iutenligne
Le catalogue de ressources de l'enseignement technologique universitaire.

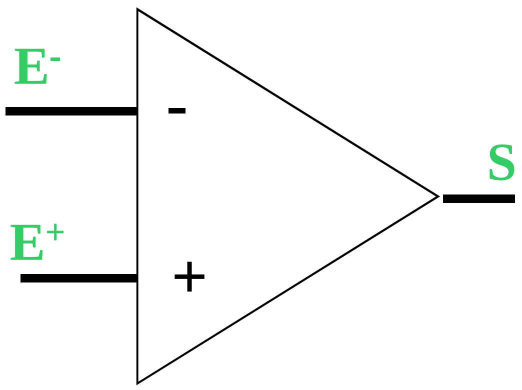
Amplificateur Opérationnel (A.O)

Hugues Ott
Maître de Conférences à l'IUT Robert Schuman
Université de Strasbourg Département Chimie

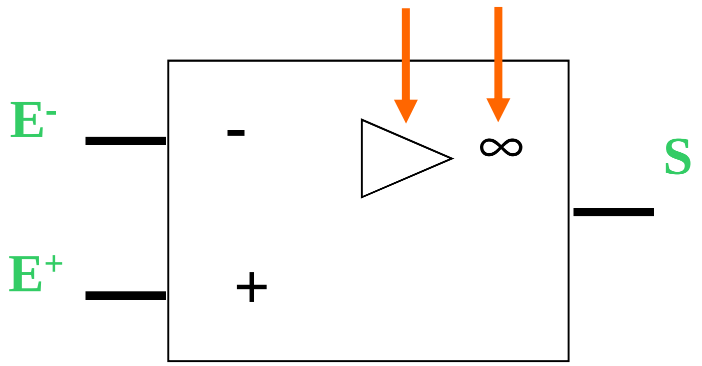
Généralités

- L'amplificateur opérationnel (A.O.) est apparu en 1965.
    - il fut appliqué d'abord à la résolution d'opérations mathématiques
- L'AO est un circuit intégré (C.I.)
    - volume - facilité de montage - faible consommation - performance
    - faible longueur de connexion $\Rightarrow$ accroissement vitesse de réponse
    - Loi de Moore: tous les 18 mois la puissance est multipliée par 2
- Applications
    - Générateurs de signaux
    - Amplification de signaux
    - Instruments de mesures
    - Filtrage

Représentation



Représentation anglo-saxonne
la plus courante

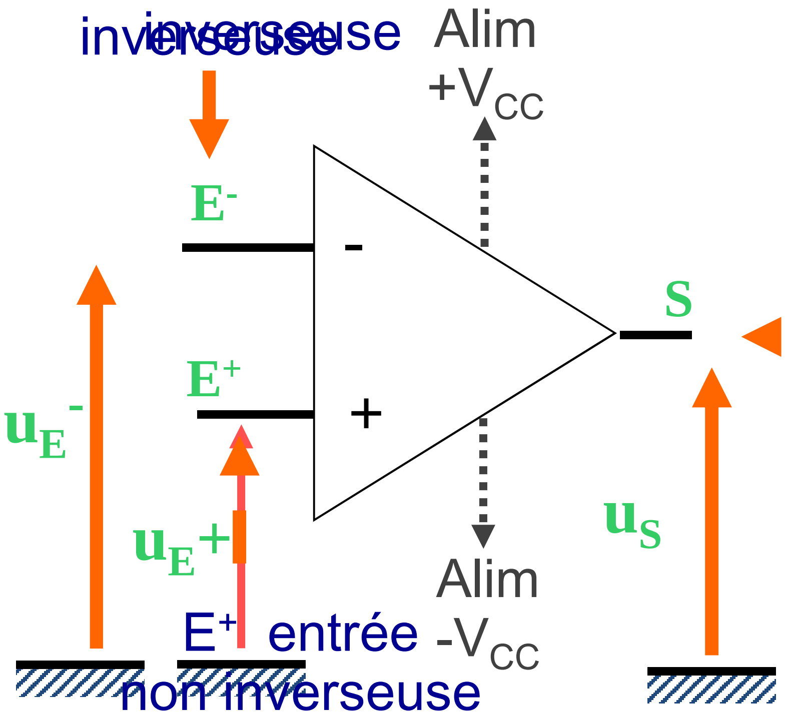


Représentation européenne

Branchement

E- entrée
inverseuse

E- entrée
inverseuse



E+ entrée
non inverseuse

E+ entrée
non inverseuse

S
sortie

S
sortie

5 bornes

2 Entrées
1 Sortie

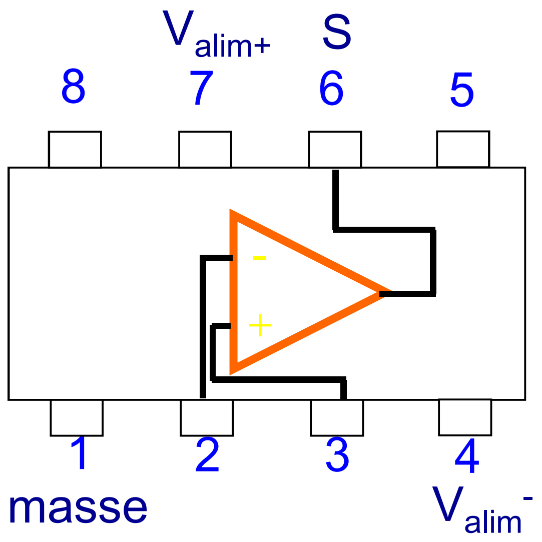
2 bornes
Alimentation

non représentées
sur le schéma

alimentation stabilisée

Généralement
V_{CC} = +15V
$-V_{CC}$=-15V

Brochage AO 741



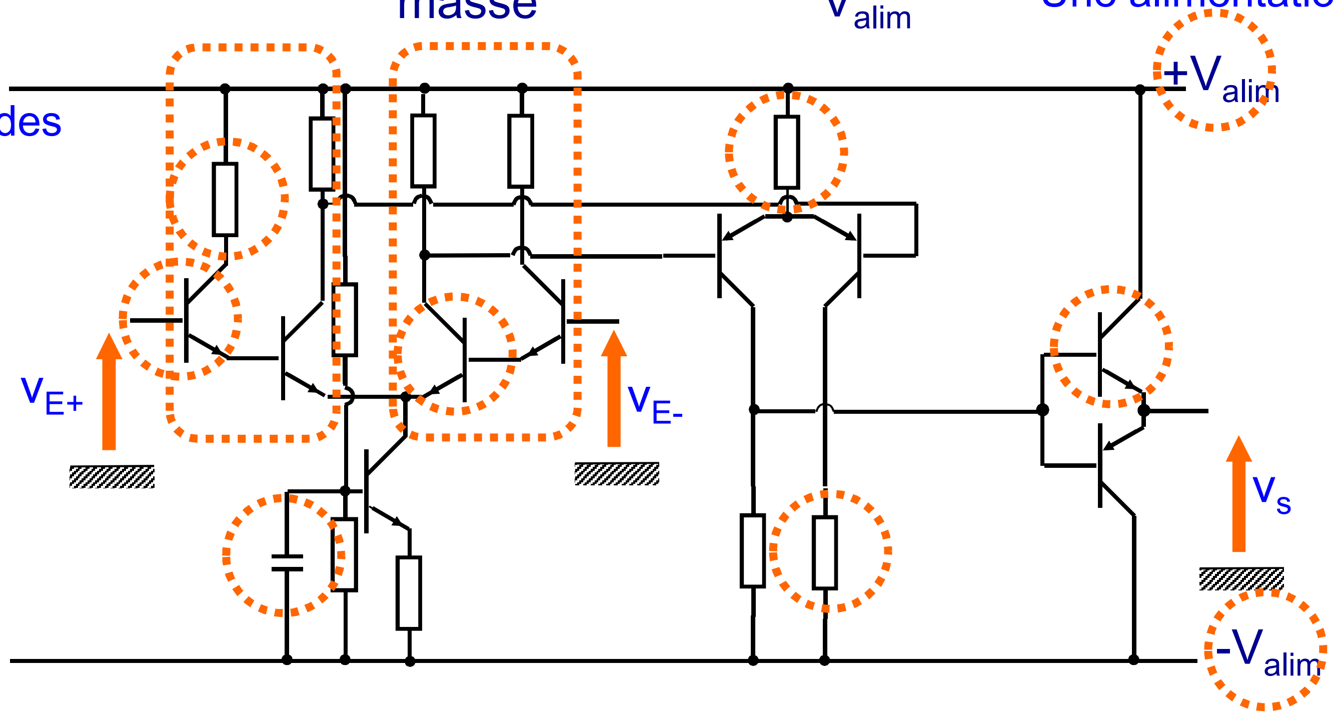
Descriptif

Un AO comprend des transistors,

résistances

condensateurs

Une alimentation



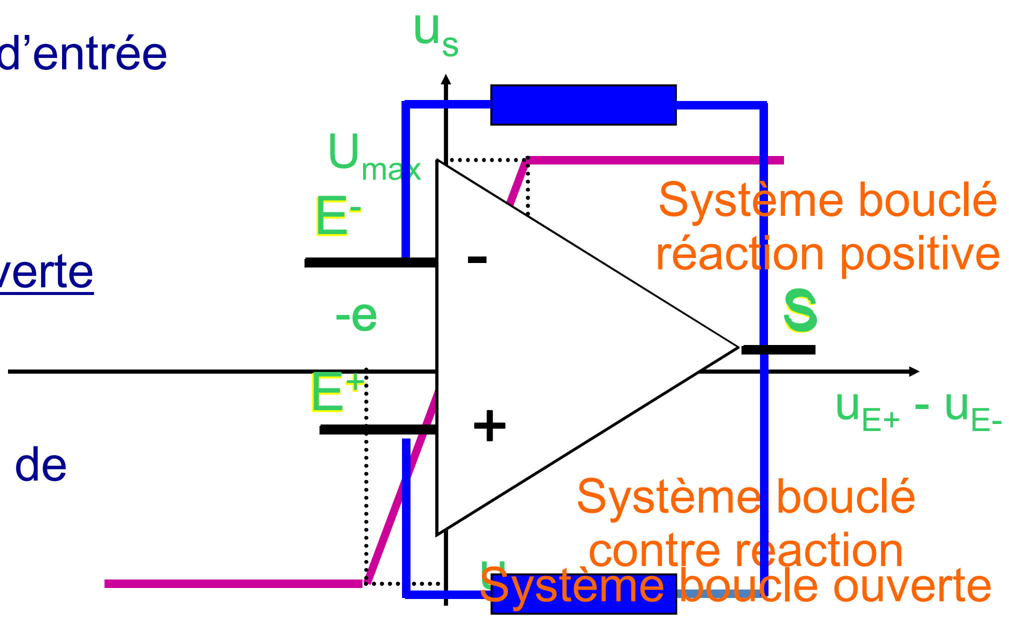
Caractéristiques

C'est un amplificateur différentiel
Il amplifie la différence des signaux d'entrée

$$u_s = A_d\left(u_{E^+} - u_{E^-}\right)$$

A_d gain différentiel en <u>boucle ouverte</u>

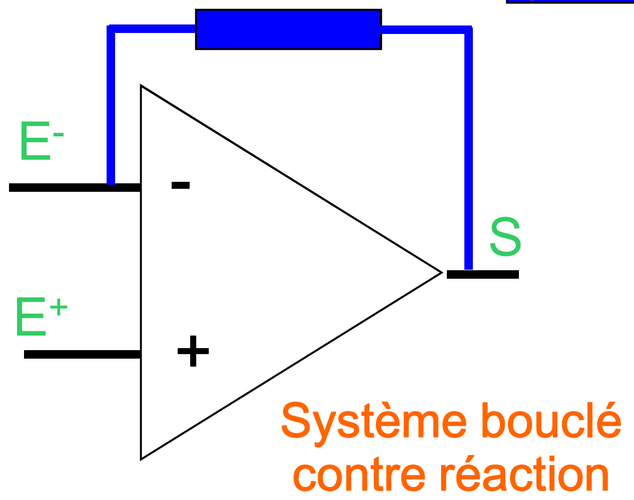
$Ad \cong 10^5$



Il ne peut amplifier que des différences de tensions très faibles en boucle ouverte

Nécessité d'une contre réaction

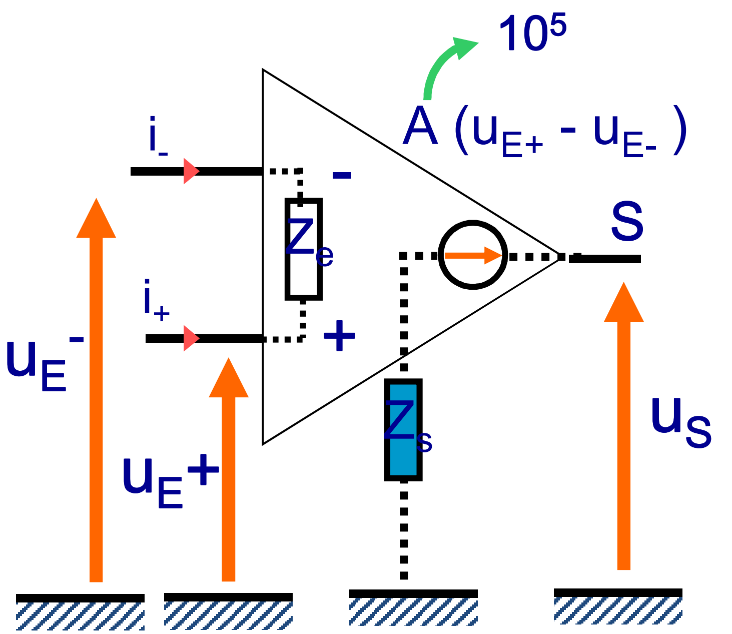
Une boucle de contre réaction assure automatiquement un fonctionnement linéaire de l'A.O



Amplificateur opérationnel réel

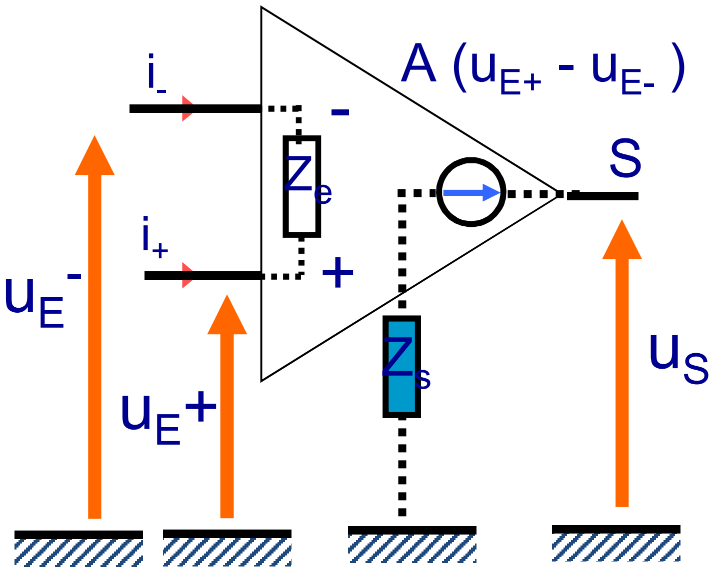
Un Amplificateur Différentiel à :

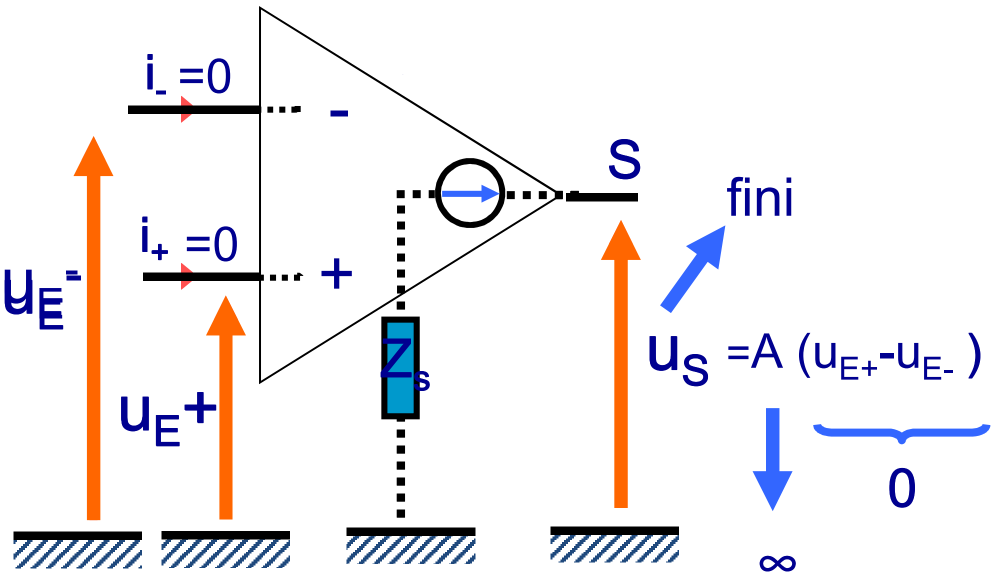
- courant continu
- grand gain en boucle ouverte (10^4 à 10^5) *le gain dépend de la fréquence*
- grande impédance d'entrée (Z_e= 10^8W à 10^{12}W)
  $\Rightarrow$ courant d'entrée très faible (10^{-10}A)
- impédance de sortie faible (Z_s qques dizaines d'Ohms)
- large bande passante débutant aux très basses fréquences
- le bruit de fond et les dérives sont maintenus faibles par contre-réaction



A.O. réel — A.O. idéal

L 'AO idéal est un modèle qui permet d'interpréter les propriétés du montage





Z_s = qques dizaines Ohms → $Z_s = 0$

$A_d = 10^5$ → $A_d = \infty$ → $u_{E+} = u_{E-}$

$Z_e = 10^8$W à 10^{12}W → $Z_e = \infty$ → $i_+ = i_- = 0$

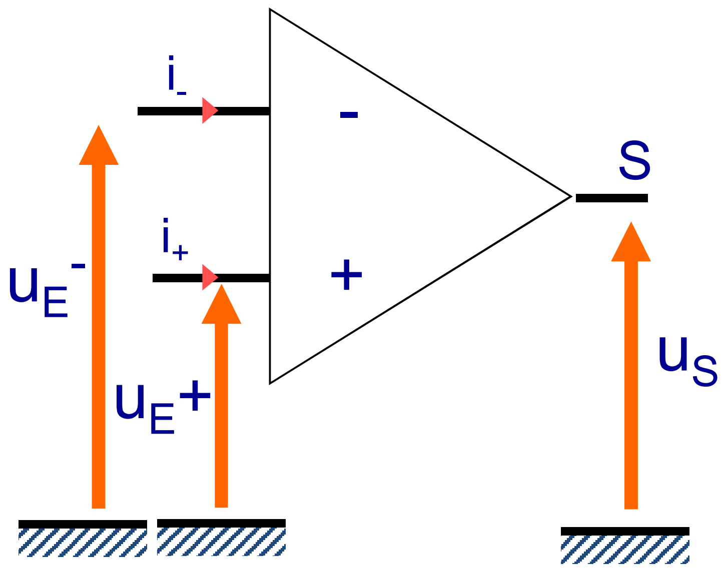
$i_+ = i_- = 10^{-10}$A

Résumé A.O. idéal

1e loi $\boxed{i_+ = i_- = 0}$

2e loi $\boxed{V_{E+} = V_{E-}}$

3e loi $\boxed{U_{sortie} < U_{alim}}$

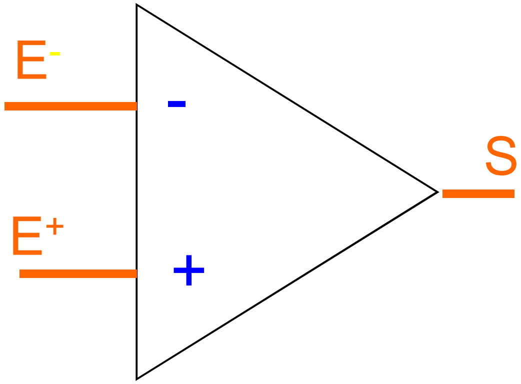


La tension de sortie est proche de la tension d'alimentation

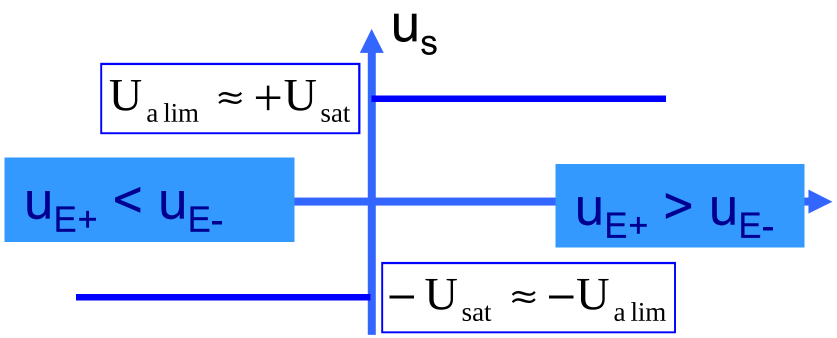
Réaction et contre réaction

Système en boucle ouverte

Absence de branchement entre la sortie et les entrées



Système boucle ouverte

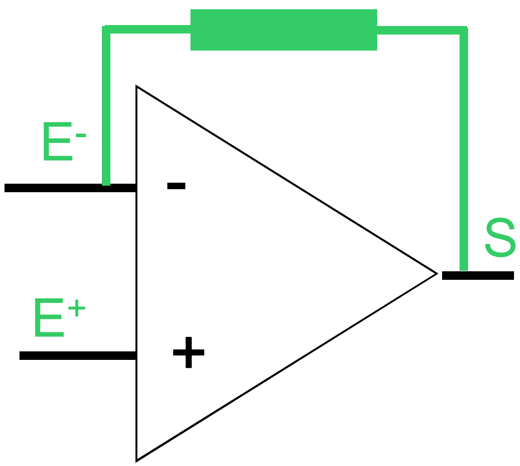


Comparateur de tension

Système bouclé

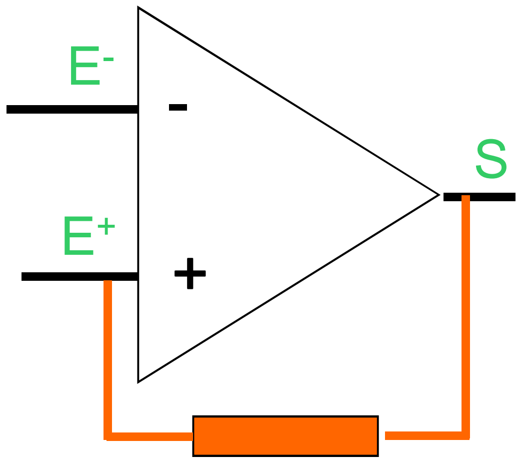
Une partie du signal de sortie est réinjectée sur une entrée.

Contre réaction



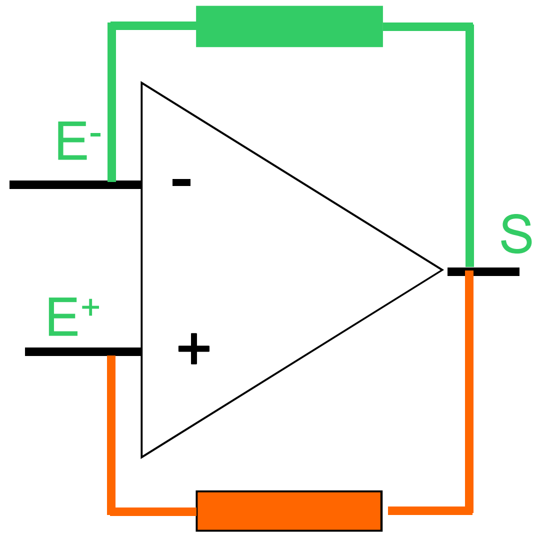
Fonctionnement linéaire

Réaction positive



Fonctionnent saturation

Réaction mixte



Fonctionnement linéaire

Filtrage

Définition :

Gain complexe

$$\underline{G} = \frac{\underline{u_s}}{\underline{u_e}}$$

Gain réel

$$G = |\underline{G}| = \left|\frac{\underline{u_s}}{\underline{u_e}}\right|$$

Gain en décibels

$$G_{dB} = 20\log|\underline{G}| = 20\log\left|\frac{\underline{u_s}}{\underline{u_e}}\right|$$

La phase φ de la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée

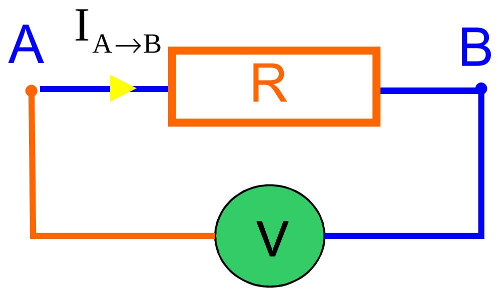
$$\varphi = \varphi(\omega) = \arg[\underline{G}]$$

Diagramme de Bode

$$G_{dB} = 20\log\left|\frac{\underline{u_s}}{\underline{u_e}}\right| = f(\log f)$$

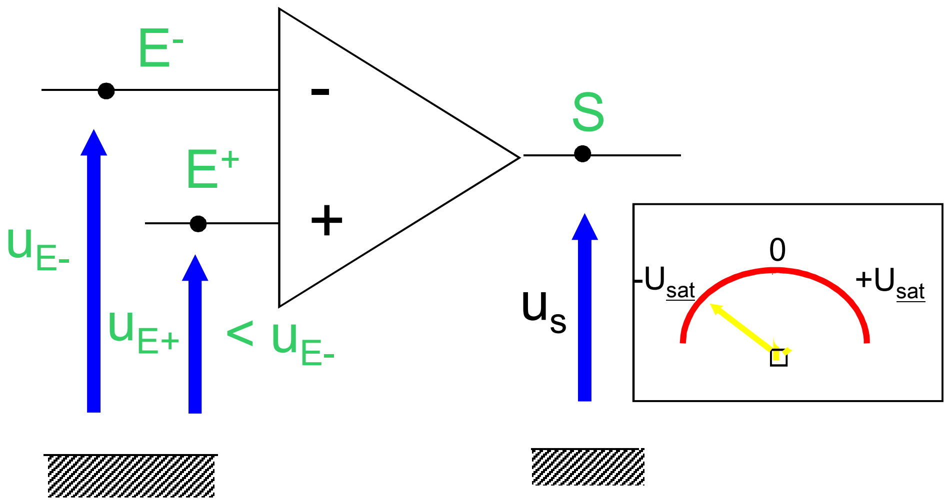
φ en fonction de log (f) : φ = f(f)

Loi d’Ohm



$$U_{AB} = V_A - V_B = R_{AB} . I_{A\to B}$$

Montage comparateur

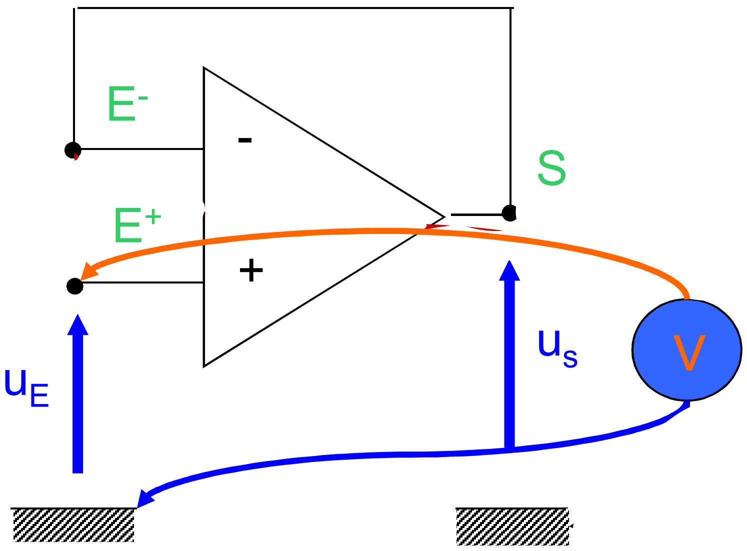


Système

☐ bouclé

■ ouvert

Montage suiveur



$$\boxed{V_{E+} = V_{E-}}$$

$$\boxed{u_s = u_e}$$

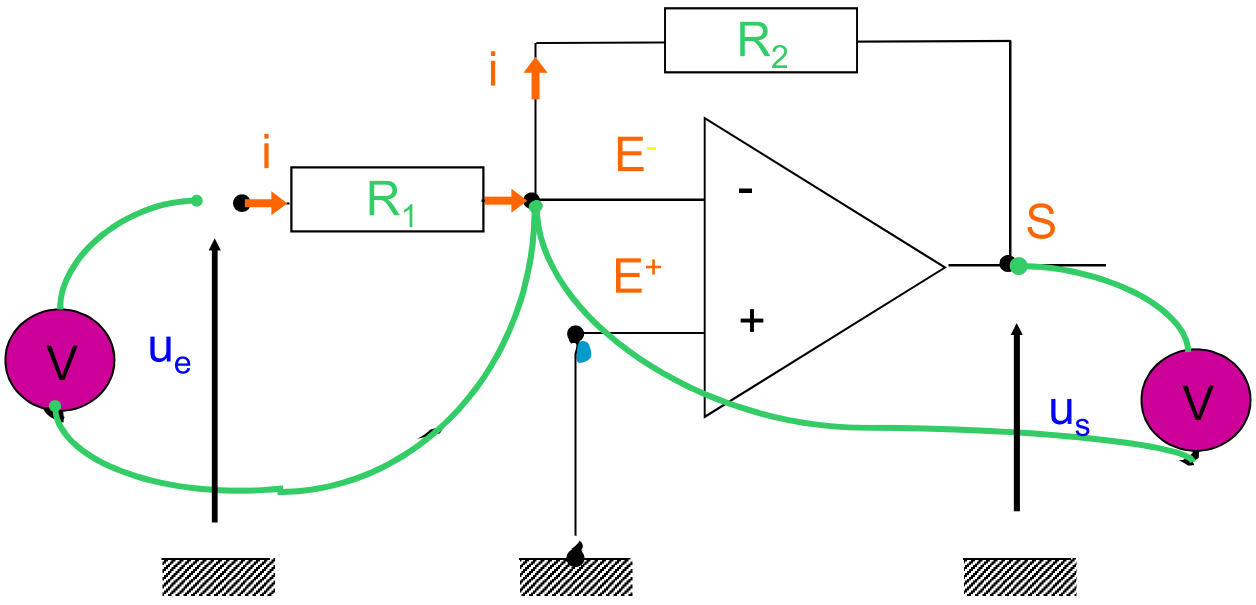
Système
- ■ bouclé
- □ ouvert

Existence d 'une
- □ Réaction positive
- ■ Contre réaction
- □ Réaction mixte

Fonctionnement
- ■ linéaire
- □ saturation

iutenligne

Montage amplificateur inverseur



$$i_+ = i_- = 0$$

$$V_{E+} = V_{E-}$$

$$u_e = +R_1.i \qquad u_S = R_2.I_{S\to E-} = -R_2.i$$

$$\frac{u_S}{u_e} = \frac{-R_2 i}{R_1 i}$$

R_2= 10kW
R_1=1kW
u_e=0,3V

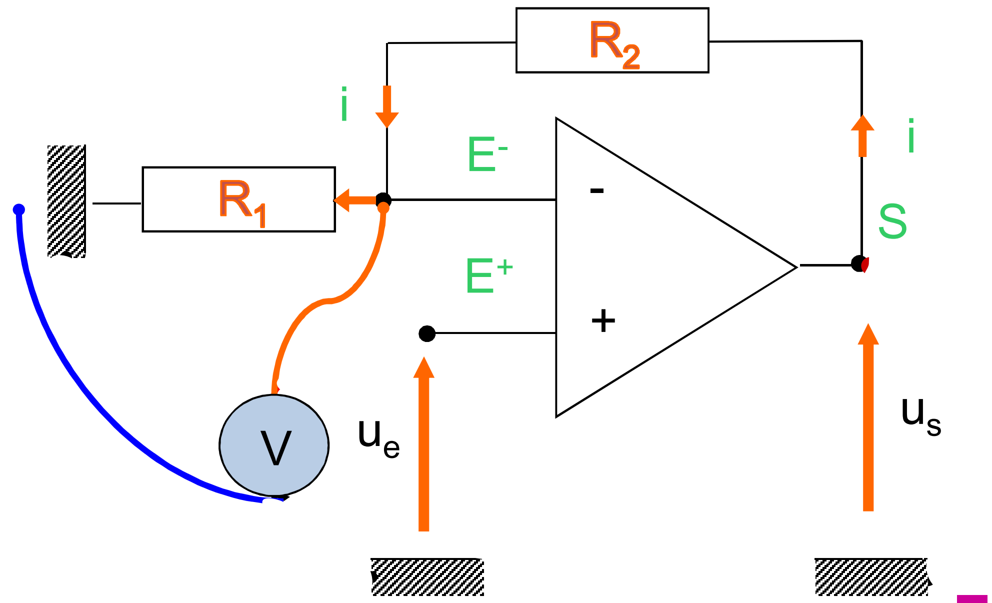
$$u_S = -3V$$

Montage : amplificateur inverseur

R_2= 10kW
R_1=1kW
u_e=3V

$$u_S \approx -15V$$

Montage amplificateur non inverseur



$$\boxed{i_+ = i_- = 0}$$

$$\boxed{V_{E+} = V_{E-}}$$

$$u_e = +R_1.i$$

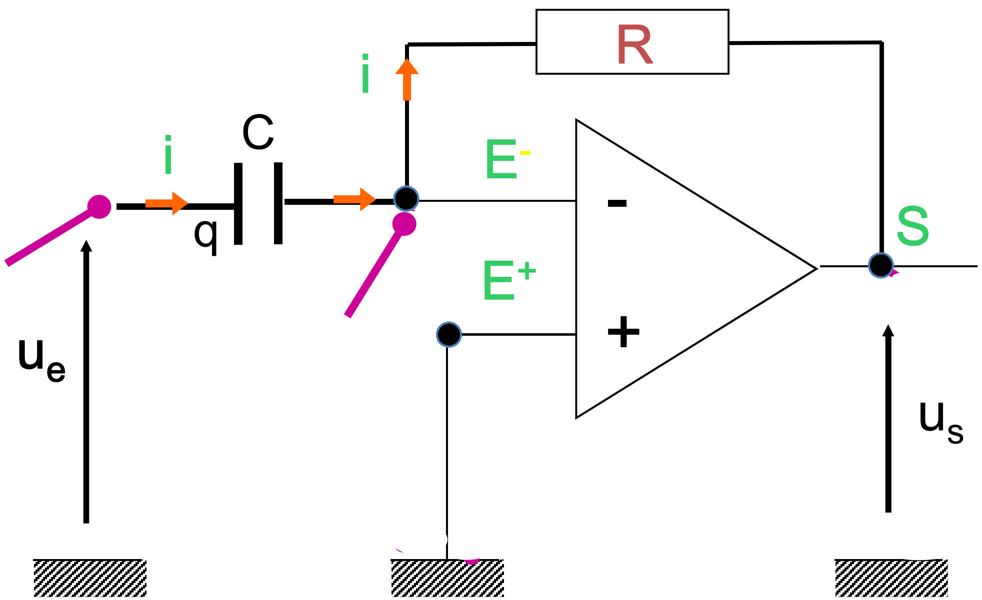
$$u_S = R_{S\to M}.I_{S\to M} = (R_2 + R_1).i$$

$$\boxed{(R_2 + R_1)} \qquad \boxed{i}$$

$$\frac{u_S}{u_e} = \frac{(R_1 + R_2)\cancel{i}}{R_1\cancel{i}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Montage : amplificateur non inverseur

Montage dérivateur



$$i_+ = i_- = 0$$

$$V_{E+} = V_{E-}$$

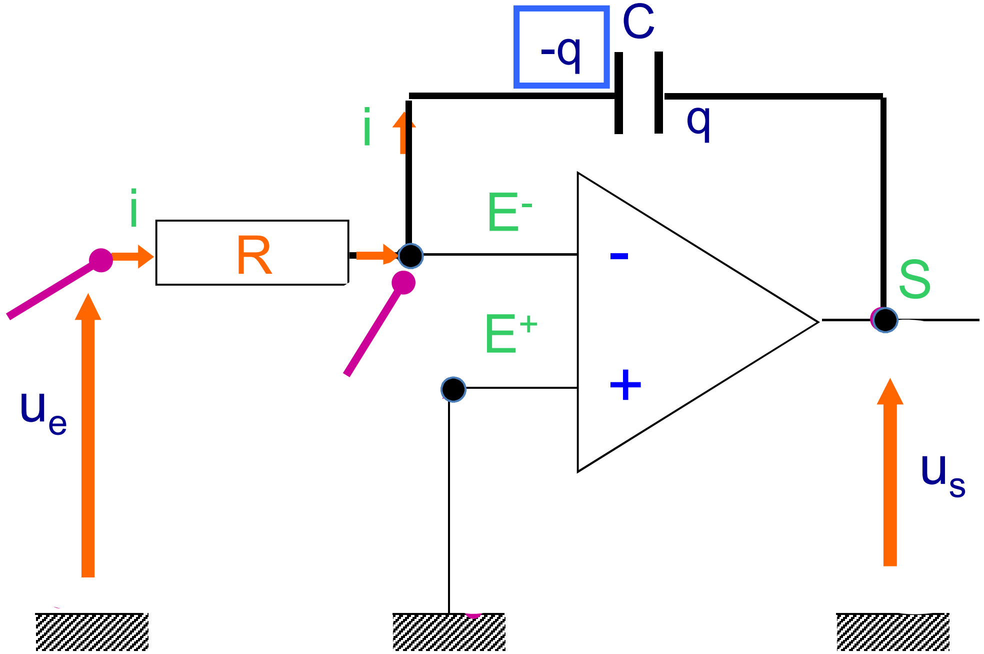
$$u_e = \frac{q}{C} \Rightarrow q = C.u_e$$

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(C.u_e)}{dt} = C\frac{du_e}{dt}$$

$$u_S = R.I_{S\rightarrow E-} = -R.i$$

$$\boxed{u_S = -R.C.\frac{du_e}{dt}}$$

Montage intégrateur



$$i_+ = i_- = 0$$

$$V_{E+} = V_{E-}$$

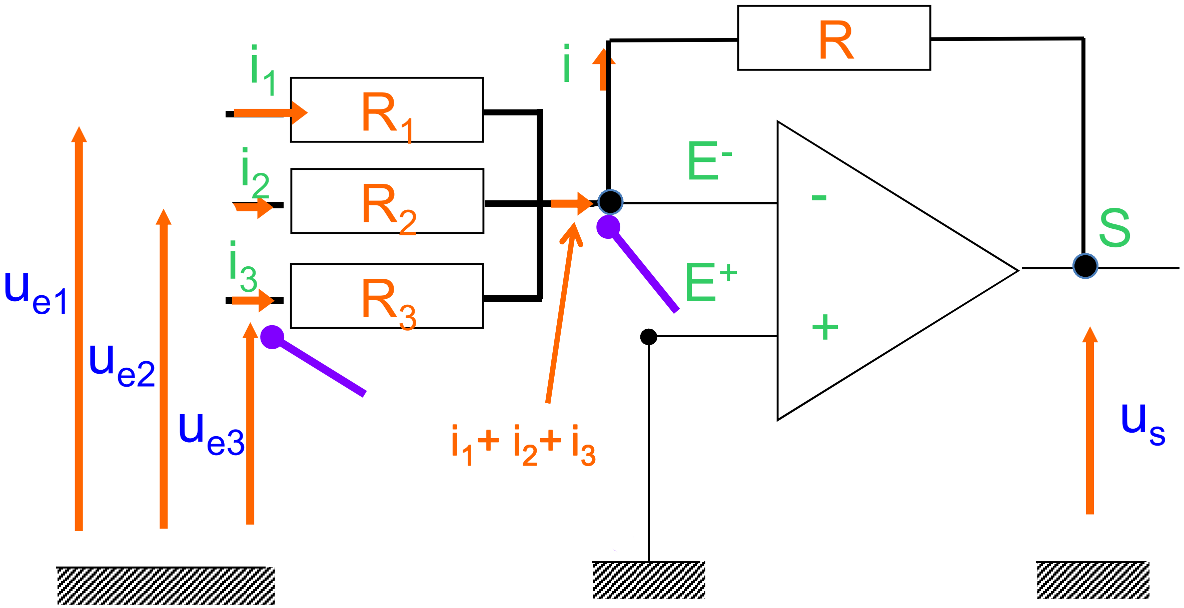
$$u_e = R.i \Rightarrow \boxed{i = \frac{u_e}{R}}$$

$$u_S = \frac{q}{C} = \frac{1}{C}\left[-\frac{1}{R}\int u_e.dt\right]$$

$$i = -\frac{dq}{dt} \Rightarrow q = -\int i.dt \Rightarrow q = -\int \frac{u_e}{R}.dt \Rightarrow q = \boxed{-\frac{1}{R}\int u_e.dt}$$

$$\boxed{u_S = -\frac{1}{R.C}.\int u_e\,dt}$$

Montage sommateur inverseur



$$\boxed{i_+ = i_- = 0}$$

$$\boxed{V_{E+} = V_{E-}}$$

$$u_{e1} = R_1.i_1 \quad \Rightarrow \boxed{i_1 = \frac{u_{e1}}{R_1}}$$

$$u_{e2} = R_2.i_2 \quad \Rightarrow \boxed{i_2 = \frac{u_{e2}}{R_2}}$$

$$u_{e3} = R_3.i_3 \quad \Rightarrow \boxed{i_3 = \frac{u_{e3}}{R_3}}$$

$$i = \boxed{i_1} + \boxed{i_2} + \boxed{i_3}$$

$$\boxed{i = \frac{u_{e1}}{R_1} + \frac{u_{e2}}{R_2} + \frac{u_{e3}}{R_3}}$$

$$\boxed{R_1 = R_2 = R_3 = R}$$

$$\boxed{i = \frac{1}{R}(u_{e1} + u_{e2} + u_{e3})}$$

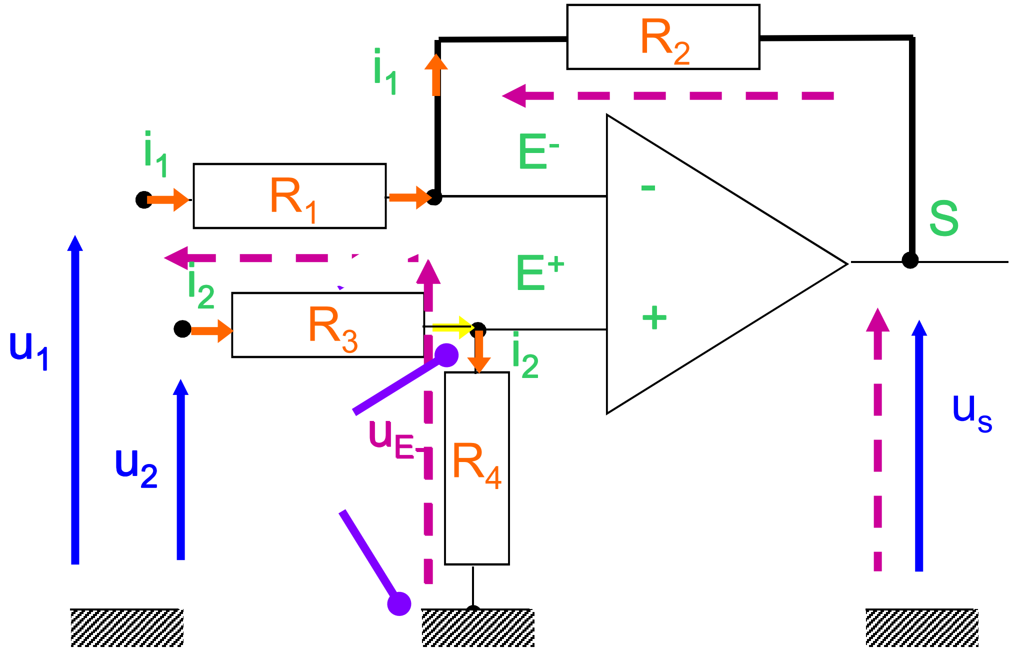
$$u_S = R.I_{S \to E-} = -R.i$$

$$\boxed{u_S = \boxed{-}\boxed{(u_{e1} + u_{e2} + u_{e3})}}$$

Montage : sommateur inverseur

Montage soustracteur

$$\boxed{i_+ = i_- = 0}$$

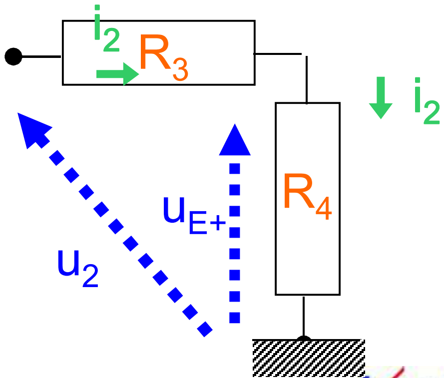


$$\boxed{R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R}$$

$$u_1 = +R_1.i_1 + u_{E-} \Rightarrow R_1.i_1 = u_1 - u_{E-} \Rightarrow i_1 = \frac{u_1 - u_{E-}}{R_1} \Rightarrow i_1 = \boxed{\frac{u_1 - u_{E-}}{R}}$$

$$u_{E-} = +R_2.i_1 + u_S \Rightarrow R_2.i_1 = u_{E-} - u_S \Rightarrow i_1 = \frac{u_{E-} - u_S}{R_2} \Rightarrow i_1 = \boxed{\frac{u_{E-} - u_S}{R}}$$

$$u_1 - u_{E-} = u_{E-} - u_S \Rightarrow 2u_{E-} = u_1 + u_S \Rightarrow u_{E-} = \boxed{\frac{u_1 + u_S}{2}}$$

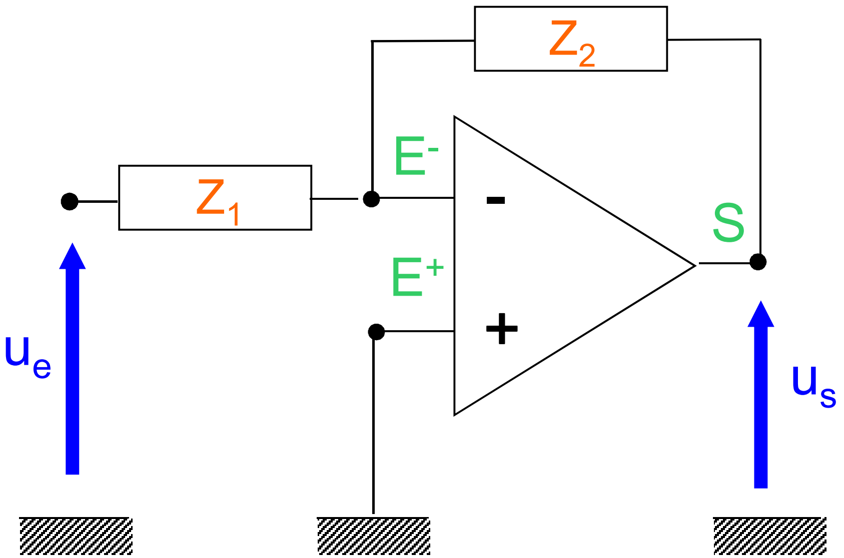


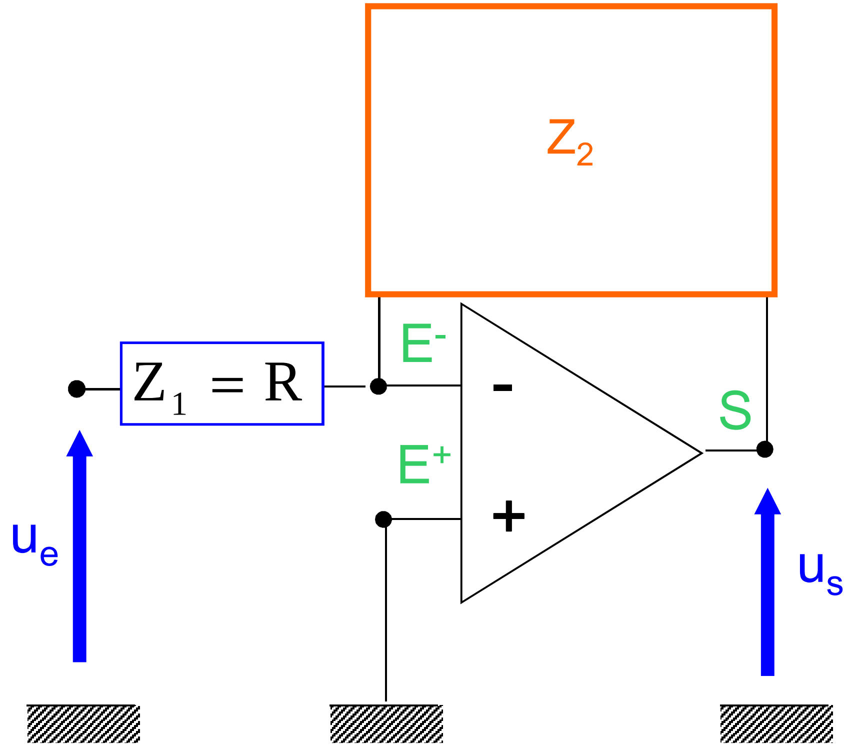
Pont diviseur

$$u_{E+} = +R_4.i_2 = R_4.\frac{u_2}{R_3 + R_4} = \cancel{R}.\frac{u_2}{2\cancel{R}} = \boxed{\frac{u_2}{2}}$$

$$\boxed{u_{E+} = u_{E-}} \qquad \frac{u_1 + u_S}{\cancel{2}} = \frac{u_2}{\cancel{2}} \qquad \boxed{u_S = u_2 - u_1}$$

Filtre…





$$\frac{u_S}{u_e} = -\frac{Z_2}{Z_1}$$

$$Z_2 = \frac{Z_R \,.\, Z_C}{Z_R + Z_C}$$

$$Z_2 = \frac{R \,.\, \frac{1}{jC\omega}}{R + \frac{1}{jC\omega}}$$

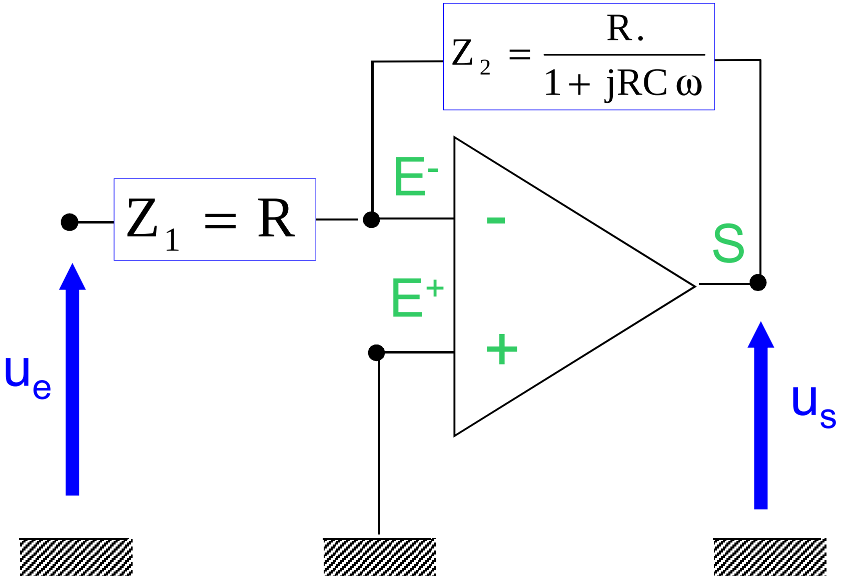
← jCw

← jCw

$$\frac{u_S}{u_e} = -\frac{\frac{\cancel{R}}{1 + jRC\omega}}{\cancel{R}}$$

$$\boxed{\frac{u_S}{u_e} = -\frac{1}{1 + jRC\omega}}$$

Filtre : suite...



$$\frac{u_S}{u_e} = -\frac{1}{1+jRC\omega}$$

$$\boxed{\underline{G} = \frac{\underline{u}_s}{\underline{u}_e}} \quad \boxed{= -\frac{\boxed{1}}{\boxed{1+jRC\omega}}} \qquad \underline{z} = \frac{\underline{z}_1}{\underline{z}_2} \Rightarrow |\underline{z}| = \frac{|\underline{z}_1|}{|\underline{z}_2|}$$

$$\Rightarrow \quad |\underline{G}| = \left|\frac{\underline{u}_s}{\underline{u}_e}\right| = \frac{1}{\sqrt{1+(RC\omega)^2}} \qquad \underline{z} = a + jb \qquad |\underline{z}| = \sqrt{a^2+b^2}$$

$$|G_{dB}| = 20\log|\underline{G}| = 20\log\frac{1}{\sqrt{1+(RC\omega)^2}}$$

$$|G_{dB}| = -20\log\sqrt{1+(RC\omega)^2}$$

$$|G_{dB}| = -20\log\left[1+(RC\omega)^2\right]^{1/2}$$

$$\boxed{|G_{dB}| = -10\log\left[\cancel{1}+(\boxed{\cancel{RC}\omega})^2\right]} \rightarrow 1$$

quand $\omega \to 0$

$$\Rightarrow G_{dB} \approx -10\log[1] \Rightarrow G_{dB} \approx 0$$

quand $\omega = \dfrac{1}{RC}$

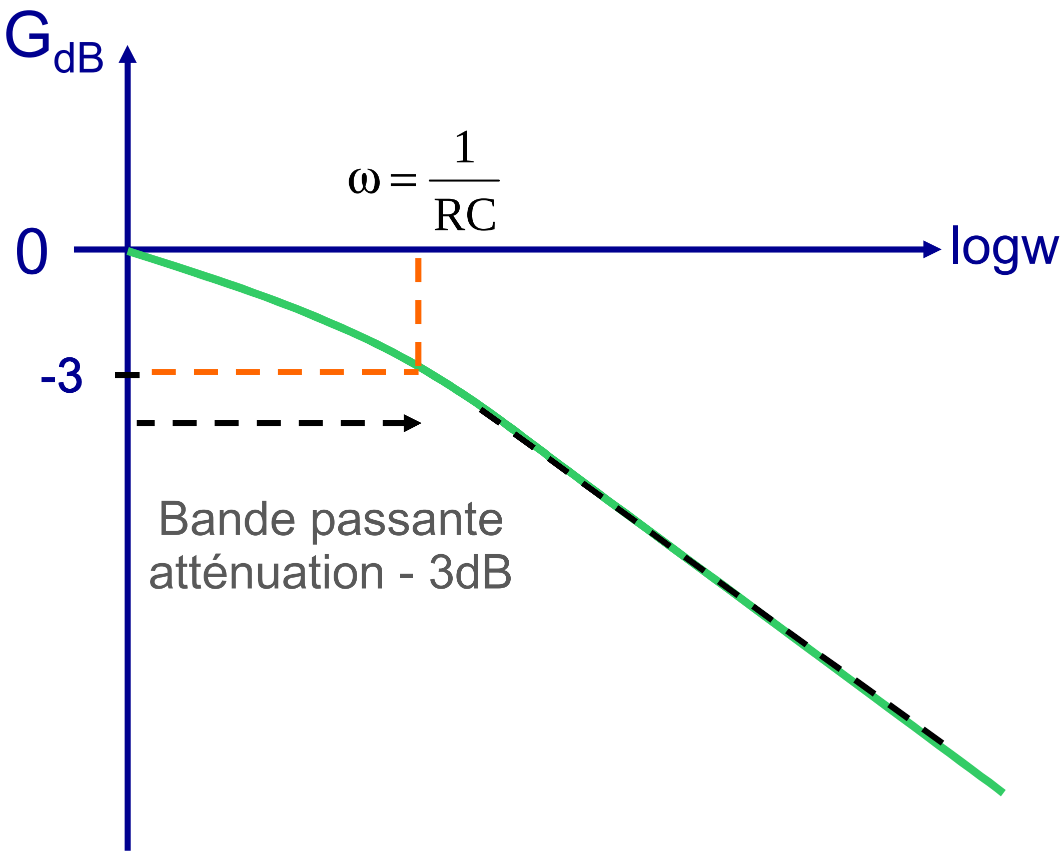
$$\Rightarrow G_{dB} = -10\log[2] \Rightarrow G_{dB} = -3$$

quand $\omega >> \dfrac{1}{RC}$

G_{dB} =f(logw) : droite de pente -20

$$\Rightarrow G_{dB} \approx -10\log(RC\omega)^2 \Rightarrow G_{dB} \approx -20\log RC\omega \Rightarrow G_{dB} \approx -20\log\omega - 20\log RC$$

Filtre passe bas

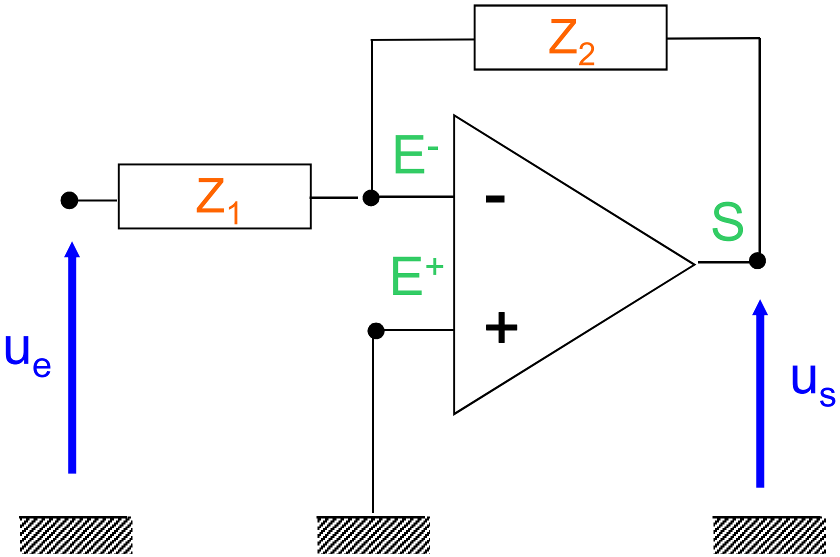


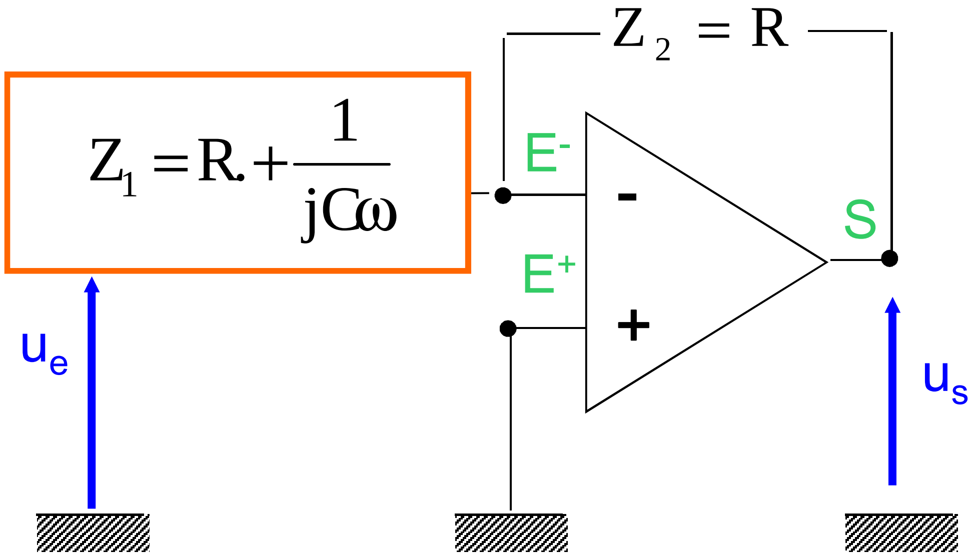
$$\omega = 0 \qquad G_{dB} = 0$$

$$\omega = \frac{1}{RC} \qquad G_{dB} = -3$$

$$\omega >> \frac{1}{RC} \qquad \text{dte pente} - 20$$

Filtre : suite…





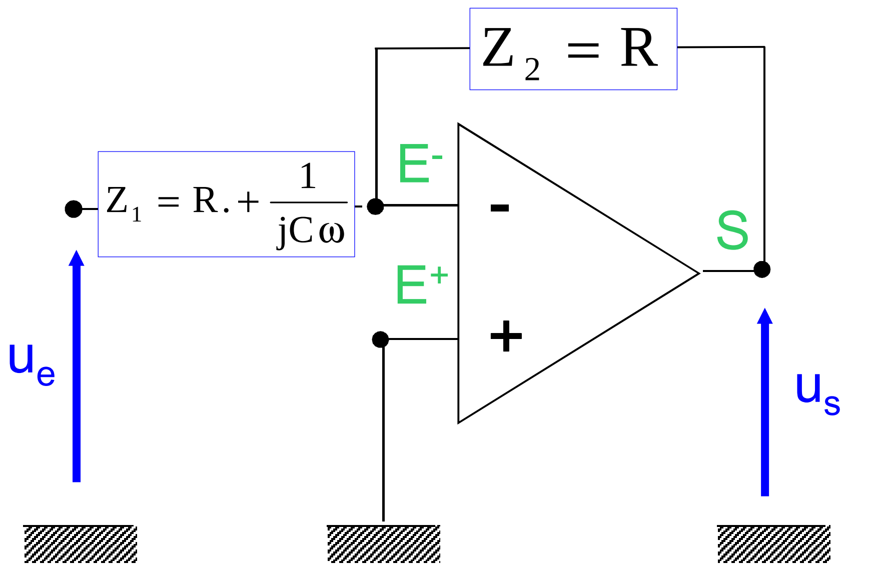
$$\boxed{Z_1 = R. + \frac{1}{jC\omega}}$$

$$\frac{u_S}{u_e} = -\frac{Z_2}{Z_1} \qquad Z_1 = Z_R + .Z_C$$

$$\frac{u_S}{u_e} = -\frac{R}{R + \dfrac{1}{jC\omega}} \quad \begin{array}{l} \boxed{\leftarrow jCw} \\ \boxed{\leftarrow jCw} \end{array}$$

$$\boxed{\frac{u_S}{u_e} = -\frac{jRC\,\omega}{jRC\,\omega + 1}}$$

Filtre : suite…



$$\frac{u_S}{u_e} = -\frac{jRC\omega}{1+jRC\omega}$$

$$\boxed{\underline{G} = \frac{\underline{u}_s}{\underline{u}_e}}\ \boxed{= -\frac{\boxed{jRC\omega}}{\boxed{1+jRC\omega}}}$$

$$\underline{z} = \frac{\underline{z}_1}{\underline{z}_2} \Rightarrow \left|\underline{z}\right| = \frac{\left|\underline{z}_1\right|}{\left|\underline{z}_2\right|}$$

$$\Rightarrow \quad \left|\underline{G}\right| = \left|\frac{\underline{u}_s}{\underline{u}_e}\right| = \frac{RC\omega}{\sqrt{1+(RC\omega)^2}}$$

$$\underline{z} = a + jb$$

$$\left|\underline{z}\right| = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\left|G_{dB}\right| = 20\log\left|\underline{G}\right| = 20\log\frac{RC\omega}{\sqrt{\cancel{1+(RC\omega)^2}}}$$

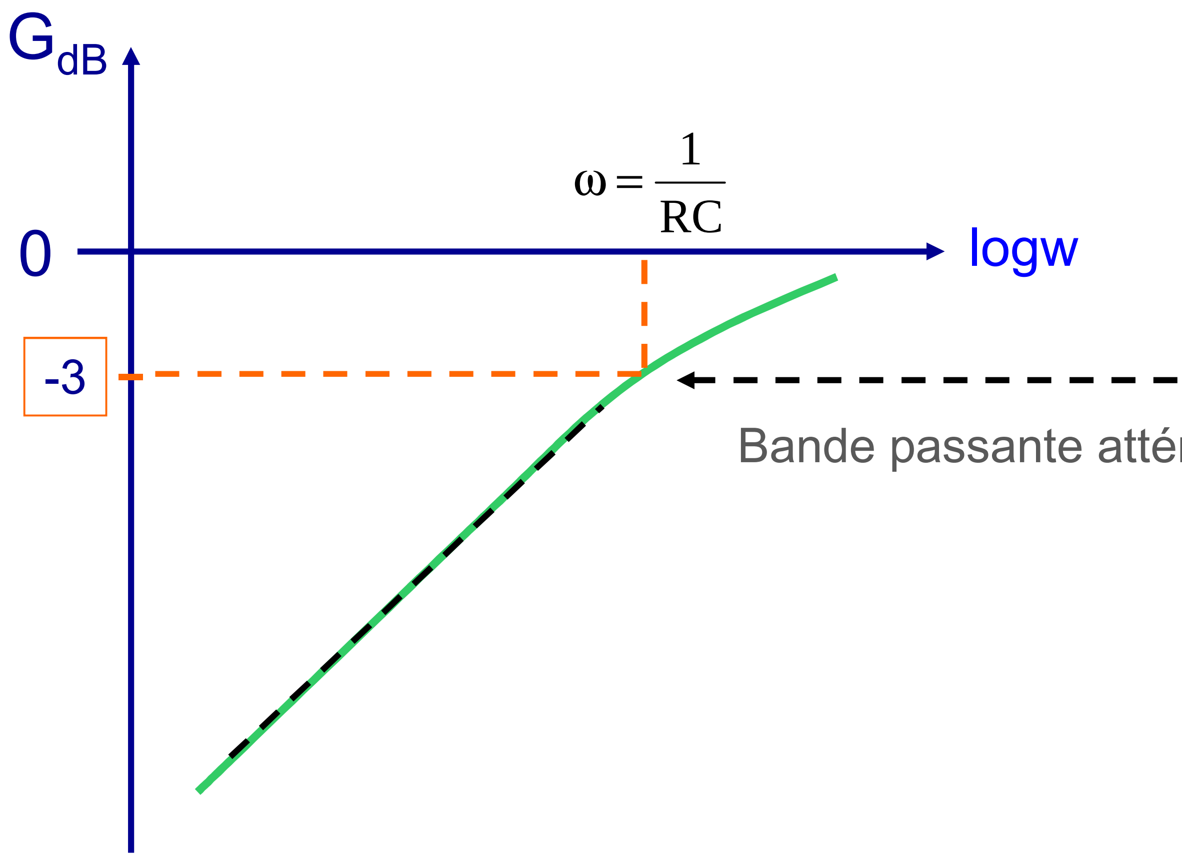
G_{dB} =f(logw) : droite de pente +20

$$\boxed{\text{quand} \quad \omega \to 0} \quad \Rightarrow G_{dB} \approx 20\log[RC\omega] \approx 20\log\omega + 20\log RC$$

$$\boxed{\text{quand} \quad \omega = \frac{1}{RC}} \quad \Rightarrow G_{dB} = +20\log\left[\frac{1}{\sqrt{2}}\right] = +20\log\left[\frac{1}{2^{1/2}}\right] = -20\log 2^{1/2} = -10\log 2 = -3$$

$$\boxed{\text{quand} \quad \omega >> \frac{1}{RC}} \quad \Rightarrow G_{dB} \approx -10\log\frac{RC\omega}{\sqrt{(RC\omega)^2}} = -10\log 1 = 0$$

Filtre passe haut



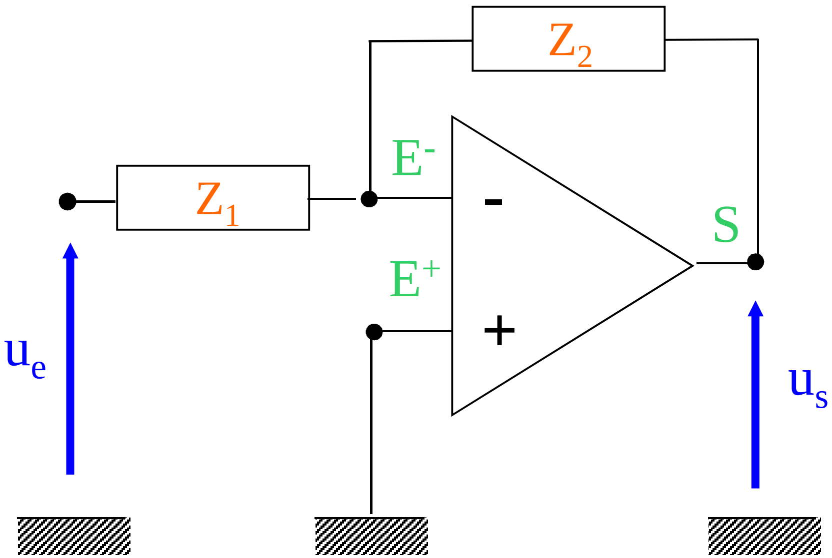
Bande passante atténuation - 3dB

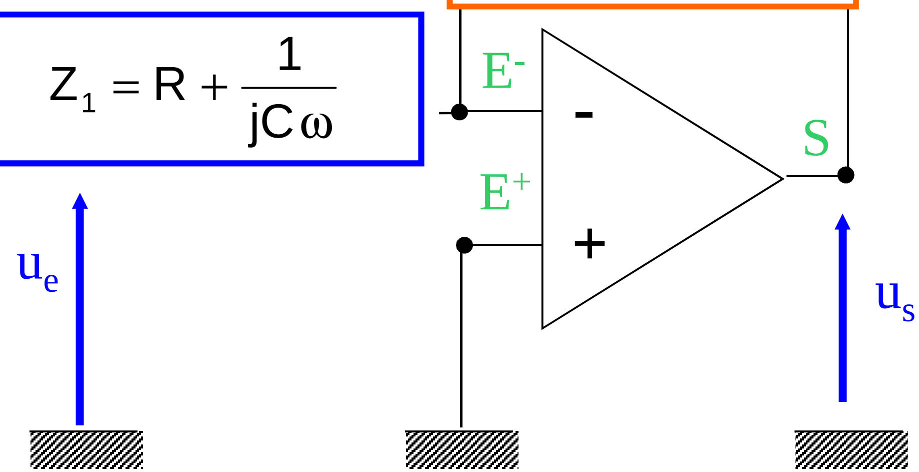
$$\omega = 0 \qquad \text{dte pente} + 20$$

$$\omega = \frac{1}{RC} \qquad G_{dB} = -3$$

$$\omega >> \frac{1}{RC} \qquad G_{dB} = 0$$

Filtre : suite…





$$Z_1 = R + \frac{1}{jC\omega}$$

$$Z_2 = \frac{R}{1 + jRC\omega}$$

$$\boxed{\frac{u_S}{u_e} = -\frac{Z_2}{Z_1}}$$

$$\frac{u_S}{u_e} = -\frac{\dfrac{R}{1 + jRC\omega}}{R + \dfrac{1}{jC\omega}}$$

$$Z_2 = \frac{Z_R . Z_C}{Z_R + Z_C}$$

$$Z_1 = Z_R + Z_C$$

$$Z_2 = \frac{R.\dfrac{1}{jC\omega}}{R + \dfrac{1}{jC\omega}} \quad \begin{matrix} \boxed{\leftarrow \mathbf{jC\omega}} \\ \boxed{\leftarrow \mathbf{jC\omega}} \end{matrix}$$

Filtre : suite…

$$\frac{u_S}{u_e} = -\frac{\dfrac{R}{1+jRC\omega}}{\boxed{R+\dfrac{1}{jC\omega}}} = \frac{\boxed{\dfrac{R}{1+jRC\omega}}}{\boxed{\dfrac{1+jRC\omega}{jC\omega}}} = \frac{R}{1+jRC\omega}\cdot\frac{jC\omega}{1+jRC\omega} = -\frac{\boxed{jRC\omega}}{1\boxed{[1+jRC\omega}]^2}$$

$$\left[\sqrt{1+(RC\omega)^2}\right]^2$$

$$\Rightarrow \quad |\underline{G}| = \left|\frac{\underline{u_s}}{\underline{u_e}}\right| = \frac{RC\omega}{\cancel{1+}(\cancel{RC\omega})^2} \quad \begin{matrix} \longrightarrow \mathbf{1} \\ \longrightarrow \mathbf{1+1} \end{matrix} \Bigg\} \ \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}$$

$$\boxed{\textbf{quand } \mathbf{RC\omega << 1}} \Rightarrow \boldsymbol{\omega << \frac{1}{RC}} \quad \Rightarrow |\underline{\mathbf{G}}| = \mathbf{RC\omega} \Rightarrow |\underline{\mathbf{G}}|_{\mathbf{dB}} = \mathbf{20\log(RC\omega) = 20\log\omega + 20\log RC}$$

G_{dB} =f(logw) : droite de pente +20

$$\boxed{\textbf{quand } \mathbf{RC\omega >> 1}} \Rightarrow \boldsymbol{\omega >> \frac{1}{RC}} \quad \Rightarrow |\underline{\mathbf{G}}| = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{RC\omega}} \quad \Rightarrow |\underline{\mathbf{G}}|_{\mathbf{dB}} = \mathbf{20\log\frac{1}{RC\omega} = -20\log\omega - 20\log RC}$$

G_{dB} =f(logw) : droite de pente -20

$$\boxed{\textbf{quand } \mathbf{RC\omega = 1}} \Rightarrow \boldsymbol{\omega = \frac{1}{RC}} \quad \Rightarrow |\underline{\mathbf{G}}| = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}} \quad \Rightarrow |\underline{\mathbf{G}}|_{\mathbf{dB}} = \mathbf{20\log\frac{1}{2} = -20\log 2 = -6dB}$$

Filtre passe bande

$$\omega << \frac{1}{RC} \quad \text{dte pente} + 20 \qquad \omega = \frac{1}{RC} \quad G = -6\text{dB} \qquad \omega >> \frac{1}{RC} \quad \text{dte pente} - 20$$