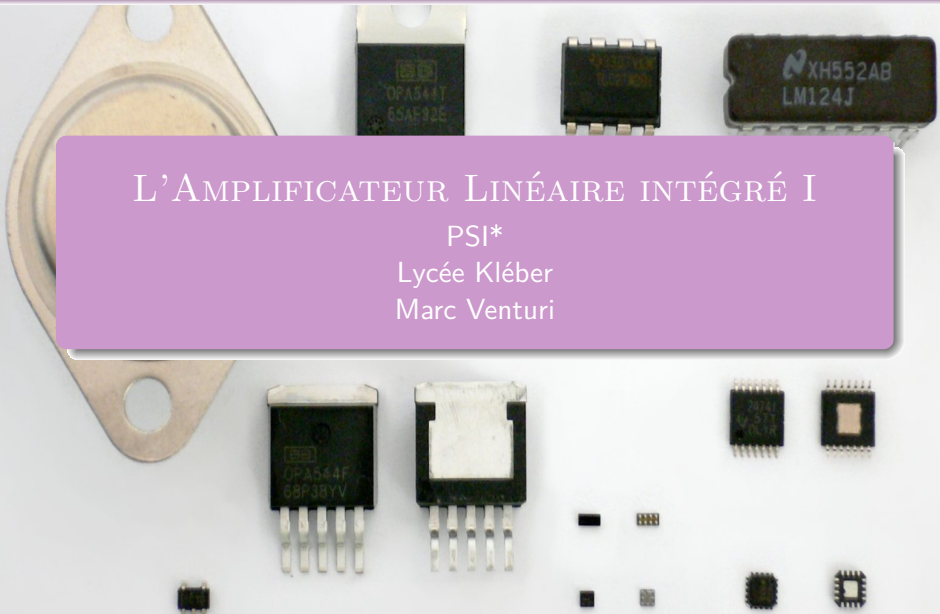


# L'AMPLIFICATEUR LINÉAIRE INTÉGRÉ I

PSI\*

Lycée Kléber

Marc Venturi



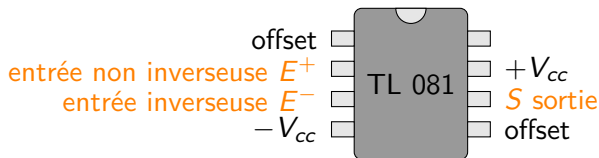
- 1 Caractéristiques de l'ALI
- 2 Montages fonctionnant en régime linéaire
- 3 Montages fonctionnant en régime saturé

# Sommaire

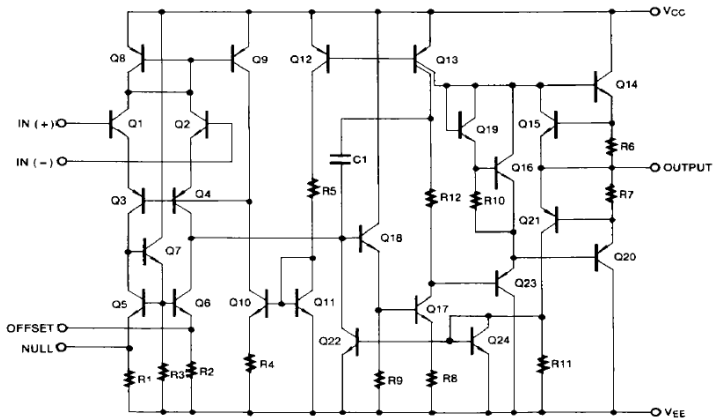
- 1 Caractéristiques de l'ALI
- 2 Montages fonctionnant en régime linéaire
- 3 Montages fonctionnant en régime saturé

## Description

L'amplificateur linéaire intégré (ALI) est un composant intégré **actif** se présentant sous forme d'une puce à huit broches. Il est aussi appelé Amplificateur Opérationnel, AO ou AmpliOp.

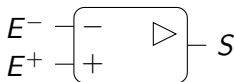


## Description

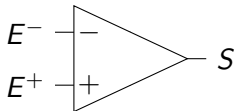


## Description

Schémas simplifiés :

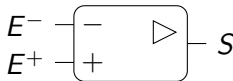


ou

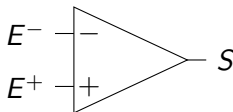


## Description

Schémas simplifiés :



ou

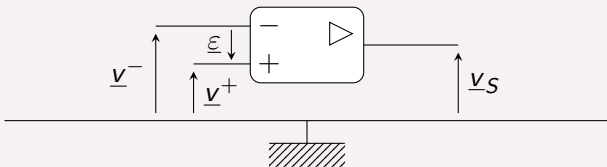


On utilisera le schéma européen, celui du haut.

# Caractéristiques

## Gain différentiel

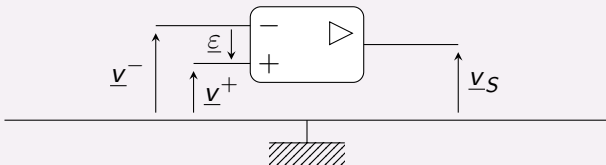
Soit les deux tensions d'entrées  $\underline{v}^+$  et  $\underline{v}^-$  appliquées aux bornes non inverseuse et inverseuse respectivement, et  $\underline{v}_S$  la tension de sortie, en notation complexe.





# Caractéristiques

## Gain différentiel

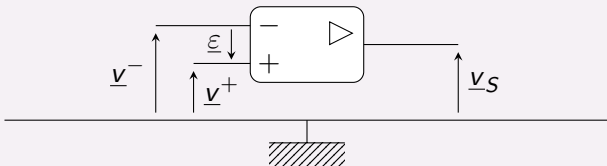


## Référence des potentiels

Ces trois tensions ont pour référence commune la masse du circuit dans lequel est placé l'ALI. **Cette masse est obligatoirement reliée au bloc d'alimentation de l'ALI, bloc qui n'est jamais représenté sur les schémas !**

# Caractéristiques

## Gain différentiel



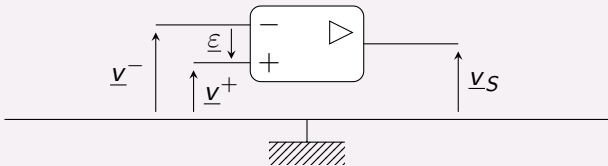
L'ALI est un système électronique dont le transfert est décrit par la relation :

$$\underline{V}_S = \frac{\mu_0}{1 + j\omega\tau} \underline{\varepsilon},$$

où  $\mu_0 \simeq 10^5$  à  $10^6$  et  $\tau \simeq 10^{-2}$  s.

# Caractéristiques

## Gain différentiel



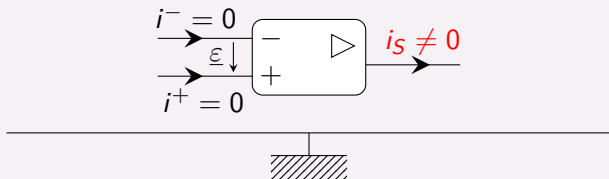
Le gain **différentiel** (l'ALI amplifie une différence de tension) est donc :

$$\underline{\mu} = \frac{\mu_0}{1 + j\omega\tau}$$

- $\mu_0$  est la gain différentiel statique (à fréquence nulle) ;
- $\tau$  est le temps de réponse de l'ALI,  $1/\tau = \omega_c$  est la pulsation de coupure de l'ALI.

# Caractéristiques

## Résistances d'entrée et de sortie

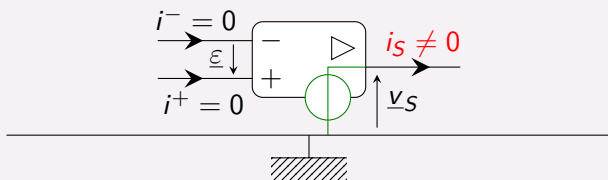


On utilise un modèle d'ALI pour lequel :

- les résistances d'entrée sont infinies  $\Rightarrow i^- = i^+ = 0$  ;
- la résistance de sortie est nulle

# Caractéristiques

## Résistances d'entrée et de sortie

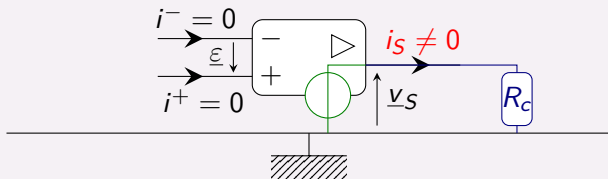


On utilise un modèle d'ALI pour lequel :

- les résistances d'entrée sont infinies  $\Rightarrow i^- = i^+ = 0$  ;
- la résistance de sortie est nulle : la sortie est équivalente à un générateur de tension idéal.

# Caractéristiques

## Résistances d'entrée et de sortie



On utilise un modèle d'ALI pour lequel :

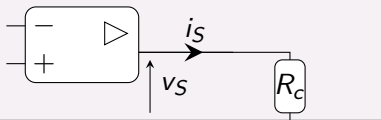
- les résistances d'entrée sont infinies  $\Rightarrow i^- = i^+ = 0$  ;
- la résistance de sortie est nulle

## Confusion fréquente

Ne pas confondre *résistance de sortie* avec *résistance de charge*  $R_C$ , appelée aussi *résistance d'utilisation* !

# Caractéristiques

## Saturation en tension de sortie

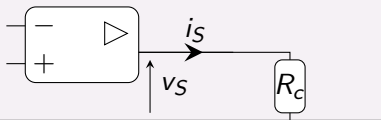


Le tension de sortie  $v_s$  est limitée en valeurs, positive et négative. Ces limites  $V_{\text{sat}}^-$  et  $V_{\text{sat}}^+$  sont les **tensions de saturation**.

$$V_{\text{sat}}^- \leq v_s \leq V_{\text{sat}}^+$$

# Caractéristiques

## Saturation en tension de sortie



Le tension de sortie  $v_s$  est limitée en valeurs, positive et négative. Ces limites  $V_{\text{sat}}^-$  et  $V_{\text{sat}}^+$  sont les **tensions de saturation**.

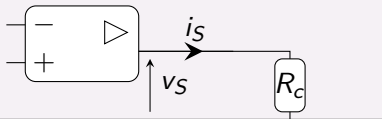
$$V_{\text{sat}}^- \leq v_s \leq V_{\text{sat}}^+$$

- Ces tensions de saturation dépendent des tensions d'alimentation  $+V_{\text{cc}}$  et  $-V_{\text{cc}}$ .



# Caractéristiques

## Saturation en tension de sortie



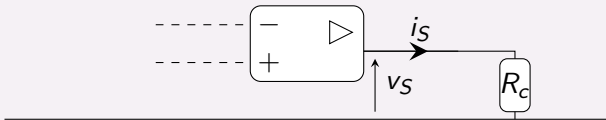
Le tension de sortie  $v_S$  est limitée en valeurs, positive et négative. Ces limites  $V_{\text{sat}}^-$  et  $V_{\text{sat}}^+$  sont les **tensions de saturation**.

$$V_{\text{sat}}^- \leq v_S \leq V_{\text{sat}}^+$$

- Ces tensions de saturation dépendent des tensions d'alimentation  $+V_{CC}$  et  $-V_{CC}$ .
- Généralement, on alimente les ALI en  $\pm 15\text{ V}$ . Dans ce cas,  $V_{\text{sat}}^+ \simeq 13\text{ V}$  et  $V_{\text{sat}}^- \simeq -V_{\text{sat}}^+$ .

# Caractéristiques

## Saturation en courant de sortie



Le courant de sortie  $i_S$  est limité en valeurs positive et négatives. Ces valeurs sont prévues par construction. Typiquement,

$$|i_S| \leq i_{\text{sat}} \simeq 25 \text{ mA.}$$

# Caractéristiques

Propriétés	À retenir	ALI Bipolaire LM471	BIFET TL081	Bimos CA3140	Cmos LMC035
Amplification $\mu_0$	$\geq 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$10^5$	$10^6$
Impédances d'entrées	$> 10^6 \Omega$	$2 \cdot 10^6 \Omega$	$10^{12} \Omega$	$10^{12} \Omega$	$> 10^{13} \Omega$
Impédance de sortie	$\leq 100 \Omega$	$75 \Omega$	$100 \Omega$	$60 \Omega$	
Fréquence de coupure	$\simeq 10 \text{ Hz}$			$20 \text{ Hz}$	
Courants de polarisation	$< 100 \text{ nA}$	$80 \text{ nA}$	$30 \text{ pA}$	$10 \text{ pA}$	$0,02 \text{ pA}$

## Régimes de fonctionnement

**Remarque** : on fera l'hypothèse par la suite que

$$V_{\text{sat}}^- = -V_{\text{sat}}^+ = -V_{\text{sat}}.$$

### Régime linéaire

L'ALI est en fonctionnement linéaire si la tension de sortie  $v_S$  n'atteint pas une valeur de saturation, donc si :

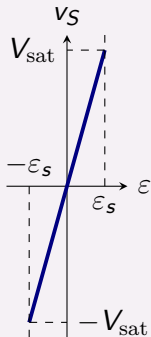
$$-V_{\text{sat}} < v_S < V_{\text{sat}}.$$

Dans ce cas, la tension de sortie vaut, à faible fréquence :

$$v_S = \mu_0 \varepsilon = \mu_0 (v^+ - v^-)$$

## Régimes de fonctionnement

### Régime linéaire

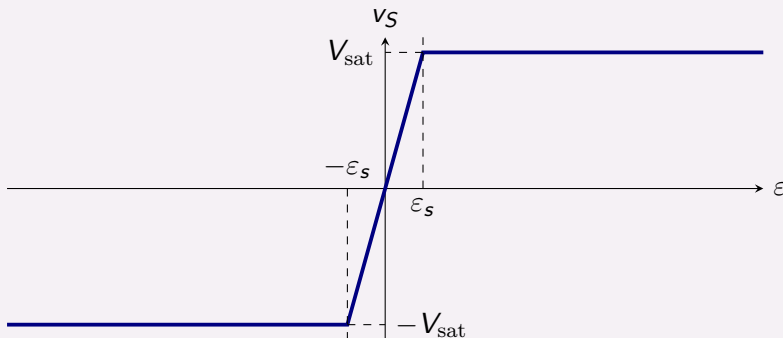


Régime linéaire  $v_s = \mu_0 \varepsilon$

## Régimes de fonctionnement

### Régime saturé

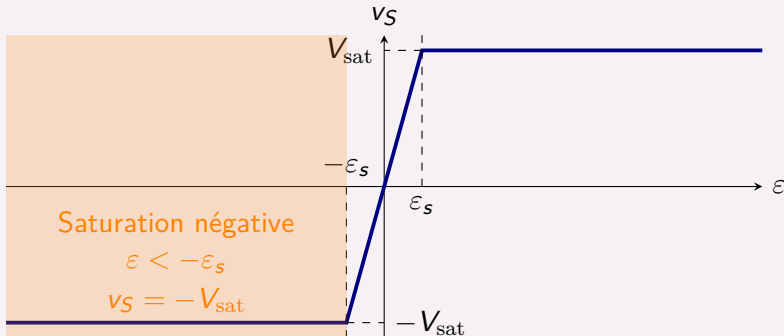
C'est le second cas de régime, où  $v_S = +V_{\text{sat}}$  (saturation positive) ou  $v_S = -V_{\text{sat}}$  (saturation négative).



# Régimes de fonctionnement

## Régime saturé

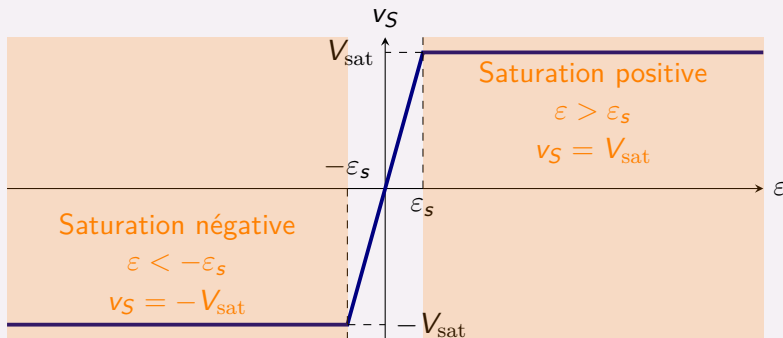
C'est le second cas de régime, où  $v_S = +V_{\text{sat}}$  (saturation positive) ou  $v_S = -V_{\text{sat}}$  (saturation négative).



# Régimes de fonctionnement

## Régime saturé

C'est le second cas de régime, où  $v_S = +V_{\text{sat}}$  (saturation positive) ou  $v_S = -V_{\text{sat}}$  (saturation négative).

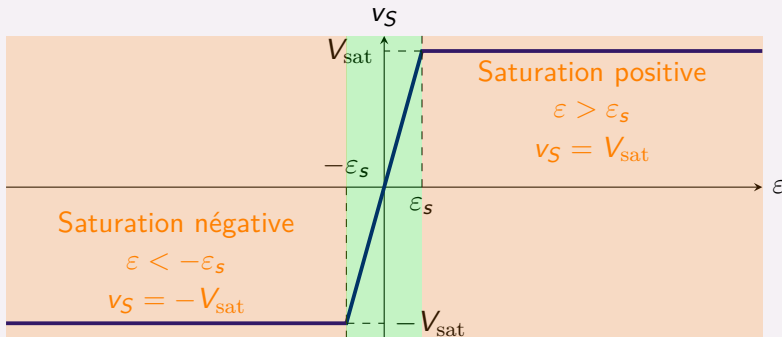




# Régimes de fonctionnement

## Régime saturé

C'est le second cas de régime, où  $v_S = +V_{\text{sat}}$  (saturation positive) ou  $v_S = -V_{\text{sat}}$  (saturation négative).



Régime linéaire  $v_S = \mu_0 \epsilon$

## Modèle idéal à gain infini

- La pente du domaine linéaire est de l'ordre de  $\mu_0 = 10^5$  à  $10^6$ .  
On en déduit que la limite du domaine linéaire

$$\varepsilon_s \simeq \frac{13 \text{ V}}{10^5} = 0,13 \text{ mV}.$$

## Modèle idéal à gain infini

- La pente du domaine linéaire est de l'ordre de  $\mu_0 = 10^5$  à  $10^6$ .  
On en déduit que la limite du domaine linéaire  
$$\varepsilon_s \simeq \frac{13 \text{ V}}{10^5} = 0,13 \text{ mV}.$$
- Les tensions mesurées sont de l'ordre du volt, la valeur de  $\varepsilon_s$  est donc négligeable devant celles-ci.

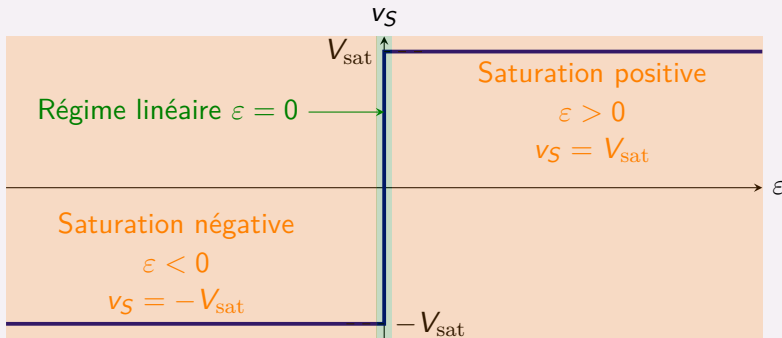
## Modèle idéal à gain infini

- La pente du domaine linéaire est de l'ordre de  $\mu_0 = 10^5$  à  $10^6$ .  
On en déduit que la limite du domaine linéaire  
$$\varepsilon_s \simeq \frac{13 \text{ V}}{10^5} = 0,13 \text{ mV}.$$
- Les tensions mesurées sont de l'ordre du volt, la valeur de  $\varepsilon_s$  est donc négligeable devant celles-ci.
- Cela conduit à utiliser le cas limite d'une valeur nulle pour  $\varepsilon_s$  et d'une pente **infinie** du domaine linéaire.

## Modèle idéal à gain infini

## ALI idéal

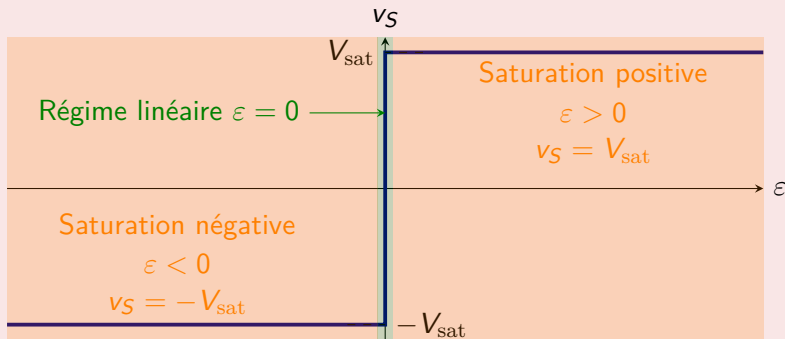
$$\mu_0 \rightarrow \infty \Rightarrow \varepsilon_s \rightarrow 0.$$



# Modèle idéal à gain infini

## Conséquence

En régime linéaire, on ne peut pas déduire la valeur de  $v_S$  à partir de l'ALI seul. Il faut déterminer cette valeur à partir du circuit dont fait partie l'ALI.



## Conditions de fonctionnement

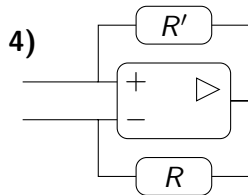
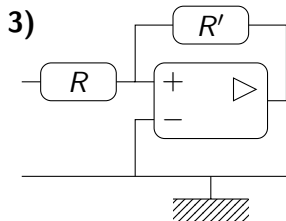
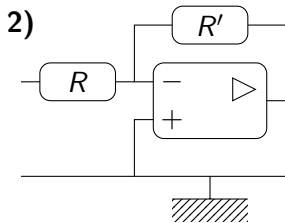
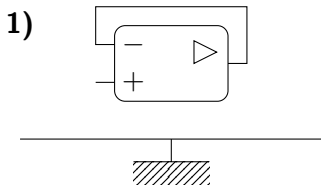
### Condition nécessaire de linéarité

Comment savoir si l'ALI fonctionne en régime linéaire ou saturé ?

Règle :

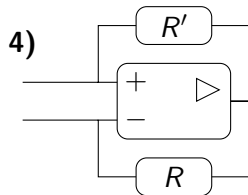
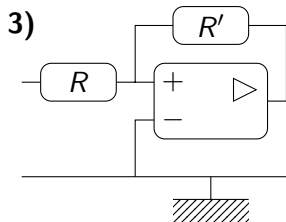
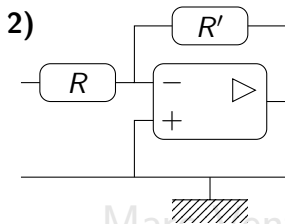
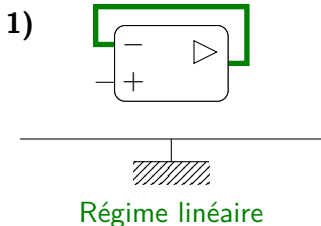
- Pour qu'un ALI fonctionne en régime linéaire, **il faut** qu'il existe un branchement électrique entre **la sortie S** et la borne d'entrée **inverseuse  $E^-$** .
- Son absence **implique** un fonctionnement en saturation :
  - $v^+ > v^- \Rightarrow v_S = +V_{\text{sat}}$  ;
  - $v^+ < v^- \Rightarrow v_S = -V_{\text{sat}}$ .

## Conditions de fonctionnement

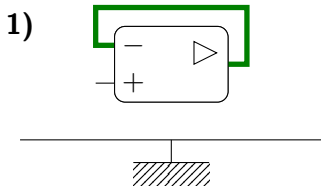




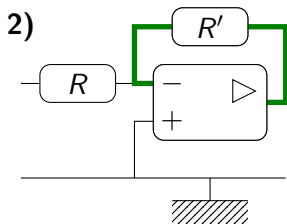
## Conditions de fonctionnement



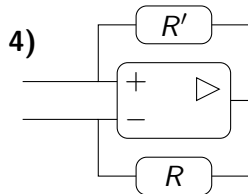
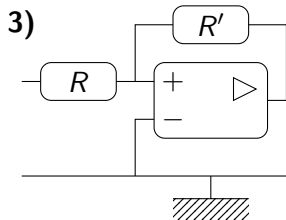
## Conditions de fonctionnement



Régime linéaire

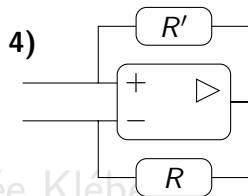
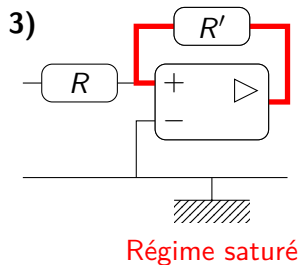
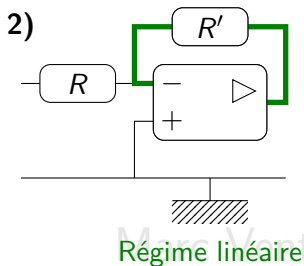
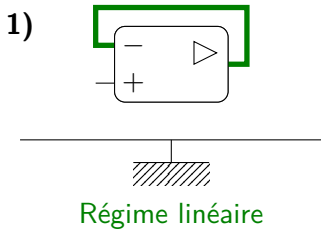


Régime linéaire

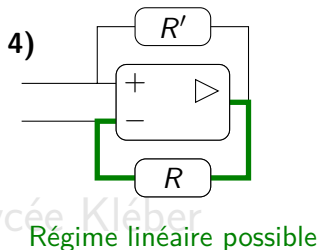
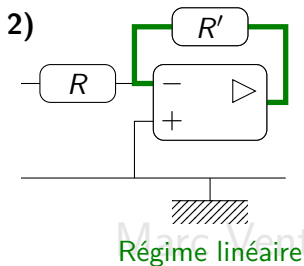
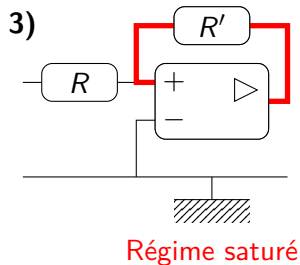
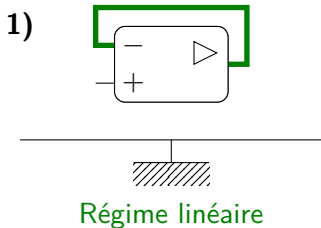


Marc Venturi - Lycée Kléber

## Conditions de fonctionnement



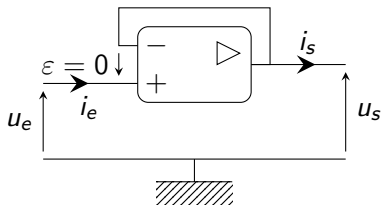
## Conditions de fonctionnement



# Sommaire

- 1 Caractéristiques de l'ALI
- 2 Montages fonctionnant en régime linéaire
- 3 Montages fonctionnant en régime saturé

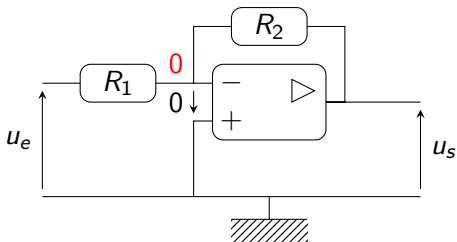
## Montage suiveur



$$\left. \begin{array}{l} v^+ = u_e \\ v^- = u_s \\ \epsilon = 0 \Rightarrow v^- = v^+ \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{u_s = u_e}$$

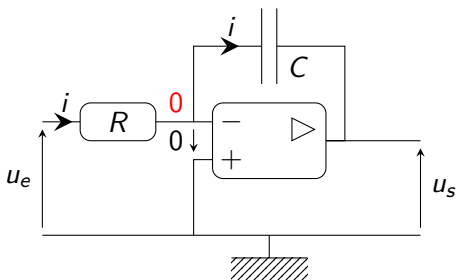
Intérêt :  $i_e = 0$  mais  $i_s \neq 0$  ! ▶ Application

## Montage amplificateur inverseur



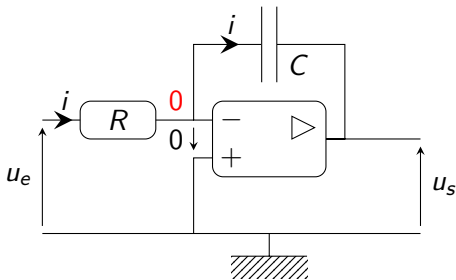
$$\left. \begin{array}{l} v^+ = 0 \\ v^- = \frac{G_1 u_e + G_2 u_s}{G_1 + G_2} \varepsilon = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{u_s = -\frac{R_2}{R_1} u_e}$$

# Montage intégrateur (théorique)



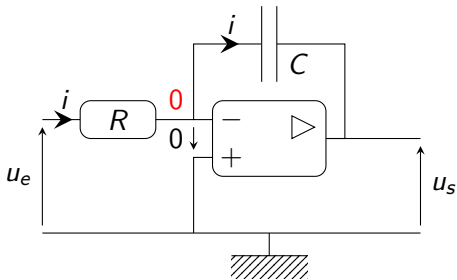


## Montage intégrateur (théorique)



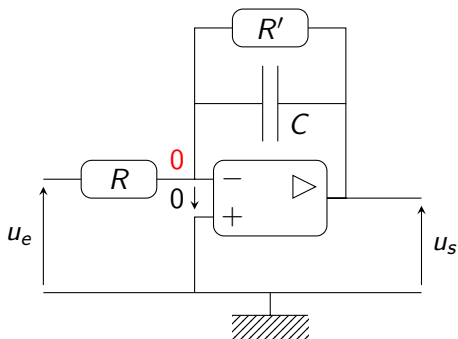
$$\left. \begin{array}{l} v^+ = 0 \\ \varepsilon = 0 \Rightarrow v^- = 0 \\ i = \frac{u_e}{R} \\ i = -C \frac{du_s}{dt} \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{u_s = -\frac{1}{RC} \int u_e dt .}$$

## Montage intégrateur (théorique)



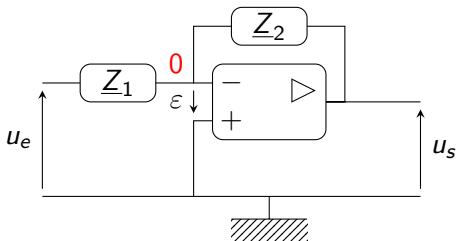
$$\left. \begin{array}{l} v^+ = 0, \varepsilon = 0 \Rightarrow v^- = 0 \\ v^- = \frac{G\underline{u}_e + Y_C\underline{u}_s}{G + Y_C} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{\underline{u}_s = -\frac{1}{jRC\omega}\underline{u}_e}$$

## Montage intégrateur (réel)



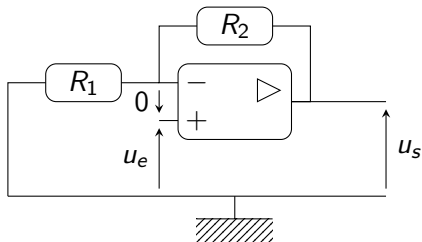
$$\frac{\underline{u}_s}{\underline{u}_e} = -\frac{R'}{R} \frac{1}{1 + jR'C\omega} \approx -\frac{1}{jRC\omega} \text{ si } \omega \gg \frac{1}{R'C}.$$

## Pont d'impédances



$$\left. \begin{array}{l} v^+ = 0 \\ v^- = \frac{Y_1 u_e + Y_2 u_s}{Y_1 + Y_2} \epsilon = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{u_s = -\frac{Z_2}{Z_1} u_e}$$

## Montage amplificateur NON inverseur



$$\left. \begin{array}{l} v^+ = u_e \\ \varepsilon = 0 \Rightarrow v^- = u_e \\ v^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_s \end{array} \right\} \Rightarrow u_s = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) u_e$$

## Conditions supplémentaires

### Attention !

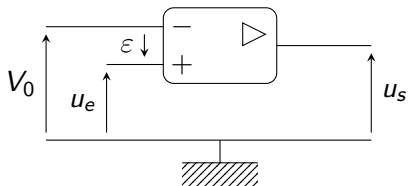
Les montages précédents ne fonctionnent en régime linéaire que si leur utilisation respecte les conditions suivantes :

- pas de saturation en tension :  $-V_{\text{sat}} \leq u_s \leq +V_{\text{sat}}$  ;
- pas de saturation en courant :  $|i_s| < i_{\text{sat}}$  ;
- fréquence du signal limitée (slew rate)  $\rightarrow$  T.P.

# Sommaire

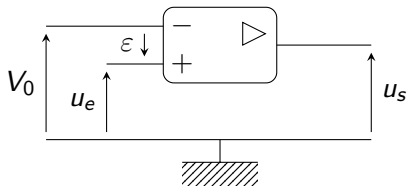
- 1 Caractéristiques de l'ALI
- 2 Montages fonctionnant en régime linéaire
- 3 Montages fonctionnant en régime saturé

## Comparateur simple



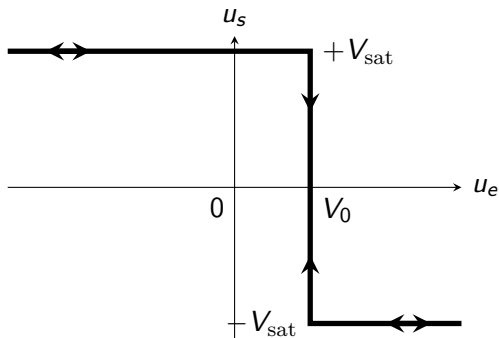


## Comparateur simple

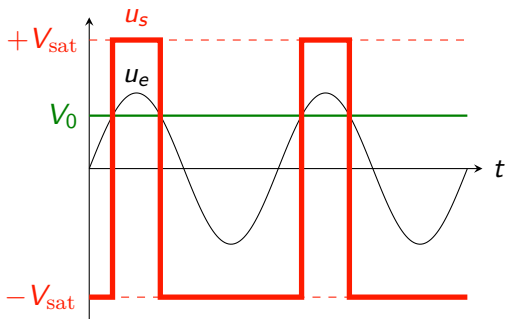


- $u_e > V_0 \Rightarrow \varepsilon > 0 \Rightarrow u_s = +V_{\text{sat}}$ .
- $u_e < V_0 \Rightarrow \varepsilon < 0 \Rightarrow u_s = -V_{\text{sat}}$ .

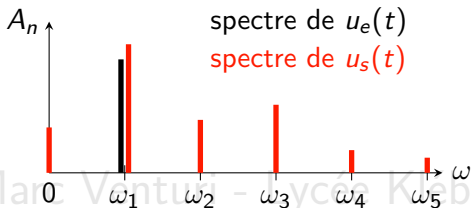
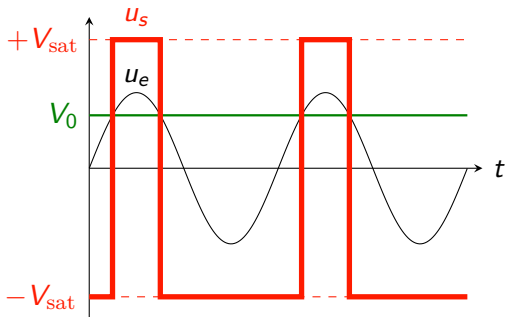
# Comparateur simple



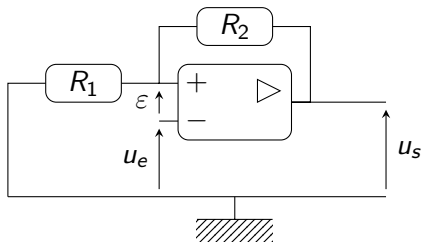
## Comparateur simple



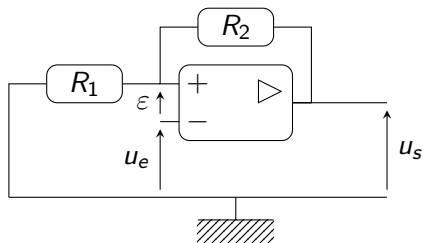
## Comparateur simple



## Comparateur à hystérésis



## Comparateur à hystérésis

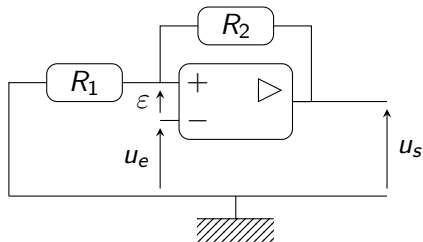


Relations générales :

$$v^+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_s$$

$$v^- = u_e$$

## Comparateur à hystérésis



Hypothèse 1

$$u_s = +V_{\text{sat}} \Rightarrow \varepsilon > 0$$

$$u_e < \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}}.$$

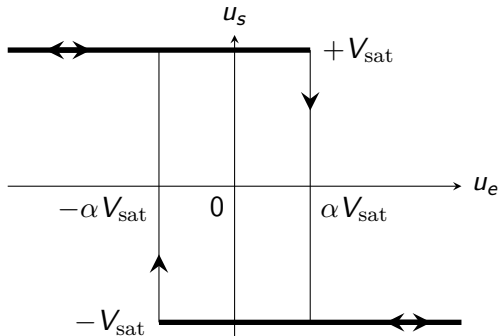
Hypothèse 2

$$u_s = -V_{\text{sat}} \Rightarrow \varepsilon < 0$$

$$u_e > -\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}}.$$

## Comparateur à hystérésis

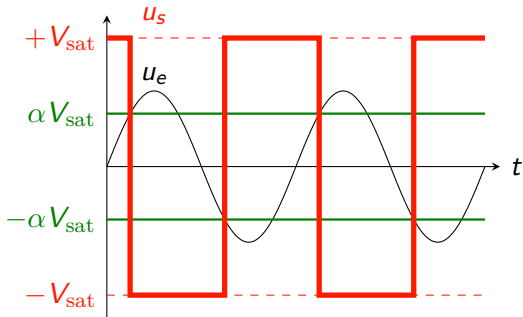
### Cycle d'hystérésis



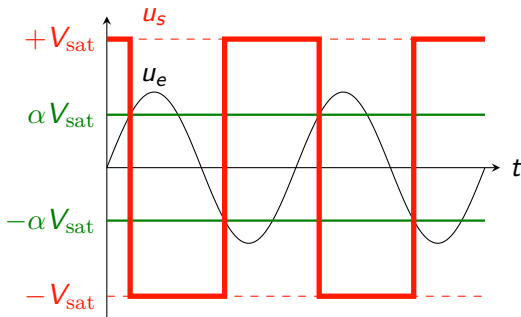
$$\alpha = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



## Comparateur à hystérésis



## Comparateur à hystérésis



**Question** : tracer le spectre du signal de sortie  $u_s(t)$ .

► Solution

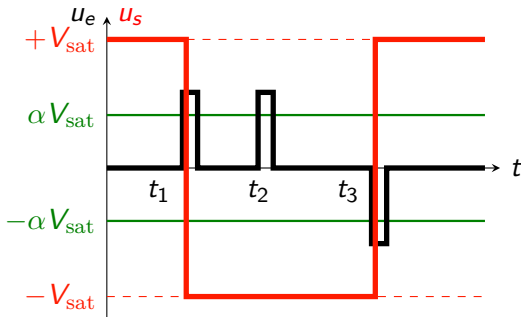
## Comparateur à hystérésis

Le comparateur à hystérésis présente une fonction **mémoire**.  
L'état de sortie à tension d'entrée nulle dépend de l'histoire passée du circuit.

$$u_e = 0 \Rightarrow u_s = \begin{cases} +V_{\text{sat}} \\ -V_{\text{sat}} \end{cases} ?$$

## Comparateur à hystérésis

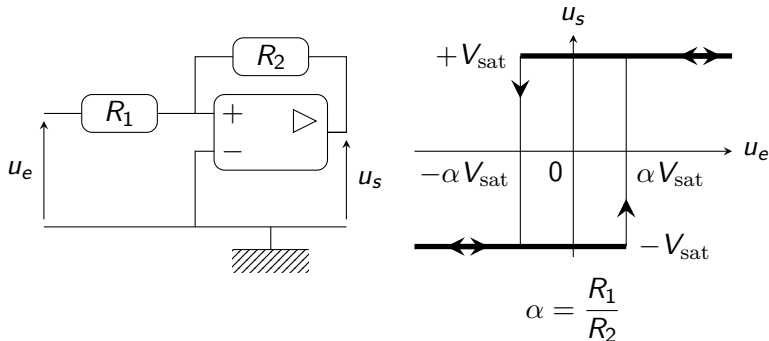
Fonction **mémoire** (1 bit).



Si on considère le codage binaire ( $-V_{sat} \rightarrow 0, +V_{sat} \rightarrow 1$ ), alors :  
à  $t_1$ , on écrit 0 dans la mémoire, à  $t_2$  on écrit 0 aussi, ce qui ne change rien, et à  $t_3$  on écrit 1 dans la mémoire.

## Exercice

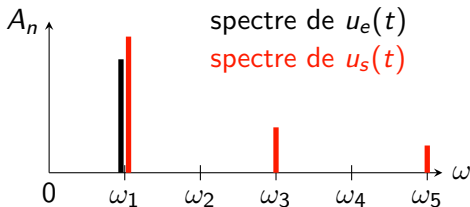
Montrer que le circuit suivant constitue un comparateur à hystérésis dont le cycle est donné ci-contre.



## Spectre du signal $u_s(t)$

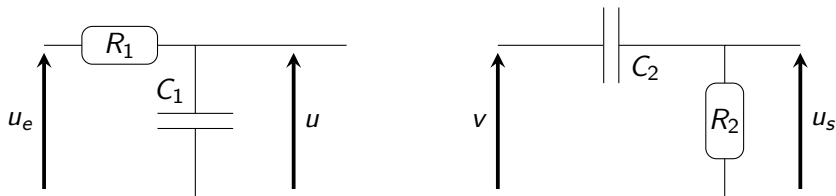
Le signal  $u_s(t)$  est un signal créneau, de moyenne nulle, de rapport cyclique  $\frac{1}{2}$  (la durée du signal haut est égale à la durée du signal bas).

On retrouve le spectre déjà étudié dans la chapitre précédent (Série de Fourier). Seules les harmoniques impaires sont non nulles :



## Application du suiveur

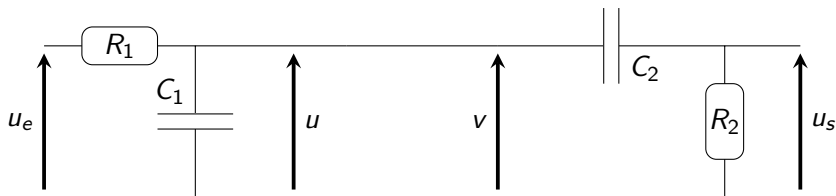
On désire obtenir un filtre passe-bande facilement réglable en connectant en cascade deux filtres, le premier passe-bas de pulsation de coupure  $\omega_{cb} = 1/R_1 C_1$ , le second passe-haut de pulsation de coupure  $\omega_{ch} = 1/R_2 C_2 < \omega_{cb}$  :



## Application du suiveur

Pour chaque filtre seul,  $\underline{H}_1 = \frac{1}{1 + jR_1 C_1 \omega}$  et  $\underline{H}_2 = \frac{jR_2 C_2 \omega}{1 + jR_2 C_2 \omega}$ .

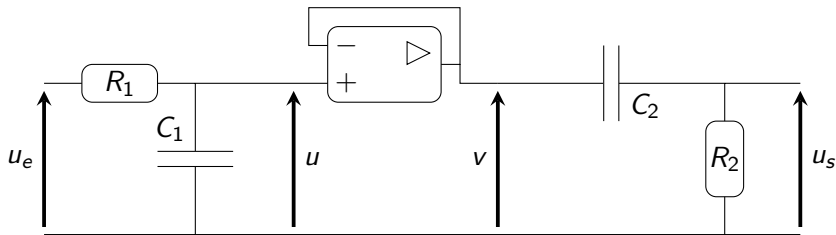
Si l'on relie directement la sortie du filtre 1 à l'entrée du filtre 2, on impose  $v = u$  mais la fonction de transfert du filtre global N'EST PAS le produit  $\underline{H}_2 \underline{H}_1$  ! (Pourquoi ? Quelle est la fonction de transfert ?)





# Application du suiveur

Cette fois,  $\frac{u_s}{u_e} = \underline{H}_2 \underline{H}_1 = \frac{jR_2 C_2 \omega}{(1 + jR_1 C_1 \omega)(1 + jR_2 C_2 \omega)}$ .



◀ Retour