

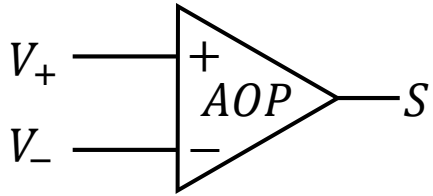
CHAPITRE EA3

L'amplificateur opérationnel I
Circuits de base, non-idéalités

- 1. Introduction
- 2. L'amplificateur opérationnel idéal
- 3. Circuits d'application linéaires
- 4. Mise en œuvre
- 5. Principales non-idéalités et leurs effets
- 6. Circuits non-linéaires: comparateurs

1. INTRODUCTION – L'amplificateur opérationnel, la contre-réaction

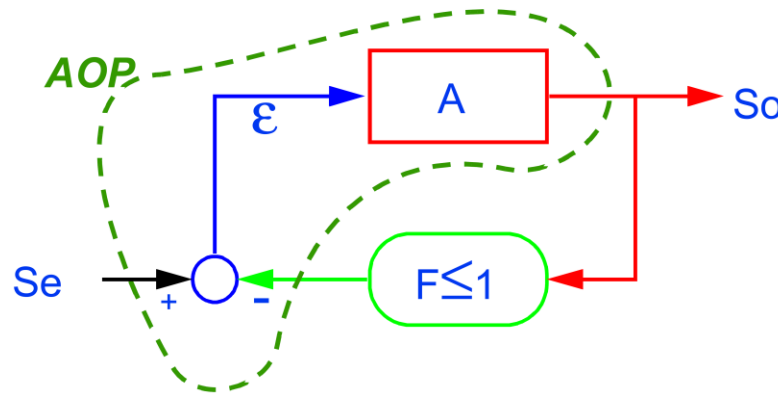
- Qu'est-ce qu'un amplificateur opérationnel ?



C'est un **amplificateur de tension** qui réalise la fonction $V_S = A(V^+ - V^-)$

Particularité: le gain A est très grand (typiquement $> 10^5$)

- Qu'est-ce que la contre-réaction ?



C'est lorsque l'on prélève une image de la grandeur de sortie (S_0) pour la soustraire à la grandeur d'entrée (S_e) dans le but de faire tendre l'erreur ε vers 0

$$\varepsilon = \frac{S_0}{A} = S_e - F \cdot S_0$$

$$\frac{S_0}{S_e} = \frac{A}{1+A \cdot F} \text{ et pour } A \cdot F \gg 1, \frac{S_0}{S_e} \approx \frac{1}{F}$$



La valeur exacte de A est sans importance !

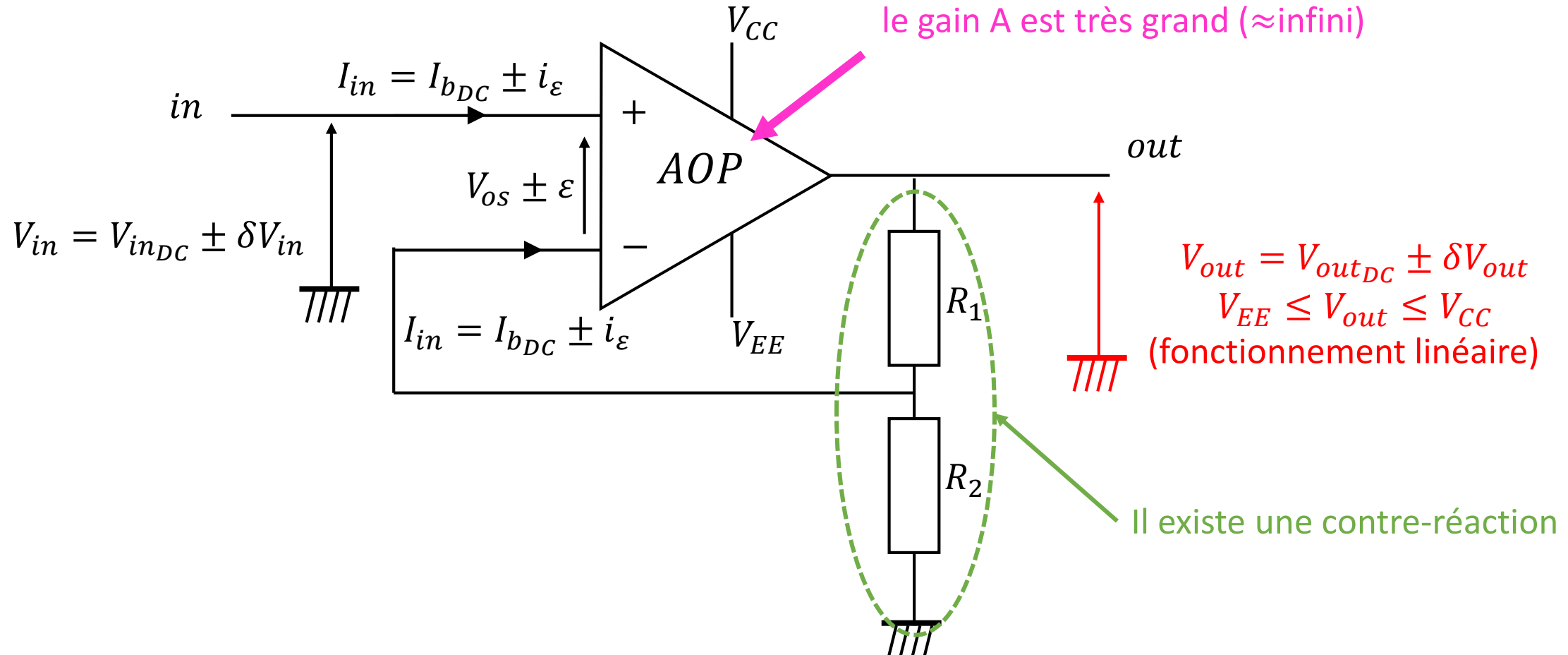
- Que fait un amplificateur opérationnel dans un circuit contre-réactionné ?

Il **tente** d'ajuster sa tension de sortie V_s de telle façon que :

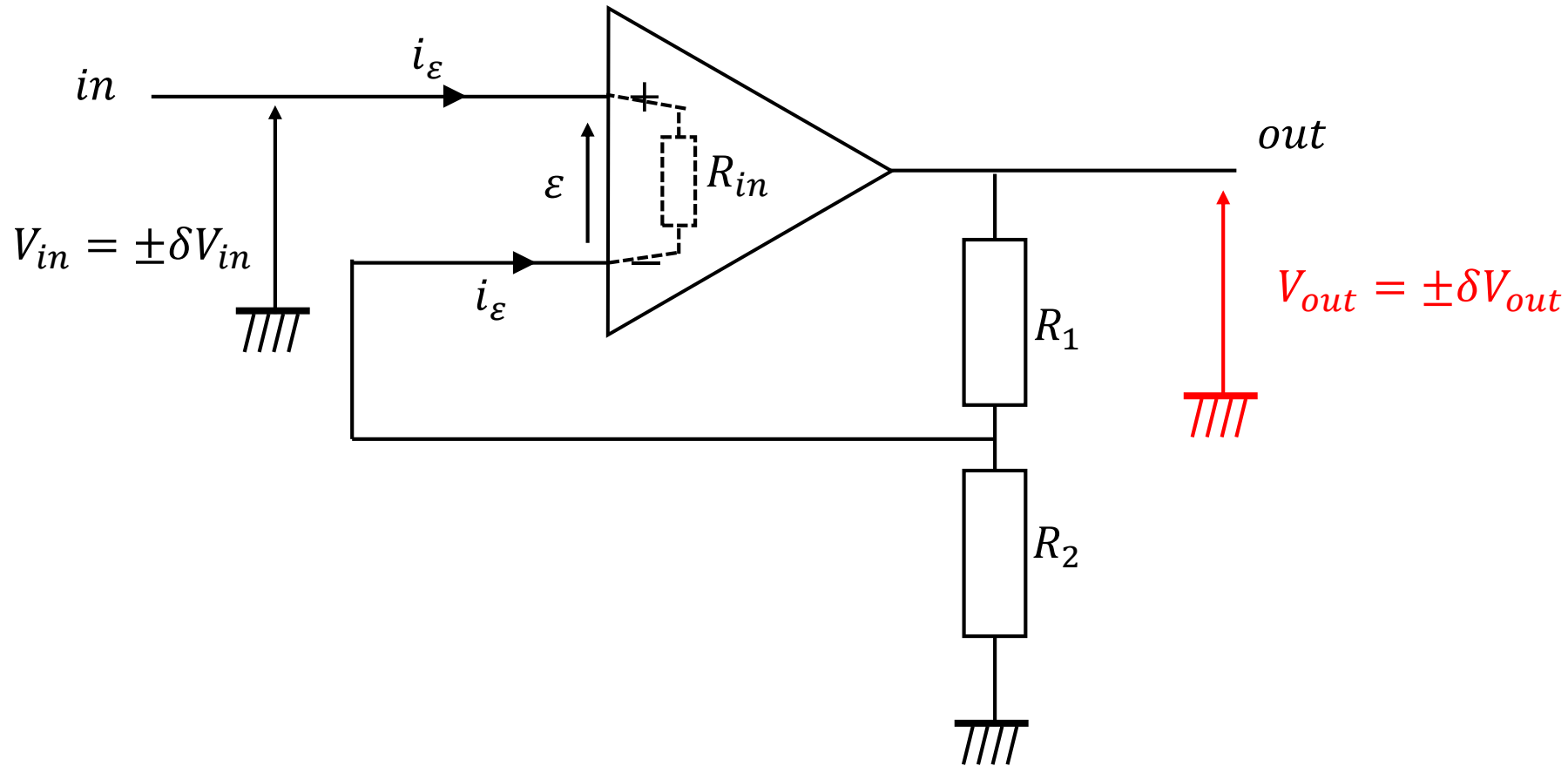
$$\varepsilon = V^+ - V^- \rightarrow 0$$

2. L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL IDÉAL – Tensions, courants, hypothèses de fonctionnement

- Superposition d'un régime statique (DC) et d'un régime dynamique (signal)



2. L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL IDÉAL – Régime dynamique: schéma aux variations (signal)

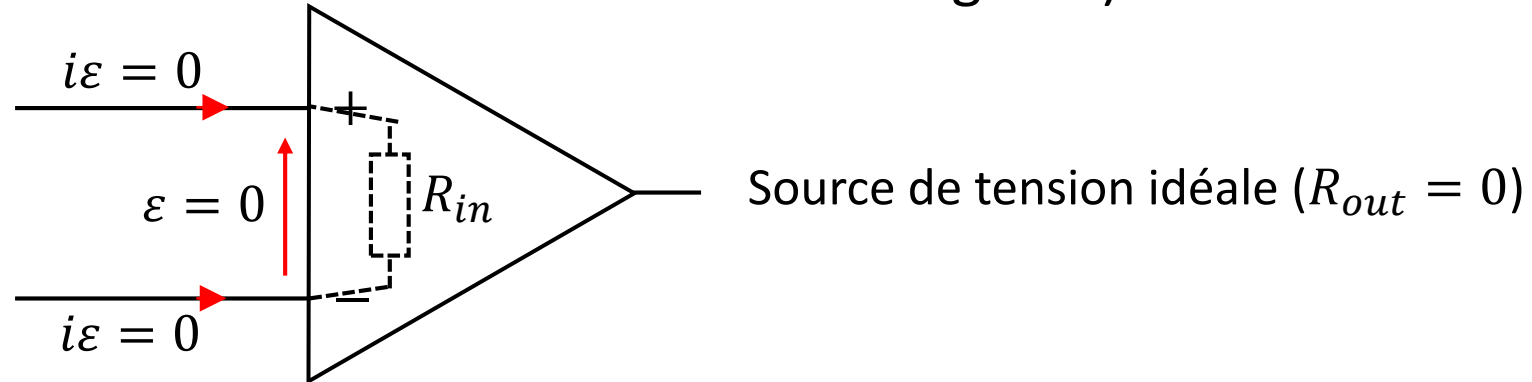


$$\varepsilon = \frac{V_{out}}{A} \rightarrow 0$$

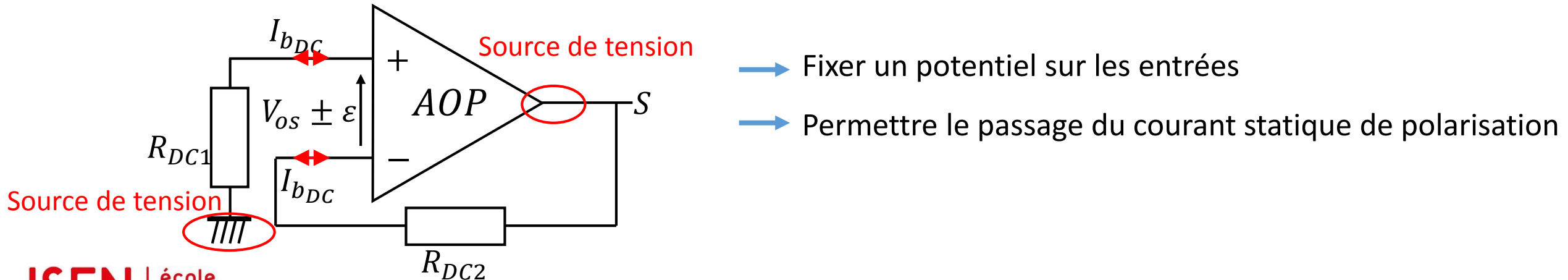
$$i_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{R_{in}} \rightarrow 0$$

2. L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL IDÉAL – Modèle et règles d'utilisation

- Règle d'or N°1: SI (contre-réaction ET zone linéaire ET A très grand) ALORS $\varepsilon = 0$ ET $i_e = 0$

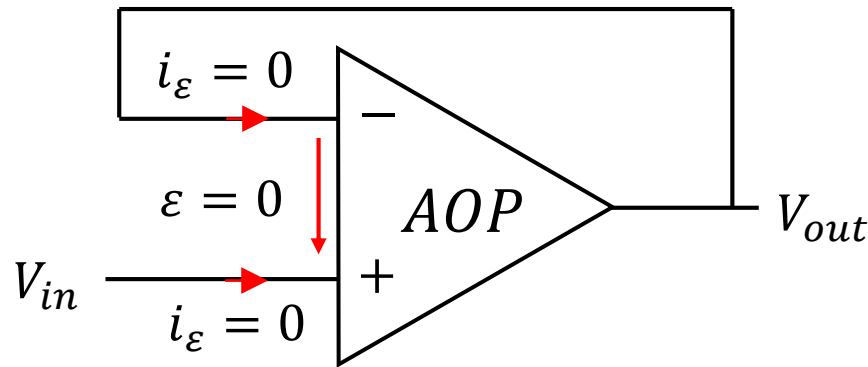


- Règle d'or N°2: il est IMPERATIF de prévoir un chemin continu (DC) entre les entrées de l'amplificateur et une source de tension présente dans le circuit



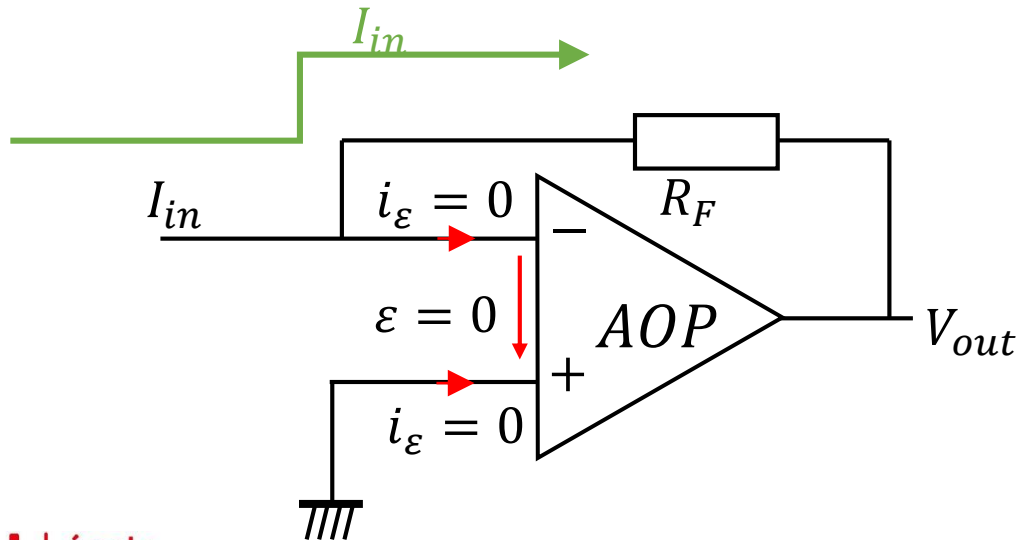
3. CIRCUITS D'APPLICATION LINÉAIRES – Amplificateurs de tension et de transrésistance

- Le plus simple possible ... suiveur de tension



$$V_{in} + \varepsilon = V_{out} \quad A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1$$
$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{i_\varepsilon} \quad Z_{out} \approx 0$$

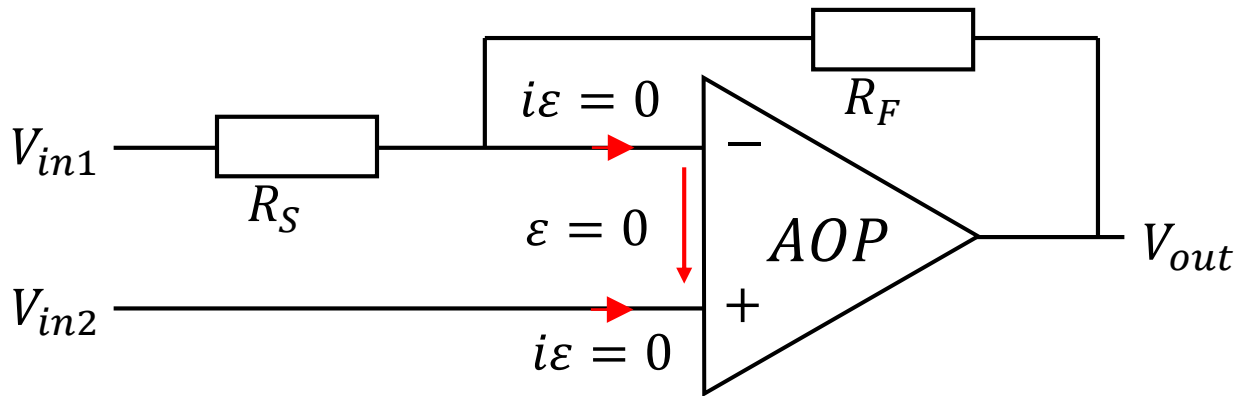
- Un peu plus compliqué... convertisseur courant-tension (transrésistance)



$$\varepsilon - R_F \times I_{in} = V_{out} \quad R_T = \frac{V_{out}}{I_{in}} = -R_F$$
$$Z_{in} = \frac{\varepsilon}{I_{in}} \rightarrow 0 \quad Z_{out} \approx 0$$

3. CIRCUITS D'APPLICATION LINÉAIRES – Amplificateurs de tension (suite)

- Amplificateur de tension « universel »



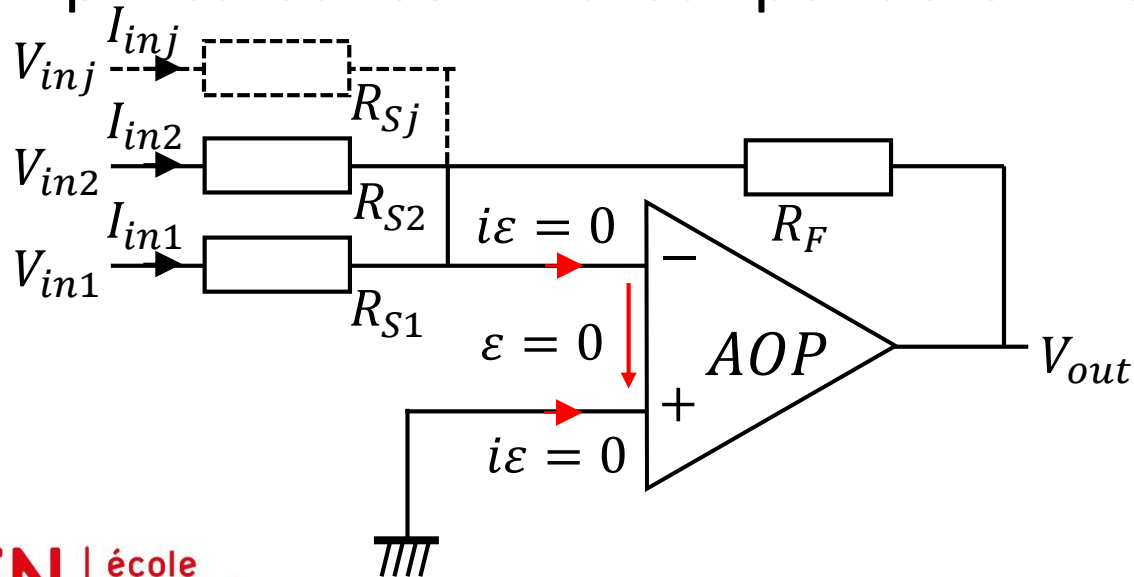
$$V_{out} = \frac{-R_F}{R_S} \times V_{in1} + \left(1 + \frac{R_F}{R_S}\right) V_{in2}$$

$$Z_{in1} = \frac{V_{in1}}{I_{in}} = R_S$$

$$Z_{out} \approx 0$$

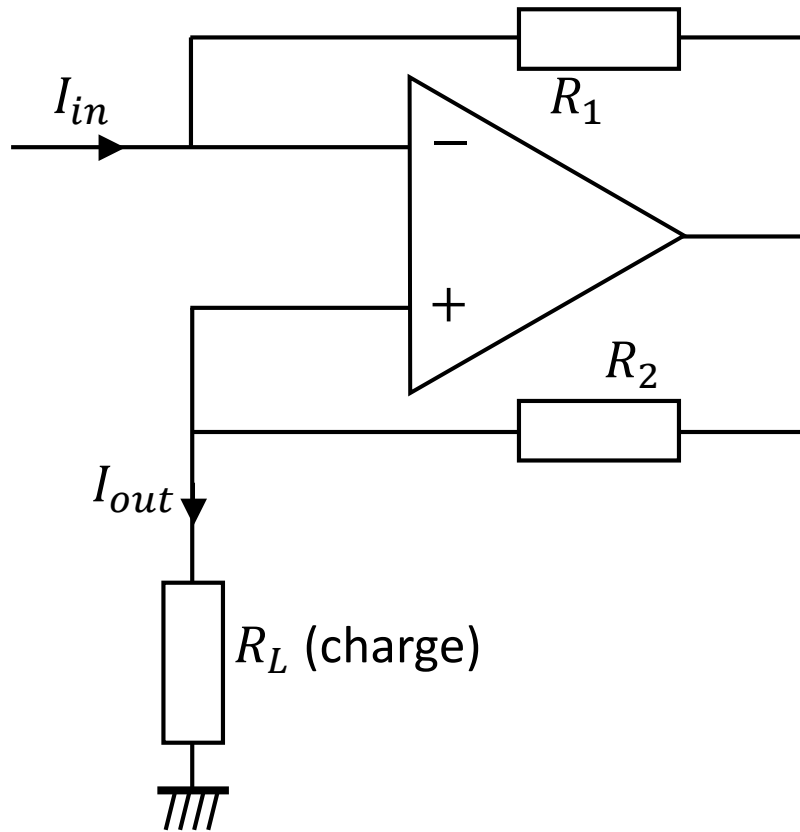
$$Z_{in2} = \frac{V_{in2}}{i_\varepsilon} \rightarrow \infty$$

- Amplificateur sommateur pondéré inverseur

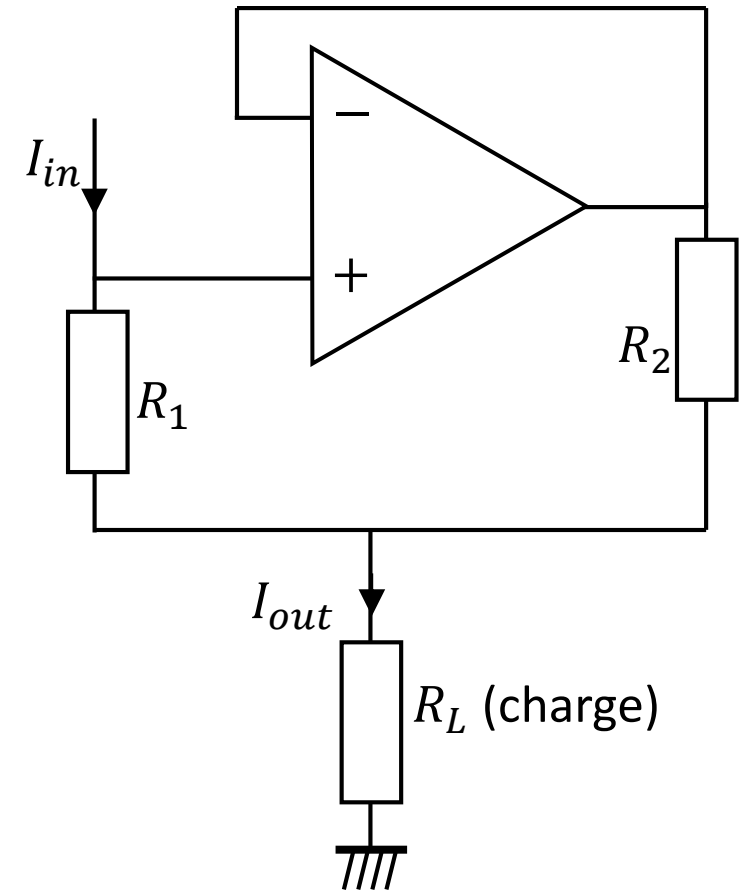


$$V_{out} = \dots$$
$$Z_{inj} = \frac{V_{inj}}{I_{inj}} = \dots$$
$$Z_{out} \approx 0$$

3. CIRCUITS D'APPLICATION LINÉAIRES – Amplificateurs de courant

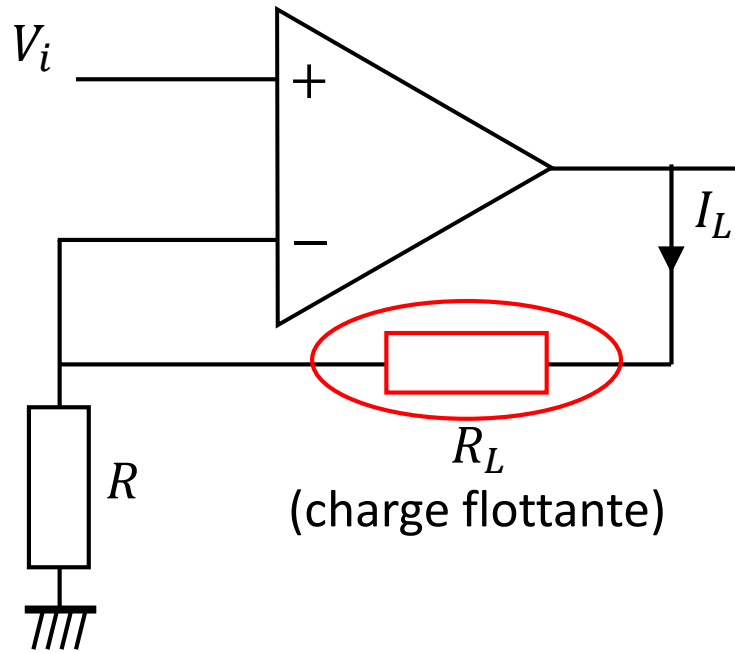


$$\begin{aligned} I_{out} &= ? \\ Z_{in} &= ? \\ Z_{out} &= ? \end{aligned}$$

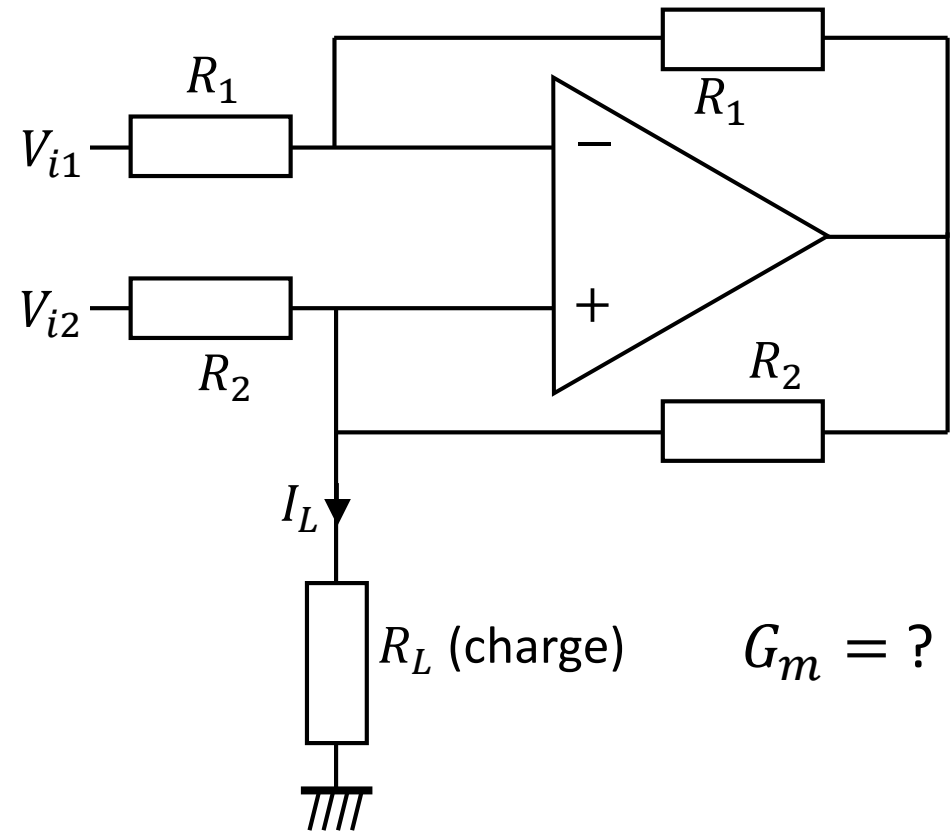


$$\begin{aligned} I_{out} &= ? \\ Z_{in} &= ? \\ Z_{out} &= ? \end{aligned}$$

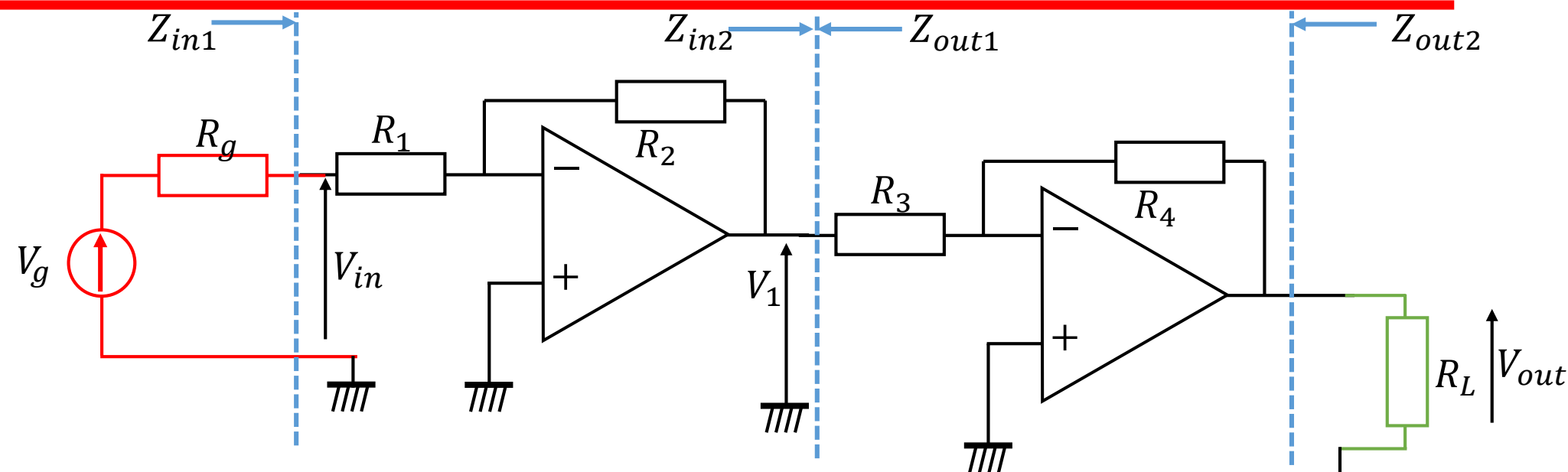
3. CIRCUITS D'APPLICATION LINÉAIRES – Amplificateurs de transconductance



$$G_m = \frac{I_L}{V_i} = \frac{1}{R}$$



3. CIRCUITS D'APPLICATION LINÉAIRES – Circuits multi-étages : calcul du gain global



Impédance de source R_g :
diviseur de tension avec Z_{in1}

$$V_{in} = V_g \frac{Z_{in1}}{Z_{in1} + R_g}$$

Impédance de charge Z_{in2} :
diviseur de tension avec Z_{out1}

$$V_1 = V_{in} A_{V1} \frac{Z_{in2}}{Z_{in2} + Z_{out1}}$$

Impédance de charge R_L :
diviseur de tension avec Z_{out2}

$$V_{out} = V_1 A_{V2} \frac{R_L}{R_L + Z_{out2}}$$

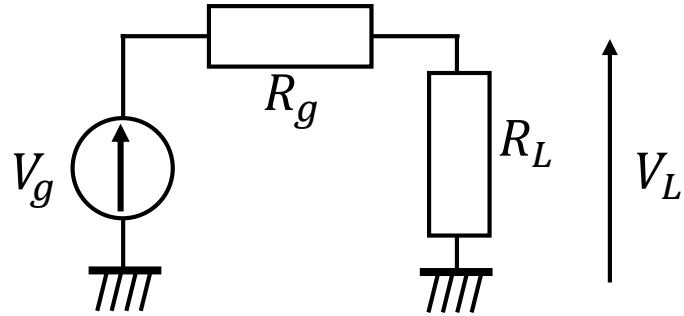
$$A_{V1} \cdot \frac{Z_{in2}}{Z_{in2} + Z_{out1}} = A_{VL1}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \prod_i A_{VLi} \longrightarrow \frac{V_{out}}{V_g} = \frac{Z_{in1}}{Z_{in1} + R_g} \prod_i A_{VLi}$$

C'est le gain en charge

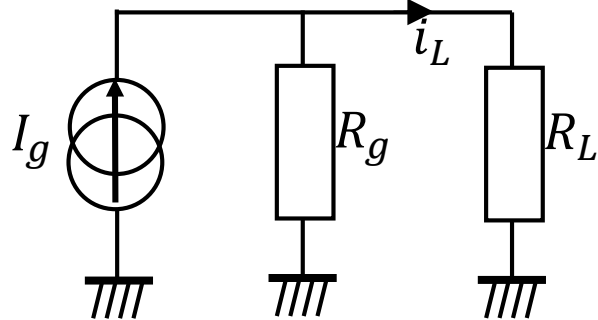
3. CIRCUITS D'APPLICATION LINÉAIRES – Circuits multi-étages : adaptation

- Adaptation en tension: transfert maximal de la tension V_g vers la charge R_L



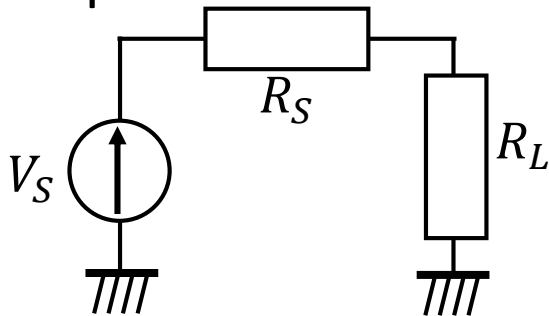
$$V_L = \frac{R_L}{R_L + R_g} V_g \text{ il faut } R_L \gg R_g$$

- Adaptation en courant: transfert maximal du courant I_g vers la charge R_L



$$i_L = \frac{R_g}{R_L + R_g} I_g \text{ il faut } R_g \gg R_L$$

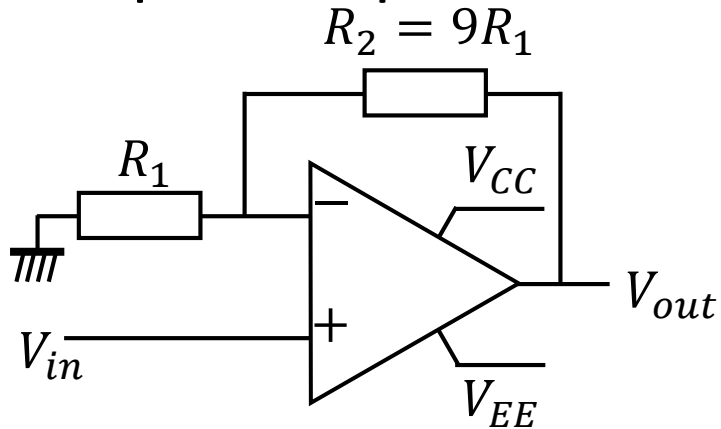
- Adaptation en puissance: transfert maximal de puissance vers la charge



$$R_L = R_S \text{ pour } P_{RL} \text{ maximal}$$

4. MISE EN ŒUVRE – Alimentation symétrique (Split-Supply)

- Exemple : amplificateur non-inverseur de gain 10



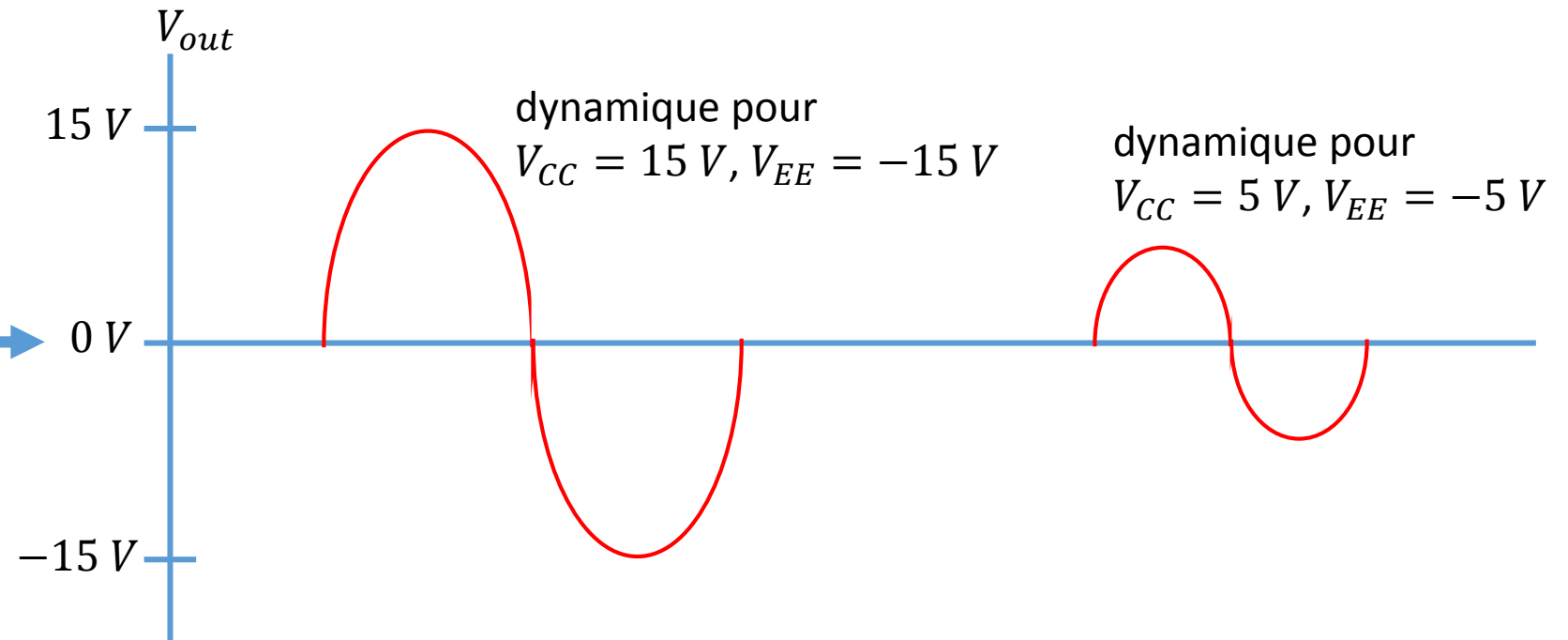
→ $|V_{CC}| = |V_{EE}|$, typiquement 5 à 15V

→ Permet de traiter directement les signaux bipolaires



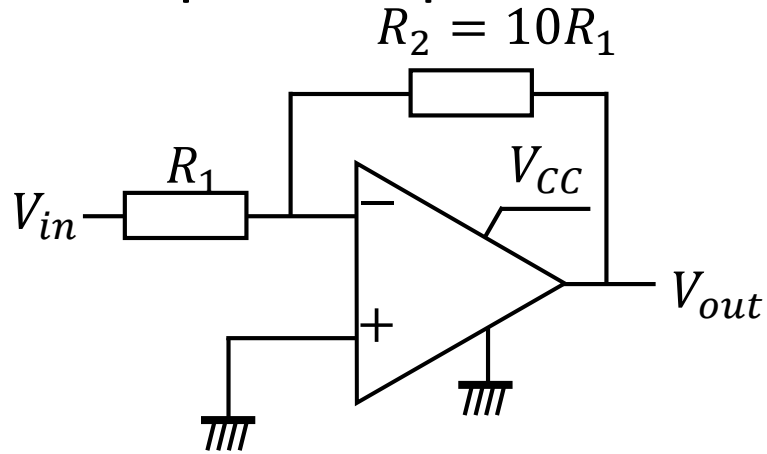
Tend à devenir obsolète

Point de polarisation :
 $V_{out} = 0$



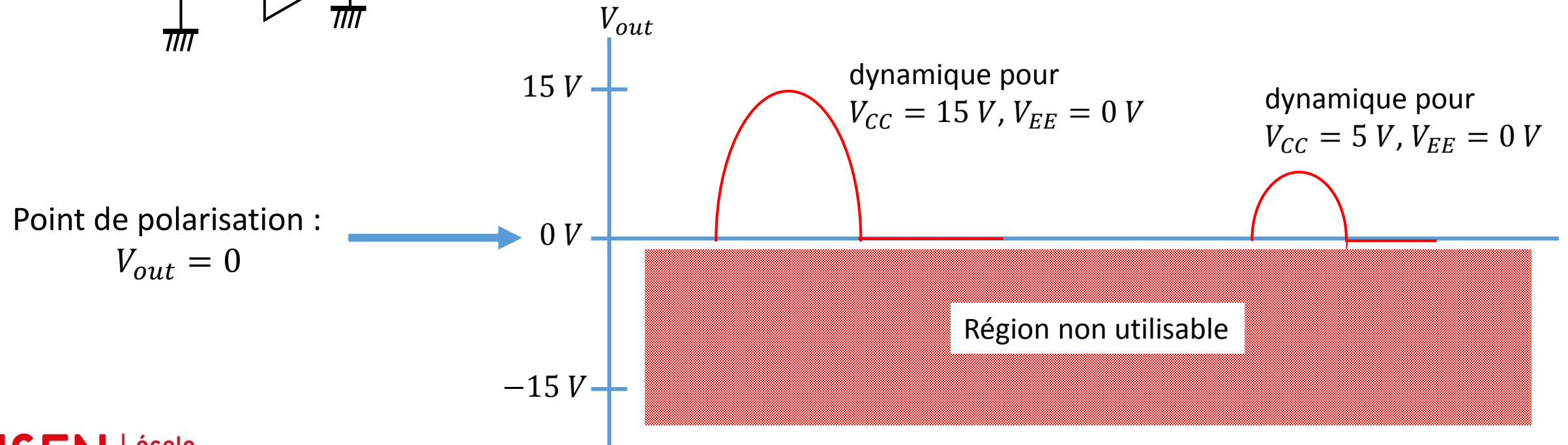
4. MISE EN ŒUVRE – Alimentation asymétrique (Single-Supply)

- Exemple : amplificateur inverseur de gain 10 sans décalage



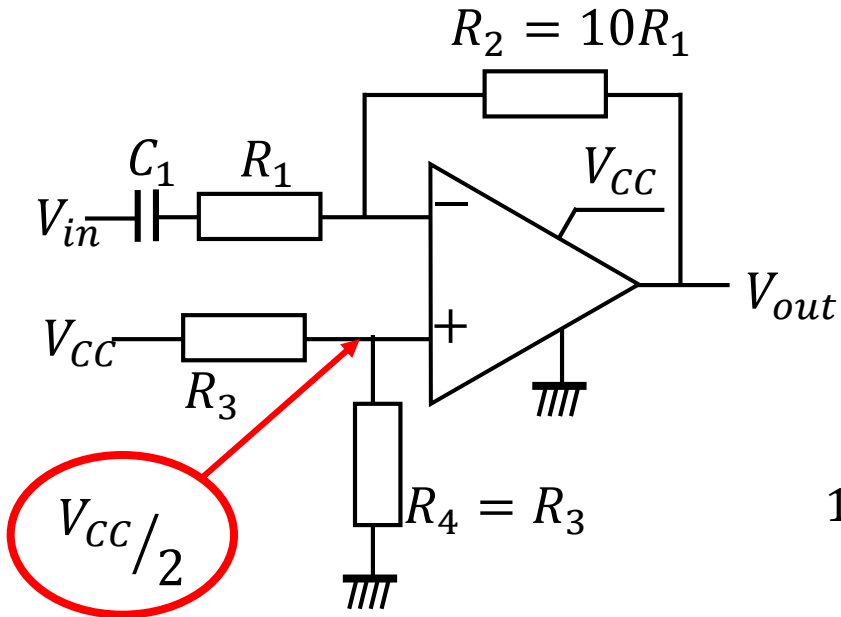
→ $V_{CC} = 1,5 \text{ à } 30 \text{ V}$ et $V_{EE} = 0$

→ Ne permet pas de traiter directement les signaux bipolaires



4. MISE EN ŒUVRE – Alimentation asymétrique (Single-Supply)

- Exemple : amplificateur inverseur de gain 10 avec décalage du point de polarisation

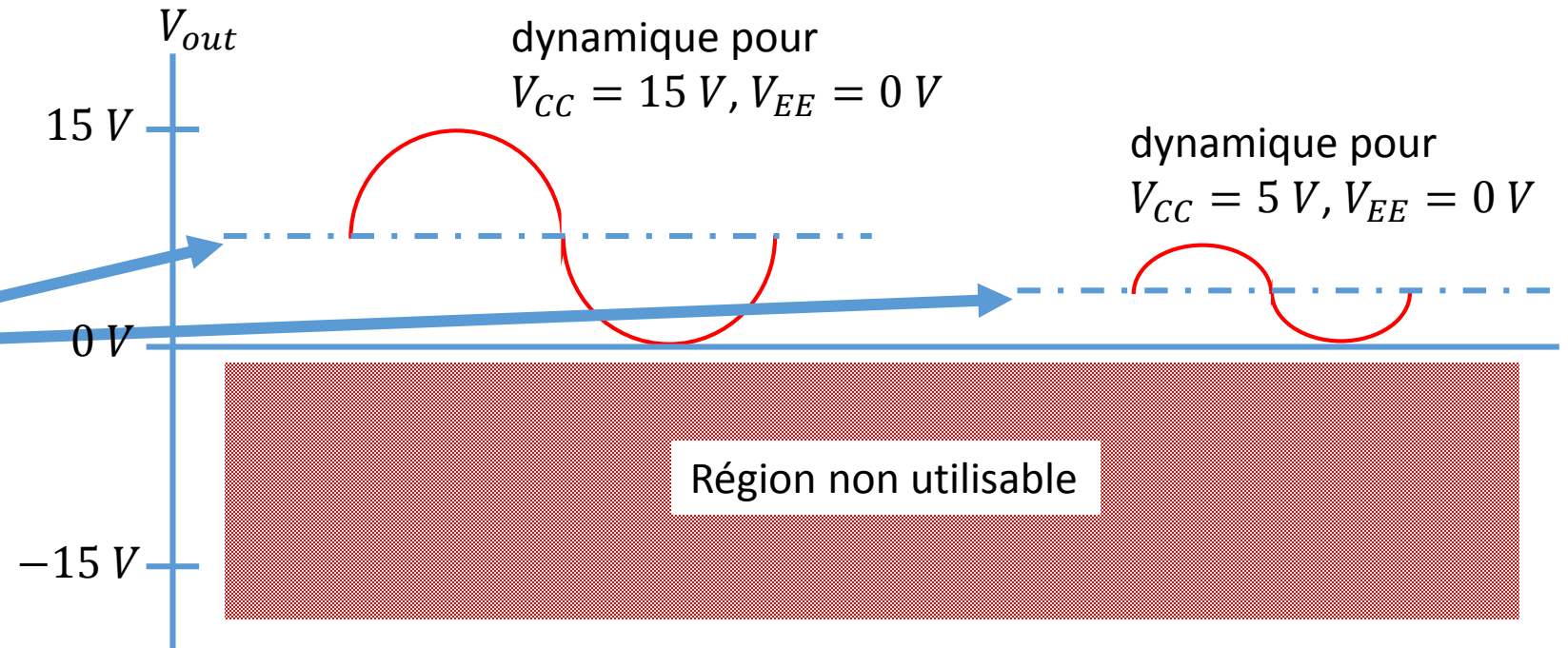


→ $V_{CC} = 1,5 \text{ à } 30 \text{ V}$ et $V_{EE} = 0$

→ Permet maintenant de traiter directement les signaux bipolaires

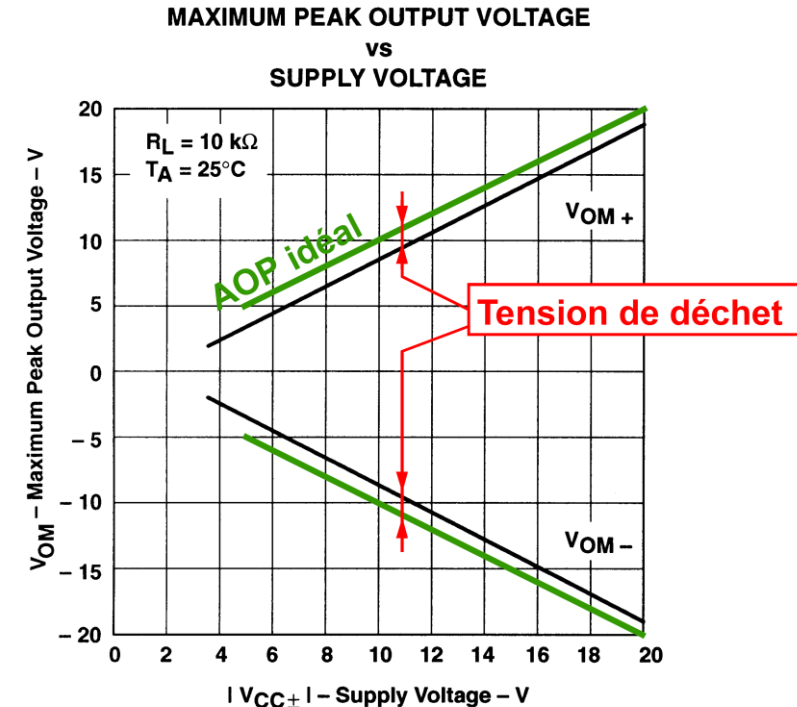
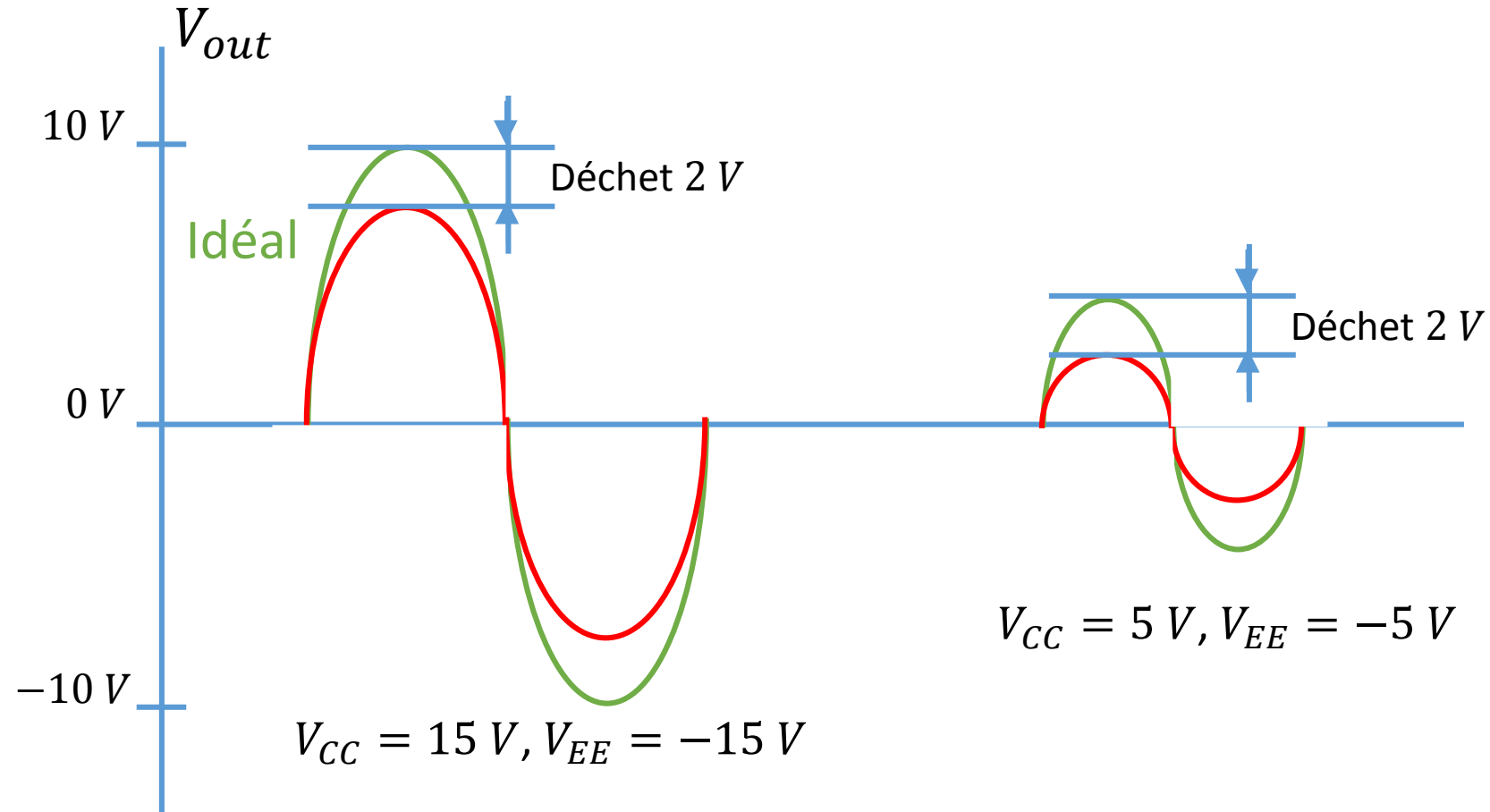
Point de polarisation :

$$V_{out} = \frac{V_{CC}}{2}$$



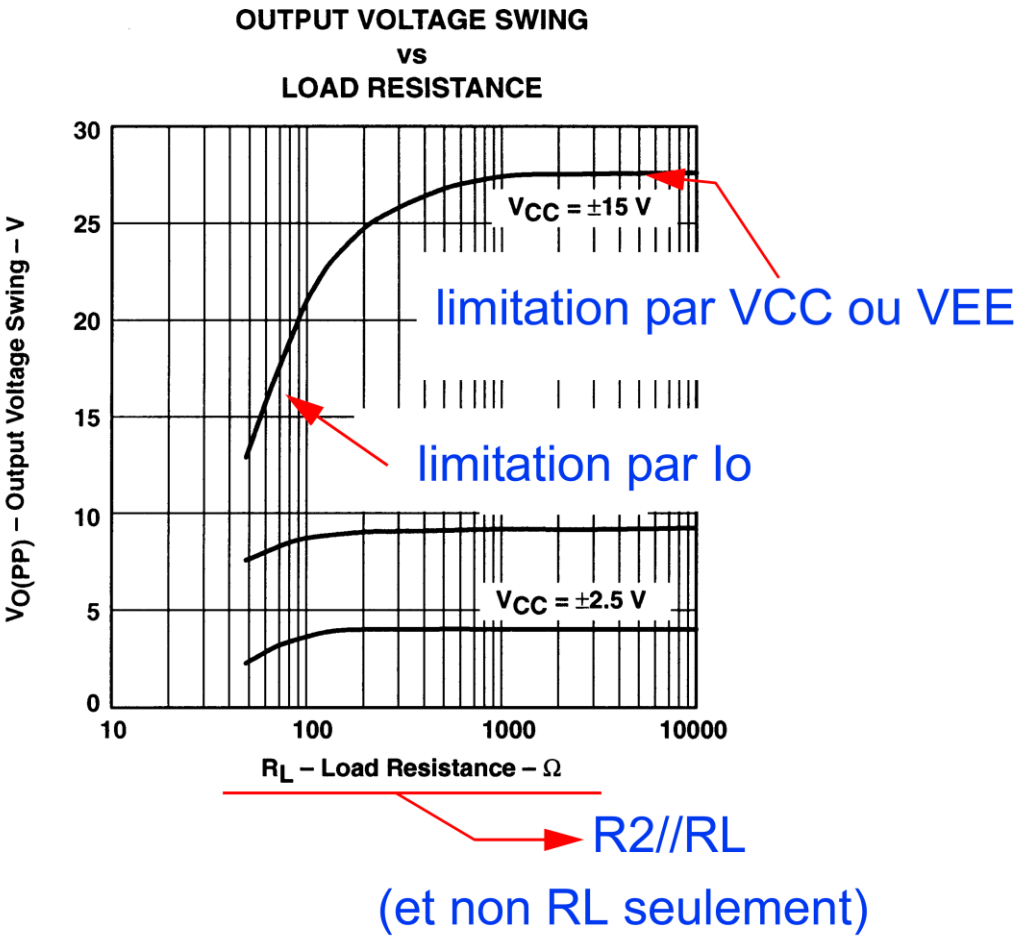
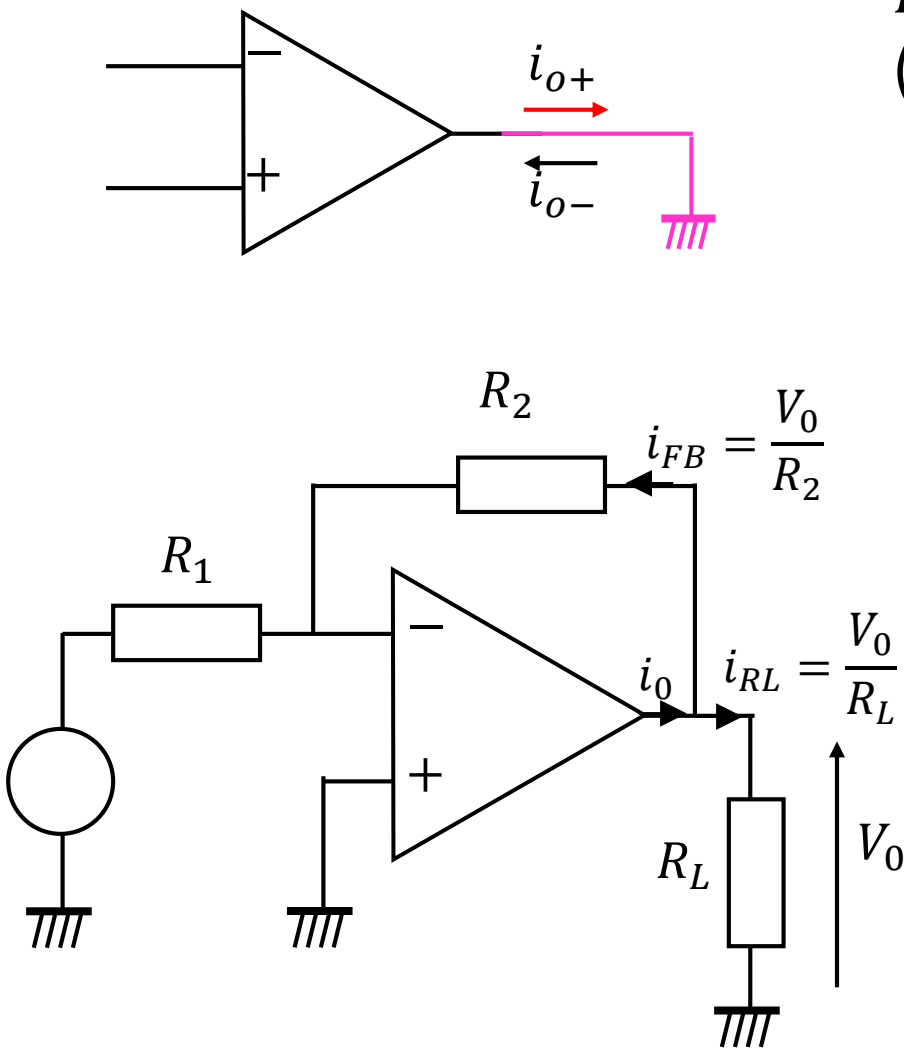
5. PRINCIPALES NON-IDÉALITÉS ET LEURS EFFETS – Limitation en tension et en courant

- En réalité, la dynamique en sortie est inférieure à $V_{CC} - V_{EE}$: tensions de déchet

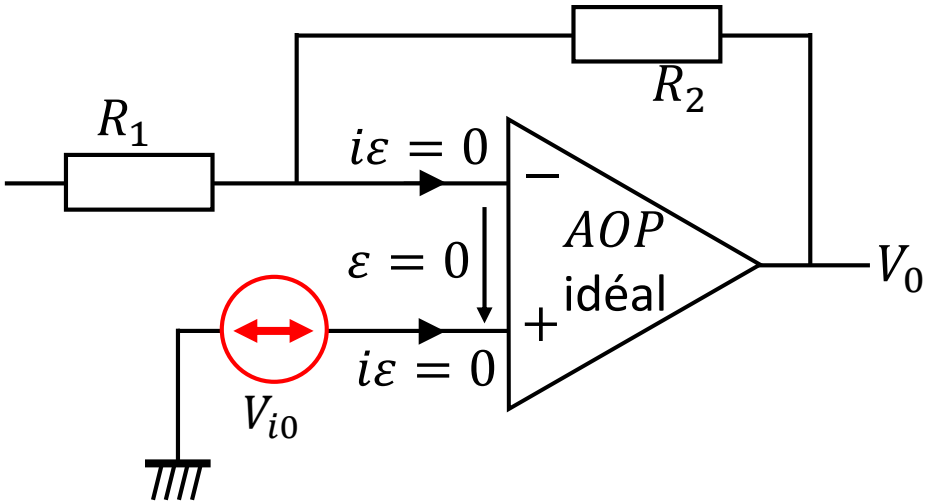


5. PRINCIPALES NON-IDÉALITÉS ET LEURS EFFETS – Limitation en tension et en courant

I_0 : limitation pour protection contre les court-circuits (et pas uniquement les court-circuits à la masse!!)



5. PRINCIPALES NON-IDÉALITÉS ET LEURS EFFETS – Tension de décalage (offset)



Pour $V_i = 0$:

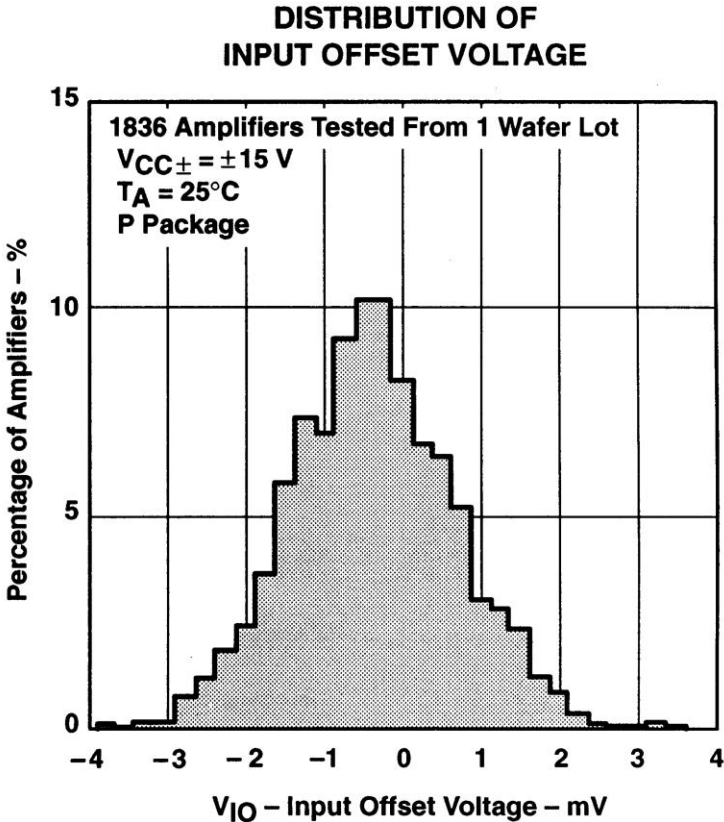
$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{io}$$

electrical characteristics, $V_{CC} = \pm 15\text{ V}$, $R_L = 150\ \Omega$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	V_{CC}	MIN	TYP	MAX	UNIT
V_{IO} Input offset voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$	$\pm 15\text{ V}$		2	8	mV
	$T_A = \text{full range}$	$\pm 5\text{ V}$			10	
	$T_A = 25^\circ\text{C}$	$\pm 15\text{ V}$		2.6	5	

➡ Effet induit: peut éventuellement réduire la dynamique utilisable de façon importante

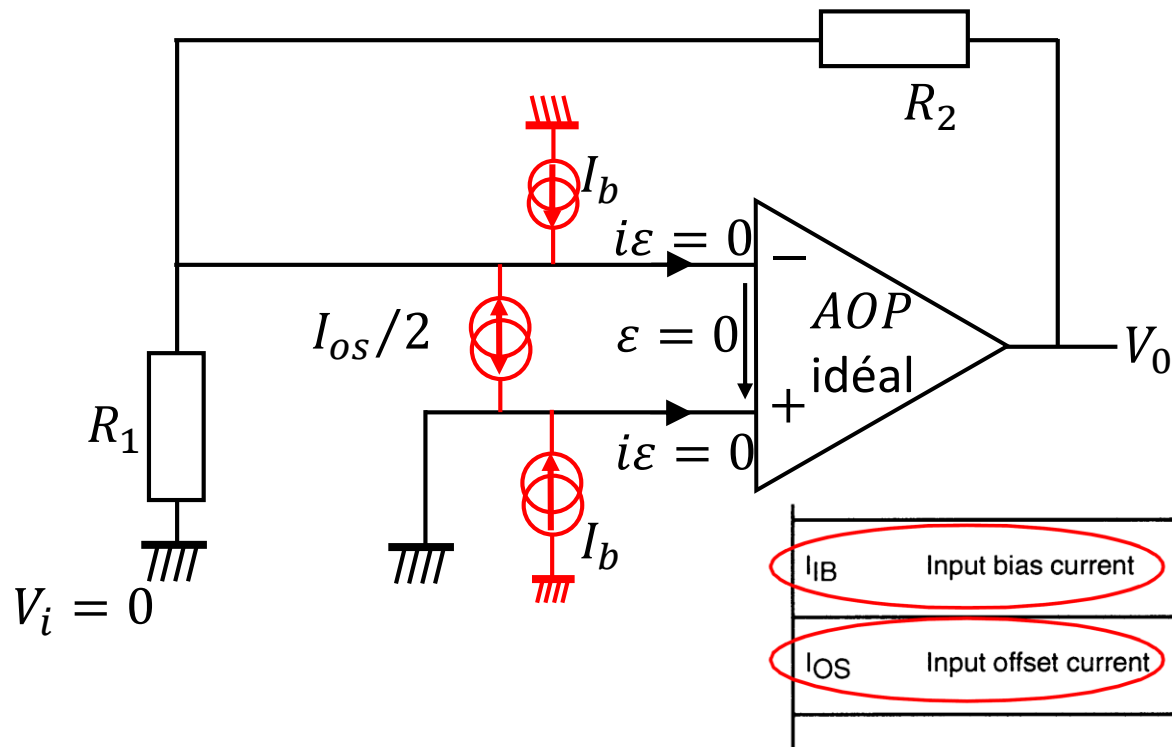
Exemple: un amplificateur de gain 1000 alimenté en $\pm 5\text{ V}$



Polarité et valeur de V_{io} aléatoires

5. PRINCIPALES NON-IDÉALITÉS ET LEURS EFFETS – Courant de polarisation (bias) & de décalage (offset)

Courant de polarisation en entrée = Input Bias Current (I_b)
 Courant de décalage = Offset Current (I_{OS})



$$I_b = \frac{I_{b_{moins}} + I_{b_{plus}}}{2}$$

$$I_{os} = I_{b_{moins}} - I_{b_{plus}}$$

Pour $V_i = 0$:

$$V_0 = -R_2 \left(\frac{I_{os}}{2} + I_b \right)$$

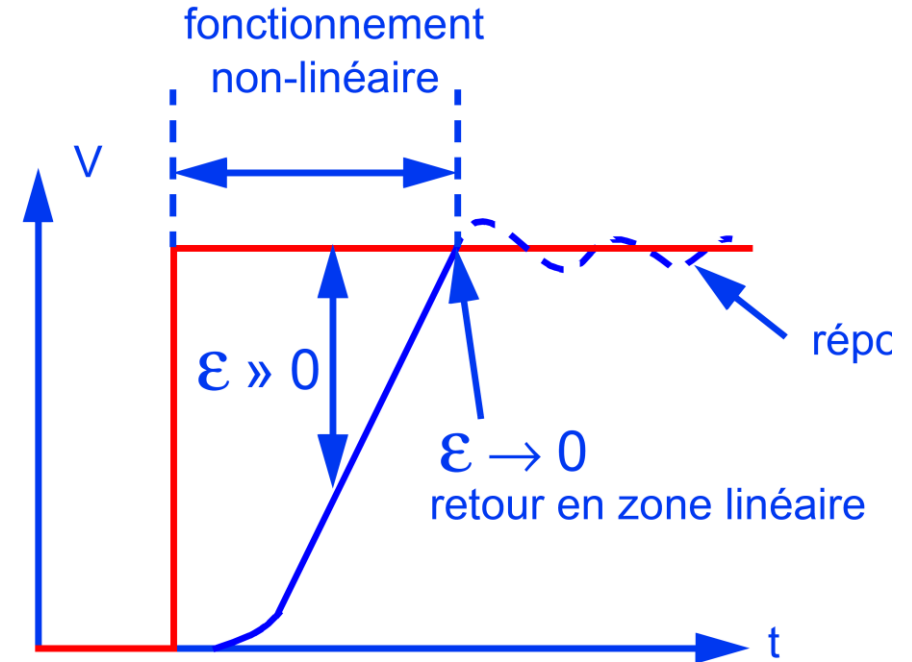
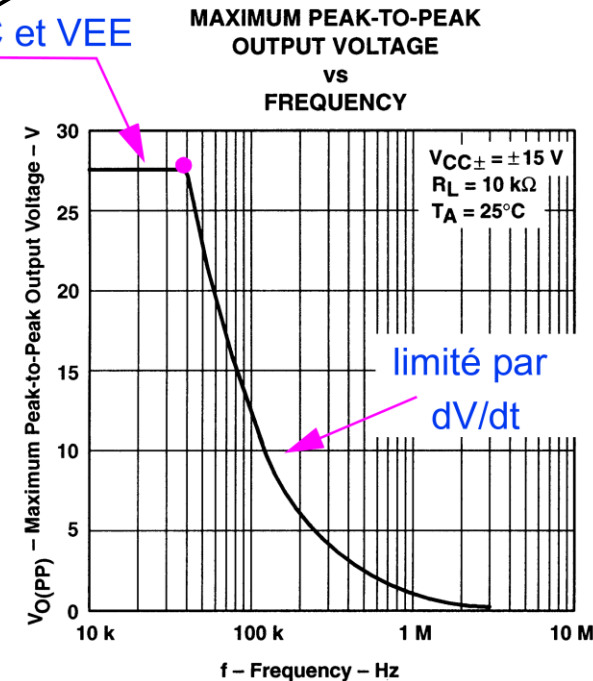
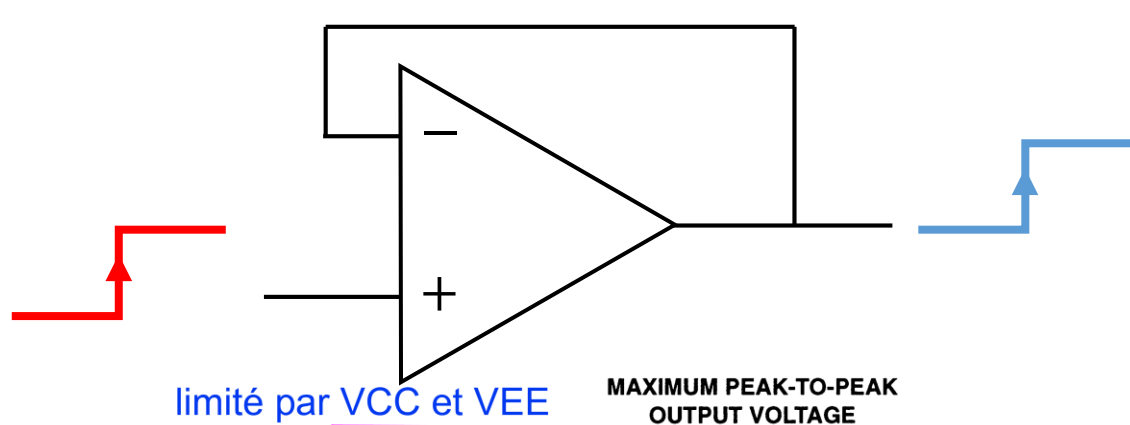
I_B Input bias current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		$\pm 15\text{ V,}$ $\pm 5\text{ V}$	2.6	5	μA
	$T_A = \text{full range}$				6	
I_{OS} Input offset current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		$\pm 15\text{ V,}$ $\pm 5\text{ V}$	35	200	nA
	$T_A = \text{full range}$				500	
		$V_O = \pm 10\text{ V,}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		5 10	

Effet induit: peut éventuellement réduire la
 dynamique utilisable de façon importante

Exemple: un amplificateur de transrésistance $R_T = 10^6\text{ V/A}$ alimenté en $\pm 5\text{ V}$

5. PRINCIPALES NON-IDÉALITÉS ET LEURS EFFETS – Slew-rate & temps d'établissement

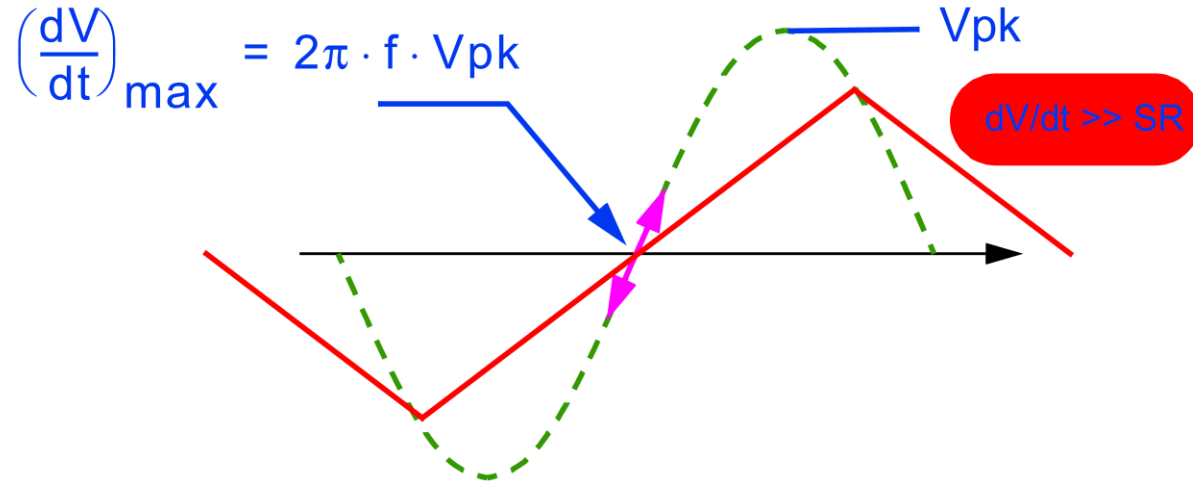
- Slew-rate: valeur maximale du dV/dt en sortie de l'amplificateur opérationnel.



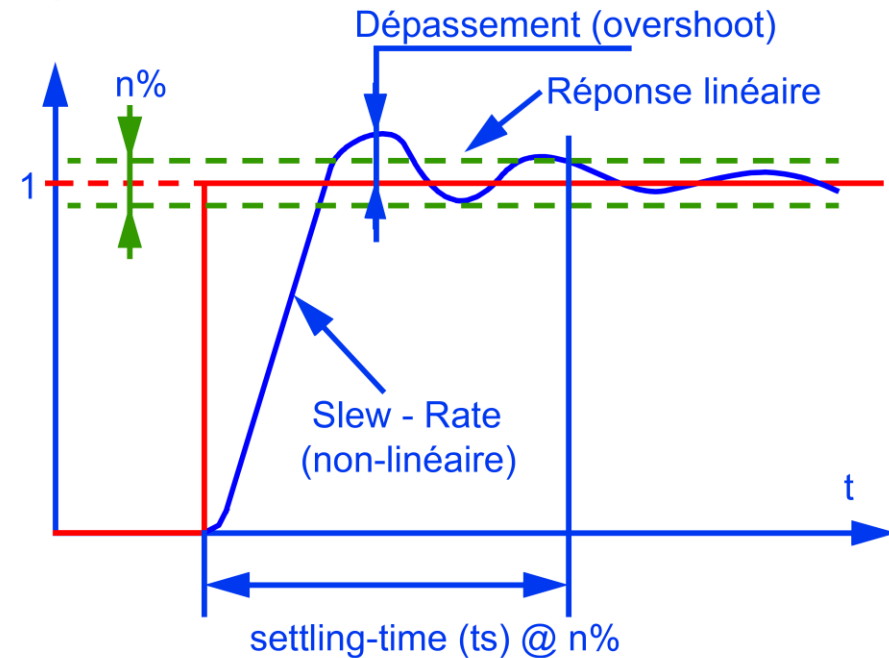
➡ Effet induit : limite la capacité d'un circuit à suivre des signaux à évolution rapide, d'où apparition de distorsion.

5. PRINCIPALES NON-IDÉALITÉS ET LEURS EFFETS – Slew-rate & temps d'établissement

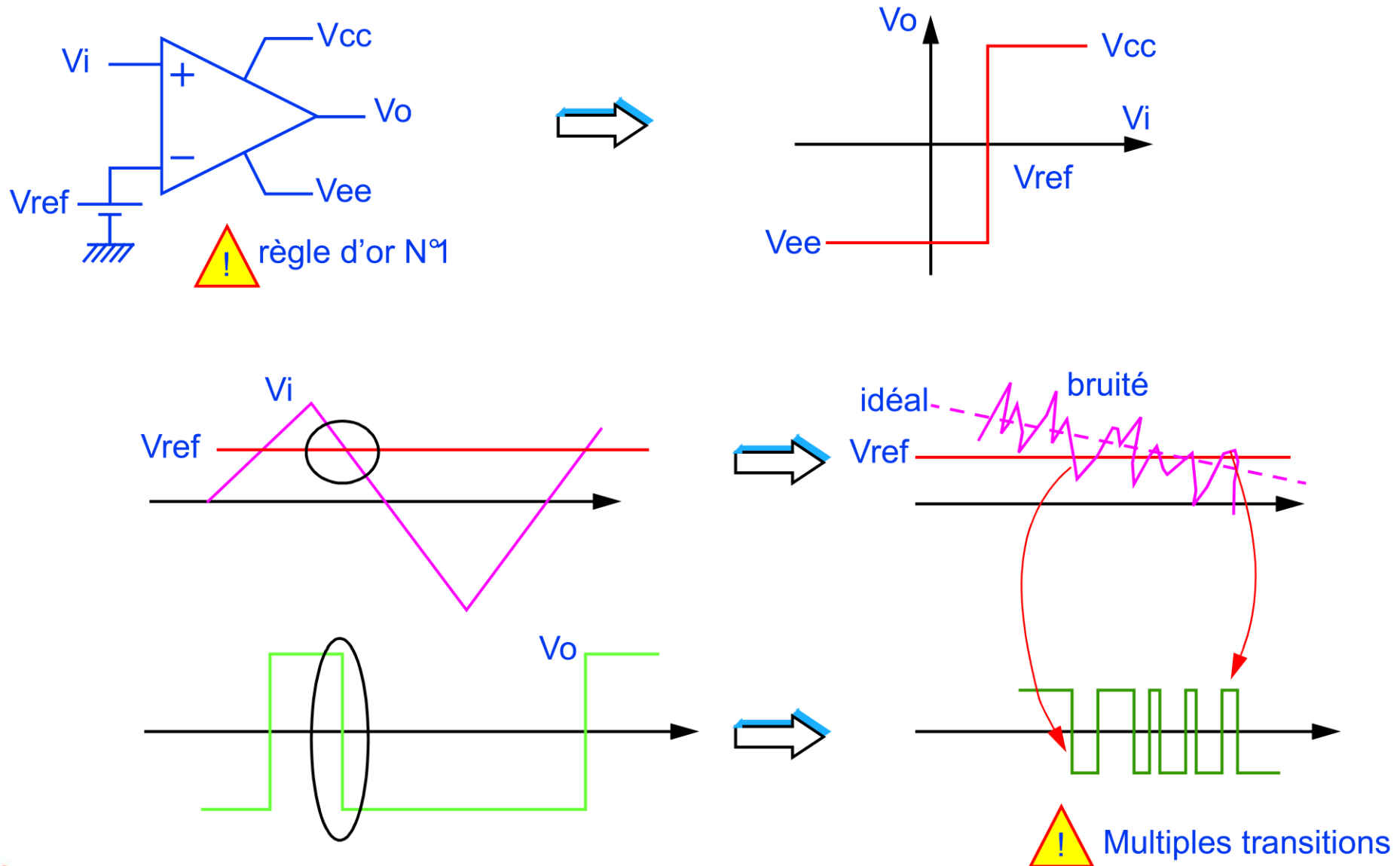
exemple de distorsion par
limitation du slew-rate



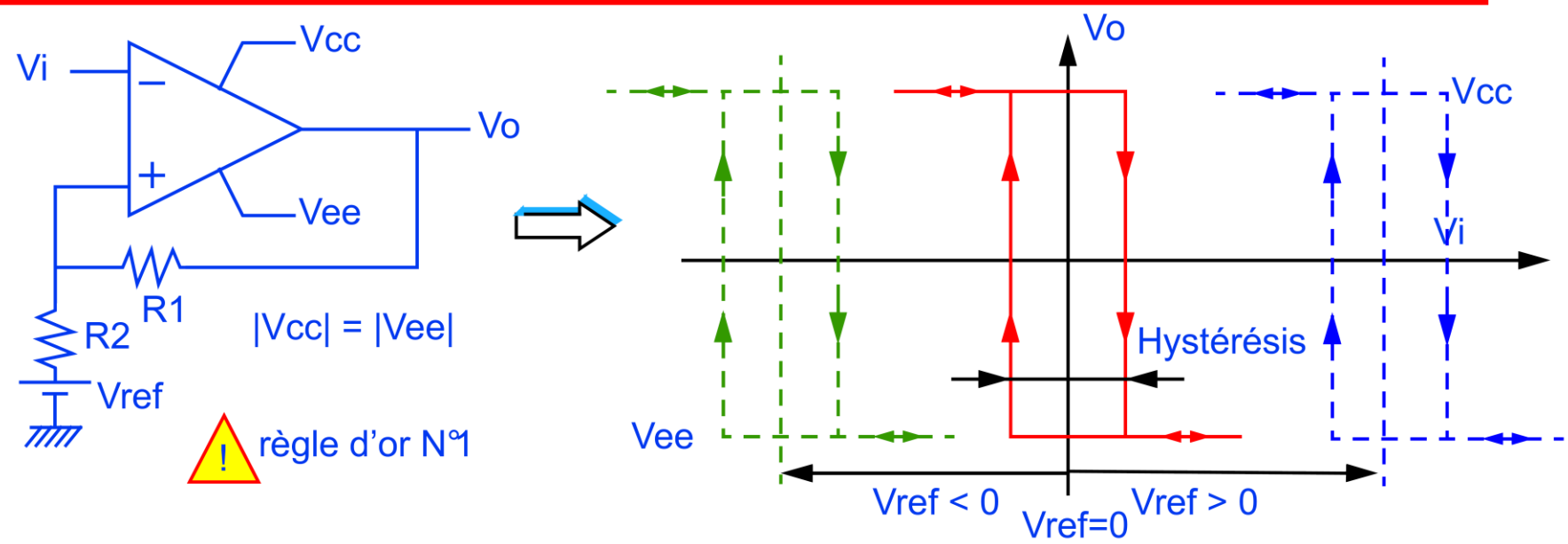
- Temps d'établissement (settling time)



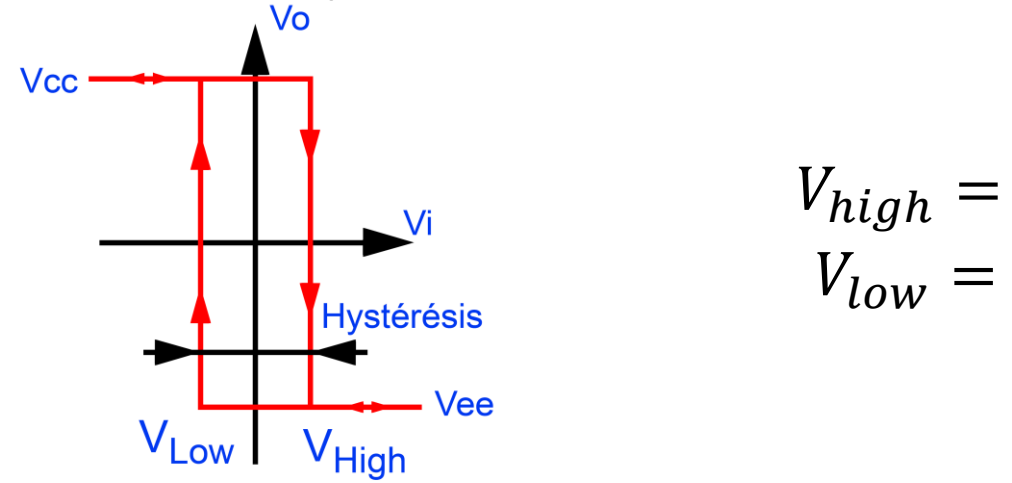
6. CIRCUITS NON-LINÉAIRES: COMPAREURS – *Compareur simple*



6. CIRCUITS NON-LINÉAIRES: COMPAREURS – Comparateur à hystérésis (trigger de Schmitt)



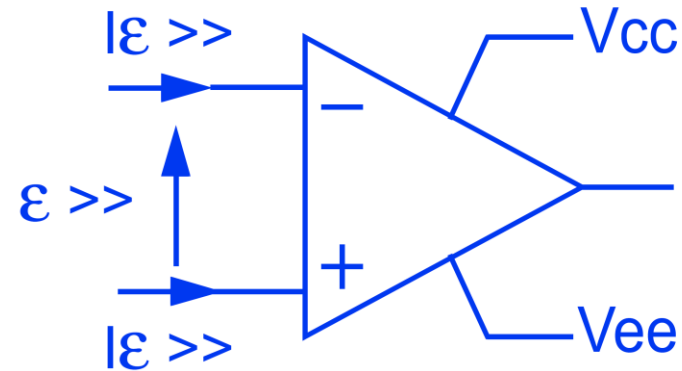
Intérêt si l’hystérésis est supérieur au bruit (crête-crête) sur V_i



6. CIRCUITS NON-LINÉAIRES: COMPAREURS – Aspects de réalisation pratique



Un comparateur est un circuit en boucle ouverte donc pas de contre-réaction



Utiliser des circuits dédiés à la fonction de comparateur de préférence à un OPA classique à cause des diodes de protection

