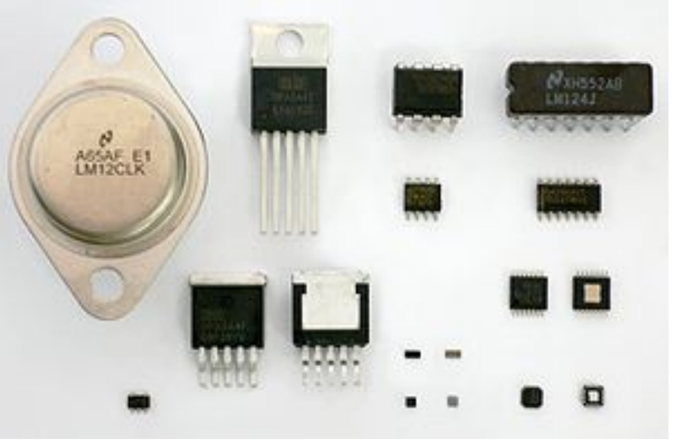
AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL EN REGIME LINEAIRE

« From the beginning at Intel, we planned on being big »

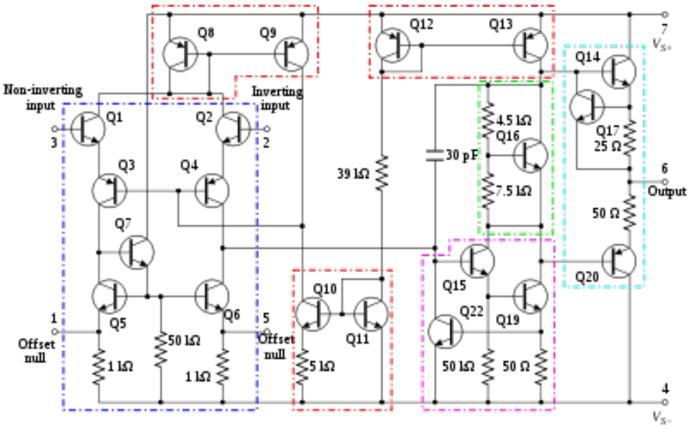
Robert Noyce (1927-1990) et Gordon Moore (1929-), cofondateurs de la société Intel. Robert Noyce est l'inventeur (au même titre que Jack Kilby) du premier circuit imprimé en 1958.

L'amplificateur opérationnel (**abréviation AO**) est un circuit intégré complexe constitué de résistances, de condensateurs, de transistors etc...



Différents Amplificateurs Opérationnels

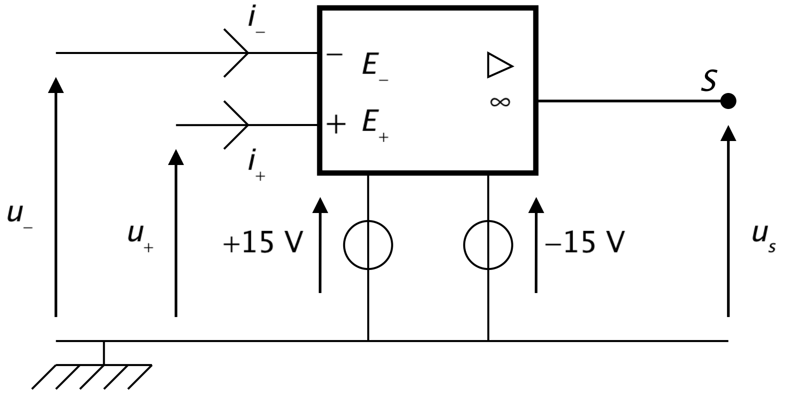
Le schéma ci-dessous correspond à la structure d'un AO type 741 (hors programme bien sûr ☺)



Pour nous, de façon beaucoup plus simple, l'AO est une « **boîte noire** » qui permet de réaliser diverses opérations mathématiques sur les signaux électriques : amplification, sommation, intégration, dérivation, comparateur…

I -DESCRIPTION DE L'AO

1.1 Les signaux électriques



a) 2 bornes d'entrée :

E_- = l'entrée inverseuse.

E_+ = l'entrée non inverseuse.

S = la borne de sortie.

b) Courants de décalage d'entrée :

$i_+(t)$ et $i_-(t)$ qui sont très faible et que l'on considérera en général comme nuls (voir suite sur l'AO idéal).

c) Les tensions continues d'alimentation −15 V et +15 V

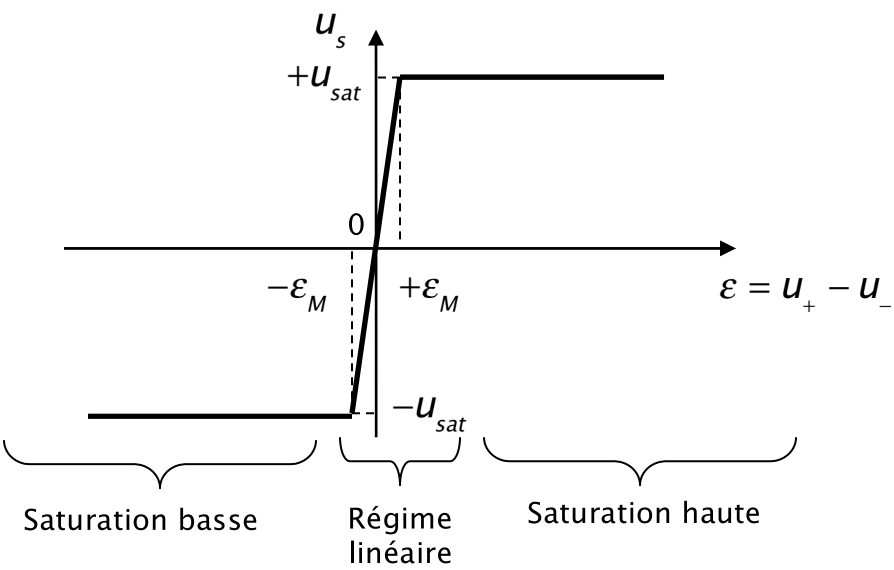
Par la suite ces tensions ne seront plus représentées sur les schémas électriques avec des AO.

d) Les tensions d'entrées et la tension de sortie

Les tensions appliquées à l'entrée sont des fonctions quelconques du temps $u_+(t)$ et $u_-(t)$. La tension de sortie $u_S(t)$ dépend des tensions d'entrée (suivant le type de montage à AO, voir la suite).

1.2 Caractéristique statique de transfert

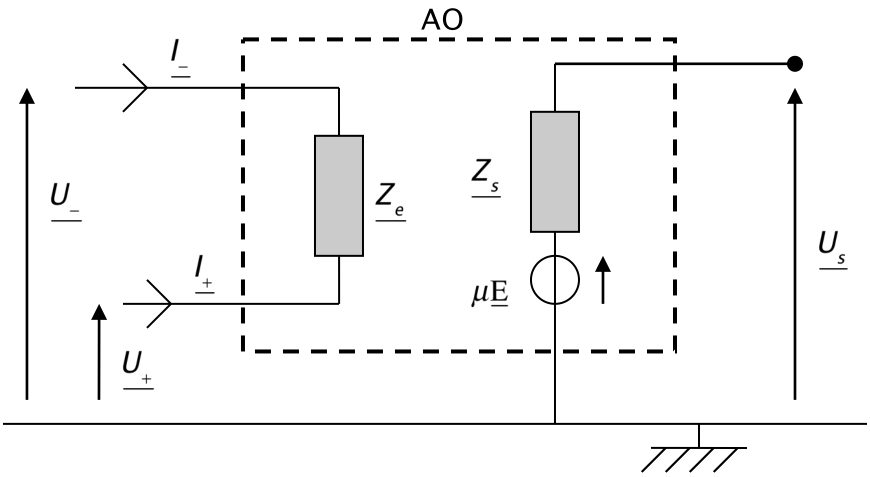
Il existe deux types de régime de fonctionnement : le **régime de saturation** et le **régime linéaire.**



- Régime linéaire $\Rightarrow$ $\boxed{\begin{array}{l} u_s = \mu(u_+ - u_-) = \mu\,\varepsilon \\ \mu = \text{amplification différentielle} \approx 10^5 \end{array}}$

- Régime de saturation $\Rightarrow$ $\boxed{u_s = \pm u_{sat} \approx 14 \text{ V}}$

On est en régime linéaire quand $-\varepsilon_M < \varepsilon < +\varepsilon_M$, avec $\varepsilon_M = \dfrac{u_{sat}}{\mu} \approx 10^{-4}$ V. On constate qu'en régime linéaire $\pm\varepsilon_M$ sont très faibles. Dans le cas de l'AO idéal (voir suite) on prendra $\pm\varepsilon_M \approx 0$ V.



1.3 Modèle électrique équivalent en régime sinusoïdal

$\underline{Z}_e$ est l'impédance différentielle d'entrée. La sortie est équivalente à un générateur de Thévenin $\left(\mu\underline{E},\underline{Z}_s\right)$ avec $\underline{E}$ l'amplitude complexe associée à $\varepsilon(t)$. $\underline{Z}_s$ est l'impédance de sortie.

1.4 L'AO idéal

Un **AO idéal** est un amplificateur différentiel de tension tel que :

- gain infini $\mu \to \infty$
- courant $i_+ = i_- = 0$
- u_s est fini, $u_s = \mu\varepsilon$ donc $\varepsilon = 0$

Ces trois résultats sont indispensables pour faire les exercices.

En terme de modèle équivalent, ces trois résultats impliquent que $\left|\underline{Z}_e\right| = \infty$ et $\left|\underline{Z}_s\right| = 0$. La bande passante (voir cours sur les fonctions de transfert) est infinie $\left[0,+\infty\right[$.

Si de plus $\left|u_s\right| < u_{sat}$; l'AO idéal fonctionne en régime linéaire (très souvent le cas en PTSI mais pas toujours).

Valeur typique des caractéristiques d'un AO		
Caractéristiques	Valeur réelle	Valeur idéale
Gain μ	10^5 à 10^8	∞
Impédance de sortie $\left\|\underline{Z}_s\right\|$	10 à 100 Ω	0 Ω
Impédance d'entrée $\left\|\underline{Z}_e\right\|$	10^5 à 10^{13} Ω	∞ Ω

II –MONTAGES USUELS A AO IDEAL

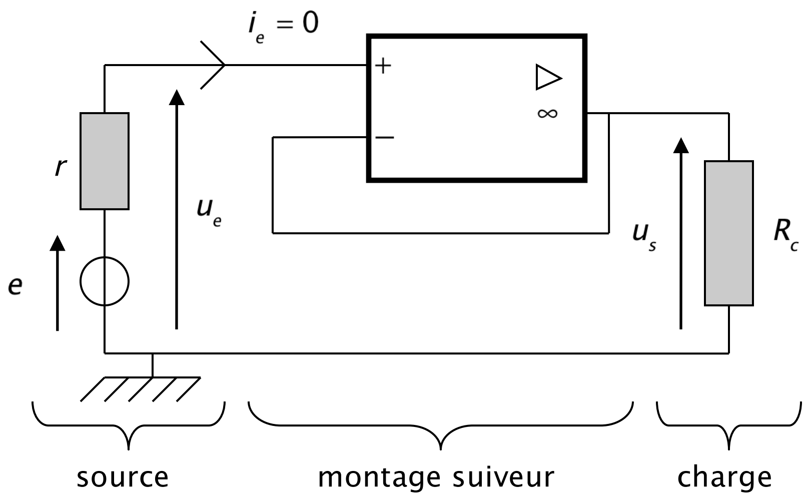
Les calculs qui suivent sont valables pour n'importe quel régime temporel, pas uniquement sinusoïdal.

2.1 Suiveur de tension

$i_e = i_+ = 0 \quad u_e = u_+ = u_- = u_s$

$u_e = e - ri_e = e \quad u_s = u_e = e$

$\Rightarrow \boxed{\dfrac{u_s}{u_e} = \dfrac{u_s}{e} = 1}$

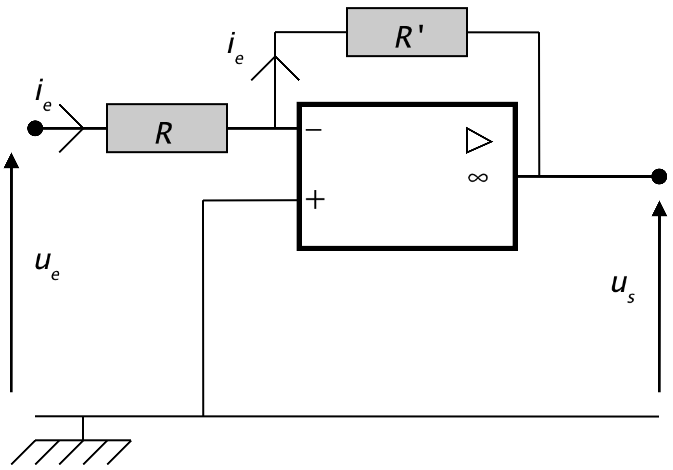


2.2 Amplificateur de tension

$u_+ = u_- = 0 \quad u_e = Ri_e \quad u_s = -R'i_e$

$\Rightarrow \boxed{\dfrac{u_s}{u_e} = -\dfrac{R'}{R}}$

On a un gain de $-R'/R$.



2.3 Changeur de signe

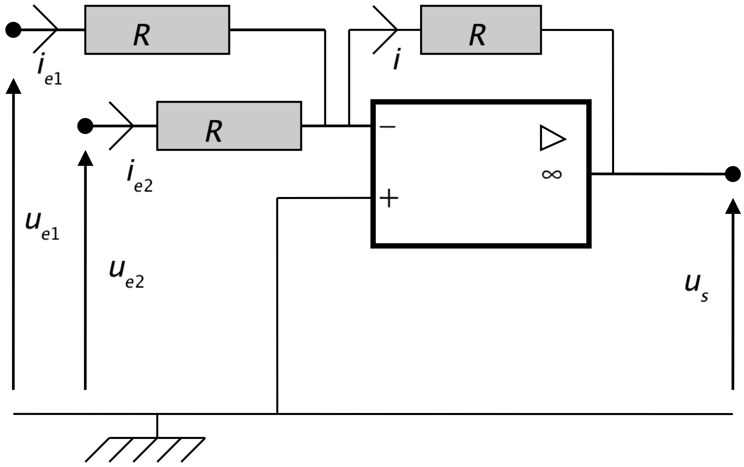
$R = R' \Rightarrow \boxed{u_s = -u_e}$

2.4 Sommateur de tensions

$u_+ = u_- = 0 \quad u_s = -Ri \quad u_{e1} = Ri_{e1}$

$u_{e2} = Ri_{e2} \quad i = i_{e1} + i_{e2}$

$\Rightarrow \boxed{u_s = -\left(u_{e1} + u_{e2}\right)}$



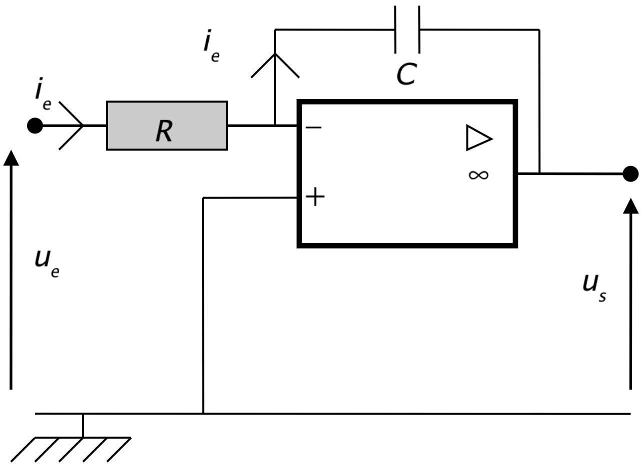
2.5 Intégrateur simple

$u_e = Ri_e \quad i_e = \dfrac{dq}{dt} = C\dfrac{du_C}{dt},$

$u_s = -u_C$ à t=0 $u_s(0) = 0,$

condensateur déchargé $i_e = \dfrac{u_e}{R} = -C\dfrac{du_s}{dt},$

$\Rightarrow \boxed{u_s(t) = -\dfrac{1}{RC}\int_0^t u_e(t)\,dt}$

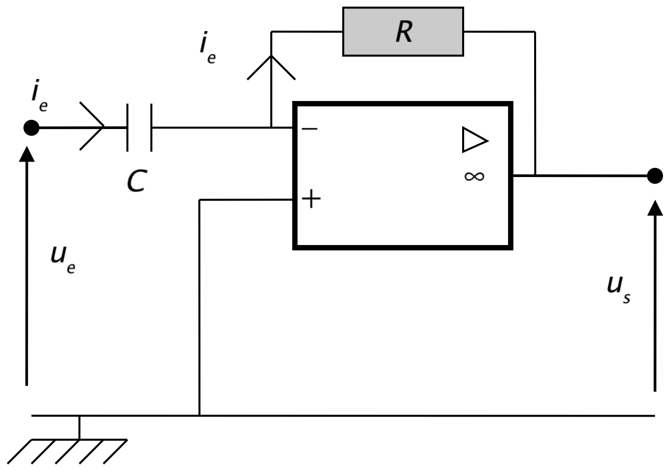


2.6 Dérivateur simple

On permute R et C dans le montage intégrateur.

$i_e = C\dfrac{du_e}{dt} = -\dfrac{u_s}{R},$

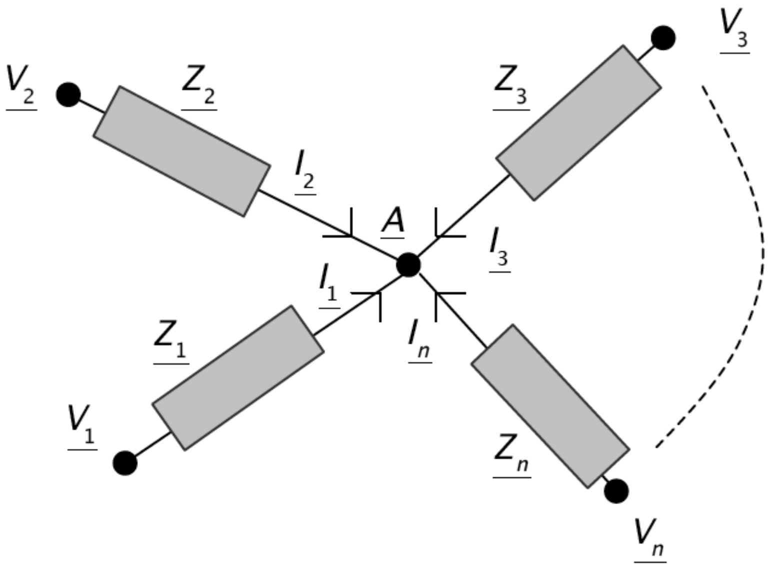
$\Rightarrow \boxed{u_s(t) = -RC\dfrac{du_e}{dt}}$



ANNEXE 1: Théorème de Millman

Il s'agit d'exprimer la loi des noeuds en terme de potentiels comme l'a fait pour la première fois l'électronicien Américain Jacob Millman (1911–1991) du MIT. Il s'agit d'un outil très utile dans l'étude des filtres à amplificateurs opérationnels comme nous allons le voir dans la prochain chapitre.

On travaille en représentation complexe. On considère le nœud suivant :



On cherche à exprimer le potentiel au point A, représenté par son amplitude complexe $\underline{V}_A$, en fonction des seuls potentiels des nœuds adjacents $\underline{V}_n$ et des amplitudes complexes $\underline{Z}_n$.

La loi des nœuds en A donne : $\sum_{\ell=1}^{n} \underline{I}_\ell = 0 \Leftrightarrow \sum_{\ell=1}^{n} \frac{\underline{V}_\ell - \underline{A}}{\underline{Z}_\ell} = 0$. En isolant $\underline{A}$, on obtient le théorème de Millman :

$$\boxed{\underline{A} = \frac{\frac{\underline{V}_1}{\underline{Z}_1} + \frac{\underline{V}_2}{\underline{Z}_2} + \ldots + \frac{\underline{V}_n}{\underline{Z}_n}}{\frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \ldots + \frac{1}{\underline{Z}_n}} = \frac{\sum_{\ell=1}^{n} \frac{\underline{V}_\ell}{\underline{Z}_\ell}}{\sum_{\ell=1}^{n} \frac{1}{\underline{Z}_\ell}}}$$

Nous verrons de nombreux exemples d'application de ce théorème dans le chapitre sur les filtres.

ANNEXE 2: Résumé montage AO (sans intégrateur et dérivateur)