèle STATIQUE de mon choix
 - Je dessine un schéma équivalent statique
 - Je calcule le point de fonctionnement STATIQUE $M_o(V_{x0}, I_{x0})$
 - » En utilisant les outils du cours de signaux et circuits.
 - Je dessine un schéma équivalent dynamique
 - J'éteinds les sources continues et je remplace les condensateurs par un fil (si $Z_c \ll Z_{\text{montage}}$)
 - Je remplace les composants par le modèle DYNAMIQUE de mon choix
 - Je dessine un schéma équivalent dynamique
 - Je calcule la réponse alternative $\tilde{v}_x(t)$
 - Le point instantané de fonctionnement s'obtient en appliquant la superposition
$$V_x(t) = V_{x0} + \tilde{v}_x(t)$$

Diode

● Modèles usuels de la diode (en direct)

■ Modèle équivalent **statique** (rappels)

– Choix du modèle selon précision souhaitée



■ Modèle équivalent **dynamique** petit signal

- Les éléments équivalents s'obtiennent par calculs des dérivées partielles
- Ce modèle s'utilise dans un schéma où toutes sources continues sont éteintes

$$g = \frac{\partial I_D}{\partial V_D} = \frac{I_s}{\eta V_T} e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} = \frac{I_D}{\eta V_T} \approx 20 I_D \quad \text{avec } \eta = 2$$

$$\tilde{v}_d \quad \begin{array}{c} \uparrow \\ \downarrow \end{array} \quad \begin{array}{c} \tilde{i}_d \\ \downarrow \end{array} \quad r_{dyn} = \frac{1}{g_0}$$



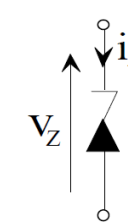
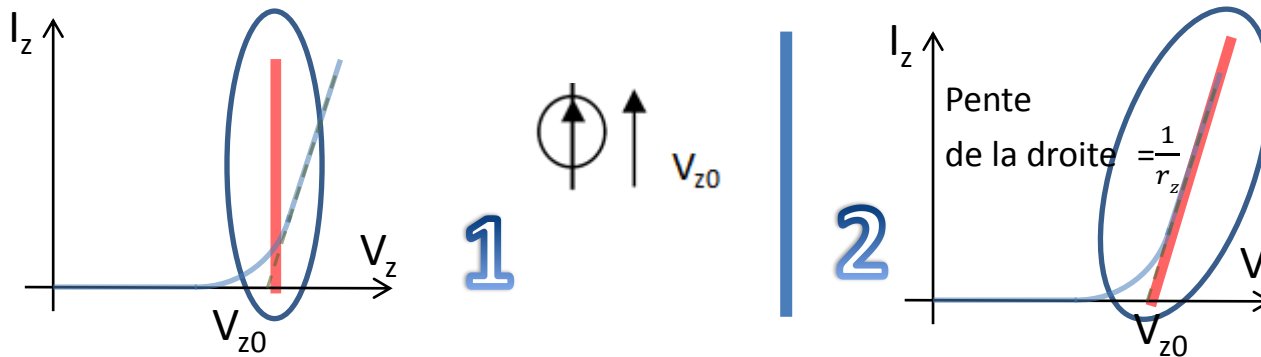
La plupart des applications se font dans un contexte grand signal (redressement) et le modèle dynamique petit signal ne s'applique pas. Il est présenté pour introduire la modélisation du transistor!

Diode Zéner

● Modèles usuels de la diode zéner (en zéner)

■ Modèle équivalent statique (rappels)

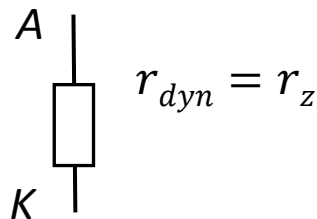
- Choix du modèle selon précision souhaitée



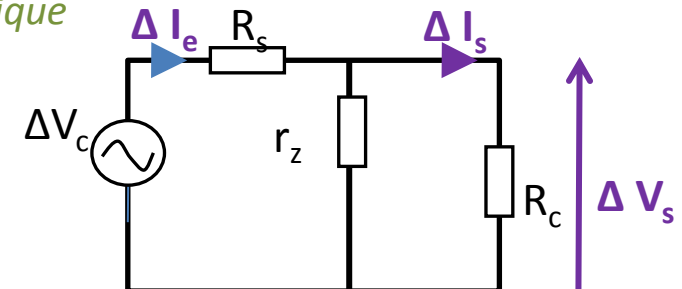
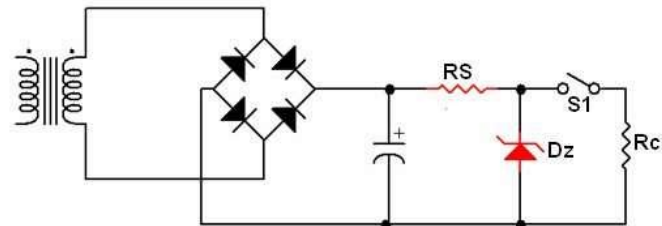
Seul le fonctionnement en zéner (polarisation inverse) est traité puisqu'il correspond à la majorité des applications => choix du fléchage

■ Modèle équivalent dynamique

- S'obtient en général à partir de données expérimentale ou de la documentation constructeur

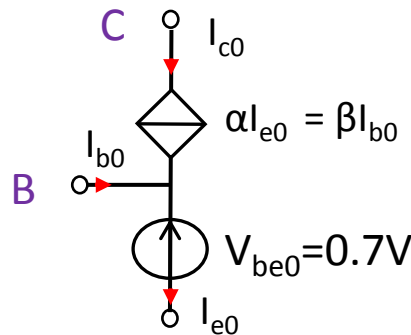


Exemple de schéma équivalent dynamique



Transistor: modèle statique

- Modèle **statique** en régime linéaire
 - Modèle d'EBERS-MOLL simplifié (*rappel*)



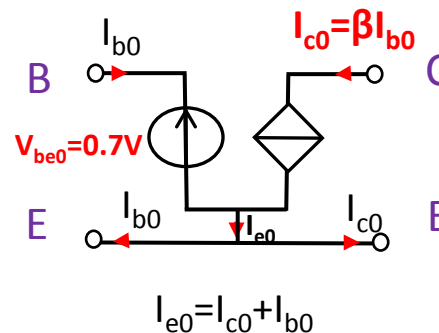
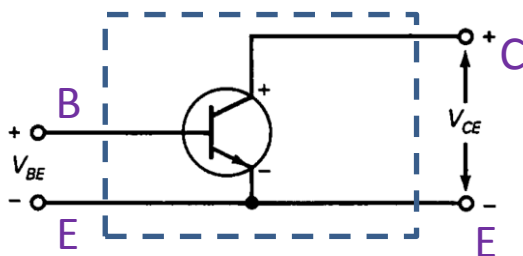
Pour les transistors bipolaire le coefficient d'idéalité $\eta \approx 1.1$ (il est classique arrondir à 1)

$$I_e = I_{es} \left(e^{\frac{V_{BE}}{\eta V_T}} - 1 \right) \approx I_{es} e^{\frac{V_{BE}}{\eta V_T}}$$



Les 2 modèles sont strictement identiques (présentation différentes uniquement)

- Réécriture en π
 - Le transistor est considéré sous sa forme quadripôle



Compte tenu des relations existants entre les courants on en déduit aussi que:

$$I_b = \frac{I_e}{\beta + 1} = \frac{I_{es}}{\beta + 1} \left(e^{\frac{V_{BE}}{\eta V_T}} - 1 \right) \approx I_{bs} e^{\frac{V_{BE}}{\eta V_T}}$$

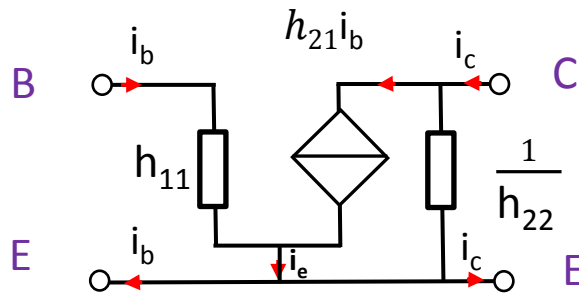
Transistor: modèle dynamique

● Modèle **dynamique** en π

- Modèle dit hybride (théorie des quadripôles)

$$\begin{bmatrix} v_{BE} \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_B \\ v_{CE} \end{bmatrix}$$

À connaître

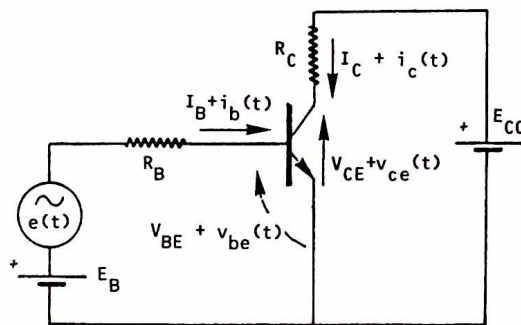


Les paramètres h sont complexes
(Pour nous, en BF, partie complexe négligeable)

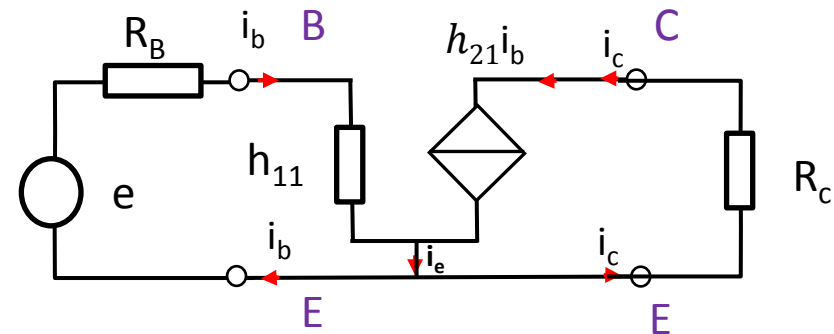
Nous négligerons en TD l'influence de h_{22}



Toutes les grandeurs sont alternatives dites « petit signal »
Écritures équivalentes: di_b ou Δi_b ou $\tilde{i}_b$ ou i_b



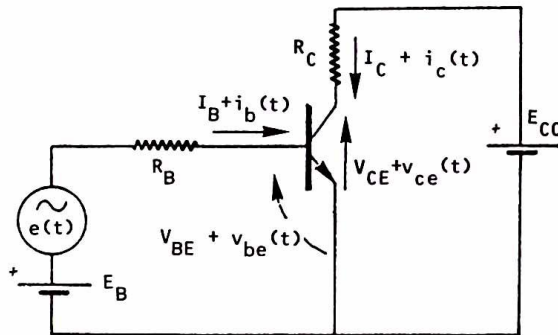
*Schéma équivalent
petit signal*



Transistor: modèle dynamique

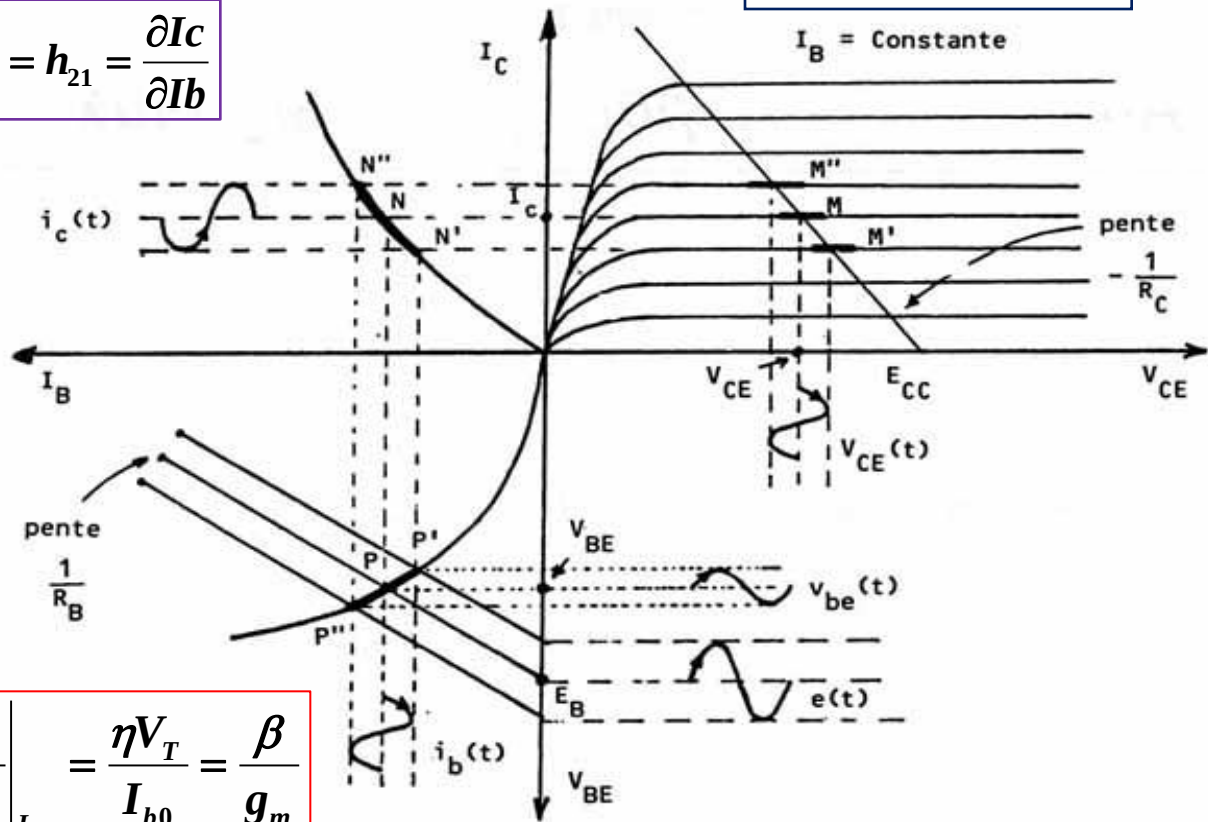
● Modèle **dynamique** en régime linéaire

■ Principe de fonctionnement



$$\beta_{dyn} = h_{21} = \frac{\partial I_c}{\partial I_b}$$

$$\frac{1}{r_{ce}} = h_{22} = \frac{\partial I_c}{\partial V_{ce}} \bigg|_{I_{c0}, V_{ce0}}$$



Linéarisation
autour du point
de repos

$$r_{\pi} = \frac{1.1 \cdot 25mV}{I_{b0}} = \frac{30mV}{I_{b0}}$$

$$r_{\pi} = h_{11} = \frac{\partial v_{be}}{\partial i_b} \bigg|_{I_{b0}} = \frac{\eta V_T}{I_{b0}} = \frac{\beta}{g_m}$$

$$g_m = \frac{I_{C0}}{\eta V_T} \approx 36 \cdot I_{C0}$$