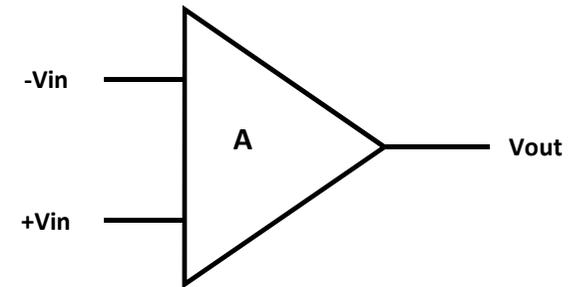
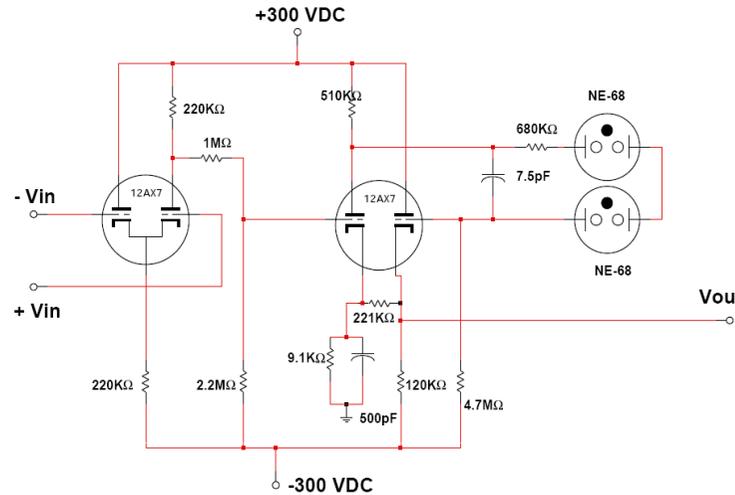


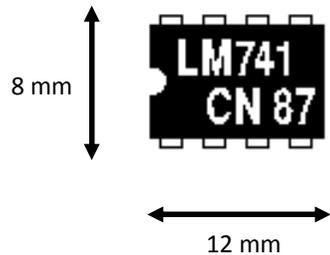
I. L'amplificateur opérationnel : structure idéale



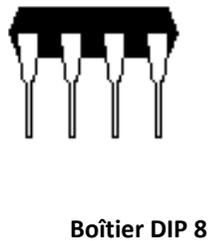
Le premier amplificateur opérationnel : le K2-W



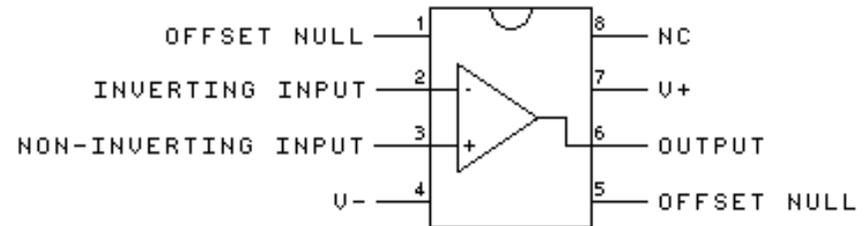
Extrait du cours du Prof. Greg Kovacs, Stanford University



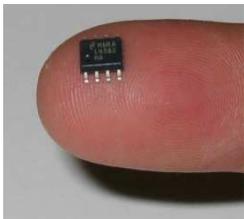
1966 – Le LM 741 de Fairchild Semiconductor



Boîtier DIP 8



1977 le TL081 Amplificateur BIFET

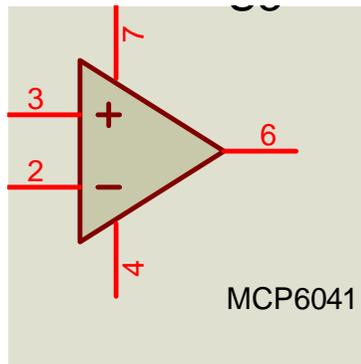


1995 – Amplificateur Rail to Rail en boîtier SOIC (Texas instruments)

Le mot opérationnel est issu d'une mauvaise traduction de « operational amplifier » soit amplificateur pour opérations au sens

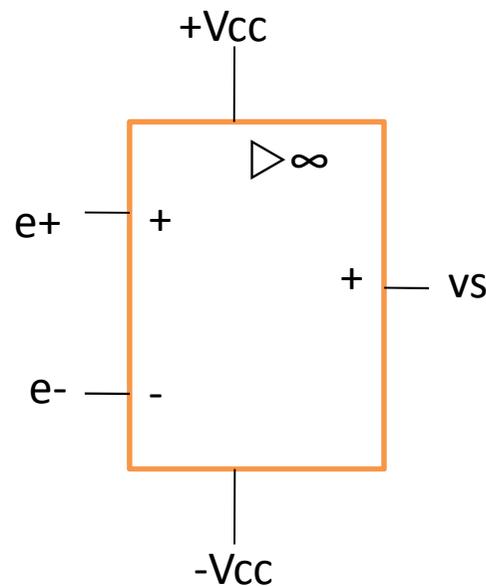
- amplifier
- Filtrer
- Additionner
- Soustraire
- Intégrer
- Dérivée
- Comparer

...



Amplificateur opérationnel
Ampli Op
Amplificateur linéaire intégré
AOP

C'est le même

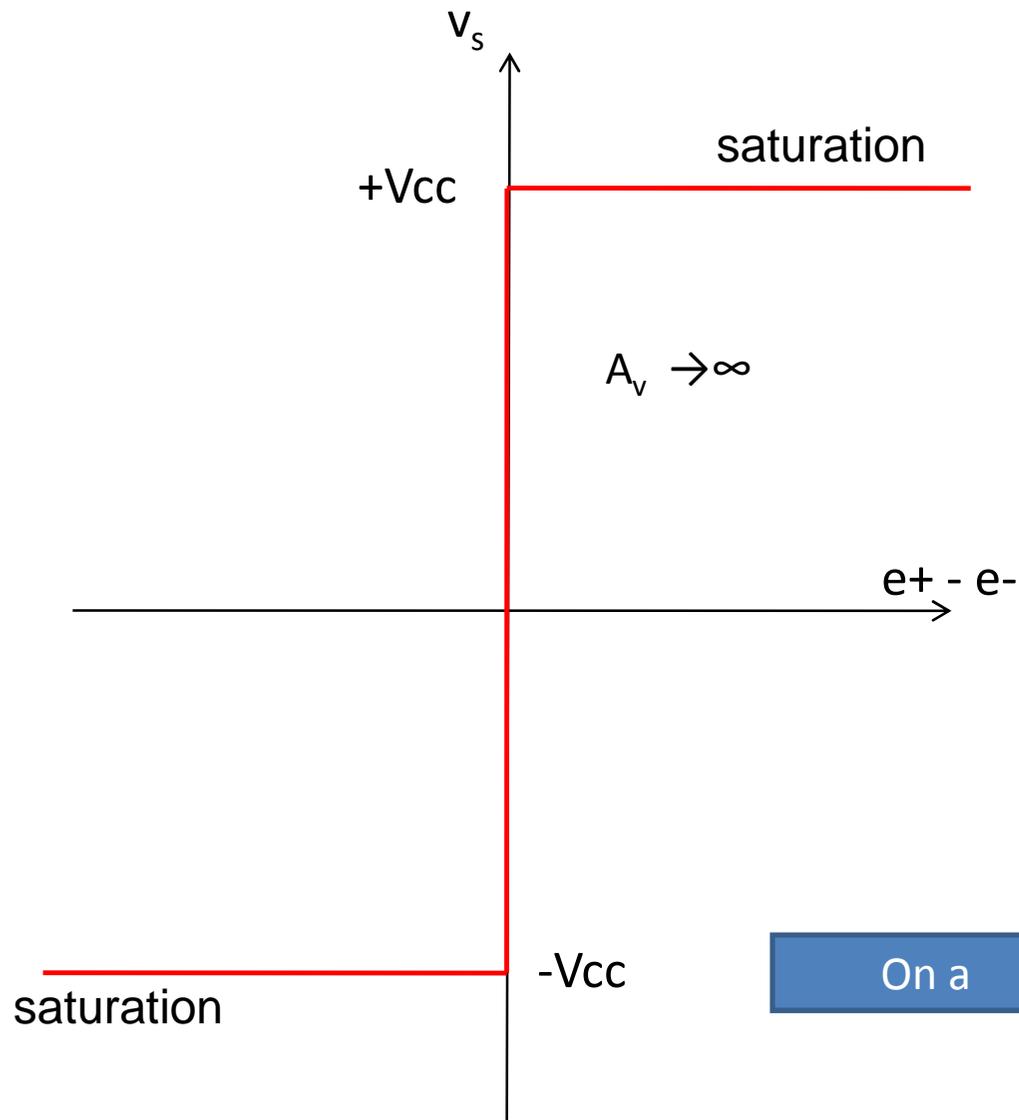


Reste du monde

Les caractéristiques de l' ampli-op idéal seraient :

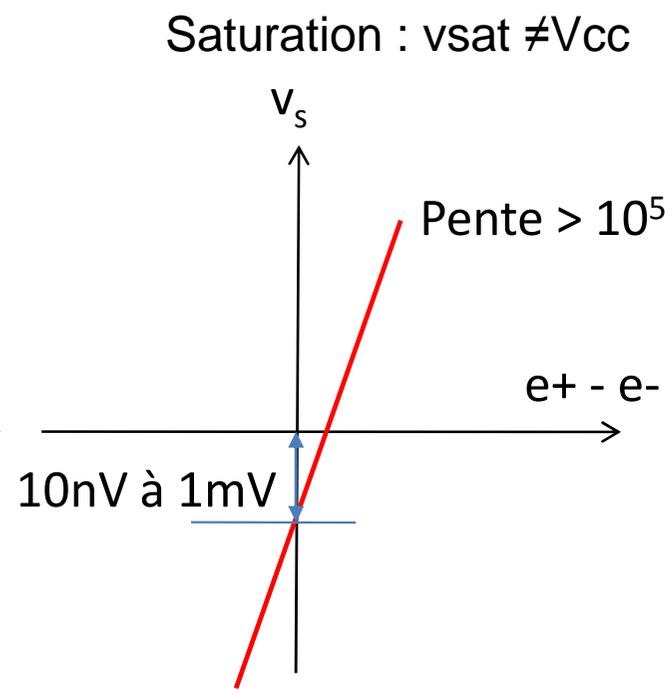
- Impédance d'entrée infinie
- Impédance de sortie nulle
- Amplification en tension infinie
- Tension de saturation = tensions d'alimentation
 - Si $e+ > e-$ $vs = +Vcc$
 - Si $e+ < e-$ $vs = -Vcc$
- Offset nul
- Bande passante infinie

$$vs = A.(e+ - e-) \text{ l'AOP est un amplificateur différentiel}$$



On voudrait ←

→ On a



On recherche $V_s = A_d \cdot (V_1 - V_2)$

Théoriquement si V_1 et V_2 augmentent ou diminuent d'une même valeur V_s ne change pas... (mode commun)

En pratique V_s n'est jamais absolument indépendante de la valeur individuelle de V_1 et de V_2 et l'on peut écrire:

$$V_s = A_d(V_1 - V_2) + A_{mc} \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad (\mathbf{A_{mc} \text{ est le gain en mode commun}})$$

Le gain en mode commun correspond à un effet indésirable (la sortie n'est plus proportionnelle à la seule différence des entrées), par conséquent il doit être le plus petit possible.

La tension V_s est en phase avec V_1 et en opposition de phase avec V_2 . L'entrée V_1 est appelée entrée non-inverseuse ou e+, l'entrée V_2 entrée inverseuse ou e-

Quelques exemples de
paramètres des AOP

Usage général : [TL081](#)

Mono tension (techno MOS) : [MCP6141](#)

Conditionnement de capteur : [AD549](#)

paramètres	
VIO	Input offset voltage
aVIO	Temperature coefficient of input offset voltage
IIB	Input bias current
VOM	output voltage swing
ri	Input resistance
CMRR	Common-mode rejection ratio
A0	Open loop amplification

CONSTITUTION

Les AOP possèdent des caractéristiques « externes » proches du modèle « parfait

- Très grande amplification ($> 10^5$)
- Grande impédance d'entrée (souvent considérée comme infinie)
- Très faibles courants de polarisation en entrée (souvent considérés comme nuls)
- Faible tension d'offset (dépend des technologies, qq uV en MOS)
- Faible impédance de sortie
- Excursion de la tension de sortie proche des alimentations (Rail to Rail)

- Cela est possible
- Grâce à l'utilisation de **transistors MOS** fonctionnant en régime linéaire (mode saturé)
- Grâce à l'architecture particulière et aux caractéristiques des **amplificateurs différentiels**

Les montages à contre réaction permettent la mise en œuvre de ces composants

Amplificateur opérationnel

Architecture simplifiée d'un amplificateur opérationnel:



Amplificateur différentiel

{ amplification de $v_+ - v_-$ (gain élevé en « *mode différentiel* »)
 atténuation de $\frac{v_+ + v_-}{2}$ (gain $\ll 1$ en « *mode commun* »)
 Z_e élevée \leftrightarrow MOSFET, ...

Etage amplificateur

{ augmente le gain total ($A_v \gg 1$)
 ex: montage drain commun et R_d élevée \leftrightarrow charge active

suiveur

impédance de sortie faible
 Configuration *Push-Pull* : domaine de linéarité

. Contre-réaction et amplificateur opérationnel

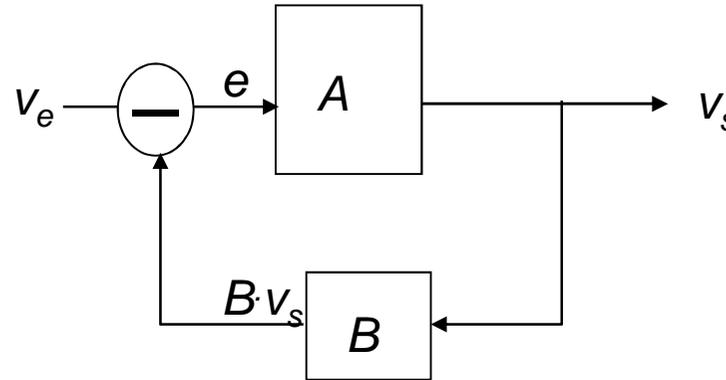
Circuit bouclé et rétroaction

▶ Circuit bouclé :

La sortie agit sur l'entrée

$$v_s = A \cdot e = A(v_e - B \cdot v_s)$$

$$\rightarrow v_s = \frac{A}{1 + AB} v_e$$



▶ **Rétroaction positive** l'action de la sortie sur l'entrée renforce la variation du signal de sortie

ex: $A > 0, B < 0$
(sans déphasage)

$$v_s \uparrow \rightarrow Bv_s \downarrow \rightarrow e \uparrow \rightarrow v_s \uparrow \dots$$

la sortie **diverge** \Leftrightarrow les composants **sortent du domaine linéaire**
par exemple : transistor sature

~~$$v_s = \frac{A}{1 + AB} v_e$$~~

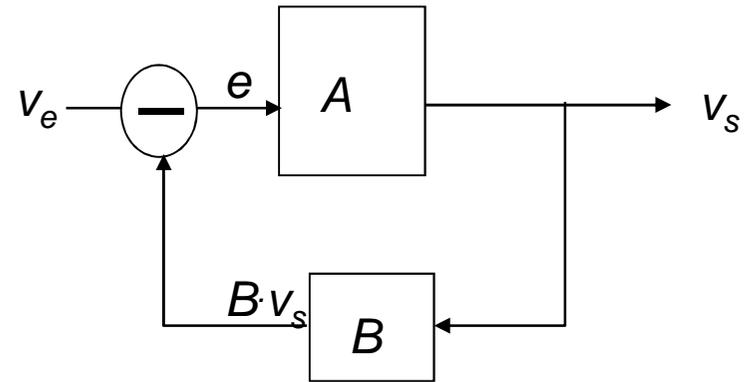
comportement non-linéaire $\Leftrightarrow A, B$ modifiés

► **Rétroaction négative ou « contre-réaction » :**

L'action de la sortie sur l'entrée atténue la variation du signal de sortie

ex: $A > 0, B > 0$ (sans déphasage)

$v_s \uparrow \rightarrow Bv_s \uparrow \rightarrow e \downarrow \rightarrow v_s \downarrow \dots$



la sortie **converge vers** :

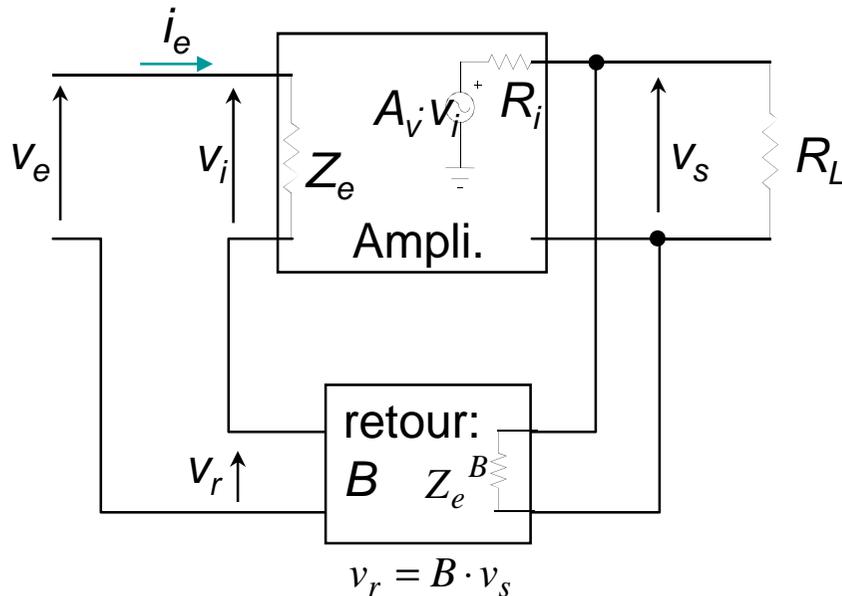
$$v_s = \frac{A}{1 + AB} v_e = G \cdot v_e$$

- $G = \text{gain en boucle fermée}$:
- $G < A$

- Si $AB \gg 1$, $G \approx \frac{1}{B}$ \Rightarrow la variation ou toute incertitude sur A n'affecte **pas** G .
 \Rightarrow **Amélioration de la linéarité**

* $B = \text{“taux de réinjection”}$

Montage "Série - parallèle" (contre réaction en tension):



Entrée en séries avec le circuit de rétroaction
Sortie en parallèle avec B

► Gain en "boucle fermé":

$$\dots \rightarrow G = \frac{v_s}{v_e} = \frac{A}{1 + AB}$$

► A = Gain en "boucle ouverte" : = v_s/v_i avec boucle de réaction ouverte, et même charge $R_L // Z_e^B$

$$A = \frac{r_L}{r_L + R_i} A_v \approx A_v \text{ si } R_i \ll r_L = R_L // Z_e^B$$

► Court-circuit virtuel :

$$v_i = \frac{v_s}{A} = \frac{v_e}{1 + AB} \ll v_e \text{ pour } AB \gg 1$$

$v_i \rightarrow 0$ pour $A \rightarrow +\infty$ **avec** $i_e = \frac{v_i}{Z_e} \approx 0$ = court-circuit "virtuel", puisque $i \sim 0$

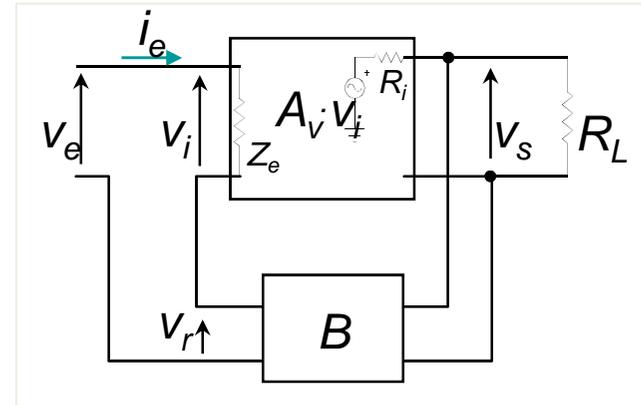
"Explication qualitative ":

si v_i "tentait" d'augmenter, l'augmentation importante de v_s (A fois plus élevée...) s'opposera, via B , à cette variation.

► **Impédance d'entrée**

$$Z_e^{B.F.} = \frac{v_e}{i_e} = \frac{v_i + B \cdot v_s}{i_e} = \frac{v_i(1 + AB)}{i_e} = Z_e(1 + A \cdot B) \gg Z_e$$

* B.F.=“boucle fermée”



* **L'impédance d'entrée est augmentée par la rétroaction :**

Qualitativement : la contre-réaction maintient v_i proche de 0 $i_e \approx 0 \leftrightarrow Z_e^{B.F.} \approx +\infty$

► **Impédance de sortie**

Qualitativement : En présence de l'impédance de sortie $Z_s^{B.F.}$, une **diminution** de R_L fera **chuter** la tension v_s .

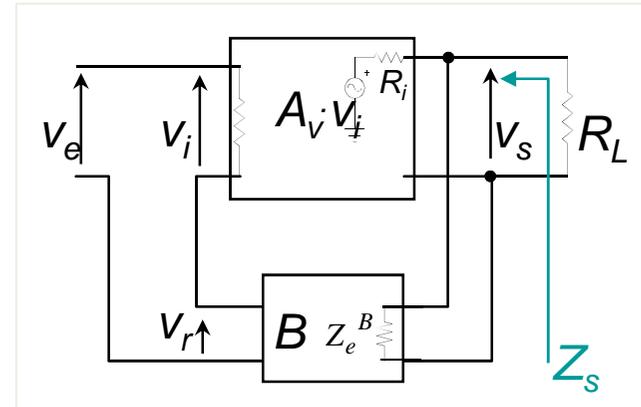
la diminution de v_s induit, via la contre-réaction, une **augmentation** de v_i , laquelle **s'oppose à la diminution de v_s** ...

l'impédance de sortie est réduite (0 si $A \rightarrow \infty$)

* **L'impédance de sortie est diminuée par la rétroaction**

Calcul de $Z_s^{B.F.}$:

Lorsque $R_L = Z_s^{B.F.}$ on a $v_s(R_L) = \frac{v_s(R_L = +\infty)}{2}$



$$v_s(R_L) = \frac{A(R_L)}{1 + A(R_L) \cdot B} v_e \quad \text{avec} \quad A(R_L) = \frac{R_L}{R_L + r_i} A_v \quad \text{et} \quad r_i = R_i // Z_E^B \approx R_i \text{ si } Z_E^B \gg R_i$$

$$\rightarrow v_s = \frac{A_v}{\frac{r_i}{R_L} + (1 + A_v B)} v_e$$

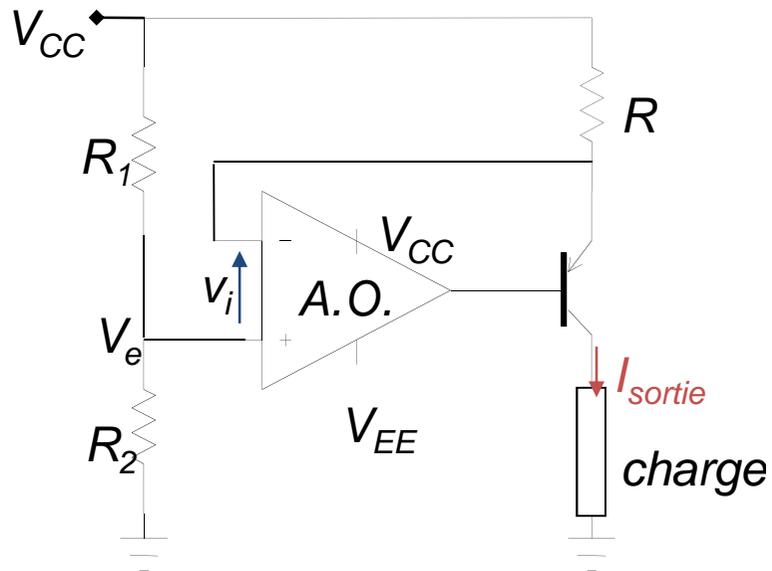
$$\Rightarrow v_s = \frac{v_s(R_L = \infty)}{2} \leftrightarrow R_L = \frac{r_i}{1 + A_v B} = Z_s^{B.F.} \ll R_i$$

Conclusion

* Si $A \infty$: **Gain stable, linéarité parfaite, Z_e infinie, Z_s nulle !!**
 utilisation d'un **amplificateur opérationnel** ($A \sim 10^4 - 10^6$, R_i très faible, Z_e très élevée)

Exemples de circuits avec rétroaction négative :

Sources de courant



Par contre-réaction : $v_i \approx 0$

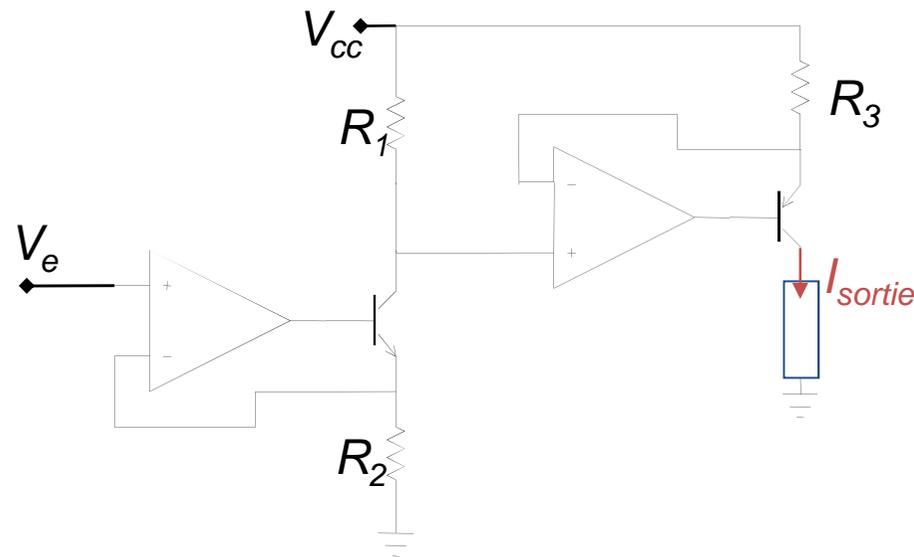
$$I_{\text{sortie}} \cong \frac{V_{cc} - V_e}{R} \quad (\text{hyp: } h_{FE} \text{ élevé, AO parfait})$$

* $I_{\text{sortie}} \approx$ indépendant de la charge, (à l'effet Early près)

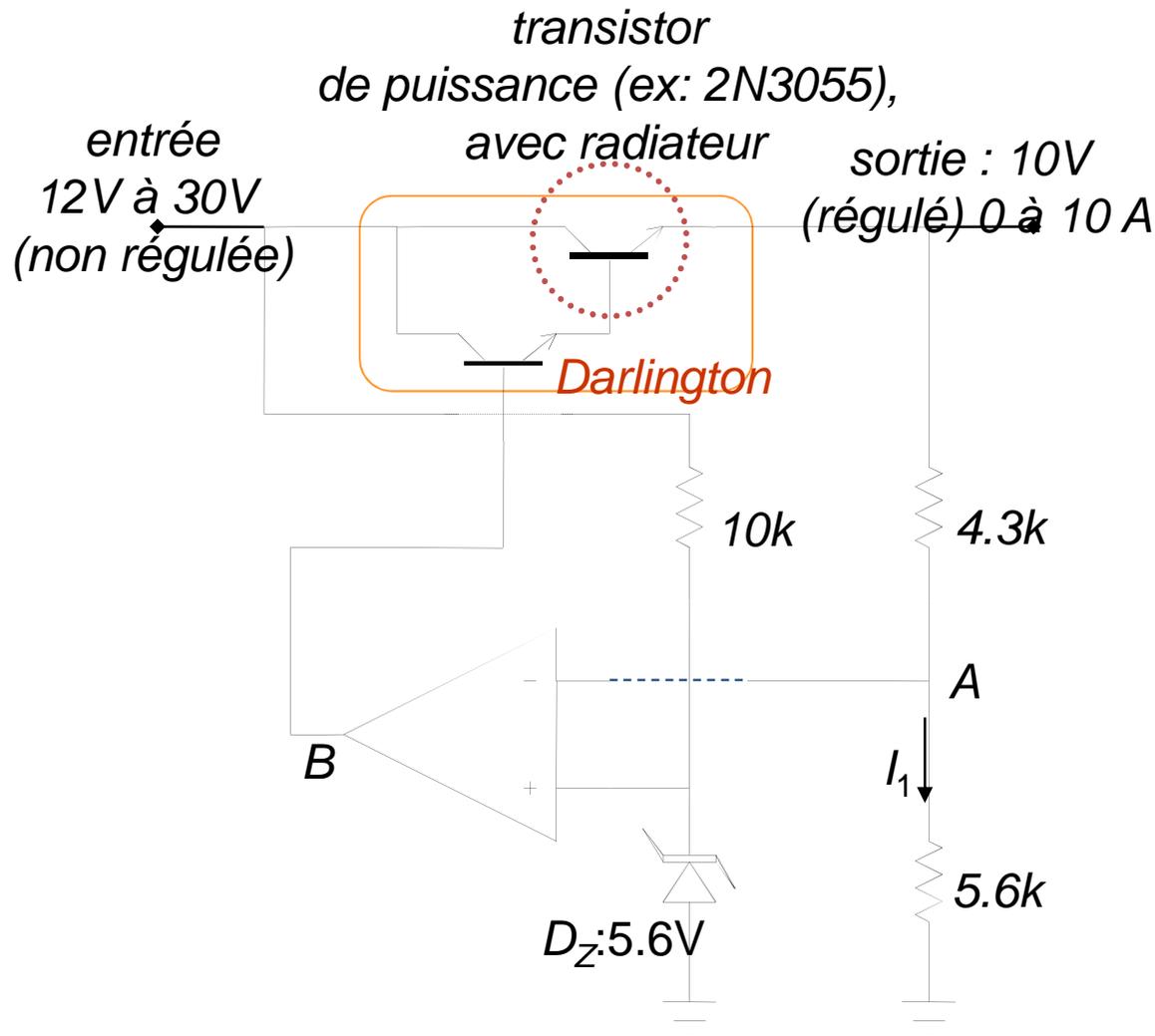
* tension de commande = $V_{cc} - V_e$

Version avec tension de commande référencée par rapport à la masse :

$$\dots \rightarrow I_{\text{sortie}} = \frac{R_1}{R_2 R_3} V_e$$



Régulateur



Contre réaction :

$$\rightarrow V_+ = V_- \rightarrow V_A = 5.6V$$

$$\rightarrow I_1 = 1mA \rightarrow V_{\text{sortie}} = 10V$$

* Si V_A **diminuerait** $\square V_+ > V_-$

V_B augmenterait

$V_s = V_B - 1.4$ augmenterait

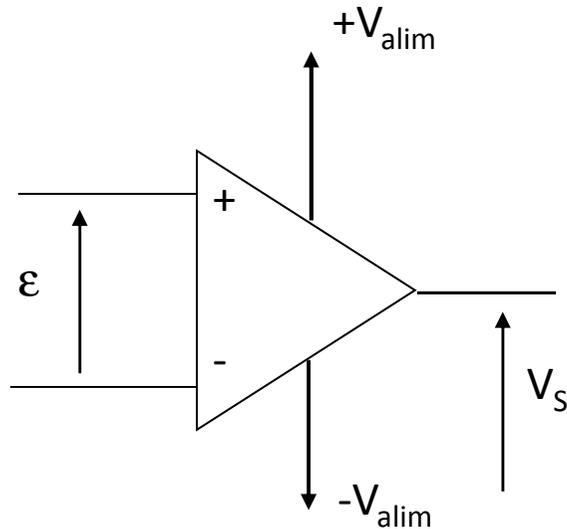
V_A **augmenterait**

$$I_{\text{sortie}}^{\text{max}} < \frac{10}{Z_s \text{ Darlington}}$$

Amplificateur opérationnel

APPLICATIONS

L'amplificateur opérationnel : caractéristiques simplifiées

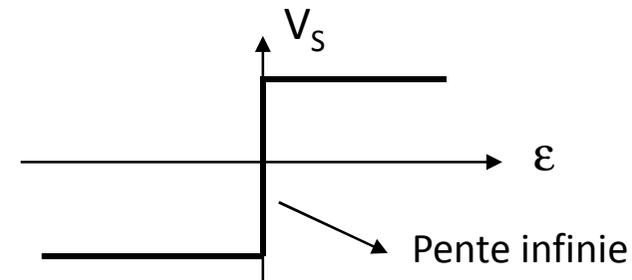


C'est un amplificateur en tension :

Fonction réalisée : $V_s = A_\infty \varepsilon = A_\infty (V_+ - V_-)$

A_∞ : gain en tension considéré comme infini

Caractéristique de la fonction de transfert :

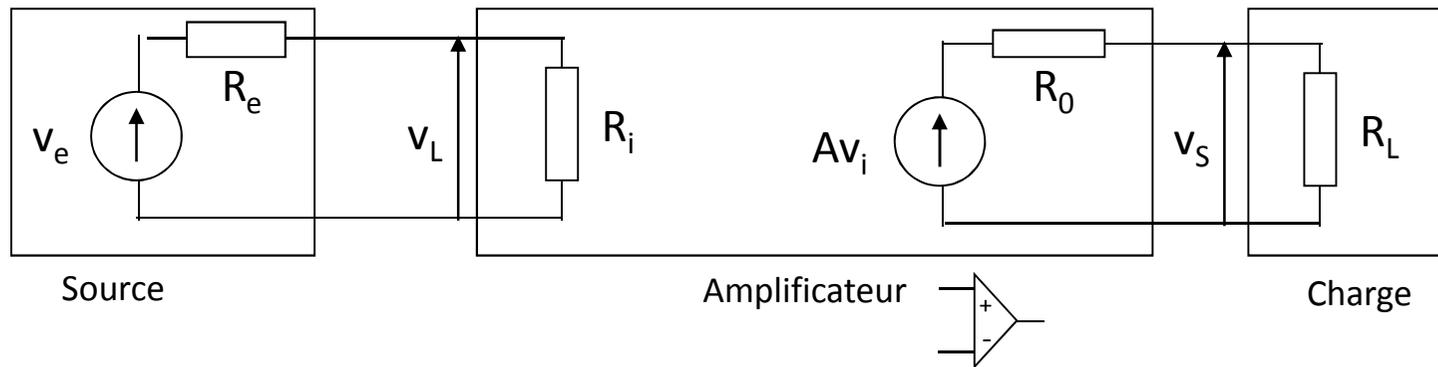


- structure d'amplification à deux entrées et une sortie
- l'énergie nécessaire pour amplifier est apportée par une alimentation DC externe qui peut-être :
 - une alimentation symétrique : $V_{alim} = +V_{alim} = -V_{alim}$
 - une alimentation positive : $V_{alim} = +V_{alim}$ et $-V_{alim} = 0$

En général : $(V_{sat} = -V_{alim} + T_{déchet}) < V_s < (V_{sat} = +V_{alim} - T_{déchet})$ avec $(T_{déchet} = 10\text{mV à } 0,6\text{ V})$

L'amplificateur opérationnel : RESUME

Impédance d'entrée et impédance de sortie



En entrée (on a un diviseur de tension) : $v_i = \frac{R_i}{R_i + R_e} v_e$

Pour avoir $v_i = v_e$ il faut $R_i \gg R_e$ donc idéalement $R_i \Rightarrow \infty$

En sortie (on a un diviseur de tension) : $v_S = \frac{R_L}{R_0 + R_L} Av_i$

Pour avoir $v_L = Av_i$ il faut idéalement $R_0 \sim 0$

Conclusion si $R_i = \infty$ et $R_0 = 0$:

$$v_S = Av_e$$

L'amplificateur opérationnel : RESUME

Seule, cette structure est peu intéressante (excepté pour le fonctionnement en comparateur) puisque :

- si $\varepsilon > 0$ alors $V_S = V_{\text{sat}}$
- si $\varepsilon < 0$ alors $V_S = -V_{\text{sat}}$

Mais, si on prélève une partie du signal de sortie pour l'injecter :

Sur la borne (-) on obtient :

Un fonctionnement linéaire

-montage avec contre réaction

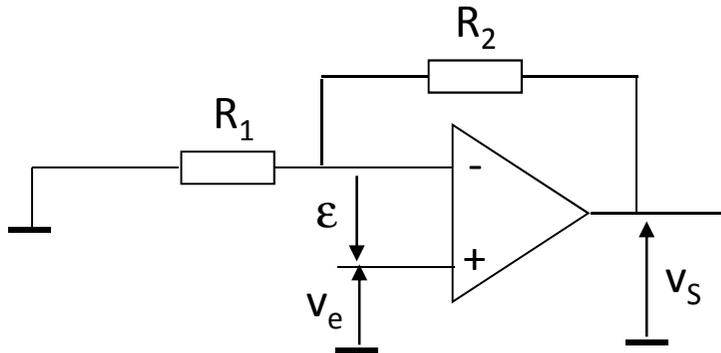
Sur la borne (+) on a alors :

Un fonctionnement non linéaire

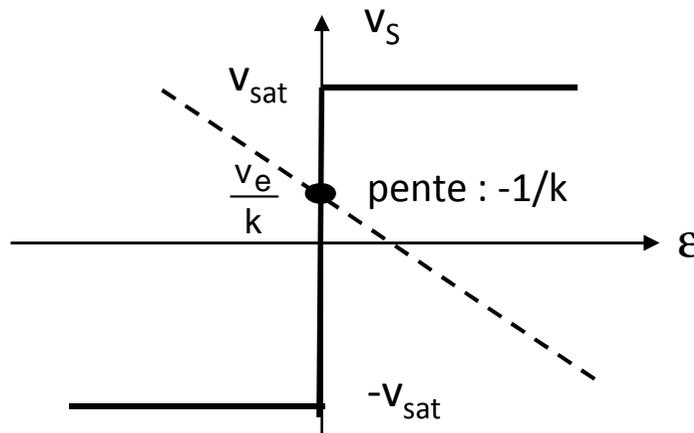
- montage avec réaction positive

L'amplificateur opérationnel : RESUME

Fonctionnement en régime linéaire : Montage avec contre réaction



Représentation graphique :



Mise en équation :

- $V_+ = V_e$
- Millman : $v_- = \frac{\frac{0}{R_1} + \frac{v_s}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_s = kv_s$

$$\Rightarrow \varepsilon = V_+ - V_- = v_e - kv_s$$

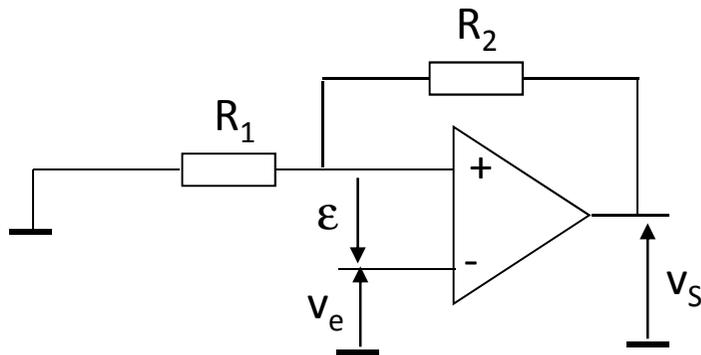
$$\Rightarrow v_s = \frac{v_e}{k} - \frac{\varepsilon}{k} \quad \text{droite de pente } -1/k$$

Discussion :

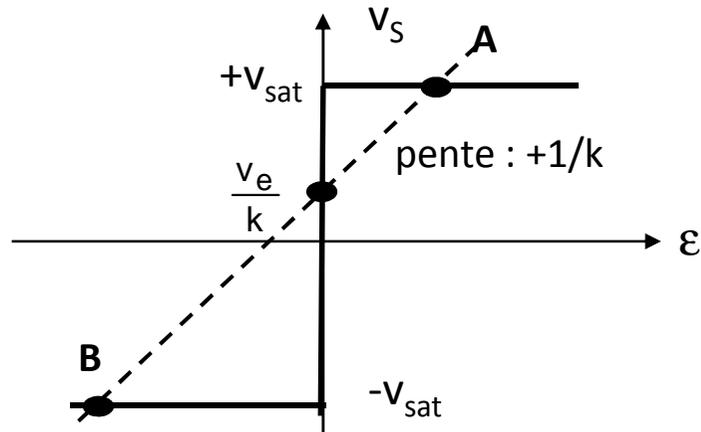
Un point de fonctionnement :
 $\varepsilon = 0$ donc $V_+ = V_-$

L'amplificateur opérationnel : RESUME

**Fonctionnement non linéaire :
montage avec réaction positive**



Représentation graphique :



Mise en équation :

- $V_- = V_e$
- On a diviseur de tension en V_+ :

$$v_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_s = k v_s$$

$$\Rightarrow \epsilon = V_+ - V_- = k v_s - v_e$$

$$\Rightarrow v_s = \frac{v_e}{k} + \frac{\epsilon}{k} \quad \text{droite de pente } 1/k$$

Discussion :

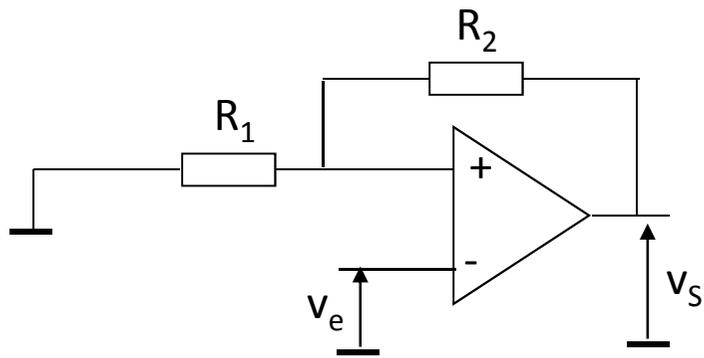
v_e/k n'est pas un point de fonctionnement stable :

$\epsilon > 0$ conduit à $V_s = +V_{\text{sat}}$

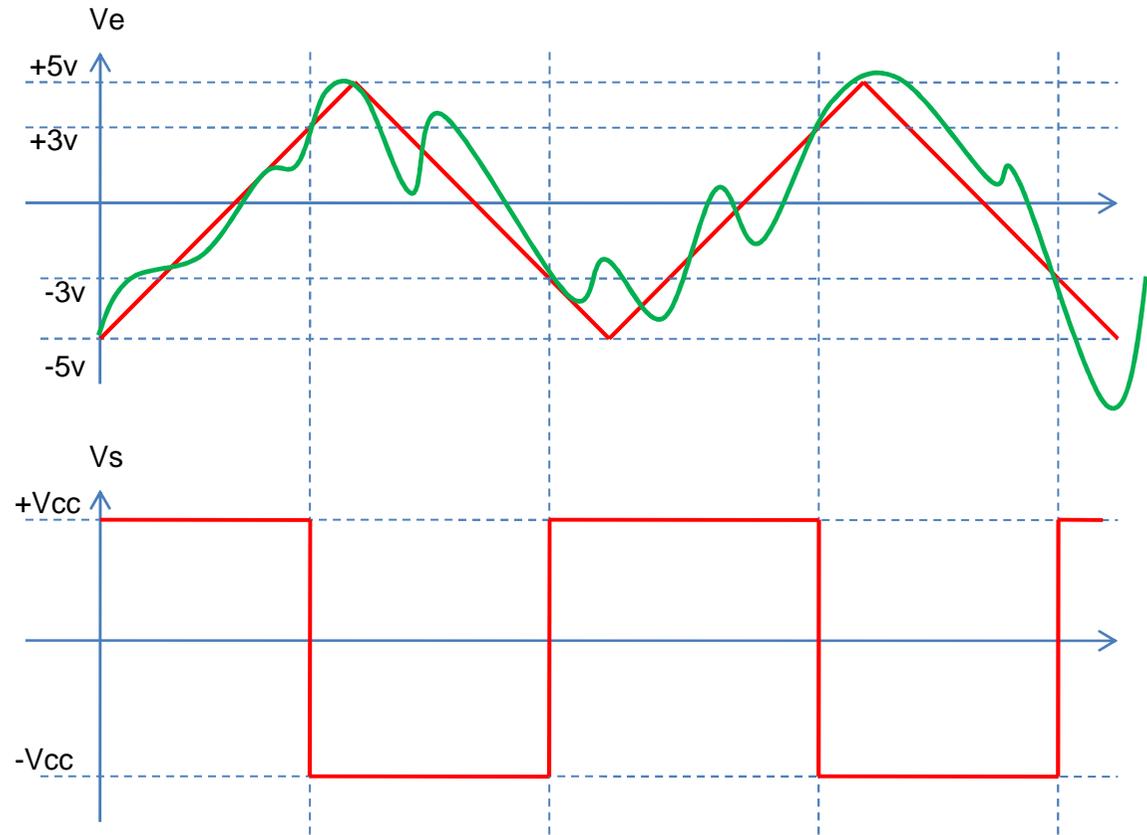
$\epsilon < 0$ conduit à $V_s = -V_{\text{sat}}$

$R_1=10K\Omega$, $R_2=20K\Omega$
 $+V_{cc}=10v$, $-V_{cc}=-10v$

Exercice : Trigger de Schmitt

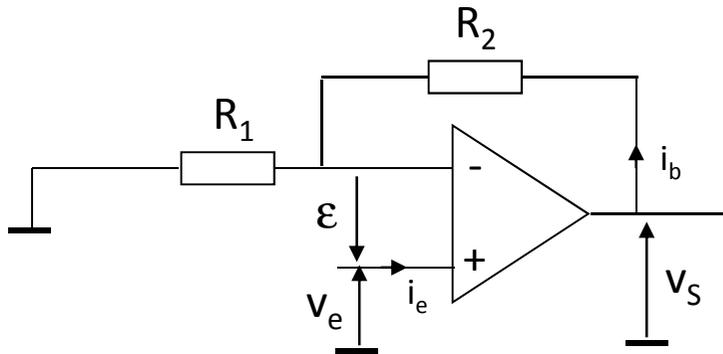


Mise en forme d'un signal numérique
Suppression de « parasites »



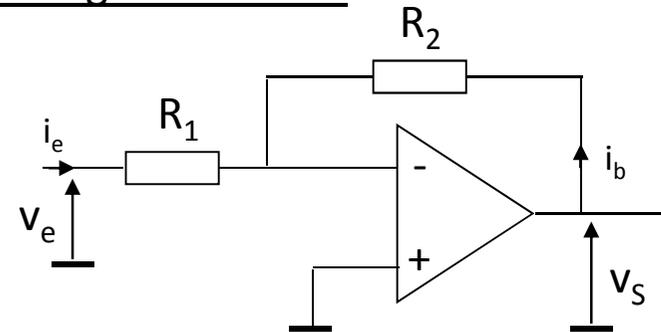
I L'amplificateur opérationnel : montages linéaires

Montage non inverseur :



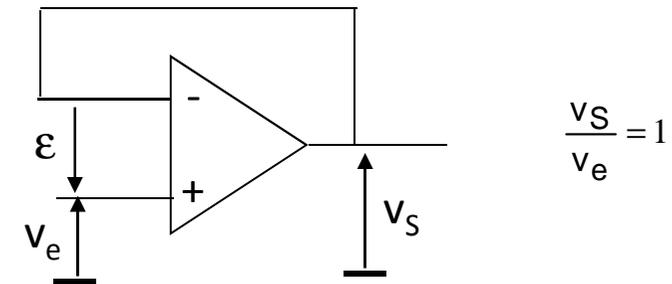
- $\frac{v_S}{v_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$ fonction de transfert
- Impédance d'entrée : $Z_e = \frac{v_e}{i_e} = \infty$ car $i_e \Rightarrow 0$
- Impédance de sortie : $Z_S = \left. \frac{v_S}{i_S} \right|_{v_e=0} = 0$

Montage inverseur :



- $\frac{v_S}{v_e} = -\frac{R_2}{R_1}$ fonction de transfert
- Impédance d'entrée : $Z_e = \frac{v_e}{i_e} = R_1$
- Impédance de sortie infinie

Montage suiveur :

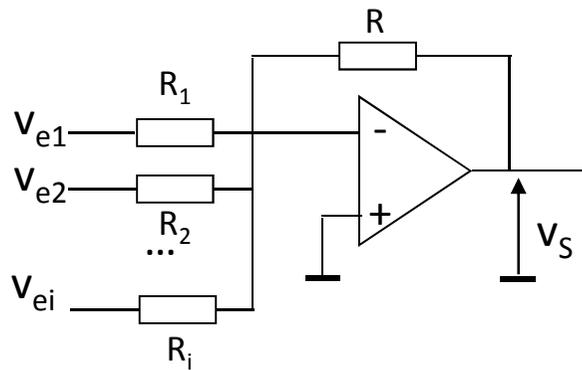


$$\frac{v_S}{v_e} = 1$$

II. L'amplificateur opérationnel : montages linéaires

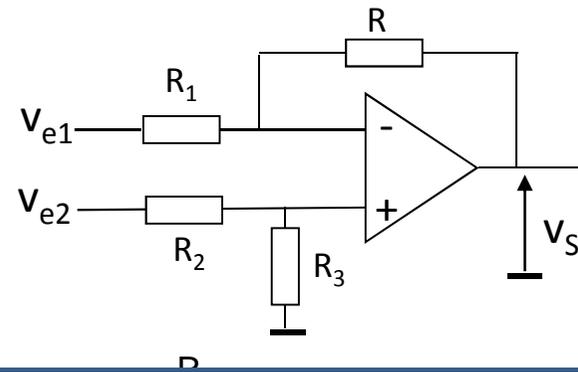
Exercices : Montage sommateurs :

Additionneur inverseur :



Calculer $V_S = f(V_{e1} \dots V_{ei}, R \dots)$

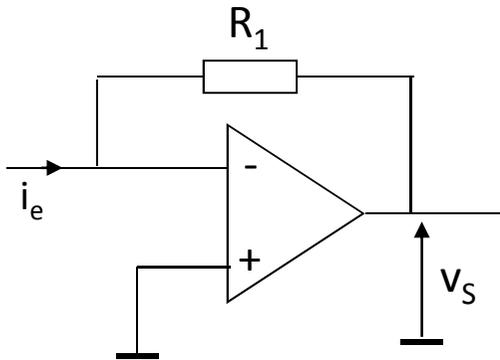
Soustracteur :



Calculer $V_S = f(V_{e1}, V_{e2}, R \dots)$

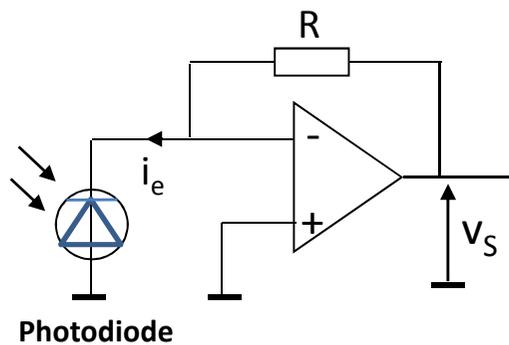
II. L'amplificateur opérationnel : montages linéaires

Convertisseur courant-tension :



Impédances d'entrée infinie et de sortie nulle

Application :



AN : $i_e = 10\mu\text{A}$
 $R = 1\text{M}\Omega$
 $V_S = 10\text{V}$

Calculer $V_S = f(i, R)$

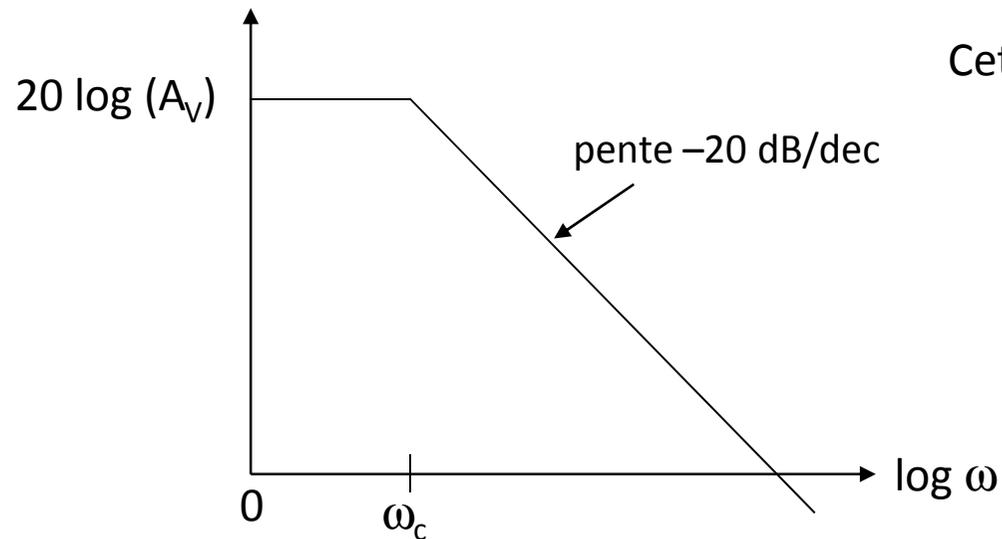
III. L'amplificateur opérationnel : comportement en fréquence

*Avertissement : Pour comprendre le fonctionnement en fréquence d'un AOP
Il faut abandonner le modèle parfait*

Par construction le comportement en fréquence de l'AOP est de type passe-bas avec :

- une fréquence de coupure (ω_c) de l'ordre de **10 Hz**
- un gain en tension A_v important (et non plus infini) de l'ordre de **10⁵**

Ce qui conduit au diagramme de Bode en gain :

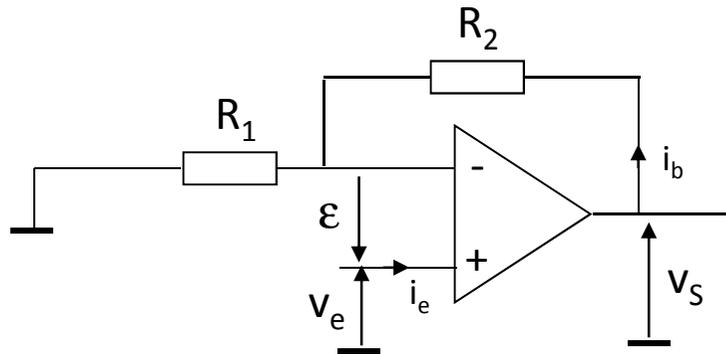


Cette fonction de transfert s'écrit :

$$H(j\omega) = \frac{A_v}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_C}\right)}$$

III. L'amplificateur opérationnel : comportement en fréquence

Comportement en fréquence du montage non inverseur (1/2) :



Mise en équation :

- $v_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_S = kV_S$

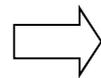
- $H(j\omega) = \frac{A_V}{\left(1 + j\frac{\omega}{\omega_C}\right)}$ donc

$$V_S = H(j\omega)\epsilon = H(j\omega)(V_e - V_-)$$

$$V_S = H(j\omega)(V_e - kV_S)$$

Fonction de transfert :

$$\frac{V_S}{V_e} = \frac{\frac{A_V}{1 + j\frac{\omega}{\omega_C}}}{1 + k\left(\frac{A_V}{1 + j\frac{\omega}{\omega_C}}\right)} = \frac{\frac{A_V}{1 + j\frac{\omega}{\omega_C}}}{\frac{1 + j\frac{\omega}{\omega_C} + kA_V}{1 + j\frac{\omega}{\omega_C}}} = \frac{\frac{A_V}{1 + kA_V}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_C(1 + kA_V)}} = \frac{A_V'}{1 + j\frac{\omega}{\omega_C'}}$$



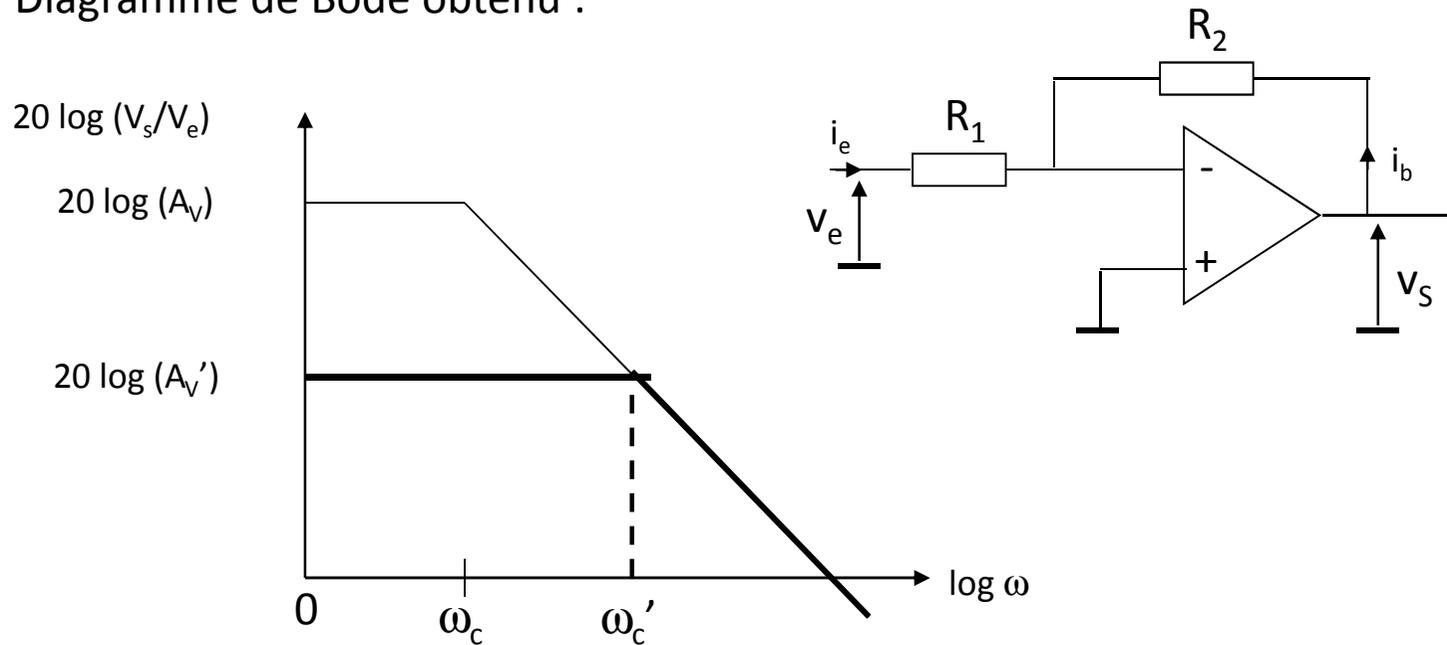
$$\left| \begin{aligned} A_V' &= \frac{A_V}{1 + kA_V} \approx \frac{1}{k} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \\ \omega_C' &= (1 + kA_V)\omega_C \approx kA_V\omega_C \end{aligned} \right.$$

car $A_V \approx 10^5$

III. L'amplificateur opérationnel : comportement en fréquence

Comportement en fréquence du montage non inverseur (2/2) :

Diagramme de Bode obtenu :

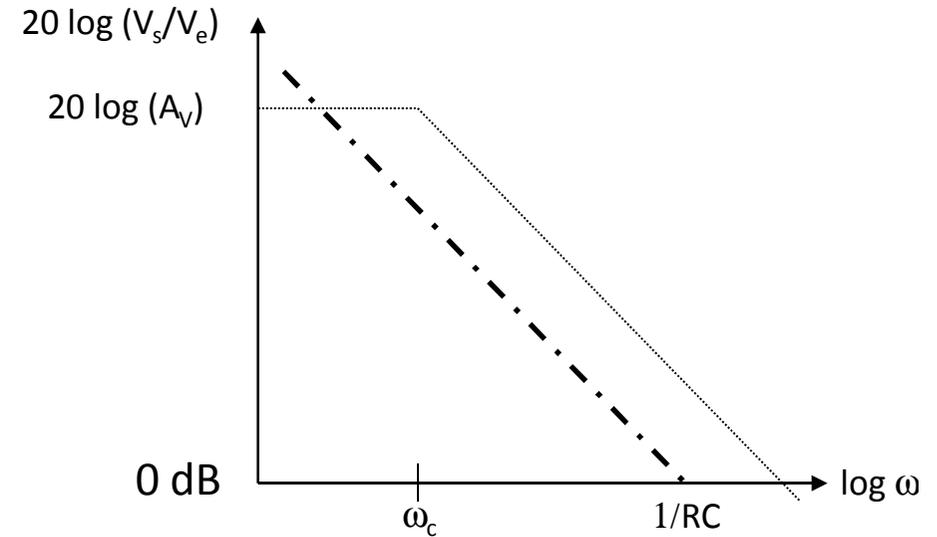
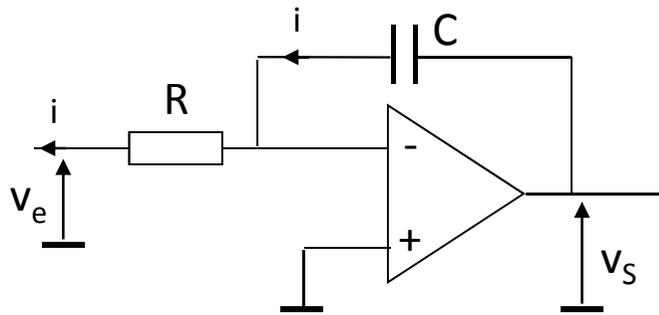


On constate que :

le produit gain bande est constant puisque : $A_V \omega_c = A_V' \omega_c'$

III. L'amplificateur opérationnel : comportement en fréquence

Montage intégrateur ou passe-bas (1/2) :



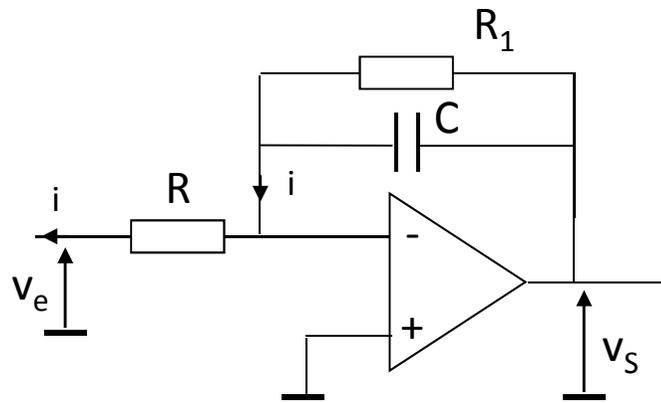
$$\frac{v_s}{v_e} = -\frac{Z_C}{Z_R} = -\frac{1}{jC\omega R} = -\frac{1}{jRC\omega} = -\frac{1}{j\frac{\omega}{\omega_a}} \quad \text{avec} \quad \omega_a = \frac{1}{RC}$$

Calculer $V_s=f(t)$ si $V_e = \text{cste}$

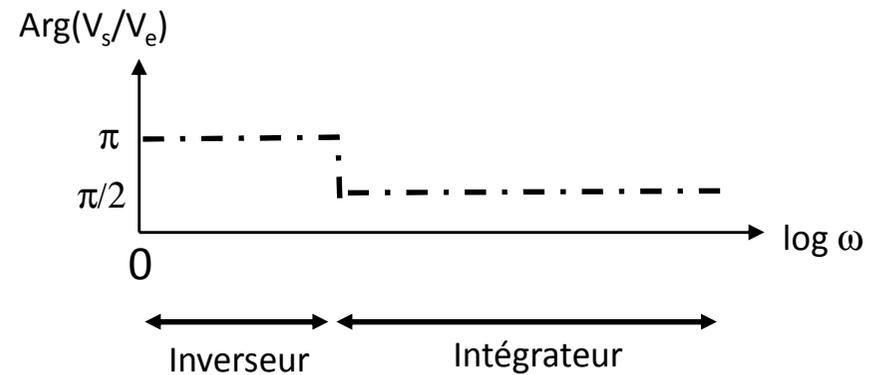
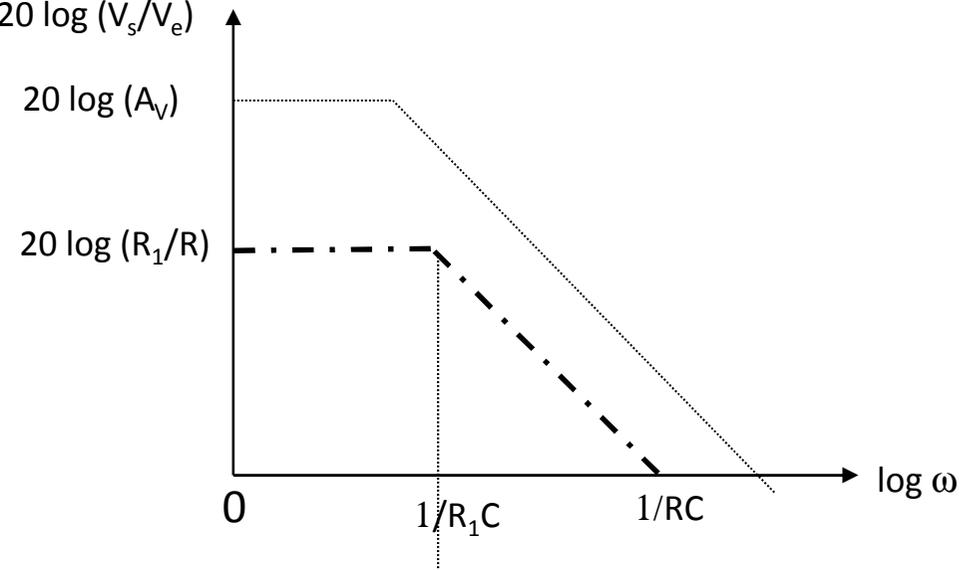
III. L'amplificateur opérationnel : comportement en fréquence

Montage intégrateur ou passe-bas (2/2) : $20 \log (V_s/V_e)$

=> limitation du gain à basses fréquences

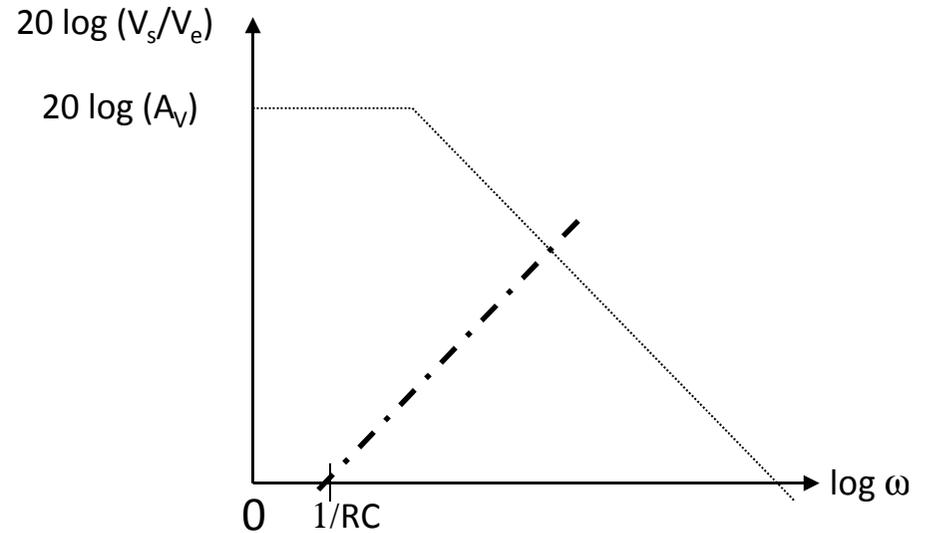
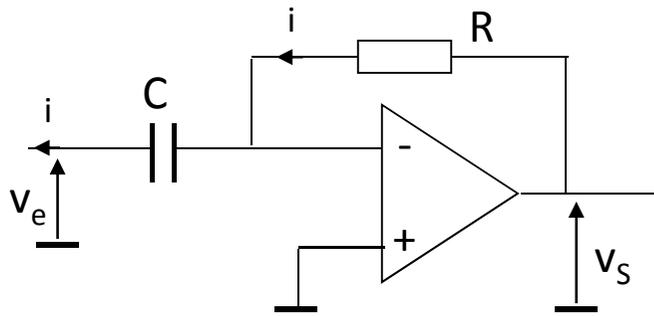


$$\frac{v_s}{v_e} = -\frac{Z_C // R}{Z_R} = -\frac{R_1}{R} \left(\frac{1}{1 + jR_1C\omega} \right)$$



III. L'amplificateur opérationnel : comportement en fréquence

Montage dérivateur ou passe-haut (1/2) :



$$\frac{v_s}{v_e} = -\frac{Z_R}{Z_C} = -jRC\omega = -j\frac{\omega}{\omega_a} \quad \text{avec} \quad \omega_a = \frac{1}{RC}$$

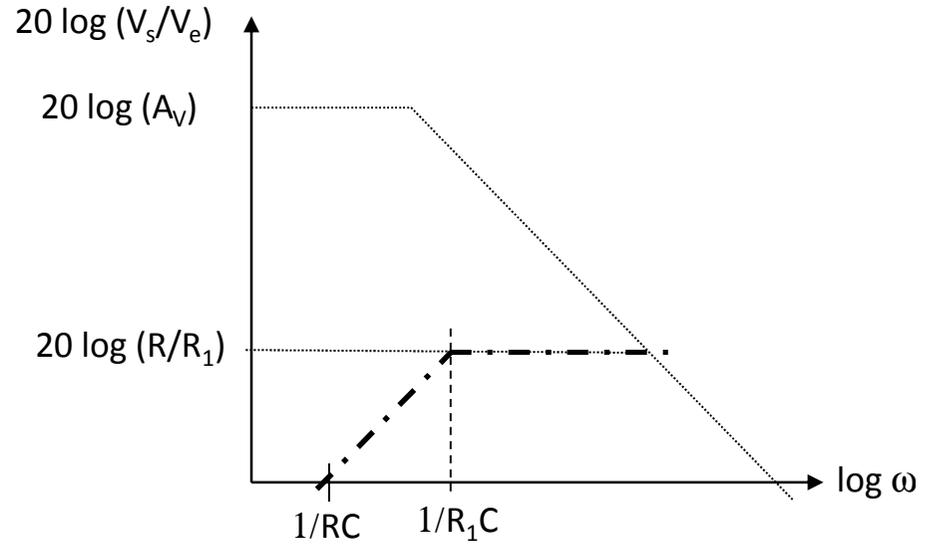
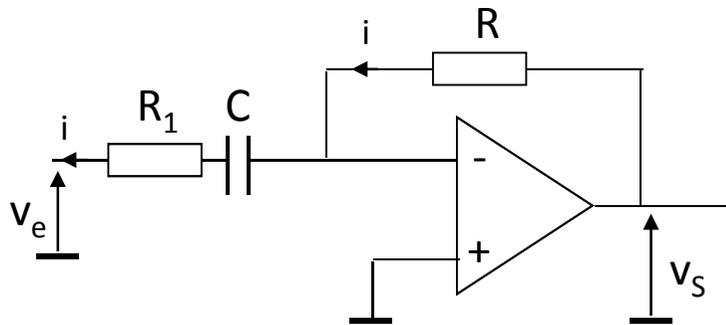
$$i = -C \cdot \frac{dV_e}{dt}$$

$$V_s = R \cdot i = R \cdot C \cdot \frac{dV_e}{dt}$$

III. L'amplificateur opérationnel : comportement en fréquence

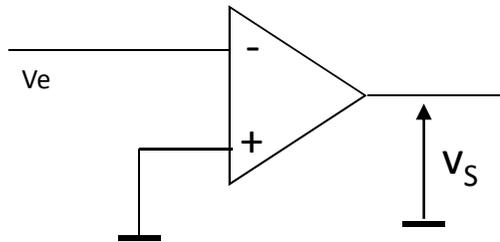
Montage dérivateur ou passe-haut (2/2) :

=> limitation du gain à hautes fréquences



$$\frac{v_s}{v_e} = -\frac{jRC\omega}{1 + jR_1C\omega} = -\frac{R}{R_1} \frac{jR_1C\omega}{1 + jR_1C\omega}$$

III. Comparateur



Ici la référence est 0v

Le principe est simple :

si $v_e > 0v$ $V_s = +v_{sat}$

si $v_e < 0v$ $V_s = -v_{sat}$

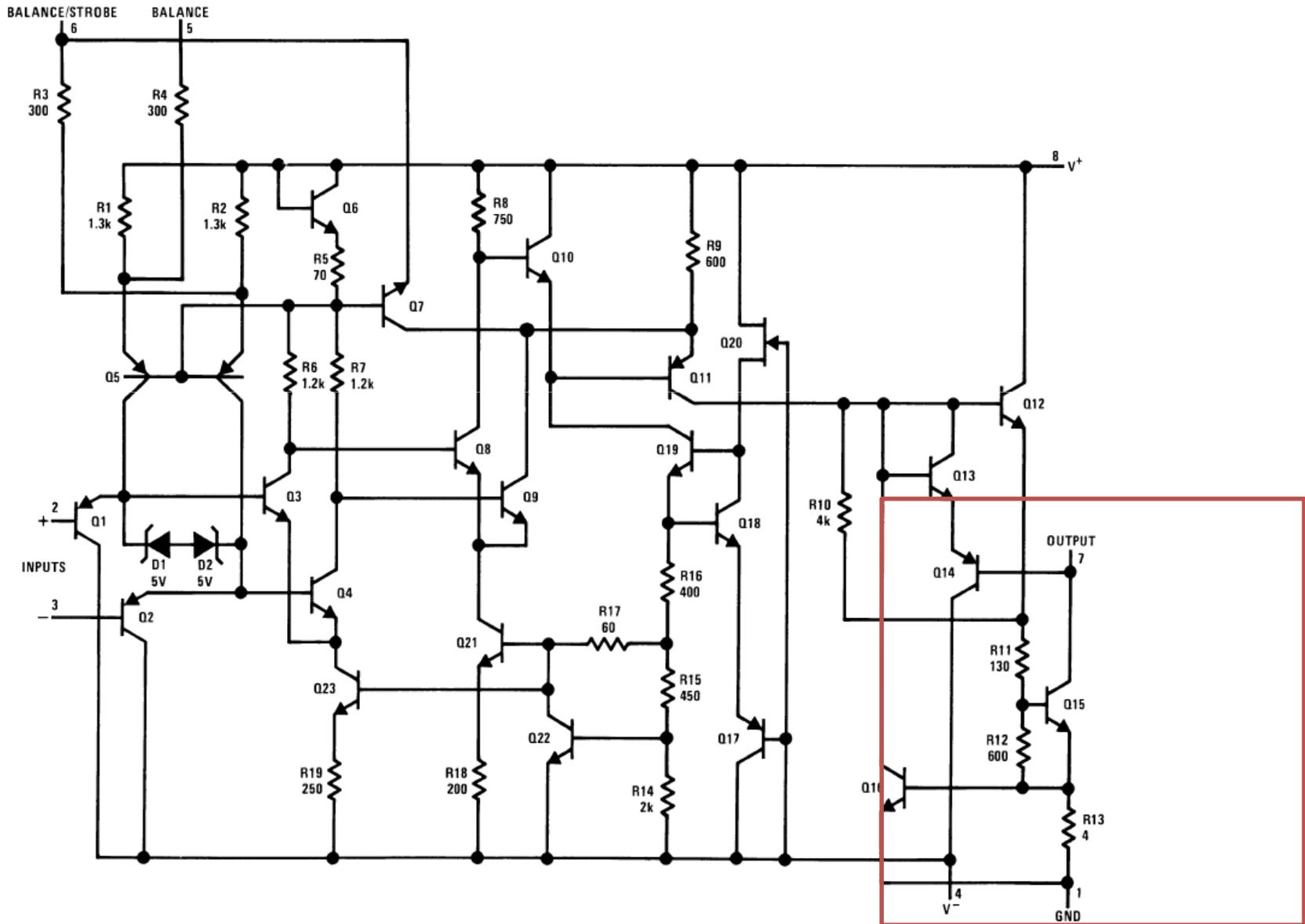
Il existe des amplificateurs utilisables uniquement en mode comparaison, les comparateurs, ils possèdent généralement une sortie collecteur ouvert et possède une grande vitesse de commutation. (ex :LM311)

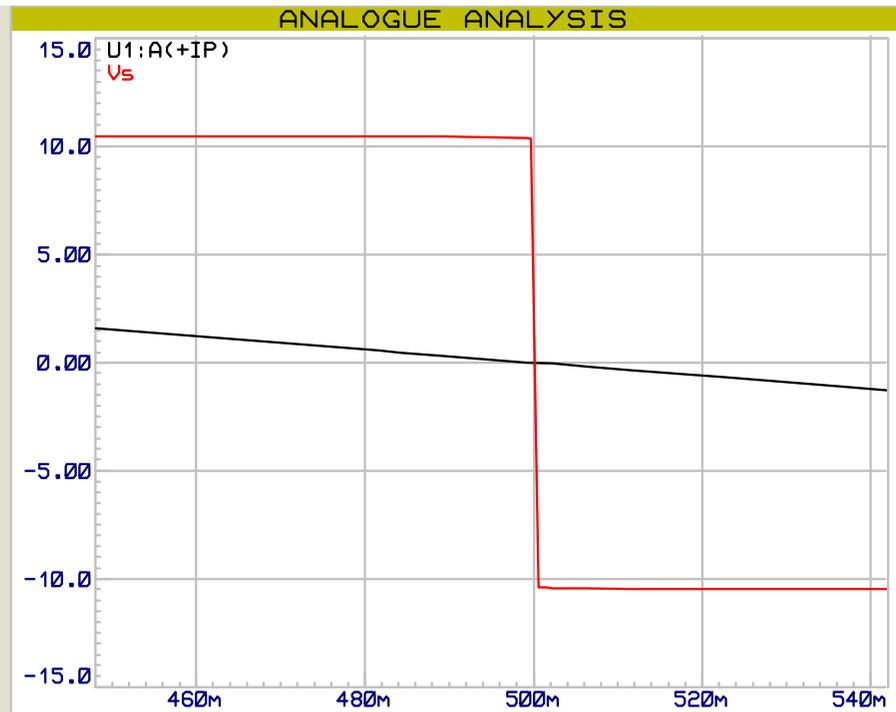
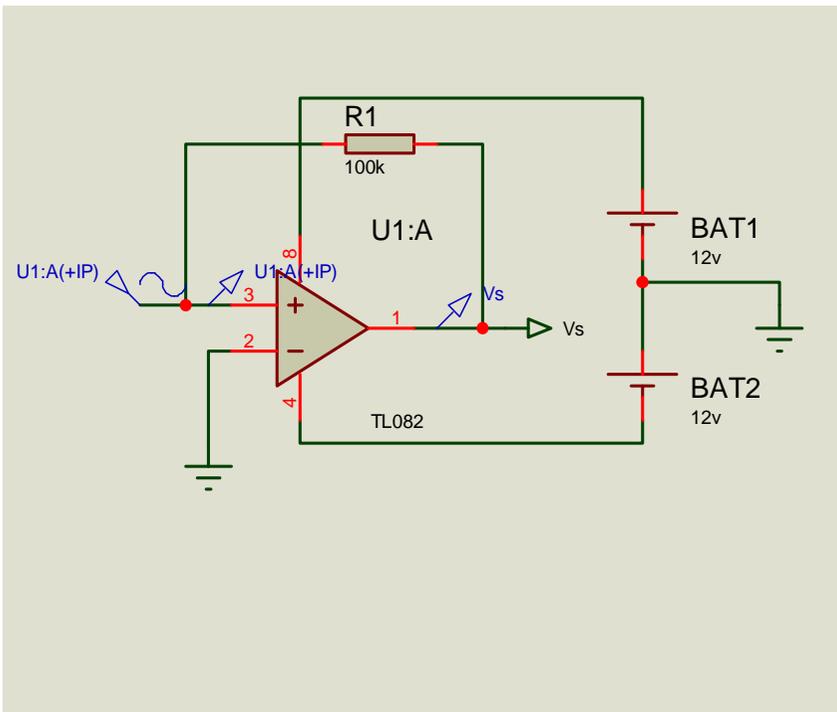
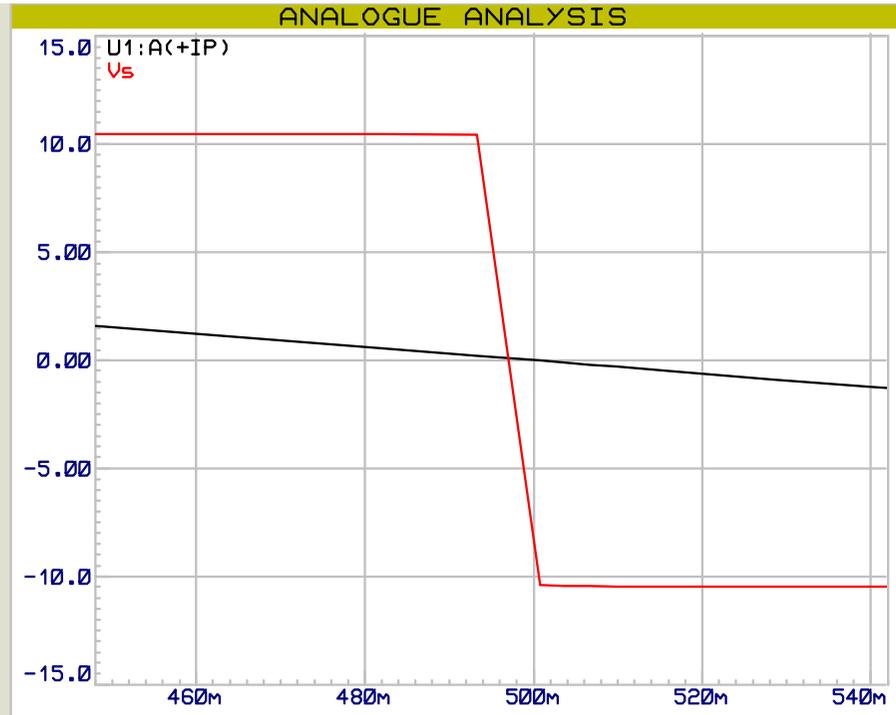
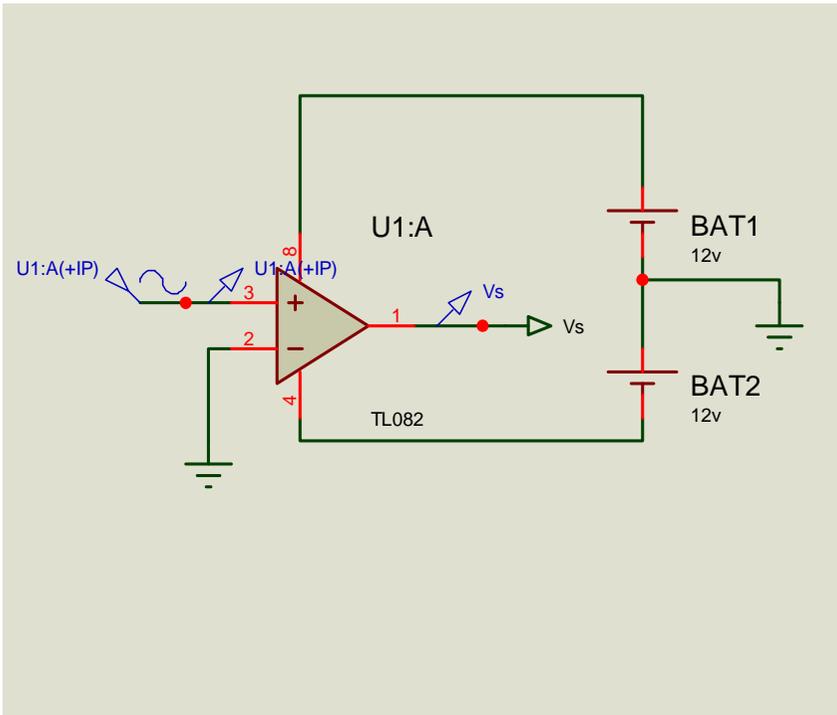
Une réaction positive (résistance entre v_s et v_e permet d'améliorer le temps de commutation (pas de phase linéaire).



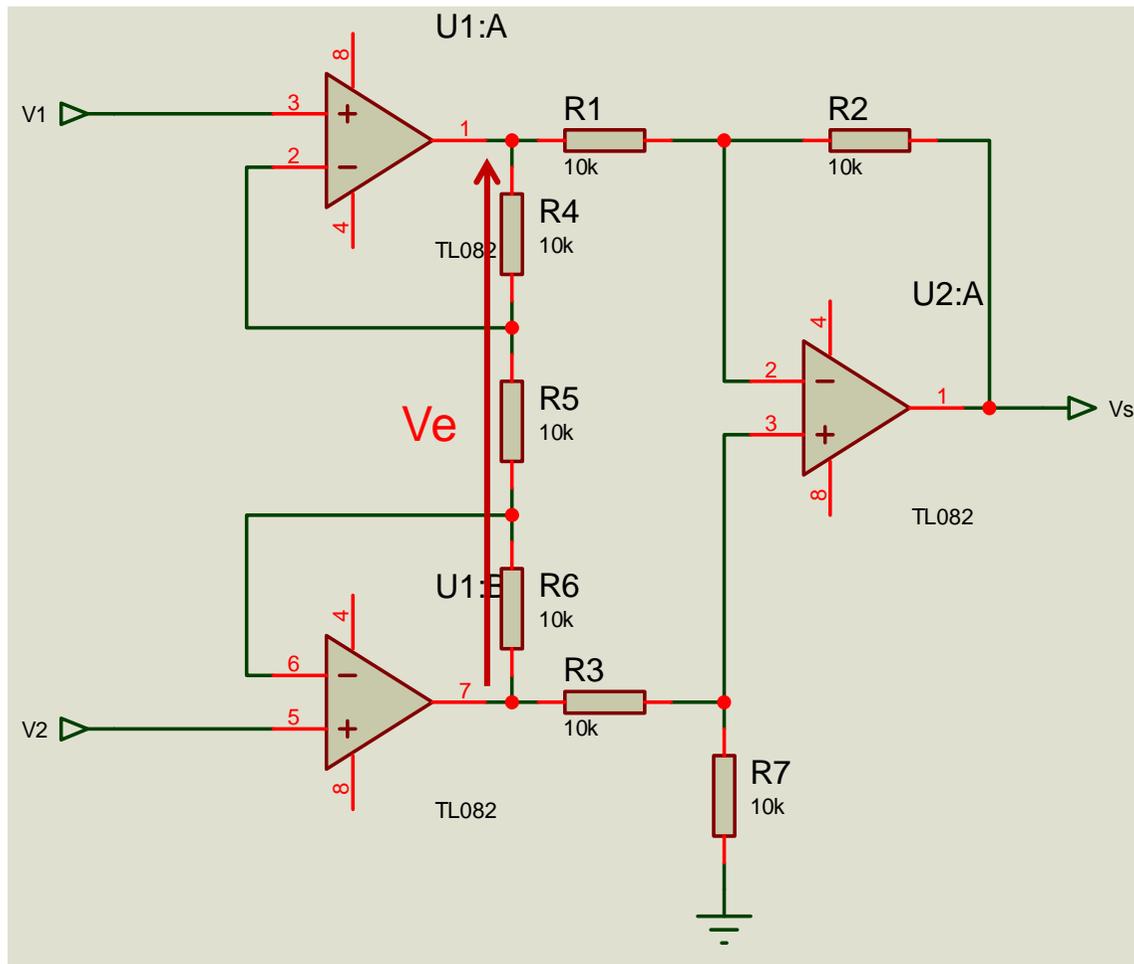
LM111/LM211/LM311
Voltage Comparator

LM311 sortie collecteur ouvert





Ampli d'instrumentation



Les amplificateurs sont alimentés entre +Vcc et -Vcc

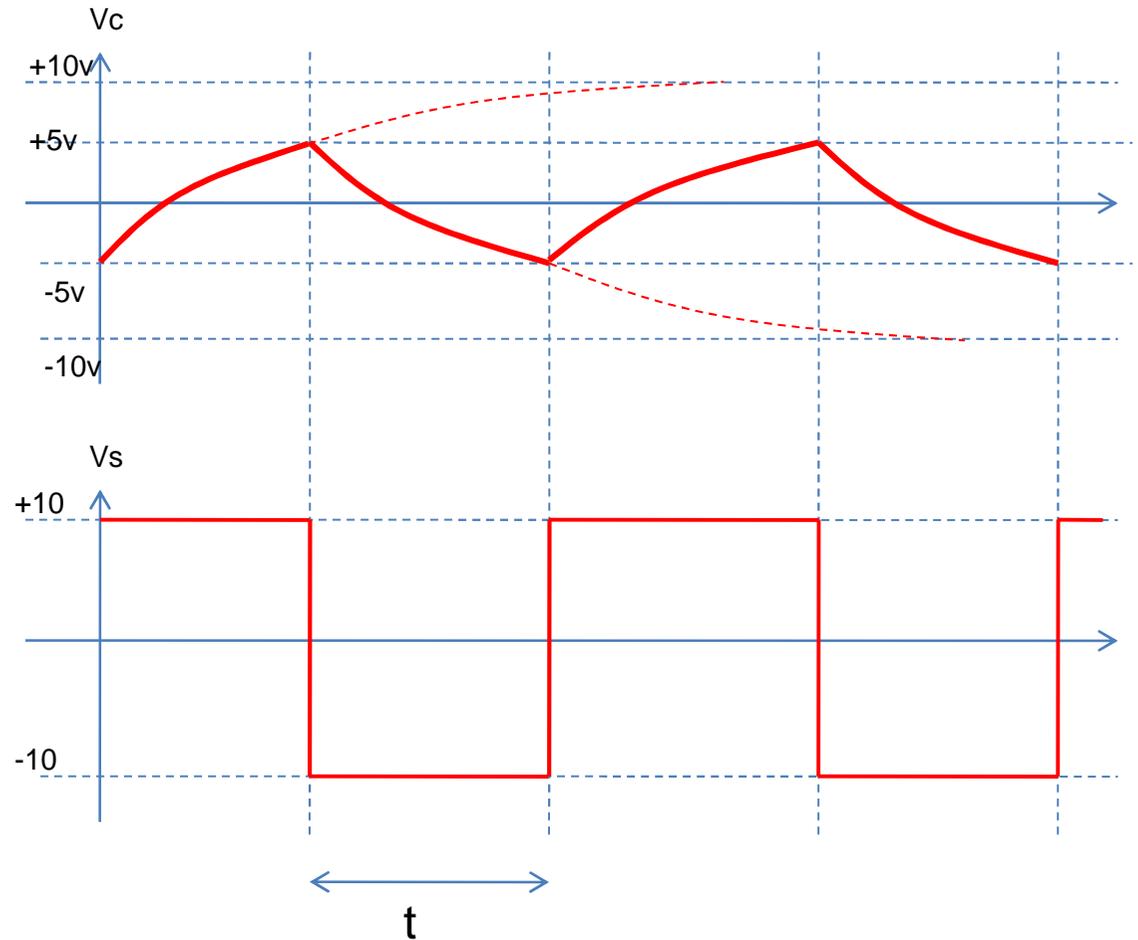
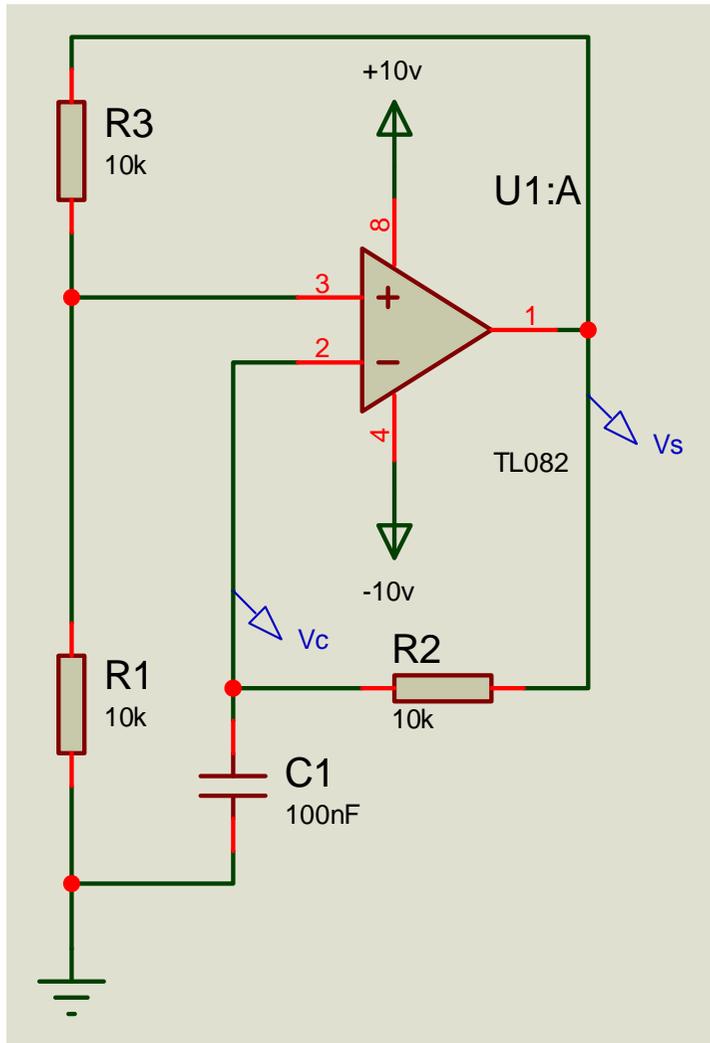
$$\text{Calculer } V_s = f(V_1 - V_2)$$

L'amplification peut être réglé par R5

Le TRMC dépend des dérives des trois amplificateurs, l'amplificateur d'instrumentation est généralement réalisé sur un seul substrat (ex : [AD620](#))

L'impédance d'entrée est très grande.

Production de signaux : multivibrateur astable



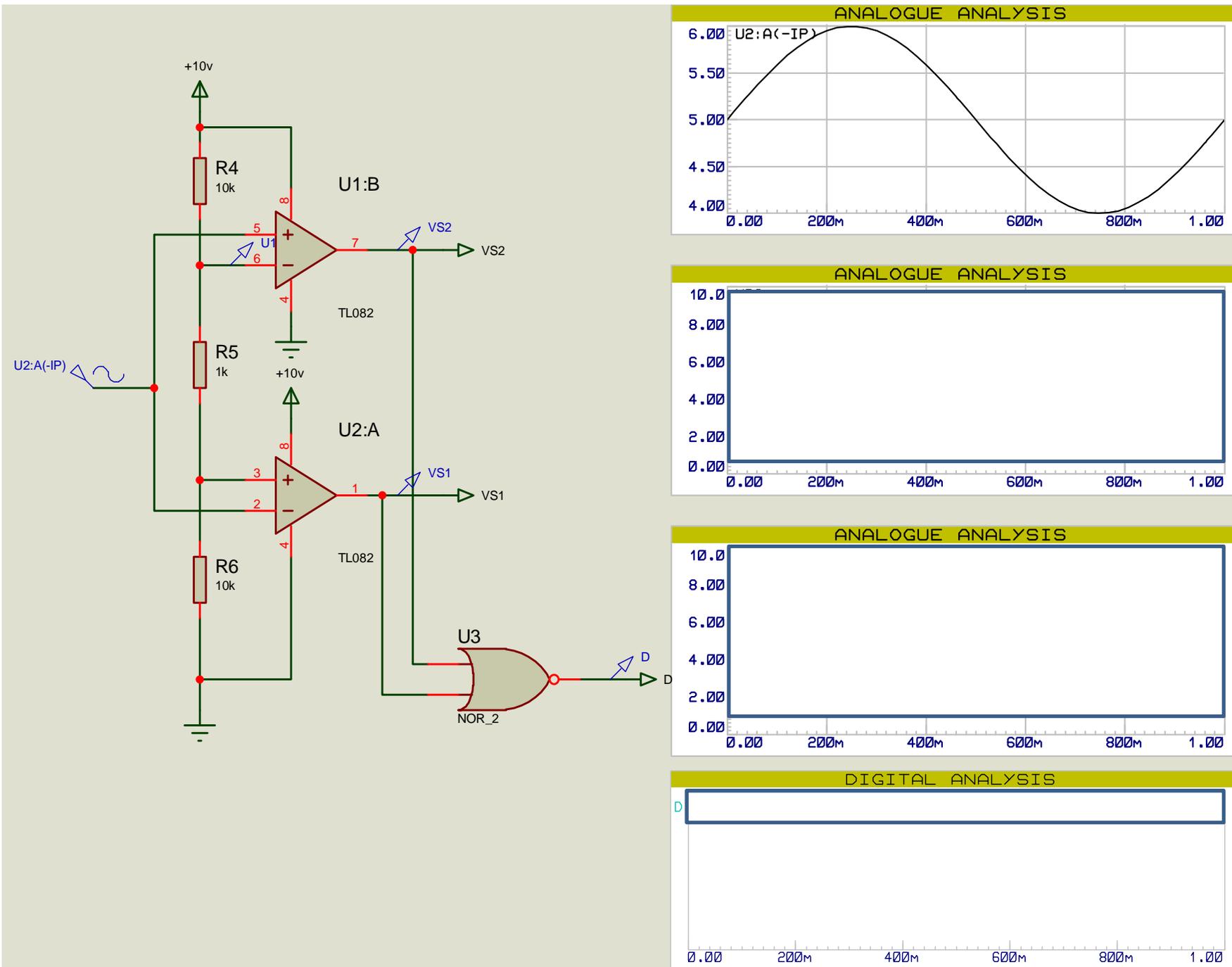
$$\frac{\Delta V_c}{\Delta U} = 1 - e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} \quad t = -\tau \cdot \ln\left(1 - \frac{\Delta V_c}{U}\right) \quad t = 1,1mS$$

Tracer Vc et Vs

Vc(0)=-5v

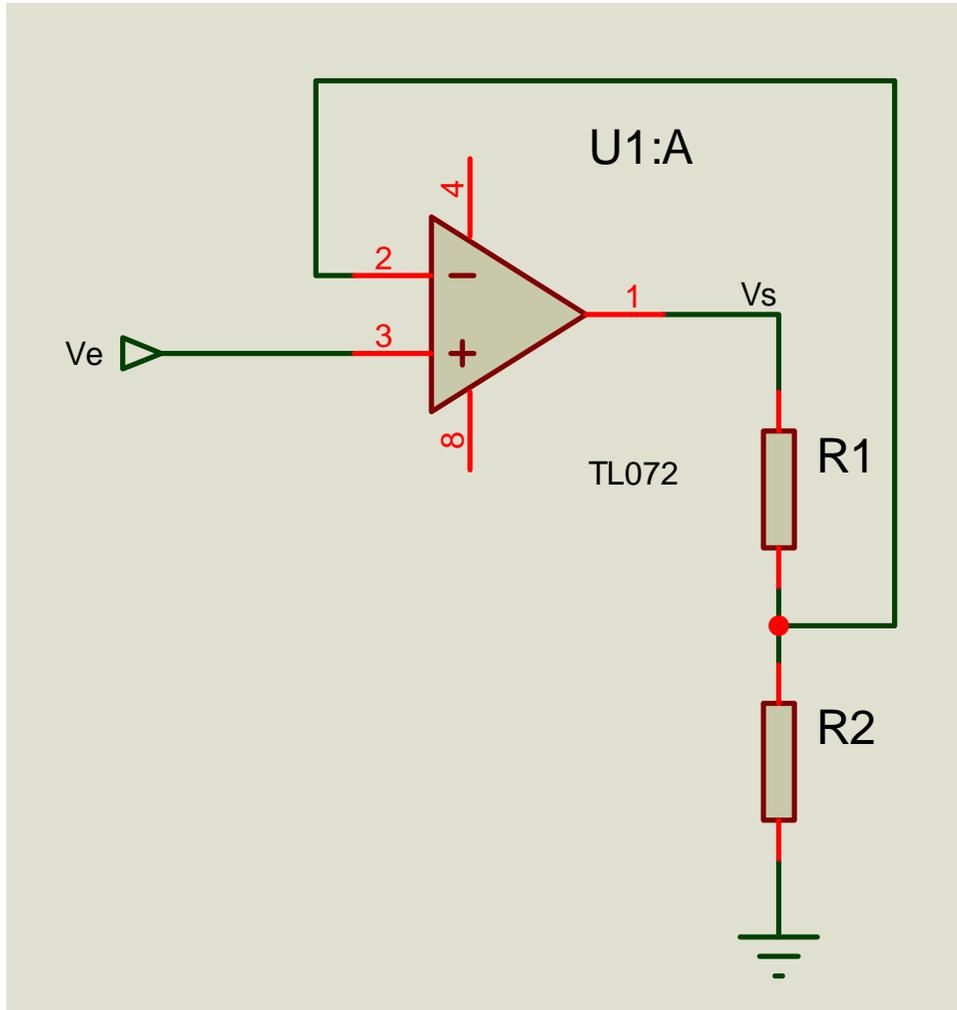
Vs(0)=+10v

Calculer t



Comparateur à fenêtre (comparateur_fenestres.dsn)

Exemples de fonctions à AOP



Conversion tension courant

R_1 représente la charge

$$I_s = V_e / R_2$$

I_s ne dépend pas de R_1 .

Maintenant ...on peut tout faire ... ou presque

