

Cours d'Électronique Amplificateur Opérationnel en régime linéaire

A. Arciniegas

F. Boucher

V. Gauthier

N. Wilkie-Chancellier

A. Bouzzit

IUT Cergy-Pontoise, Dep GEII, site de Neuville



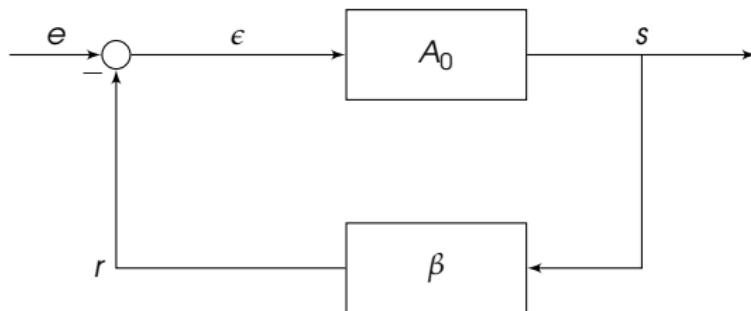
1 Introduction

2 Amplificateur Opérationnel

3 Méthode

Rappel : contre-réaction

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

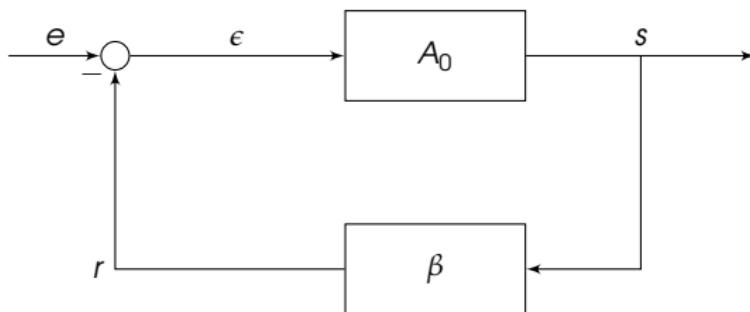


Rappel

Dans ce cas, la fonction de transfert est :

Rappel : contre-réaction

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



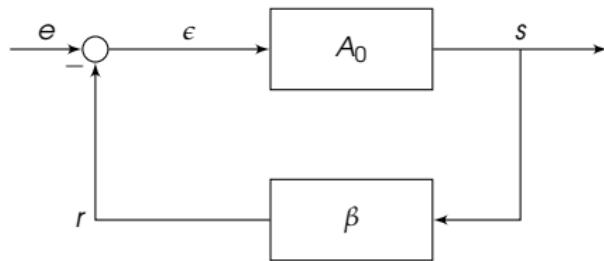
Rappel

Dans ce cas, la fonction de transfert est :

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

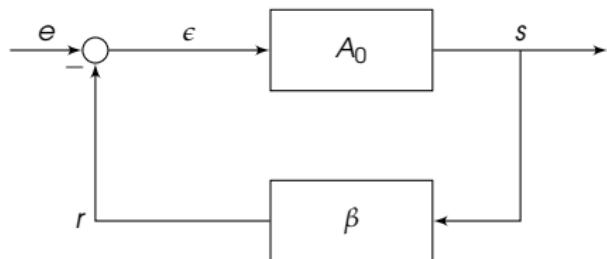
Un cas un peu particulier...

Que se passe-t'il maintenant si :



Un cas un peu particulier...

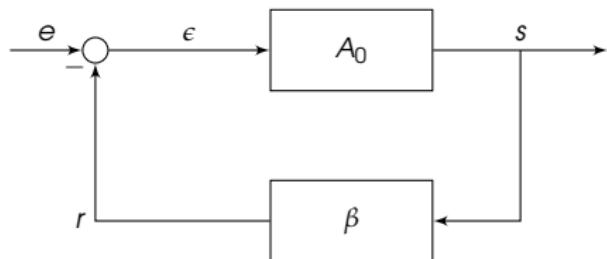
Que se passe-t'il maintenant si :



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

Un cas un peu particulier...

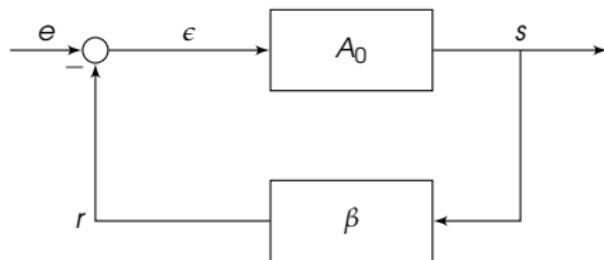
Que se passe-t'il maintenant si :



- β 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 :



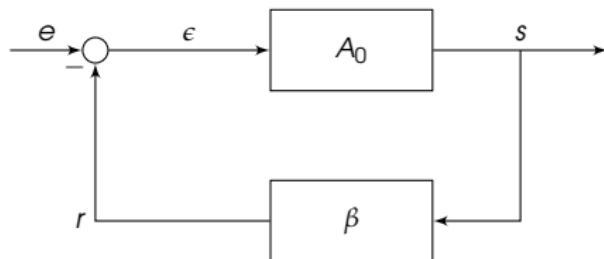
- β est un diviseur de tension $\Rightarrow \beta < 1$, facile à réaliser avec deux résistances
- et A_0 est un gain énorme (peu importe sa valeur exacte), pour les calculs $A_0 \rightarrow +\infty$

Solution

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

Un cas un peu particulier...

Que se passe-t'il maintenant si :



- β 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

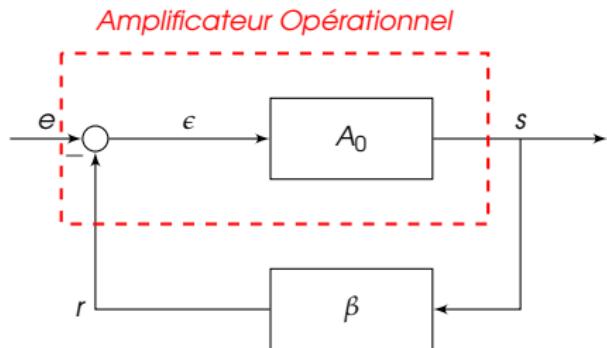
$$\lim_{A_0 \rightarrow +\infty} H =$$

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

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

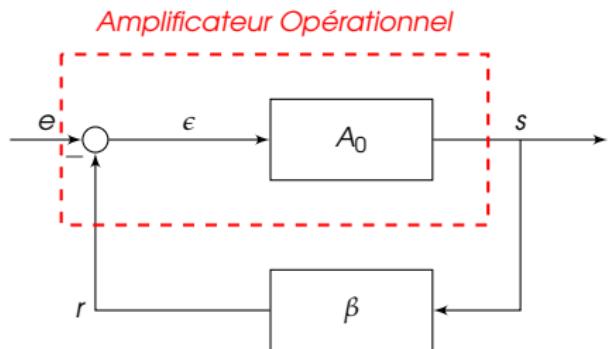
... ou plutôt régulier

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



... ou plutôt régulier

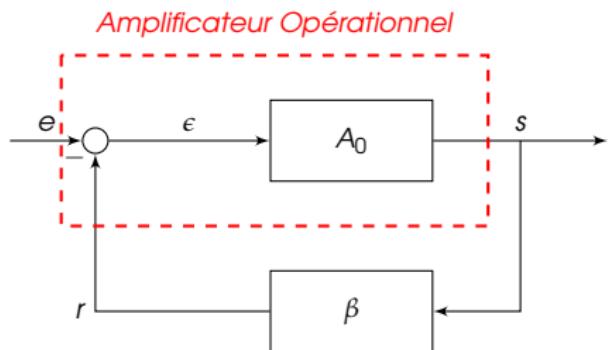
L'idée derrière l'Amplificateur opérationnel est exactement là :



On peut définir un quadripôle en tension avec :

... ou plutôt régulier

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

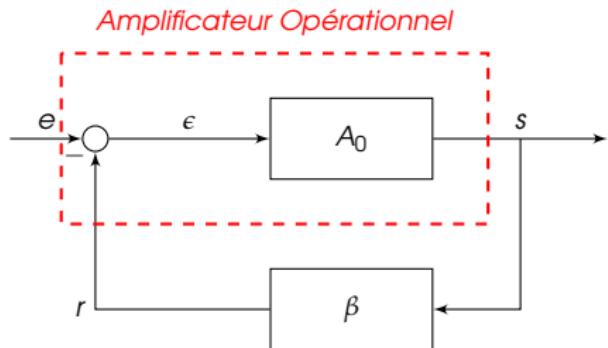


On peut définir un quadripôle en tension avec :

- un fil : une entrée inverseuse,

... ou plutôt régulier

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

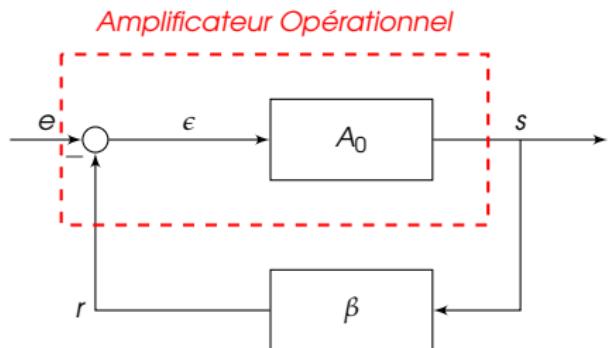


On peut définir un quadripôle en tension avec :

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

... ou plutôt régulier

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

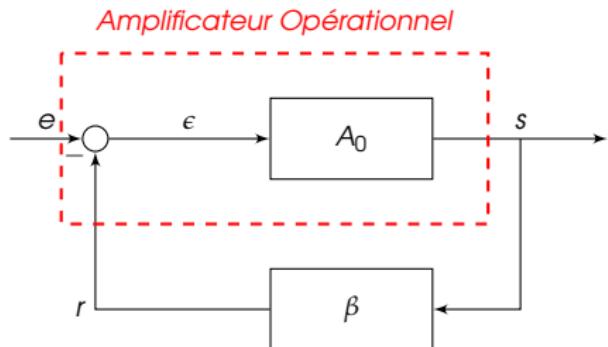


On peut définir un quadripôle en tension avec :

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

... ou plutôt régulier

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

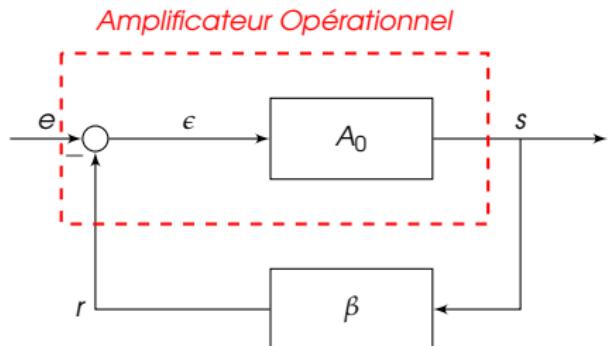


On peut définir un quadripôle en tension avec :

- 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

... ou plutôt régulier

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



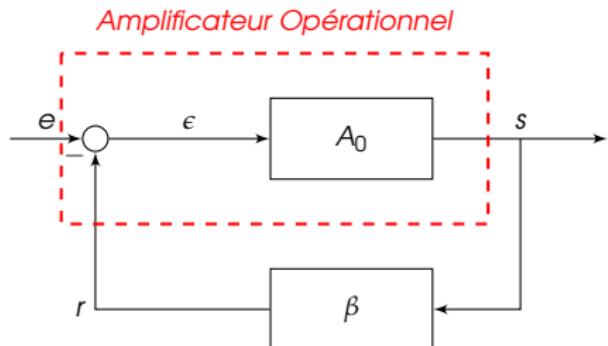
On peut définir un quadripôle en tension avec :

- 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

... ou plutôt régulier

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



On peut définir un quadripôle en tension avec :

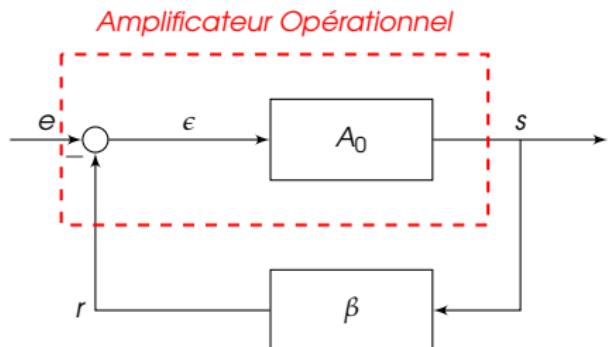
- un fil : une entrée inverseuse,
- un fil : une entrée non-inverseuse,
- un gain à vide A_0 énorme (quasi-infini)
- une paire de fils : tension de sortie

Attention

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

... ou plutôt régulier

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



On peut définir un quadripôle en tension avec :

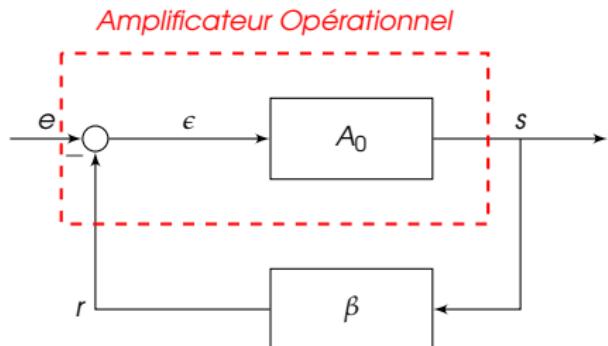
- un fil : une entrée inverseuse,
- un fil : une entrée non-inverseuse,
- un gain à vide A_0 énorme (quasi-infini)
- une paire de fils : tension de sortie

Attention

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

... ou plutôt régulier

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



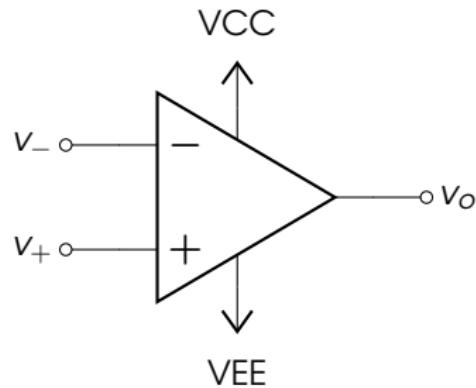
On peut définir un quadripôle en tension avec :

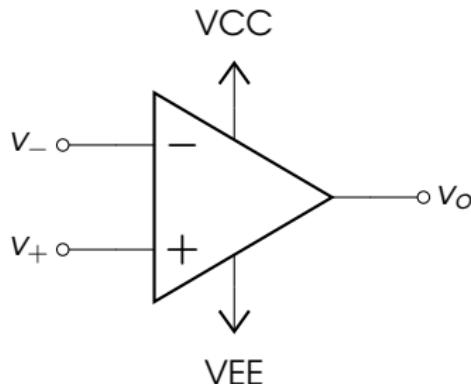
- un fil : une entrée inverseuse,
- un fil : une entrée non-inverseuse,
- un gain à vide A_0 énorme (quasi-infini)
- une paire de fils : tension de sortie

Attention

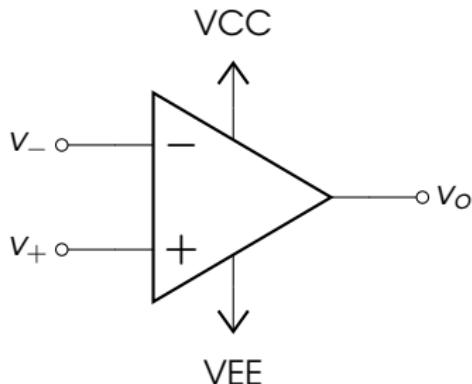
- on parlera d'un composant électronique : plus de flèche mais des fils,
- restent à définir les propriétés manquantes : **résistances d'entrée et sortie.**
- TOUT CELA N'EST VALABLE QUI SI LE SCHÉMA INCLUT UNE CONTRE-RÉACTION !

AOP, symbole et broches





- 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
- VCC et VEE les tensions d'alimentation (symétrique ou non), leur représentation n'est pas obligatoire mais en pratique :

$$VCC > v_o > VEE$$

Exemple tiré de la documentation du LM741:

6.5 Electrical Characteristics, LM741⁽¹⁾

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

Exemple tiré de la documentation du LM741:

6.5 Electrical Characteristics, LM741⁽¹⁾

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

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

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

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

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

Exemple tiré de la documentation du LM741:

6.5 Electrical Characteristics, LM741⁽¹⁾

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

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

AOP : résistance d'entrée

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⁽¹⁾

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

Point méthode - Synthèse

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 $v_+ = v_-$

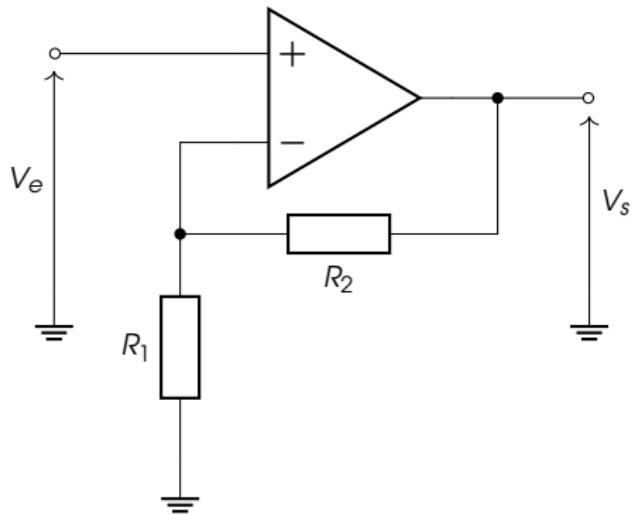
Dans la plupart des cas, on cherche à calculer la sortie en fonction de l'entrée (gain ou fonction de transfert au S2).

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...

Un premier exemple

Objectif : calculer le gain du montage suivant



Un premier exemple - pas à pas

- y a-t'il une contre-réaction ? :

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 :

$$v_+ = v_-$$

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 :

$$v_+ = v_-$$

- $i_- = 0$,

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 :

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 : $v_+ = V_e$

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

$$V_e =$$

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

$$V_e =$$

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