

# Cours d'Électronique

## Amplificateur Opérationnel en régime linéaire

A. Arciniegas  
F. Boucher  
V. Gauthier  
N. Wilkie-Chancellor  
A. Bouzzit

IUT Cergy-Pontoise, Dep GEII, site de Neuville



CERGY PARIS  
UNIVERSITÉ

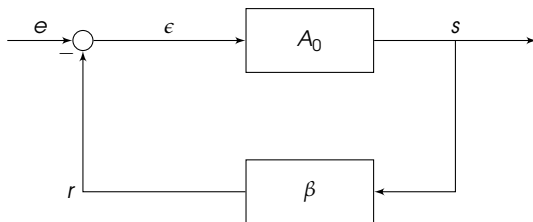


IUT  
CERGY-PONTOISE

- 1 Introduction
- 2 Amplificateur Opérationnel
- 3 Méthode

## Rappel : contre-réaction

Nous avons vu avec le schéma bloc la configuration suivante en **contre-réaction** :

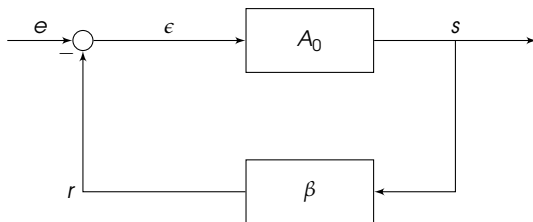


### Rappel

Dans ce cas, la fonction de transfert est :

## Rappel : contre-réaction

Nous avons vu avec le schéma bloc la configuration suivante en **contre-réaction** :



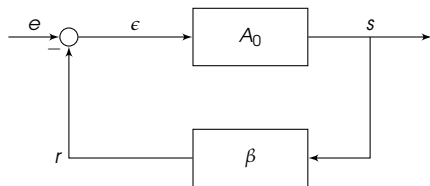
### Rappel

Dans ce cas, la fonction de transfert est :

$$H = \frac{s}{e} = \frac{A_0}{1 + \beta A_0}$$

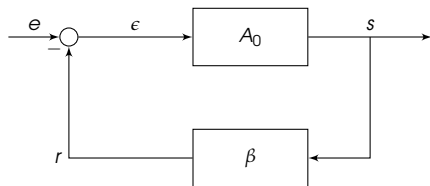
## Un cas un peu particulier...

Que se passe-t'il maintenant si :



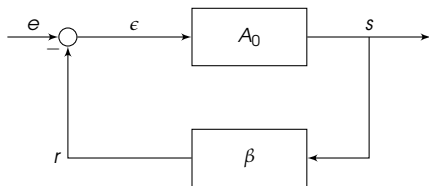
## Un cas un peu particulier...

Que se passe-t'il maintenant si :



- $\beta$  est un diviseur de tension  $\Rightarrow$   
 $\beta < 1$ , facile à réaliser avec deux résistances

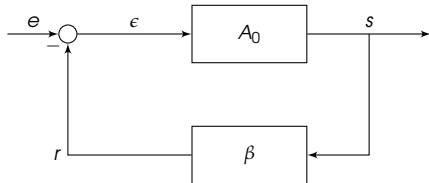
Que se passe-t'il maintenant si :



- $\beta$  est un diviseur de tension  $\Rightarrow \beta < 1$ , facile à réaliser avec deux résistances
- et  $A_0$  est un gain énorme (peu importe sa valeur exacte), pour les calculs  $A_0 \rightarrow +\infty$

## Un cas un peu particulier...

Que se passe-t'il maintenant si :



- $\beta$  est un diviseur de tension  $\Rightarrow \beta < 1$ , facile à réaliser avec deux résistances
- et  $A_0$  est un gain énorme (peu importe sa valeur exacte), pour les calculs  $A_0 \rightarrow +\infty$

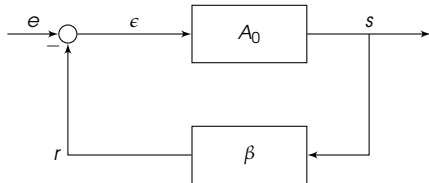
### Solution

$$\lim_{A_0 \rightarrow +\infty} H =$$



## Un cas un peu particulier...

Que se passe-t'il maintenant si :



- $\beta$  est un diviseur de tension  $\Rightarrow \beta < 1$ , facile à réaliser avec deux résistances
- et  $A_0$  est un gain énorme (peu importe sa valeur exacte), pour les calculs  $A_0 \rightarrow +\infty$

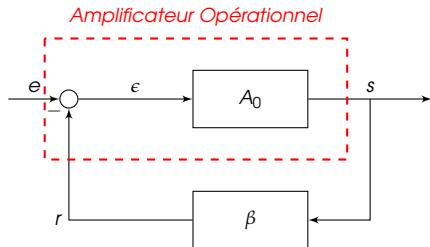
### Solution

$$\lim_{A_0 \rightarrow +\infty} H =$$

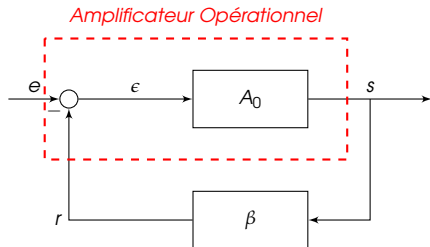
$$\text{et } \frac{1}{\beta} > 1$$

nous venons de créer un schéma qui est un amplificateur de **gain contrôlé**  $1/\beta$

L'idée derrière l'Amplificateur opérationnel est exactement là :

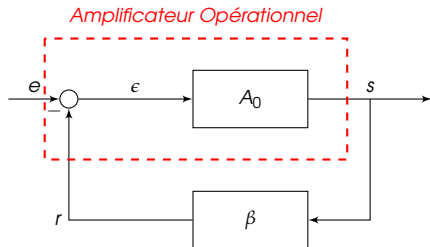


L'idée derrière l'Amplificateur opérationnel est exactement là :



On peut définir un quadripôle en tension avec :

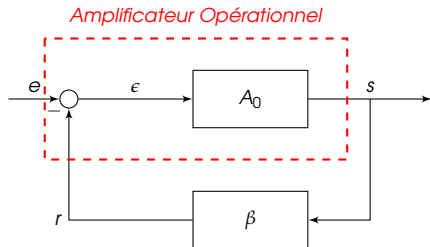
L'idée derrière l'Amplificateur opérationnel est exactement là :



On peut définir un quadripôle en tension avec :

- un fil : une entrée inverseuse,

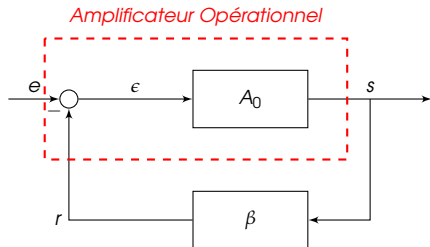
L'idée derrière l'Amplificateur opérationnel est exactement là :



On peut définir un quadripôle en tension avec :

- un fil : une entrée inverseuse,
- un fil : une entrée non-inverseuse,

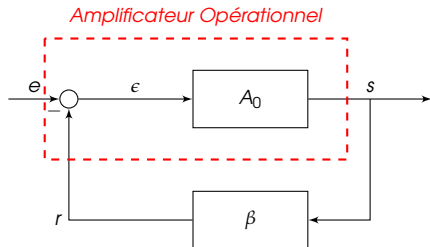
L'idée derrière l'Amplificateur opérationnel est exactement là :



On peut définir un quadripôle en tension avec :

- un fil : une entrée inverseuse,
- un fil : une entrée non-inverseuse,
- un gain à vide  $A_0$  énorme (quasi-infini)

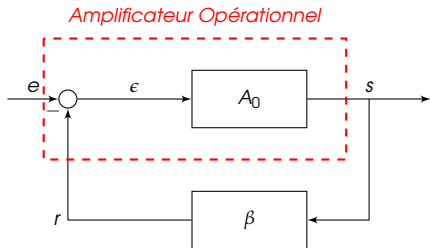
L'idée derrière l'Amplificateur opérationnel est exactement là :



On peut définir un quadripôle en tension avec :

- un fil : une entrée inverseuse,
- un fil : une entrée non-inverseuse,
- un gain à vide  $A_0$  énorme (quasi-infini)
- une paire de fils : tension de sortie

L'idée derrière l'Amplificateur opérationnel est exactement là :



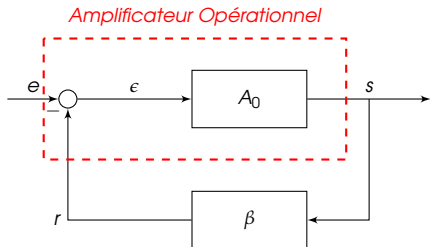
On peut définir un quadripôle en tension avec :

- un fil : une entrée inverseuse,
- un fil : une entrée non-inverseuse,
- un gain à vide  $A_0$  énorme (quasi-infini)
- une paire de fils : tension de sortie

Attention



L'idée derrière l'Amplificateur opérationnel est exactement là :



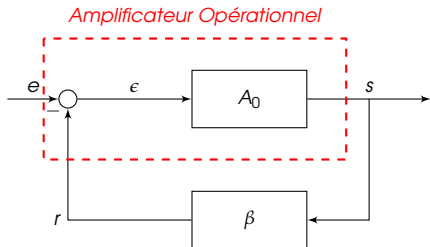
On peut définir un quadripôle en tension avec :

- un fil : une entrée inverseuse,
- un fil : une entrée non-inverseuse,
- un gain à vide  $A_0$  énorme (quasi-infini)
- une paire de fils : tension de sortie

## Attention

- on parlera d'un composant électronique : plus de flèche mais des fils,

L'idée derrière l'Amplificateur opérationnel est exactement là :



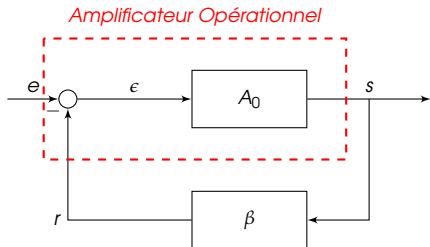
On peut définir un quadripôle en tension avec :

- un fil : une entrée inverseuse,
- un fil : une entrée non-inverseuse,
- un gain à vide  $A_0$  énorme (quasi-infini)
- une paire de fils : tension de sortie

## Attention

- on parlera d'un composant électronique : plus de flèche mais des fils,
- restent à définir les propriétés manquantes : **résistances d'entrée et sortie.**

L'idée derrière l'Amplificateur opérationnel est exactement là :

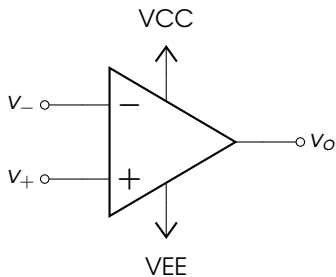


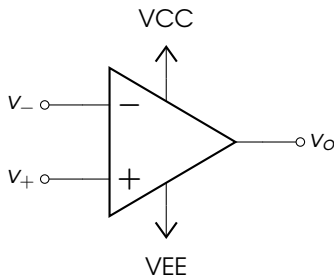
On peut définir un quadripôle en tension avec :

- un fil : une entrée inverseuse,
- un fil : une entrée non-inverseuse,
- un gain à vide  $A_0$  énorme (quasi-infini)
- une paire de fils : tension de sortie

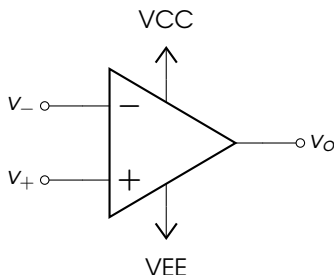
## Attention

- on parlera d'un composant électronique : plus de flèche mais des fils,
- restent à définir les propriétés manquantes : **résistances d'entrée et sortie**.
- TOUT CELA N'EST VALABLE QUE SI LE SCHÉMA INCLUT UNE CONTRE-RÉACTION !





- $v_-$  entrée inverseuse,
- $v_+$  entrée non-inverseuse,
- $v_o$  sortie, référencée à la masse



- $v_-$  entrée inverseuse,
- $v_+$  entrée non-inverseuse,
- $v_o$  sortie, référencée à la masse
- $V_{CC}$  et  $V_{EE}$  les tensions d'alimentation (symétrique ou non), leur représentation n'est pas obligatoire mais en pratique :

$$V_{CC} > v_o > V_{EE}$$

Exemple tiré de la documentation du *LM741*:6.5 Electrical Characteristics, LM741<sup>(1)</sup>

PARAMETER	TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
Input offset voltage	$R_S \leq 10 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		1	5	mV
		$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			6	mV
Input offset voltage adjustment range	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20 \text{ V}$			$\pm 15$		mV
Input offset current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			20	200	nA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			85	500	
Input bias current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			80	500	nA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$				1.5	$\mu\text{A}$
Input resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20 \text{ V}$		0.3	2		M $\Omega$
Input voltage range	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$		$\pm 12$	$\pm 13$		V
Large signal voltage gain	$V_S = \pm 15 \text{ V}, V_O = \pm 10 \text{ V}, R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	50	200		V/mV
		$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$	25			

Exemple tiré de la documentation du *LM741*:6.5 Electrical Characteristics, LM741<sup>(1)</sup>

PARAMETER	TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
Input offset voltage	$R_S \leq 10 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		1	5	mV
		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			6	mV
Input offset voltage adjustment range	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20 \text{ V}$			$\pm 15$		mV
Input offset current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			20	200	nA
	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			85	500	
Input bias current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			80	500	nA
	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$				1.5	$\mu\text{A}$
Input resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20 \text{ V}$		0.3	2		M $\Omega$
Input voltage range	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$		$\pm 12$	$\pm 13$		V
Large signal voltage gain	$V_S = \pm 15 \text{ V}, V_O = \pm 10 \text{ V}, R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	50	200		V/mV
		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$	25			

$$A_0 = 200 \text{ V/mV} = \frac{200}{10^{-3}} = 2 \cdot 10^5$$



Exemple tiré de la documentation du *LM741*:6.5 Electrical Characteristics, LM741<sup>(1)</sup>

PARAMETER	TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
Input offset voltage	$R_S \leq 10 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		1	5	mV
		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			6	mV
Input offset voltage adjustment range	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20 \text{ V}$			$\pm 15$		mV
Input offset current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			20	200	nA
	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			85	500	
Input bias current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			80	500	nA
	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$				1.5	$\mu\text{A}$
Input resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20 \text{ V}$		0.3	2		M $\Omega$
Input voltage range	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$		$\pm 12$	$\pm 13$		V
Large signal voltage gain	$V_S = \pm 15 \text{ V}, V_O = \pm 10 \text{ V}, R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	50	200		V/mV
		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$	25			

$$A_0 = 200 \text{ V/mV} = \frac{200}{10^{-3}} = 2 \cdot 10^5$$

Quelle conséquence en entrée ?

Exemple tiré de la documentation du *LM741*:6.5 Electrical Characteristics, LM741<sup>(1)</sup>

PARAMETER	TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
Input offset voltage	$R_S \leq 10 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		1	5	mV
		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			6	mV
Input offset voltage adjustment range	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20 \text{ V}$			$\pm 15$		mV
Input offset current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			20	200	nA
	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			85	500	
Input bias current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			80	500	nA
	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$				1.5	$\mu\text{A}$
Input resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20 \text{ V}$		0.3	2		M $\Omega$
Input voltage range	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$		$\pm 12$	$\pm 13$		V
Large signal voltage gain	$V_S = \pm 15 \text{ V}, V_O = \pm 10 \text{ V}, R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	50	200		V/mV
		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$	25			

$$A_0 = 200 \text{ V/mV} = \frac{200}{10^{-3}} = 2 \cdot 10^5$$

**Quelle conséquence en entrée ?**

si l'alimentation est à 15 V :

## Exemple tiré de la documentation du LM741:

6.5 Electrical Characteristics, LM741<sup>(1)</sup>

PARAMETER	TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
Input offset voltage	$R_S \leq 10 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		1	5	mV
		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			6	mV
Input offset voltage adjustment range	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20 \text{ V}$			$\pm 15$		mV
Input offset current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			20	200	nA
	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			85	500	
Input bias current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			80	500	nA
	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$				1.5	$\mu\text{A}$
Input resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20 \text{ V}$		0.3	2		M $\Omega$
Input voltage range	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$		$\pm 12$	$\pm 13$		V
Large signal voltage gain	$V_S = \pm 15 \text{ V}, V_O = \pm 10 \text{ V}, R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	50	200		V/mV
		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$	25			

$$A_0 = 200 \text{ V/mV} = \frac{200}{10^{-3}} = 2 \cdot 10^5$$

**Quelle conséquence en entrée ?**

si l'alimentation est à 15 V :

$$\text{soit } \varepsilon = v_+ - v_- \approx 0 \text{ V}$$

## Exemple tiré de la documentation du LM741:

6.5 Electrical Characteristics, LM741<sup>(1)</sup>

PARAMETER	TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
Input offset voltage	$R_S \leq 10 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		1	5	mV
		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			6	mV
Input offset voltage adjustment range	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20 \text{ V}$			$\pm 15$		mV
Input offset current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			20	200	nA
	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			85	500	
Input bias current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			80	500	nA
	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$				1.5	$\mu\text{A}$
Input resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20 \text{ V}$		0.3	2		M $\Omega$
Input voltage range	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$		$\pm 12$	$\pm 13$		V
Large signal voltage gain	$V_S = \pm 15 \text{ V}, V_O = \pm 10 \text{ V}, R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	50	200		V/mV
		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$	25			

$$A_0 = 200 \text{ V/mV} = \frac{200}{10^{-3}} = 2 \cdot 10^5$$

**Quelle conséquence en entrée ?**

si l'alimentation est à 15 V :

$$\text{soit } \varepsilon = v_+ - v_- \approx 0 \text{ V}$$

## Hypothèse 1

En pratique, **si l'AOP est contre-réactionné**, on pose :

$$v_+ = v_-$$

**Rappel :** Dans un quadripôle en tension, la résistance d'entrée idéale est infinie.

**Rappel :** Dans un quadripôle en tension, la résistance d'entrée idéale est infinie.

Exemple tiré de la documentation du *LM741*:

## 6.5 Electrical Characteristics, LM741<sup>(1)</sup>

PARAMETER	TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
Input offset voltage	$R_S \leq 10 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		1	5	mV
		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			6	mV
Input offset voltage adjustment range	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20 \text{ V}$			$\pm 15$		mV
Input offset current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			20	200	nA
	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			85	500	
Input bias current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			80	500	nA
	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$				1.5	$\mu\text{A}$
Input resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20 \text{ V}$		0.3	2		M $\Omega$
Input voltage range	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$		$\pm 12$	$\pm 13$		V
Large signal voltage gain	$V_S = \pm 15 \text{ V}, V_O = \pm 10 \text{ V}, R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	50	200		V/mV
		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$	25			

**Rappel :** Dans un quadripôle en tension, la résistance d'entrée idéale est infinie.

Exemple tiré de la documentation du *LM741*:

## 6.5 Electrical Characteristics, LM741<sup>(1)</sup>

PARAMETER	TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
Input offset voltage	$R_S \leq 10 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		1	5	mV
		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			6	mV
Input offset voltage adjustment range	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20 \text{ V}$			$\pm 15$		mV
Input offset current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			20	200	nA
	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$			85	500	
Input bias current	$T_A = 25^\circ\text{C}$			80	500	nA
	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$				1.5	$\mu\text{A}$
Input resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20 \text{ V}$		0.3	2		M $\Omega$
Input voltage range	$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$		$\pm 12$	$\pm 13$		V
Large signal voltage gain	$V_S = \pm 15 \text{ V}, V_O = \pm 10 \text{ V}, R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		50	200	V/mV
		$T_{\text{AMIN}} \leq T_A \leq T_{\text{AMAX}}$		25		

## Hypothèse 2

Dans un AOP, on considère la résistance d'entrée comme infinie. On pose :

$$i_+ = i_- = 0$$

**Rappel :** Dans un quadripôle en tension, la résistance de sortie idéale est nulle.



**Rappel :** Dans un quadripôle en tension, la résistance de sortie idéale est nulle.

### Hypothèse 3

Dans un AOP, on considère la résistance de sortie comme nulle, la sortie est un générateur de tension idéal.

Dans la plupart des cas, on cherche à calculer la sortie en fonction de l'entrée (gain ou fonction de transfert au S2).

Dans la plupart des cas, on cherche à calculer la sortie en fonction de l'entrée (gain ou fonction de transfert au S2).

### Méthode

Dans la plupart des cas, on cherche à calculer la sortie en fonction de l'entrée (gain ou fonction de transfert au S2).

### Méthode

- dans un premier temps : on vérifie **TOUJOURS** que le circuit comporte une **contre-réaction** (lien électrique entre la sortie et l'entrée inverseuse)

Dans la plupart des cas, on cherche à calculer la sortie en fonction de l'entrée (gain ou fonction de transfert au S2).

### Méthode

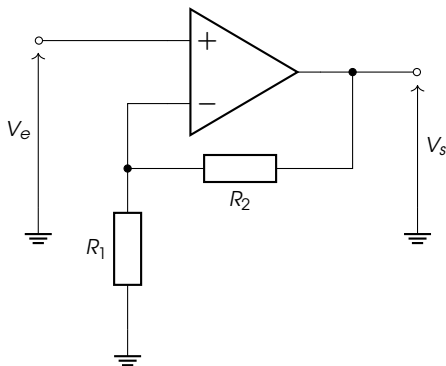
- dans un premier temps : on vérifie **TOUJOURS** que le circuit comporte une **contre-réaction** (lien électrique entre la sortie et l'entrée inverseuse)
- **si et uniquement si** c'est le cas, on peut poser l'équation  $v_+ = v_-$

Dans la plupart des cas, on cherche à calculer la sortie en fonction de l'entrée (gain ou fonction de transfert au S2).

### Méthode

- dans un premier temps : on vérifie **TOUJOURS** que le circuit comporte une **contre-réaction** (lien électrique entre la sortie et l'entrée inverseuse)
- **si et uniquement si** c'est le cas, on peut poser l'équation  $v_+ = v_-$
- en utilisant  $i_+ = 0$  et  $i_- = 0$  on peut généralement calculer  $v_+$  et  $v_-$  en fonction des autres tensions du circuit,
- la suite est normalement plus évidente...

Objectif : calculer le gain du montage suivant



## Un premier exemple - pas à pas

- y a-t'il une contre-réaction ? :



- y a-t'il une contre-réaction ? : oui ( $R_2$  et  $R_1$ ), donc l'AOP est en régime linéaire et :

$$v_+ = v_-$$

- y a-t'il une contre-réaction ? : oui ( $R_2$  et  $R_1$ ), donc l'AOP est en régime linéaire et :

$$v_+ = v_-$$

- $i_- = 0$ ,

- y a-t'il une contre-réaction ? : oui ( $R_2$  et  $R_1$ ), donc l'AOP est en régime linéaire et :

$$v_+ = v_-$$

- $i_- = 0$ , on peut donc relier  $v_-$  à  $V_s$  en utilisant un diviseur de tension :

- y a-t'il une contre-réaction ? : oui ( $R_2$  et  $R_1$ ), donc l'AOP est en régime linéaire et :

$$v_+ = v_-$$

- $i_- = 0$ , on peut donc relier  $v_-$  à  $V_s$  en utilisant un diviseur de tension :
- de manière plus évidente :  $v_+ = V_e$

- y a-t'il une contre-réaction ? : oui ( $R_2$  et  $R_1$ ), donc l'AOP est en régime linéaire et :

$$v_+ = v_-$$

- $i_- = 0$ , on peut donc relier  $v_-$  à  $V_s$  en utilisant un diviseur de tension :

- de manière plus évidente :  $v_+ = V_e$
- or nous avons déjà écrit  $v_+ = v_-$ , donc

$$V_e =$$

## Un premier exemple - pas à pas

- y a-t'il une contre-réaction ? : oui ( $R_2$  et  $R_1$ ), donc l'AOP est en régime linéaire et :

$$v_+ = v_-$$

- $i_- = 0$ , on peut donc relier  $v_-$  à  $V_s$  en utilisant un diviseur de tension :

- de manière plus évidente :  $v_+ = V_e$
- or nous avons déjà écrit  $v_+ = v_-$ , donc

$$V_e =$$

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