Leçon 2 : rétroaction - exemple de l'ALI

E. Capitaine

TSI 2 - Lycée Charles Coëffin

10 septembre 2025

Plan

Plan

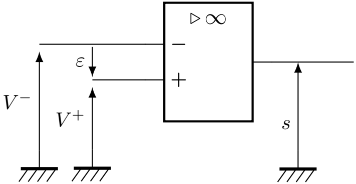
Introduction

Exemple de rétroactions négative et positive

(chaîne Youtube : Bozeman Science)

Plan

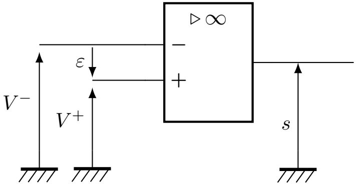
L'amplificateur opérationnel (noté AO ou ALI pour Amplificateur Linéaire Intégré) est un circuit intégré **actif** : il fournit donc de l'énergie via une alimentation (bornes $\pm U_{\text{ali}} = \pm 15\,\text{V}$ non représentées sur les schémas électriques).



Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Modèle de l'ALI linéaire du premier ordre

L'amplificateur opérationnel (noté AO ou ALI pour Amplificateur Linéaire Intégré) est un circuit intégré **actif** : il fournit donc de l'énergie via une alimentation (bornes $\pm U_{\text{ali}} = \pm 15\,\text{V}$ non représentées sur les schémas électriques).

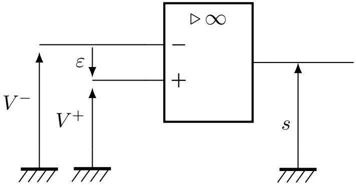


- Il comporte **deux entrées** : une entrée non inverseuse notée $+$ et de potentiel électrique V^+, une entrée inverseuse notée $-$ et de potentiel électrique V^-.

Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Modèle de l'ALI linéaire du premier ordre

L'amplificateur opérationnel (noté AO ou ALI pour Amplificateur Linéaire Intégré) est un circuit intégré **actif** : il fournit donc de l'énergie via une alimentation (bornes $\pm U_{\text{ali}} = \pm 15\,\text{V}$ non représentées sur les schémas électriques).

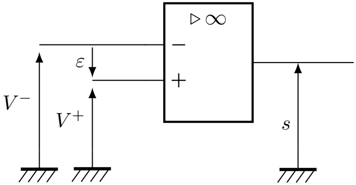


- Il comporte **deux entrées** : une entrée non inverseuse notée $+$ et de potentiel électrique V^+, une entrée inverseuse notée $-$ et de potentiel électrique V^-.
- Il comporte également **une sortie** dont la tension par rapport à la masse est notée s.

Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Modèle de l'ALI linéaire du premier ordre

L'amplificateur opérationnel (noté AO ou ALI pour Amplificateur Linéaire Intégré) est un circuit intégré **actif** : il fournit donc de l'énergie via une alimentation (bornes $\pm U_{\mathrm{ali}} = \pm 15\,\mathrm{V}$ non représentées sur les schémas électriques).



Comme son nom l'indique, l'ALI amplifie la différence de potentiels électrique en entrée

$$\varepsilon = V^+ - V^-$$

pour donner une tension de sortie s. La fonction de transfert du **modèle de l'ALI linéaire du 1er ordre** est celle d'un filtre passe-bas du premier ordre

$$\underline{H}_{ALI}(\jmath\omega) = \frac{\underline{s}}{\underline{\varepsilon}} = \frac{\mu_0}{1 + \jmath\omega\tau}$$

avec $\mu_0 \simeq 10^5$ **le gain statique** et $\tau = 1/\omega_0 \simeq 10\,\mathrm{ms}$ **le temps de réponse** de l'ALI.

Que se passe-t-il une fois que l'ALI a amplifié la différence ε pour fournir s ?

Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Modèle de l'ALI linéaire du premier ordre

Que se passe-t-il une fois que l'ALI a amplifié la différence ε pour fournir s ?
Il y a deux options :

- établir une boucle de **rétroaction négative** : en reliant la sortie s (ou V_s) à la borne inverseuse $-$

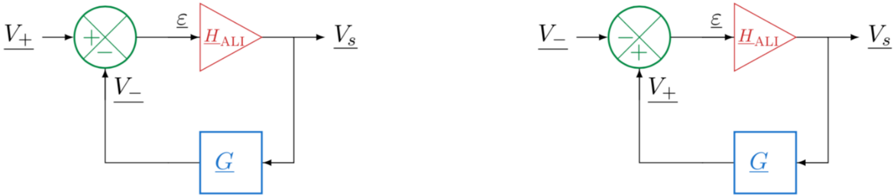


Figure – Schémas fonctionnels d'un montage à rétroaction négative (gauche) et à rétroaction positive (droite).

Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Modèle de l'ALI linéaire du premier ordre

Que se passe-t-il une fois que l'ALI a amplifié la différence ε pour fournir s ?
Il y a deux options :

- établir une boucle de **rétroaction négative** : en reliant la sortie s (ou V_s) à la borne inverseuse $-$
- établir une boucle de **rétroaction positive** : en reliant la sortie s (ou V_s) à la borne non inverseuse $+$.

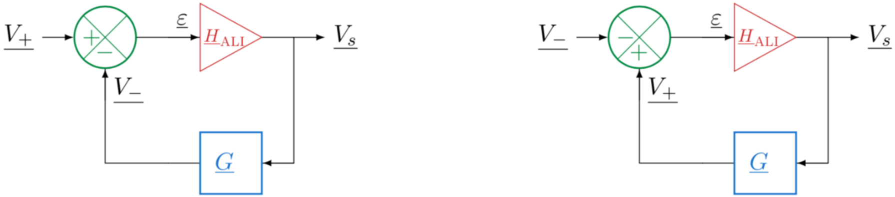


Figure – Schémas fonctionnels d'un montage à rétroaction négative (gauche) et à rétroaction positive (droite).

Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Modèle de l'ALI linéaire du premier ordre

Que se passe-t-il une fois que l'ALI a amplifié la différence ε pour fournir s ?

- Une **rétroaction négative** a, la plupart du temps, tendance à **stabiliser** le fonctionnement de l'ALI et le place en **régime linéaire**.

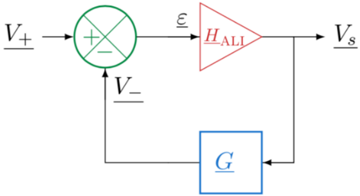


Figure – Schémas fonctionnels d'un montage à rétroaction négative (gauche) et à rétroaction positive (droite).

Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Modèle de l'ALI linéaire du premier ordre

Que se passe-t-il une fois que l'ALI a amplifié la différence ε pour fournir s ?

- Une **rétroaction négative** a, la plupart du temps, tendance à **stabiliser** le fonctionnement de l'ALI et le place en **régime linéaire**.
- Une **rétroaction positive** tend à **déstabiliser** le fonctionnement de l'ALI et le place en **régime de saturation**.

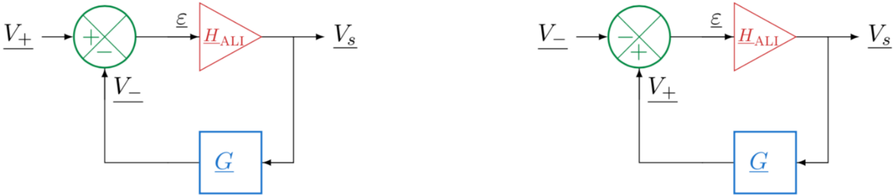


Figure – Schémas fonctionnels d'un montage à rétroaction négative (gauche) et à rétroaction positive (droite).

Si l'ALI permet d'amplifier ε pour donner s, cette tension ne peut pas dépasser les tensions de saturations $\pm V_{\text{sat}}$ légèrement inférieures aux tensions d'alimentation $\pm U_{\text{ali}}$.

Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Modèle de l'ALI linéaire du premier ordre

Si l'ALI permet d'amplifier ε pour donner s, cette tension ne peut pas dépasser les tensions de saturations $\pm V_{\text{sat}}$ légèrement inférieures aux tensions d'alimentation $\pm U_{\text{ali}}$. Lorsque s atteint ces limites, on dit que l'ALI fonctionne en **mode saturé**, sinon il fonctionne en **mode linéaire**.

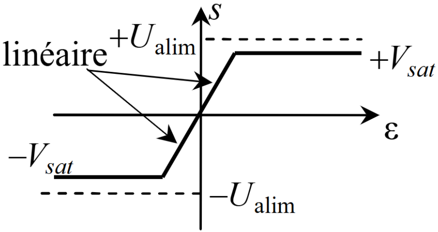


Figure – Caractéristique statique de l'ALI

Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Modèle de l'ALI linéaire du premier ordre

Si l'ALI permet d'amplifier ε pour donner s, cette tension ne peut pas dépasser les tensions de saturations $\pm V_{\text{sat}}$ légèrement inférieures aux tensions d'alimentation $\pm U_{\text{ali}}$. Lorsque s atteint ces limites, on dit que l'ALI fonctionne en **mode saturé**, sinon il fonctionne en **mode linéaire**.

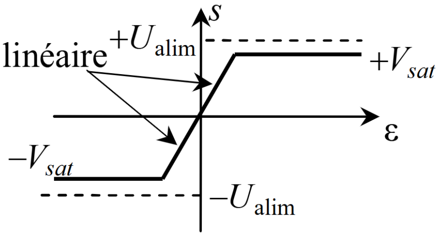


Figure – Caractéristique statique de l'ALI

Il existe aussi **une limitation de l'ALI en courant**. Le courant de sortie i_s est limité à une valeur de près de $20\,\text{mA}$.

D'autre part, la vitesse de balayage d'un ALI est limitée : le signal de sortie ne peut pas avoir une pente supérieure à une valeur limite σ de l'ordre de 1 à $10\,\mathrm{V}\cdot\mu\mathrm{s}^{-1}$ suivant les types d'ALI. C'est une limite en fréquence du comportement linéaire.

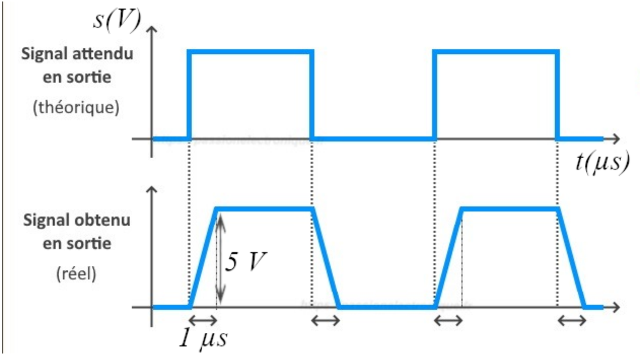
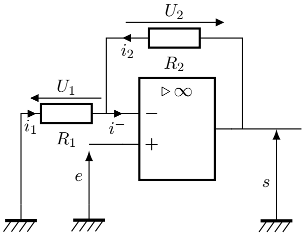


Figure – Comparaison signaux de sortie théorique et réel.

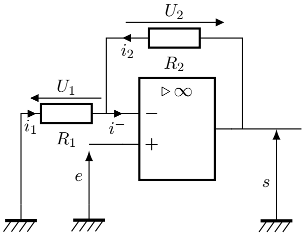
Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Exemple du montage amplificateur non inverseur



Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Exemple du montage amplificateur non inverseur

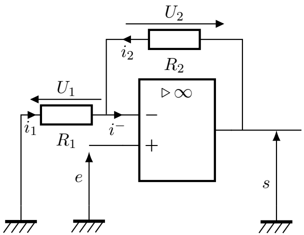


- On a la relation entre s et ε par définition du modèle de l'ALI linéaire du premier ordre

$$\underline{H}_{ALI}(\jmath\omega) = \frac{\underline{s}}{\underline{\varepsilon}} = \frac{\mu_0}{1 + \jmath\omega\tau} \quad \underline{s} = \underline{\varepsilon}\frac{\mu_0}{1 + \jmath\omega\tau}.$$

Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Exemple du montage amplificateur non inverseur



- On a la relation entre s et ε par définition du modèle de l'ALI linéaire du premier ordre

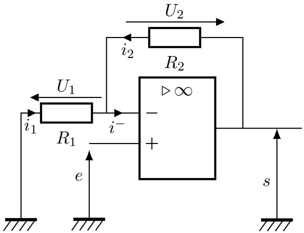
$$\underline{H}_{ALI}(\jmath\omega) = \frac{\underline{s}}{\underline{\varepsilon}} = \frac{\mu_0}{1+\jmath\omega\tau} \quad \underline{s} = \underline{\varepsilon}\frac{\mu_0}{1+\jmath\omega\tau}.$$

- On a la définition de ε

$$\varepsilon = V_+ - V_-.$$

Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Exemple du montage amplificateur non inverseur

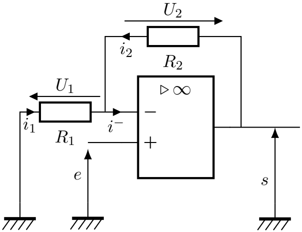


- On définit V_+ à partir de la lecture des potentiels

$$e = V_+ - V_M = V_+.$$

Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Exemple du montage amplificateur non inverseur



- On définit V_+ à partir de la lecture des potentiels

$$e = V_+ - V_M = V_+.$$

- Pour V_- on utilise la loi des nœuds en terme de potentiels

$$i_1 + i_2 = i_- \quad ; \quad i_1 + i_2 = 0 \quad ; \quad \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} = 0$$

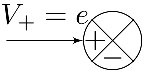
$$\frac{V_M - V_-}{R_1} + \frac{V_s - V_-}{R_2} = 0 \;\; ; \;\; \frac{-V_-}{R_1} + \frac{s - V_-}{R_2} = 0 \;\; ; \;\; V_- = s\frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Exemple du montage amplificateur non inverseur

On peut alors trace le schéma fonctionnel du montage

- $V_+ = e$

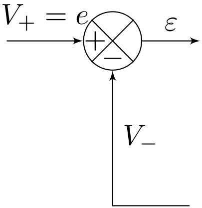


Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Exemple du montage amplificateur non inverseur

On peut alors trace le schéma fonctionnel du montage

- $V_+ = e$
- $\varepsilon = V_+ - V_-$

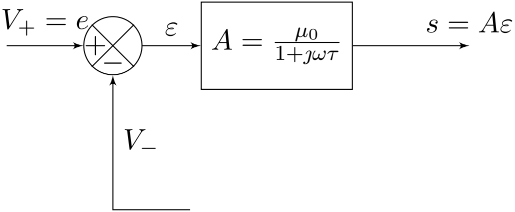


Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Exemple du montage amplificateur non inverseur

On peut alors trace le schéma fonctionnel du montage

- $V_+ = e$
- $\varepsilon = V_+ - V_-$
- $\underline{s} = \underline{\varepsilon}\frac{\mu_0}{1+\jmath\omega\tau}$

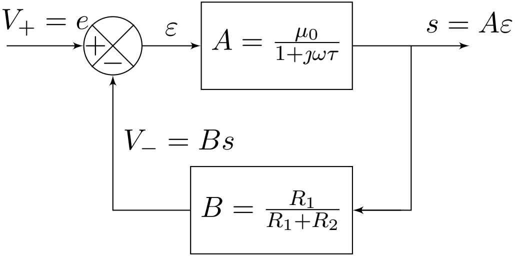


Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Exemple du montage amplificateur non inverseur

On peut alors trace le schéma fonctionnel du montage

- $V_+ = e$
- $\varepsilon = V_+ - V_-$
- $\underline{s} = \underline{\varepsilon}\frac{\mu_0}{1+\jmath\omega\tau}$
- $V_- = s\frac{R_1}{R_1+R_2}$.

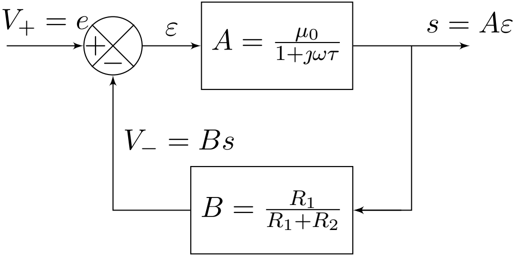


Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Exemple du montage amplificateur non inverseur

On peut alors trace le schéma fonctionnel du montage

- $V_+ = e$
- $\varepsilon = V_+ - V_-$
- $\underline{s} = \underline{\varepsilon}\frac{\mu_0}{1+\jmath\omega\tau}$
- $V_- = s\frac{R_1}{R_1+R_2}$.



On en déduit la fonction de transfert du montage à partir de ces quatres relations :

$$\varepsilon = V_+ - V_- = e - Bs \quad ; \quad \frac{s}{A} = e - Bs \quad ; \quad s\left(\frac{1}{A} + B\right) = e$$

$$\frac{s}{e} = \frac{1}{\frac{1}{A} + B} \quad ; \quad \frac{\underline{s}}{\underline{e}} = \frac{1}{\frac{1}{\mu_0} + \frac{R_1}{R_1+R_2} + \jmath\omega\frac{\tau}{\mu_0}} \simeq \frac{1}{\frac{R_1}{R_1+R_2} + \jmath\omega\frac{\tau}{\mu_0}} \quad \text{car } \mu_0 \gg 1.$$

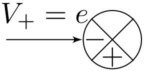
Système stable.

Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Exemple du montage amplificateur non inverseur

On prend le même montage mais **on inverse les branchements sur les bornes + et -.**

- $V_- = e$

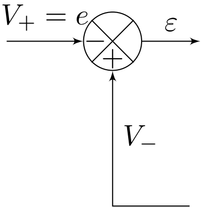


Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Exemple du montage amplificateur non inverseur

On prend le même montage mais **on inverse les branchements sur les bornes + et -.**

- $V_- = e$
- $\varepsilon = V_+ - V_-$

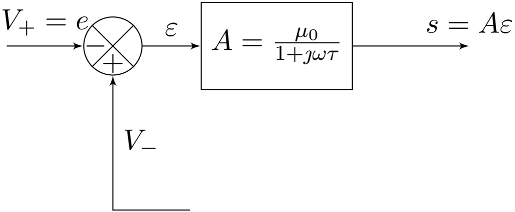


Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Exemple du montage amplificateur non inverseur

On prend le même montage mais **on inverse les branchements sur les bornes + et -.**

- $V_- = e$
- $\varepsilon = V_+ - V_-$
- $\underline{s} = \underline{\varepsilon}\frac{\mu_0}{1+\jmath\omega\tau}$

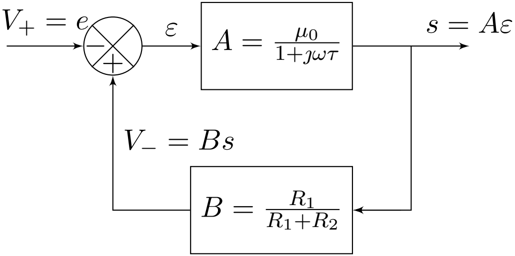


Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Exemple du montage amplificateur non inverseur

On prend le même montage mais **on inverse les branchements sur les bornes + et -.**

- $V_- = e$
- $\varepsilon = V_+ - V_-$
- $\underline{s} = \underline{\varepsilon}\frac{\mu_0}{1+\jmath\omega\tau}$
- $V_+ = s\frac{R_1}{R_1+R_2}$.

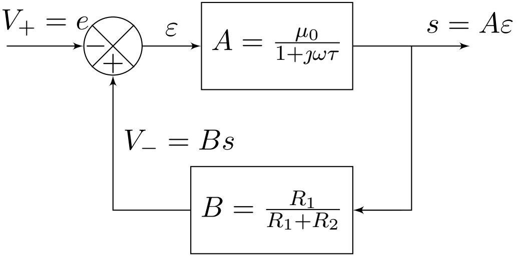


Amplificateur opérationnel linéaire du premier ordre

Exemple du montage amplificateur non inverseur

On prend le même montage mais **on inverse les branchements sur les bornes + et -.**

- $V_- = e$
- $\varepsilon = V_+ - V_-$
- $\underline{s} = \underline{\varepsilon}\frac{\mu_0}{1+\jmath\omega\tau}$
- $V_+ = s\frac{R_1}{R_1+R_2}$.



On en déduit la fonction de transfert du montage à partir de ces quatres relations :

$$\varepsilon = V_+ - V_- = e - Bs \quad ; \quad \frac{s}{A} = Bs - e \quad ; \quad s\left(B - \frac{1}{A}\right) = e$$

$$\frac{s}{e} = \frac{1}{B - \frac{1}{A}} \quad ; \quad \frac{\underline{s}}{\underline{e}} = \frac{1}{\frac{1}{\mu_0} - \frac{R_1}{R_1+R_2} + \jmath\omega\frac{\tau}{\mu_0}} \simeq \frac{1}{-\frac{R_1}{R_1+R_2} + \jmath\omega\frac{\tau}{\mu_0}} \quad \text{car } \mu_0 \gg 1$$

Système instable.

Plan

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Modèle

Le modèle de l'ALI idéal en gain infini est une modélisation encore simplifiée du modèle précédent.

ALI idéal :

Gain infini :

Régime linéaire :

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Modèle

Le modèle de l'ALI idéal en gain infini est une modélisation encore simplifiée du modèle précédent.

ALI idéal :

- intensités de polarisation i_+ et i_- nulles : **résistance d'entrée infinie**

Gain infini :

Régime linéaire :

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Modèle

Le modèle de l'ALI idéal en gain infini est une modélisation encore simplifiée du modèle précédent.

ALI idéal :

- intensités de polarisation i_+ et i_- nulles : **résistance d'entrée infinie**
- intensité de sortie i_s indépendante de V_s : **résistance de sortie nulle**.

Gain infini :

Régime linéaire :

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Modèle

Le modèle de l'ALI idéal en gain infini est une modélisation encore simplifiée du modèle précédent.

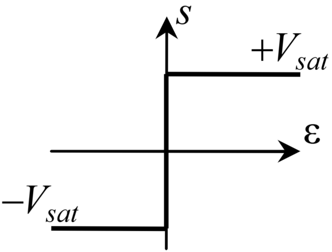
ALI idéal :

- intensités de polarisation i_+ et i_- nulles : **résistance d'entrée infinie**
- intensité de sortie i_s indépendante de V_s : **résistance de sortie nulle**.

Gain infini :

- $\mu_0 = +\infty$.

Régime linéaire :



Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Modèle

Le modèle de l'ALI idéal en gain infini est une modélisation encore simplifiée du modèle précédent.

ALI idéal :

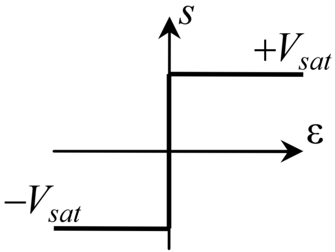
- intensités de polarisation i_+ et i_- nulles : **résistance d'entrée infinie**
- intensité de sortie i_s indépendante de V_s : **résistance de sortie nulle**.

Gain infini :

- $\mu_0 = +\infty$.

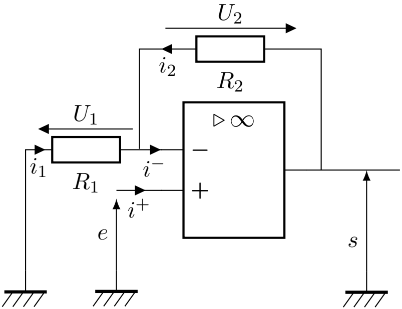
Régime linéaire :

- $\varepsilon = V_+ - V_- = 0$.



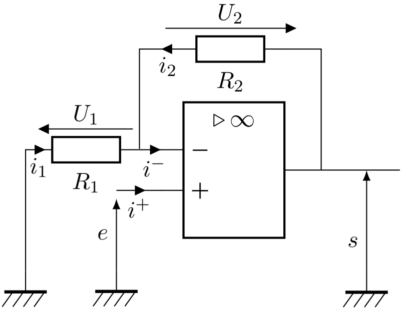
Le montage amplificateur non inverseur

- Régime linéaire car
- $V_+ =$
- $V_- =$
- Relation entre s et e :
- Résistances d'entrée et sortie :



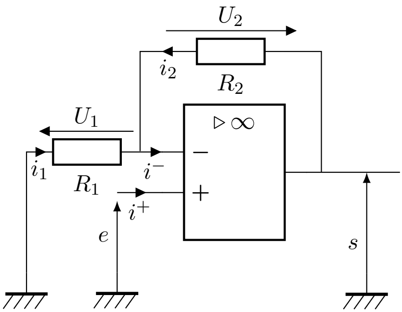
Le montage amplificateur non inverseur

- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ =$
- $V_- =$
- Relation entre s et e :
- Résistances d'entrée et sortie :



Le montage amplificateur non inverseur

- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = \ e$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- $V_- =$
- Relation entre s et e :
- Résistances d'entrée et sortie :

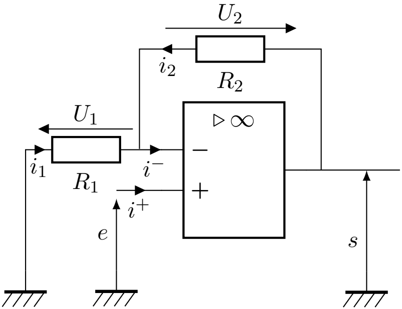


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

Le montage amplificateur non inverseur

- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = e$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- $V_- = s\frac{R_1}{R_1+R_2}$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- Relation entre s et e :



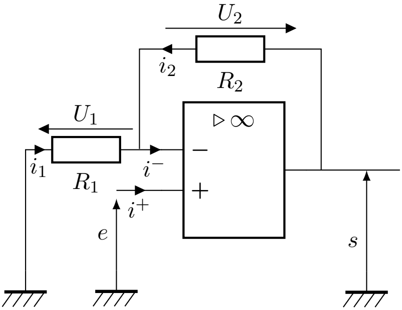
- Résistances d'entrée et sortie :

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

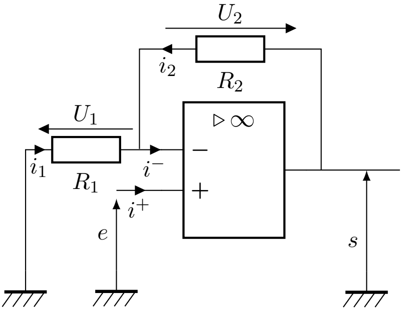
Le montage amplificateur non inverseur

- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = e$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- $V_- = s\frac{R_1}{R_1+R_2}$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- Relation entre s et e : régime linéaire donc $\varepsilon = V_+ - V_- = 0$
  $e - s\frac{R_1}{R_1+R_2} = 0$
  $s = e\frac{R_1+R_2}{R_2}$.
- Résistances d'entrée et sortie :



Le montage amplificateur non inverseur

- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = e$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- $V_- = s\frac{R_1}{R_1+R_2}$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- Relation entre s et e : régime linéaire donc $\varepsilon = V_+ - V_- = 0$
  $e - s\frac{R_1}{R_1+R_2} = 0$
  $s = e\frac{R_1+R_2}{R_2}$.
- Résistances d'entrée et sortie : $R_e = \frac{e}{i_+} = +\infty$ et $R_s = 0$ (s pas modifiée si on place une impédance en sortie d'ALI).

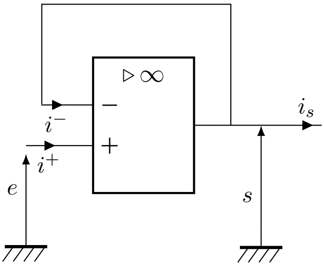


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

Le montage suiveur

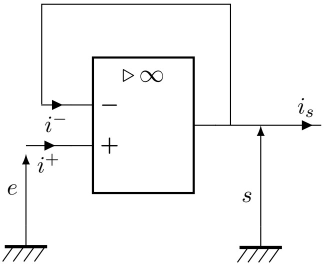
- Régime linéaire car
- $V_+ =$
- $V_- =$
- Relation entre s et e :
- Résistances d'entrée et sortie :



Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Le montage suiveur

- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ =$
- $V_- =$
- Relation entre s et e :
- Résistances d'entrée et sortie :

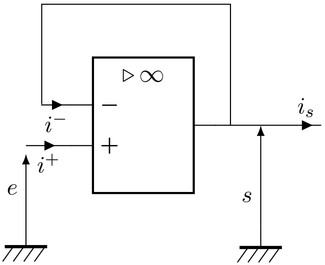


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

Le montage suiveur

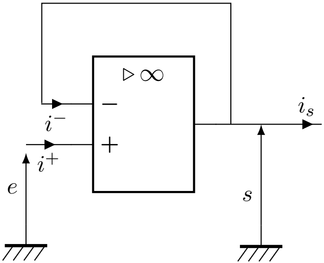
- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = \ e$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- $V_- =$
- Relation entre s et e :
- Résistances d'entrée et sortie :



Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Le montage suiveur

- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = e$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- $V_- = s$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- Relation entre s et e :



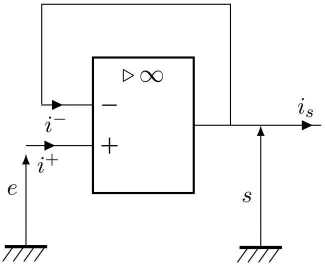
- Résistances d'entrée et sortie :

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

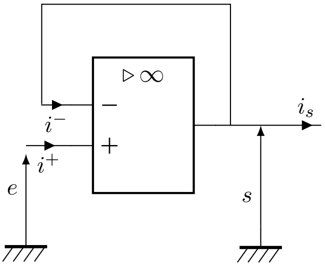
Le montage suiveur

- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = e$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- $V_- = s$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- Relation entre s et e : régime linéaire donc $\varepsilon = V_+ - V_- = 0$
  $e - s = 0$
  $s = e$.
- Résistances d'entrée et sortie :



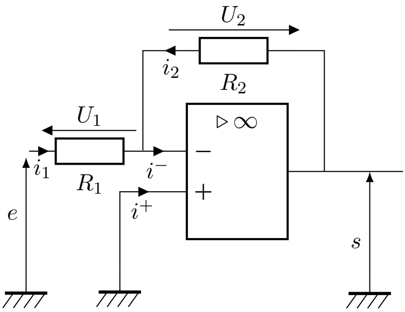
Le montage suiveur

- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = e$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- $V_- = s$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- Relation entre s et e : régime linéaire donc $\varepsilon = V_+ - V_- = 0$
  $e - s = 0$
  $s = e$.
- Résistances d'entrée et sortie : $R_e = \frac{e}{i_+} = +\infty$ et $R_s = 0$ (s pas modifiée si on place une impédance en sortie d'ALI).



Le montage amplificateur inverseur

- Régime linéaire car
- $V_+ =$
- $V_- =$
- Relation entre s et e :
- Résistances d'entrée et sortie :

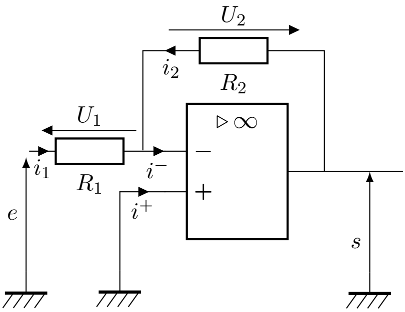


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

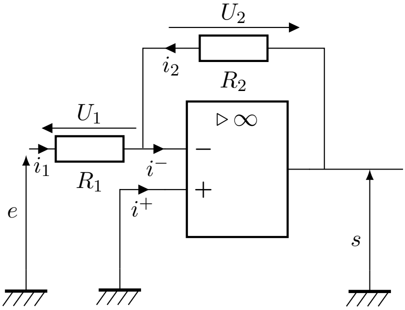
Le montage amplificateur inverseur

- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ =$
- $V_- =$
- Relation entre s et e :
- Résistances d'entrée et sortie :



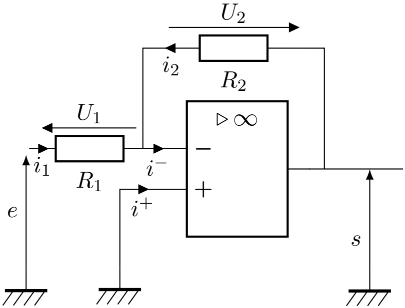
Le montage amplificateur inverseur

- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = 0$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- $V_- =$
- Relation entre s et e :
- Résistances d'entrée et sortie :



Le montage amplificateur inverseur

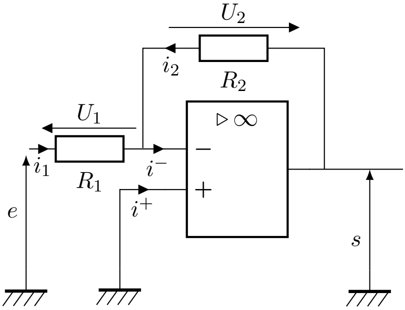
- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = 0$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- $V_- = \frac{sR_1}{R_1+R_2} + \frac{eR_2}{R_1+R_2}$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- Relation entre s et e :



- Résistances d'entrée et sortie :

Le montage amplificateur inverseur

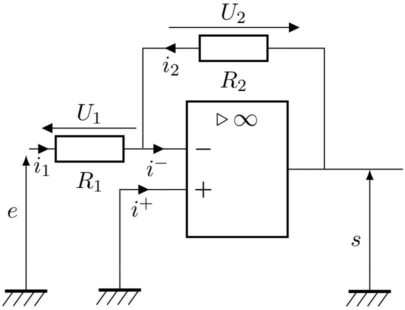
- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = \ 0$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- $V_- = \ \frac{sR_1}{R_1+R_2} + \frac{eR_2}{R_1+R_2}$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- Relation entre s et e : régime linéaire donc $\varepsilon = V_+ - V_- = 0$
  $0 - \frac{sR_1}{R_1+R_2} - \frac{eR_2}{R_1+R_2} = 0$
  $s = -e\frac{R_2}{R_1}$.
- Résistances d'entrée et sortie :



Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Le montage amplificateur inverseur

- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = 0$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- $V_- = \frac{sR_1}{R_1+R_2} + \frac{eR_2}{R_1+R_2}$ (loi des nœuds en termes de potentiels ou lecture directe du potentiel).
- Relation entre s et e : régime linéaire donc $\varepsilon = V_+ - V_- = 0$
  $0 - \frac{sR_1}{R_1+R_2} - \frac{eR_2}{R_1+R_2} = 0$
  $s = -e\frac{R_2}{R_1}$.
- Résistances d'entrée et sortie : $R_e = \frac{e}{i_1} = R_1$ et $R_s = 0$ on perd une des qualités de l'ALI : impédance d'entrée plus infinie.

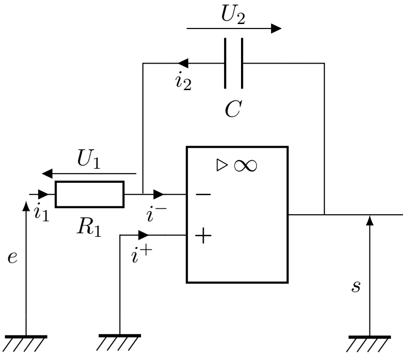


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

Le montage intégrateur

- Régime linéaire car
- $V_+ =$
- $\underline{V}_- =$
- Relation entre s et e :
- Résistances d'entrée et sortie :

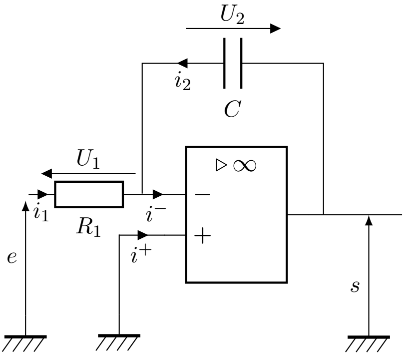


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

Le montage intégrateur

- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ =$
- $\underline{V}_- =$
- Relation entre s et e :



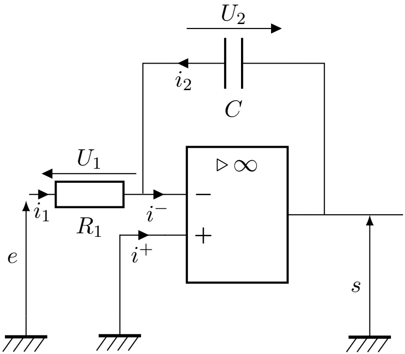
- Résistances d'entrée et sortie :

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

Le montage intégrateur

- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = \ 0.$
- $\underline{V}_- =$
- Relation entre s et e :



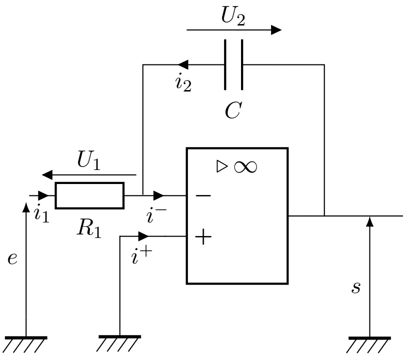
- Résistances d'entrée et sortie :

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

Le montage intégrateur

- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = 0$.
- $\underline{V}_- = \frac{\underline{e}+\jmath\omega R_1 C \underline{s}}{1+\jmath\omega R_1 C}$.
- Relation entre s et e :
- Résistances d'entrée et sortie :

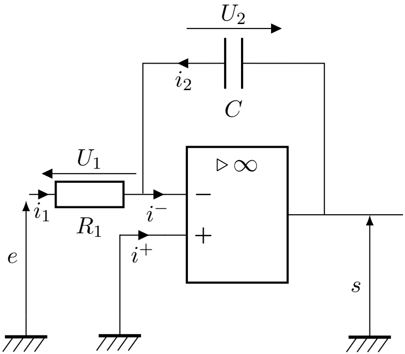


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

Le montage intégrateur

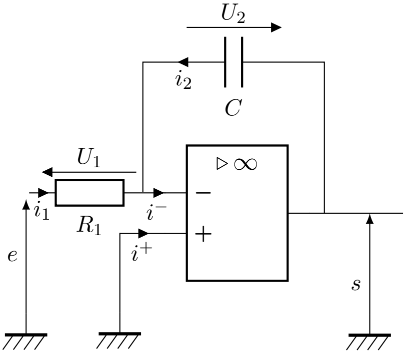
- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = 0.$
- $\underline{V}_- = \frac{\underline{e}+\jmath\omega R_1 C\underline{s}}{1+\jmath\omega R_1 C}.$
- Relation entre s et e : régime linéaire donc $\varepsilon = V_+ - V_- = 0$
  $0 - \frac{\underline{e}+\jmath\omega R_1 C\underline{s}}{1+\jmath\omega R_1 C} = 0$
  $\underline{s} = -\frac{1}{\jmath\omega}\frac{\underline{e}}{R_1 C}$
  $s(t) = -\frac{1}{R_1 C}\int_0^t e(t)\mathrm{d}t.$
- Résistances d'entrée et sortie :



Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Le montage intégrateur

- Régime linéaire car rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = 0$.
- $\underline{V_-} = \frac{\underline{e}+\jmath\omega R_1 C \underline{s}}{1+\jmath\omega R_1 C}$.
- Relation entre s et e : régime linéaire donc $\varepsilon = V_+ - V_- = 0$
  $0 - \frac{\underline{e}+\jmath\omega R_1 C \underline{s}}{1+\jmath\omega R_1 C} = 0$
  $\underline{s} = -\frac{1}{\jmath\omega}\frac{\underline{e}}{R_1 C}$
  $s(t) = -\frac{1}{R_1 C}\int_0^t e(t)\mathrm{d}t$.
- Résistances d'entrée et sortie : $R_e = \frac{e}{i_1} = R_1$ et $R_s = 0$ on perd une des qualités de l'ALI : impédance d'entrée plus infinie.

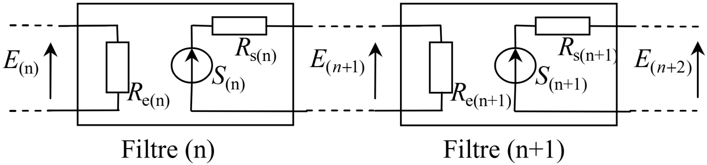


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

Associations en cascade ou pourquoi est-il intéressant d'avoir une résistance d'entrée infinie et une résistance de sortie nulle ?

- Chaque filtre n est modélisé par une résistance d'entrée $R_{\mathrm{e(n)}}$ et un générateur de Thévenin en sortie de f.é.m. $S_{\mathrm{(n)}}$ et de résistance de sortie $R_{\mathrm{s(n)}}$.

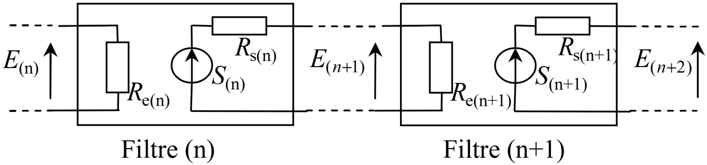


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

Associations en cascade ou pourquoi est-il intéressant d'avoir une résistance d'entrée infinie et une résistance de sortie nulle ?

- Chaque filtre n est modélisé par une résistance d'entrée $R_{\mathrm{e(n)}}$ et un générateur de Thévenin en sortie de f.é.m. $S_{\mathrm{(n)}}$ et de résistance de sortie $R_{\mathrm{s(n)}}$.
- La fonction de transfert d'un filtre seul est : $H_{\mathrm{n}} =$.

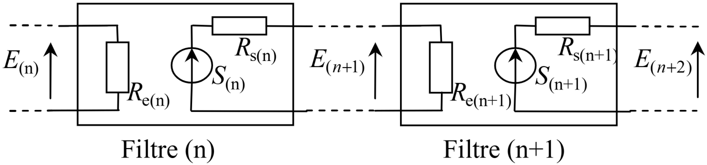


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

Associations en cascade ou pourquoi est-il intéressant d'avoir une résistance d'entrée infinie et une résistance de sortie nulle ?

- Chaque filtre n est modélisé par une résistance d'entrée $R_{\mathrm{e(n)}}$ et un générateur de Thévenin en sortie de f.é.m. $S_{\mathrm{(n)}}$ et de résistance de sortie $R_{\mathrm{s(n)}}$.
- La fonction de transfert d'un filtre seul est : $H_{\mathrm{n}} = S_{\mathrm{(n)}}/E_{\mathrm{(n)}}$.

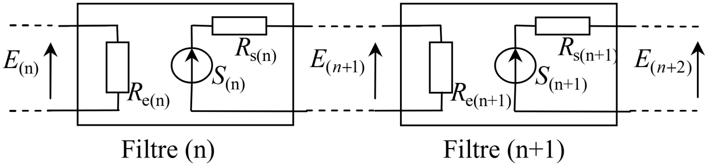


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

Associations en cascade ou pourquoi est-il intéressant d'avoir une résistance d'entrée infinie et une résistance de sortie nulle ?

- Chaque filtre n est modélisé par une résistance d'entrée $R_{\mathrm{e(n)}}$ et un générateur de Thévenin en sortie de f.é.m. $S_{\mathrm{(n)}}$ et de résistance de sortie $R_{\mathrm{s(n)}}$.
- La fonction de transfert d'un filtre seul est : $H_{\mathrm{n}} = S_{\mathrm{(n)}}/E_{\mathrm{(n)}}$.
- La fonction de transfert d'un filtre n quand il est associé à un filtre $\mathrm{n}+1$ est : $H'_{\mathrm{n}} =$

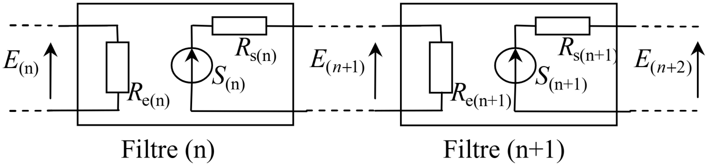


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

Associations en cascade ou pourquoi est-il intéressant d'avoir une résistance d'entrée infinie et une résistance de sortie nulle ?

- Chaque filtre n est modélisé par une résistance d'entrée $R_{\mathrm{e(n)}}$ et un générateur de Thévenin en sortie de f.é.m. $S_{\mathrm{(n)}}$ et de résistance de sortie $R_{\mathrm{s(n)}}$.
- La fonction de transfert d'un filtre seul est : $H_{\mathrm{n}} = S_{\mathrm{(n)}}/E_{\mathrm{(n)}}$.
- La fonction de transfert d'un filtre n quand il est associé à un filtre $\mathrm{n}+1$ est : $H'_{\mathrm{n}} = E_{\mathrm{(n+1)}}/E_{\mathrm{(n)}}$.

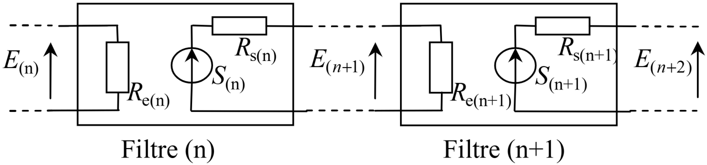


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

Associations en cascade ou pourquoi est-il intéressant d'avoir une résistance d'entrée infinie et une résistance de sortie nulle ?

- Chaque filtre n est modélisé par une résistance d'entrée $R_{\mathrm{e(n)}}$ et un générateur de Thévenin en sortie de f.é.m. $S_{\mathrm{(n)}}$ et de résistance de sortie $R_{\mathrm{s(n)}}$.
- La fonction de transfert d'un filtre seul est : $H_{\mathrm{n}} = S_{\mathrm{(n)}}/E_{\mathrm{(n)}}$.
- La fonction de transfert d'un filtre n quand il est associé à un filtre $\mathrm{n}+1$ est : $H'_{\mathrm{n}} = E_{\mathrm{(n+1)}}/E_{\mathrm{(n)}}$.
  Mais attention **a priori** $E_{\mathrm{(n+1)}} \neq S_{\mathrm{(n)}}$ donc $H'_{\mathrm{n}} \neq H_{\mathrm{n}}$: **la mise en cascade change le comportement d'un filtre.**

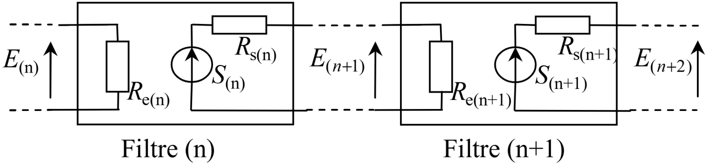


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

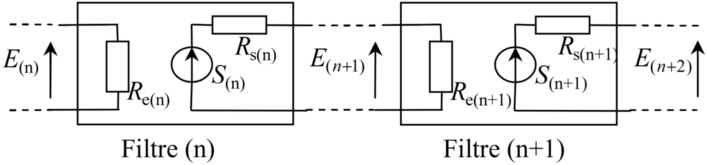
Associations en cascade ou pourquoi est-il intéressant d'avoir une résistance d'entrée infinie et une résistance de sortie nulle ?

- Pour empêcher cette modification due à la mise en cascade il faut que $H'_{\mathrm{n}} = E_{(\mathrm{n}+1)}/E_{(\mathrm{n})}$ soit égale à $H_{\mathrm{n}} = S_{(\mathrm{n})}/E_{(\mathrm{n})}$, donc $E_{(\mathrm{n}+1)} =$



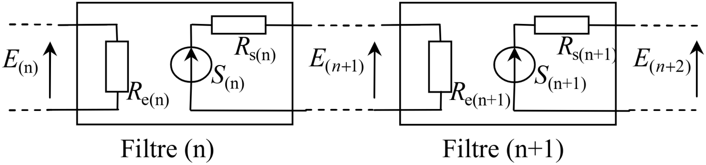
Associations en cascade ou pourquoi est-il intéressant d'avoir une résistance d'entrée infinie et une résistance de sortie nulle ?

- Pour empêcher cette modification due à la mise en cascade il faut que $H'_{\mathrm{n}} = E_{(\mathrm{n}+1)}/E_{(\mathrm{n})}$ soit égale à $H_{\mathrm{n}} = S_{(\mathrm{n})}/E_{(\mathrm{n})}$, donc $E_{(\mathrm{n}+1)} = S_{(\mathrm{n})}$.



Associations en cascade ou pourquoi est-il intéressant d'avoir une résistance d'entrée infinie et une résistance de sortie nulle ?

- Pour empêcher cette modification due à la mise en cascade il faut que $H'_{\mathrm{n}} = E_{(\mathrm{n}+1)}/E_{(\mathrm{n})}$ soit égale à $H_{\mathrm{n}} = S_{(\mathrm{n})}/E_{(\mathrm{n})}$, donc $E_{(\mathrm{n}+1)} = S_{(\mathrm{n})}$.
- Pour cela il faut que la tension $U_{R_{\mathrm{s(n)}}}$ aux bornes de $R_{\mathrm{s(n)}}$ tendent vers 0, il y a deux solutions :

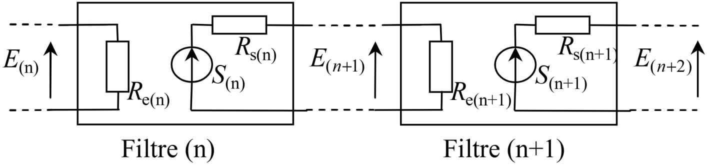


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

Associations en cascade ou pourquoi est-il intéressant d'avoir une résistance d'entrée infinie et une résistance de sortie nulle ?

- Pour empêcher cette modification due à la mise en cascade il faut que $H'_{\mathrm{n}} = E_{(\mathrm{n+1})}/E_{(\mathrm{n})}$ soit égale à $H_{\mathrm{n}} = S_{(\mathrm{n})}/E_{(\mathrm{n})}$, donc $E_{(\mathrm{n+1})} = S_{(\mathrm{n})}$.
- Pour cela il faut que la tension $U_{R_{\mathrm{s(n)}}}$ aux bornes de $R_{\mathrm{s(n)}}$ tendent vers 0, il y a deux solutions :
  - $R_{\mathrm{s(n)}} = 0$, donc $U_{R_{\mathrm{s(n)}}} = R_{\mathrm{s(n)}} i = 0$

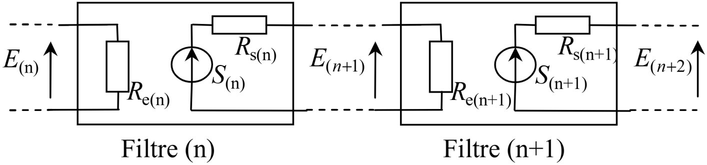


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

Associations en cascade ou pourquoi est-il intéressant d'avoir une résistance d'entrée infinie et une résistance de sortie nulle ?

- Pour empêcher cette modification due à la mise en cascade il faut que $H'_\mathrm{n} = E_{(\mathrm{n}+1)}/E_{(\mathrm{n})}$ soit égale à $H_\mathrm{n} = S_{(\mathrm{n})}/E_{(\mathrm{n})}$, donc $E_{(\mathrm{n}+1)} = S_{(\mathrm{n})}$.
- Pour cela il faut que la tension $U_{R_{\mathrm{s}(\mathrm{n})}}$ aux bornes de $R_{\mathrm{s}(\mathrm{n})}$ tendent vers 0, il y a deux solutions :
  - $R_{\mathrm{s}(\mathrm{n})} = 0$, donc $U_{R_{\mathrm{s}(\mathrm{n})}} = R_{\mathrm{s}(\mathrm{n})} i = 0$
  - $R_{e(\mathrm{n}+1)} \to +\infty$, donc $U_{R_{\mathrm{s}(\mathrm{n})}} = S_{(\mathrm{n})} \frac{R_{\mathrm{s}(\mathrm{n})}}{R_{\mathrm{s}(\mathrm{n})} + R_{e(\mathrm{n}+1)}} \to 0$.

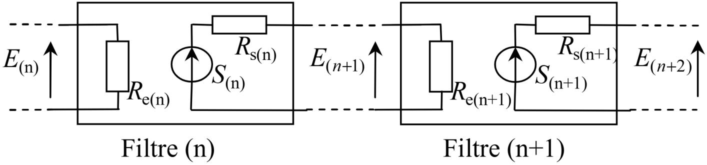


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime linéaire

Exemples

Associations en cascade ou pourquoi est-il intéressant d'avoir une résistance d'entrée infinie et une résistance de sortie nulle ?

Une grande impédance d'entrée OU une faible impédance de sortie permet l'association en cascade de filtres sans perturber leur fonction de transfert. D'où l'intérêt de nombreux montages avec ALI.



Plan

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Modèle

Le modèle de l'ALI idéal en gain infini est une modélisation encore simplifiée du modèle précédent.

ALI idéal :

Gain infini :

Régime saturée :

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Modèle

Le modèle de l'ALI idéal en gain infini est une modélisation encore simplifiée du modèle précédent.

ALI idéal :

- intensités de polarisation i_+ et i_- nulles : **résistance d'entrée infinie**

Gain infini :

Régime saturée :

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Modèle

Le modèle de l'ALI idéal en gain infini est une modélisation encore simplifiée du modèle précédent.

ALI idéal :

- intensités de polarisation i_+ et i_- nulles : **résistance d'entrée infinie**
- intensité de sortie i_s indépendante de V_s : **résistance de sortie nulle**.

Gain infini :

Régime saturée :

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Modèle

Le modèle de l'ALI idéal en gain infini est une modélisation encore simplifiée du modèle précédent.

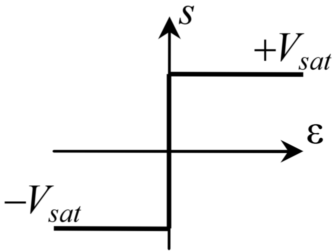
ALI idéal :

- intensités de polarisation i_+ et i_- nulles : **résistance d'entrée infinie**
- intensité de sortie i_s indépendante de V_s : **résistance de sortie nulle**.

Gain infini :

- $\mu_0 = +\infty$.

Régime saturée :



Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Modèle

Le modèle de l'ALI idéal en gain infini est une modélisation encore simplifiée du modèle précédent.

ALI idéal :

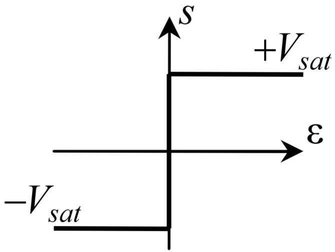
- intensités de polarisation i_+ et i_- nulles : **résistance d'entrée infinie**
- intensité de sortie i_s indépendante de V_s : **résistance de sortie nulle**.

Gain infini :

- $\mu_0 = +\infty$.

Régime saturée :

- Si $V_+ > V_-$ soit $\varepsilon > 0$
  alors $s = +V_{\mathrm{sat}}$.
  Si $V_+ < V_-$ soit $\varepsilon < 0$
  alors $s = -V_{\mathrm{sat}}$.

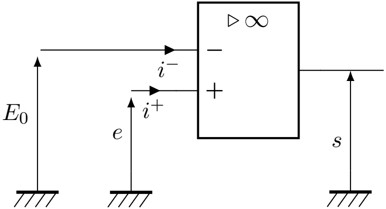


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur simple

- Régime saturée car

- $V_+ =$
- $V_- =$
- Relation entre s et e :

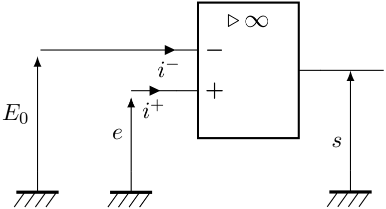


- Résistances d'entrée et sortie :

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur simple

- Régime saturée car pas de rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ =$
- $V_- =$
- Relation entre s et e :

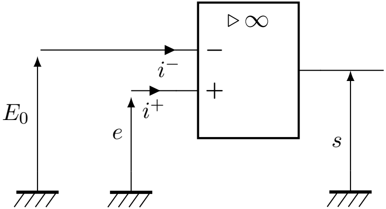


- Résistances d'entrée et sortie :

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur simple

- Régime saturée car pas de rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ =\ e$.
- $V_- =$
- Relation entre s et e :

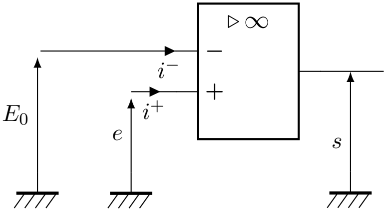


- Résistances d'entrée et sortie :

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur simple

- Régime saturée car pas de rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = \ e$.
- $V_- = \ E_0$.
- Relation entre s et e :

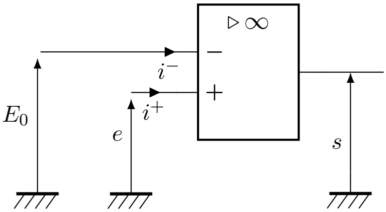


- Résistances d'entrée et sortie :

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur simple

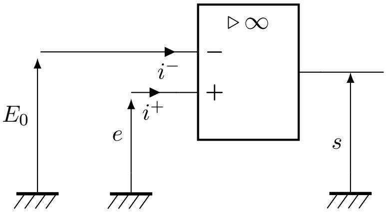
- Régime saturée car pas de rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = e$.
- $V_- = E_0$.
- Relation entre s et e : régime saturé donc
  $s = +V_{\text{sat}}$ si $V_+ > V_-$ soit $e > E_0$ ou
  $s = -V_{\text{sat}}$ si $V_+ < V_-$ soit $e < E_0$.
- Résistances d'entrée et sortie :



Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur simple

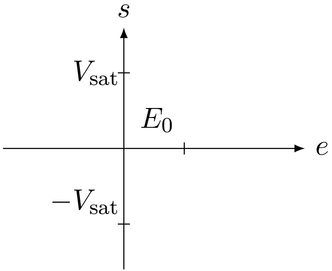
- Régime saturée car pas de rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = e$.
- $V_- = E_0$.
- Relation entre s et e : régime saturé donc
  $s = +V_{\text{sat}}$ si $V_+ > V_-$ soit $e > E_0$ ou
  $s = -V_{\text{sat}}$ si $V_+ < V_-$ soit $e < E_0$.
- Résistances d'entrée et sortie :
  $R_e = \frac{e}{i_+} = +\infty$ et $R_s = 0$.

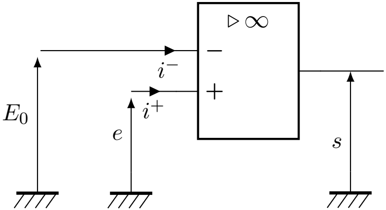


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur simple

Tracé de la caractéristique entrée-sortie

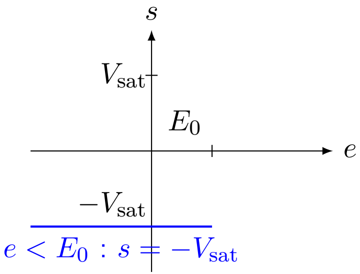


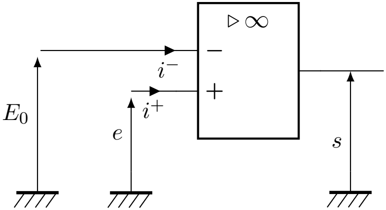


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur simple

Tracé de la caractéristique entrée-sortie

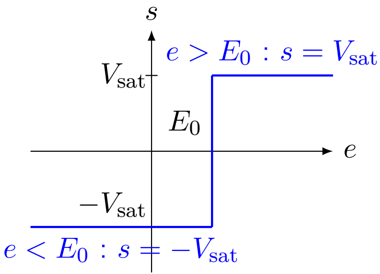


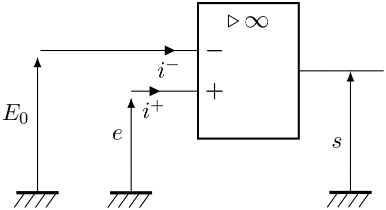


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur simple

Tracé de la caractéristique entrée-sortie

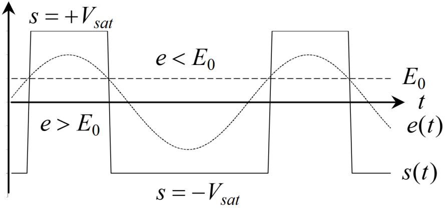


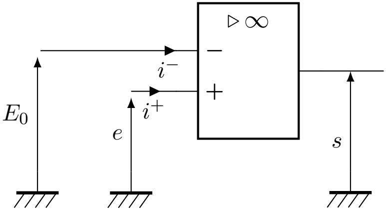


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur simple

Exemple avec un signal d'entrée e sinusoïdal

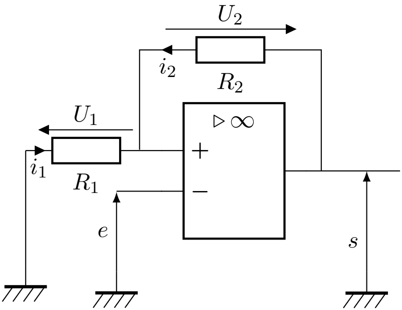




Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

- Régime saturée car
- $V_+ =$
- $V_- =$
- Relation entre s et e :

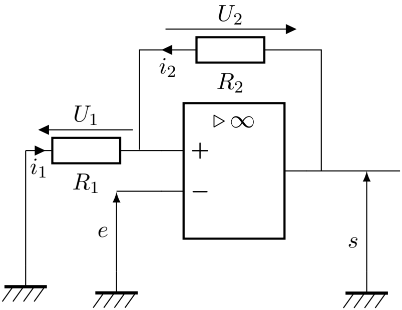


- Résistances d'entrée et sortie :

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

- Régime saturée car pas de rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ =$
- $V_- =$
- Relation entre s et e :

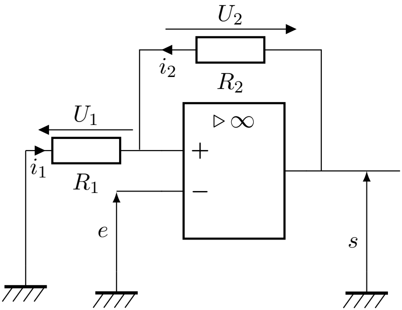


- Résistances d'entrée et sortie :

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

- Régime saturée car pas de rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = \ s\frac{R_1}{R_1+R_2}$.
- $V_- =$
- Relation entre s et e :

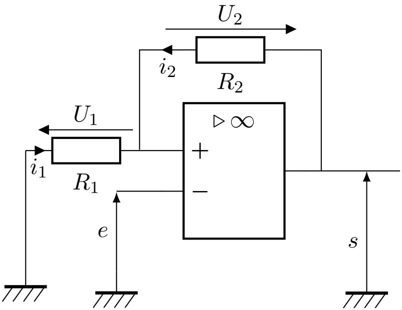


- Résistances d'entrée et sortie :

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

- Régime saturée car pas de rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = s\frac{R_1}{R_1+R_2}$.
- $V_- = e$.
- Relation entre s et e :

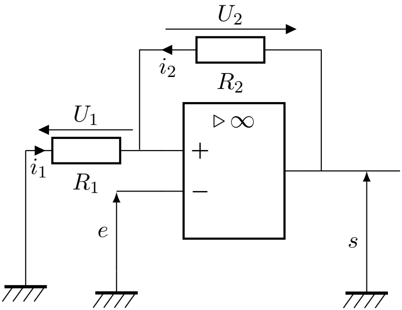


- Résistances d'entrée et sortie :

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

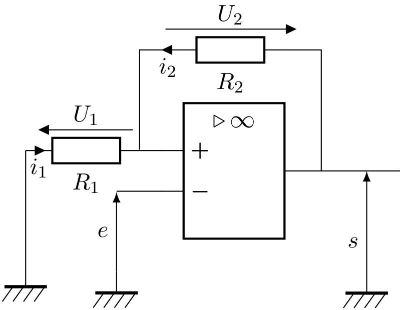
- Régime saturée car pas de rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = \; s\frac{R_1}{R_1+R_2}$.
- $V_- = \; e$.
- Relation entre s et e : régime saturé donc
  $s = +V_{\text{sat}}$ si $V_+ > V_-$ soit
  $+V_{sat}\frac{R_1}{R_1+R_2} > e$ ou
  $s = -V_{\text{sat}}$ si $V_+ < V_-$ soit
  $-V_{sat}\frac{R_1}{R_1+R_2} < e$.
- Résistances d'entrée et sortie :



Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

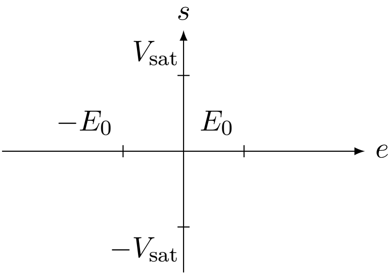
- Régime saturée car pas de rétroaction sur la voie inverseuse.
- $V_+ = \ s\frac{R_1}{R_1+R_2}$.
- $V_- = \ e$.
- Relation entre s et e : régime saturé donc
  $s = +V_{\text{sat}}$ si $V_+ > V_-$ soit $+V_{sat}\frac{R_1}{R_1+R_2} > e$ ou
  $s = -V_{\text{sat}}$ si $V_+ < V_-$ soit $-V_{sat}\frac{R_1}{R_1+R_2} < e$.
- Résistances d'entrée et sortie : $R_e = \frac{e}{i_-} = +\infty$ et $R_s = 0$.

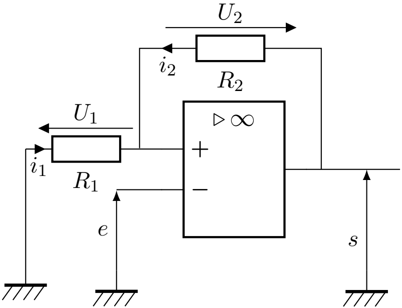


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

Tracé de la caractéristique entrée-sortie



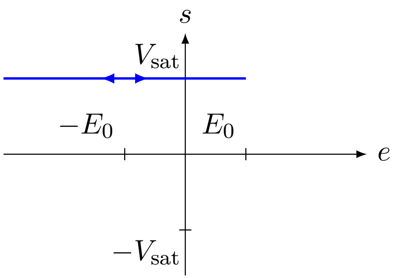


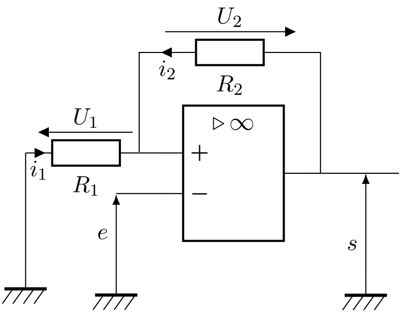
Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

Tracé de la caractéristique entrée-sortie

On part de l'hypothèse $s = +V_{\text{sat}}$, donc $e < +V_{\text{sat}} \frac{R_1}{R_1+R_2}$, on note $\pm E_0 = \pm V_{\text{sat}} \frac{R_1}{R_1+R_2}$



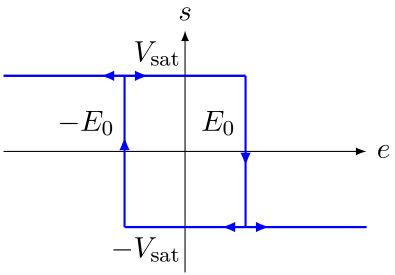


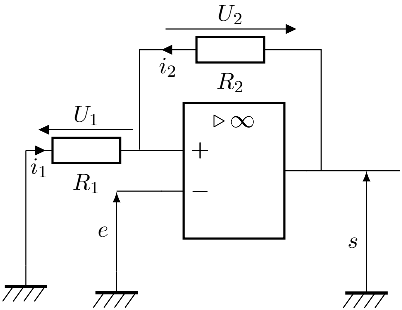
Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

Tracé de la caractéristique entrée-sortie

On part de l'hypothèse $s = -V_{\text{sat}}$, donc $e > -V_{\text{sat}}\frac{R_1}{R_1+R_2}$, on note $\pm E_0 = \pm V_{\text{sat}}\frac{R_1}{R_1+R_2}$



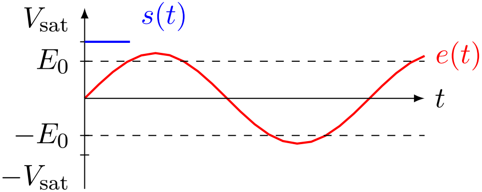


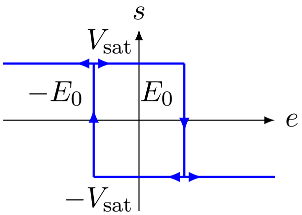
Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

Exemple avec un signal d'entrée e sinusoïdal

Partons de $s = +V_{\text{sat}}$ avec $e(t)$ croissant.



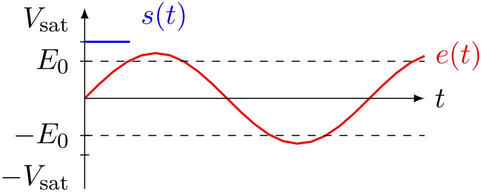


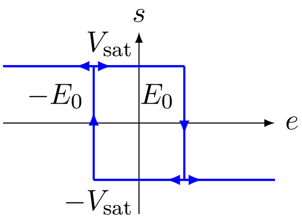
Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

Exemple avec un signal d'entrée e sinusoïdal

Partons de $s = +V_{\text{sat}}$ avec $e(t)$ croissant. On se situe sur la demi droite du haut sur $s(e)$.



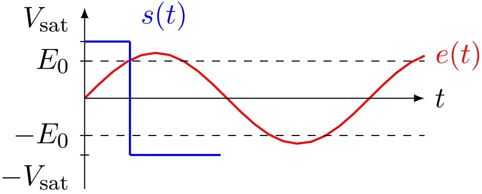


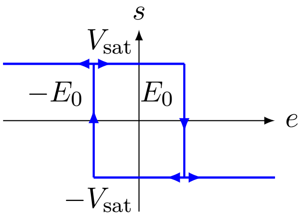
Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

Exemple avec un signal d'entrée e sinusoïdal

Lorsque e dépasse E_0 alors $s = -V_{\text{sat}}$.



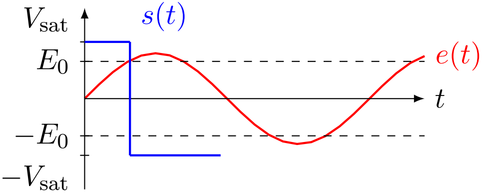


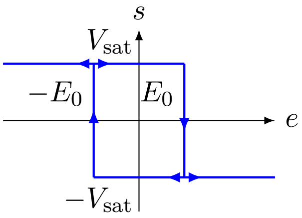
Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

Exemple avec un signal d'entrée e sinusoïdal

On est à $s = -V_{\text{sat}}$; $e(t)$ commence à décroître.



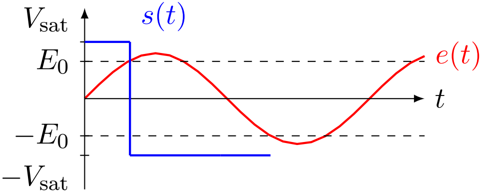


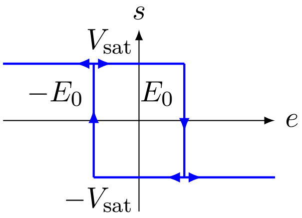
Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

Exemple avec un signal d'entrée e sinusoïdal

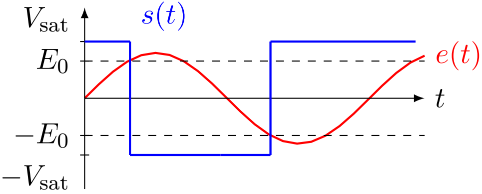
On est à $s = -V_{\text{sat}}$; $e(t)$ commence à décroître. On se situe sur la demi droite du bas sur $s(e)$.

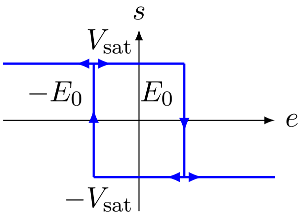




Exemple avec un signal d'entrée e sinusoïdal

Lorsque e passe sous $-E_0$ alors $s = V_{\text{sat}}$.



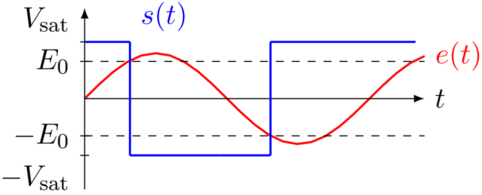


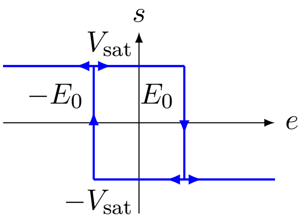
Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

Exemple avec un signal d'entrée e sinusoïdal

On est à $s = V_{\text{sat}}$; $e(t)$ commence à croître de nouveau.



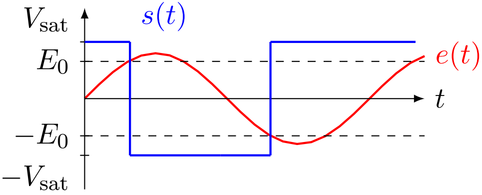


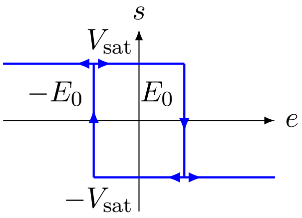
Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

Exemple avec un signal d'entrée e sinusoïdal

On est à $s = V_{\rm sat}$; $e(t)$ commence à croître de nouveau.



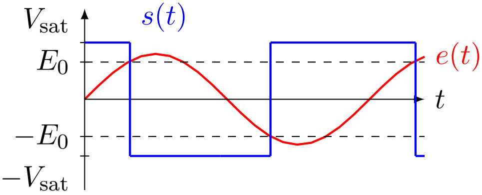


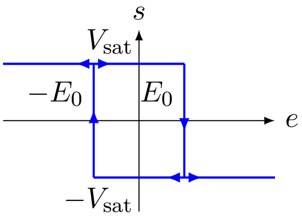
Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

Exemple avec un signal d'entrée e sinusoïdal

Lorsque e dépasse E_0 alors $s = -V_{\text{sat}}$.

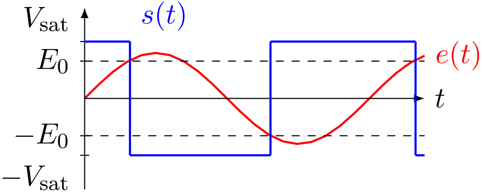


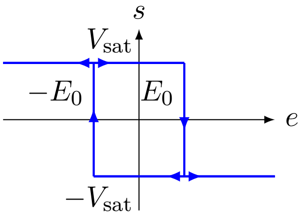


Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

Exemple avec un signal d'entrée e sinusoïdal



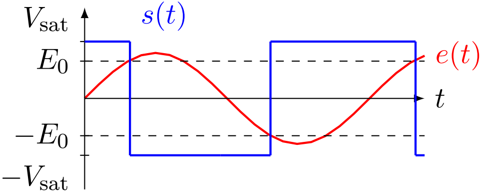


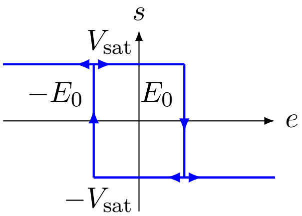
On voit que ce montage est **non linéaire** : il peut admettre plusieurs valeurs de s différentes pour une seule entrée e (ici deux).

Cas limite : ALI idéal de gain infini en régime saturé

Comparateur à hystérésis inverseur

Exemple avec un signal d'entrée e sinusoïdal





On voit aussi que la sortie s dépend de sont état antérieur : s reste dans le même état antérieur tant que rien ne l'oblige à basculer. La valeur de s est conservée jusqu'à ce que le signal e ne commande le changement : on parle de **fonction mémoire**.