Cours électronique

Chapitre 5:

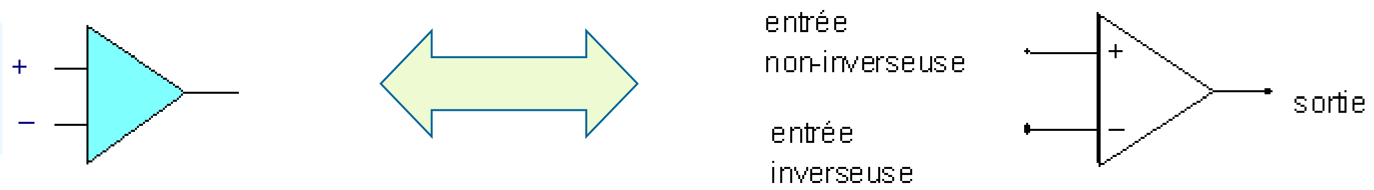
Les amplificateurs opérationels

Abdenour Lounis

I-Introduction :

La fonction d’amplificateur opérationnel est d’amplifier le signal
Il est opérationnel car ses caractéristiques nous donnent la possibilité de créer des fonctions mathématiques telles que dérivées, intégrales, sommations etc…,

Symbôle de l’amplificateur opérationnel:

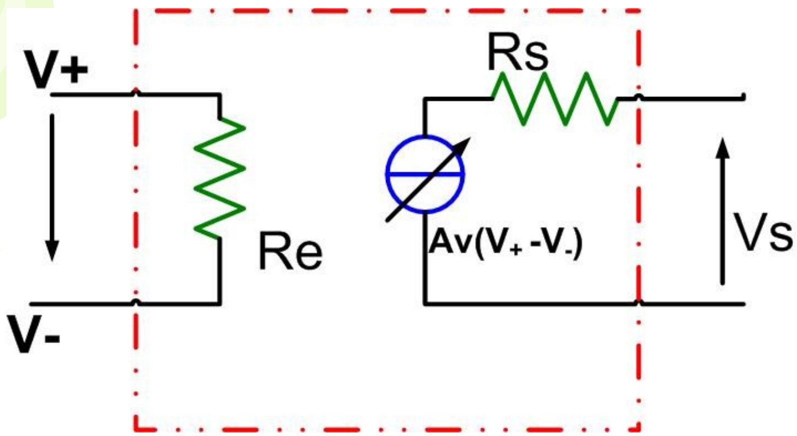


Pour un ampli opérationnel idéal, le gain est défini par :

$$A_v = \frac{S}{\left(V_{e+} - V_{e-}\right)}$$

V_{e+} est l’entrée non inverseuse
V_{e-} est l’entrée inverseuse
Le gain différentiel Av est infini (10^5 à 10^7)
La resistance d’entrée ou impédance d’entrée est infinie (10^5 à 10^{12} Ω)

Schéma équivalent :



La resistance ou impédance de sortie est nulle ou très faible : Rs ~10 à 500 Ω

La réponse en fréquence va du continu jusqu'à des fréquences assez élevées (100 MHz)

Pour l'amplificateur opérationel, on prendra :

$$V_+ - V_- = 0 \quad \text{(approximation)}$$

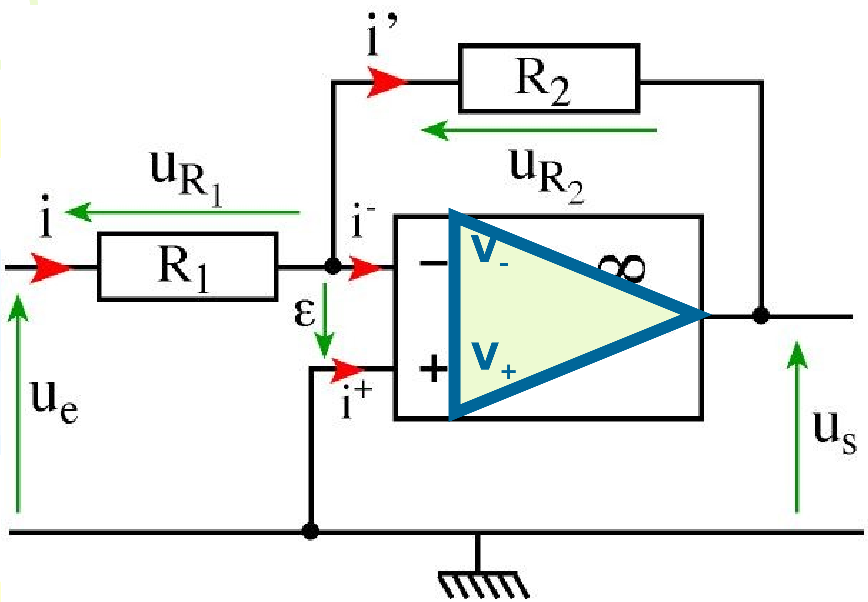
Les courants d'entrée aux bornes + et - :

$$I^+ = I^- = 0$$

II- Montage à base d'amplificateurs opérationels:

1- Amplificateurs inverseur:

schéma :



$$u_e = R_1 i - \varepsilon \cong R_1 i$$

$$u_s = -R_2 i - \varepsilon \cong -R_2 i$$

$$A_V = \frac{u_s}{u_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Les impédances étant infinies, il n'a aucun courant qui rentre dans l'entrée inverseuse, V_-, donc $i^- \sim 0$, le courant i traversera R_2 vers la sortie de l'AOP.

Le gain A_{vd} est infini, dans ces conditions : $V_+ \sim V_- \sim 0$

V_+ est à la masse, V_- se retrouve au même potentiel, comme il n'est pas relié
physiquement à la masse, on parle de masse virtuelle

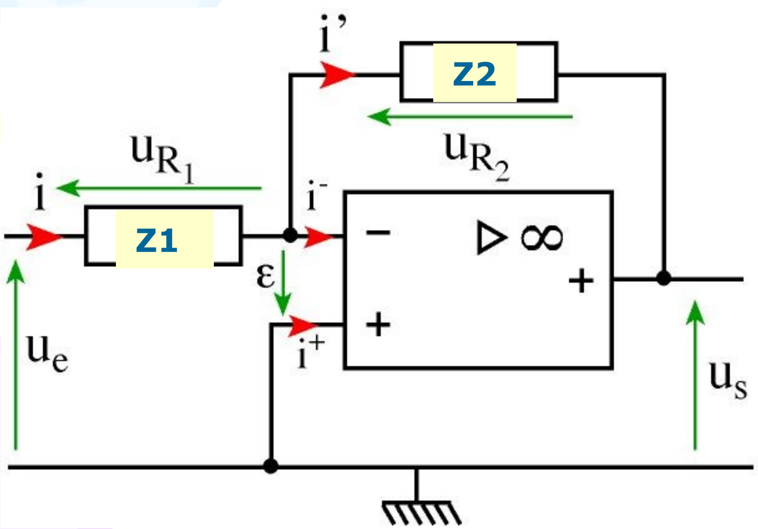
Remarque ampli inverseur :
Av ne dépend que du rapport des résistances → résultat fiable

Impédance d'entrée : $$Z_e = \frac{V_e}{i_e} = \frac{u_e}{i} = R_1$$

$$\textit{impédance d'entrée} : Z_e = R_1$$

$$\textit{impédance de sortie} : Z_s = 0$$

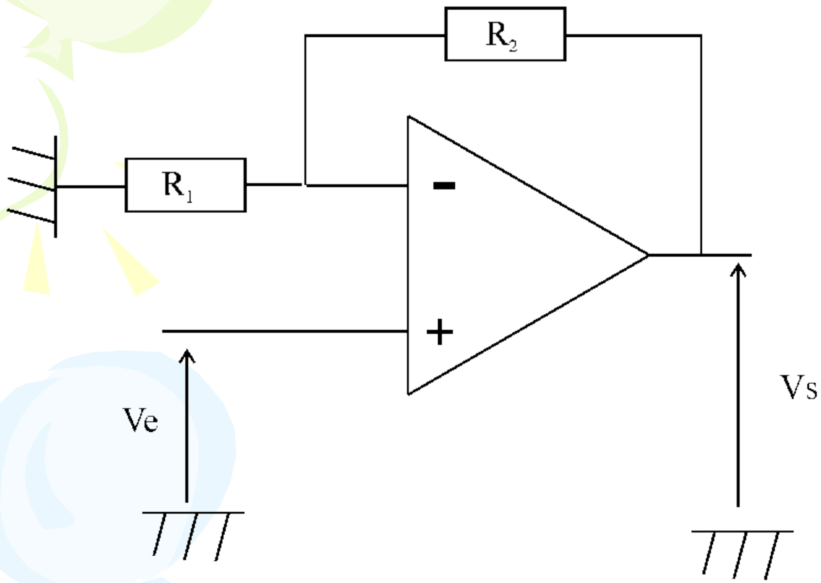
si on généralise à des quadrupôles quelconques :



$$A_V = \frac{u_s}{u_e} = -\frac{Z_2}{Z_1}$$

- **On ouvre la voie à de nombreux filtres en fréquence,**
- **avantage de l'AOP est l'amplification de signaux à certaines fréquences**

2- Amplificateur non-inverseur :



R_1 et R_2 forment un pont diviseur entre Vs et Ve

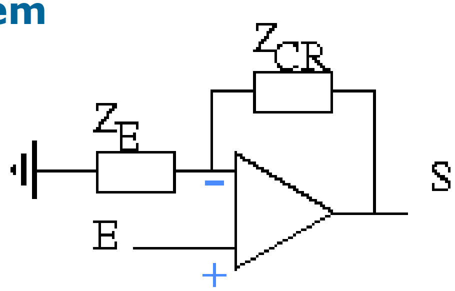
donc :

$$V_e = V_s \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$A_V = \frac{V_s}{V_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_{11}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

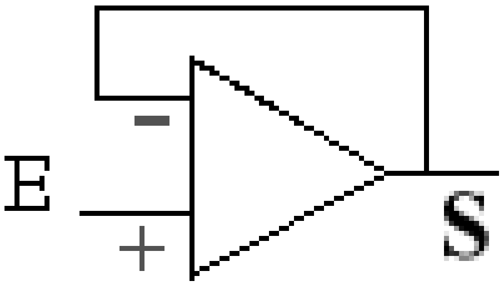
$$A_V = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

impédance : idem



$$G = \frac{V_S}{V_E}\left[1 + \frac{Z_{CR}}{Z_E}\right]$$

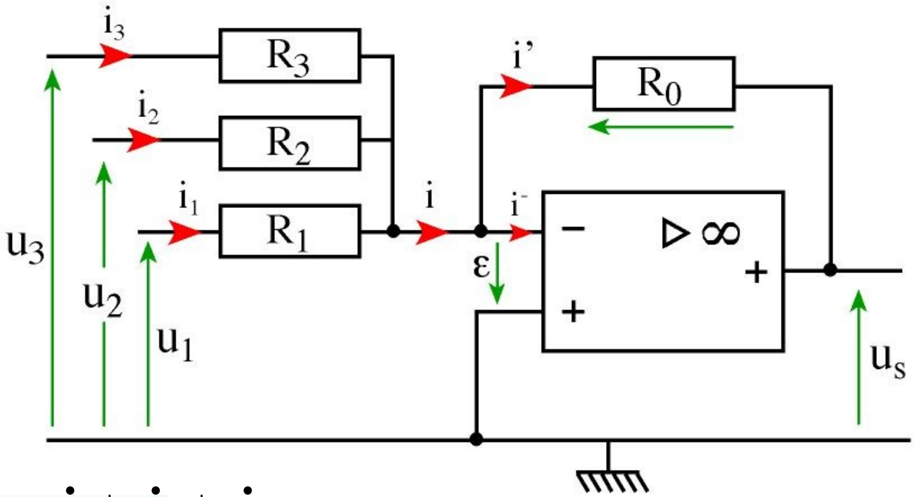
On remarque que le gain ne dépend que du rapport des resistances.
Remarque : si R2=0, on a : $A_v = 1$



ce circuit permet d’obtenir un circuit simple d’impédance d’entrée infinie et d’impédance de sortie nulle et de gain unité : suiveur de tension

III-Montages opérationnels

a) l'additionneur inverseur:



on sait que i- à l'entrée de l'A.O est nul; loi des noeuds donc :

$$\sum_{i=1}^{n} i_i = 0$$

En entrée :

$$u_1 = R_1 i_1$$

$$u_2 = R_2 i_2$$

$$u_3 = R_3 i_3$$

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

$$U_s = -R_0 i' \cong -R_0 i = -R_0 \left(i_1 + i_2 + i_3 \right)$$

$$U_s = -R_0 \left(\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \frac{u_3}{R_3} \right)$$

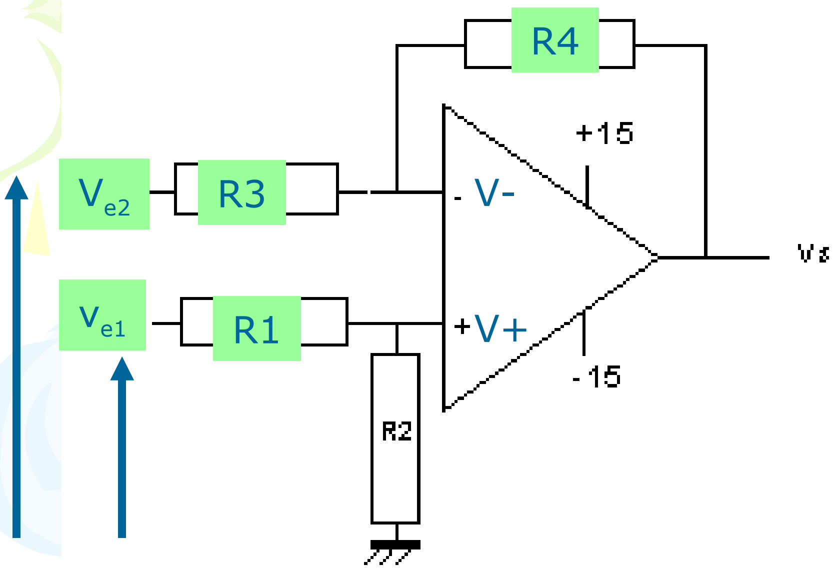
si on pose $R_1 = R_2 = R_3 = R'$

$$U_s = -\frac{R_0}{R'} \left(u_1 + u_2 + u_3 \right) = C.\sum_{i=1}^{n} u_i$$

conclusion : La sortie est proportionnelle à la somme des entrées (inversé).

b- Montage soustracteur :

amplificateur différentiel



On sait que V+ = V-

La tension à l'entrée non inverseuse est:

$$V_+ = V_{e1}\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Si on utilise le théorème de superposition:

Ve2 allumé Vs eteint + Ve2 eteint –Vs allumé

Le calcul de V_- donnera:

$$V_- = V_{e2}\frac{R_4}{R_4 + R_3} + V_s\frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

On égalise V_+ et V_- :

$$V_+ = V_{e1}\frac{R_2}{R_1 + R_2} = V_- = V_{e2}\frac{R_4}{R_4 + R_3} + V_s\frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

$$V_s\frac{R_3}{R_3 + R_4} = V_{e1}\frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{e2}\frac{R_4}{R_4 + R_3}$$

$$V_s \frac{R_3}{R_3 + R_4} = V_{e1} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{e2} \frac{R_4}{R_4 + R_3}$$

$$V_s = \left(V_{e1} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{e2} \frac{R_4}{R_4 + R_3} \right) \frac{R_3 + R_4}{R_3}$$

$$V_s = V_{e1} \left(\frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2} \right) \frac{R_2}{R_3} - V_{e2} \left(\frac{R_4}{R_3} \right)$$

$$V_s = V_{e1} \left(\frac{\left(\dfrac{R_3 + R_4}{R_3} \right)}{\left[\dfrac{R_1 + R_2}{R_2} \right]} \right) - V_{e2} \left(\frac{R_4}{R_3} \right)$$

$$V_s = V_{e1} \left(\frac{\left(1 + \dfrac{R_4}{R_3} \right)}{\left[1 + \dfrac{R_1}{R_2} \right]} \right) - V_{e2} \left(\frac{R_4}{R_3} \right)$$

$$V_s = V_{e1}\left(\frac{\left(1+\dfrac{R_4}{R_3}\right)}{\left[1+\dfrac{R_1}{R_2}\right]}\right) - V_{e2}\left(\frac{R_4}{R_3}\right)$$

soit k$= \dfrac{R_1}{R_2} = \dfrac{R_4}{R_3}$

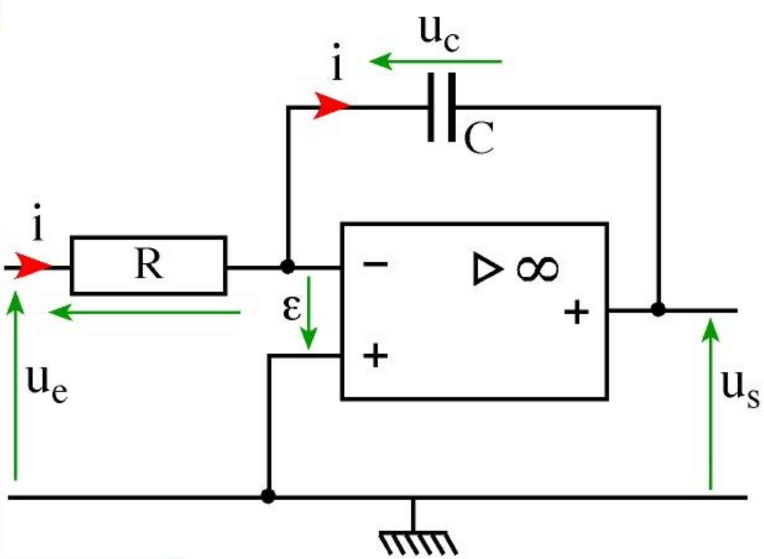
on aboutit à :

$$V_s = V_{e1}\left(\frac{\left(1+k\right)}{\left[1+\dfrac{1}{k}\right]}\right) - V_{e2}.k =$$

$$V_s = k\left(V_{e1} - V_{e2}\right)$$

La sortie est proportionnelle à la différence des entrées

c- Montage intégrateur:



U_e =R i

Q=C.V_s

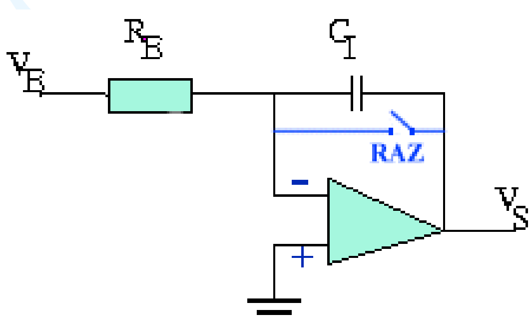
Vu le sens du courant :

$$q = \int i.dt$$

$$Cu_s = -\int \frac{u_e}{R}.dt$$

$$u_s = -\frac{1}{RC}\int u_e dt$$

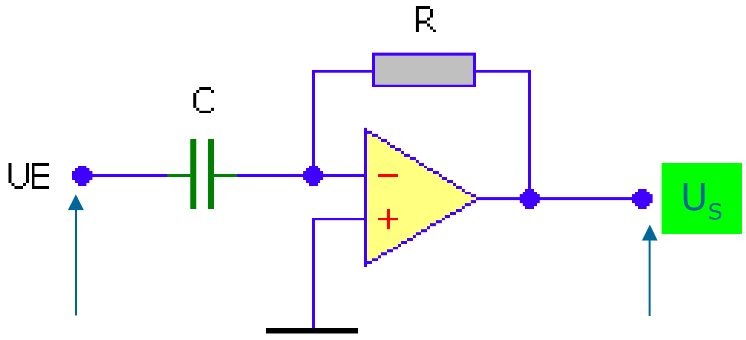
On voit que la sortie est proportionnelle à l'intégrale de la tension d'entrée



$$V_S = \frac{-1}{R_E\,C_i}\int_0^t V_E\,dt$$

intégrateur avec RAZ

d- Montage dérivateur



$$U_s = -Ri$$

$$Q = C.u_e$$

$$i = \frac{dQ}{dt}$$

$$U_s = -RC\frac{dU_e}{dt}$$

La sortie est proportionnelle à la dérivée de l'entrée

e- Montage logarithmique :

Ve =R.I

I= V/R

$$I_D = I_s\left(e^{\frac{qV_d}{KT}} - 1\right)$$

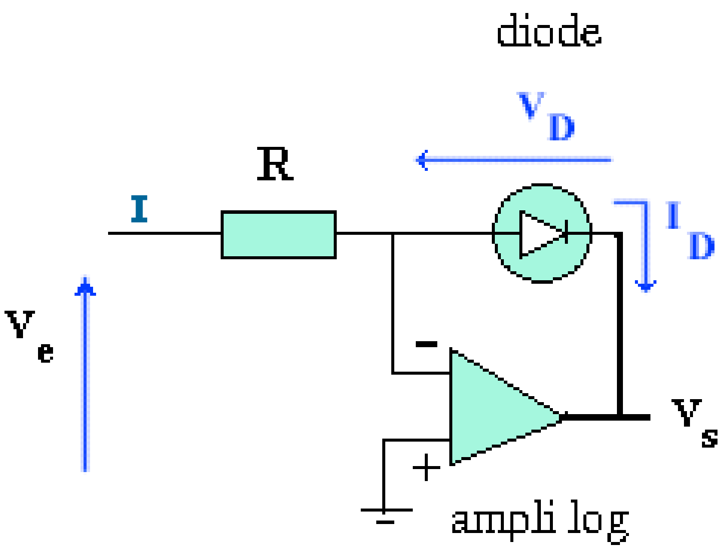
K constante de Boltzmann
T température en degrés K
q charge de l'electron

Pour Vd >50 mV, on peut écrire

$$I_D \cong I_s.e^{\frac{qV_d}{KT}}$$

$$LogI_D = LogI_s + \frac{qV_d}{KT}$$

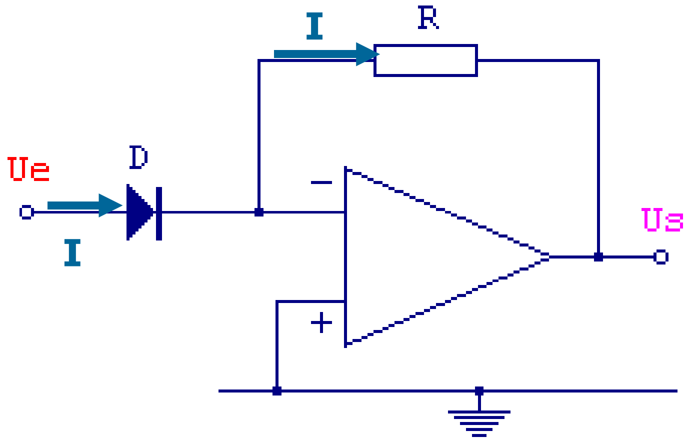
$$V_d = \left(LogI_D - LogI_s\right).\frac{KT}{q} = \frac{KT}{q}Log\frac{I_D}{I_s}$$



$$I_D = I_S\left[\exp\frac{V_D}{kT} - 1\right]$$

$$V_S = -V_D = -kTLn\frac{I_D}{I_S} = -kTLn\frac{V_E}{I_S R}$$

En sortie, on trouve une réponse proportionnelle au logarithme népérien de l'entrée f- Le montage exponentiel :



$$u_s = -Ri = -Ri_s\left(e^{\frac{qV_d}{KT}} - 1\right)$$

$$u_s \cong -Ri_s.e^{\frac{qV_d}{KT}}$$

$$u_e = V_d$$

$$u_s = -Ri_s.e^{\frac{qU_e}{KT}}$$

La tension de sortie est proportionnelle à l'exponentielle de la tension d'entrée

http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02bis/cours_elec/index.html

On suppose que l'amplificateur opérationnel est idéal.

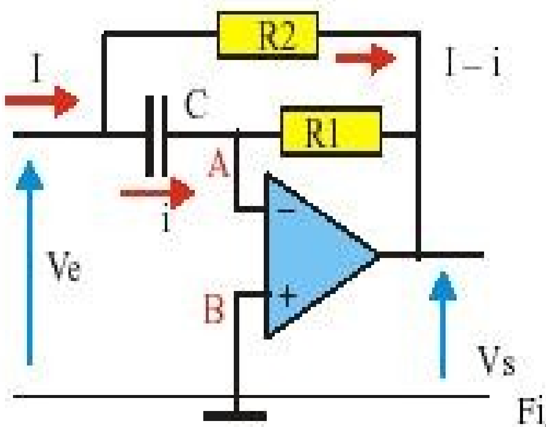


Fig. 23

$V_A = V_B = 0$

$V_E = i/jC\,\omega \quad V_S = -R_1.i$

$V_S = -jR_1.C\,\omega.V_E$

De plus : $V_E - V_S = R_2.(I - i)$

La valeur du courant d'entrée est donc :

$I = i + (I - i) = jC\omega V_E + (V_E - V_S)/R_2$

$I = jC\omega V_E + V_E/R_2 + jR_1.C\,\omega V_E/R_2$

$$I = V_E.\left(\frac{1}{R_2} + jC\omega\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)\right)$$

On en déduit la valeur de l'admittance d'entrée : $Y_E = \dfrac{1}{R_2} + jC\omega.\left(1 + \dfrac{R_1}{R_2}\right)$

☞ Ce circuit est équivalent à une résistance R_2 en parallèle avec un condensateur dont la capacité vaut $C' = C.(1 + R_1/R_2)$. Il permet de simuler une capacité de grande valeur.

Par rapport au montage précédent, on permute C et R_1

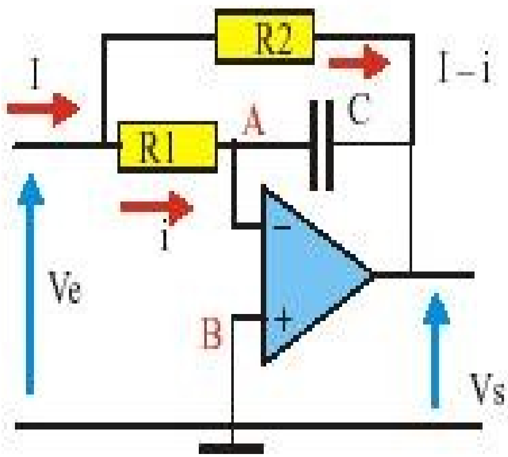


Fig. 24

$V_A = V_B = 0$

$I = i + (I - i)$

$V_E = R_1.i \qquad V_S = - i/jC\omega$

$V_S = - V_E/jC.\omega.R_1$

$V_E - V_S = R_2.(I - i)$

$I = i + (I - i). \quad = V_E/R_1 + (V_E - V_S)/R_2$

On en déduit la valeur du courant I.

$$I = V_E.\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{jC\omega R_1 R_2}\right)$$

La valeur de l'admittance équivalente est : $Y_e = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{jC\omega R_1 R_2} = \frac{1}{r} + \frac{1}{jL\omega}$

☞ Ce circuit est équivalent à une résistance $r = (R_1 // R_2)$ en parallèle avec une inductance $L = C.R_1.R_2$. Il permet de simuler une inductance de grande valeur en utilisant un condensateur.