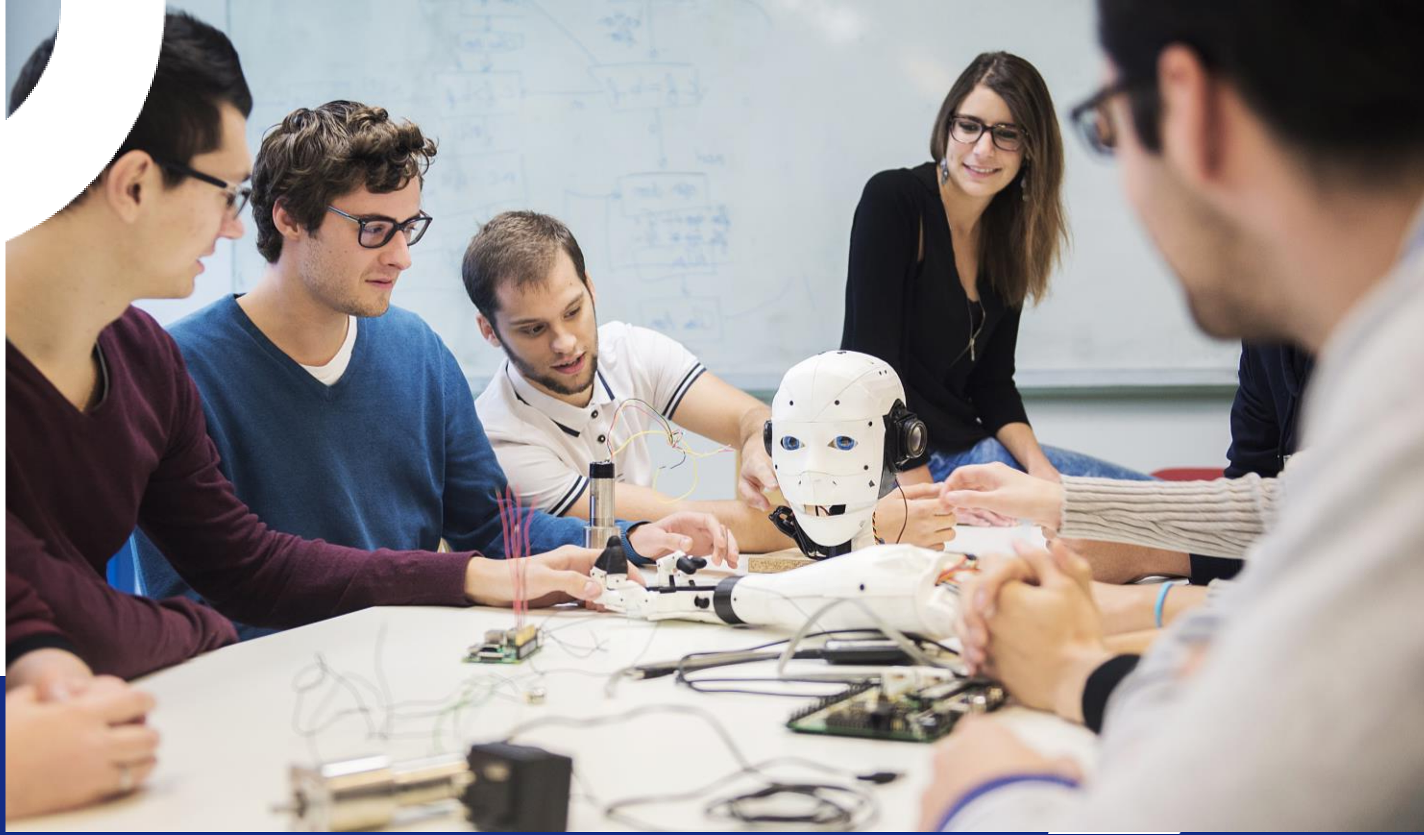
ESIEE PARIS

L'ÉCOLE DE L'INNOVATION TECHNOLOGIQUE



Traitement de l'information analogique

Chapitre 2 : L'amplificateur opérationnel

Corinne Berland

Une école de CCI PARIS ILE-DE-FRANCE EDUCATION

Université Gustave Eiffel

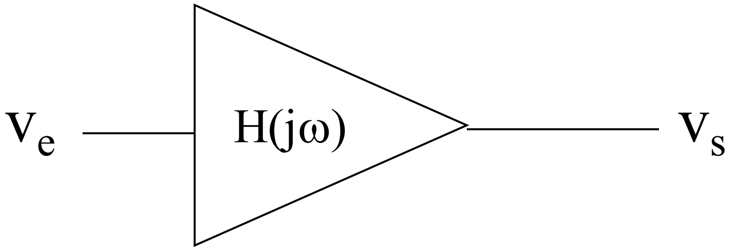
Introduction

- Chapitre 1 : Montages en régime sinusoïdal établi
  1. Les sources sinusoïdales
  2. Régime établi et notation complexe
  3. Les phaseurs – relation avec les éléments passifs
  4. Lois de Kirchhoff en régime établi
  5. Fonctions de transfert
  6. Diagrammes de Bode : 1er ordre
  7. Fonctions de filtrage
- **Chapitre 2 : l'amplificateur opérationnel**
  1. L'amplificateur opérationnel : principe
  2. Fonctionnement en amplificateur
  3. Fonctionnement en oscillateur
  4. Fonctionnement en comparateur
- Chapitre 3 : La diode
  1. Le fonctionnement de la diode PN
  2. Modèles équivalents de la diode
  3. Circuits élémentaires
- Chapitre 4 : le transistor bipolaire
  1. Le fonctionnement du transistor
  2. Modèle équivalent petit signal du transistor
  3. L'amplificateur à transistor bipolaire
  4. Le transistor bipolaire en commutation

1. L'amplificateur opérationnel

Rappel sur la notion de fonction de transfert

- Un circuit à une entrée et une sortie
- La fonction de transfert est le rapport entre la grandeur de sortie et la grandeur d'entrée



$$H(j\omega) = \frac{V_s(j\omega)}{V_e(j\omega)}$$

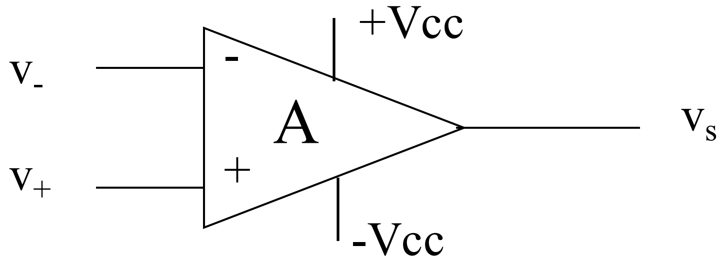
- Module de la fonction de transfert : $|H(j\omega)| = \left|\frac{V_s(j\omega)}{V_e(j\omega)}\right|$
- Module en décibel (dB) : $20Log_{10}|H(j\omega)| = 20Log_{10}\left|\frac{V_s(j\omega)}{V_e(j\omega)}\right|$

1. L'amplificateur opérationnel

- Amplificateur opérationnel : circuit alimenté (+Vcc,-Vcc)

  ✓ Deux entrées : V_+ et V_-

  ✓ Une sortie : V_s



- La sortie dépend de ce qui rentre sur V_+ et V_-

  ✓ Entrée de mode différentiel : $V_{ed} = V_+ - V_-$

  ✓ Entrée de mode commun : $V_{ec} = V_+ + V_-$

- La tension de sortie est de la forme : $V_s = A_{vd}V_{ed} + A_{vc}V_{ec}$

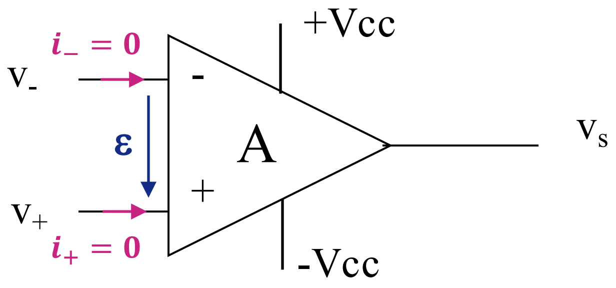
  ✓ Gain de mode commun : A_{vc}

  ✓ Gain de mode différentiel : A_{vd}

1. L'amplificateur opérationnel

Amplificateur différentiel : cas idéal

- On ne travaille qu'avec le gain de mode différentiel



  - ✓ Gain de mode commun nul : $A_{vc} = 0$
  - ✓ Gain de mode différentiel : $A_{vd} = A$

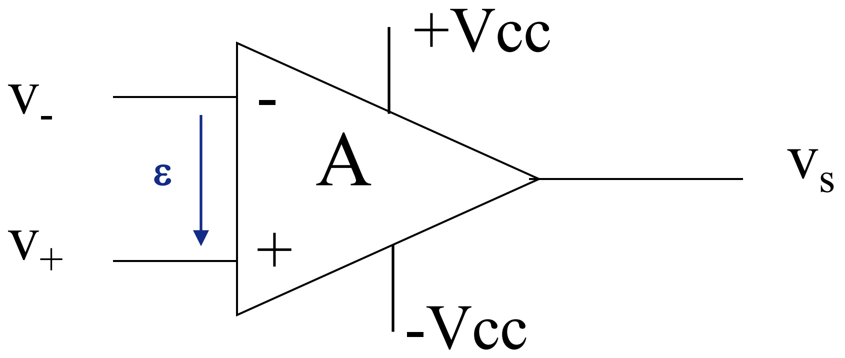
$$V_s = A(V_+ - V_-) = A\varepsilon$$

  - ✓ La tension de sortie est égale à l'entrée dite différentielle multipliée par un gain A

- Condition sur les impédances
  - ✓ Impédance d'entrée infinie
    - ❖ Il n'y a aucun courant sur les entrées V_+ et V_- : ceci implique $\boldsymbol{I_- = I_+ = 0}$
  - ✓ Impédance de sortie nulle

1. L'amplificateur opérationnel

- Le soucis : A est très grand



  - Comment utiliser une AOP avec A très grand ?
  - Exemple avec un LM356 : $A = 2.10^5$
    - ✓ Pour avoir une tension de sortie Vs=1V ⇒ il faut en entrée une tension égale à

$$\varepsilon = \frac{1}{2.10^5} = 0.5\mu V$$

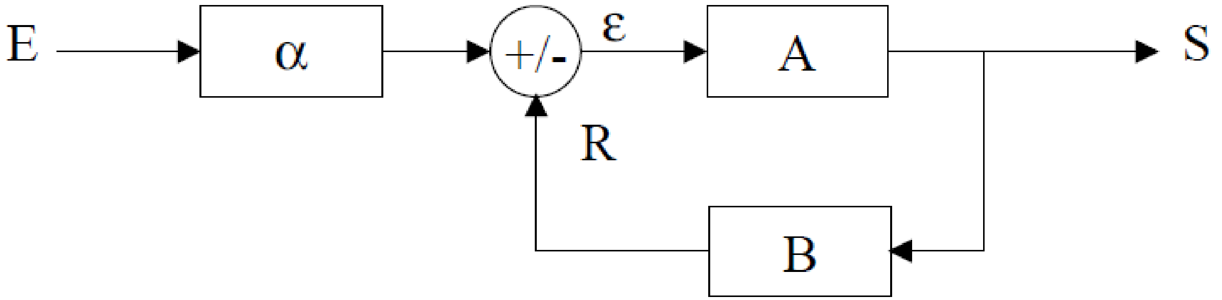
    - ✓ Si en entrée de l'amplificateur, on met un signal d'amplitude plus élevés, par exemple 1V.
      - ❖ La tension de sortie vaut : $V_s = A.\varepsilon$
        - ○ $\varepsilon = 1V \Rightarrow$ théoriquement $Vs = 2.10^5\ Volt$
          - • Impossible : $V_s = +V_{sat}$
        - ○ $\varepsilon = -1V \Rightarrow V_s = -V_{sat}$

Vsat : tension de saturation

- *Correspond à la valeur maximale de tension que peut sortir l'AOP*
- *Valeur un peu inférieure à l'alimentation*

1. L'amplificateur opérationnel

- Il faut utiliser un système à réaction
  - Pour obtenir une tension finie en sortie avec A très grand
    - Il faut ajouter une contre réaction à l'AOP dont l'objectif est de diminuer la tension d'entrée en lui soustrayant une partie de la tension de sortie

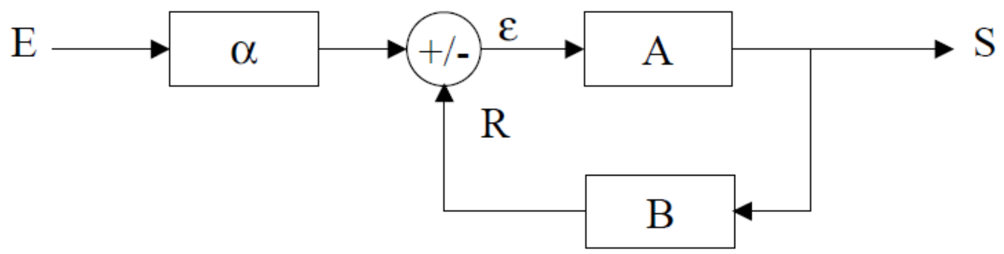


$$S = A.\varepsilon$$
$$R = B.S$$
$$\varepsilon = \alpha.E - R = \alpha.E - B.S$$

$$\Longrightarrow \quad H = \alpha\frac{A}{1 + A.B}$$

1. L'amplificateur opérationnel

- Quel est l'influence de la contre réaction ?
  - Cela dépend de la valeur du dénominateur



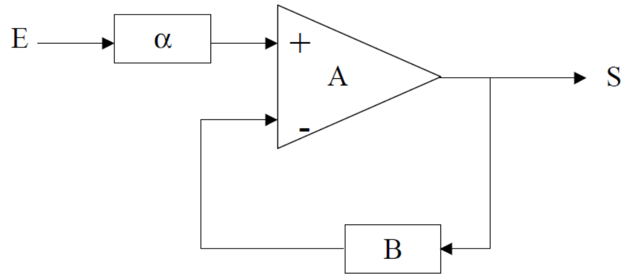
- $$H = \alpha.\frac{A}{1+AB}$$
  - Si $|1 + AB| > 1$: la contre réaction diminue le gain
    - ✓ Si $|AB| \gg 1 \Rightarrow H = \alpha.\frac{A}{1+AB} \approx \alpha.\frac{A}{AB} \approx \frac{\alpha}{B}$
    - ✓ Mode Amplificateur
  - Si $|1 + AB| < 1$: la contre réaction augmente le gain
    - ✓ Comparateur
  - Si $1 + AB = 0$: il y a un signal de sortie « sans » signal en entrée
    - ✓ Oscillateur :

$$|AB| = 1, \arg(A) + \arg(B) = \pi$$

2. Fonctionnement en amplificateur

Contre réaction de l'amplificateur entre la sortie et la patte V_{-}

- Le circuit est en mode amplificateur



✓ Hypothèses :

❖ $\alpha = 1$

❖ A est infini donc : $H = \frac{A}{1+AB} \approx \frac{1}{B}$

❖ Le gain du montage est contrôlé par la contre réaction

✓ Pour faire les calculs des montages, voici les hypothèses :

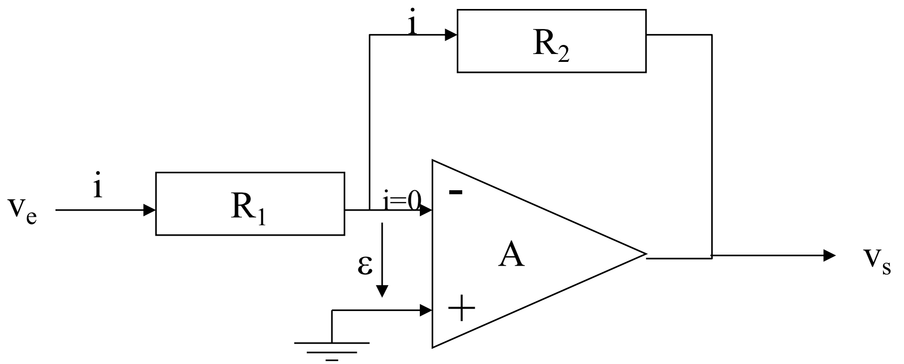
❖ Si A infini : $V_s = A.\varepsilon$

- Pour que V_s soit fini, il faut que $\varepsilon \to 0$.
- On considère que $\boldsymbol{\varepsilon = 0 \Rightarrow V_{+} = V_{-}}$

❖ On se rappelle que : $\boldsymbol{I_{-} = I_{+} = 0}$

2. Fonctionnement en amplificateur

Amplificateur inverseur (AOP idéal)



- Hypothèses :
  - Si A infini : $\boldsymbol{\varepsilon = 0 \Rightarrow V_+ = V_-}$
  - Impédance d'entrée infinie : $\boldsymbol{I_- = I_+ = 0}$

- On regarde le montage :

✓ $V_+ = 0$ donc avec $\varepsilon = 0 \Rightarrow V_+ = V_-$=0

✓ Avec $I_- = I_+ = 0$, le courant dans R_1 et égal au courant dans R_2

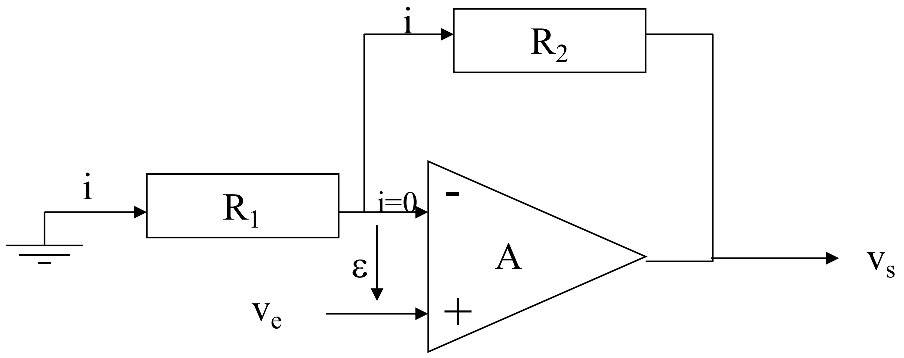
- Equations

✓ Loi des nœuds : $\dfrac{V_e - V_-}{R_1} = \dfrac{V_- - V_s}{R_2}$ $\Rightarrow \dfrac{V_e}{R_1} = -\dfrac{V_s}{R_2}$ $\boxed{\Rightarrow \dfrac{V_s}{V_e} = -\dfrac{R_2}{R_1}}$

✓ Millman : $V_- = \dfrac{\frac{V_e}{R_1}+\frac{V_S}{R_2}}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}} = 0$ $\Rightarrow \dfrac{V_e}{R_1} + \dfrac{V_s}{R_2} = 0$ $\boxed{\Rightarrow \dfrac{V_s}{V_e} = -\dfrac{R_2}{R_1}}$

2. Fonctionnement en amplificateur

▸ Amplificateur non inverseur (AOP idéal)



- Hypothèses :
  - ❖ Si A infini : $\boldsymbol{\varepsilon = 0 \Rightarrow V_+ = V_-}$
  - ❖ Impédance d'entrée infinie : $\boldsymbol{I_- = I_+ = 0}$

- On regarde le montage :

✓ $V_+ = V_e$, donc avec $\varepsilon = 0 \Rightarrow V_+ = V_- = \mathrm{V_e}$

✓ Avec $I_- = I_+ = 0$, le courant dans R_1 et égal au courant dans R_2

- Equations

✓ Loi des nœuds : $\dfrac{0 - V_-}{R_1} = \dfrac{V_- - V_s}{R_2} \quad \Rightarrow \dfrac{V_e}{R_1} + \dfrac{V_e}{R_2} = \dfrac{V_s}{R_2}$

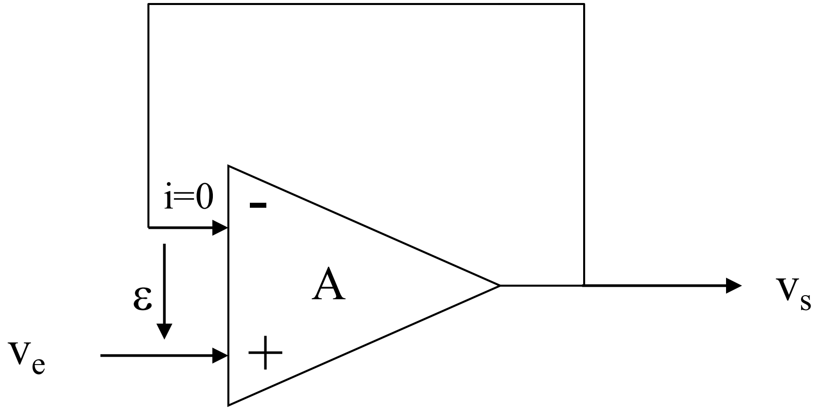
$$\boxed{\Rightarrow \frac{V_s}{V_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1}}$$

✓ Millman : $V_- = \dfrac{\frac{0}{R_1} + \frac{V_S}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = V_e \qquad \Rightarrow V_e\left(\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2}\right) = \dfrac{V_s}{R_2}$

$$\boxed{\Rightarrow \frac{V_s}{V_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1}}$$

2. Fonctionnement en amplificateur

- Le suiveur (AOP idéal)



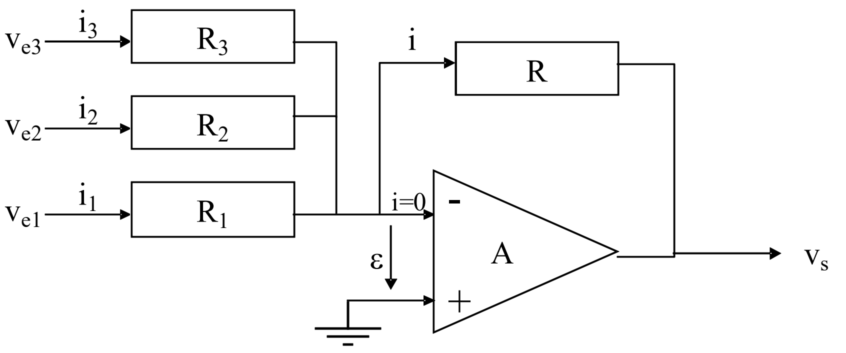
- Hypothèses :
  - Si A infini : $\boldsymbol{\varepsilon = 0 \Rightarrow V_+ = V_-}$
  - Impédance d'entrée infinie : $\boldsymbol{I_- = I_+ = 0}$
- On regarde le montage :
  - ✓ $V_+ = V_e$, donc avec $\varepsilon = 0 \Rightarrow V_+ = V_- = \mathrm{V_e}$
  - ✓ La sortie est directement reliée à V_-:$V_- = V_e = V_s$

$$\boxed{\Rightarrow \frac{V_s}{V_e} = 1}$$

- Le suiveur sert à recopier une tension d'entrée en sortie du montage
  - ✓ Pas d'effet de chute de tension en cascadant deux montages par pont diviseur de tension
    - Exemple : deux filtres RC l'un à la suite de l'autre

2. Fonctionnement en amplificateur

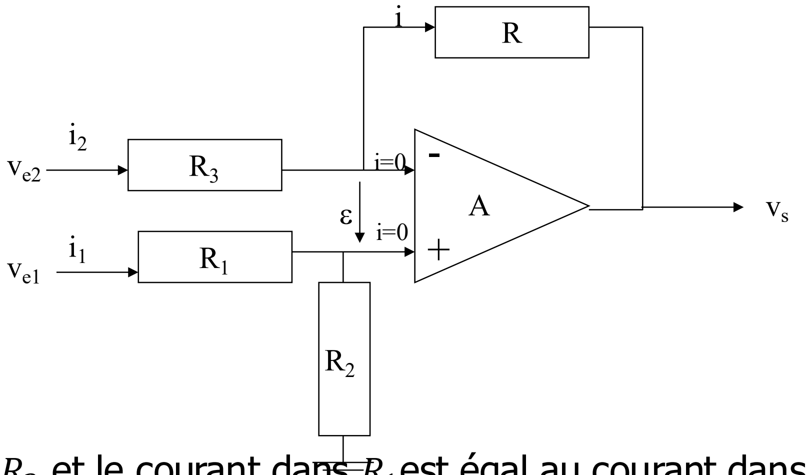
L'additionneur inverseur



- Hypothèses :
  - Si A infini : $\varepsilon = 0 \Rightarrow V_+ = V_-$
  - Impédance d'entrée infinie : $I_- = I_+ = 0$
- On regarde le montage :
  - ✓ $V_+ = 0$, donc avec $\varepsilon = 0 \Rightarrow V_+ = V_-$=0
  - ✓ Avec $I_- = I_+ = 0$, le courant dans R est égal à la somme des courants dans au courant de R_1, R_2, R_3
- Equations :
  - ✓ Loi des nœuds : $\frac{V_{e1} - V_-}{R_1} + \frac{V_{e2} - V_-}{R_2} + \frac{V_{e3} - V_-}{R_3} = \frac{V_- - V_s}{R}$ $\Rightarrow V_S = -\left(\frac{R}{R_1}V_{e1} + \frac{R}{R_2}V_{e2} + \frac{R}{R_3}V_{e3}\right)$
  - ✓ Millman : $V_- = \frac{\frac{V_{e1}}{R_1}+\frac{V_{e2}}{R_2}+\frac{V_{e3}}{R_3}+\frac{V_S}{R}}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R}} = 0$ $\Rightarrow \frac{V_S}{R} = -\left(\frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_{e2}}{R_2} + \frac{V_{e3}}{R_3}\right)$ $\Rightarrow V_S = -\left(\frac{R}{R_1}V_{e1} + \frac{R}{R_2}V_{e2} + \frac{R}{R_3}V_{e3}\right)$
  - ✓ Pour $R_1 = R_2 = R_3 = R \Rightarrow$ $V_S = -(V_{e1} + V_{e2} + V_{e3})$

2. Fonctionnement en amplificateur

▸ Le soustracteur différentiel



- **Hypothèses :**
  - ❖ Si A infini : $\boldsymbol{\varepsilon = 0 \Rightarrow V_+ = V_-}$
  - ❖ Impédance d'entrée infinie : $\boldsymbol{I_- = I_+ = 0}$

- **On regarde le montage :**
  - ✓ $V_+ = V_-$ mais on ne peut rien dire d'autre
  - ✓ Avec $I_- = I_+ = 0$, le courant dans R est égal au courant dans R_3 et le courant dans R_1est égal au courant dans R_2

- **Equations :**
  - ✓ Loi des nœuds :

$$\left.\begin{array}{c} \dfrac{V_{e2} - V_-}{R_3} = \dfrac{V_- - V_s}{R} \\ \dfrac{V_{e1} - V_+}{R_1} = \dfrac{V_+}{R_2} \end{array}\right\} \Rightarrow \begin{cases} V_+\left(1 + \dfrac{R_1}{R_2}\right) = V_{e1} \\ V_S = -\dfrac{R}{R_3} V_{e2} + \dfrac{\left(1 + \dfrac{R}{R_3}\right)}{1 + \dfrac{R_1}{R_2}} V_{e1} \end{cases}$$

  - ✓ Millman :

$$\left.\begin{array}{c} V_- = \dfrac{\frac{V_{e2}}{R_3} + \frac{V_S}{R}}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R}} \\ V_+ = \dfrac{\frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{0}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \end{array}\right\} \Rightarrow \begin{cases} \dfrac{V_S}{R} = V_-\left(\dfrac{1}{R_3} + \dfrac{1}{R}\right) - \dfrac{V_{e2}}{R_3} \\ V_+ = v_- = \dfrac{V_{e1}}{1 + \dfrac{R_1}{R_2}} \end{cases}$$

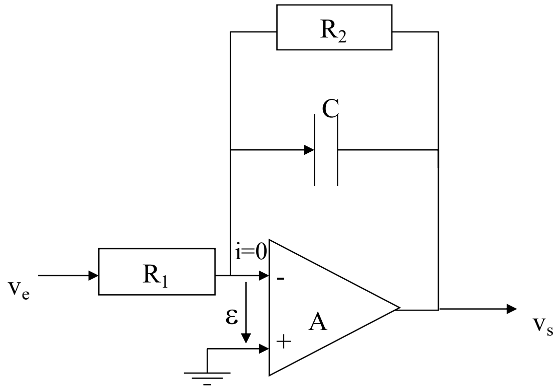
$$\Rightarrow V_S = -\frac{R}{R_3} V_{e2} + \frac{\left(1 + \frac{R}{R_3}\right)}{1 + \frac{R_1}{R_2}} V_{e1}$$

  - ✓ Soustracteur parfait pour :

$$\boxed{k = \frac{R}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow V_s = k(V_{e1} - V_{e2})}$$

2. Fonctionnement en amplificateur

Le filtre du premier ordre



- **Hypothèses :**
  - Si A infini : $\boldsymbol{\varepsilon = 0 \Rightarrow V_+ = V_-}$
  - Impédance d'entrée infinie : $\boldsymbol{I_- = I_+ = 0}$

- **On regarde le montage :**
  - ✓ $V_+ = 0$, donc avec $\varepsilon = 0 \Rightarrow V_+ = V_-$=0
  - ✓ Avec $I_- = I_+ = 0$, le courant dans R_1 est égal à la somme des courants dans R_2 et C

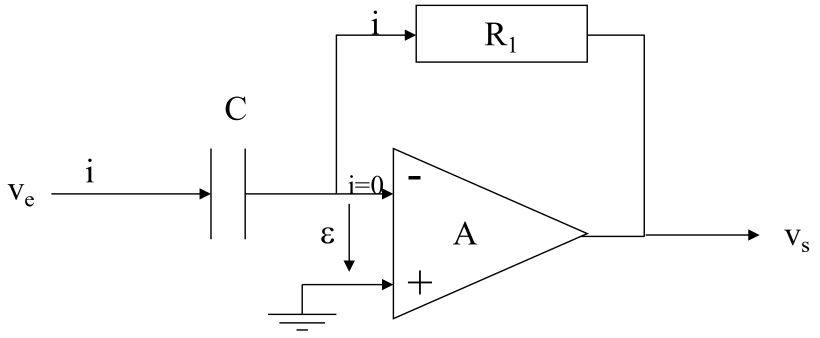
- **Equations :** On se rappelle que $Z_c = \dfrac{1}{jC\omega}$

  - ✓ Loi des nœuds : $\dfrac{V_e - V_-}{R_1} = \dfrac{V_- - V_s}{Z_c} + \dfrac{V_- - V_s}{R_2}$ $\Rightarrow \dfrac{V_S}{V_e} = -\dfrac{R_2}{R_1} \cdot \dfrac{1}{1 + jR_2C\omega}$

  - ✓ Millman : $V_- = \dfrac{\frac{V_e}{R_1} + \frac{V_S}{R_2} + \frac{V_S}{Z_C}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{Z_C}} = 0$ $\Rightarrow V_s\left(\dfrac{1}{R_2} + jC\omega\right) = -\dfrac{V_e}{R_1}$ $\Rightarrow \dfrac{V_S}{V_e} = -\dfrac{R_2}{R_1} \cdot \dfrac{1}{1 + jR_2C\omega}$

2. Fonctionnement en amplificateur

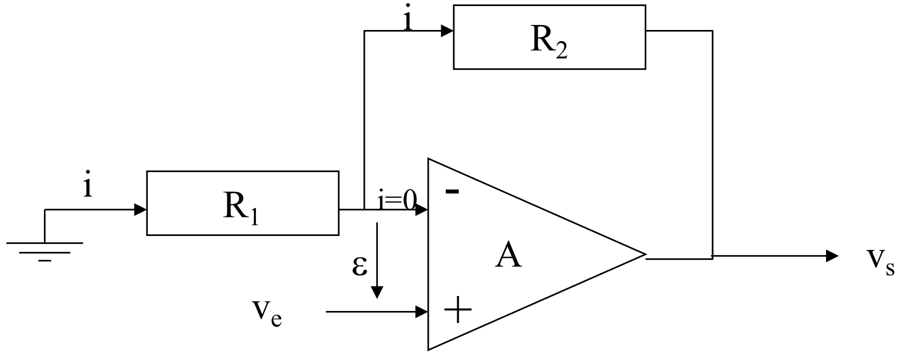
- Le dérivateur
  - Hypothèses :
    - Si A infini : $\boldsymbol{\varepsilon = 0 \Rightarrow V_+ = V_-}$
    - Impédance d'entrée infinie : $\boldsymbol{I_- = I_+ = 0}$



  - On regarde le montage :
    - ✓ $V_+ = 0$, donc avec $\varepsilon = 0 \Rightarrow V_+ = V_-$=0
    - ✓ Avec $I_- = I_+ = 0$, le courant dans R_1 est égal à la somme des courants dans R_2 et C
  - Equations : On se rappelle que $Z_c = \frac{1}{jC\omega}$
    - ✓ Loi des nœuds : $\dfrac{V_e - V_-}{Z_c} = \dfrac{V_- - V_s}{R_1}$ $\quad \boxed{\Rightarrow \dfrac{V_s}{V_e} = -jR_1C\omega}$
    - ✓ Millman : $V_- = \dfrac{\frac{V_e}{Z_C} + \frac{V_S}{R_1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{Z_C}} = 0$ $\quad \Rightarrow \dfrac{V_S}{R_1} = -jC\omega V_e$ $\quad \boxed{\Rightarrow \dfrac{V_S}{V_e} = -jR_1C\omega}$
  - Expression temporelle : $V_S(t) = -R_1C\dfrac{dV_e(t)}{dt}$

2. Fonctionnement en amplificateur

- Malheureusement, le gain de l'AOP n'est pas infini !



  - Lorsque le gain est fini, on doit écrire :
    - ✓ $V_s = A(V_+ - V_-)$
    - ✓ On ne peut plus considérer $\varepsilon = 0$
  - Cela modifie alors le calcul
    - ✓ Loi des nœuds : $\dfrac{0 - V_-}{R_1} = \dfrac{V_- - V_s}{R_2}$ $et\ V_- = V_e - \dfrac{V_S}{A}$
    - ✓ Millman : $V_- = \dfrac{\frac{0}{R_1}+\frac{V_S}{R_2}}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}}$ $et\ \ V_- = V_e - \dfrac{V_S}{A}$

$$\Rightarrow \frac{V_S}{A}.\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)+\frac{V_S}{R_2} = V_e\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)$$

  - Plus A est faible, plus l'erreur sur le gain devient importante:

$$\frac{V_S}{V_e} = \left(1+\frac{R_2}{R_1}\right) * \frac{1}{1+\frac{1}{A}*\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)} \approx \left(1+\frac{R_2}{R_1}\right) * \left(\mathbf{1} - \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{A}} * \left(\mathbf{1}+\frac{\boldsymbol{R_2}}{\boldsymbol{R_1}}\right)\right)$$

2. Fonctionnement en amplificateur

▸ L'AOP est modélisé comme un passe bas du premier ordre

- C'est un modèle très très simplifié

$$A(j\omega) = \frac{A_0}{1 + j\dfrac{\omega}{\omega_c}}$$

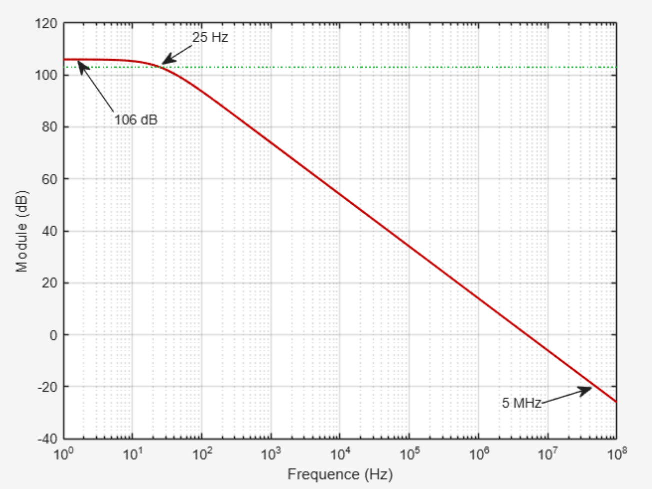
✓ Passe bas 1er ordre

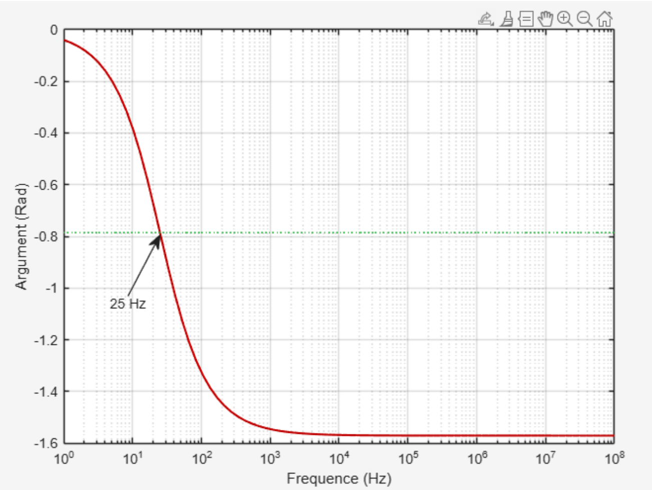
❖ La fréquence de coupure est très faible

- 25Hz pour le LF356
- Gain continu : 106dB

❖ Dès que l'on monte en fréquence, le gain diminue

- -20dB/décade





- **Important** : la fréquence de transition :

✓ C'est la valeur de la fréquence pour laquelle : $|A(j\omega_T)| = 1$

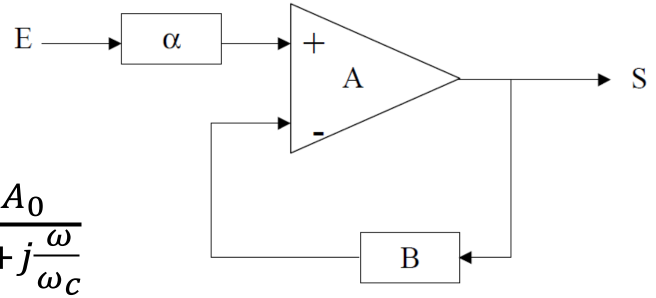
2. Fonctionnement en amplificateur

- L'AOP est modélisé comme un passe bas du premier ordre
  - Que vaut la fréquence de transition ?
    - ✓ On cherche la valeur telle que : $|\mathrm{A}(\mathrm{j}\,\omega_T)| = 1$
    - ✓ Pour faire le calcul, on considère que $\omega_T \gg \omega_c$
      - ❖ On approxime alors le gain sous la forme : $\mathrm{A}(\mathrm{j}\,\omega) \approx \frac{A_0}{j\frac{\omega}{\omega_c}}$
    - ✓ On cherche donc la pulsation ω_T telle que : $|\mathrm{A}(\mathrm{j}\,\omega_T)| = \frac{A_0.\omega_c}{\omega_T} = 1 \Rightarrow \omega_T = \omega_c A_0$
    - ✓ La fréquence de transition est donc : $f_T = A_0.f_c$
      - ❖ On l'appelle aussi le produit **GAIN BANDE**

2. Fonctionnement en amplificateur

Quel est l'impact de la contre réaction sur le gain du montage ?

- Revenons sur le principe de la contre réaction de l'AOP (α=1)



  ✓ On a démontré que : $\frac{V_S}{V_e} = \frac{A}{1+A.B}$

- En remplaçant dans cette expression le terme A par : $A(j\omega) = \frac{A_0}{1+j\frac{\omega}{\omega_c}}$

  ✓ On peut écrire : $\frac{V_S}{V_e} = \frac{\frac{A_0}{1+j\frac{\omega}{\omega_C}}}{1+\frac{A_0}{1+j\frac{\omega}{\omega_C}}B} = \frac{A_0}{1+j\frac{\omega}{\omega_C}+A_0.B} = \frac{A_0}{1+A_0.B+j\frac{\omega}{\omega_C}} = \frac{A_0}{1+A_0.B} \cdot \frac{1}{1+j\frac{\omega}{\omega_C(1+A_0.B)}}$

  ✓ On obtient une fonction de transfert passe-bas du premier ordre

    ❖ de gain : $A'_0 = \frac{A_0}{1+A_0.B}$

    ❖ de pulsation de coupure : $\omega'_c = \omega_c(1 + A_0.B)$

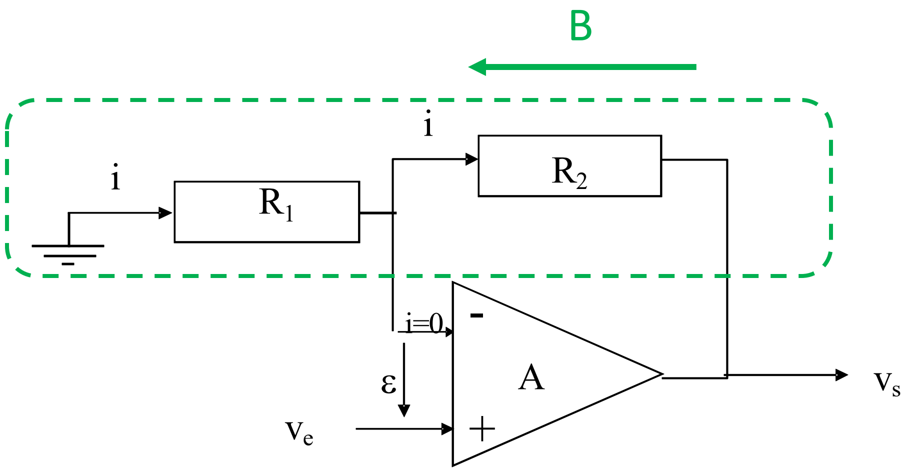
- On observe que l'on a conservation du produit gain bande puisque : $\boxed{A'_0.\omega'_c = A_0.\omega_c}$

2. Fonctionnement en amplificateur

- Exemple de calcul sur le montage non inverseur
  - On identifie le bloc A et le bloc B
    - ✓ Le bloc A : $A(j\omega) = \frac{A_0}{1+\frac{j\omega}{\omega_c}}$
    - ✓ Le bloc B : contre réaction avec R_2 et R_1

$$B = \frac{V_-}{V_S} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1}}$$

- ❖ B est l'inverse du gain du montage non inverseur



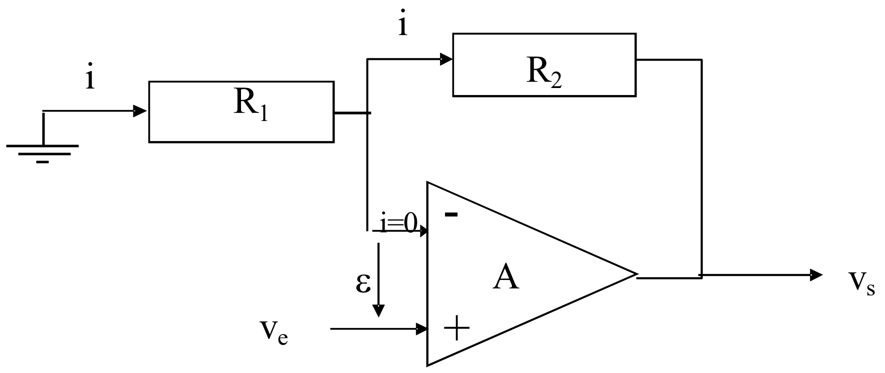
  - En reprenant l'expression de la diapositive précédente :

$$\frac{V_S}{V_e} = \frac{A_O}{1 + A_0 B} \cdot \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_c(1 + A_0 B)}}$$

  - Avec A0 très grand on retrouve bien le gain théorique idéal d'un montage non inverseur : $A_0' = \frac{A_O}{1 + A_0 B} \approx \frac{1}{B} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

2. Fonctionnement en amplificateur

- Exemple sur le montage non inverseur
  - Démonstration en réalisant le calcul complet



✓ Les courants à l'entrée de l'AOP sont nuls

✓ Le gain de l'AOP étant fini , on peut écrire

$$V_s = A.(V_e - V_-) \Rightarrow V_- = V_e - \frac{V_S}{A}$$

✓ Que ce soit avec Millman ou la loi des nœuds, au niveau du nœud V_-, on peut écrire :

$$\frac{0 - V_-}{R_1} = \frac{V_- - V_S}{R_2} \Rightarrow \frac{V_S}{R_2} = V_-\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \Rightarrow V_S = V_-\left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right)$$

✓ En posant $B = \frac{1}{1+\frac{R_2}{R_1}}$ pour simplifier l'écriture, et en remplaçant V_- par son expression en fonction de V_e et V_s, nous obtenons

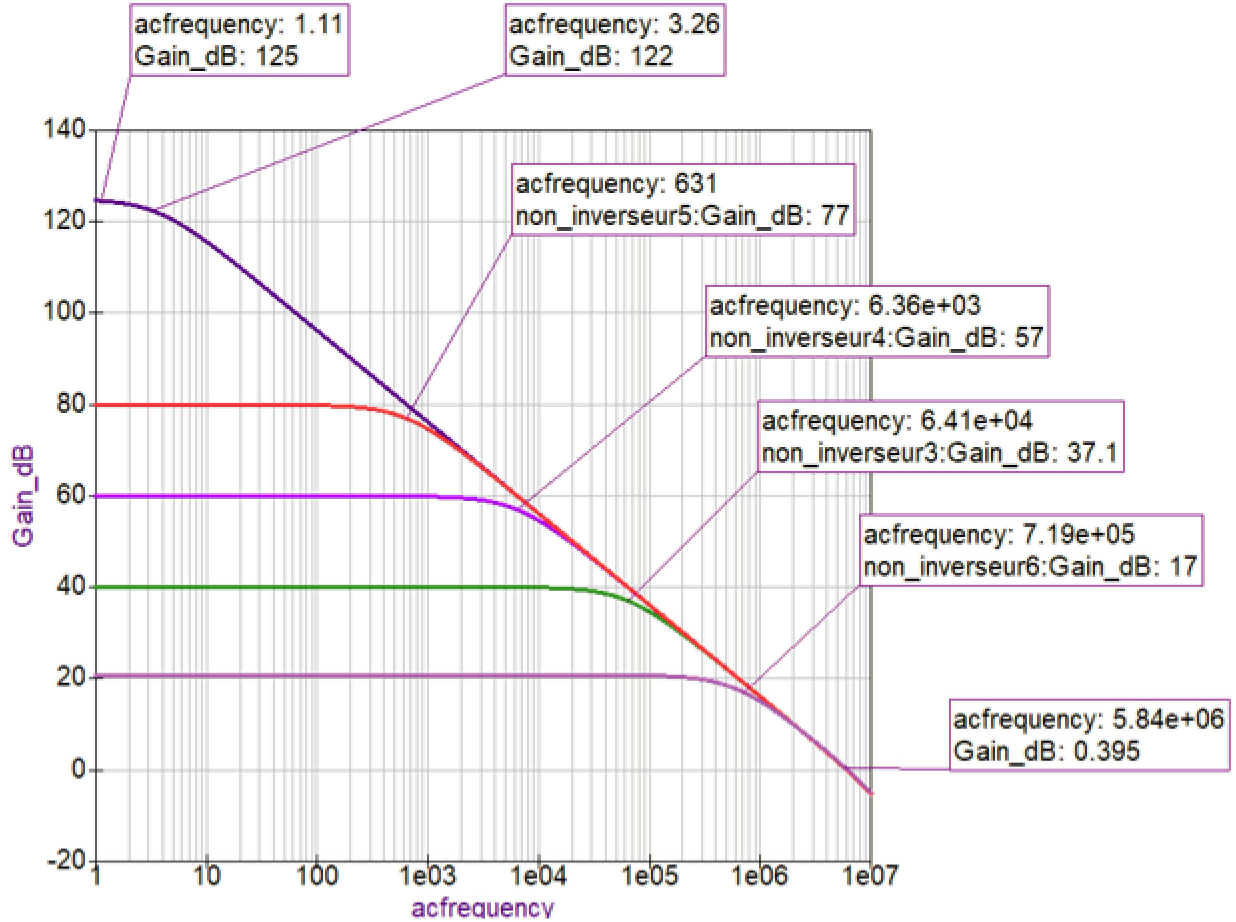
$$V_S = \frac{\left(V_e - \frac{V_S}{A}\right)}{B} \Rightarrow \left(B + \frac{1}{A}\right)V_S = V_e$$

✓ Le résultat est donc le même que celui trouvé précédemment : $\frac{V_S}{V_e} = \frac{1}{B + \frac{1}{A}} = \frac{A}{1 + AB}$

- ❖ Il suffit de remplacer A par $A(j\omega)$ dans l'expression

2. Fonctionnement en amplificateur

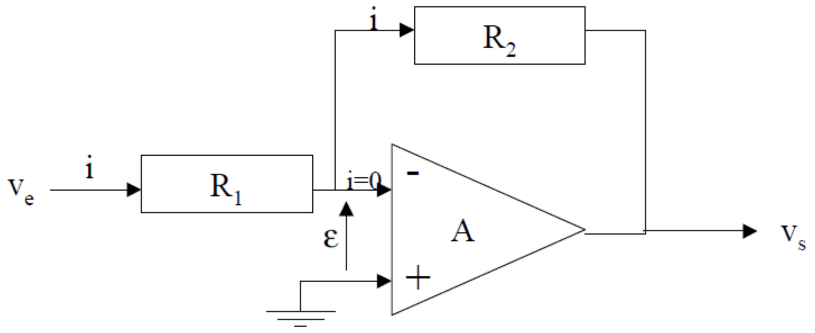
- Exemple avec le montage non inverseur



2. Fonctionnement en amplificateur

- A-t-on conservation du produit gain bande sur un montage inverseur ?
  - Le calcul du montage donne la fonction de transfert suivante :

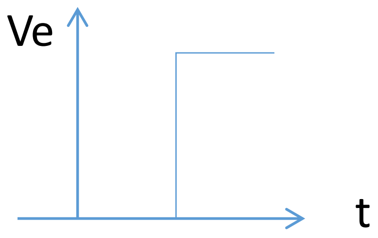
$$\frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1} . \frac{1}{1 + \frac{R_1 + R_2}{A_0 R_1}\left(1 + j\frac{\omega}{\omega_c}\right)}$$

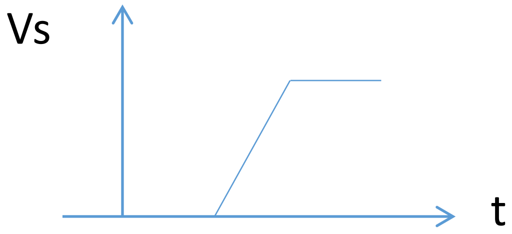


  - Pour ce montage, il n’y a pas conservation du produit gain bande
    - ✓ On n’est pas dans la configuration classique de la contre réaction

2. Fonctionnement en amplificateur

- Paramètre pour évaluer la vitesse de fonctionnement de l'AOP : le slew rate
  - Le slew rate est la vitesse maximale de variation de la tension en sortie d'un AOP
    - ✓ Si le signal varie plus vite que la valeur du slew rate, la tension de sortie ne suit pas la tension d'entrée
      - ❖ Analogie : temps de charge d'un condensateur





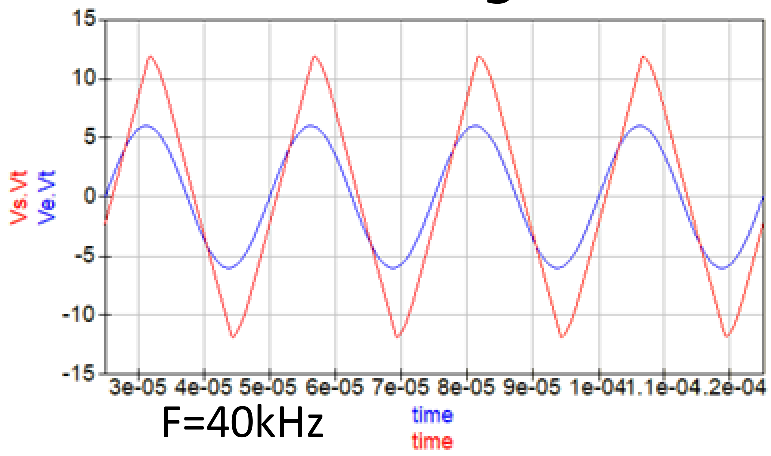
  - Le slew rate correspond à la valeur maximale de $\frac{dV_s}{dt}$: en V/s

$$\left.\frac{dV_s}{dt}\right|_{max} = \left.\frac{d[A_S \cos(\omega t)]}{dt}\right|_{max} = A_s\omega$$

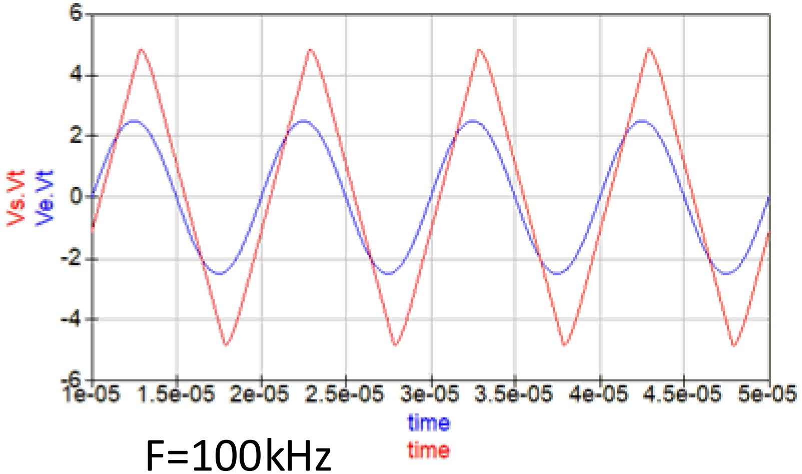
    - ✓ Dérivée de la pente de Vs en fonction du temps : Tangente

2. Fonctionnement en amplificateur

- Impact du slew rate sur le signal :
  - lorsque la vitesse de variation du signal est supérieure au slew rate : **triangulation du signal**
  - Effet sur un signal sinusoïdal



F=40kHz
Amplitude d'entrée : 6V
Gain x2

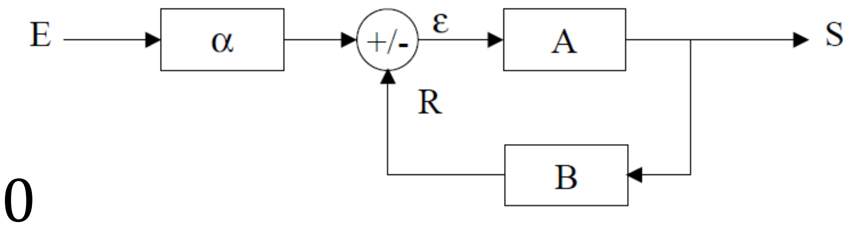


F=100kHz
Amplitude d'entrée : 2.5V
Gain x2

3. Fonctionnement en oscillateur

- Le mode oscillateur correspond à un circuit qui génère un signal de sortie sans signal d'entrée !!!!
  - Mode oscillateur : cas particulier de la contre réaction ($\alpha = 1$)

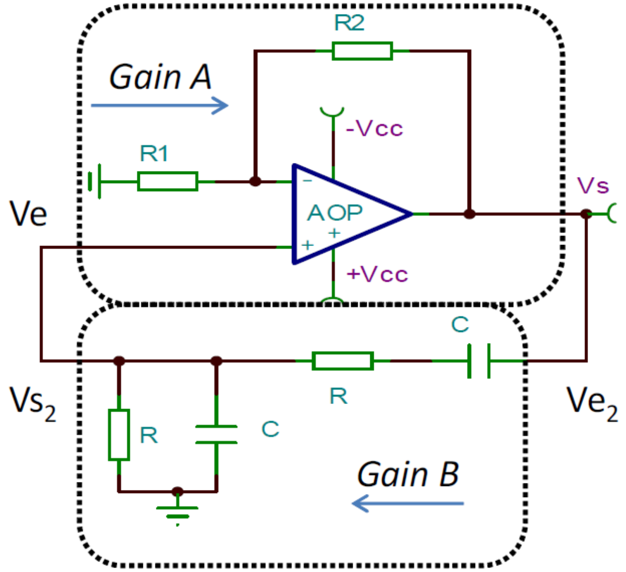
$$\frac{S}{E} = \frac{A}{1 + A.B}$$



  - Cas ou le dénominateur est nul : $1 + A.B = 0$
    - ✓ Ceci implique :$|AB| = 1$ et $\arg(A) + \arg(B) = \pi$
  - Il y a une tension de sortie mais il n'y a pas d'entrée : E=0

3. Fonctionnement en oscillateur

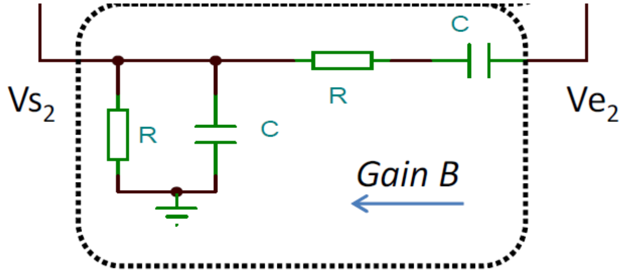
- Exemple d'oscillateur : le pont de Wien



  - Contre réaction de l'AOP sur V_+
    - ✓ L'expression est de la forme : $\frac{S}{E} = \frac{A}{1 - A.B}$
  - On doit calculer les coefficients A et B
    - ✓ Et chercher les valeurs telles que : $1 - AB = 0$
  - Calcul de A :
    - ✓ Montage non inverseur : $A = \frac{V_s}{V_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

3. Fonctionnement en oscillateur

- Contre réaction de l'AOP
  - Calcul de B : petit pont diviseur de tension ?

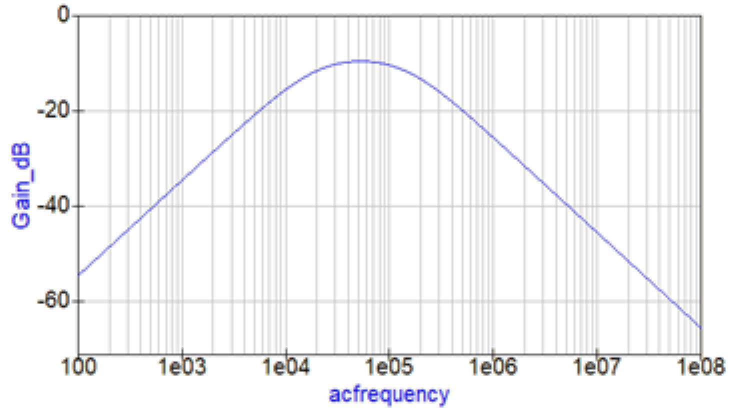


$$Z_{eq1} = Z_R + Z_C = R + \frac{1}{jC\omega}$$

$$Z_{eq2} = \frac{1}{\frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C}} = \frac{1}{\frac{1}{R} + jC\omega} = \frac{R}{1 + jRC\omega}$$

$$\frac{V_{S2}}{V_{e2}} = \frac{Z_{eq2}}{Z_{eq1} + Z_{eq2}} = \frac{\frac{R}{1 + jRC\omega}}{R + \frac{1}{jC\omega} + \frac{R}{1 + jRC\omega}}$$

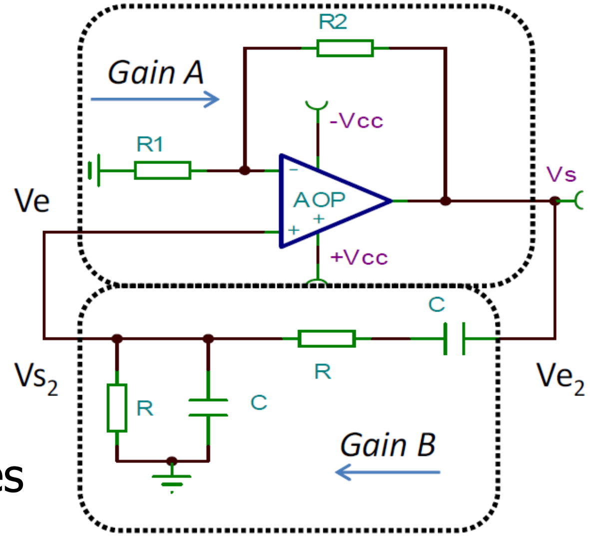
$$\frac{V_{S2}}{V_{e2}} = \frac{jRC\omega}{R(jC\omega)(1 + jRC\omega) + (1 + jRC\omega) + jRC\omega} = \frac{jRC\omega}{j^2R^2C^2\omega^2 + 3jRC\omega + 1}$$



  - On reconnait la fonction de transfert d'un filtre passe-bande
    - ✓ La pulsation propre : $\omega_0 = \frac{1}{RC}$
    - ✓ Coefficient de surtension : $\frac{2m}{\omega_0} = 3RC \Rightarrow m = \frac{3}{2}$

3. Fonctionnement en oscillateur

▸ On vérifie maintenant les conditions d'oscillation



$$A.B = 1 \Rightarrow A.\frac{jRC\omega}{j^2R^2C^2\omega^2+3jRC\omega+1} = 1$$

$$\Rightarrow \quad A.jRC\omega = j^2R^2C^2\omega^2 + 3jRC\omega + 1$$

- Deux équations
  - ✓ Pour vérifier l'égalité , on vérifie l'égalité des parties réelles et imaginaires

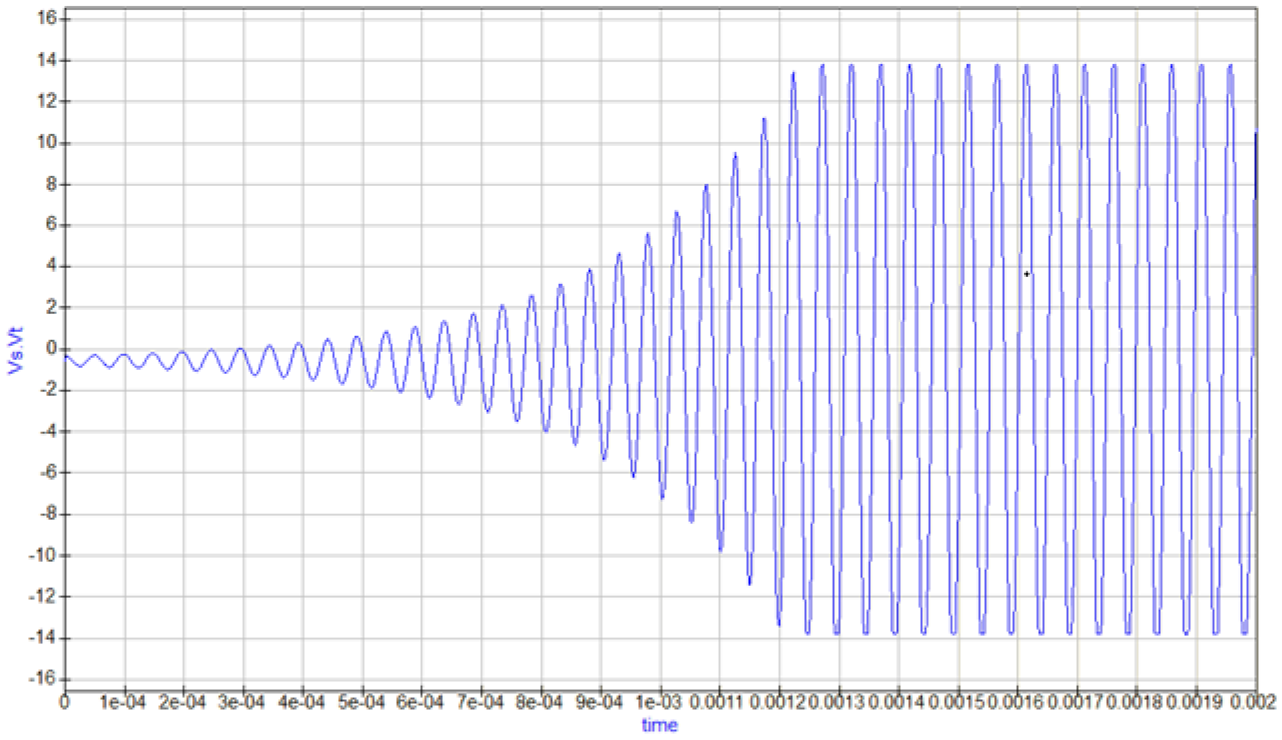
$$1 - R^2C^2\omega^2 = 0 \Rightarrow \omega = \frac{1}{RC}$$

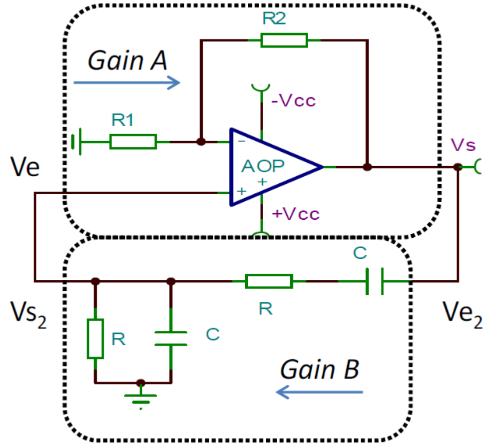
$$A.RC\omega = 3RC\omega \Rightarrow A = 3$$

- Le circuit oscille donc : $A = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 3 \Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 2$
- A la fréquence : $F = \frac{1}{2\pi RC}$

3. Fonctionnement en oscillateur

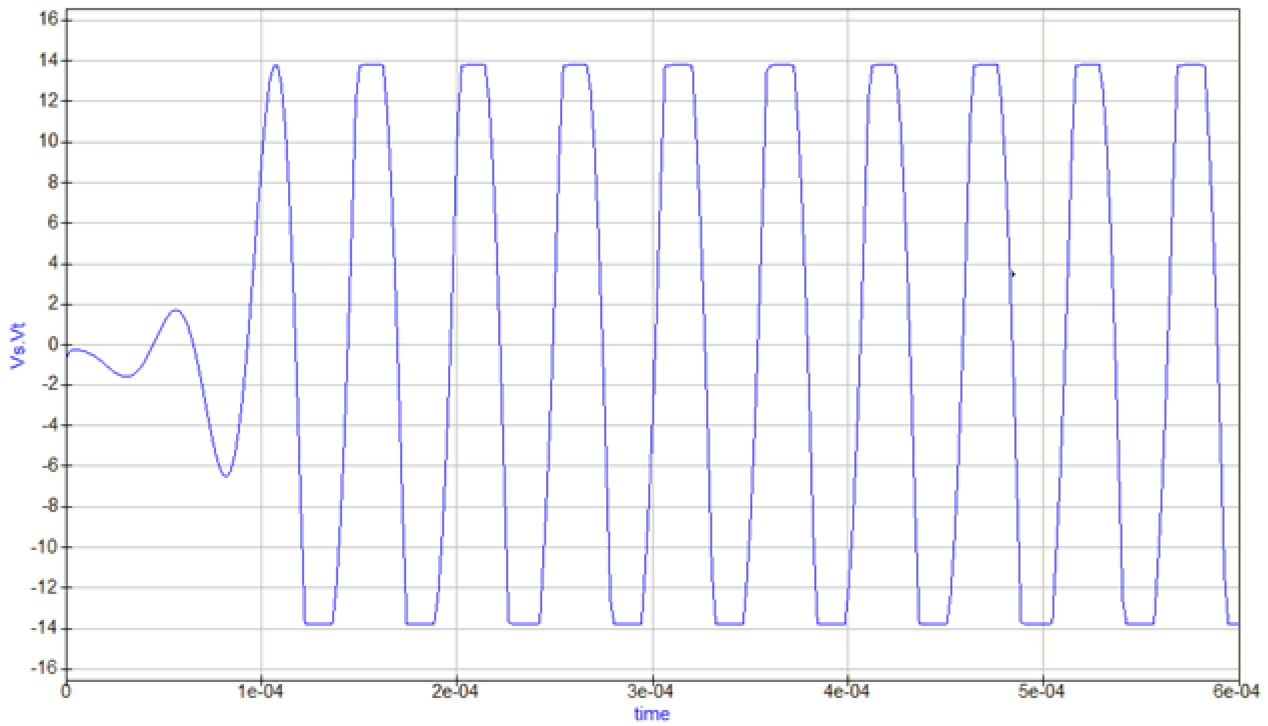
- Fonctionnement : AB=1
  - Que se passe t'il si AB =1

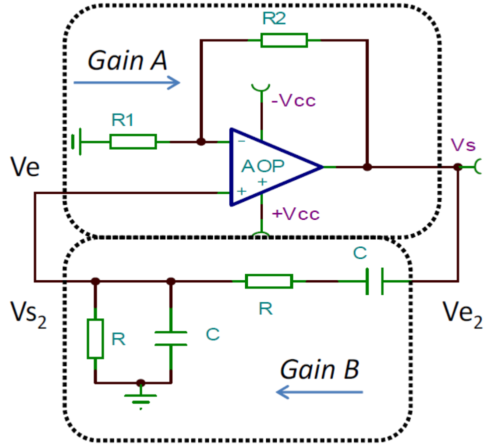




3. Fonctionnement en oscillateur

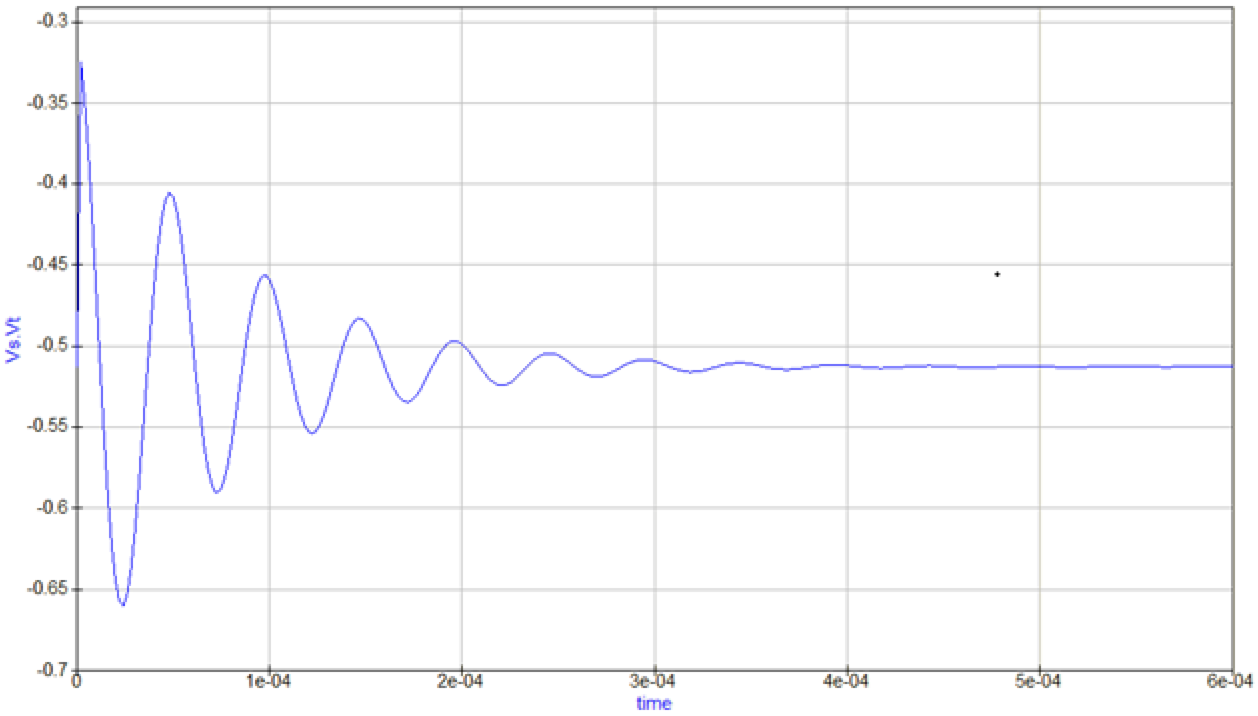
- Fonctionnement : AB=1
  - Que se passe t'il si AB >1

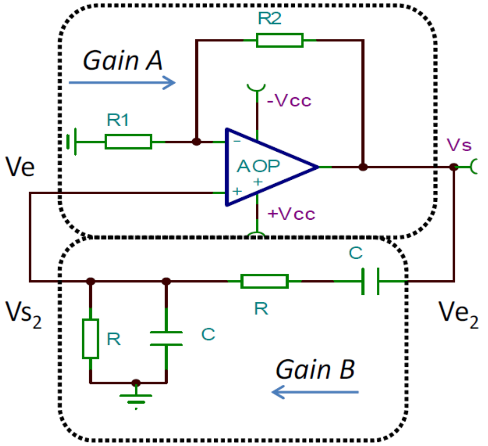




3. Fonctionnement en oscillateur

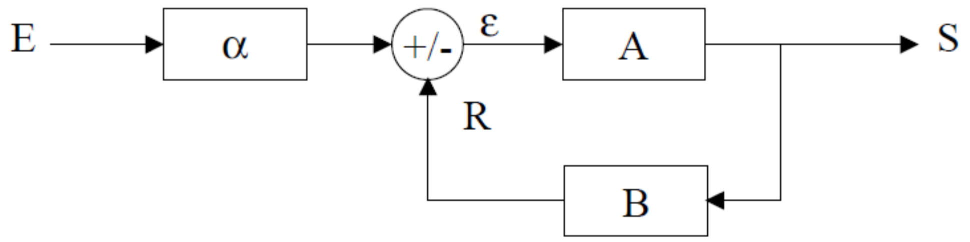
- Fonctionnement : AB=1
  - Que se passe t'il si AB <1





4. Fonctionnement en comparateur

- Le mode comparateur est obtenu :
  - Soit quand il n'y a pas de contre réaction
  - Soit quand il y a une contre réaction sur la patte V_+



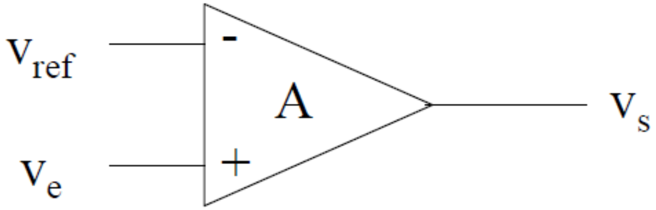
✓ Le montage n'est pas dans une configuration d'oscillateur (conditions non remplies)

$$\frac{S}{E} = \frac{A}{1 - A.B}$$

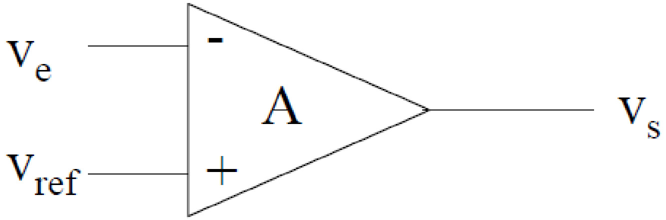
✓ La contre réaction augmente le gain : $|1 - AB| < 1$

4. Fonctionnement en comparateur

- Le fonctionnement en comparateur simple
  - L'AOP n'est plus contre réactionné
    - ✓ Il n'y a pas de contrôle du gain
      - ❖ On retrouve : $V_s = A\varepsilon$ avec A très grand
      - ❖ La tension de sortie ne peut pas tendre vers l'infini
        - Elle se bloque à une tension proche des tensions d'alimentation : V_{sat}^{+} et V_{sat}^{-}
  - Comparateur non inverseur :
    - ❖ L'entrée V_e est sur la place V_+
    - ❖ Une tension de référence est mise sur la patte V_-
    - ✓ si $V_e > V_{ref}$, $\varepsilon > 0$ donc $V_s = A.\varepsilon$ tend vers V_{sat}^{+}
    - ✓ si $V_e < V_{ref}$, $\varepsilon < 0$ donc $V_s = A.\varepsilon$ tend vers V_{sat}^{-}

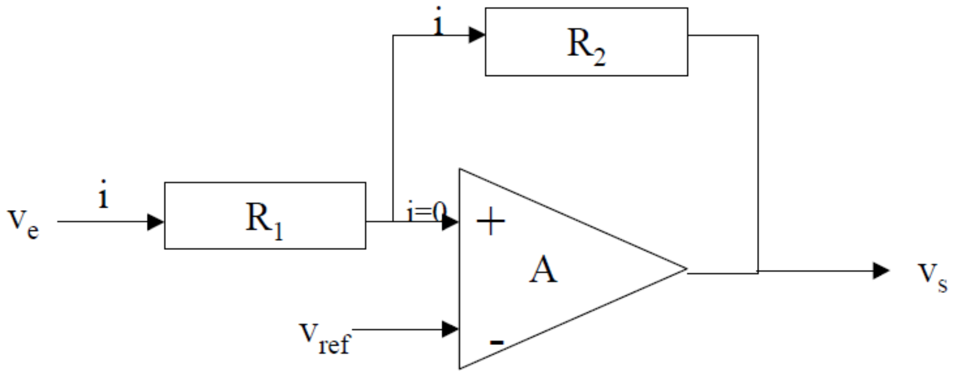


  - Comparateur inverseur :
    - ❖ L'entrée V_e est sur la place V_-
    - ❖ Une tension de référence est mise sur la patte V_+
    - ✓ si $V_e < V_{ref}$, $\varepsilon < 0$ donc $V_s = A.\varepsilon$ tend vers V_{sat}^{-}
    - ✓ si $V_e > V_{ref}$, $\varepsilon > 0$ donc $V_s = A.\varepsilon$ tend vers V_{sat}^{+}



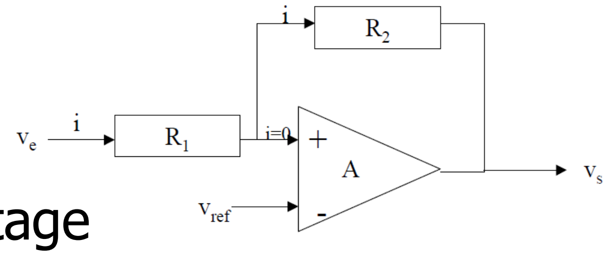
4. Fonctionnement en comparateur

▸ Le comparateur à hystérésis



- il y a une contre réaction sur la patte V_+
  - ✓ elle augmente de la gain de l'AOP
    - ❖ La sortie est à V_{sat}^{+} et V_{sat}^{-}
- Le calcul du montage se fait classiquement
  - ✓ $\frac{V_e - V_+}{R_1} = \frac{V_+ - V_s}{R_2} \Rightarrow V_+ = \frac{R_2}{R_1+R_2} V_e + \frac{R_1}{R_1+R_2} V_s$
- Il y a basculement lorsque $V_+ = V_{ref}$
  - ✓ On réécrit l'équation pour chercher les valeurs de V_e qui font basculer la sortie entre V_{sat}^{+} et V_{sat}^{-}
  - ✓ $V_e = \frac{R_1+R_2}{R_2} V_{ref} - \frac{R_1}{R_2} V_s$

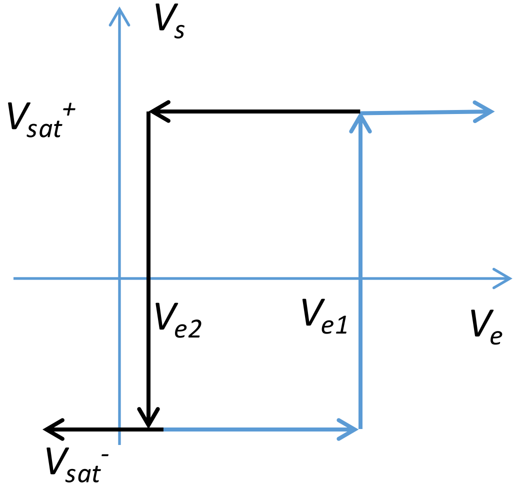
4. Fonctionnement en comparateur



Le comparateur à hystérésis

- ✓ La sortie prend deux valeurs : V_{sat}^{+} et V_{sat}^{-}

- Il y a donc deux valeurs d'entrée qui vont faire commuter le montage
  - ❖ Il faut trouver comment fonctionne le comparateur



- ✓ Si V_e est très faible, on peut considérer $V_+ < V_{ref}$ donc $\varepsilon < 0$
  - La sortie du comparateur est : $V_s = V_{sat}^{-}$
  - ❖ La sortie du montage passe donc à $V_s = V_{sat}^{+}$ pour une entrée qui augmente :

$$V_{e1} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{ref} - \frac{R_1}{R_2} V_{sat}^{-}$$

- ✓ Si V_e est très fort, on peut considérer $V_+ > V_{ref}$ donc $\varepsilon > 0$
  - La sortie du comparateur est : $V_s = V_{sat}^{+}$
  - ❖ La sortie du montage passe donc à $V_s = V_{sat}^{-}$ pour une entrée :

$$V_{e2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{ref} - \frac{R_1}{R_2} V_{sat}^{+}$$

▸ Le comparateur à hystérésis

- Résolution du calcul si : $V_{\mathbf{sat}}^{+} = -V_{\mathbf{sat}}^{-} = V_{\mathbf{sat}}$
- Basculement pour :

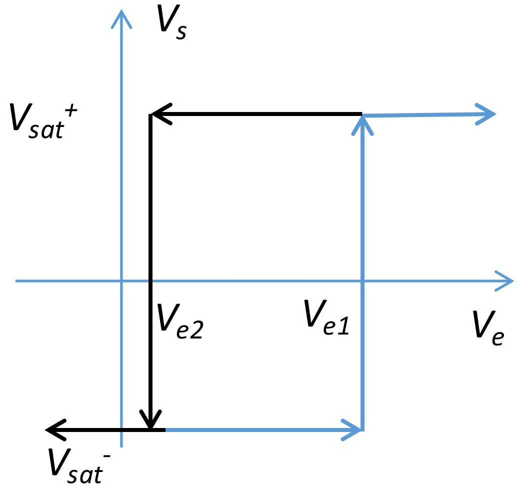
$$V_{e1} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{ref} + \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$$

$$V_{e2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{ref} - \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$$

- On en déduit que :

$$2\frac{R_1}{R_2} V_{sat} = V_{e1} - V_{e2} \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{V_{e1} - V_{e2}}{2V_{sat}}$$

$$2\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_{ref} = V_{e1} + V_{e2} \Rightarrow V_{ref} = \frac{V_{e1} + V_{e2}}{2\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)}$$



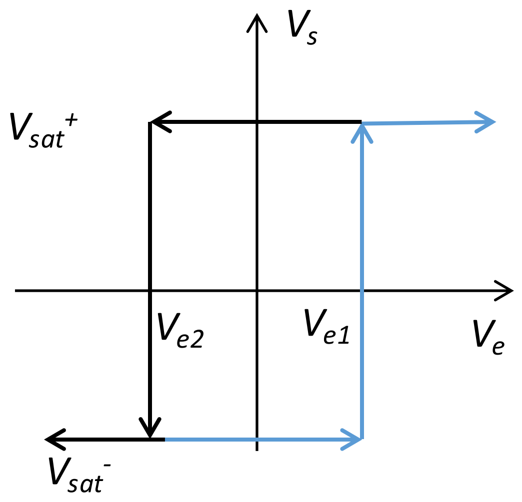
4. Fonctionnement en comparateur

- Le comparateur à hystérésis
  - On regarde le cas particulier où $V_{ref} = 0$ et $V_{\mathbf{sat}}^{+} = -V_{sat}^{-} = V_{sat}$
  - En reprenant les équations, on peut écrire

$$v_e = \frac{R_1 + R_2}{R_2} v_{ref} - \frac{R_1}{R_2} v_s$$

✓ Pour $V_{ref} = 0$:

$$v_e = -\frac{R_1}{R_2} v_s$$



✓ La sortie du montage bascule donc, en reprenant les équations précédentes, pour:

$$v_{e1} = +\frac{R_1}{R_2} v_{sat}$$

$$v_{e2} = -\frac{R_1}{R_2} v_{sat}$$

❖ L'hytérésis en centré autour de 0