

Électronique 1

(SP2 11/12)

<http://iut-tice.ujf-grenoble.fr/tice-espaces/MPH/EP-gallotLava/>

Outils d'analyse (Quadripôle, Fonction de transfert, Diagramme de Bode) - Diodes - Transistors - Amplificateurs Opérationnels

Déroulement du module « Eln1 »

■ Formation:

- 8 heures de Cours Magistraux
 - 14 heures de Travaux dirigés
 - 20 heures de Travaux pratiques
- } C/TD

■ Évaluation:

- 1 TEST « surprise » de 30 minutes
- 1 DS de 2 heures
- 1 EP (Examen Pratique) de 2h

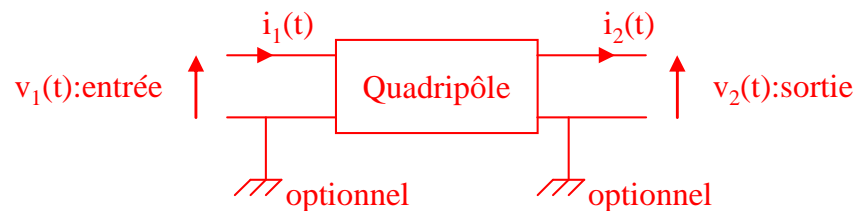
Objectif

- Connaître les fonctions électroniques de bases et leurs caractéristiques

Diapositive de résumé

- Quadripôle, fonction de transfert, filtre et diagramme de Bode (2h)
- Diodes à semi-conducteur et montages usuels (2h)
- Transistors à jonction (bipolaires) et montages usuels (+variantes) (2h)
- Amplificateurs Opérationnels et montages usuels (2h)

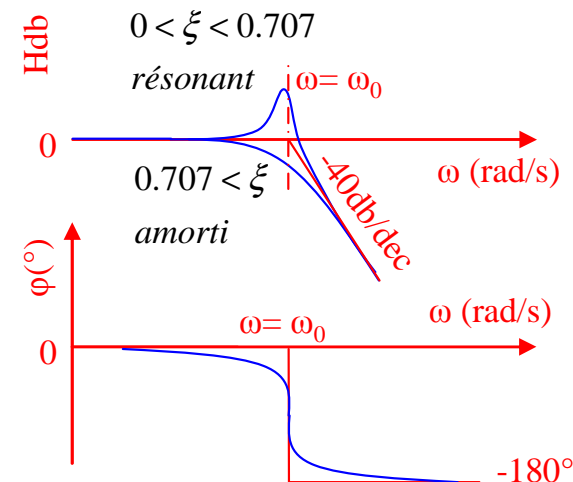
Quadripôle, fonction de transfert, filtre et diagramme de Bode (2h)



- Créer un modèle équivalent
- Caractériser le rapport sortie/entrée
- Représenter un filtre électronique

$$H(p) = \frac{V_s}{V_e} = \alpha \cdot p^q \cdot \frac{\prod_{k=1}^K \left(1 + 2\xi_k \frac{p}{\omega_k} + \left(\frac{p}{\omega_k} \right)^2 \right) \prod_{l=1}^L \left(1 + \frac{p}{\omega_l} \right)}{\prod_{m=1}^M \left(1 + 2\xi_m \frac{p}{\omega_m} + \left(\frac{p}{\omega_m} \right)^2 \right) \prod_{n=1}^N \left(1 + \frac{p}{\omega_n} \right)}$$

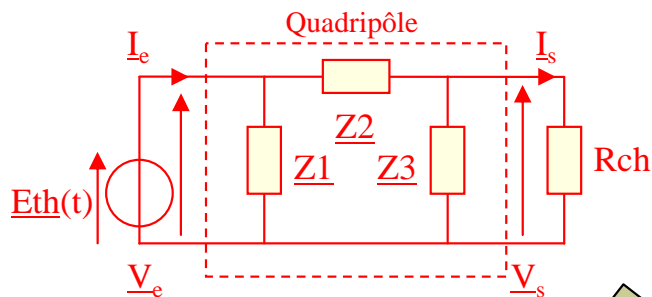
Gain statique: α
 Coefficient d'amortissement: ξ_k, ξ_m
 Pulsations propres: ω_k, ω_m
 Pulsations de coupures: ω_l, ω_n



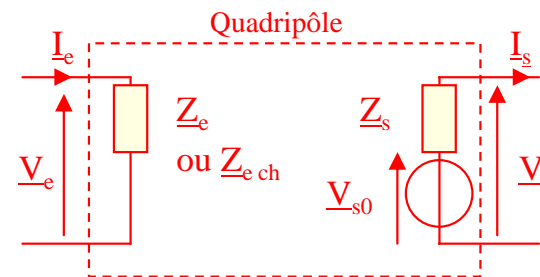
Le quadripôle

- Il peut être parfois utile de modéliser un composant ou un circuit (ensemble de composants) sous la forme de boîtes noires, dont on ne connaîtrait que les paramètres d'entrée/sortie

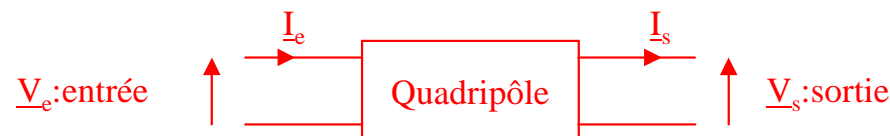
- Circuit d'origine



- Quadripôle équivalent

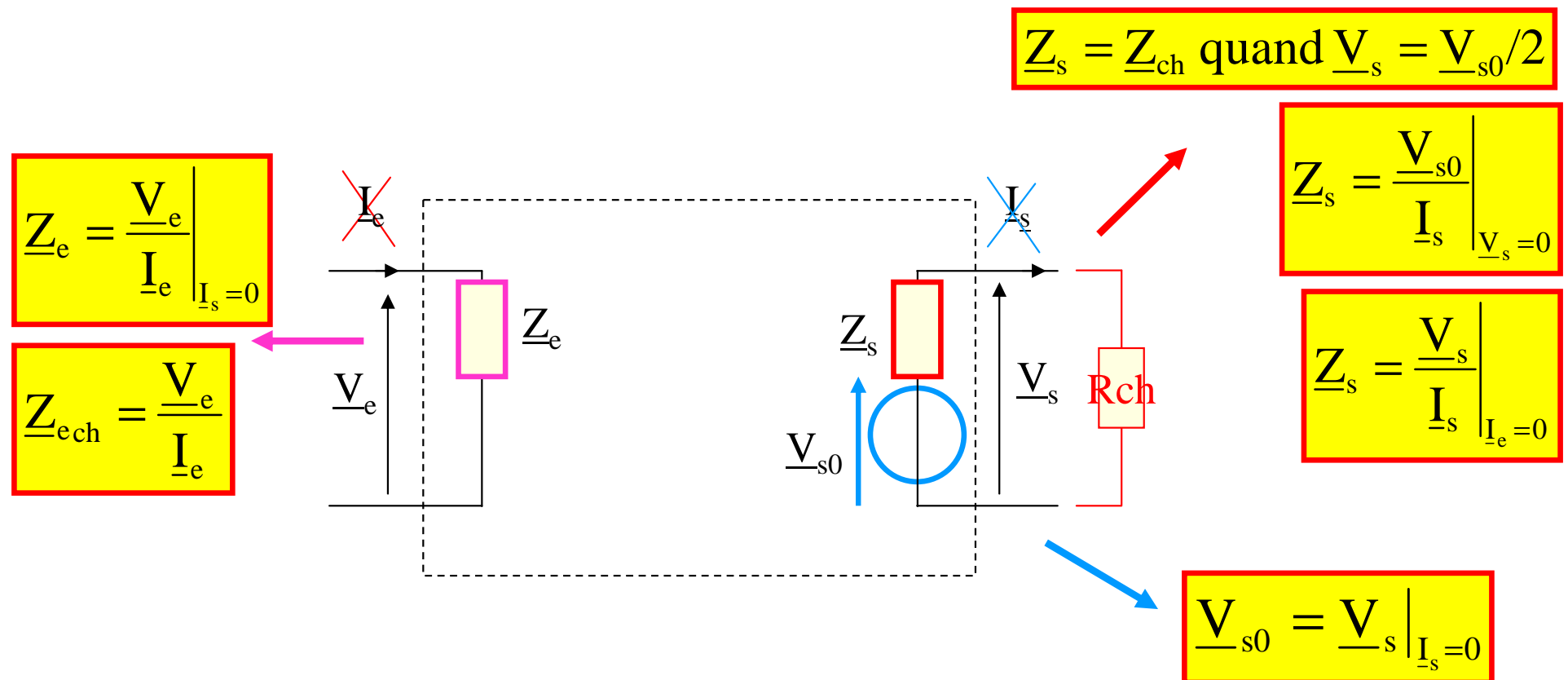


- Quadripôle



Identification des paramètres du modèle en « Z simplifié »

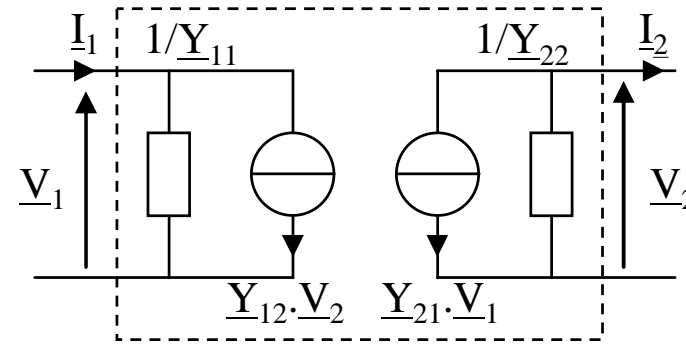
- Le modèle en Z est adapté à l'Électronique d'Instrumentation



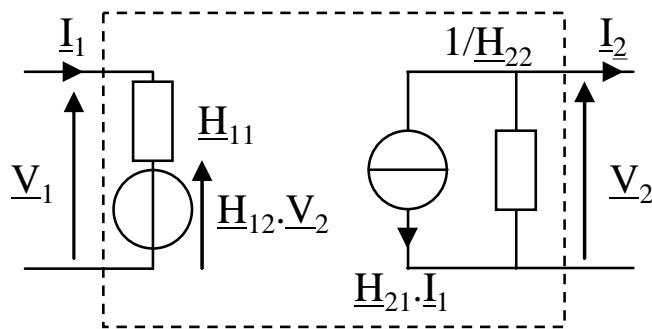
Modèles équivalents (généralisation)

■ Il existe 3 principaux modèles équivalents:

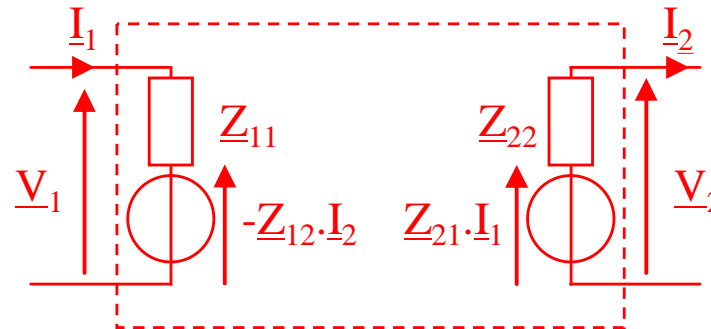
- Le modèle en « H »
- Le modèle en « Z »
- Et le modèle en « Y »



$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ -\underline{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \end{bmatrix}$$



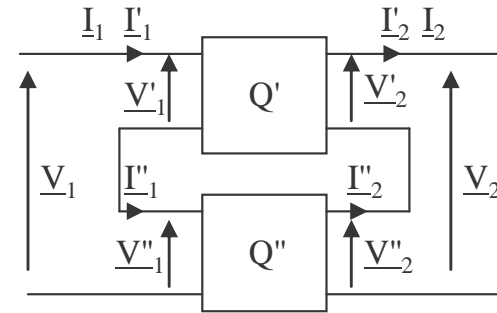
$$\begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ -\underline{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{H}_{11} & \underline{H}_{12} \\ \underline{H}_{21} & \underline{H}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{V}_2 \end{bmatrix}$$



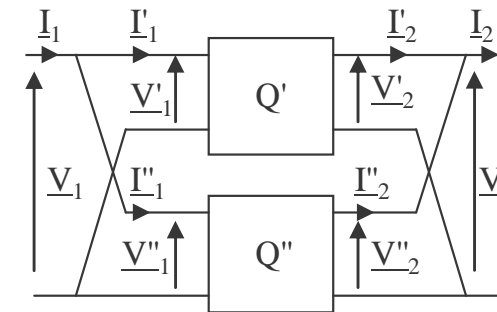
$$\begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ -\underline{I}_2 \end{bmatrix}$$

Règles d'association de quadripôles

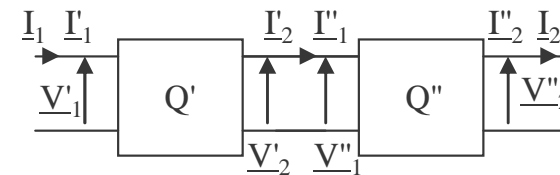
- Association série: $[\underline{Z}] = [\underline{Z}'] + [\underline{Z}'']$



- Association parallèle: $[\underline{Y}] = [\underline{Y}'] + [\underline{Y}'']$



- Association cascade: $[\underline{C}] = [\underline{C}'] [\underline{C}'']$



Fonctions de transfert d'un quadripôle

Gain en
tension

$$\underline{F}_V = \frac{\underline{V}_s}{\underline{V}_e}$$

Gain en
courant

$$\underline{F}_I = \frac{\underline{I}_s}{\underline{I}_e}$$

Trans-
admittance

$$\underline{Y}_T = \frac{\underline{I}_s}{\underline{V}_e}$$

Trans-
impédance

$$\underline{Z}_T = \frac{\underline{V}_s}{\underline{I}_e}$$

Admittance
d'entrée

$$\underline{Y}_e = \frac{\underline{I}_e}{\underline{V}_e}$$

Impédance
d'entrée

$$\underline{Z}_e = \frac{\underline{V}_e}{\underline{I}_e}$$

Forme canonique de la FT (gain en tension)

$$|H(j\omega)|_{\omega \rightarrow 0} = |H(p)|_{p \rightarrow 0} = H_0$$

Gain statique

Coefficient d'amortissement

Pulsations de coupures

Pulsations propres

$$H(p) = \frac{V_s}{V_e} = \alpha \cdot p^q \cdot \frac{\prod_{k=1}^K \left(1 + 2\xi_k \frac{p}{\omega_k} + \left(\frac{p}{\omega_k} \right)^2 \right) \prod_{l=1}^L \left(1 + \frac{p}{\omega_l} \right)}{\prod_{m=1}^M \left(1 + 2\xi_m \frac{p}{\omega_m} + \left(\frac{p}{\omega_m} \right)^2 \right) \prod_{n=1}^N \left(1 + \frac{p}{\omega_n} \right)}$$

- Fréquence de coupure: $fc = \omega c / 2\pi$
- Constante de temps: $\tau = 1 / \omega c \Leftrightarrow \tau = 1 / 2\pi fc$
- Pulsation de coupure: $|H(j\omega c)|_{db} = 20 \log(|H(j\omega)|_{\max} / \sqrt{2}) = H_{db \max} - 3_{db}$
- Facteur de mérite: $F = H_0 \cdot fc = |H(j.2\pi f)|_{=1} \cdot f$

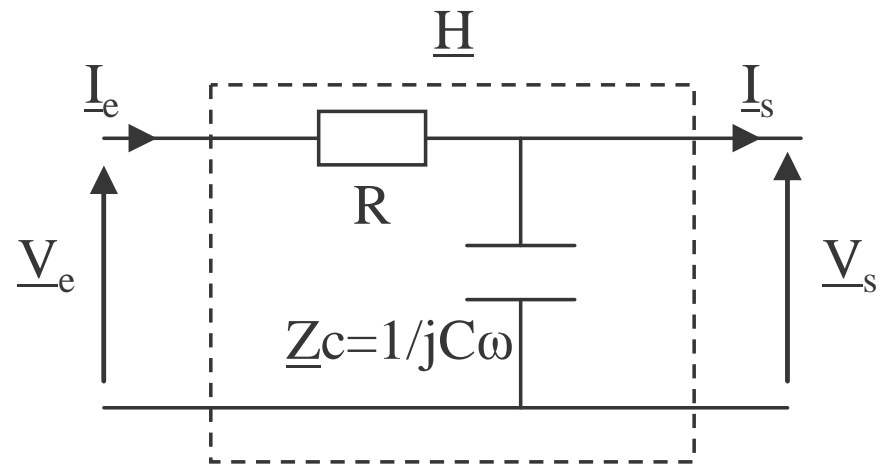
Application...

- Calculer la FT d'un circuit RC

$$\underline{V}_s = \underline{V}_e \cdot \frac{\underline{Z}_c}{R + \underline{Z}_c} \quad (\text{Pont diviseur de tension})$$

$$\Leftrightarrow H(j\omega) = \frac{\underline{V}_s}{\underline{V}_e} = \frac{H_0}{1 + \frac{p}{\omega_c}}$$

$$\text{où } \begin{cases} \omega_c = \frac{1}{RC} \\ H_0 = 1 \\ p = j\omega \end{cases}$$



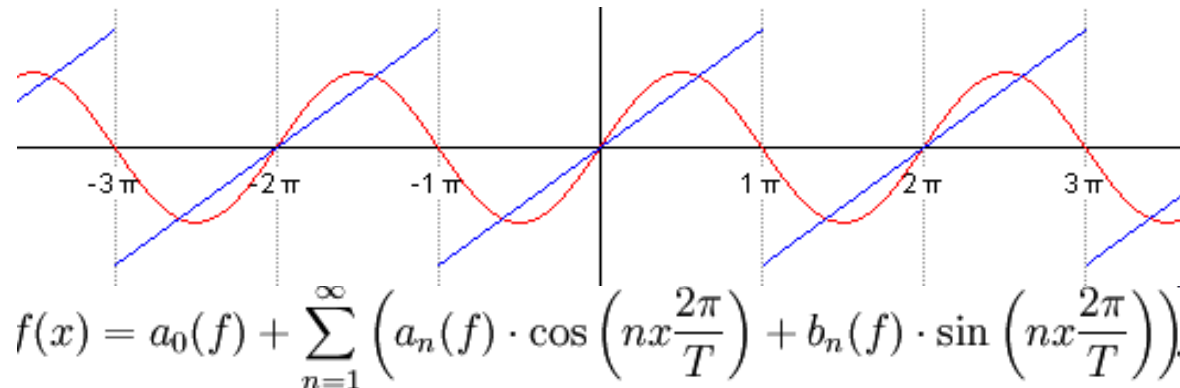
$$H(p) = \frac{\underline{V}_s}{\underline{V}_e} = \alpha \cdot p^q \cdot \frac{\prod_{k=1}^K \left(1 + 2\xi_k \frac{p}{\omega_k} + \left(\frac{p}{\omega_k} \right)^2 \right) \prod_{l=1}^L \left(1 + \frac{p}{\omega_l} \right)}{\prod_{m=1}^M \left(1 + 2\xi_m \frac{p}{\omega_m} + \left(\frac{p}{\omega_m} \right)^2 \right) \prod_{n=1}^N \left(1 + \frac{p}{\omega_n} \right)}$$

Notion de filtrage

- D'après la théorie de Fourier, tout signal réel peut être considéré comme composé d'une somme de signaux sinusoïdaux (en nombre infini si nécessaire) à des fréquences différentes
- **Le rôle du filtre est de modifier la phase et l'amplitude** de ces composantes
- Un filtre est caractérisé par sa fonction de transfert

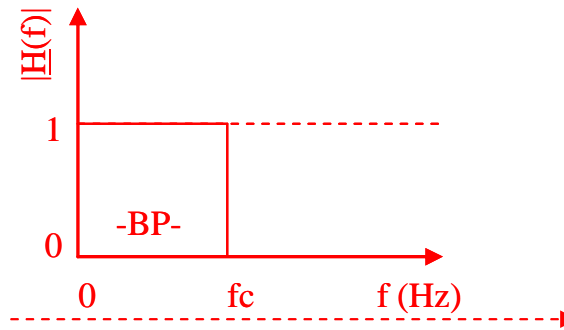


Phys. Fr. Joseph Fourier (1768 – 1830)

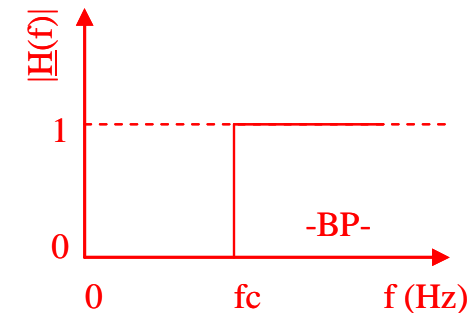


Classification des filtres

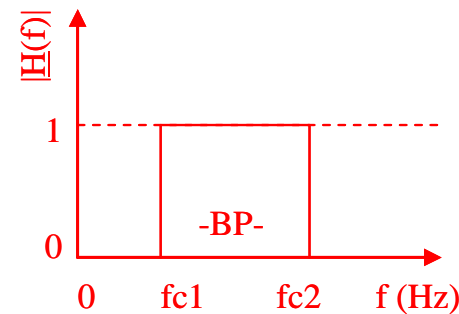
■ Passe-Bas



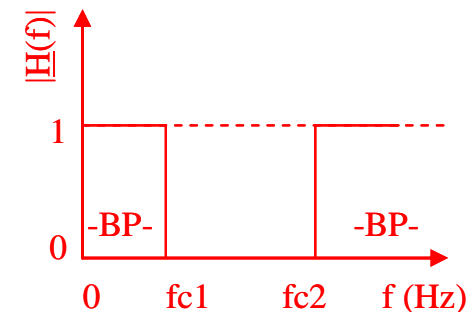
■ Passe Haut



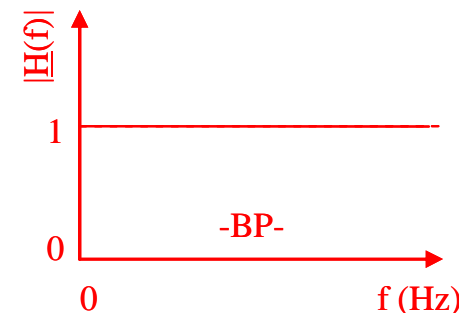
■ Passe Bande



■ Coupe Bande



■ Passe Tout



Filtre actif ou passif ?

- Les filtres passifs = composants passifs
 - $F > \text{MHz}$ et $\text{Gain} \leq 1$
- Les filtres actifs = composants actifs
 - $F < \text{MHz}$ et $\text{Gain} > 1$

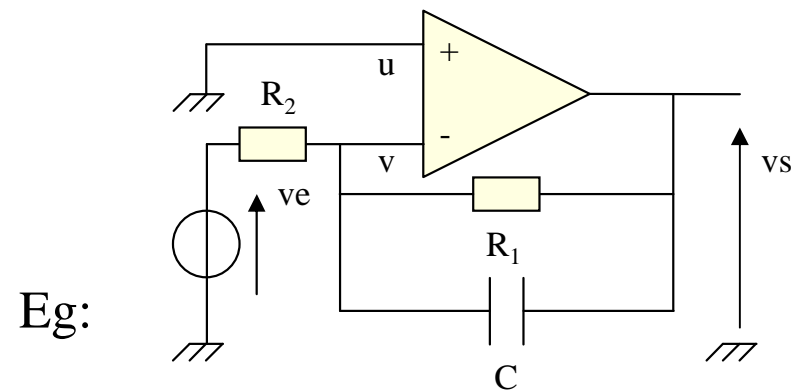
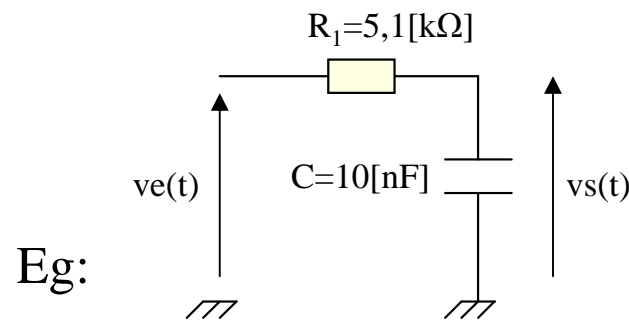
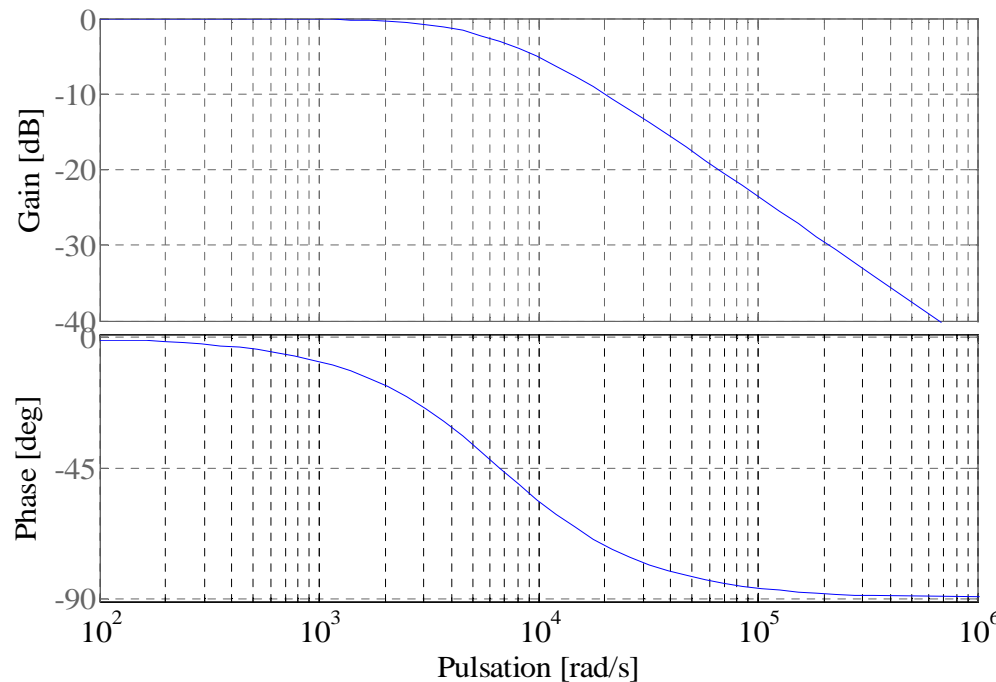


Diagramme de Bode

- Représentation graphique d'une fonction complexe $H(j\omega)$
- Le gain (ou l'amplitude): $|H|$ en db = $20 \log |H(j\omega)|$
- La phase φ en degré: $\varphi = \arg(H(j\omega))$
- L'échelle log. des pulsations en rad/s ou en Hz.



Eg: Filtre RC

Méthode de tracé du diagramme de Bode (diagramme asymptotique)

- (1) Mise sous forme canonique de la fonction de transfert
- (2) Approximation de la fonction de transfert: $\omega \rightarrow 0$;
- (3) Approximation de la fonction de transfert: $\omega \rightarrow \infty$;
- (4) Ecriture des équations du Gain H_{db} et de la phase φ correspondants
- (5) Calcul du gain et de la phase au point particulier ω tel que $p/\omega c_{(klm \text{ ou } n)} = j$
- (6) Tracé des asymptotes, du point particulier et de la fonction réel à main levée

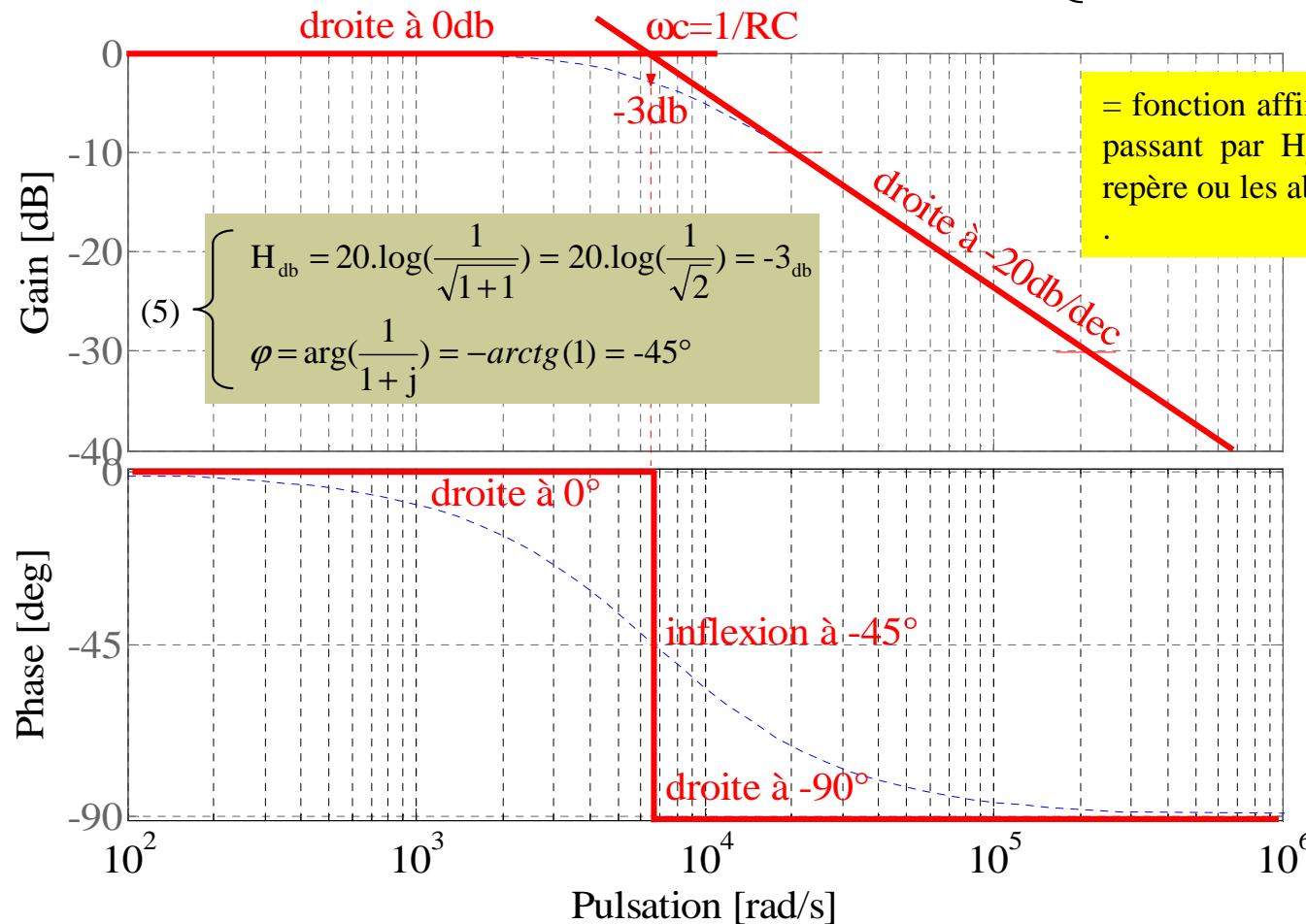
Application...

(1) $H(p) = \frac{1}{1 + RC \cdot p}$

(2) $H(p)_{p \rightarrow 0} \approx 1$

(3) $H(p)_{p \rightarrow \infty} \approx \frac{1}{RC \cdot p}$

(4) $\begin{cases} H_{db} \approx 20 \cdot \log(1) = 0 \\ H_{db} \approx 20 \cdot \log\left(\frac{1}{RC \cdot \omega}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{1}{RC}\right) - 20 \cdot \log(\omega) \end{cases}$



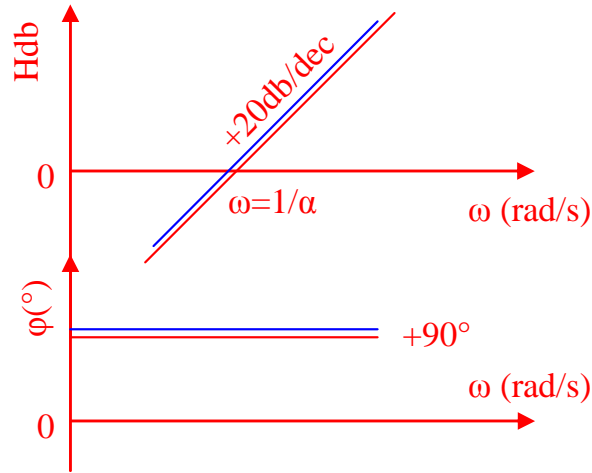
= fonction affine de pente $-20_{db}/\text{décades}$ et passant par $H_{db}=0$ en $\omega = 1/RC$ (dans un repère où les abscisses sont log.)

(5) $\begin{cases} H_{db} = 20 \cdot \log\left(\frac{1}{\sqrt{1+1}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = -3_{db} \\ \varphi = \arg\left(\frac{1}{1+j}\right) = -\arctg(1) = -45^\circ \end{cases}$

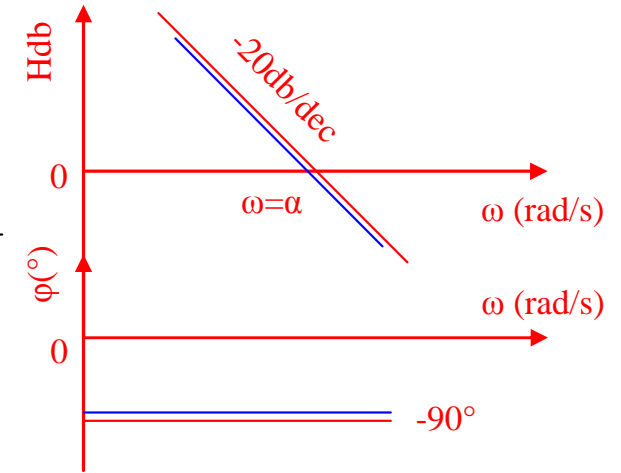
(4) $\begin{cases} \varphi \approx \arg(1) = 0^\circ \\ \varphi \approx \arg\left(\frac{1}{j \cdot RC \cdot \omega}\right) = -90^\circ \end{cases}$

Diagrammes de Bode des fonctions de transferts élémentaires du 1^{er} ordre

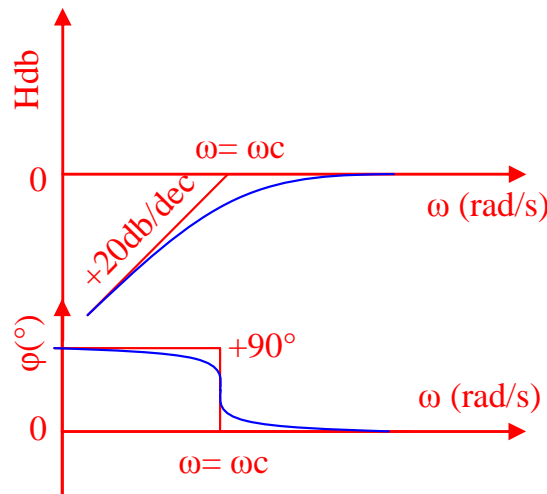
$$H(p) = \alpha \cdot p$$



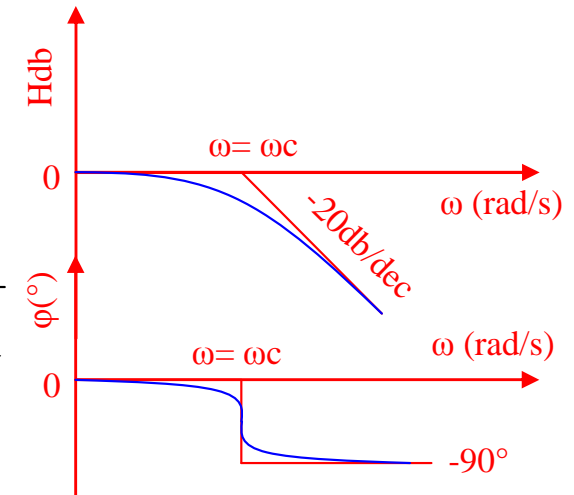
$$H(p) = \alpha \cdot \frac{1}{p}$$



$$H(p) = \frac{p}{\omega_c} \cdot \frac{1}{1 + \frac{p}{\omega_c}}$$



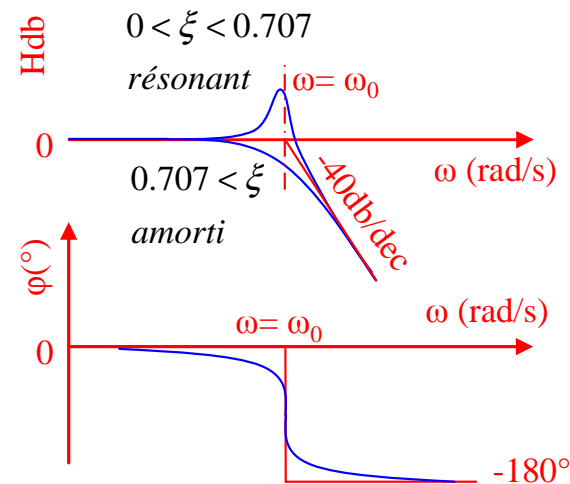
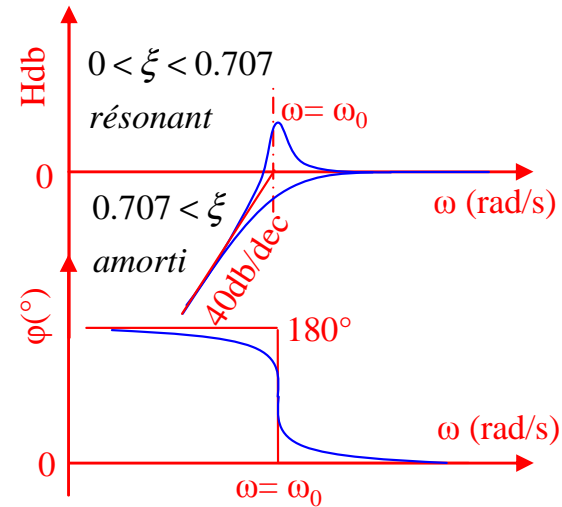
$$H(p) = \frac{1}{1 + \frac{p}{\omega_c}}$$



Diagrammes de Bode des fonctions de transferts élémentaires du 2^{ème} ordre

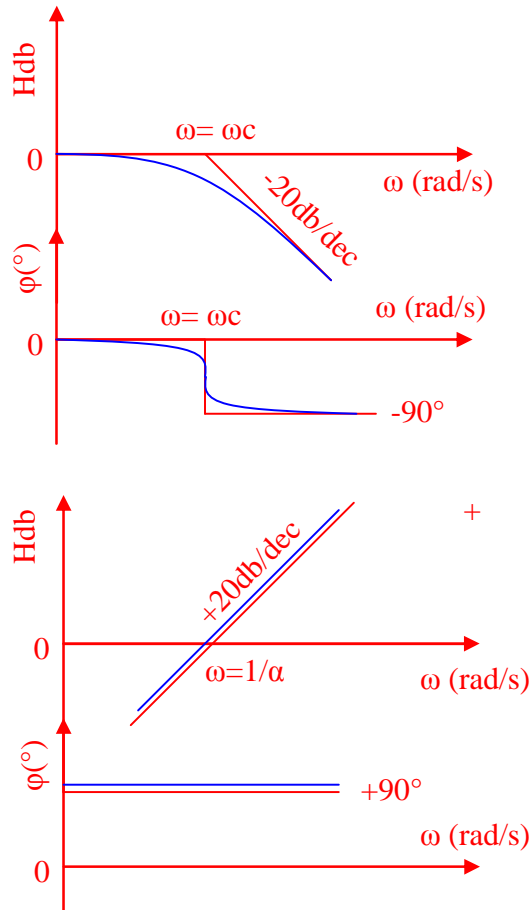
$$H(p) = \frac{\left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2}{1 + 2\xi \frac{p}{\omega_0} + \left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2}$$

$$H(p) = \frac{1}{1 + 2\xi \frac{p}{\omega_0} + \left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2}$$



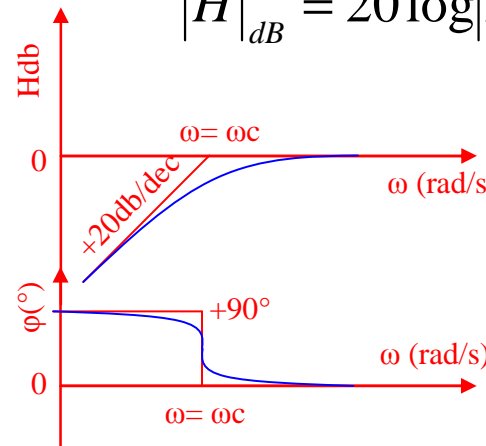
Quelques règles de calculs

$$H(j\omega) = H_1(j\omega).H_2(j\omega)$$



$$|H| = \prod_{k=1}^{k=n} |H_k|$$

$$|H|_{dB} = 20 \log |H| = |H_1|_{dB} + |H_2|_{dB} \dots + |H_n|_{dB}$$



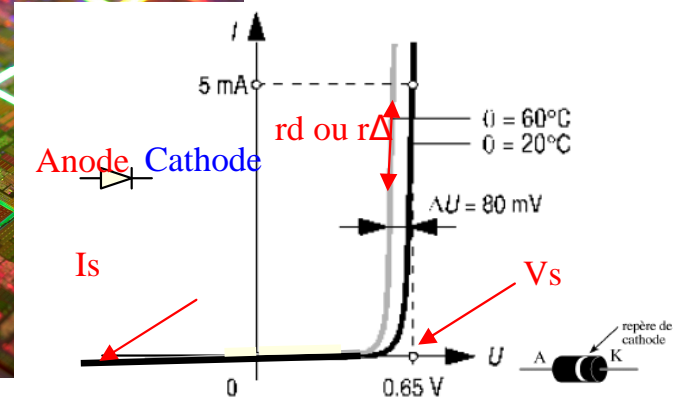
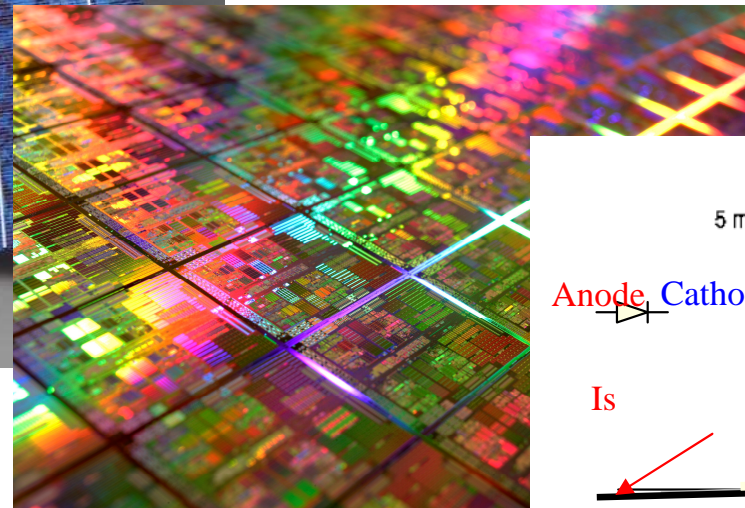
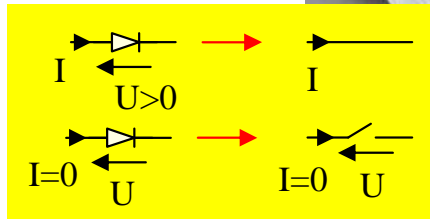
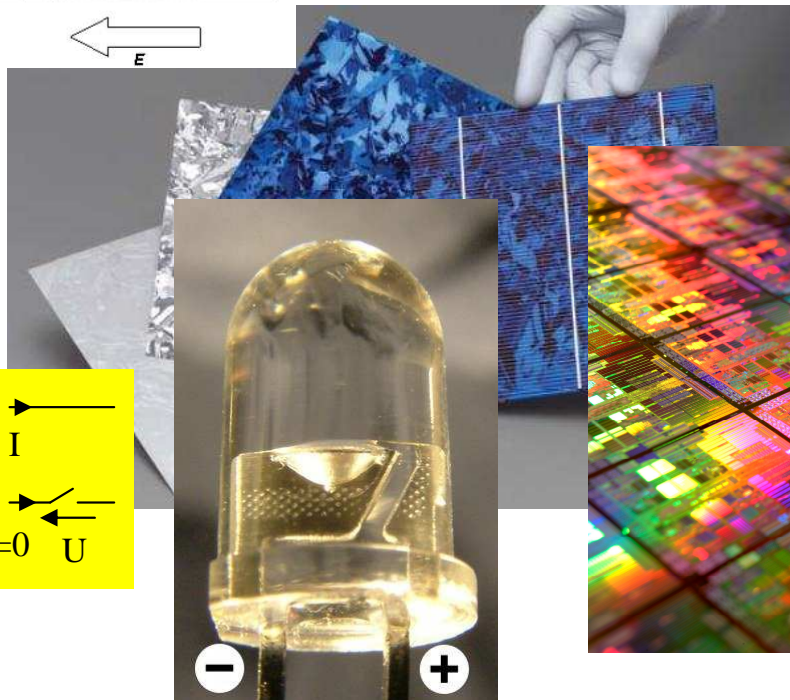
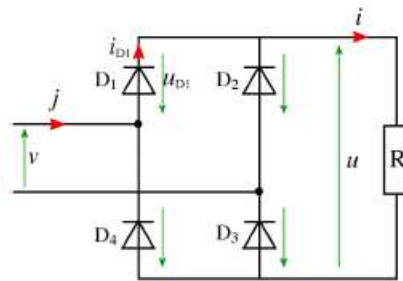
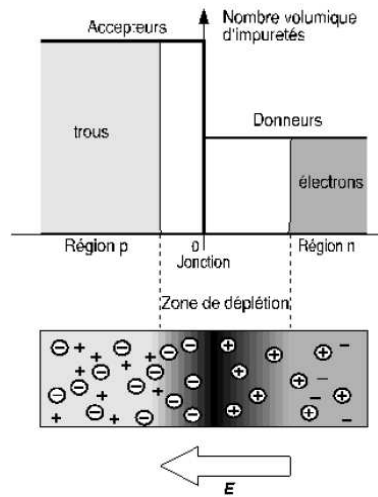
$$\varphi = \sum_{k=1}^{k=n} \varphi_k$$

Quiz sur les outils d'analyse appliqués à l'électronique...

- Qu'est ce qu'un quadripôle ?
- A quoi sert ce formalisme ?
- Quel est le modèle équivalent d'un quadripôle paramétré en Z ?
- Comment identifie-t-on les paramètres du modèle en Z simplifié ?
- Quelles sont les trois principales formes d'association des quadripôles ?
- Qu'est ce qu'une fonction de transfert ?
- Qu'est ce qu'une fonction de transfert de type gain en tension ?
- Quelle est la forme canonique la plus universelle des fonctions de transfert ?
- A quoi sert ce formalisme ?
- Qu'est ce que la pulsation de coupure (sous entendu d'une FT du 1er ordre) ?
- Qu'est ce que la fréquence de coupure (sous entendu d'une FT du 1er ordre) ?
- Qu'est ce que la bande passante ?
- Qu'est ce que la constante de temps (sous entendu d'une FT du 1er ordre) ?
- Qu'est ce que le gain statique ?
- Qu'est ce que le facteur de mérite ?
- Qu'elle est la fonction de transfert d'un circuit RC (entrée sur RC et sortie sur C) ?
- Quels sont les paramètres d'identification à la forme canonique de cette FT ?
- Qu'est ce qui caractérise un filtre actif ?
- Qu'est ce qui caractérise un filtre passif ?
- Quelles sont les 5 principales classes de filtre ?
- Qu'est ce qu'un diagramme de Bode ?
- Quel est l'intérêt de cette représentation ?
- Quelle est la méthode du tracé du diagramme de Bode asymptotique ?
- Quel est le diagramme de Bode asymptotique et réel (à main levée) du circuit RC (entrée sur RC et sortie sur C) ?
- Quels sont les diagrammes asymptotiques des 6 principales FT élémentaires ?
- Quelle est la règle de construction du diagramme d'un produit de FT ?

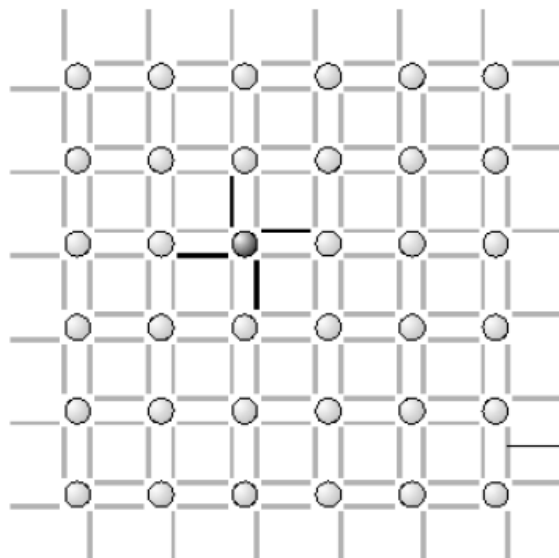
Diodes à semi-conducteur et montages usuels (2h)

- Les semi-conducteurs
- Jonction p-n
- Caractéristiques de la diode
- Modèles équivalents
- Montages usuels
- Diodes particulières

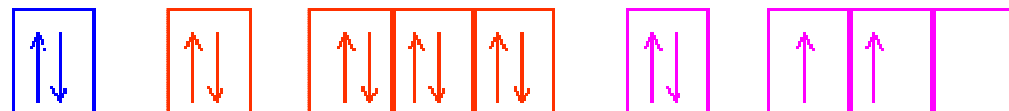


Semi-conducteur intrinsèque

- Les atomes de semi-conducteur sont tétravalents
- La concentration des électrons libres et des trous dépend très fortement de la température
 - Dans un barreau de Silicium à 300K il y a $1,5 \cdot 10^{10}$ électrons-trous /cm³
 - Soit une paire électrons-trous pour $3,3 \cdot 10^{12}$ atomes
 - Mauvais conducteur et mauvais isolant = semi-conducteur

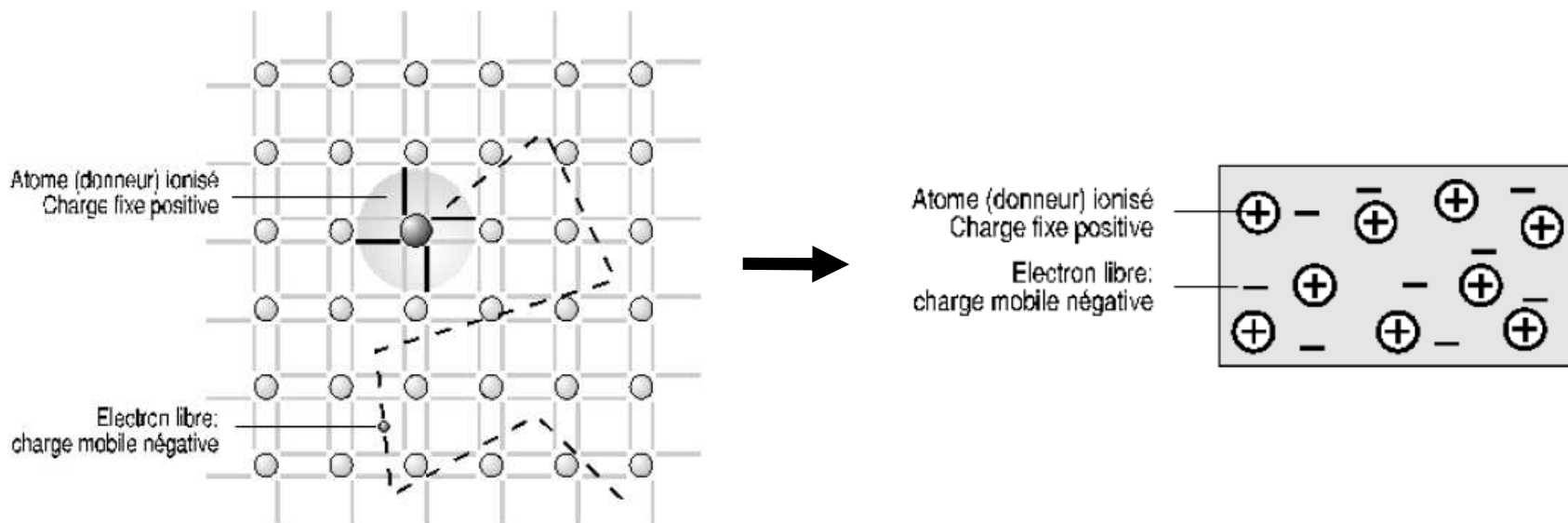


Eg: Silicium (Si) 14e⁻ : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$



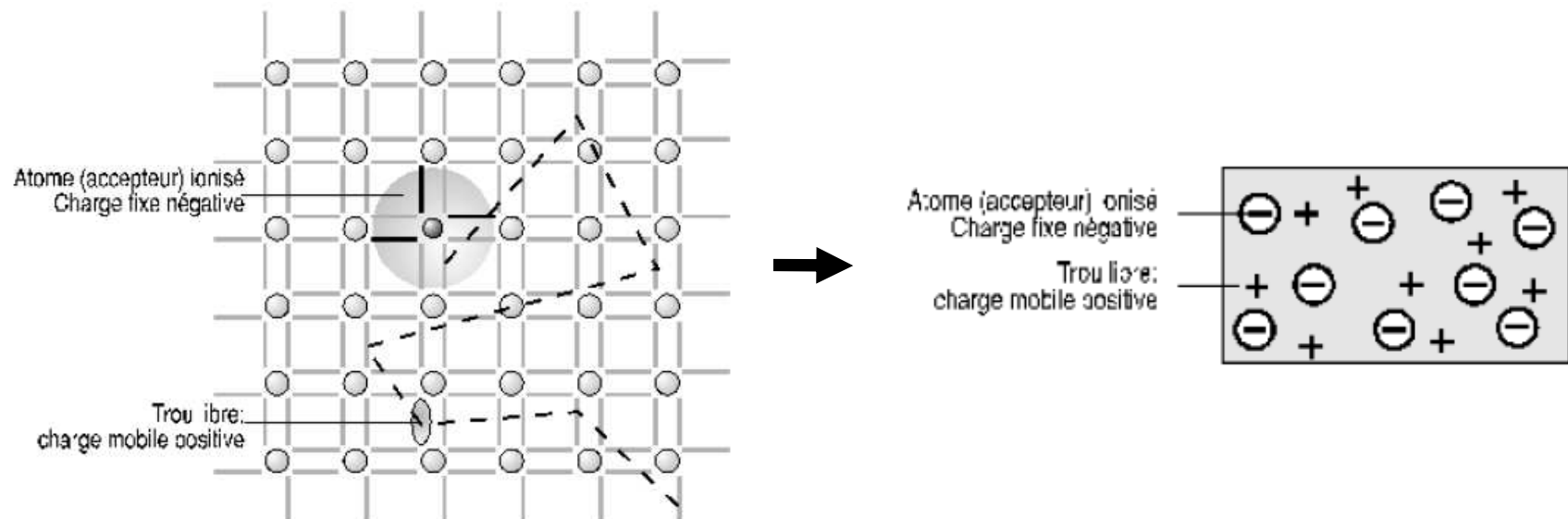
Semi-conducteur extrinsèque de type n

- Substitution d'atomes tétravalents par des atomes pentavalents = dopage n
- Atomes pentavalents = Impuretés = donneurs
 - Dans un barreau de Silicium dopé n il y env. 10^{18} donneurs /cm³
 - Soit autant d'électrons libres créés



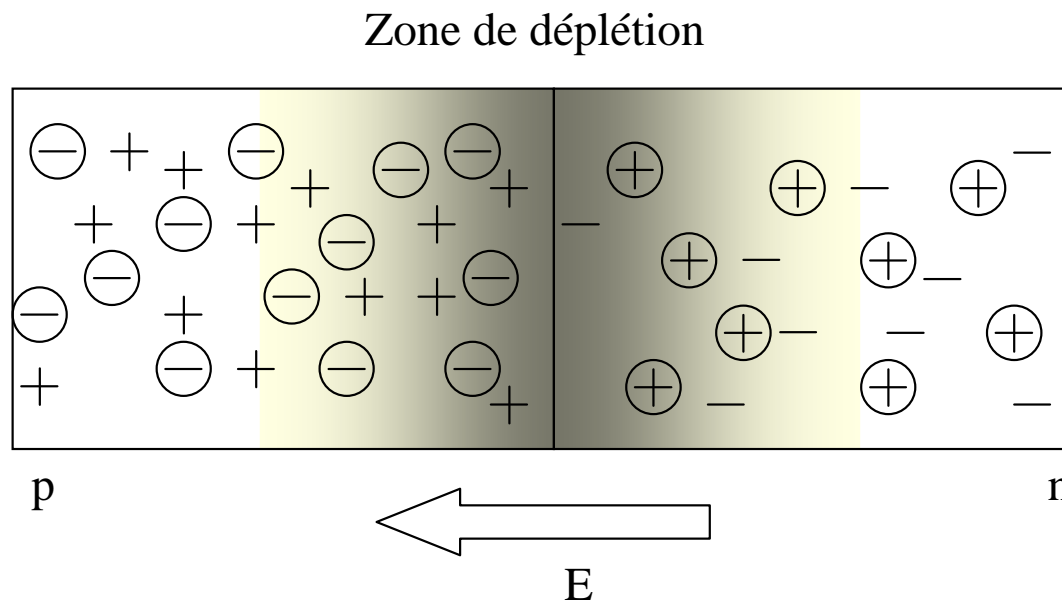
Semi-conducteur extrinsèque de type p

- Substitution d'atomes tétravalents par des atomes trivalents = dopage p
- Atomes trivalents = Impuretés = accepteurs
 - Dans un barreau de Silicium dopé p il y a env. 10^{18} accepteurs / cm^3
 - Soit autant de trous libres créés

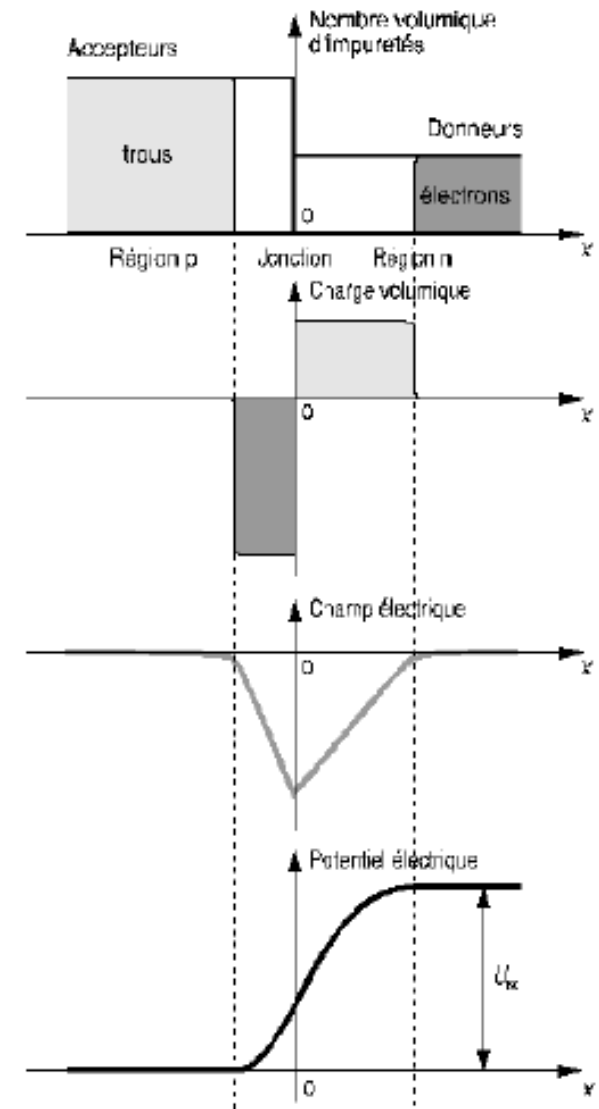
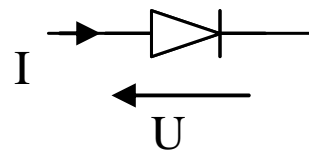


La jonction p-n = Diode

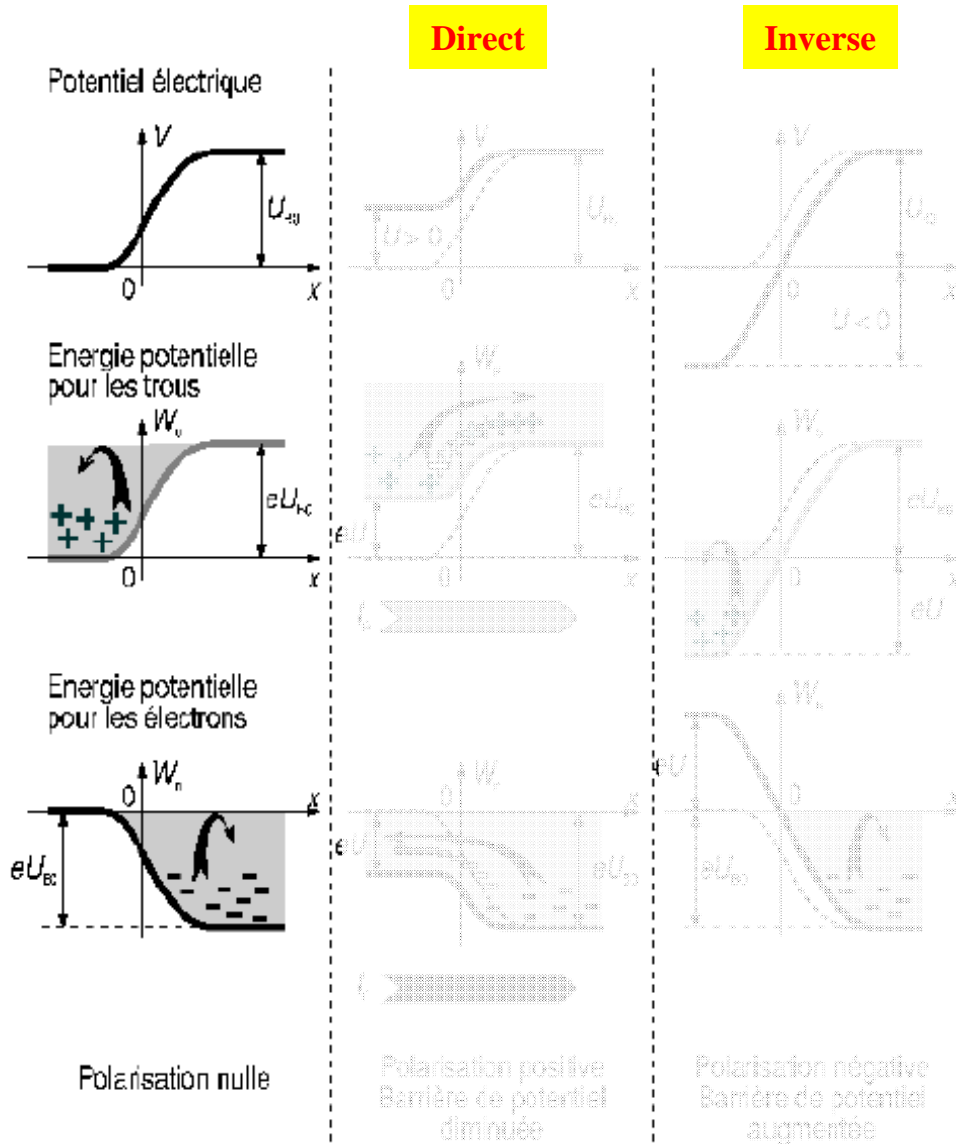
- La jonction se polarise spontanément




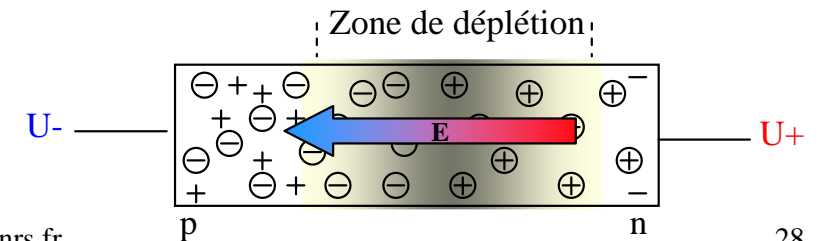
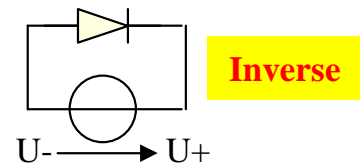
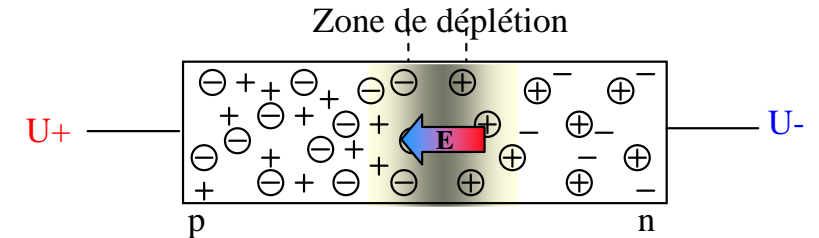
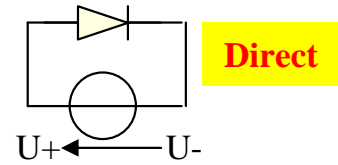
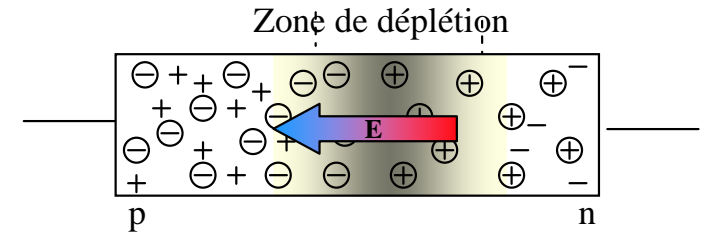
Anode (A) Cathode (K)



Polarisation de la jonction p-n



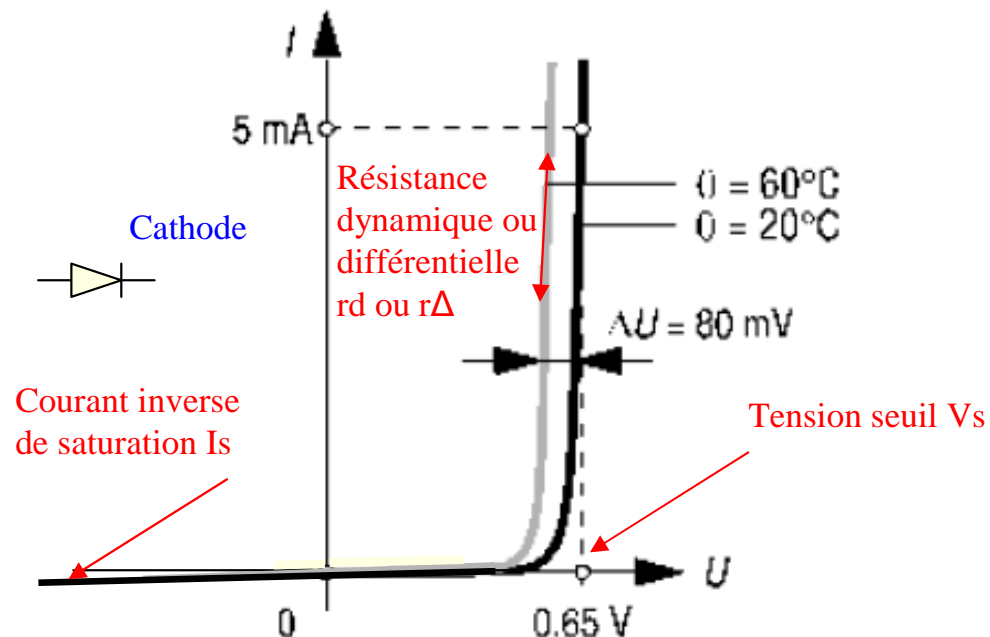
Anode  Cathode



Caractéristique $I=f(V)$ de la jonction p-n

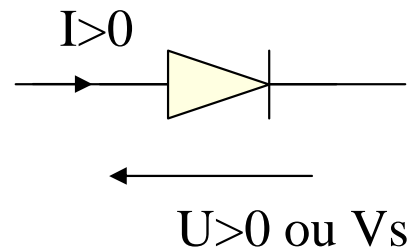
$$I_p = I_{sp} \left[\exp\left(\frac{U}{nU_T}\right) - 1 \right] \quad I_n = I_{sn} \left[\exp\left(\frac{U}{nU_T}\right) - 1 \right] \quad \text{avec } U_T = \frac{kT}{e} \quad (\text{tension de Boltzmann})$$

$$\Rightarrow I = I_p + I_n = I_s \left[\exp\left(\frac{U}{nU_T}\right) - 1 \right] \quad \text{avec } I_s = I_{sp} + I_{sn}$$

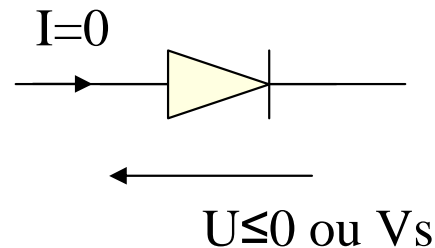


Détermination de l'état d'une diode

- La diode devient passante si la tension à ses bornes $U=(V_A-V_K)>0$ ou V_s

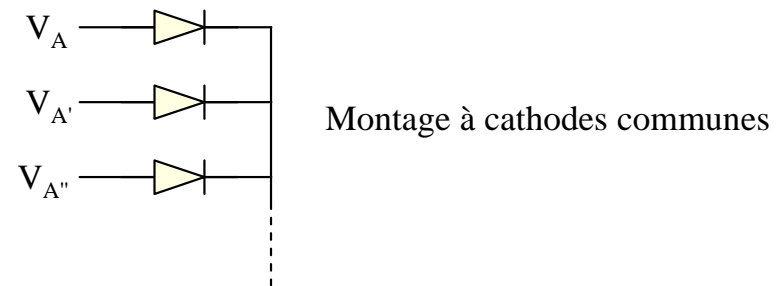


- La diode devient bloquée si le courant qui la traverse $I_{AK}=0$

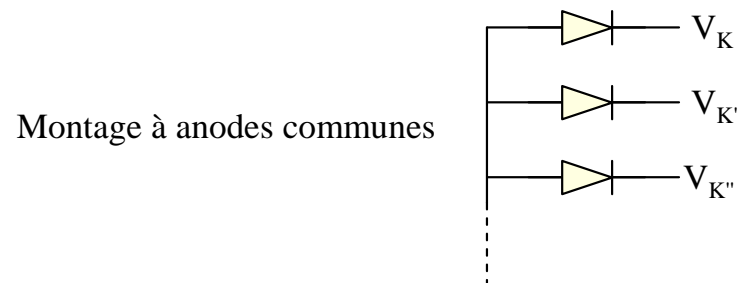


Dét. de l'état d'un réseau de diodes

- Dans un montage de diodes à **cathodes communes**, c'est la diode dont le **potentiel d'anode est le plus haut** qui devient l'unique **diode passante**



- Dans un montage de **diodes à anodes communes**, c'est la diode dont le **potentiel de cathode est le plus bas** qui devient l'unique **diode passante**

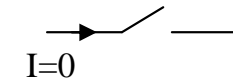
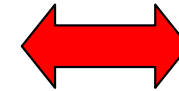
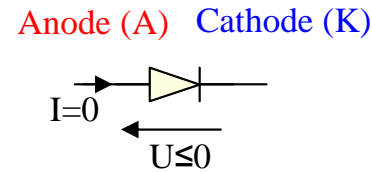


Dét. de l'état d'une diodes dans un circuit complexe

- Une dernière méthode consiste à supposer l'un des deux états de la diode
 - ...puis à vérifier que les conditions associées sont vérifiées.
 - Si elles ne le sont pas, alors la diode est dans l'autre état

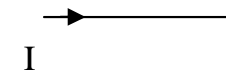
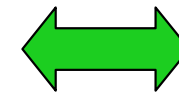
Modèles éq. de la diode bipolaire

■ Diode bloquée

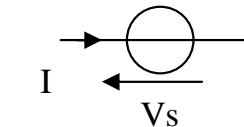
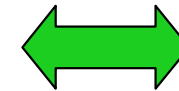
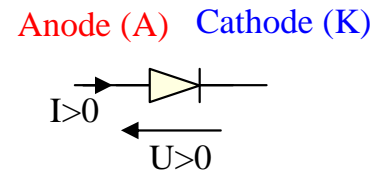


■ Diode passante

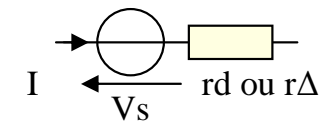
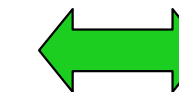
■ 1^{er} modèle



■ 2^{ième} modèle

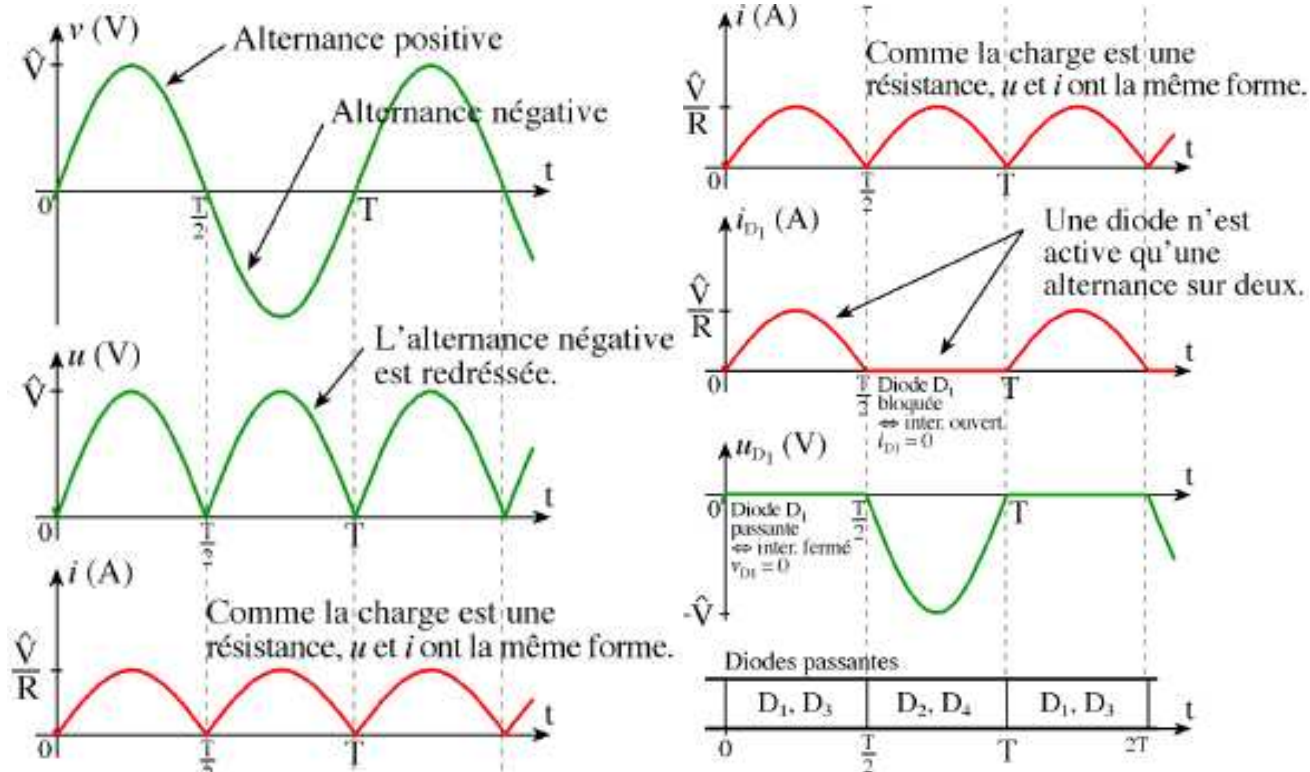
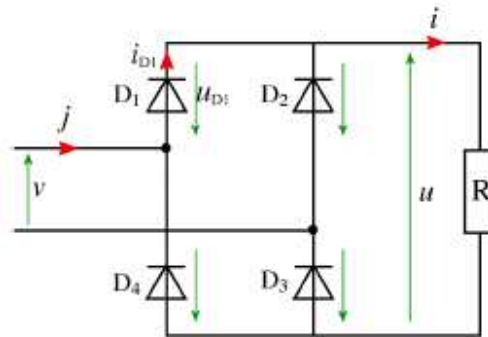


■ 3^{ième} modèle

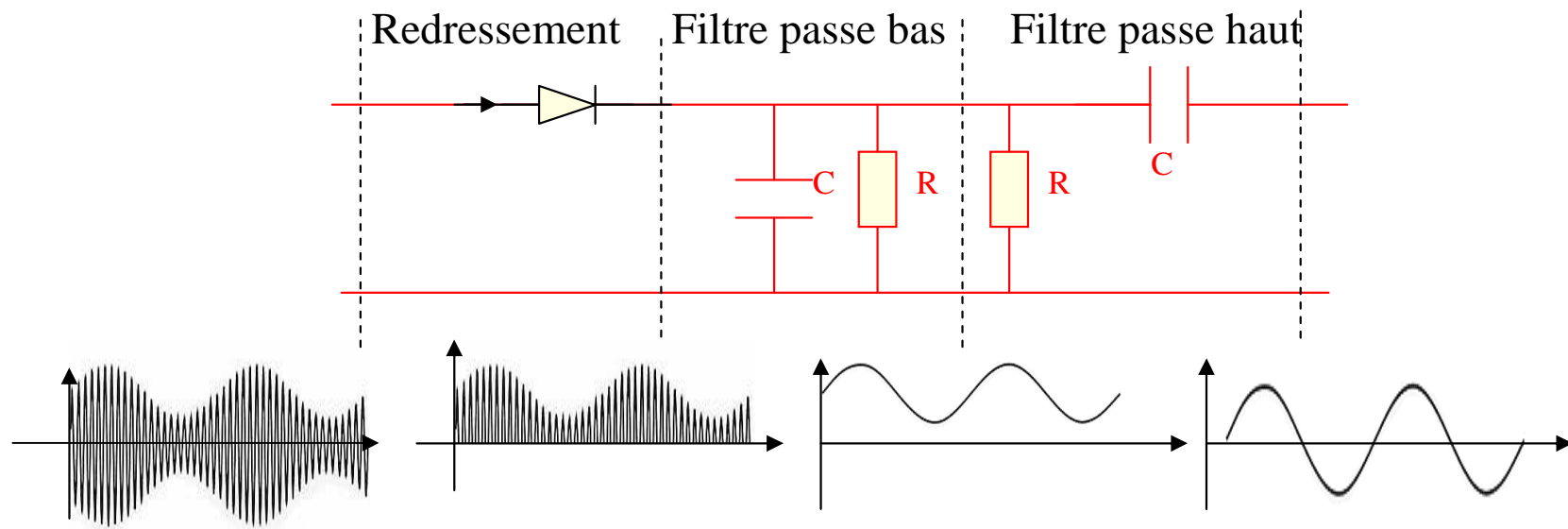


Montage usuel à base de diodes:

Redressement double alternance

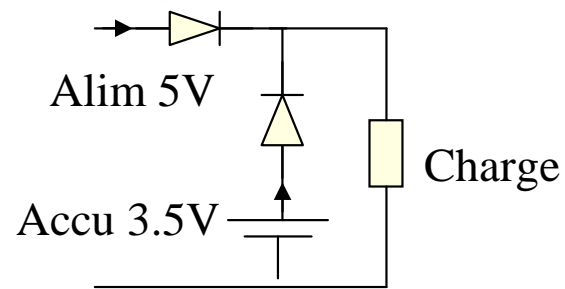


Montage usuel à base de diodes: Démodulation AM

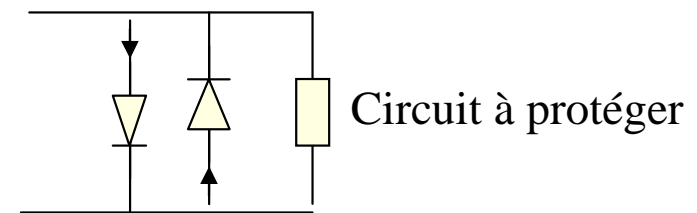


Montage usuel à base de diodes:

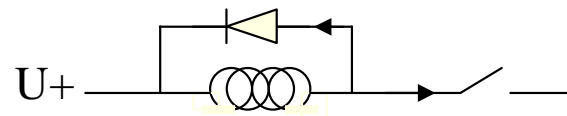
■ Anti-retour



■ Ecrêteur

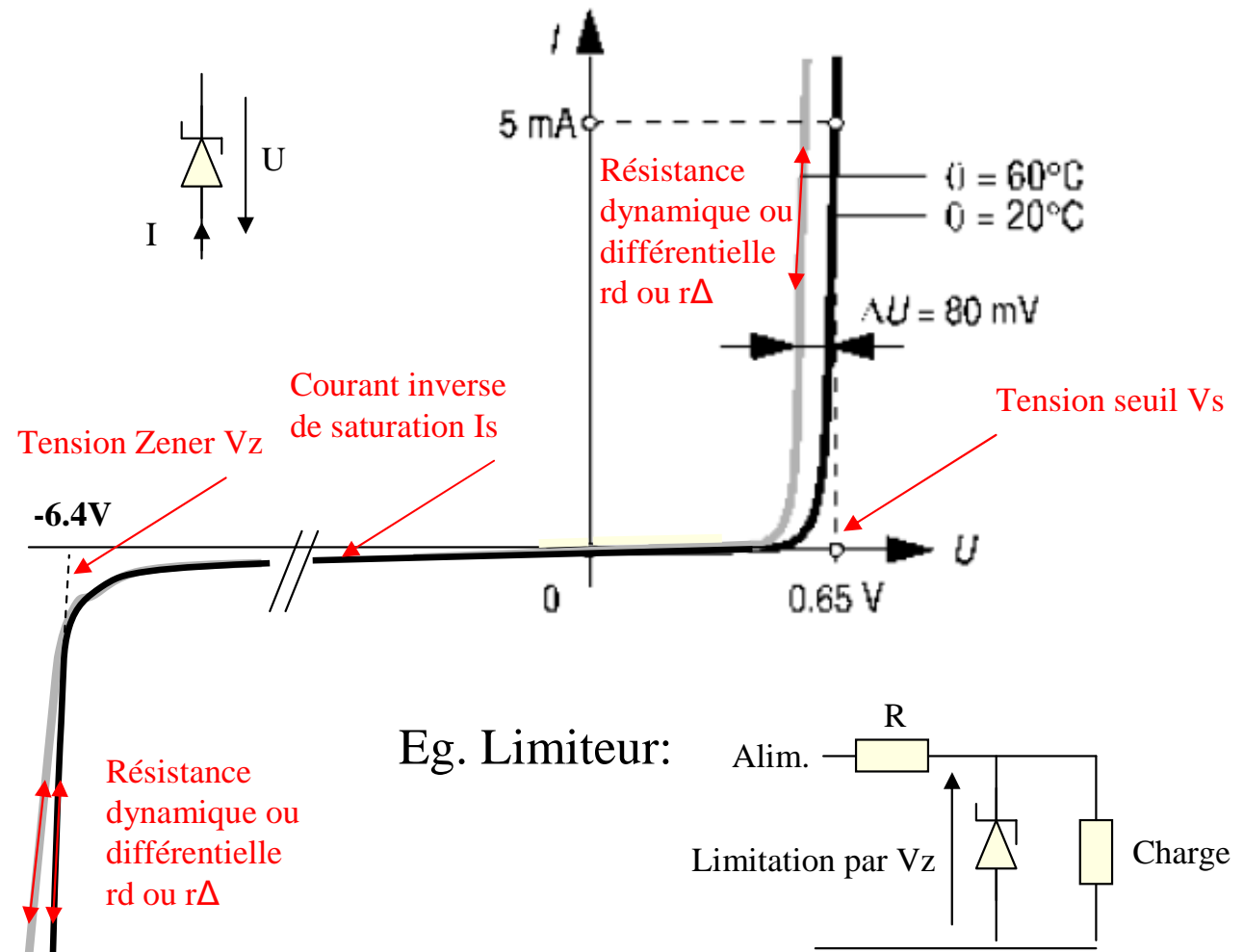


■ Protection de contact



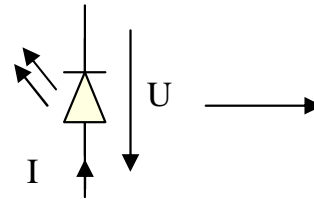
Diodes spéciales...

■ -Zener

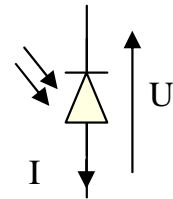


Diodes spéciales...

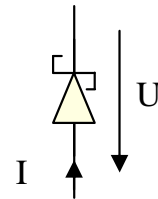
■ -Électroluminescente



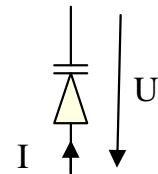
■ Photo-



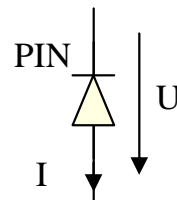
■ -Schottky



■ -Varicap



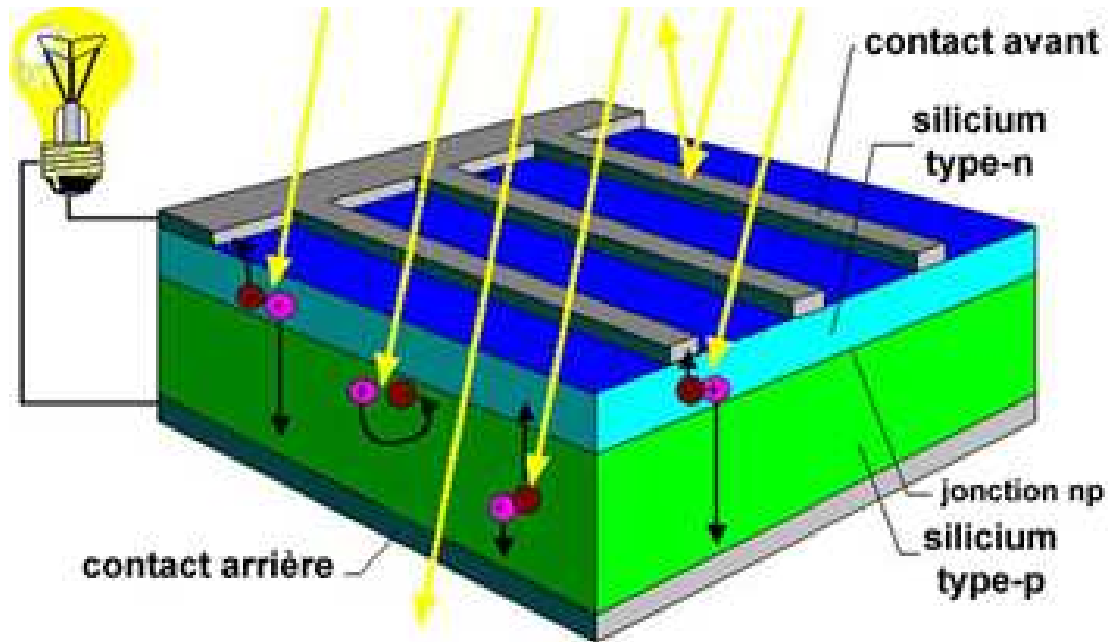
■ -PIN



La cellule photovoltaïque



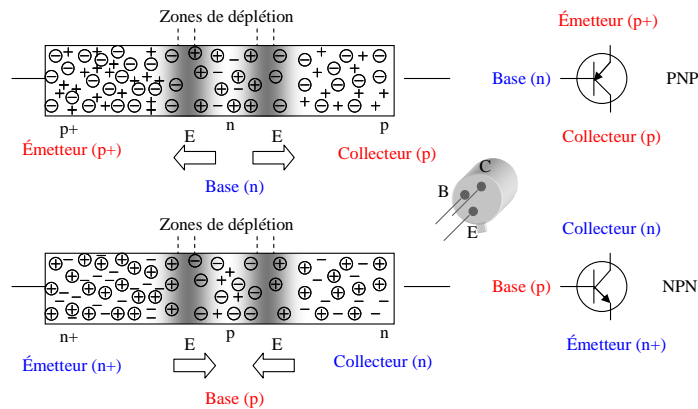
■ = photo-diode



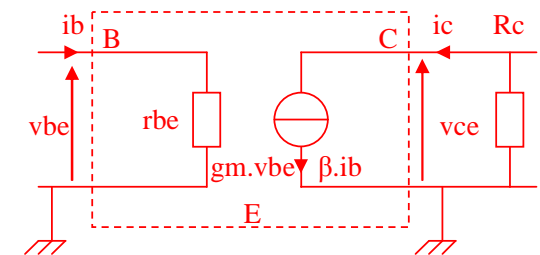
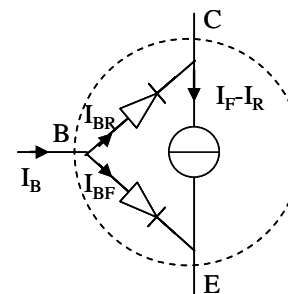
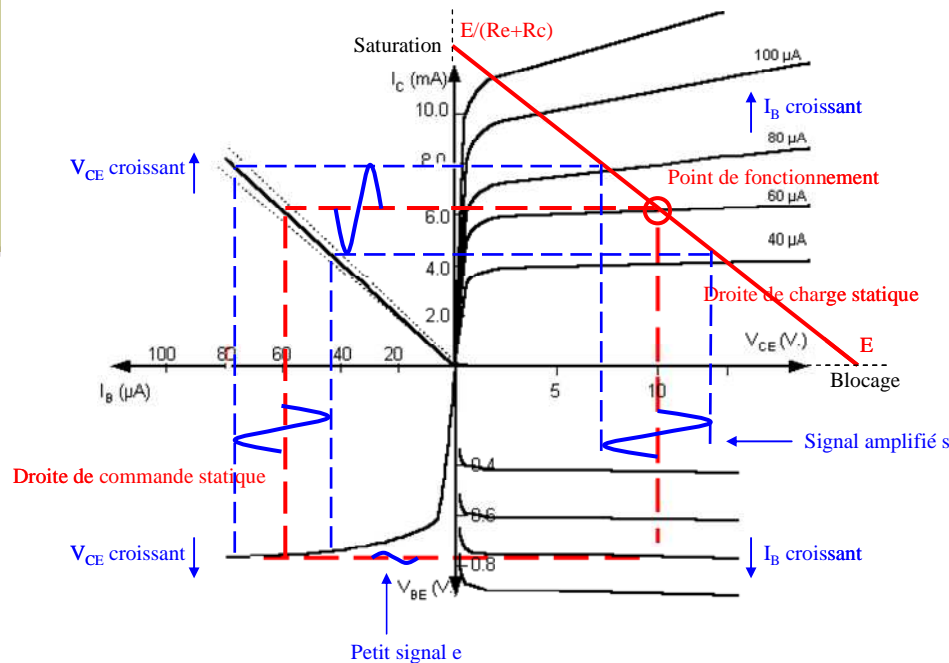
Quiz sur les diodes...

- Qu'est ce qu'un semi-conducteur intrinsèque ?
- Qu'est ce qu'un semi-conducteur extrinsèque de type n ?
- Qu'est ce qu'un semi-conducteur extrinsèque de type p ?
- Que se passe-t-il lorsque l'on forme une jonction pn ?
- Quelle est dans ce cas la distribution des charges, du champ et du potentiel électrique ?
- Quel est le symbole de la diode ?
- Quelles sont les distributions de charge, de potentiel, d'énergie et de courant en fonction de la polarisation appliquée à la jonction pn ?
- Quelle est l'expression et la caractéristique électrique d'une jonction pn (ie. d'une diode) ?
- Quels sont les 4 principaux modèles électriques d'une diode ?
- Quels sont les méthodes permettant de déterminer l'état d'une ou de plusieurs diodes ?
- Quelles est l'oscillogramme complet d'un redressement double alternance (chronogramme des diodes, courants d'entrée et de sortie, tensions d'entrée et de sortie) ?
- Comment fonctionne une démodulation AM à base de diode ?
- Quel est le principe du montage anti-retour ?
- Quel est le principe du montage écréteur ?
- Quel est le principe du montage protection de contact ?
- Quelle est la caractéristique électrique d'une diode Zener ?
- Quel peut être son application ?
- Quel est le principe et le symbole d'une diode électroluminescente ?
- Quel est le principe et le symbole d'une photo-diode ?
- Quel est le principe et le symbole d'une diode Schottky ?
- Quel est le principe et le symbole d'une diode Varicap ?
- Quel est le principe et le symbole d'une diode PIN ?

Transistors à jonction (bipolaires) et montages usuels (+variantes) (2h)

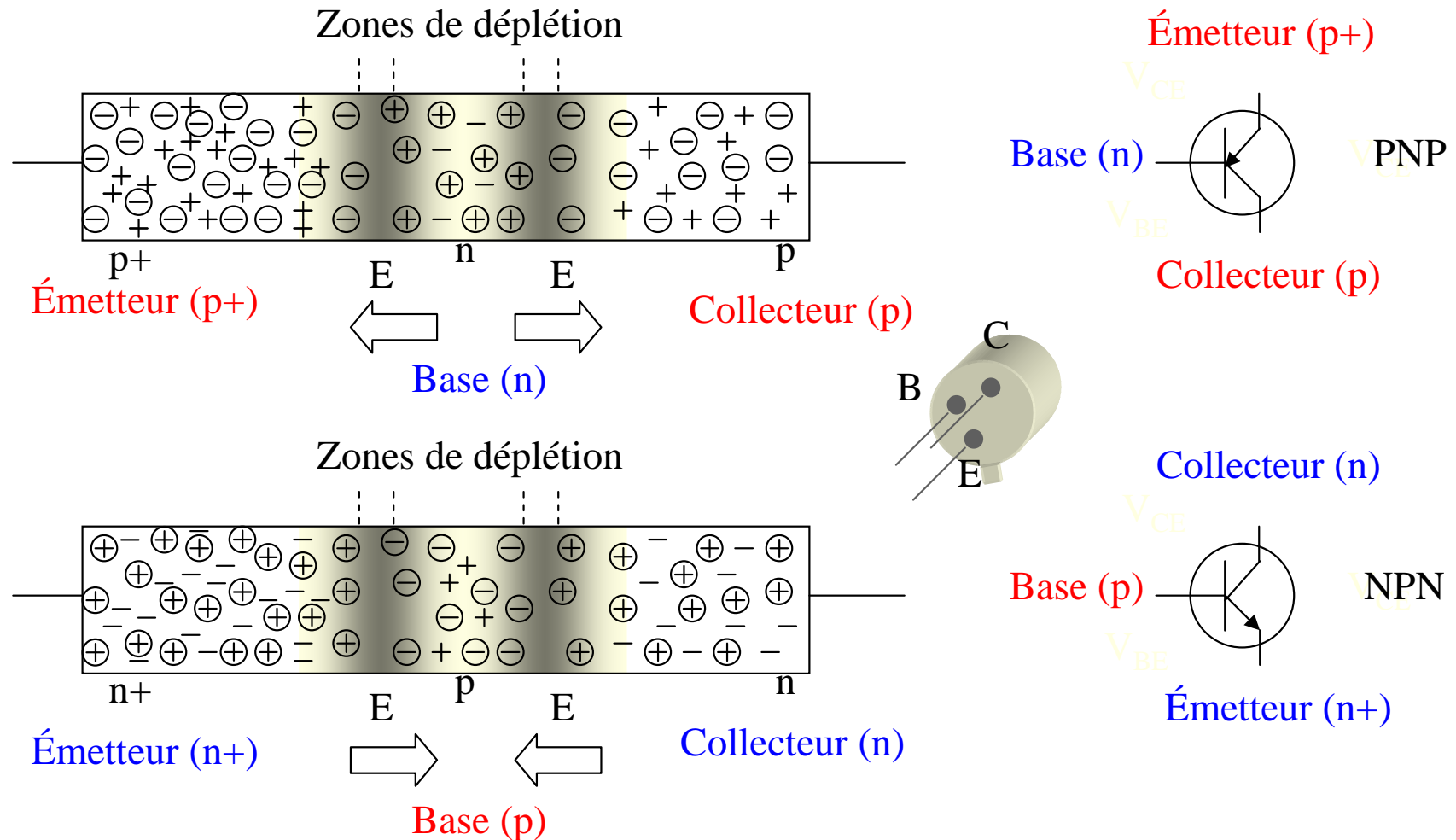


- Physique du transistor
- Caractéristique électrique
- Modèle éq. statique
- Modèle éq. dynamique
- Montages usuels
 - Amplificateur
 - Logique (inverseur)



La jonction npn ou pnp = Transistor

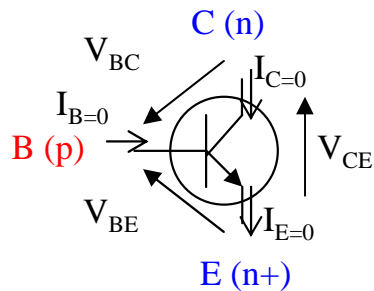
- Le transistor bipolaire (Bipolar Junction Transistor) est un dispositif à semi-conducteur formé par l'association de deux jonctions pn placées en opposition



Polarisations de la jonction npn

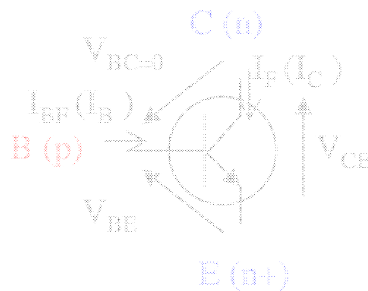
... où « l'effet transistor » !

Repos



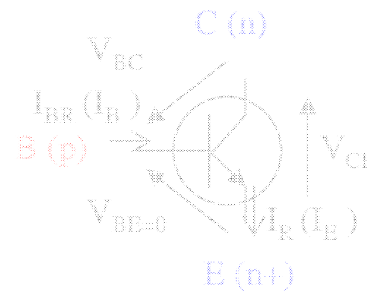
Transistor au repos

Direct (F)

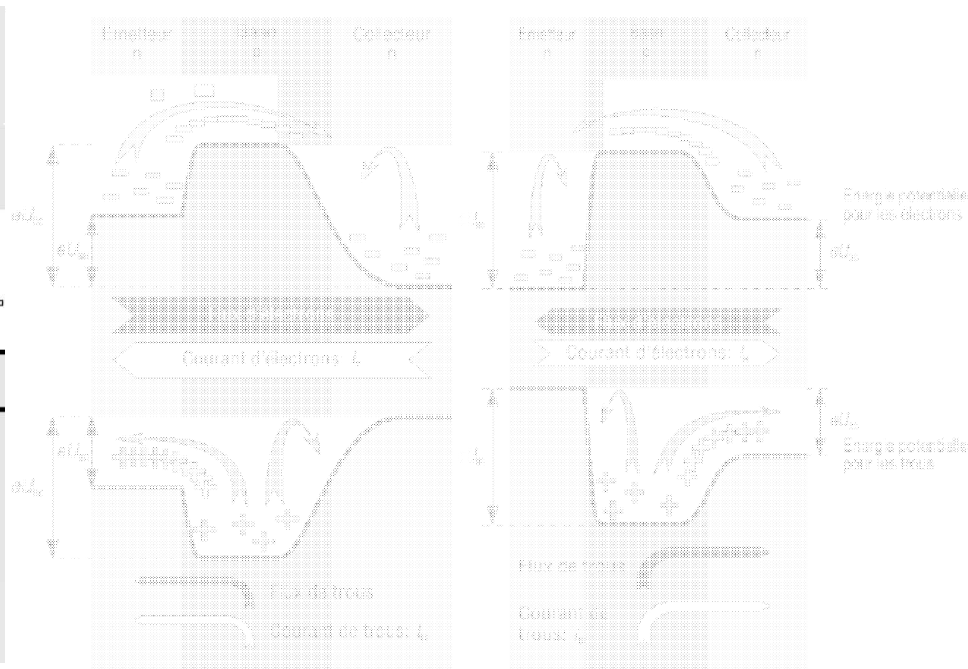
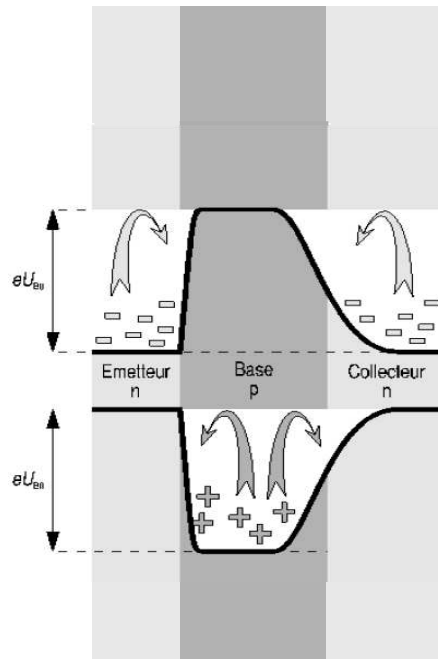


Jonction BE polarisée en sens direct ($V_{BC}=0$)

Inverse (R)

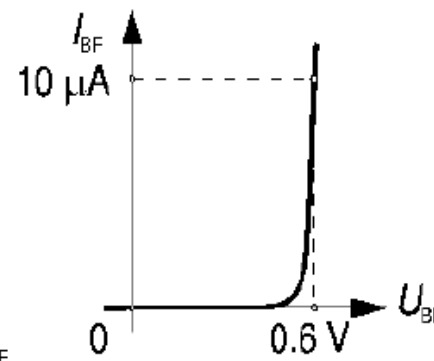
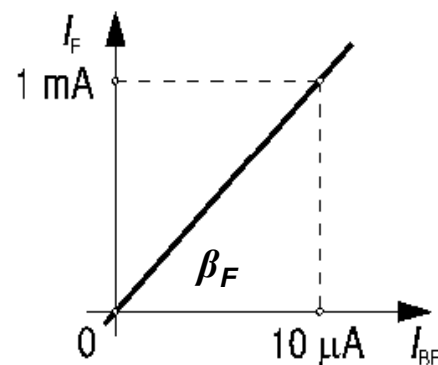
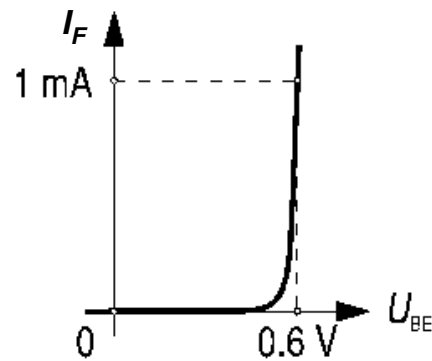


Jonction BC polarisée en sens direct ($V_{BE}=0$)



Propriétés électriques en mode F et R

■ Mode Direct (Forward)

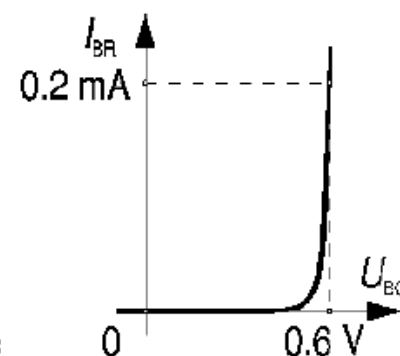
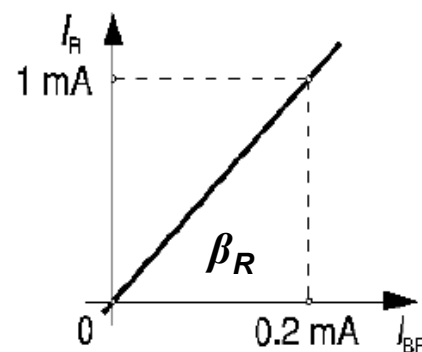
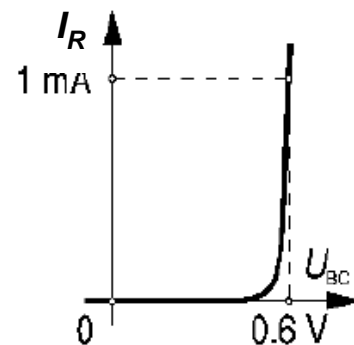


$$I_F = I_s \left(\exp \frac{U_{BE}}{U_T} - 1 \right) \cong I_s \exp \frac{U_{BE}}{U_T}$$

$$I_{BF} = I_{sF} \left(\exp \frac{U_{BE}}{U_T} - 1 \right) \cong I_{sF} \exp \frac{U_{BE}}{U_T}$$

$$\beta_F = \frac{I_F}{I_{BF}} = \frac{I_s}{I_{sF}}$$

■ Mode Inverse (Reverse)



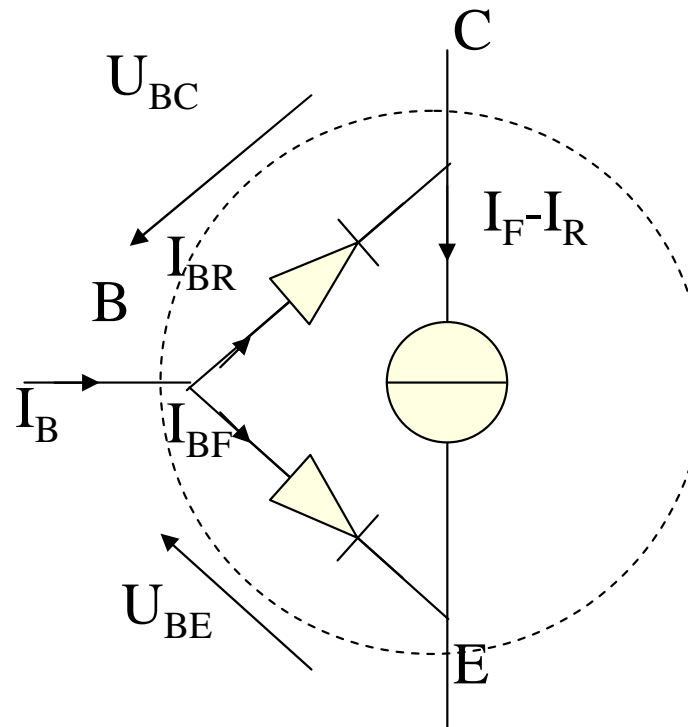
$$I_R = I_s \left(\exp \frac{U_{BC}}{U_T} - 1 \right) \cong I_s \exp \frac{U_{BC}}{U_T}$$

$$I_{BR} = I_{sR} \left(\exp \frac{U_{BC}}{U_T} - 1 \right) \cong I_{sR} \exp \frac{U_{BC}}{U_T}$$

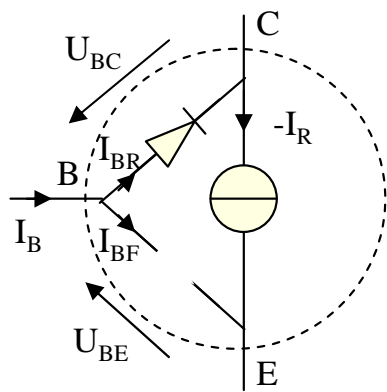
$$\beta_R = \frac{I_R}{I_{BR}} = \frac{I_s}{I_{sR}}$$

Modèle équivalent statique

- Après avoir étudié séparément l'effet de chaque jonction, le modèle complet du transistor peut être obtenu par la simple superposition des modes F et R
 - Il s'agit du modèle de Ebers et Moll



Zones de fonctionnements...



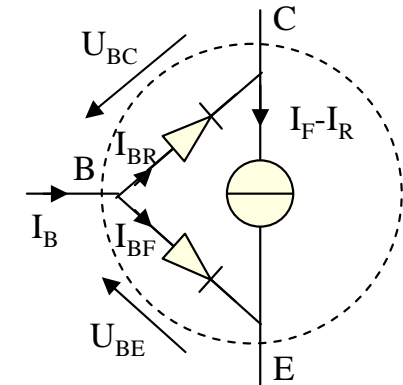
(R)

Normal
inverse

U_{BC}

(F) + (R)

Saturation



(*)

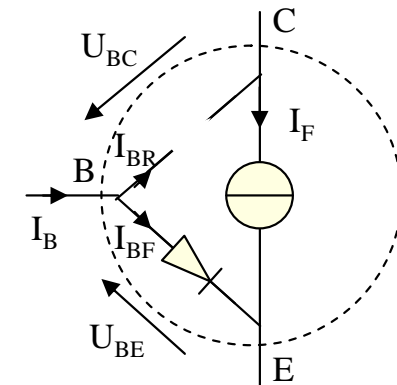
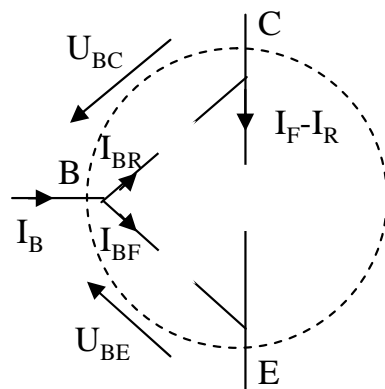
Blocage

0

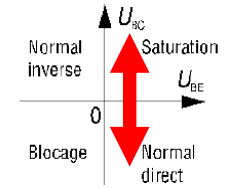
(F)

Normal
direct

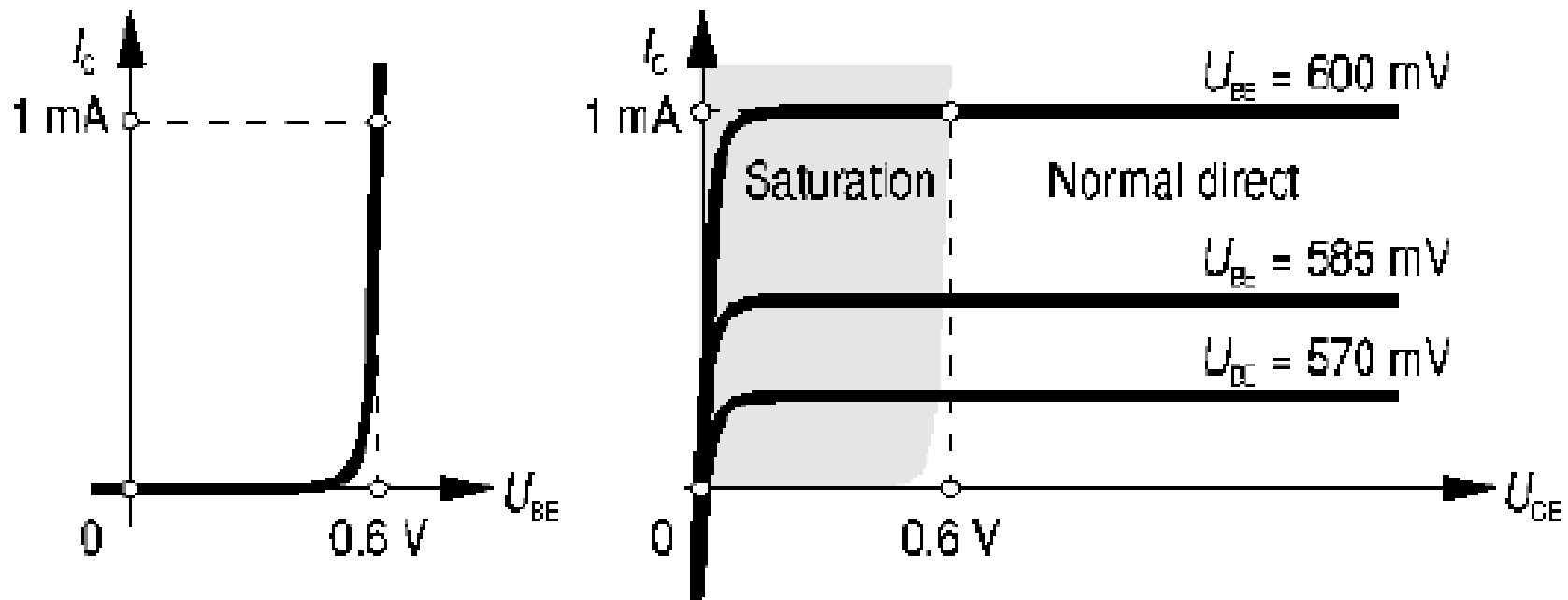
U_{BE}



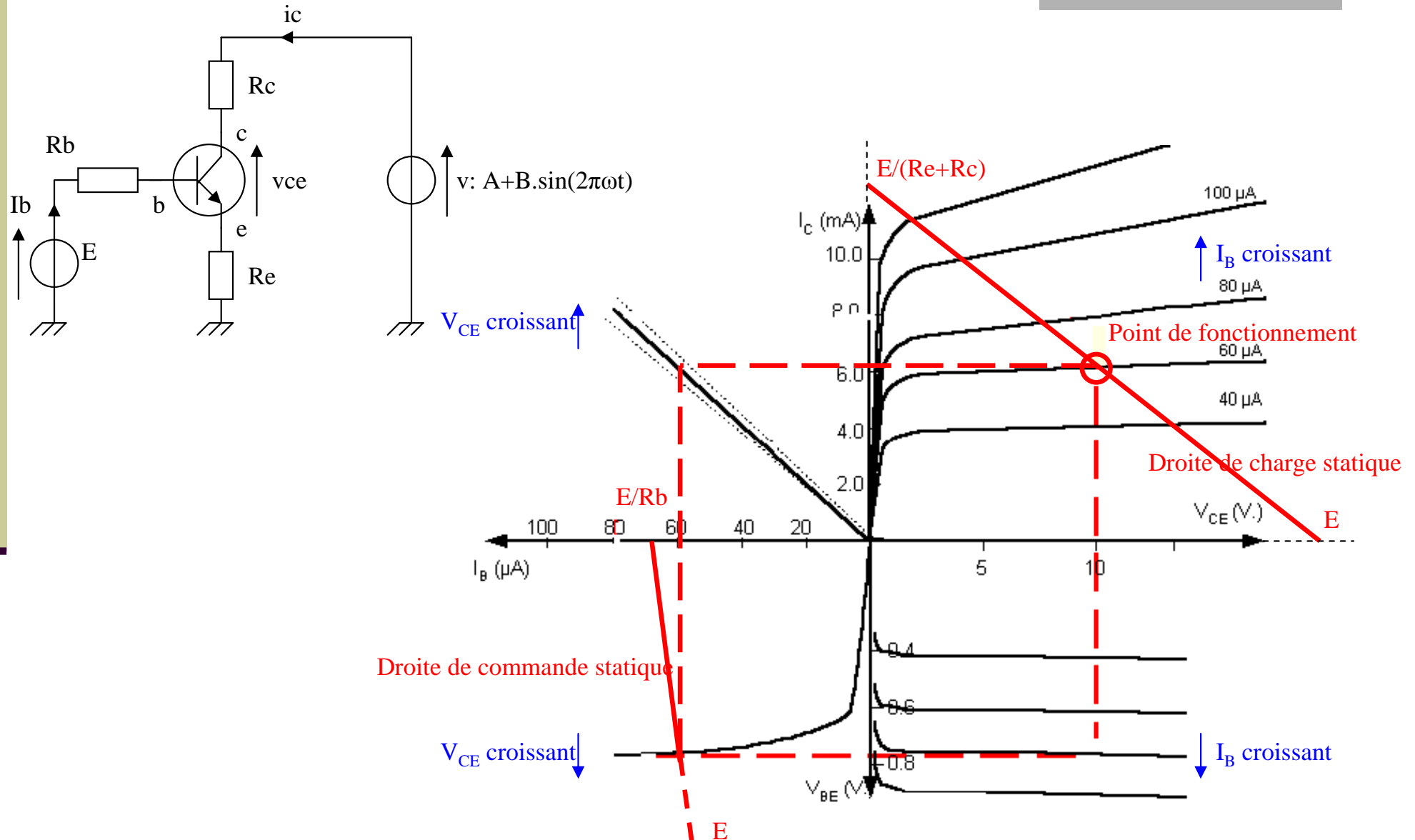
Propriétés électriques en régime saturé et normal direct



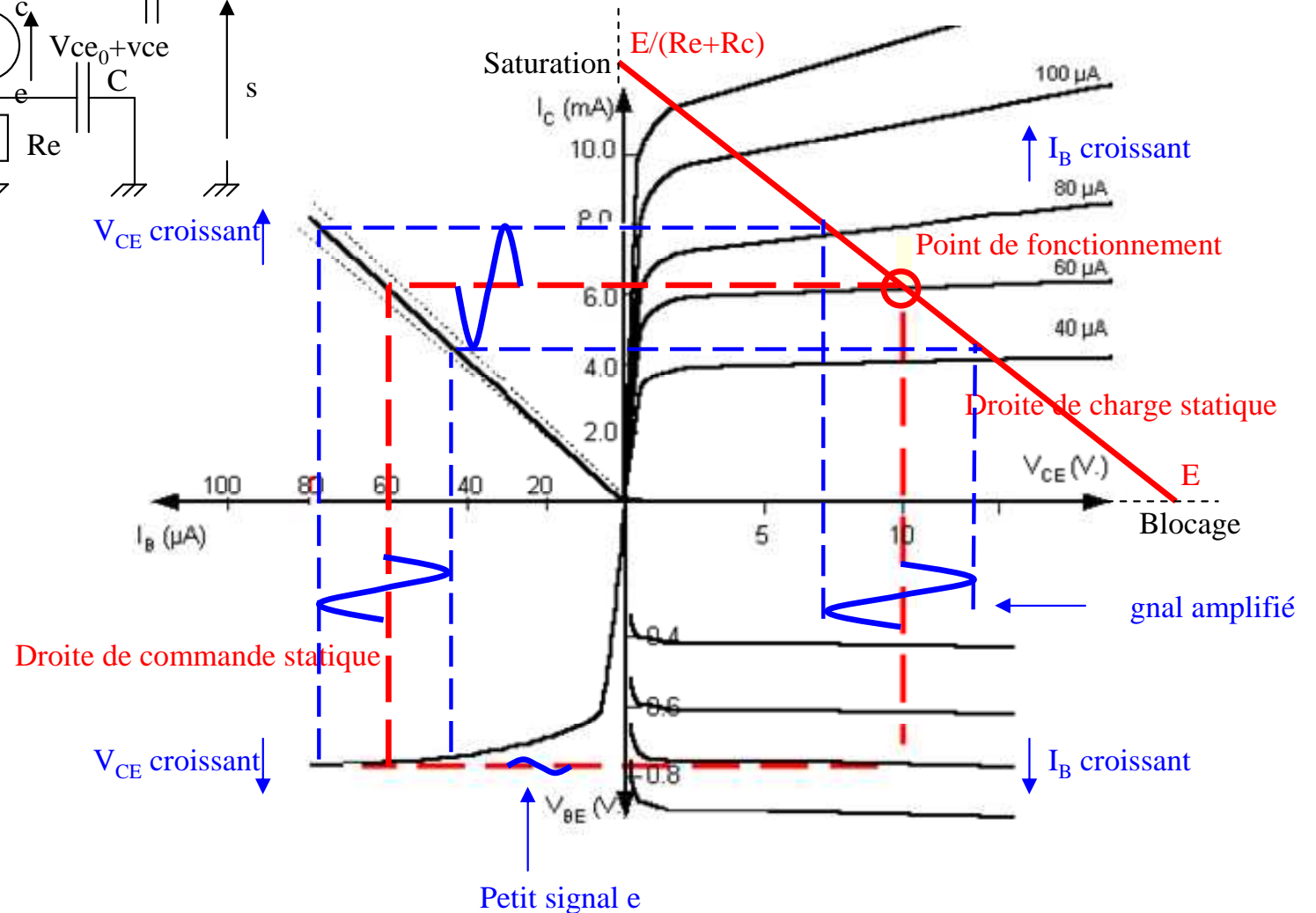
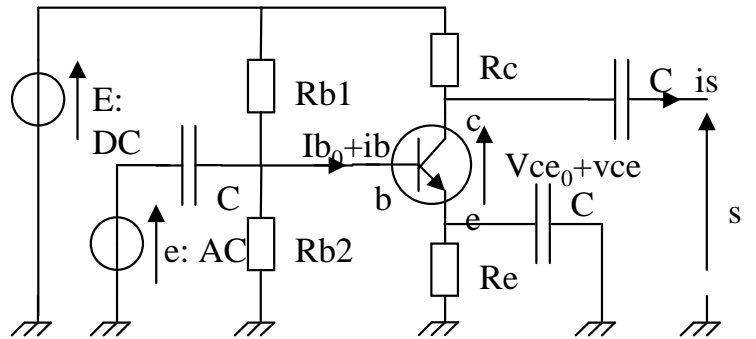
- Illustration de deux régimes de fonctionnement sur une caractéristique de transfert et de sortie



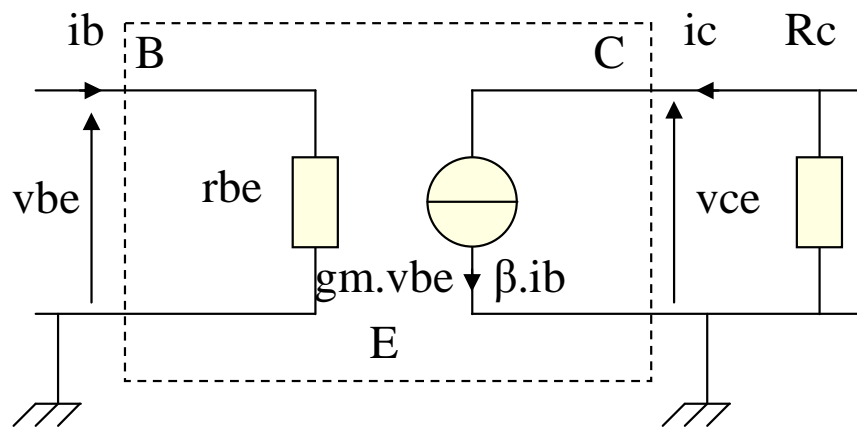
Montage à émetteur commun (EC)



Montage d'amplification



Modèle équ. Dynamique (petits signaux)



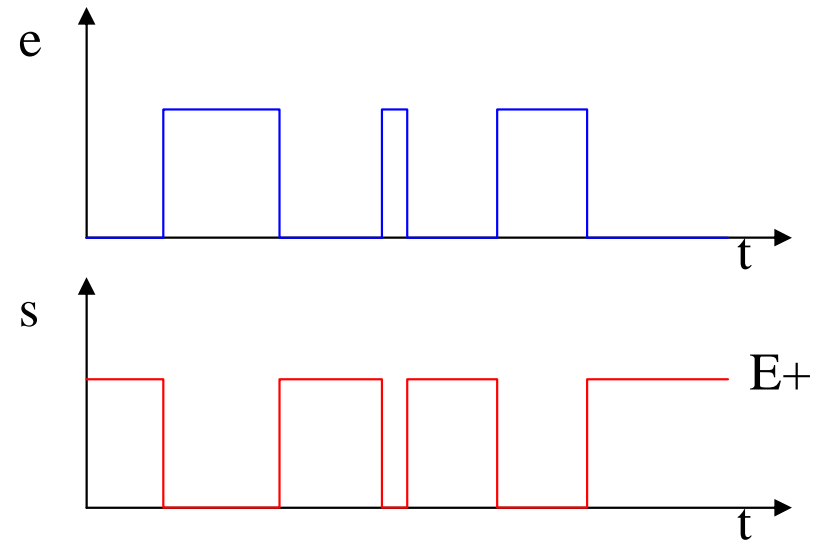
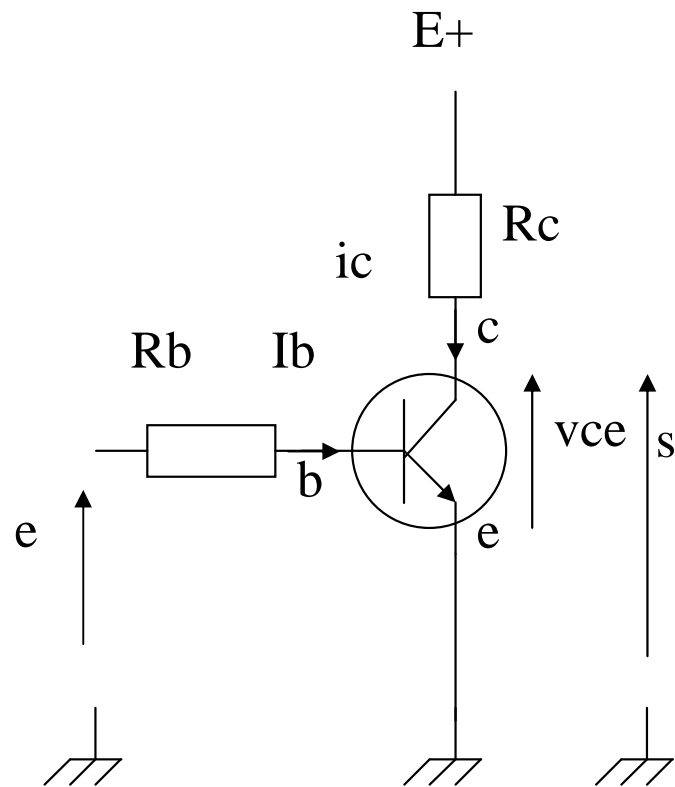
$$g_m = \left. \frac{dI_c}{dV_{be}} \right|_{I_{C_0}} = \frac{I_s \exp \frac{V_{be_0}}{U_T}}{U_T} = \frac{I_{C_0}}{U_T}$$

$$\beta = \left. \frac{dI_c}{dI_b} \right|_{I_{C_0}}$$

$$r_{be} = \left. \frac{dV_{be}}{dI_b} \right|_{I_{C_0}} = \beta \left. \frac{dV_{be}}{dI_c} \right|_{I_{C_0}} = \frac{\beta}{g_m} = \beta \frac{U_T}{I_{C_0}}$$

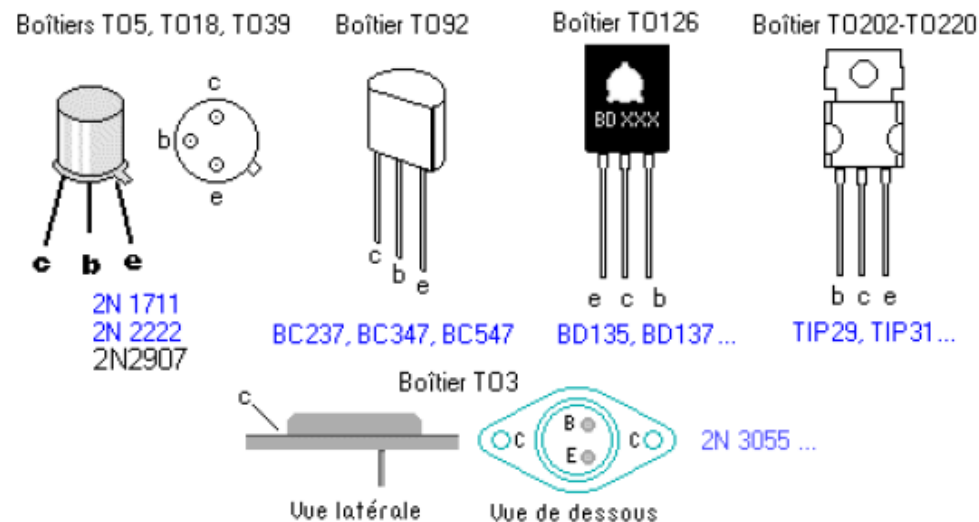
Montage à commutation

■ Inverseur

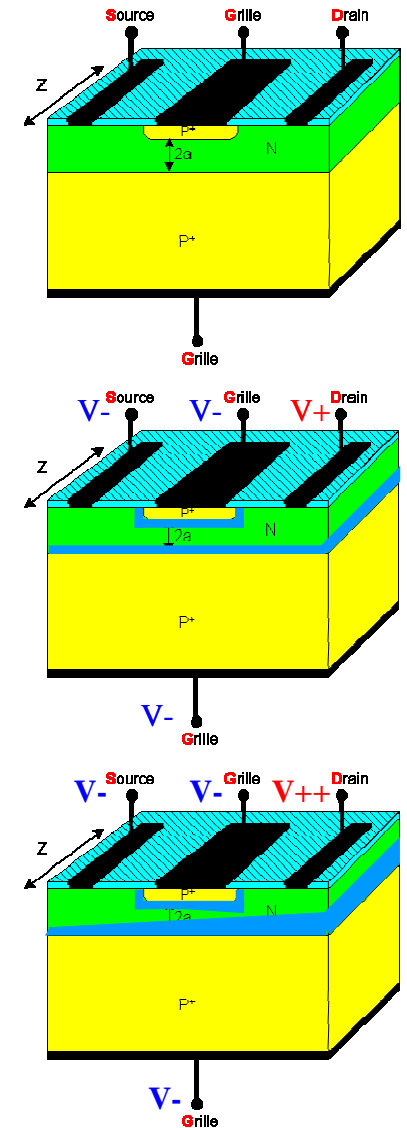
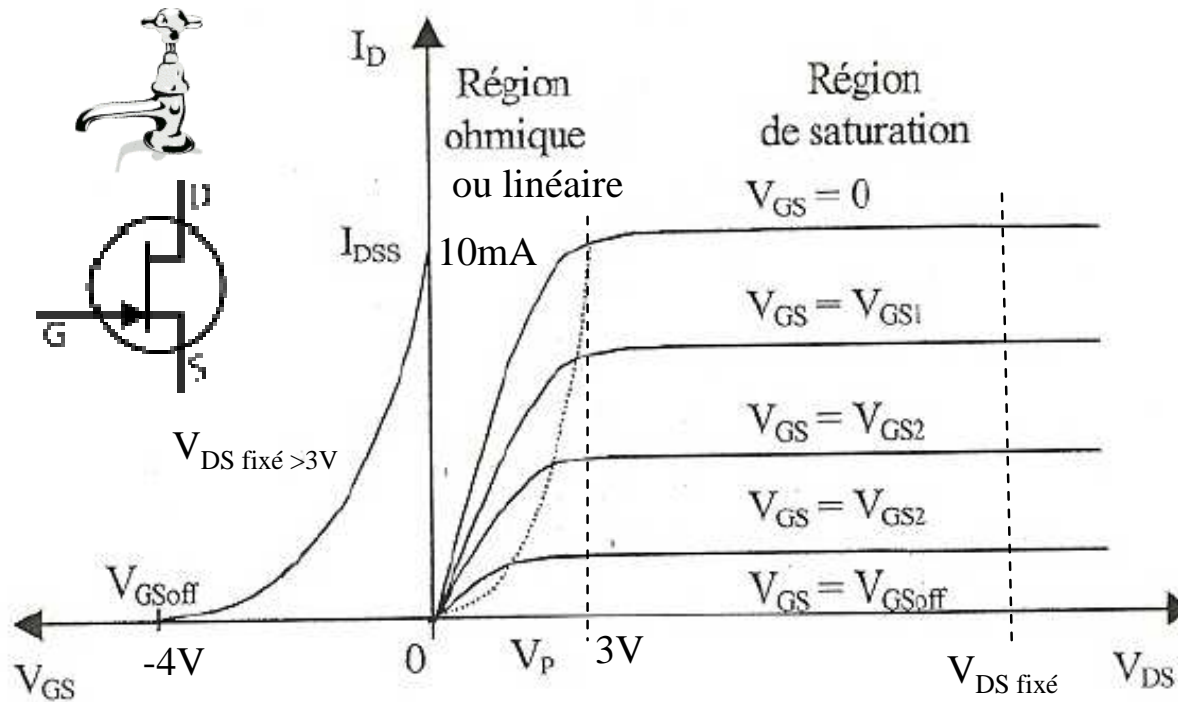


Caractéristiques techniques

- Quelques ordres de grandeurs
 - $V_{be}=0.65V$ ($I_c=mA$) et $V_{be}=1V$ ($I_c=1A$)
 - $I_b=\mu A$
 - Pertes=10W et Pertes=100W
 - $f_{max}=GHz$
- Diversité de boîtiers



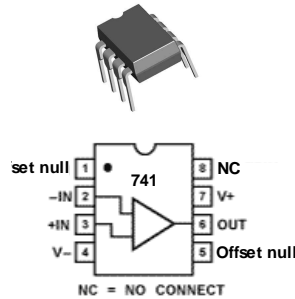
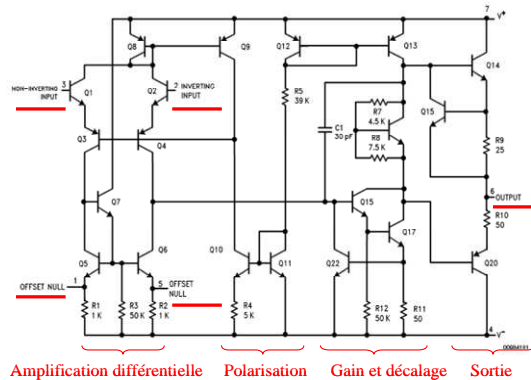
Transistors à effet de champ (JFET)



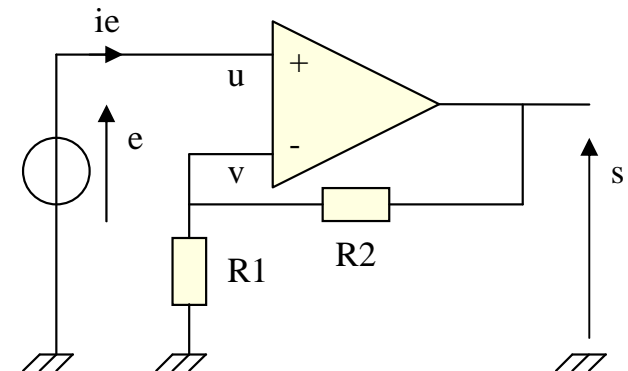
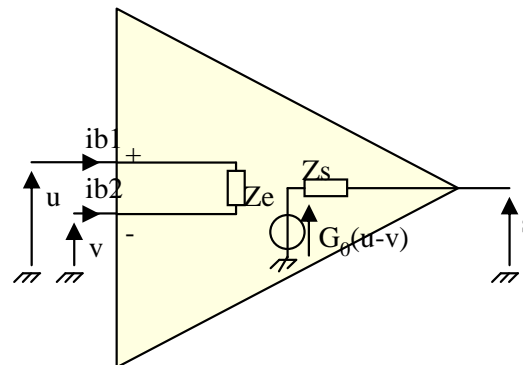
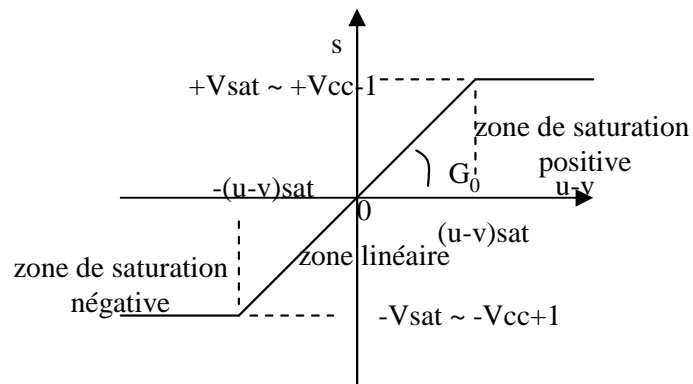
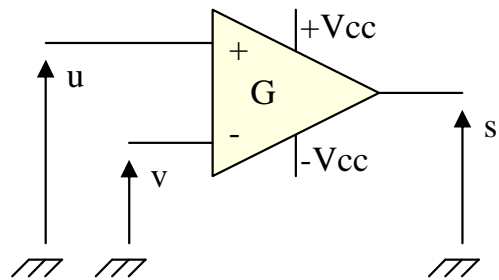
Quiz sur les transistors...

- Quelles sont les structures (représentation physique) et symboles des transistors à jonction npn et pnp ?
- Quelles sont les distributions d'énergie et de courants en fonction de la polarisation appliquée (npn) ?
- Quelles sont les caractéristiques électriques en mode direct (F) ?
- Quelles sont les caractéristiques électriques en mode inverse (R) ?
- Quel est le modèle équivalent statique du transistor dit d'Ebers et Moll ?
- Quelles sont les 4 modes de fonctionnement d'un transistor ?
- Quelle est la caractéristique $I_c=f(U_{be})=f(U_{ce})$?
- Quels sont les modes saturé, normal direct et bloqué correspondants ?
- Quelle est la relation fondamentale entre I_c , I_b et I_e ?
- Quelle est la relation fondamentale entre I_c et I_b (en mode F) ou I_e et I_b (en mode R) ?
- Quelle est la relation fondamentale entre V_{ce} , V_{cb} et V_{be} ?
- Qu'est ce que des montages à EC, BC et CC ?
- Quelle est la caractéristique statique complète d'un transistor monté en EC ?
- Quel est le principe et la caractéristique électrique d'un montage amplificateur (EC) ?
- Quel est le modèle équivalent dynamique simplifié (ou petits signaux) du transistor ?
- Quelles sont les relations qui permettent d'en identifier les principaux paramètres ?
- Quels sont les ordres de grandeurs caractéristiques d'un transistor (P , V_{be} , I_c , I_b etc...) ?
- Quel est le principe et le symbole d'un transistor à effet de champ dopé n (JFET n) ?
- Quelles sont les caractéristiques $I_d=f(V_{gs})$ et $V(ds)$ du JFET ?

Amplificateurs Opérationnels et montages usuels (2h)

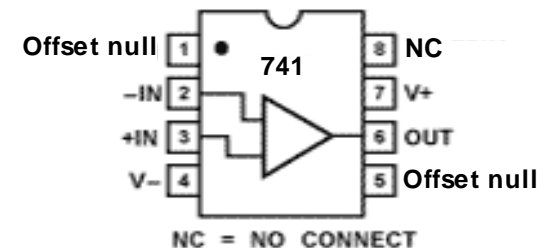
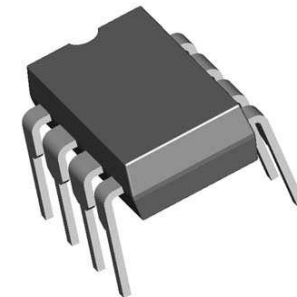
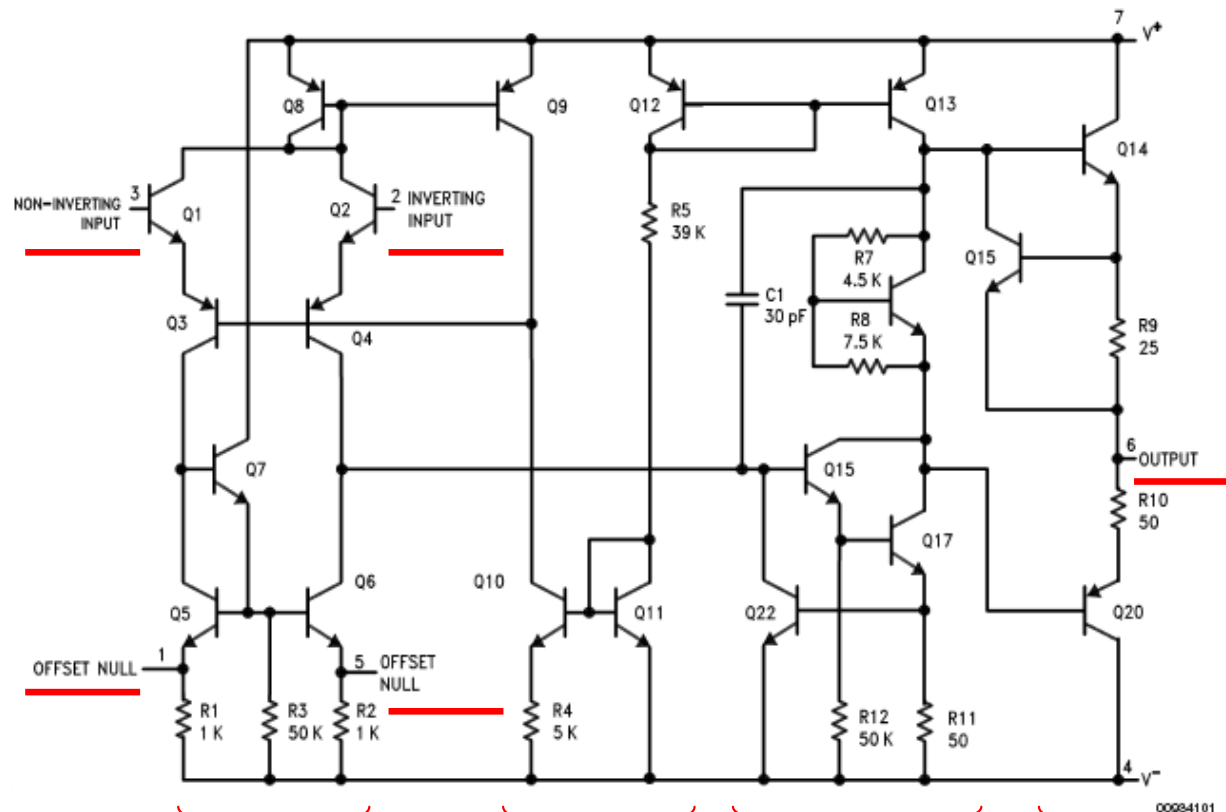


- Technologie de l'AOP
- Représentation symbolique
- Caractéristiques électriques
- Modèle éq. réel et idéal
- Montages usuelles
 - Amplificateurs
 - Comparateurs



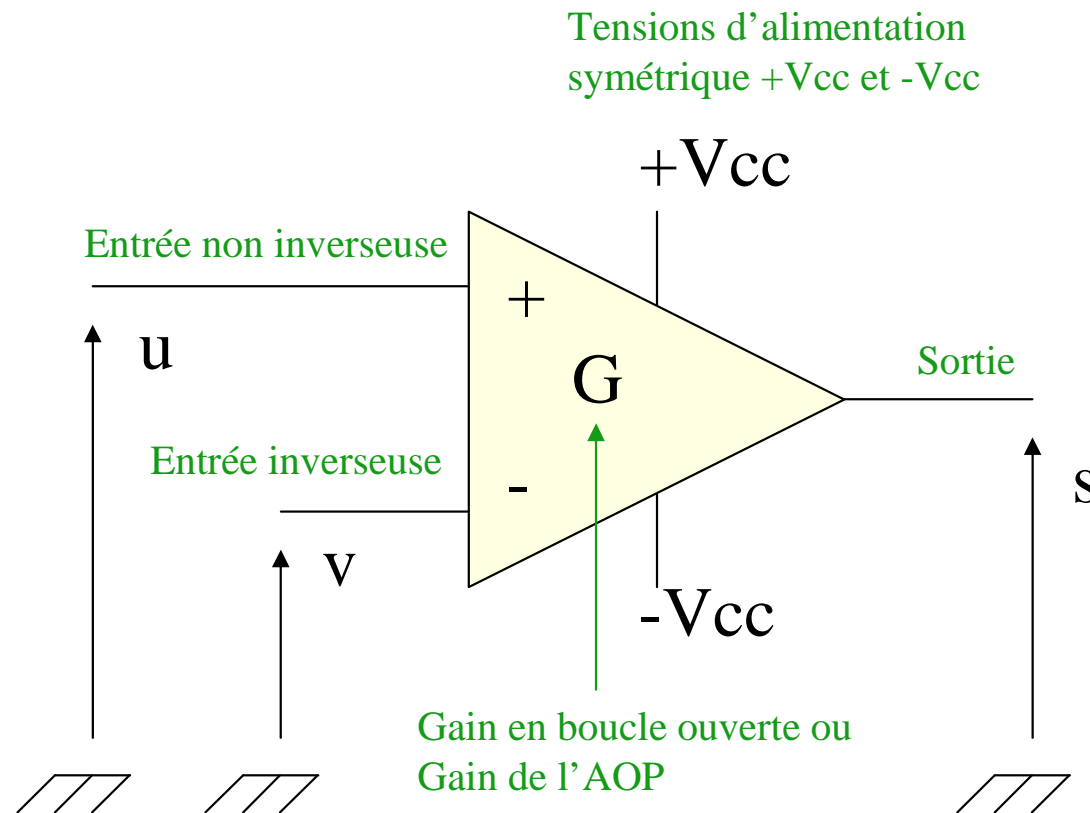
Technologie de l'Ampli-OP (eg. LM741)

- Ce montage composé de transistors de résistances et d'une capacité, est intégré dans un petit boîtier appelé « Circuit Intégré »



Amplification différentielle Polarisation Gain et décalage Sortie

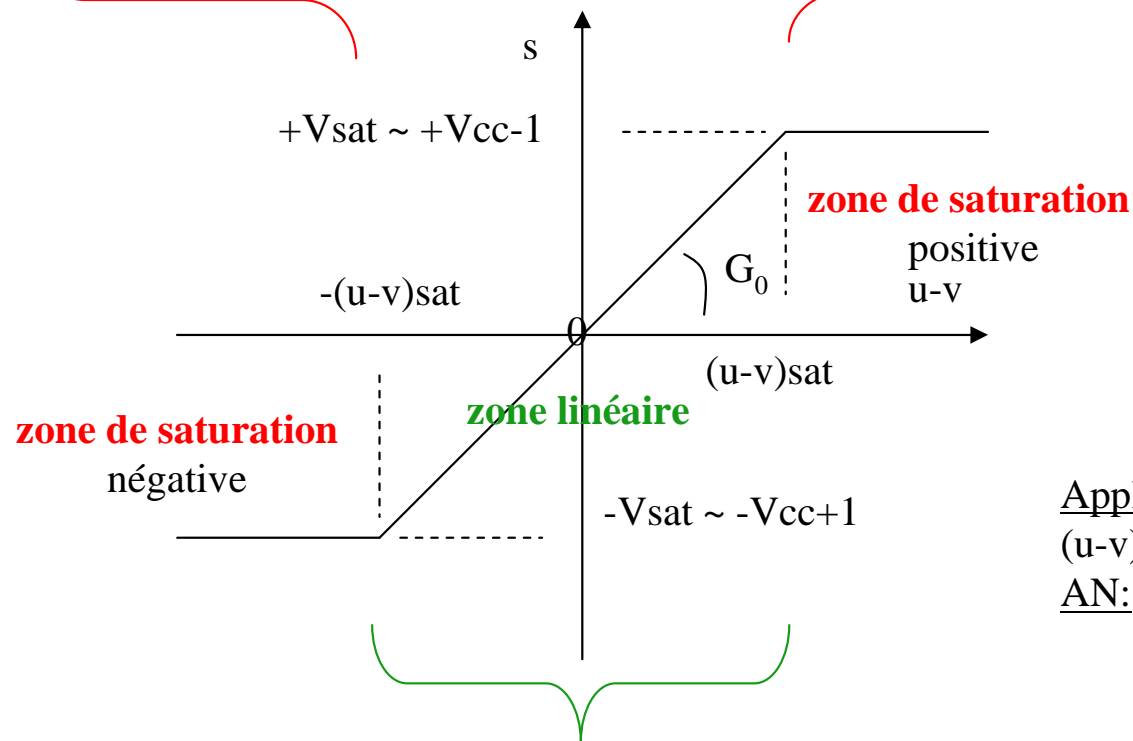
Représentation symbolique



Caractéristiques électriques

$$s = -V_{sat} \cong -V_{cc} + 1 \quad \forall u - v < -V_{sat} / G_0$$

$$s = +V_{sat} \cong +V_{cc} - 1 \quad \forall u - v > V_{sat} / G_0$$



Application numérique:
 $(u-v)_{sat} = (V_{cc}-1)/G_0$
 AN: $(u-v)_{sat} = (15-1)/10^5 = 140 \mu V$

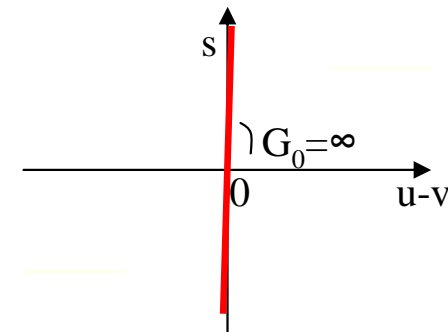
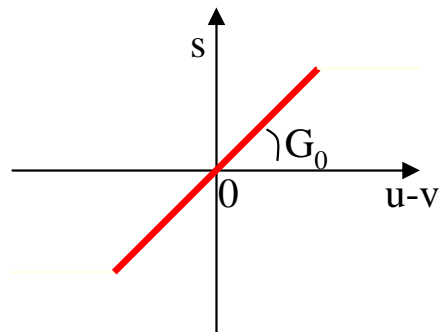
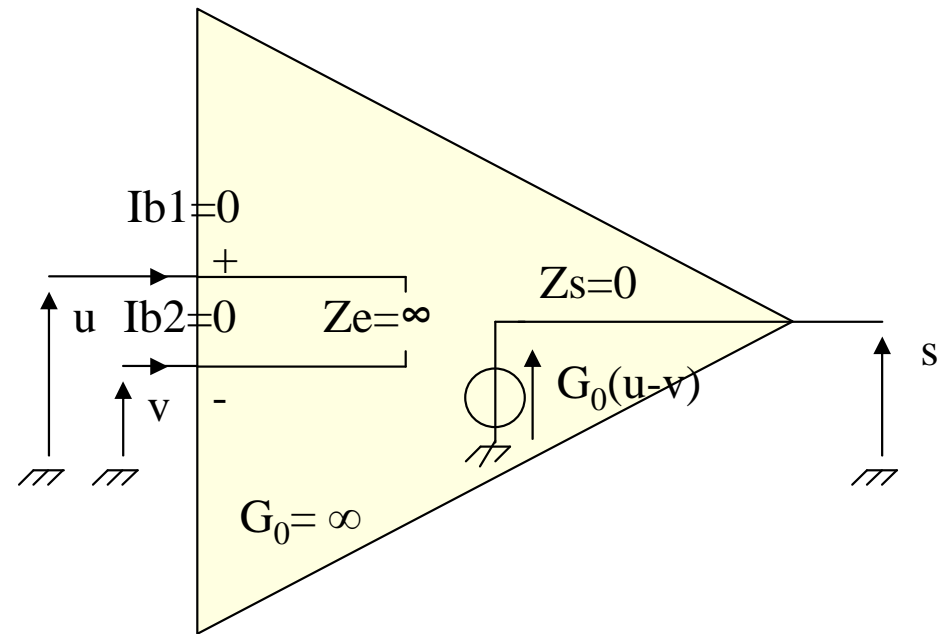
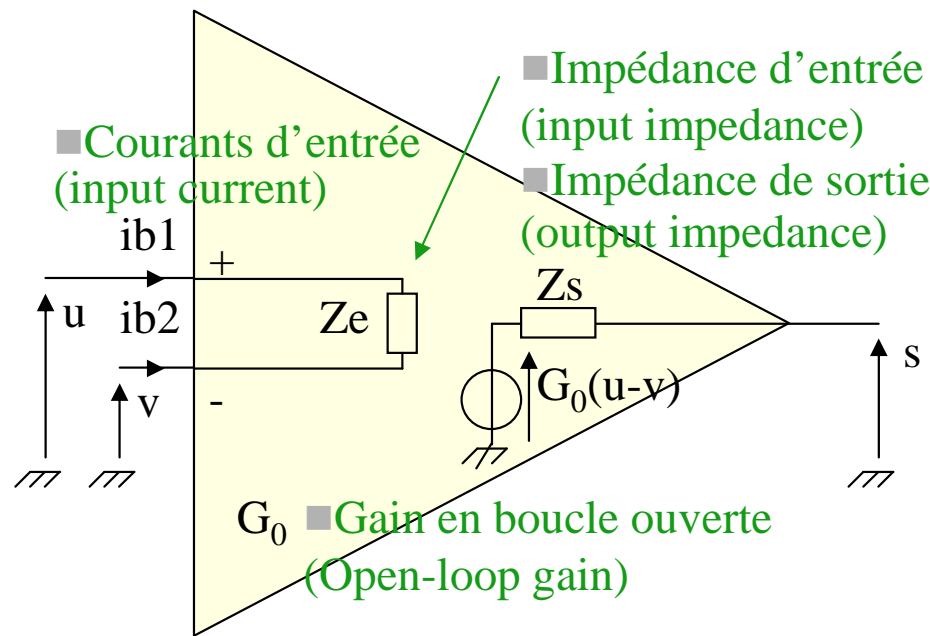
$$s = G_0 (u - v) \quad \forall |u - v| < V_{sat} / G_0$$

Modèle équivalent réel et idéal

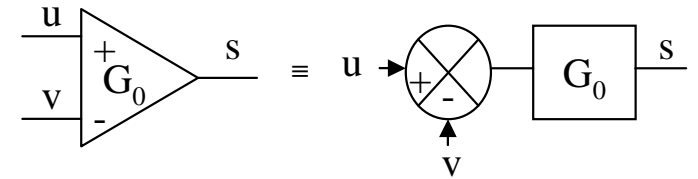
REEL



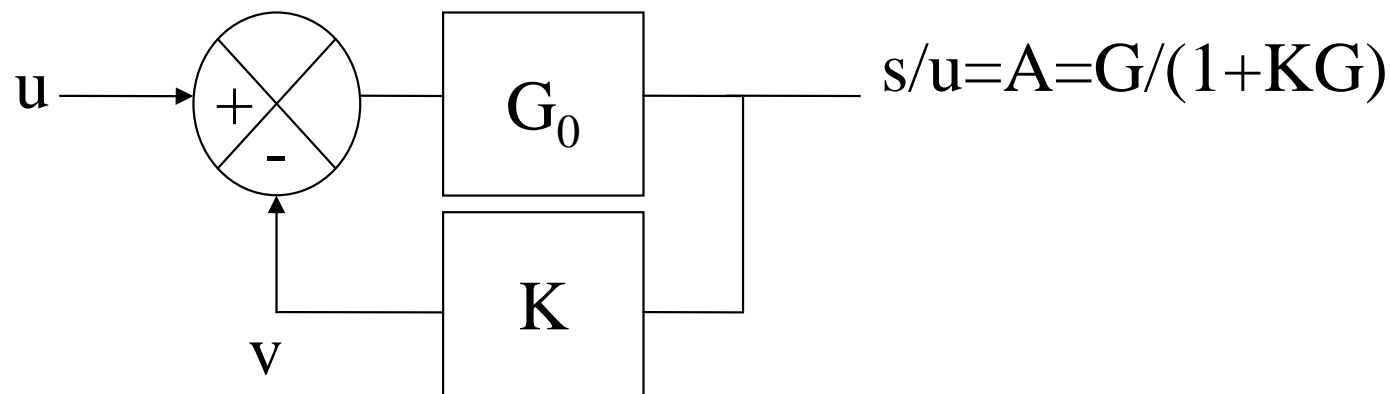
IDEAL



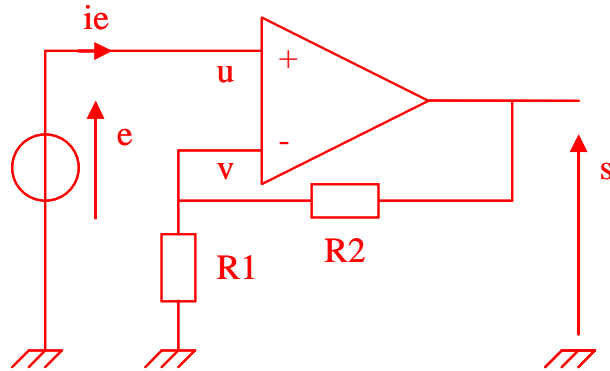
« La contre-réaction »



- Construire un AOP avec $G_0 \gg$ Gain du montage "A"
- Prélever une "partie" de S pour la réinjecter sur $V-$
 - "A" = f(composants externe) \neq f(G_0).
 - "A" peu sensible aux variations T et V_{cc}



Montage non inverseur (Noninverting amplifier)



$$A_o = s/e = \frac{R1 + R2}{R1} = 1 + \frac{R2}{R1}$$

$$Z_e' = e/ie = Z_e = \infty$$

Démo:

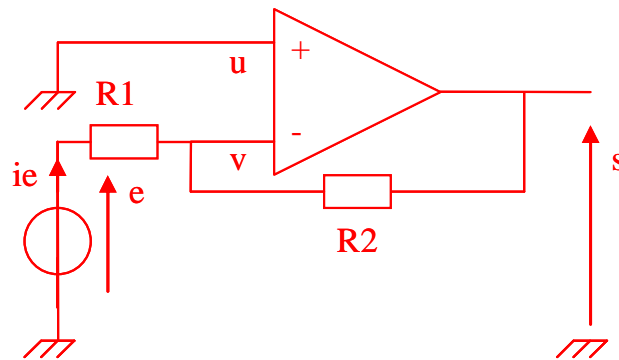
Hypothèse: $|u - v| < V_{sat} / G_0$ (ie. régime linéaire) $\Rightarrow (u - v) = s/G_0 = s/\infty = 0 \Rightarrow u = v = e$ (1)

$$\text{Millman: } v = \frac{\frac{e}{Z_e} + \frac{0}{R1} + \frac{s}{R2}}{1/Z_e + 1/R1 + 1/R2} \Rightarrow v = \frac{s/R2}{1/R1 + 1/R2} = \frac{s.R1.R2}{(R1 + R2).R2} = \frac{s.R1}{(R1 + R2)} \quad (2)$$

$$(1) \text{ et } (2) \Rightarrow s/e = \frac{R1 + R2}{R1} = 1 + \frac{R2}{R1}$$

$$ie = 0 \text{ car } Z_e = \infty \Rightarrow Z_e' = e/ie = \infty$$

Montage inverseur (Inverting amplifier)



$$A_o = s/e = -\frac{R2}{R1}$$

$$Z_{e'} = R1$$

Démo:

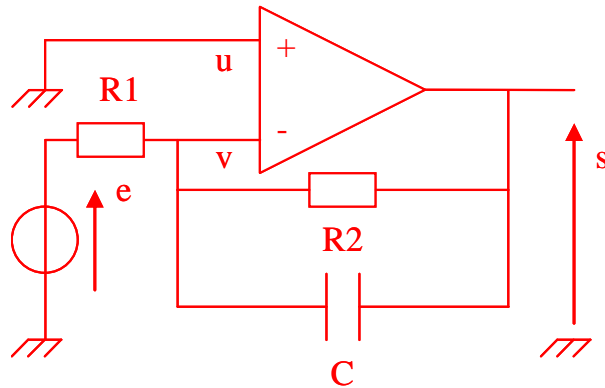
Hypothèse : $|u - v| < V_{sat} / G_0$ (ie. régime linéaire) $\Rightarrow (u - v) = s/G_0 = s/\infty = 0 \Rightarrow u = v = 0$ (1)

$$\text{Millman : } v = \frac{\frac{e}{R1} + \frac{s}{R2}}{1/R1 + 1/R2} \quad (2)$$

$$(1) \text{ et } (2) \Rightarrow 0 = \frac{e}{R1} + \frac{s}{R2} \Rightarrow s/e = -\frac{R2}{R1}$$

$$i_e = e/R1 \Rightarrow Z_{e'} = e/i_e = e.R1/e = R1$$

Filtre passe-bas du 1^{er} ordre (filtre à 20 dB/déc)



$$H(p) = H_0 \frac{1}{1 + \tau \cdot p}$$

avec : $H_0 = -R2 / R1$; $\tau = R2 \cdot C$; $f_c = 1 / 2\pi \tau$

Démo:

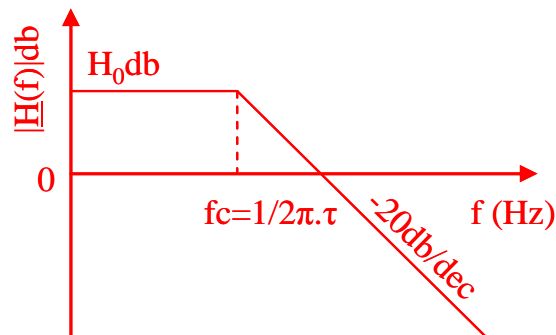
Hypothèse : *ie. régime linéaire* $\Rightarrow u = v = 0$ (1)

$$\text{Millman : } v = \frac{\frac{e}{R1} + \frac{s}{\text{Re } q}}{1/R1 + 1/\text{Re } q} \quad (2)$$

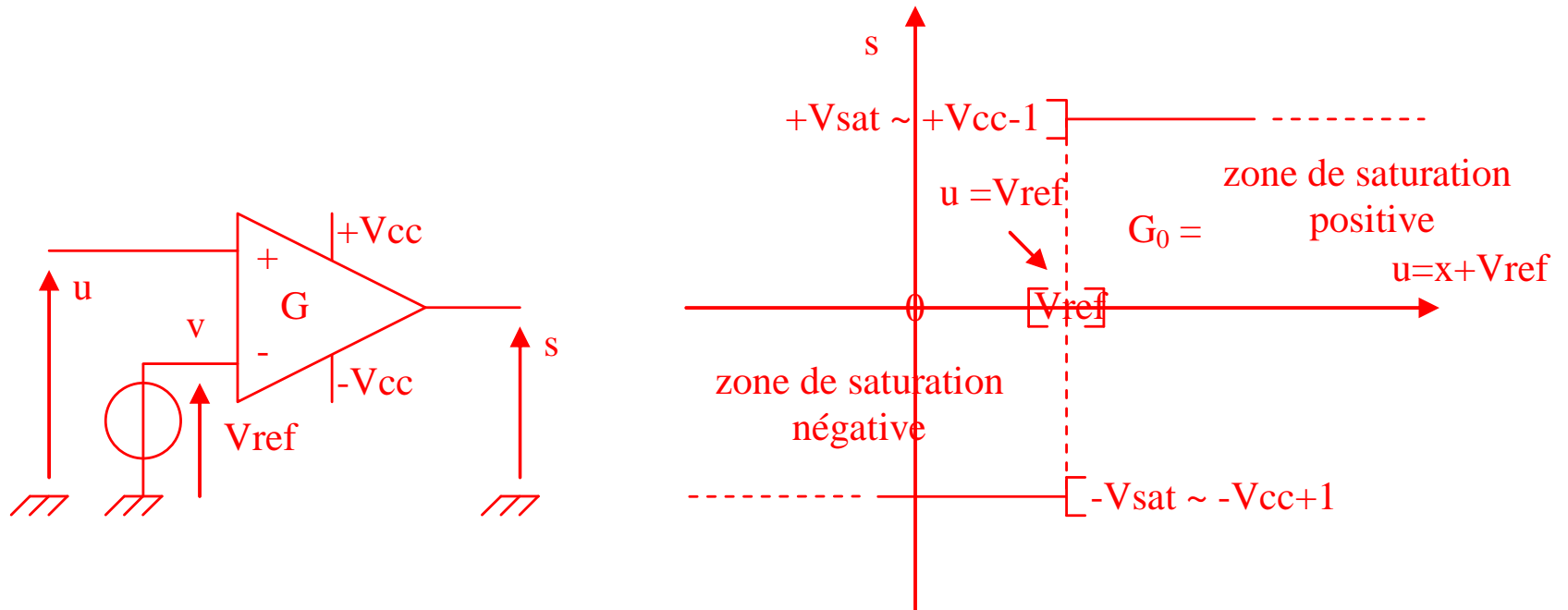
$$(1) \text{ et } (2) \Rightarrow 0 = \frac{e}{R1} + \frac{s}{\text{Re } q} \Rightarrow s/e = -\frac{\text{Re } q}{R1}$$

$$\text{or } \text{Re } q = R2 / (1 + jR2C\omega)$$

$$\Rightarrow s/e = -\frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{1 + jR2C\omega}$$



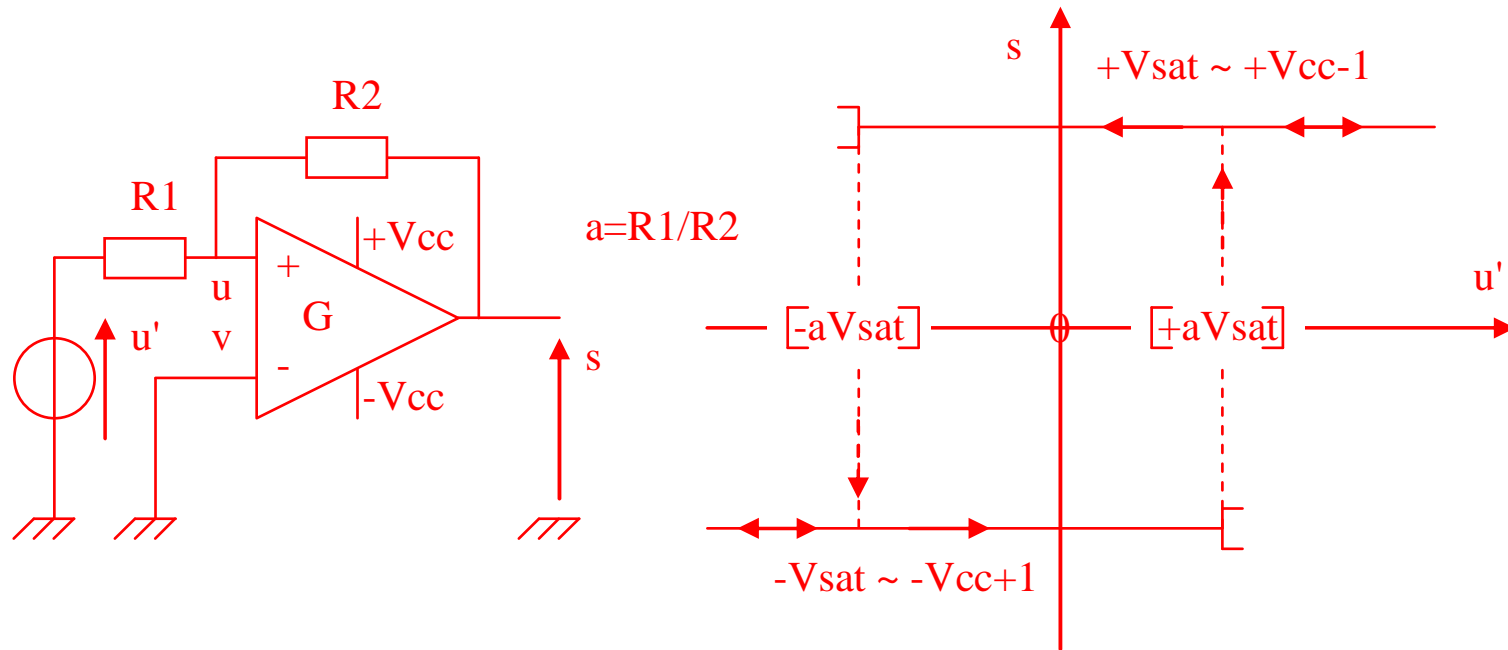
Comparateurs à référence non nulle



si $u - V_{ref} > 0 \Rightarrow u > V_{ref} \Rightarrow s = +V_{sat} \cong +V_{cc} - 1$

si $u - V_{ref} < 0 \Rightarrow u < V_{ref} \Rightarrow s = -V_{sat} \cong -V_{cc} + 1$

Comparateurs à hystérésis (non inverseur)



$$\text{Millman : } u = \frac{\frac{u'}{R1} + \frac{s}{R2}}{1/R1 + 1/R2} = (u'.R2 + s.R1)/(R1 + R2)$$

$$\text{Si } s = +V_{\text{sat}} \cong +V_{\text{cc}} - 1 \Rightarrow u - v > 0 \Rightarrow u > 0 \Rightarrow u' > -a.V_{\text{sat}} \text{ avec } a = \frac{R1}{R2}$$

$$\text{Si } s = -V_{\text{sat}} \cong -V_{\text{cc}} + 1 \Rightarrow u - v < 0 \Rightarrow u < 0 \Rightarrow u' < +a.V_{\text{sat}} \text{ avec } a = \frac{R1}{R2}$$

Quiz sur les AOPs...

- Quels sont les trois principaux étages qui constituent un AOP ?
- Quelles sont les trois principales représentations symbolique d'un AOP ?
- Quels sont les deux régimes de fonctionnement d'un AOP ?
- Quels sont les caractéristiques entré/sortie des AOPs et leur représentation graphique ?
- Quel est le modèle équivalent d'un AOP ?
- Quels sont les caractéristiques entré/sortie des AOPs idéaux et leur représentation graphique ?
- Quel est le modèle équivalent d'un AOP idéal ?
- Quel est le principe et la conséquence d'une contre-réaction ?
- Quel est la théorème de Millman ?
- Quel est le théorème des nœuds ?
- Quel est le schéma et la caractéristique d'un amplificateur non-inverseur ?
- Quel est le schéma et la caractéristique d'un suiveur ?
- Quel est le schéma et la caractéristique d'un amplificateur inverseur ?
- Quel est le schéma et la caractéristique d'un additionneur ?
- Quel est le schéma et la caractéristique d'un passe bas actif du 1er ordre ?
- Quel est le schéma et la caractéristique d'un passe haut actif du 1er ordre ?
- Quel est le schéma et la caractéristique d'un comparateur à zéro ?
- Quel est le schéma et la caractéristique d'un comparateur à référence non nulle ?
- Quel est le schéma et la caractéristique d'un comparateur à hystérésis inverseur ?
- Quel est le schéma et la caractéristique d'un comparateur à hystérésis non-inverseur ?
- Comment distingue-t-on un montage inverseur d'un montage non-inverseur ?
- Comment distingue-t-on un montage disposé à fonctionner en régime linéaire d'un montage disposé à fonctionner en régime saturé ?
- Pourquoi appel t'on ce composant un AOP ?
- Pourquoi ce composant est le compagnon idéal de la mesure physique ?

Théorème de Millman et méthode des nœuds (Annexe)

Théorème de Millman

$$V_m = \frac{\sum_{k=1}^N E_k \cdot Y_k}{\sum_{k=1}^N Y_k} = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{E_k}{Z_k}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{Z_k}}$$

Méthode des noeuds

$$\sum_{k=1}^N Y_k \times (V_m - E_k) = 0$$

