IUT de Colmar - Département R&T - 1ère année.

Introduction aux Systèmes asservis:

Laurent MURA.

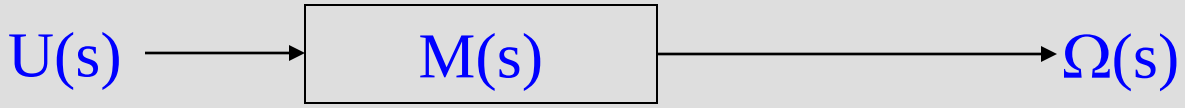
SOMMAIRE:

1. Système commandé.
2. Système asservi.
3. Les modes de fonctionnement.

1. Système commandé:

Système commandé: Fonctionnement (1):

- **Commande de vitesse d ’un moteur à courant continu:**
  - Grandeur physique de l ’entrée U(s) : Tension [V]
  - Grandeur physique de la sortie Ω(s) : Vitesse [Rad/s]
  - Représentation en **SCHEMA BLOCS**:



- M(s) est la fonction de transfert en vitesse du moteur:

$$M(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{[rad/s]}{[V]}$$

Système commandé: Fonctionnement (2):

- **Recherche de M(s):**
  - U varie de 0V à +10V
  - Ω varie de 0 à 1000 rad/s
  - Constante de temps mécanique: 5s.

$$M(s) = \frac{100}{5*s+1} = \frac{[rad/s]}{[V]}$$

$$\Omega(s) = \frac{100}{5*s+1} * U(s)$$

Asser_1.mdl

Système commandé: Fonctionnement (3):

- **Que se passe-t-il si on amène un frottement sur l ’axe du moteur ?**

=> La vitesse diminue. Asser_2.mdl

- **Comment empêcher cette diminution de vitesse ?**

=> Avoir une information sur la sortie pour la réinjecter à l ’entrée:

<u>Ce système commandé devient alors un système asservi.</u>

2. Système asservi:

Système asservi: Fonctionnement (1):

- **Comment procéder à l ’asservissement de notre moteur à courant continu ?**

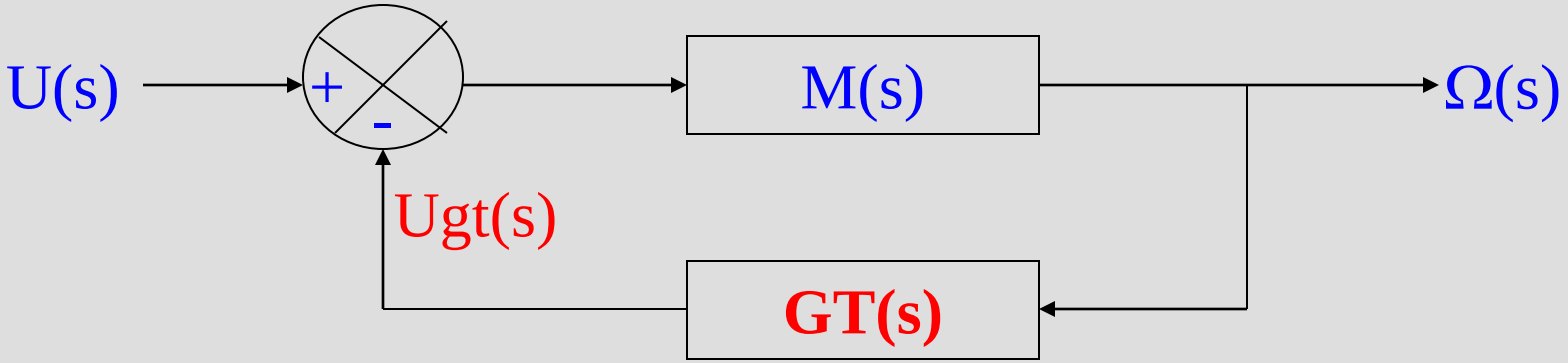
=> Utiliser un capteur qui au mieux pourrait mesurer une vitesse,

=> L ’idéal est d ’avoir l ’image de cette vitesse sous la forme d’une grandeur électrique exprimée en Volts:

=> On utilisera la génératrice tachymétrique.

=> D ’où le SCHEMA BLOCS suivant:

Système asservi: Fonctionnement (2):



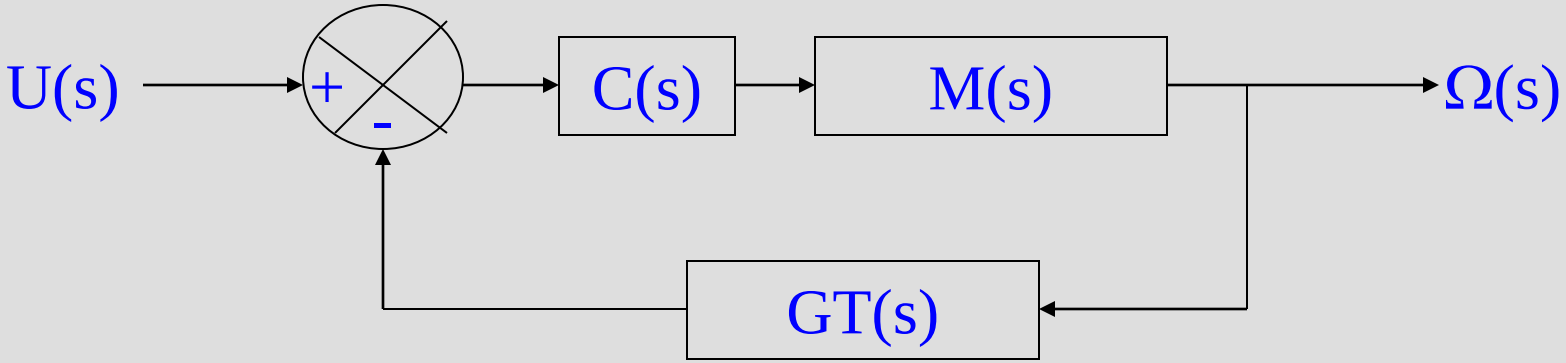
•**Recherche de GT(s) qui représente la génératrice tachymétrique:**

$$GT(s) = \frac{Ugt(s)}{\Omega(s)} = \frac{[V]}{[rad/s]}$$

$$GT(s) = \frac{10[V]}{1000[rad/s]} = 0.01\frac{[V]}{[rad/s]}$$

Système asservi: Fonctionnement (3):

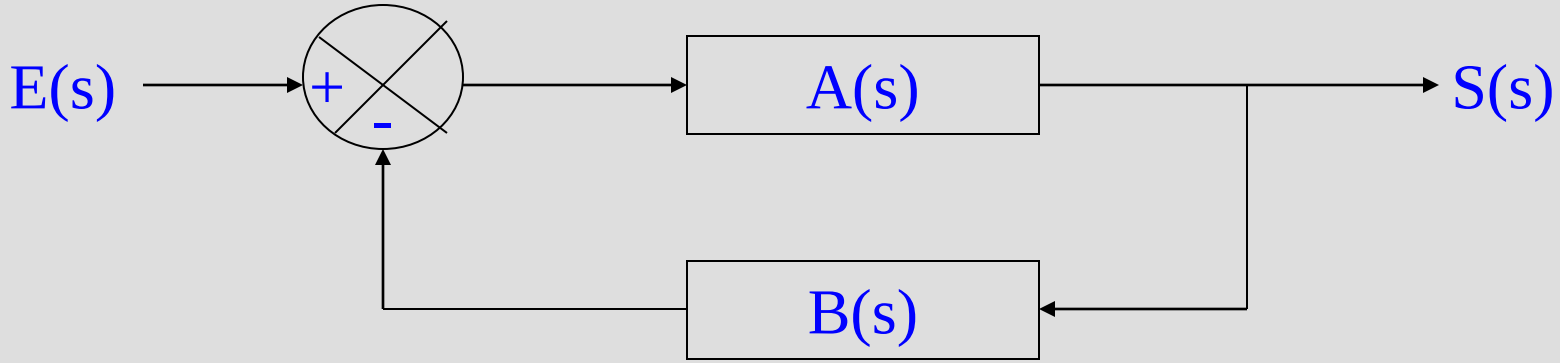
- **Problème d 'erreur statique (dans notre exemple):**
  - Pour enlever l 'erreur statique à une entrée échelon, il faut mettre un correcteur de type intégrateur,
  - Le schéma bloc du système devient:



$$C(s) = \frac{1}{s}$$

Asser_3.mdl

Système asservi: Organisation générale:



SCHEMA BLOCS:

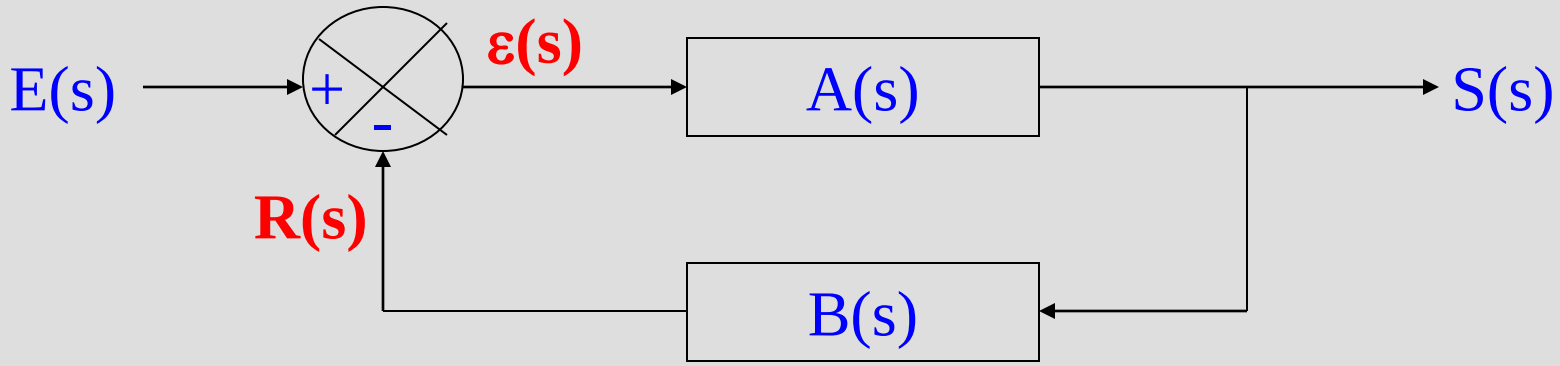
•E(s): Entrée.

•S(s): Sortie.

•A(s): **Chaîne directe ou d 'action**: Permet de transmettre l 'information de l 'Entrée vers la Sortie.

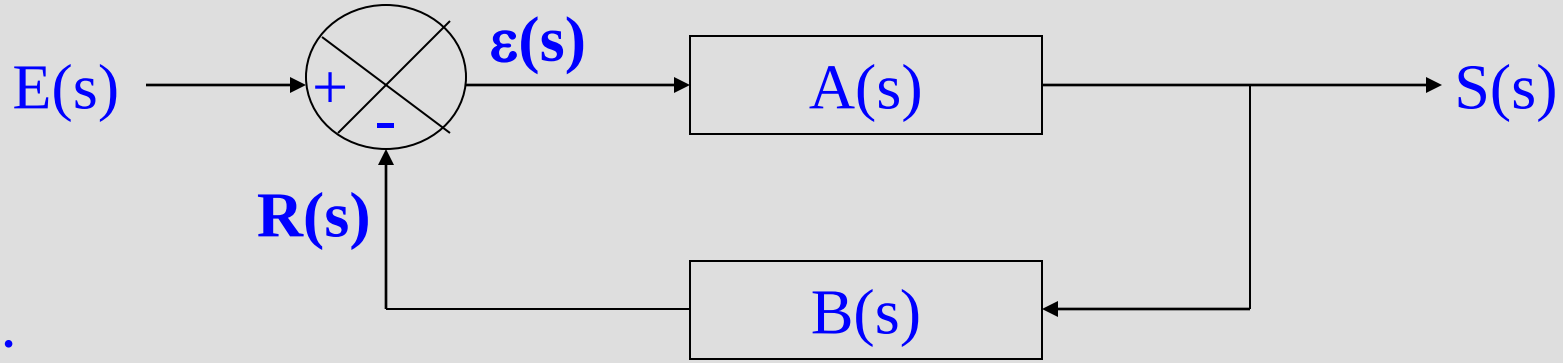
•B(s): **Chaîne de retour ou de réaction**: Permet de prélever en Sortie une fraction de l 'information pour la ramener vers l 'entrée du système.

Système asservi: Mise en équation (1):



- Soient:
  - **R(s)** : l 'information de retour de même unité que E(s),
  - **ε(s)** : l 'erreur entre E(s) et R(s).
- Lors de l 'utilisation d 'un correcteur C(s), il suffira de remplacer A(s) par A(s)*C(s).

Système asservi: Mise en équation (2):



On a:

$S(s) = A(s) * \varepsilon(s)$

$\varepsilon(s) = E(s) - R(s)$

$R(s) = B(s) * S(s)$

$$\frac{S(s)}{E(s)} = \frac{A(s)}{1 + A(s) * B(s)}$$

D 'où:

$S(s) = A(s) * (E(s) - B(s) * S(s))$

3. Les modes de fonctionnement d 'un système asservi:

Les modes de fonctionnement: La contre-réaction:

$$\frac{S(jw)}{E(jw)} = Ar(jw) = \frac{A(jw)}{1 + A(jw) * B(jw)}$$

C 'est le cas où: $\left| 1 + A(jw) * B(jw) \right| > 1$

- Il en résulte que: $|\underline{Ar}| < |\underline{A}|$

- Le signal de sortie est, en module, inférieur à celui que l'on aurait en appliquant l'entrée E directement sur l'entrée de l 'amplificateur A. L'amplification globale est diminuée.

- Nous avons une ***CONTRE-REACTION***.

Les modes de fonctionnement: La réaction positive:

$$\frac{S(jw)}{E(jw)} = Ar(jw) = \frac{A(jw)}{1 + A(jw) * B(jw)}$$

C 'est le cas où: $\left| 1 + A(jw) * B(jw) \right| < 1$

- Il en résulte que | Ar | > | A |

- Cette fois la réaction a tendance à augmenter l'amplification du système. L'amplitude du signal de sortie est supérieure à celle que l'on obtiendrait avec un système sans boucle de réaction.

- Nous avons une ***REACTION POSITIVE***.

Les modes de fonctionnement: En oscillateur (1):

$$\frac{S(jw)}{E(jw)} = Ar(jw) = \frac{A(jw)}{1 + A(jw) * B(jw)}$$

C 'est le cas où: $1 + A(jw) * B(jw) = 0$

Comme nous travaillons sur des grandeurs complexes cette relation est vérifiée si les deux conditions suivantes, dites de ***BARKAUSEN***, le sont :

$|\underline{A}|.|\underline{B}| = 1$

$\arg \underline{A} + \arg \underline{B} = \pi$

Les modes de fonctionnement: En oscillateur (2):

•Reprenons l'équation écrite précédemment :

$$\bullet \underline{S}.(1 + \underline{A}.\underline{B}) = \underline{A}.\underline{E}$$

•Si $1 + \underline{A}.\underline{B} = 0$ il est possible d'avoir $\underline{S} \neq 0$ même si $\underline{E} = 0$, c'est le fonctionnement en oscillateur du système qui délivre un signal sinusoïdal même en l'absence d'entrée.

•Cette condition est vérifiée pour une fréquence f_0, qui est la fréquence des oscillations.

CONCLUSION:

La contre-réaction peut sembler à priori désavantageuse puisque systématiquement l'amplification est diminuée, mais une analyse plus fine mettrait en lumière les avantages suivants :

- ☞ constance du gain en tension,
- ☞ diminution des distorsions harmoniques et de phase,
- ☞ diminution de l'influence de certaines perturbations,
- ☞ augmentation de la bande passante,
- ☞ diminution de la constante de temps, etc.

IUT de Colmar – Département R&T - 1ère année.

L ’amplificateur opérationnel:

Hervé BOEGLEN et Laurent MURA.

SOMMAIRE:

1. Introduction.
2. Constitution.
3. Régimes de fonctionnement.
4. L ’AOP en régime linéaire.
5. Etude des schémas de base.
6. L ’AOP en régime non-linéaire.
7. L ’AOP réel.

1. Introduction:

Introduction:

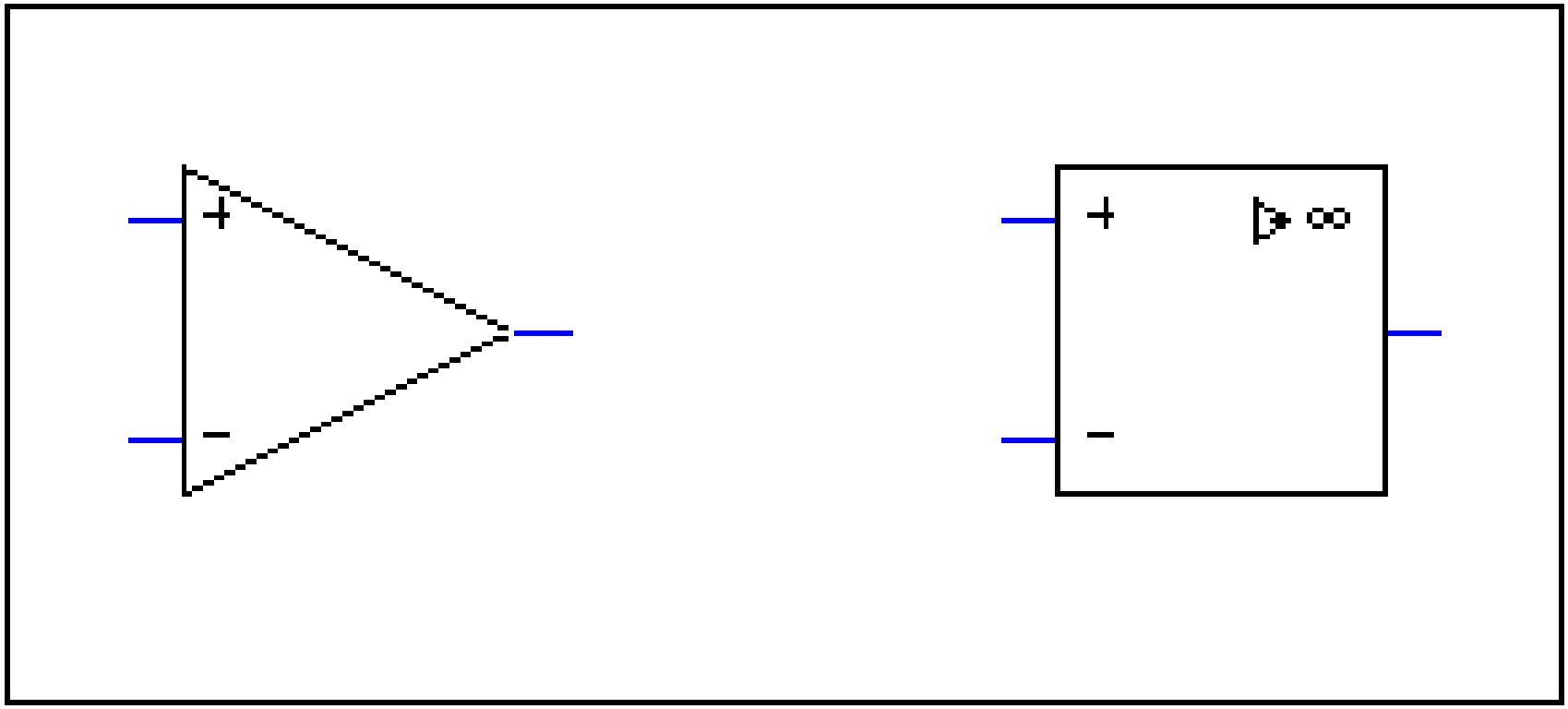
•L’amplificateur opérationnel (AOP) est un circuit intégré à entrée symétrique et à sortie non symétrique.

•Les caractéristiques principales d ’un AOP se rapprochent de celles d’un amplificateur de tension idéal.

•Il est apparu pour la première fois en 1963 (709) et, du fait de sa simplicité d’emploi, s’est vite imposé comme le composant de base de l’électronique analogique.

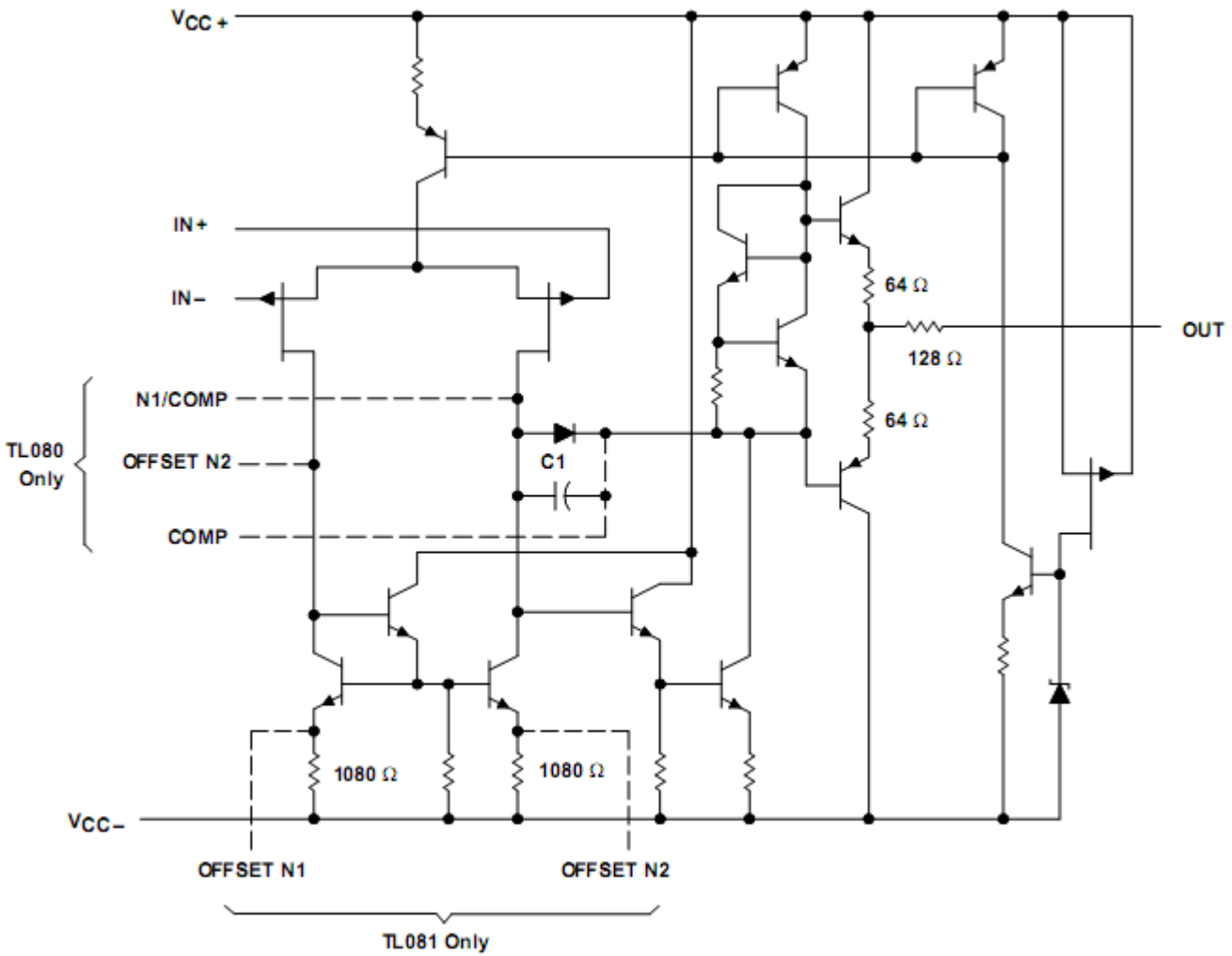
Symboles:

•Les symboles utilisés pour représenter l'AOP sont les suivants :



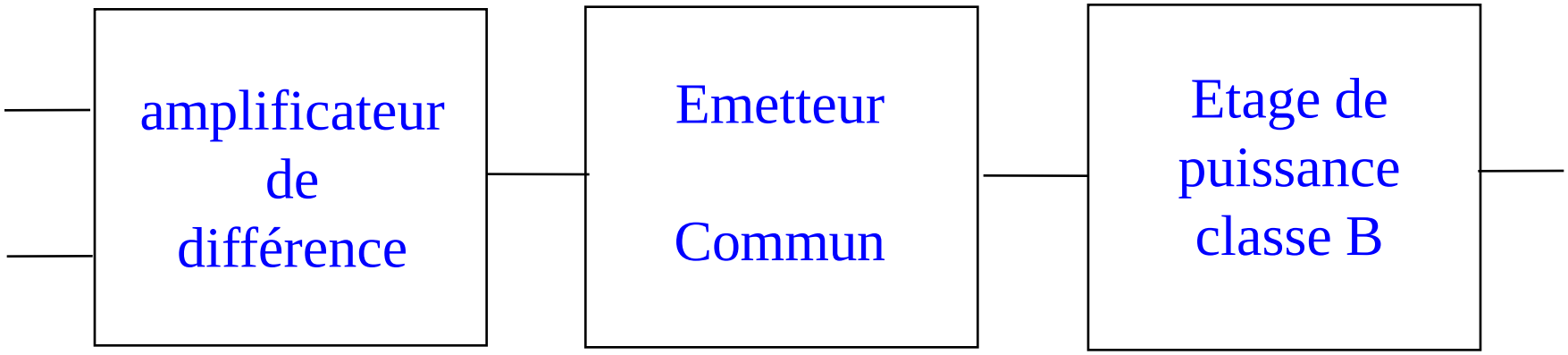
2. Constitution:

Constitution (1): Exemple avec un TL081:



Constitution (2): Schémas blocs:

•Le montage peut se résumer à :



Constitution (3):

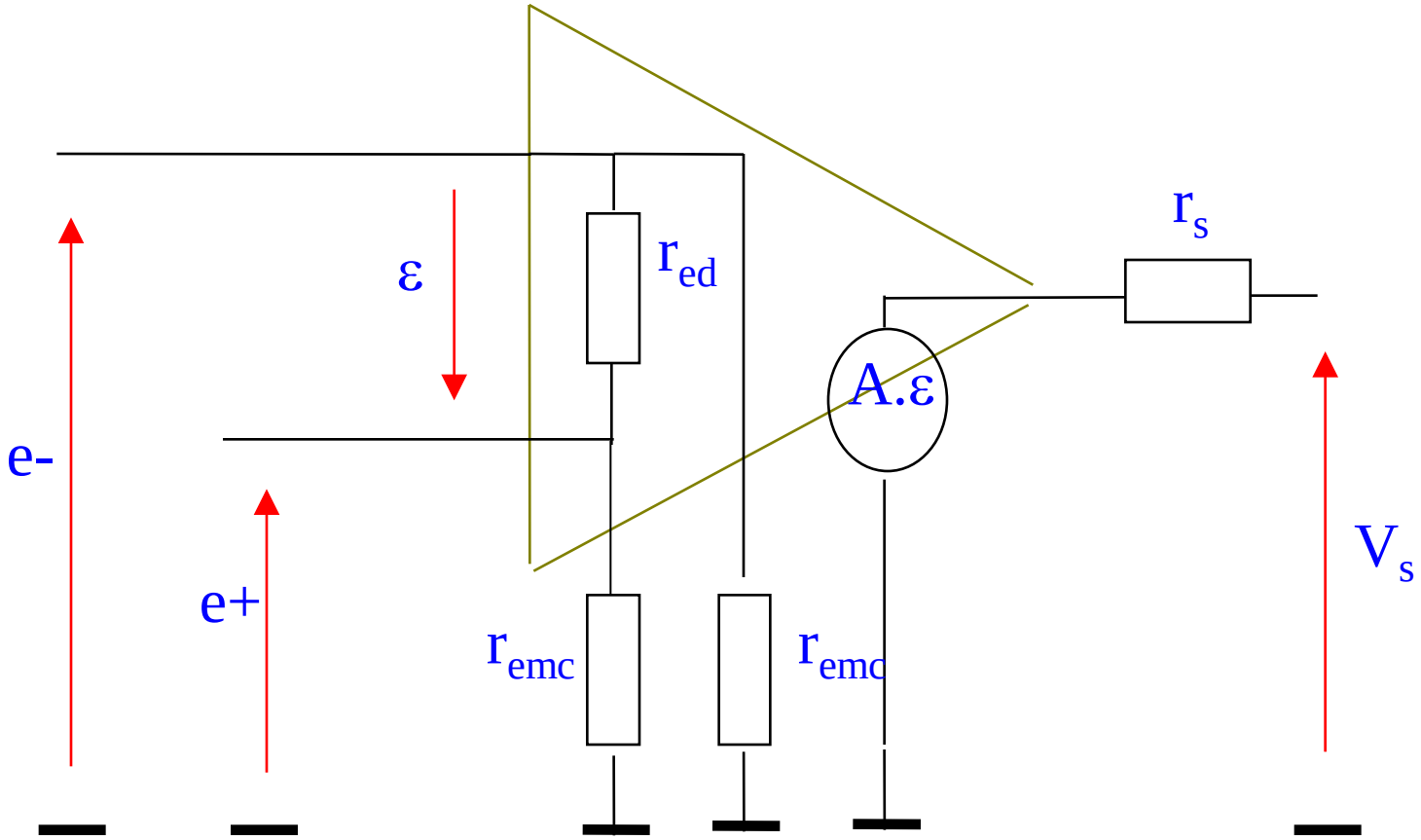
- Remarquons que le circuit est alimenté entre deux lignes :
  - l'une positive,
  - l'autre négative.

- Cela signifie que la tension de sortie de l'AOP pourra varier de par et d'autre du 0 avec une amplitude Vsmax (avec Vsmax < Valim).

  - Pour le TL081, LM741 : $\pm 3 < Valim < \pm 18$

Constitution (4): Schéma équivalent:

•Le montage peut se résumer à :



Caractéristiques:

- avec la valeur des paramètres :
  - r_{emc} --> ∞ (10^{12} Ω)
  - 10^6 Ω r_{ed} 10^{12} Ω
  - quelques ohms r_s 200 Ω
  - 10^5 A 10^6 ou plus

3. Régimes de fonctionnement:

Régimes de fonctionnement (1):

•La tension de sortie de l'AOP peut varier entre deux limites +Vsat et -Vsat qui sont telles que :

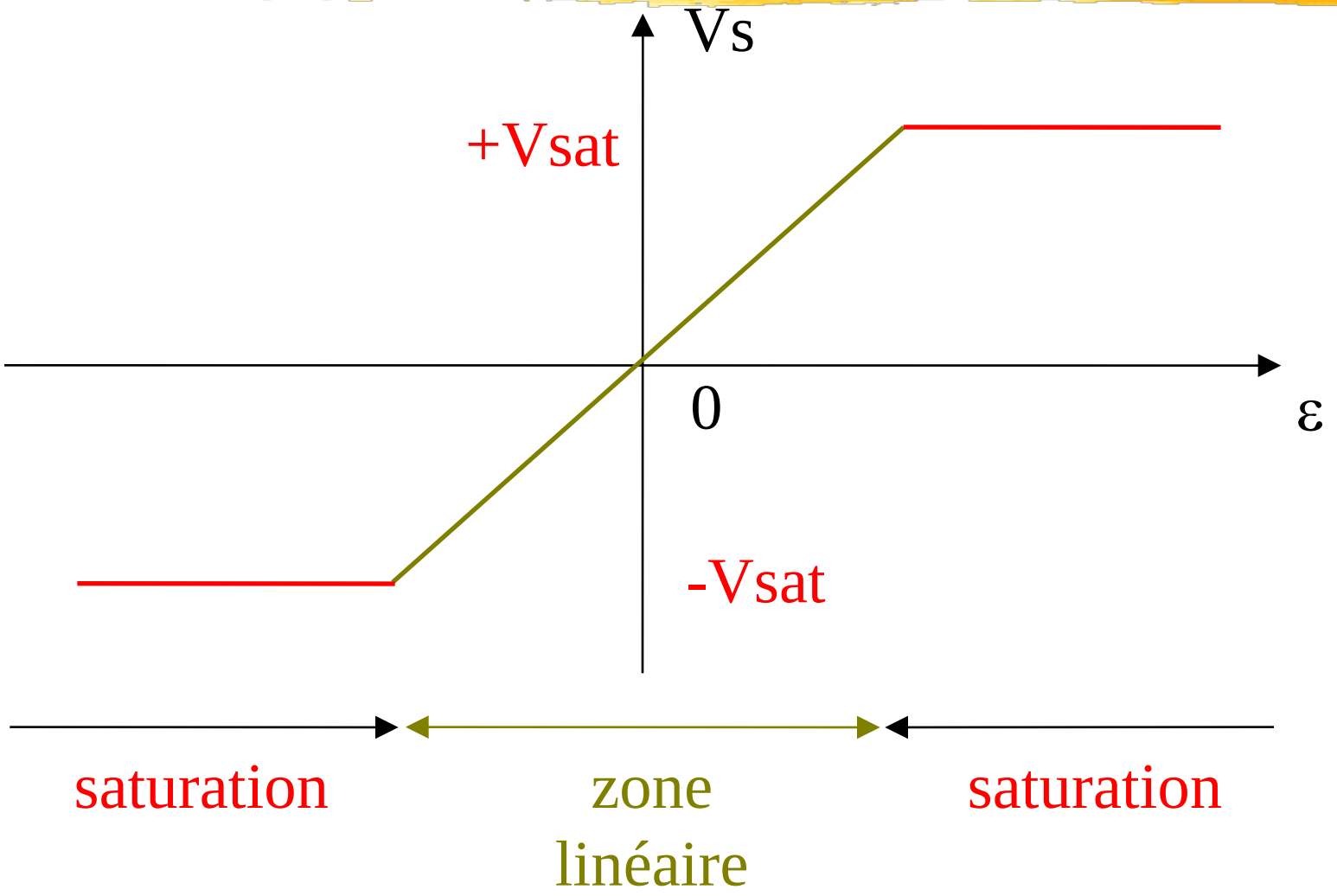
•$+V_{sat} = V_+ - \delta_+$

•$-V_{sat} = V_- + \delta_-$

•<u>Remarque</u> : pour les AOP classiques $\delta_+ = \delta_- = 2$ volts environ.

•Ces tensions maximales sont les tensions de saturation de l'AOP. Dans cet état de tension Vs n'évolue plus, la tension de sortie est indépendante de la tension d'entrée, on dit que l'AOP est ***saturé***.

Régimes de fonctionnement (2):



4. L 'AOP en régime linéaire:

Fonctionnement en régime linéaire (1):

- Si l'AOP fonctionne en régime linéaire, la tension de sortie doit être inférieure à Vsat ce qui suppose que l'on ait :

  - $\varepsilon < Vsat / A$

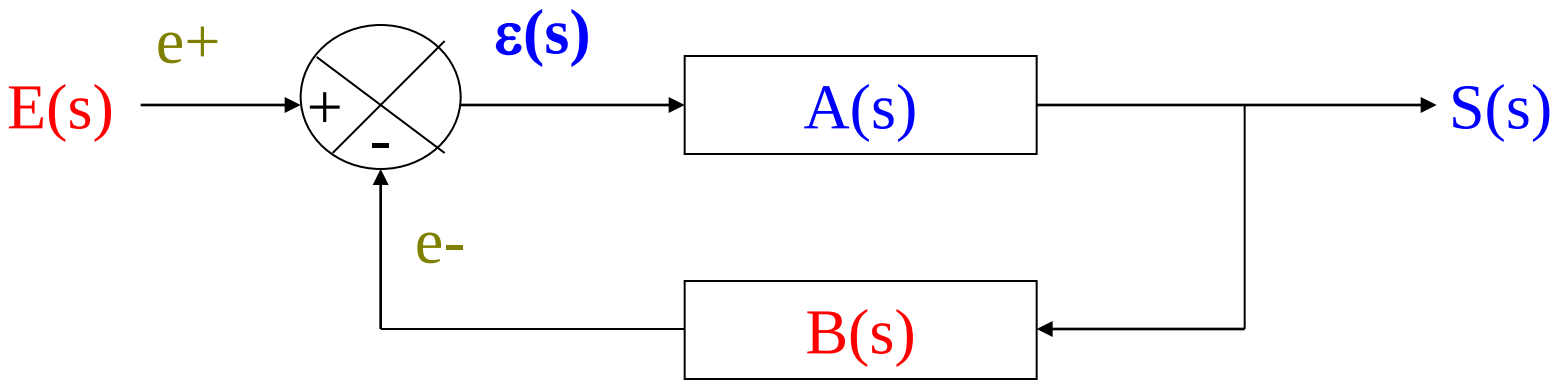
- <u>A. N</u>. : TL081 :

  - $Vsat = 14V$, $A = 2.10^5$ ==> $\varepsilon < 70\mu V$!!!

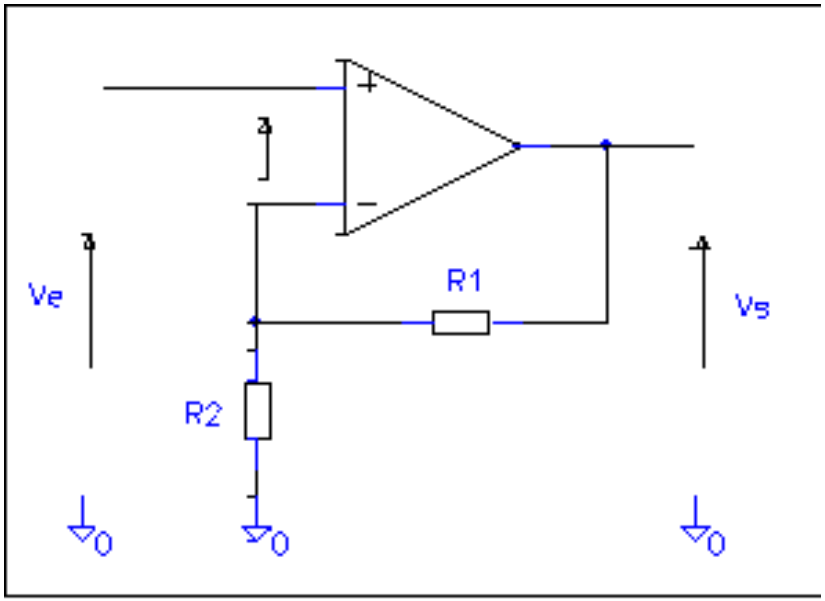
Fonctionnement en régime linéaire (2):

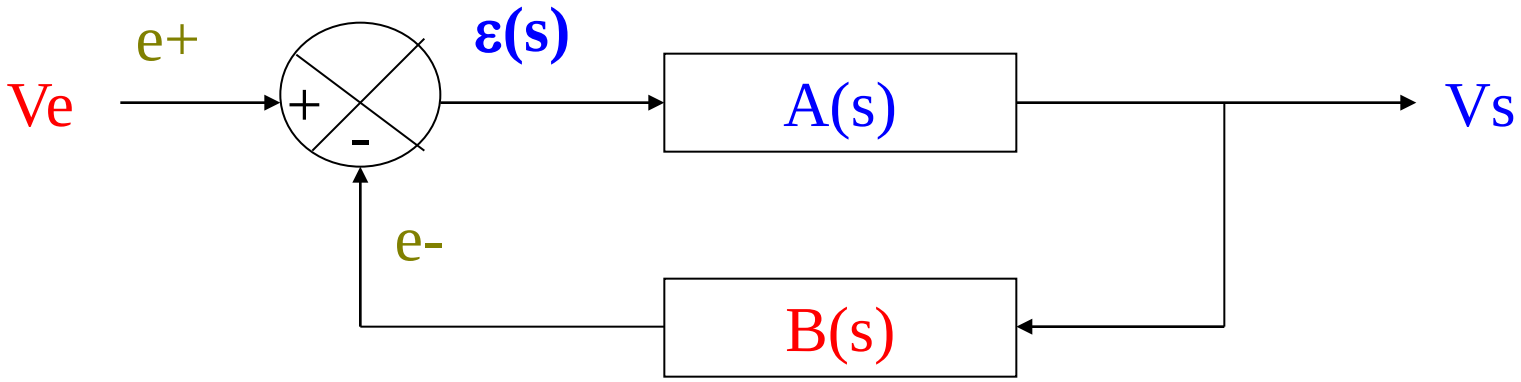
•Dans la pratique, tout système électronique génère des tensions parasites, le bruit, qui la plupart du temps, ont des amplitudes du même ordre de grandeur que la tension différentielle maximale admissible en régime linéaire.

•Ceci signifie que l'AOP a une amplification trop importante pour être utilisé tel quel : il faut lui appliquer une ***contre-réaction***.



Fonctionnement en régime linéaire: Exemple (1):





Fonctionnement en régime linéaire: Mise en équations: Vs = f (Ve) (1):

Fonctionnement en régime linéaire: Mise en équations: Vs = f (Ve) (2):

Fonctionnement en régime linéaire: Mise en équations: Vs = f (Ve) (3):

5. Etude des schémas de base:

AOP idéalisé ou parfait (1):

•Dans les domaines classiques d'utilisation, l'AOP peut être idéalisé, sans conséquence grave. On prendra alors :

- r_{ed} --> ∞
- r_s --> 0
- A --> ∞

•Par voie de conséquence les courants d'entrée deviennent négligeables : $i- = i+ = 0$

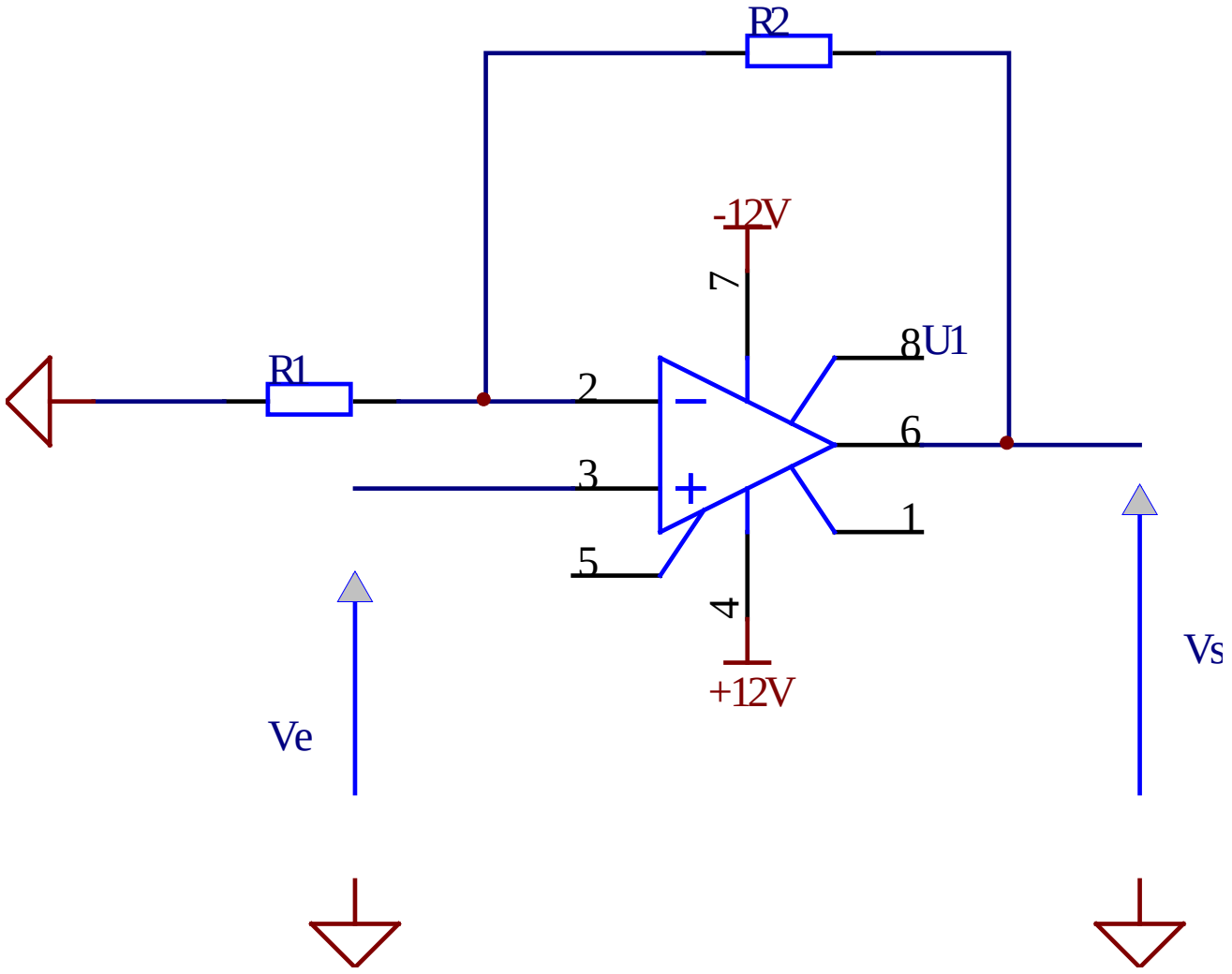
AOP idéalisé ou parfait (2):

•Dans l'étude des montages linéaires, on pourra toujours appliquer les deux méthodes suivantes :

- ❑ méthode des schémas-blocs : un AOP contre-réactionné est un système asservi linéaire.

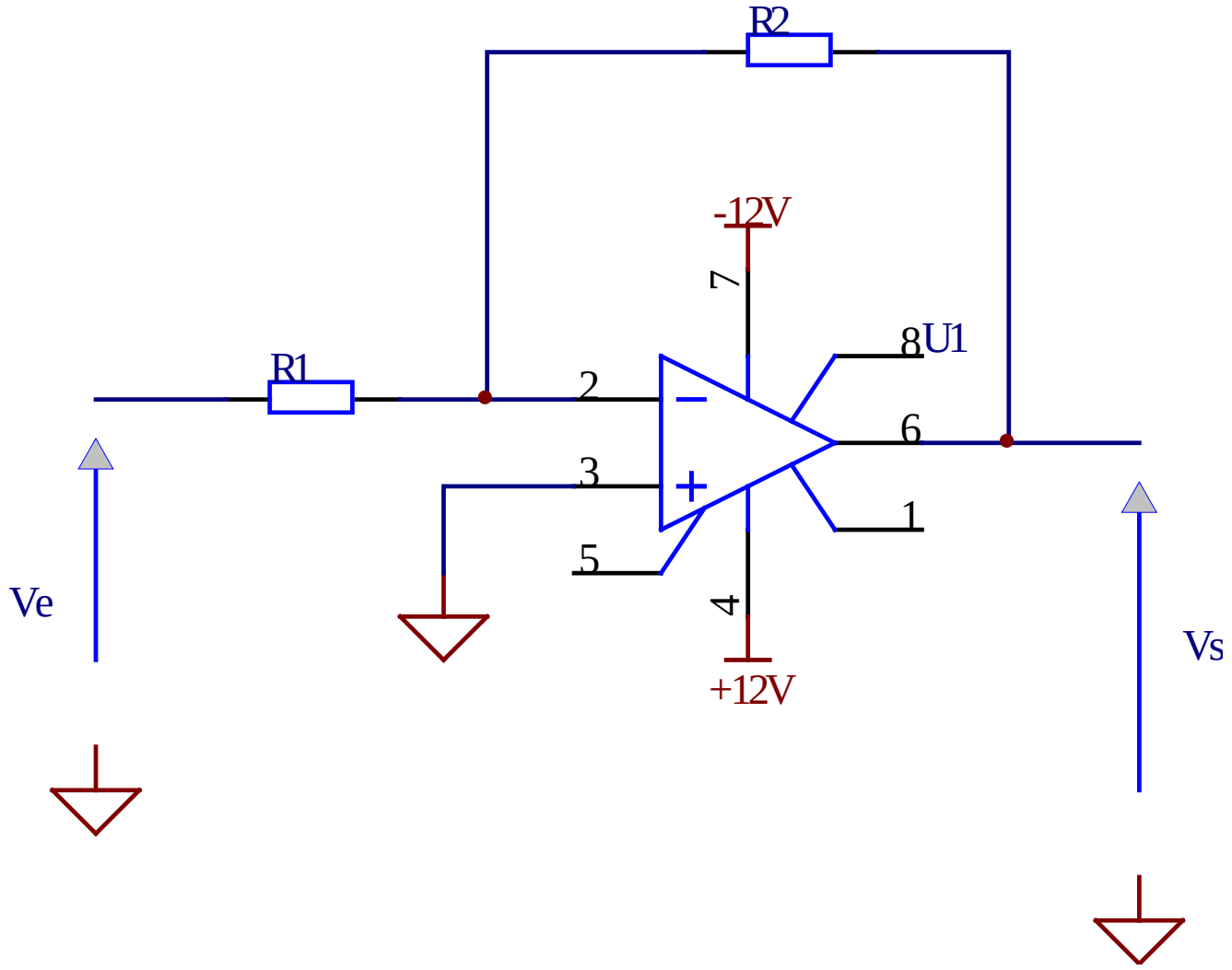
- ❑ méthode de la loi d'Ohm : on détermine l'expression de e+, puis celle de e-, puis on fait e- = e+ sachant qu'à la mise sous tension du système, la sortie évolue de manière à sensiblement égaler e- à e+.

Montage non-inverseur (1):



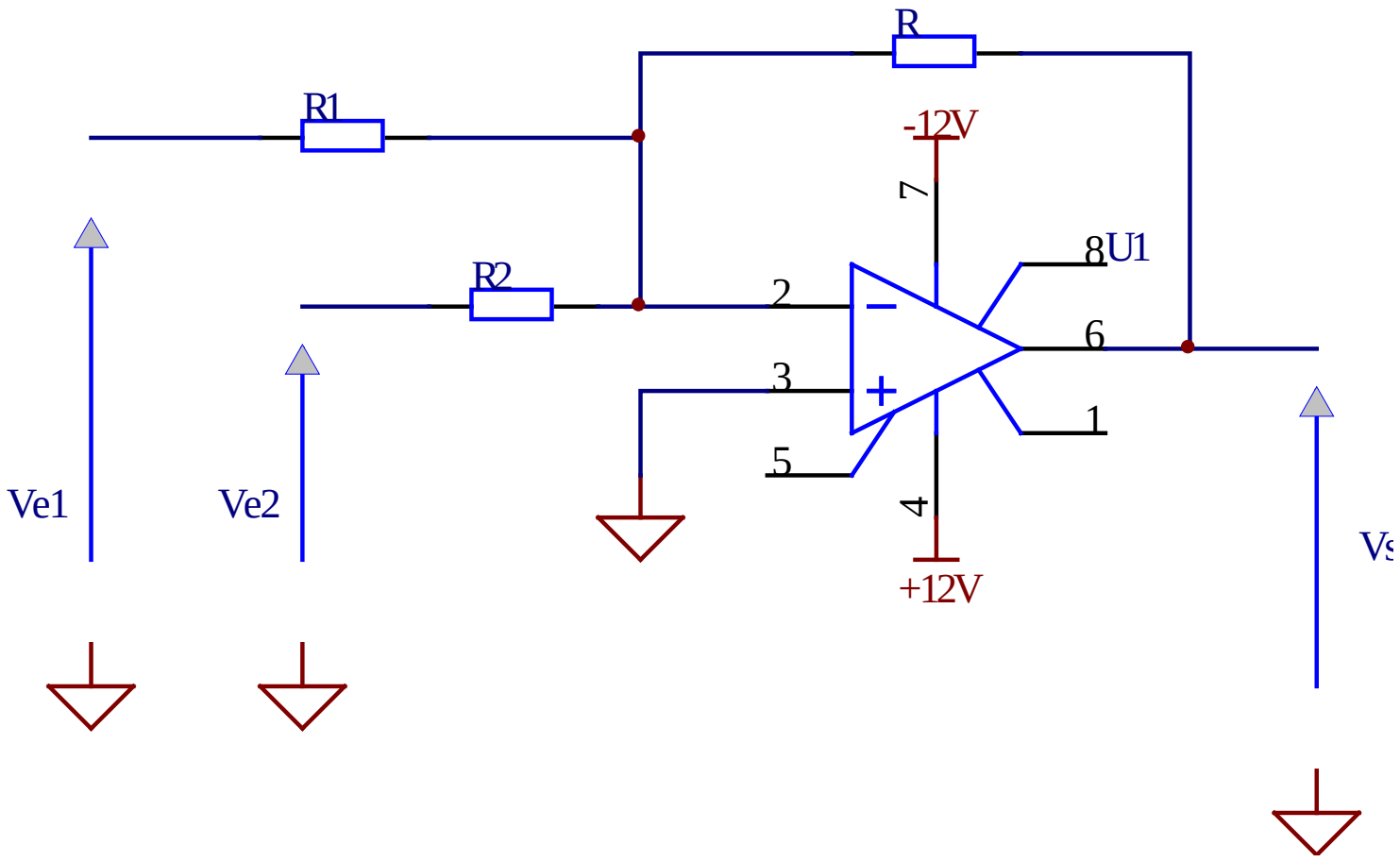
Montage non-inverseur (2):

Montage inverseur (1):



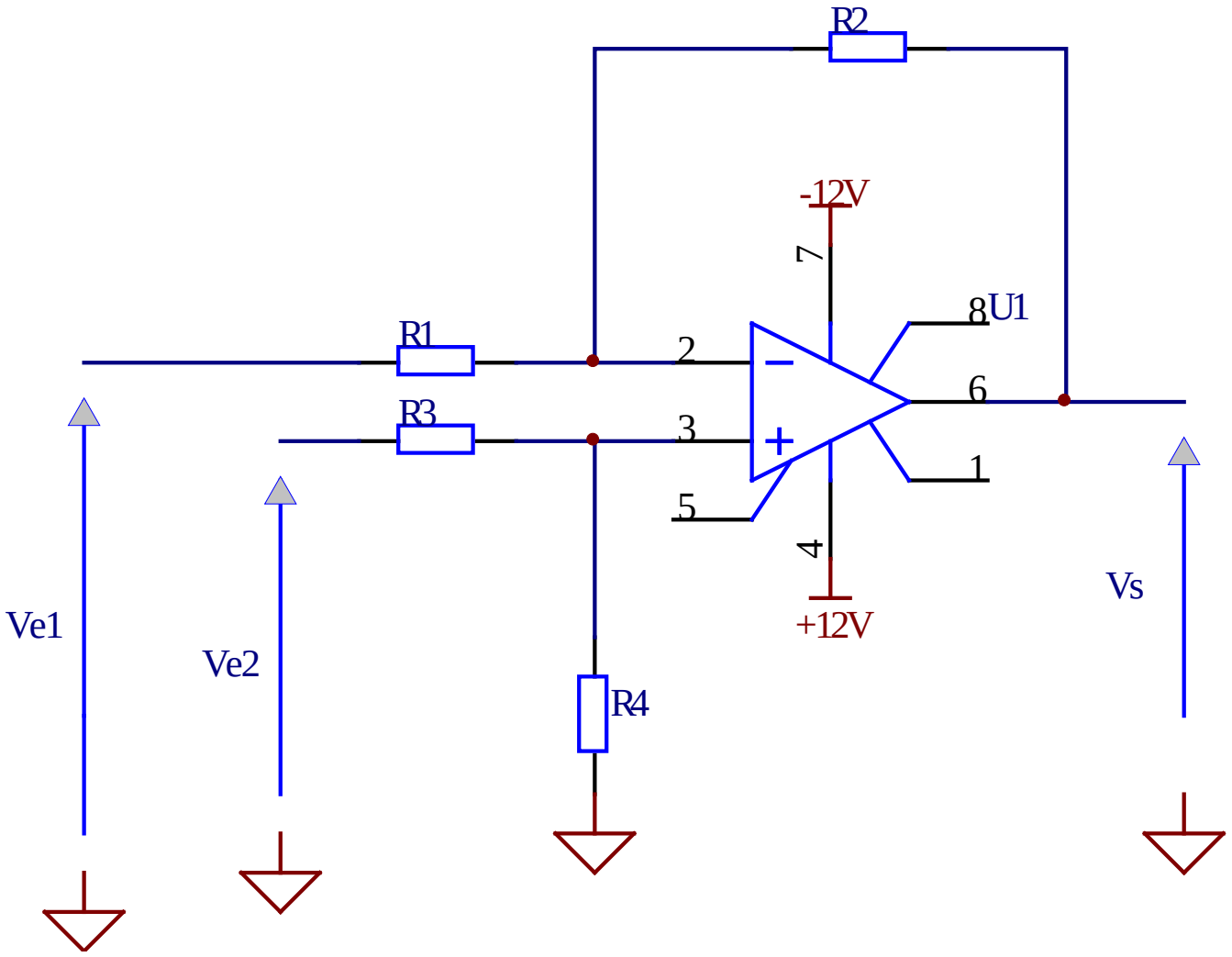
Montage inverseur (2):

Montage additionneur-inverseur (1):



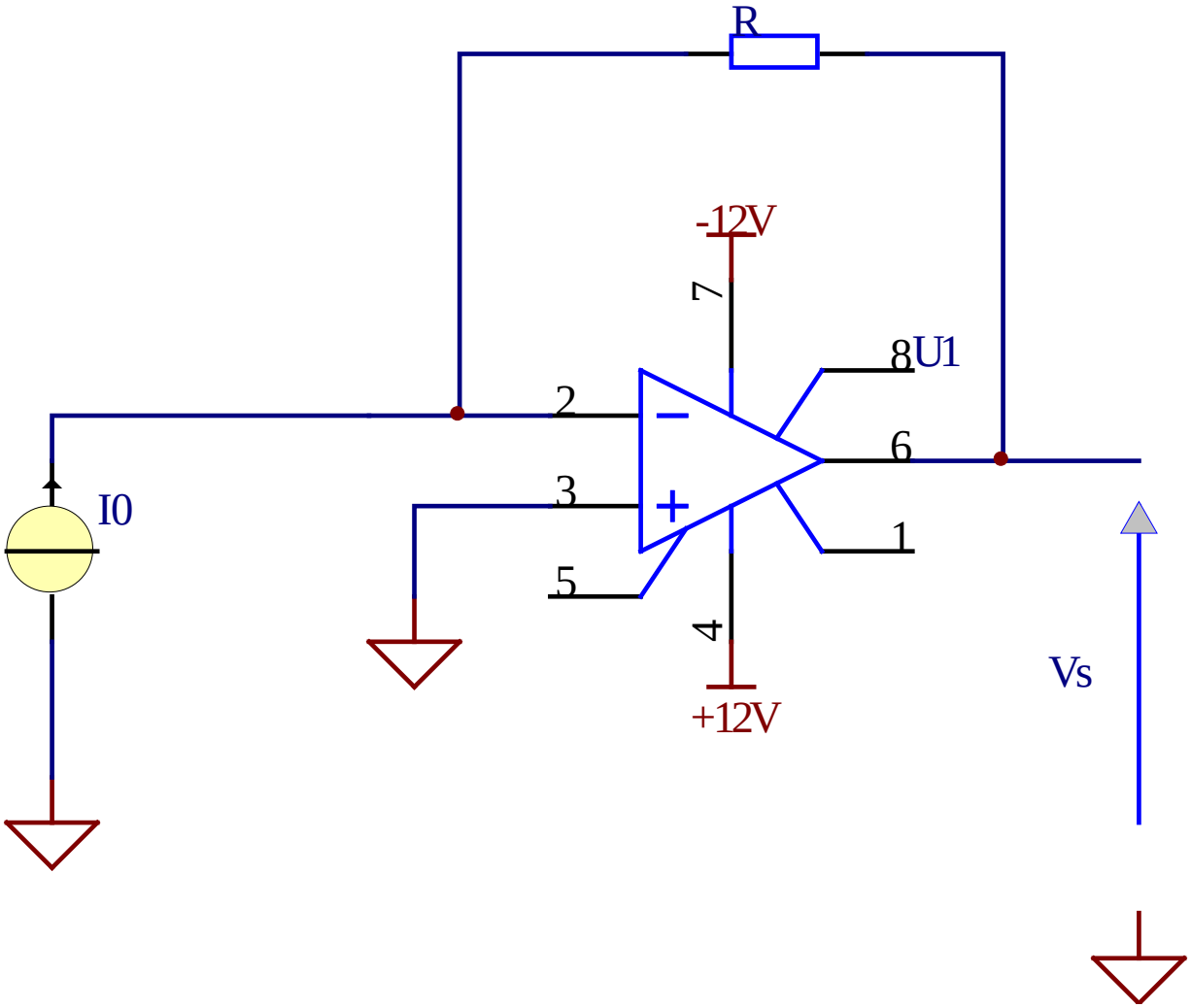
Montage additionneur-inverseur (2):

Montage soustracteur (1):



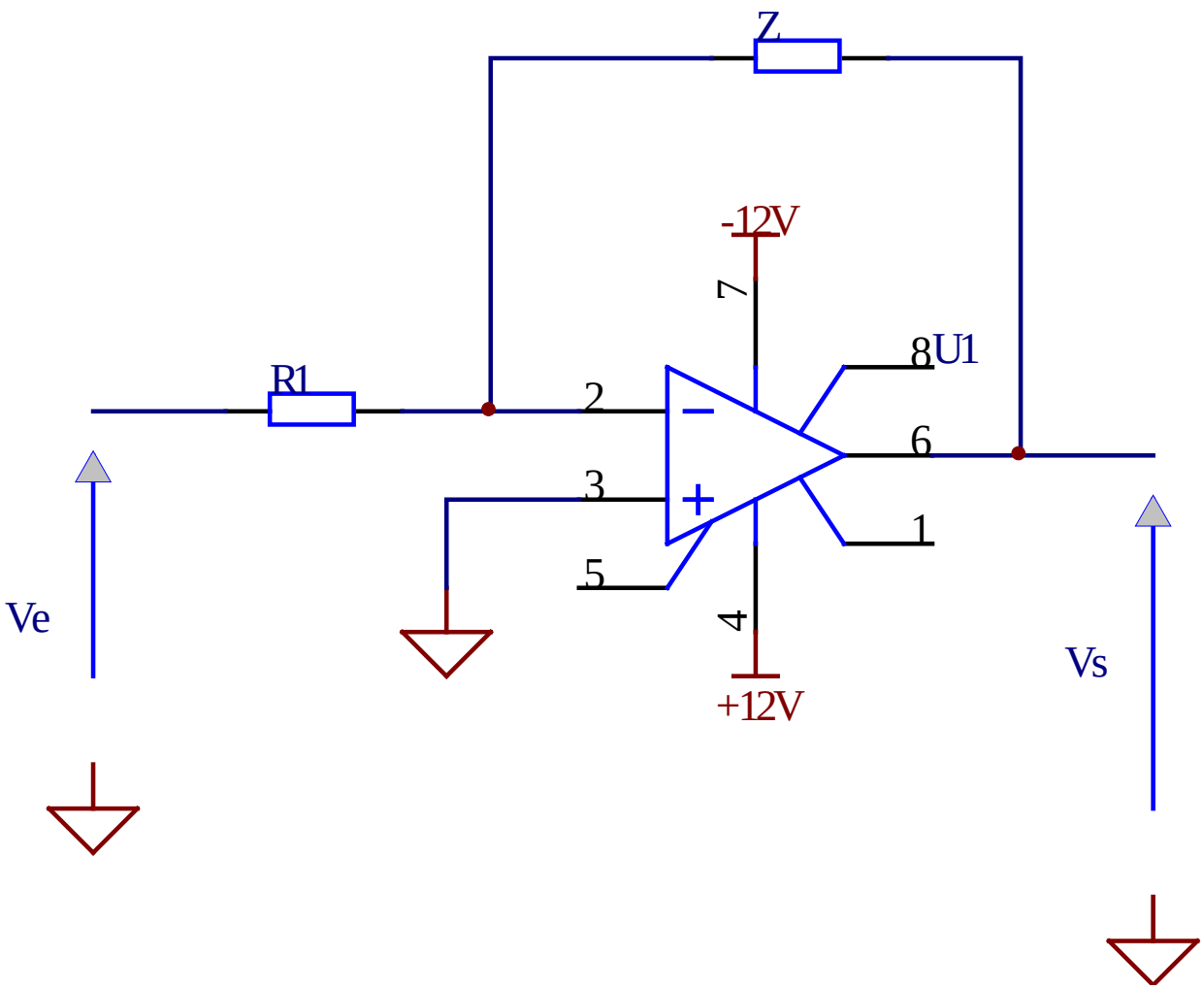
Montage soustracteur (2):

Convertisseur courant-tension (1):



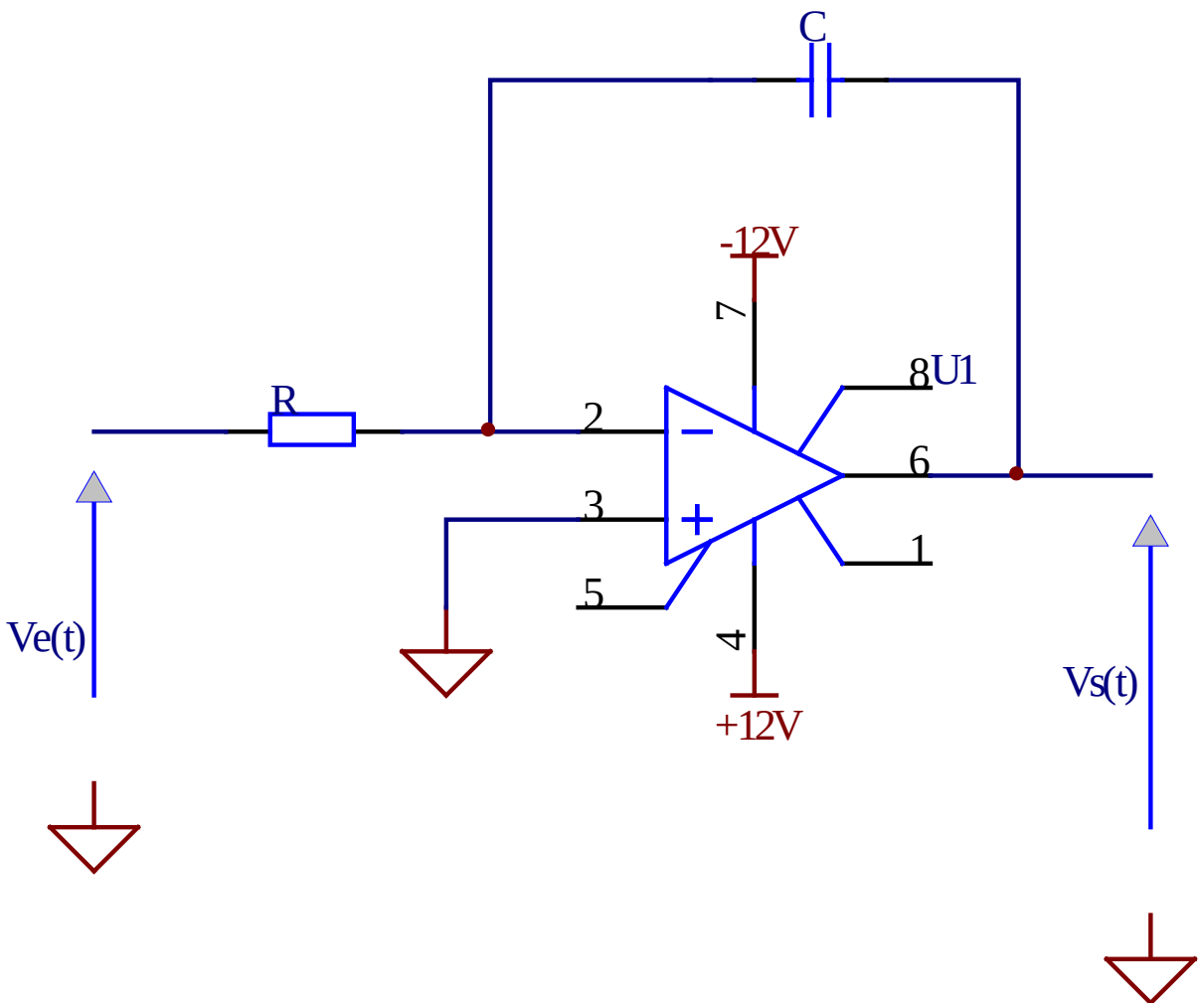
Convertisseur courant-tension (2):

Montage tension-courant (1):



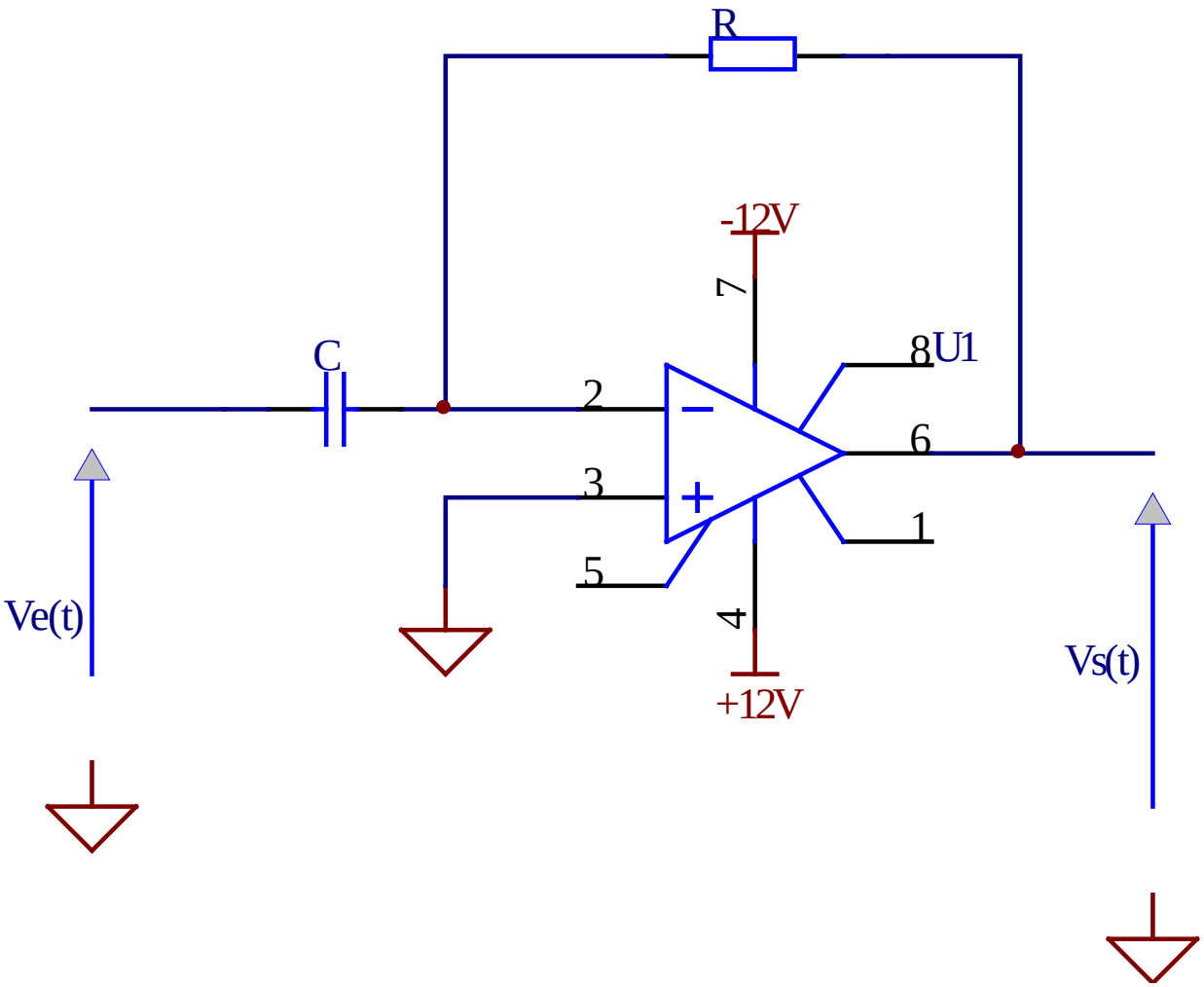
Montage tension-courant (2):

Montage intégrateur (1):



Montage intégrateur (2):

Montage dérivateur (1):



Montage dérivateur (2):

Le convertisseur d ’impédance négative (NIC) : Généralités:

•Un NIC est un quadripôle qui présente sur une paire de bornes une impédance égale à celle disposée sur son autre paire de bornes multipliée par une constante négative.

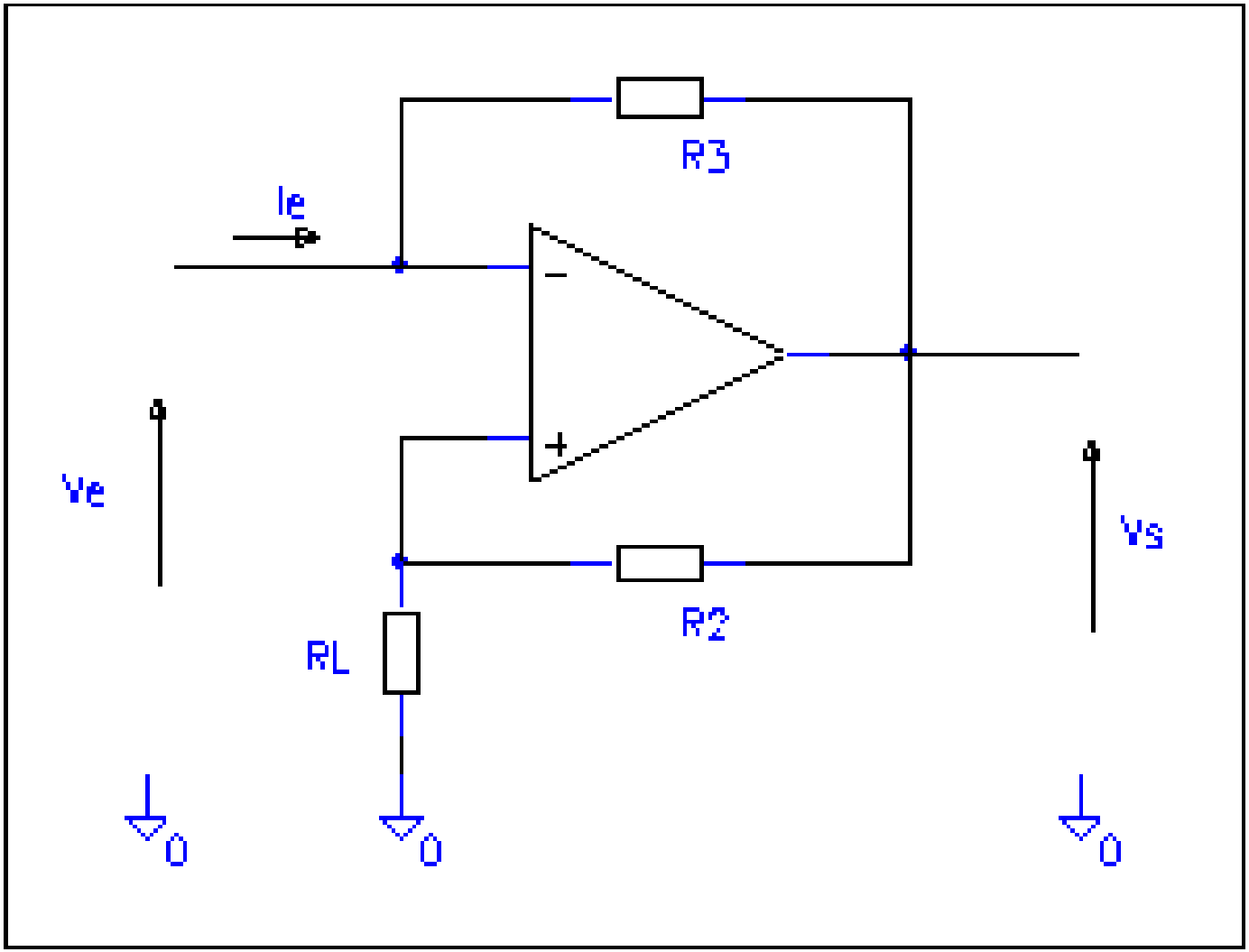
•Soit Ze l’impédance vue de l’entrée, Zs étant l’impédance de charge, on a :

$$\bullet Ze = -K.Zs \qquad K > 0$$

•Si Zg est l’impédance du générateur, l’impédance vue de la sortie est :

$$\bullet Z_L = -Zg/K \qquad K > 0$$

Le convertisseur d ’impédance négative (NIC) : Montage avec un AOP (1):

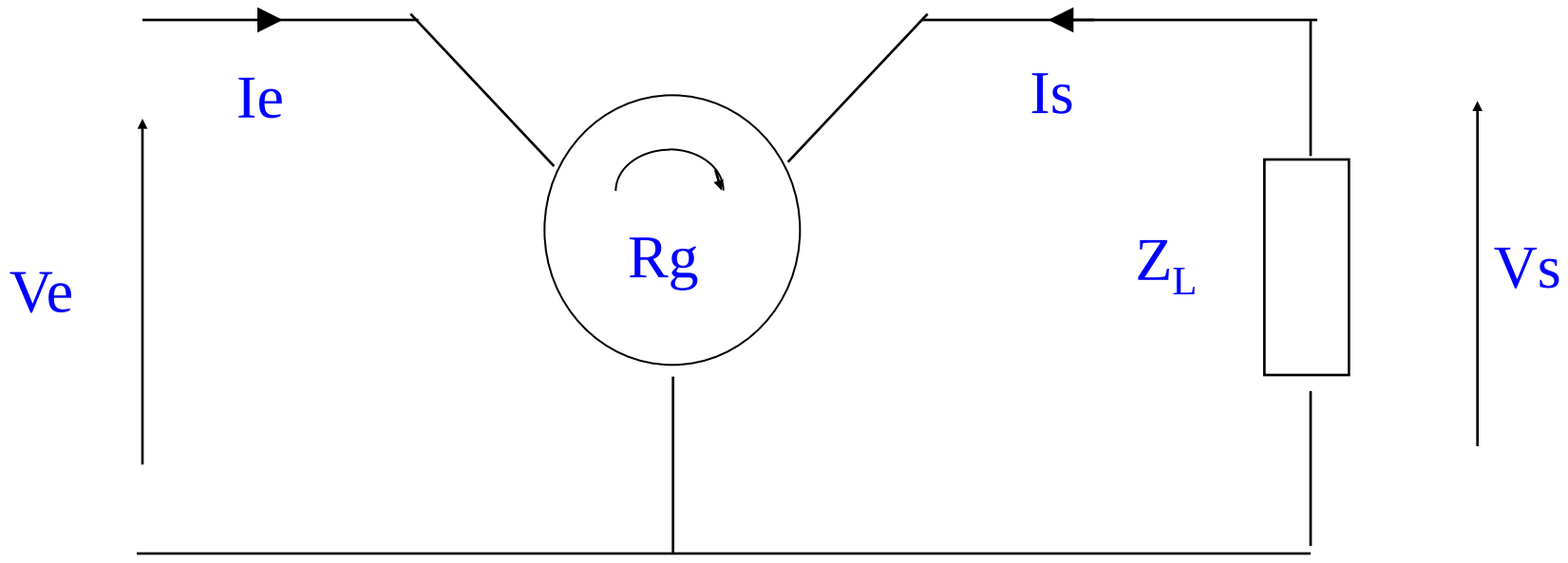


Le convertisseur d ’impédance négative (NIC) : Montage avec un AOP (2):

Le convertisseur d ’impédance négative (NIC) : Montage avec un AOP (3):

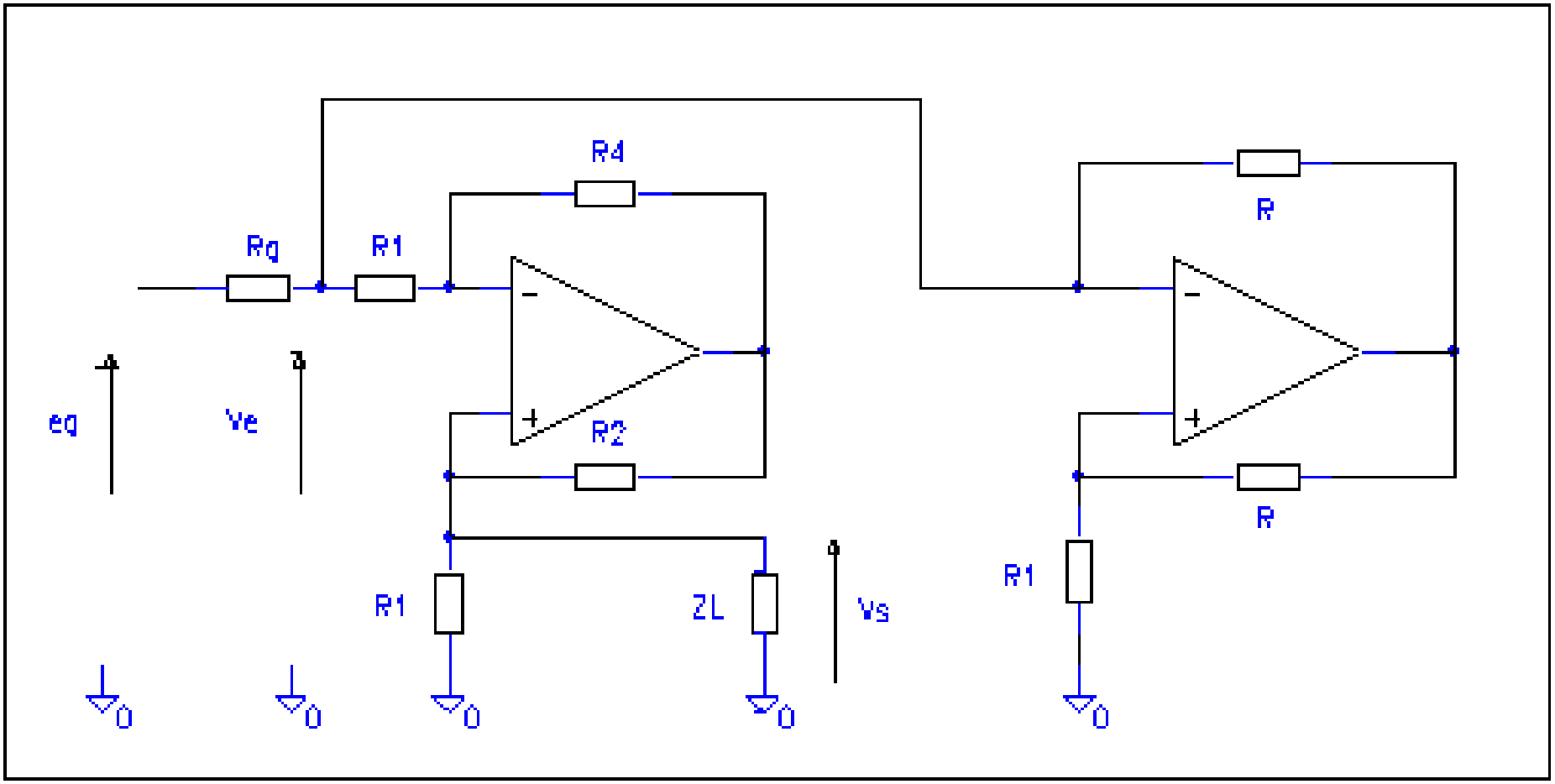
Le gyrateur: Définition (1):

•En basse fréquence, le gyrateur est un quadripôle actif qui présente sur une paire de bornes une impédance proportionnelle à l'inverse de l'impédance qui existe sur l'autre entrée.



Le gyrateur: Définition (2):

Le gyrateur: Montage avec AOPs (1):



Le gyrateur: Montage avec AOPs (2):

Le gyrateur: Montage avec AOPs (3):

Le gyrateur: Montage avec AOPs (1):

- On a:

$$\frac{Ve}{Ie} = \frac{R1^2}{Z_L}$$

$$\frac{Vs}{Is} = \frac{R1^2}{Rg}$$

6. L 'AOP en régime non linéaire:

Les comparateurs (1):

•Ce sont des montages où la sortie est toujours saturée et égale à ± Vsat.

•Deux types peuvent être rencontrés :

- ❑ les comparateurs simples, ne présentant ni contre-réaction ni réaction,

- ❑ les comparateurs à hystérésis ou trigger de Schmitt pourvus d'une réaction.

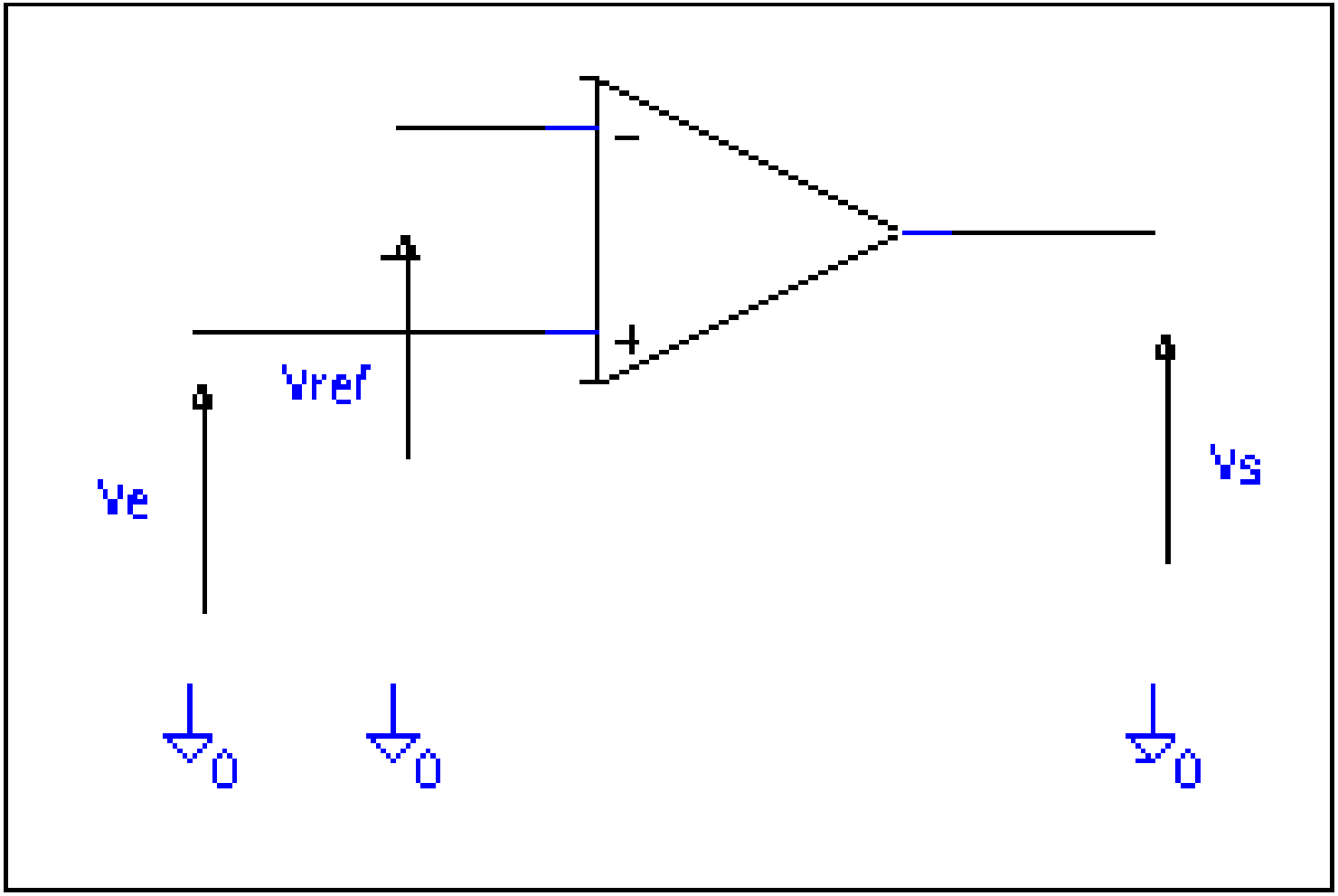
Les comparateurs (2):

•Leur étude se fait en deux étapes :

☞ représentation sur le même système d'axes de e+ et e- , leur point de rencontre correspond au changement de signe de la tension différentielle d'entrée ε = e+ - e-, donc au changement de l'état de saturation de la sortie,

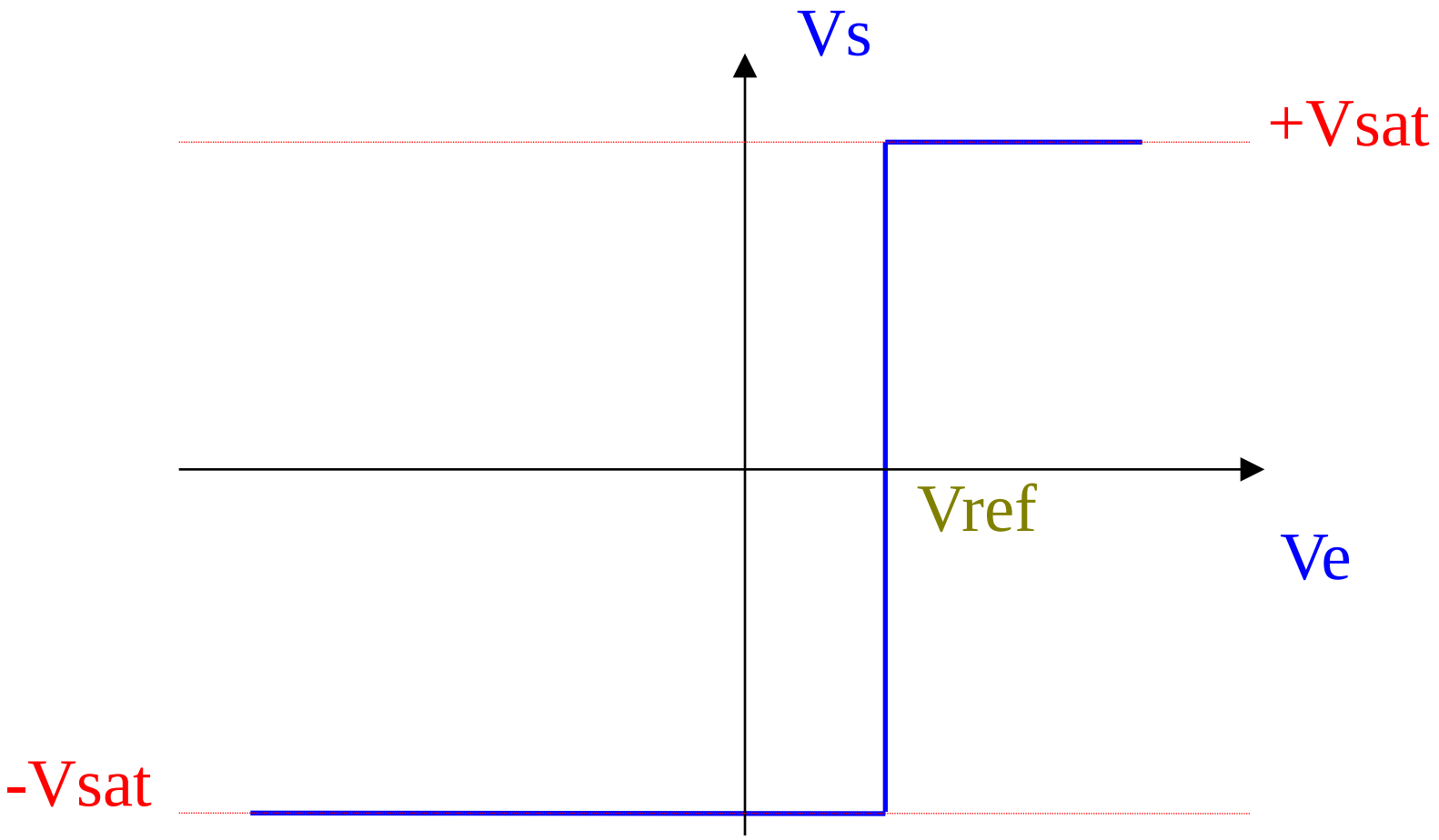
☞ représentation de la sortie à partir des considérations précédentes.

Les comparateurs Simples: Schéma:

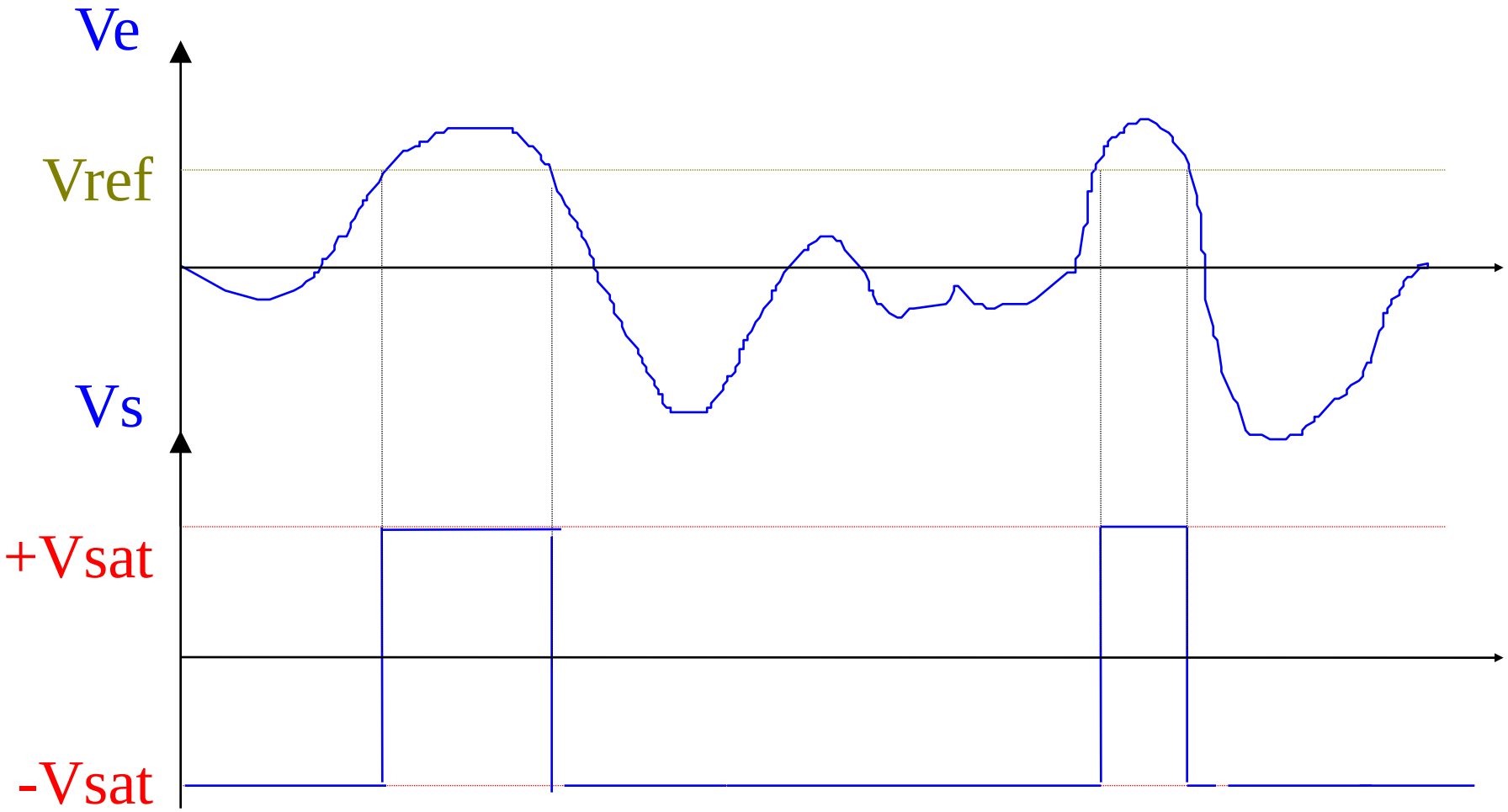


Les comparateurs Simples: Equations:

Les comparateurs Simples: Vs=f(Ve):



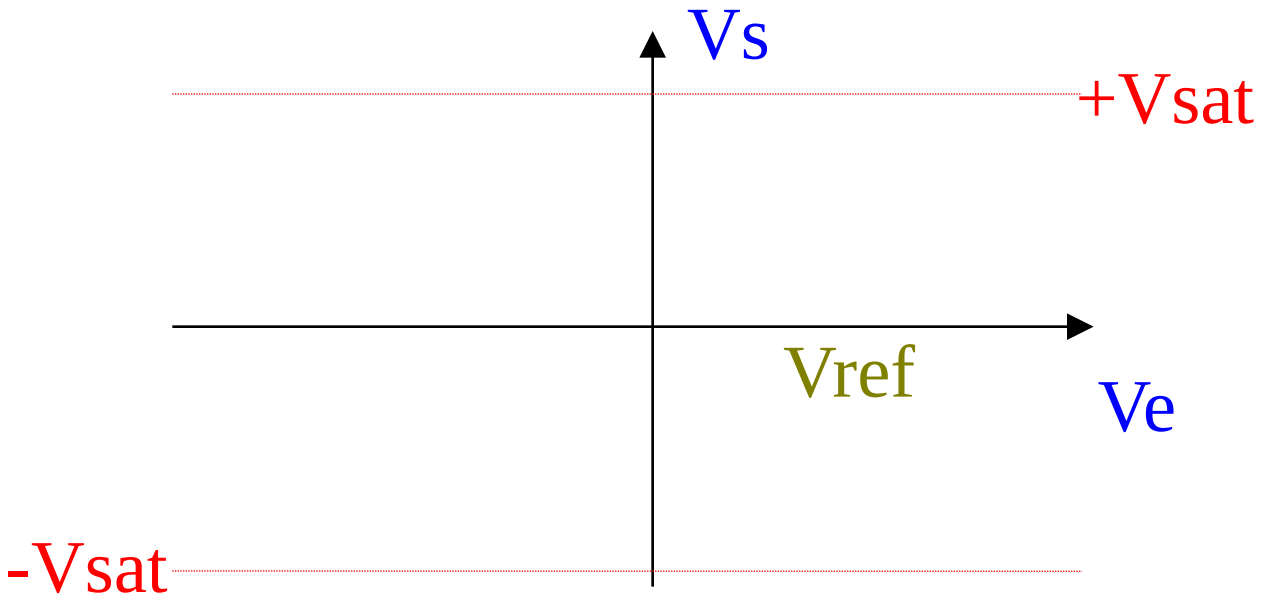
Les comparateurs Simples: Exemple avec un signal d 'entrée quelconque:



Les comparateurs Simples: Remarque:

•Dans l'exemple précédent, le signal d'entrée est appliqué sur l'entrée (+) et la référence sur l'entrée (-).

•Rien n'empêche de faire l'inverse ou même d'appliquer un signal variable sur chaque entrée de l'AOP.



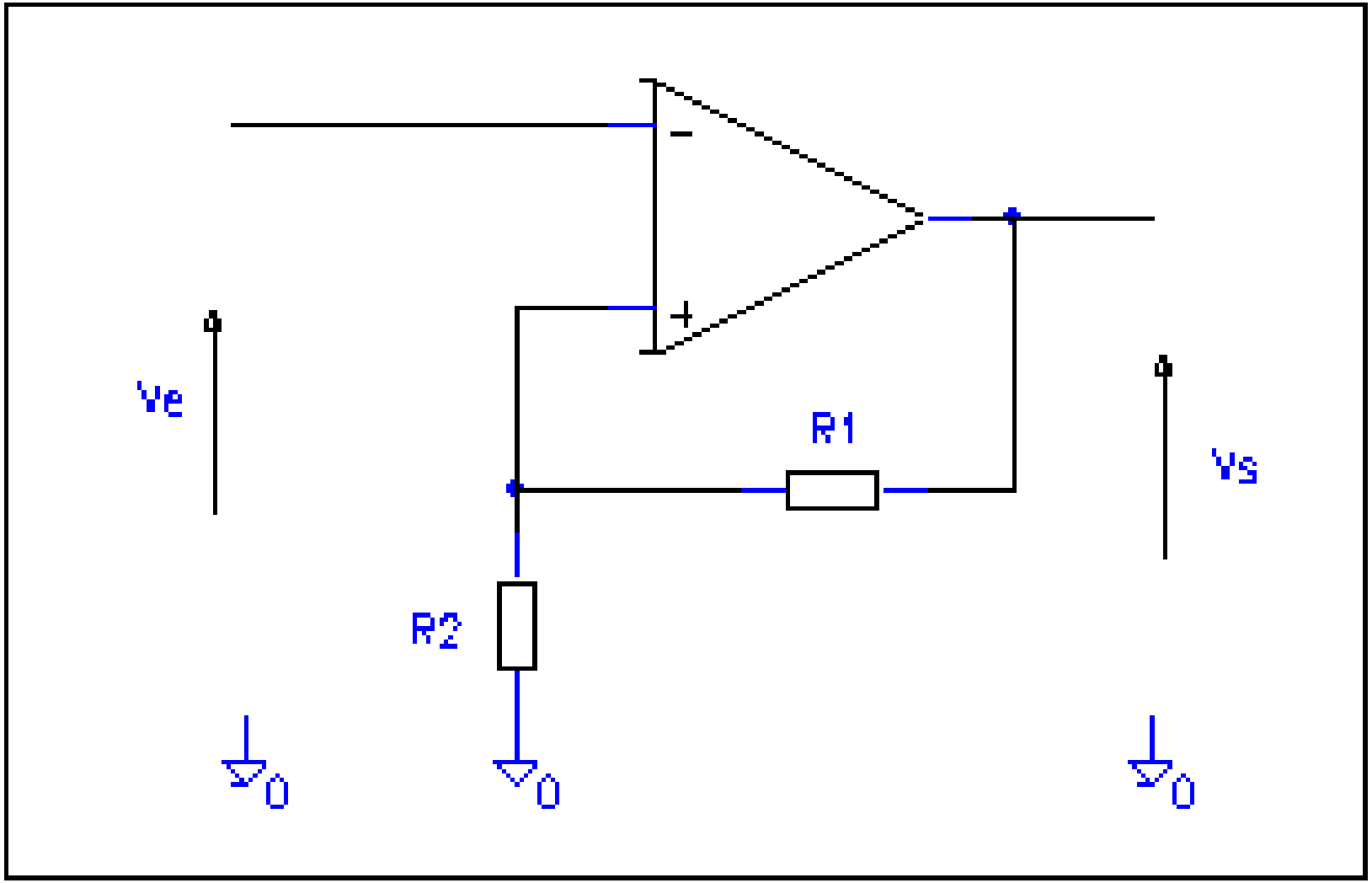
Les comparateurs à hystérésis ou triggers de Schmitt:

Deux montages sont utilisés :

- le comparateur négatif où le signal d'entrée est appliqué sur l'entrée (-),

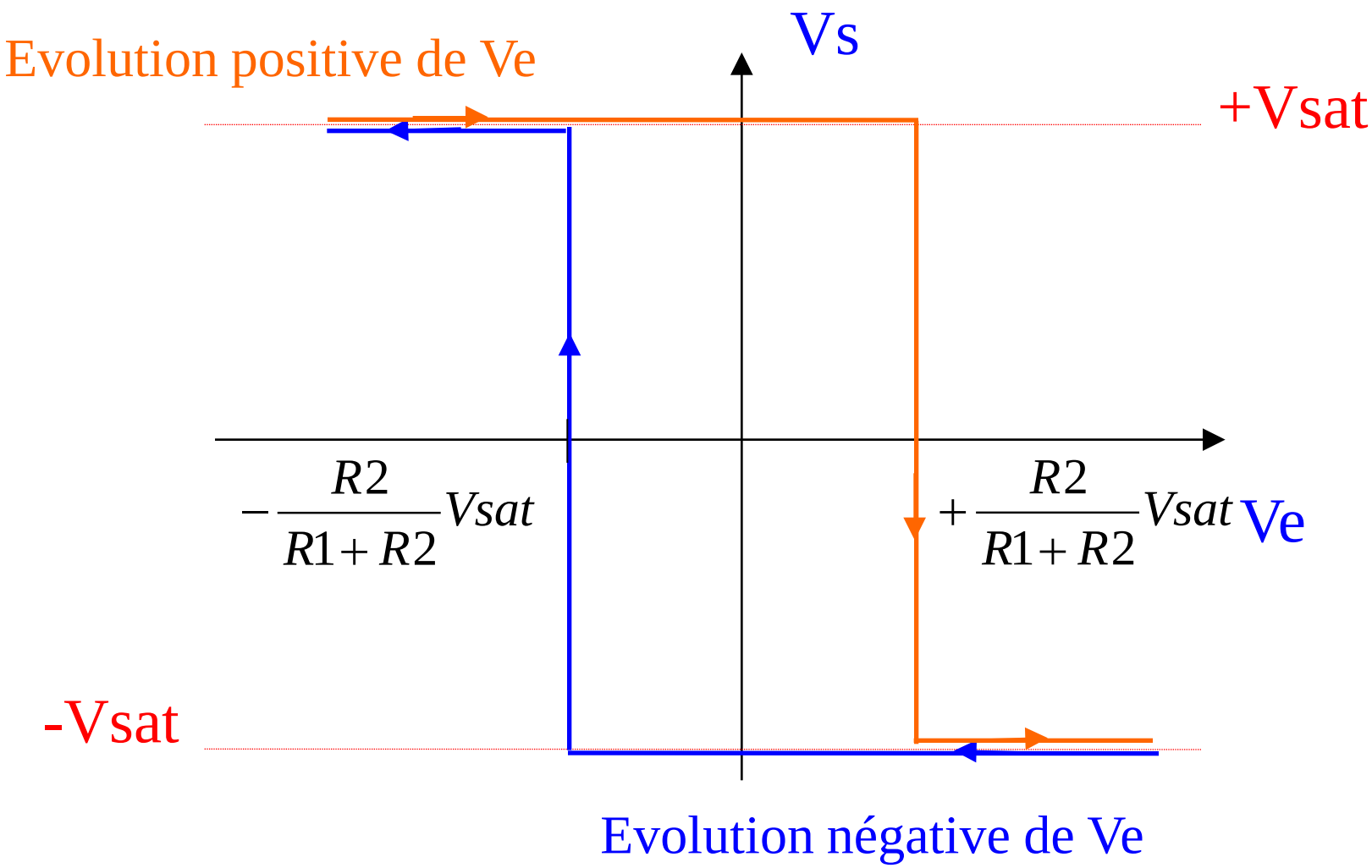
- le comparateur positif où le signal d'entrée est appliqué sur l'entrée (+).

Le comparateur négatif: Schéma:

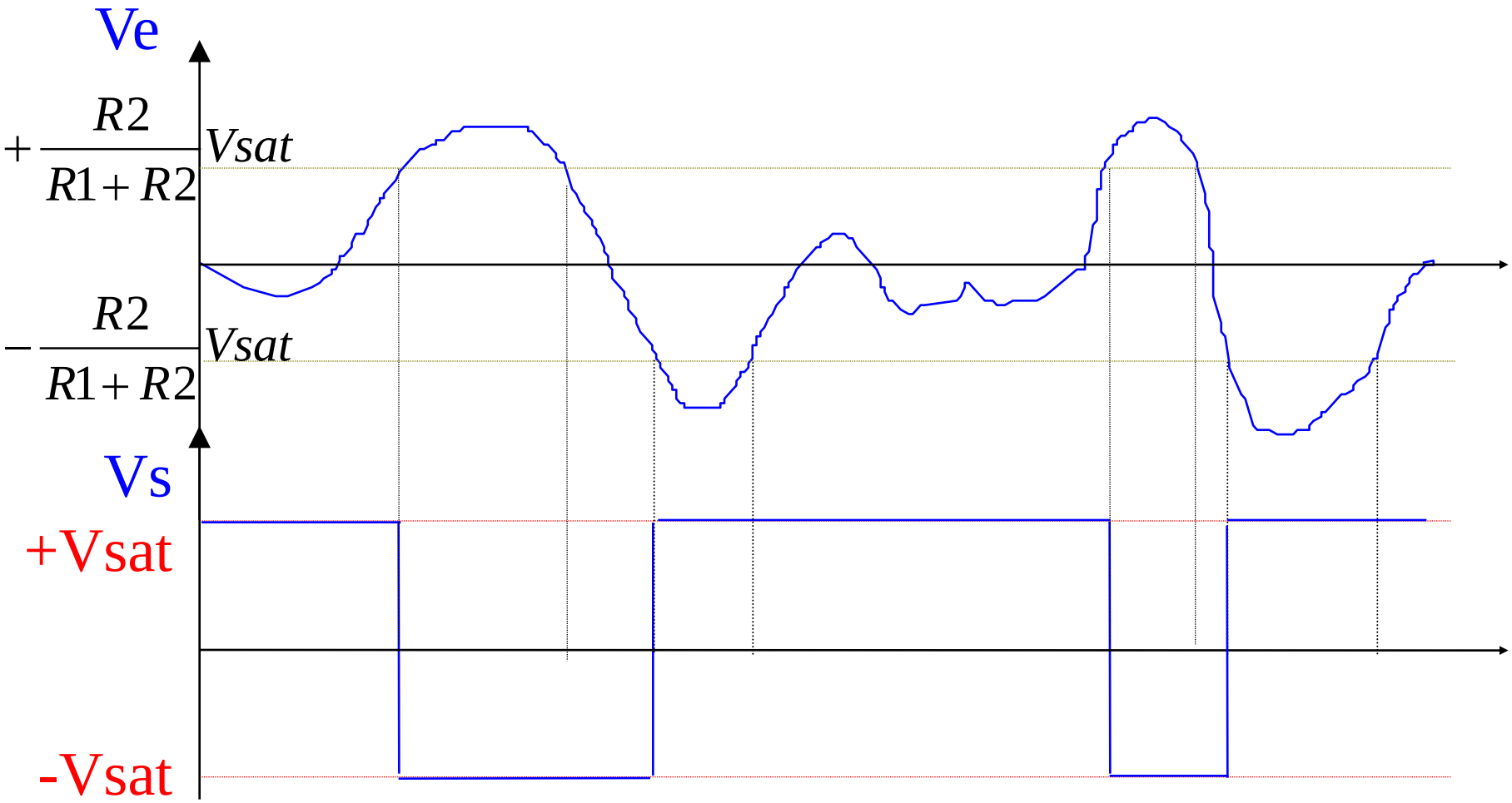


Le comparateur négatif: Equations:

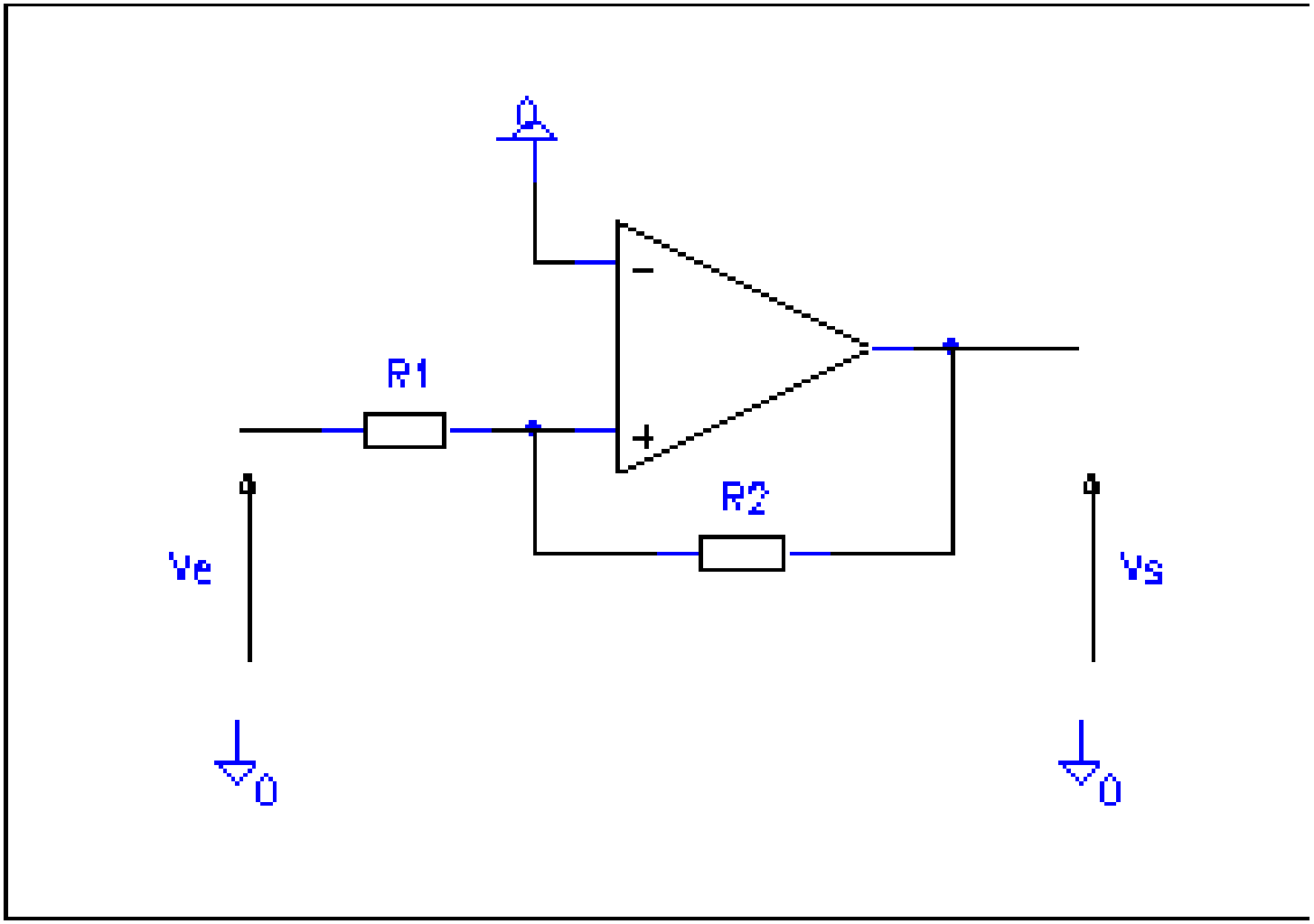
Le comparateur négatif: Vs=f(Ve):



Le comparateur négatif: Exemple avec un signal d 'entrée quelconque:

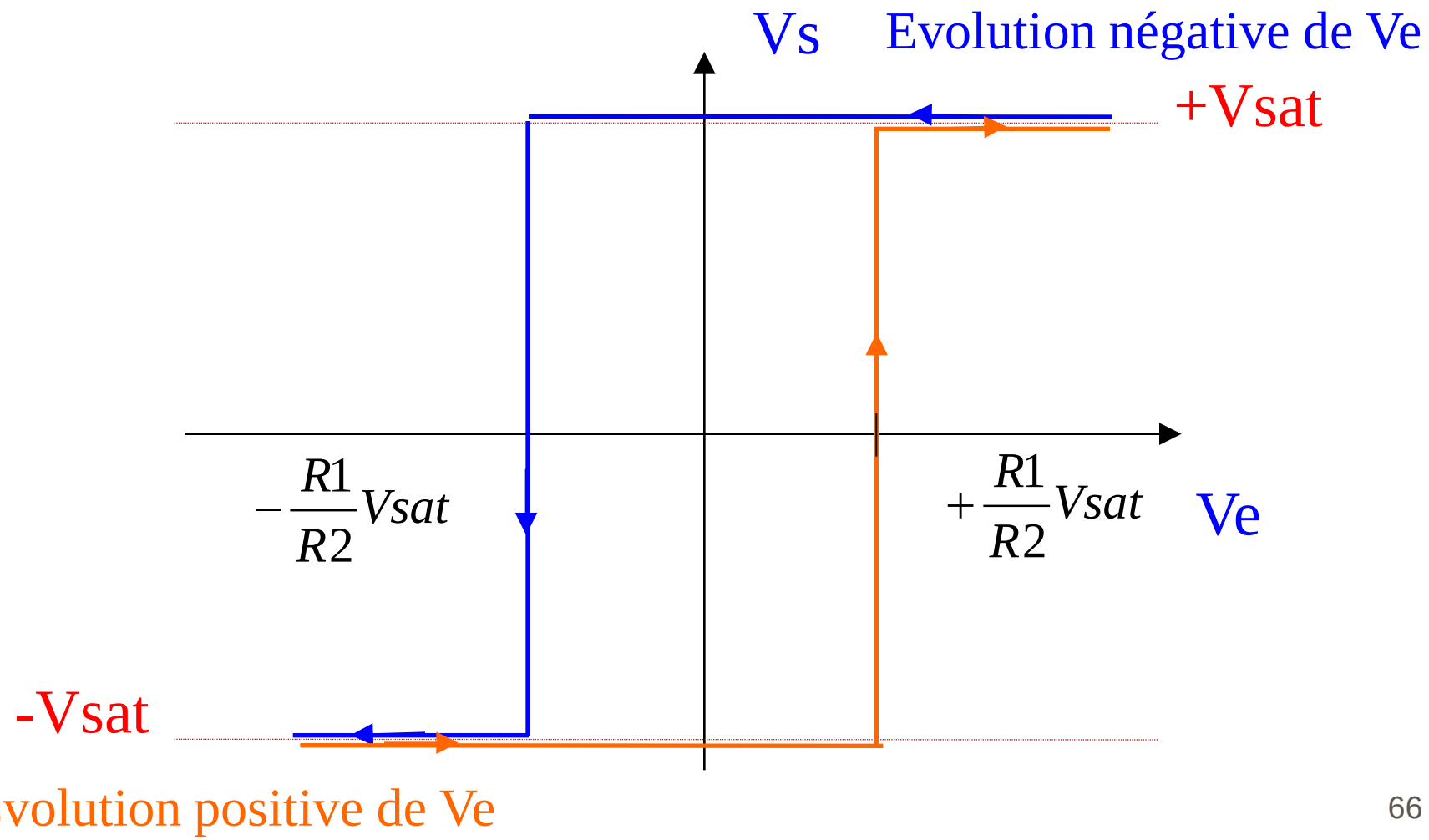


Le comparateur positif: Schéma:

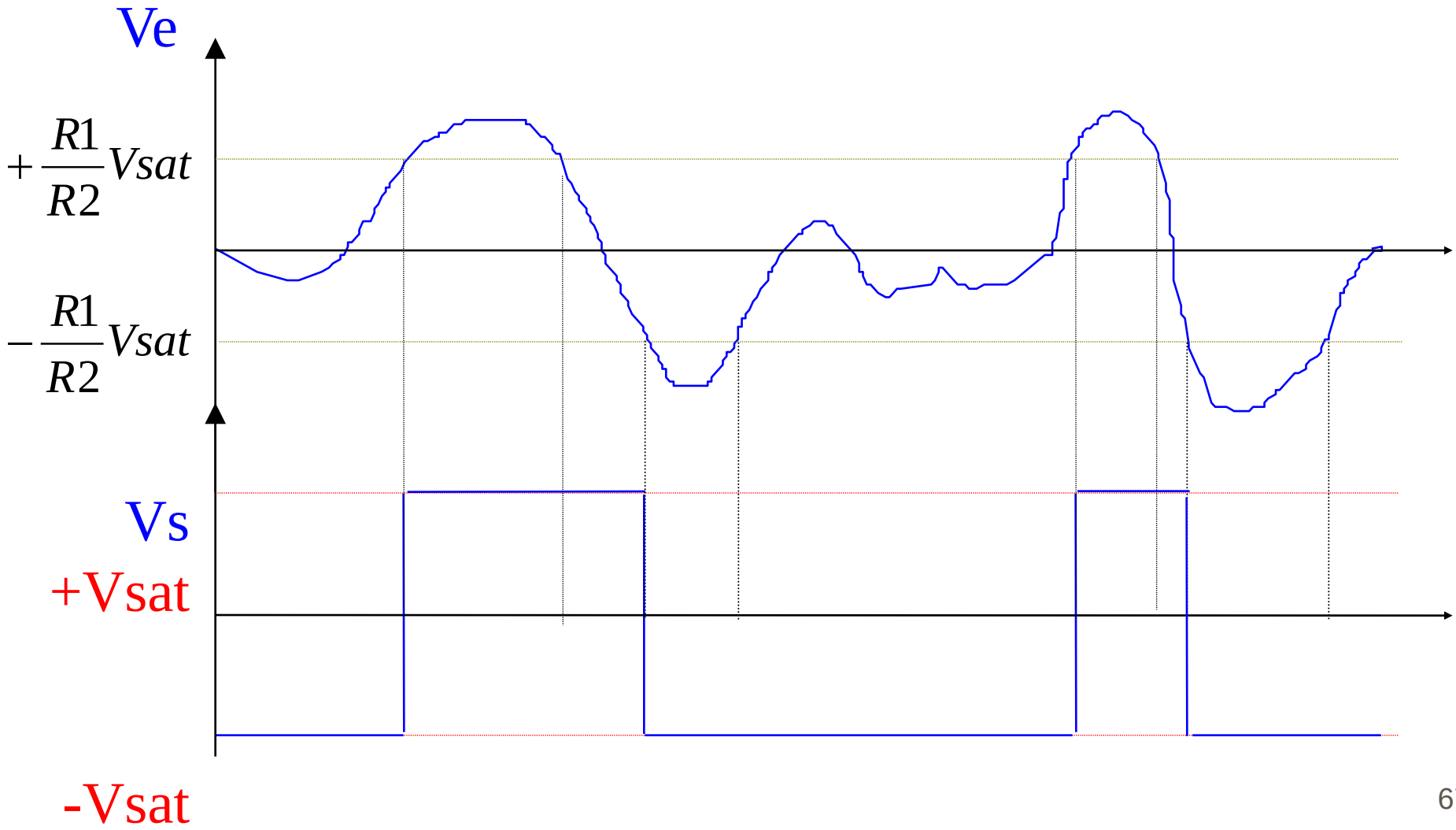


Le comparateur positif: Equations:

Le comparateur positif: Vs=f(Ve):



Le comparateur négatif: Exemple avec un signal d 'entrée quelconque:



Champ d 'application des comparateurs (1):

- Il est très vaste :

- *Comparateurs simples* :

  - fourniture d'un signal numérique à partir de signaux analogiques " rapides " d'entrée,

  - commande de relais dynamiques ou statiques (transistors en commutation),

  - génération de signaux MLI

Champ d 'application des comparateurs (2):

•*Comparateurs à hystérésis ou triggers :*

•fourniture d'un signal numérique à partir de signaux analogiques " lents " d'entrée.

•éléments de générateurs de fonction,

•éléments de régulation en " tout ou rien ".

•<u>Remarque</u> : les comparateurs travaillant en commutation imposent l'utilisation d'AOP rapides (circuits spécialisés).

7. L 'AOP réel:

L ’AOP réel:

•Jusqu'à présent, nous avons considéré l’AOP comme un amplificateur de tension parfait.

•En réalité, l’AOP réel même s’il possède d’excellentes caractéristiques, présente un certain nombre de défauts dont il faut tenir compte et que nous allons présenter ci-après.

•Partons, pour illustrer notre propos, de la fiche de caractéristiques de l’AOP μA741.

•Nous retrouvons dans les paramètres électriques donnés par le constructeur l’ensemble des défauts du composant.

•Ces défauts sont généralement classés selon trois catégories...

electrical characteristics at specified free-air temperature, $V_{CC\pm}$ = ±15 V (unless otherwise noted)

PARAMETER		TEST CONDITIONS	T_A†	μA741C			μA741I, μA741M			UNIT
				MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
V_{IO}	Input offset voltage	V_O = 0	25°C		1	6		1	5	mV
			Full range			7.5			6	
$\Delta V_{IO(adj)}$	Offset voltage adjust range	V_O = 0	25°C		±15			±15		mV
I_{IO}	Input offset current	V_O = 0	25°C		20	200		20	200	nA
			Full range			300			500	
I_{IB}	Input bias current	V_O = 0	25°C		80	500		80	500	nA
			Full range			800			1500	
V_{ICR}	Common-mode input voltage range		25°C	±12	±13		±12	±13		V
			Full range	±12			±12			
V_{OM}	Maximum peak output voltage swing	R_L = 10 kΩ	25°C	±12	±14		±12	±14		V
		R_L ≥ 10 kΩ	Full range	±12			±12			
		R_L = 2 kΩ	25°C	±10	±13		±10	±13		
		R_L ≥ 2 kΩ	Full range	±10			±10			
A_{VD}	Large-signal differential voltage amplification	R_L ≥ 2 kΩ	25°C	20	200		50	200		V/mV
		V_O = ±10 V	Full range	15			25			
r_i	Input resistance		25°C	0.3	2		0.3	2		MΩ
r_o	Output resistance	V_O = 0, See Note 5	25°C		75			75		Ω
C_i	Input capacitance		25°C		1.4			1.4		pF
CMRR	Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = V_{ICR}min$	25°C	70	90		70	90		dB
			Full range	70			70			
k_{SVS}	Supply voltage sensitivity ($\Delta V_{IO}/\Delta V_{CC}$)	V_{CC} = ±9 V to ±15 V	25°C		30	150		30	150	μV/V
			Full range			150			150	
I_{OS}	Short-circuit output current		25°C		±25	±40		±25	±40	mA
I_{CC}	Supply current	V_O = 0, No load	25°C		1.7	2.8		1.7	2.8	mA
			Full range			3.3			3.3	
P_D	Total power dissipation	V_O = 0, No load	25°C		50	85		50	85	mW
			Full range			100			100	

PARAMETER		TEST CONDITIONS	μA741C			μA741I, μA741M			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
t_r	Rise time	V_I = 20 mV, R_L = 2 kΩ, C_L = 100 pF, See Figure 1		0.3			0.3		μs
	Overshoot factor			5%			5%		
SR	Slew rate at unity gain	V_I = 10 V, R_L = 2 kΩ, C_L = 100 pF, See Figure 1		0.5			0.5		V/μs

Les défauts dits de « calcul » (1):

☞ ***L'amplification en tension A_{VD}*** est finie et typiquement égale à 200000 pour le μA741.
Dans le cas du montage inverseur, par exemple, on peut montrer que l'approximation qui consiste à considérer que A_{VD} est infini est d'autant meilleur que R2/R1 << A_{VD}.

☞ ***La résistance d'entrée Re*** n'est pas infinie et est typiquement égale à 2MΩ pour le μA741.
Dans le cas du montage inverseur, par exemple, on peut montrer qu'elle est négligeable pour R2/R1 << A_{VD} + 1.

Les défauts dits de « calcul » (2):

☞ ***La résistance de sortie Rs*** n'est pas nulle et est typiquement égale à 75Ω.

Dans le cas du montage inverseur, par exemple, on peut montrer qu'elle est négligeable si :

$$\frac{(R1+R2)Rs}{A_{VD}.R1} << 1$$

Les défauts dits « statiques » (1):

☞ ***Les tension et courant d'offset***. Ils sont respectivement et typiquement égaux à 1mV et 20nA pour le µA741.

•Ces défauts peuvent avoir des conséquences fâcheuses en métrologie notamment où l'on a besoin d'une grande précision.

Il est possible de compenser l'offset grâce au montage suivant : Figure 2 shows a diagram for an input offset voltage null circuit.

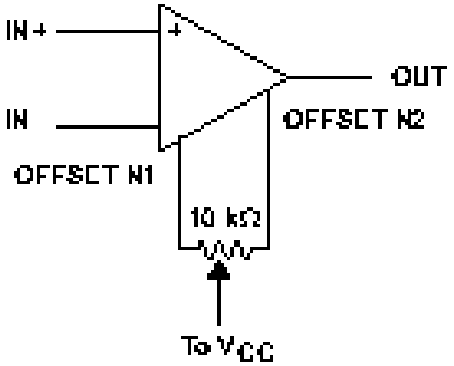


Figure 2. Input Offset Voltage Null Circuit

Les défauts dits « statiques » (2):

☞ ***Les courants de polarisation*** :

Il s'agit des courants de polarisation de base des transistors de l'amplificateur différentiel constituant l'entrée du circuit intégré. On a :

$$I_{IB} = (I- + I+)/2$$

Pour le µA741 le constructeur donne : I_{IB} = 80nA typique.

☞ ***Le taux de réjection de mode commun (CMRR)*** :

Il n'est pas infini et est typiquement égal à 90dB pour le µA741.

Les défauts dits « statiques » (3):

☞ ***Le facteur de réjection des tensions d'alimentation*** :

Il traduit le fait qu'une variation des tensions d'alimentation provoque une variation de la tension de sortie Vs. Pour faciliter la définition, ce défaut est ramené sur la tension d'offset V_{IO}.

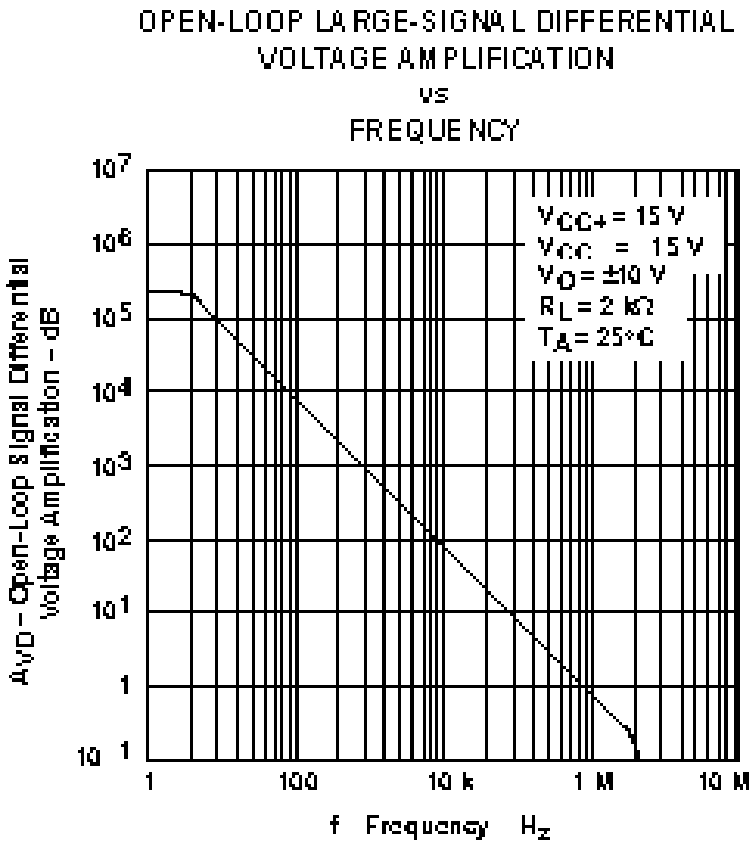
On a alors :

$$k_{SVS} = (\Delta V_{IO}/\Delta V_{CC})$$

Il est égal à 30µV/V pour le µA741.

Les défauts dits « dynamiques » (1):

•La bande passante de l'AOP n'est pas infinie et l'expression s 'écrit :



$$A_{vd} = \frac{A_0}{1 + j\dfrac{f}{fc}}$$

•D 'après le tracé on a:

•fc = 10 Hz

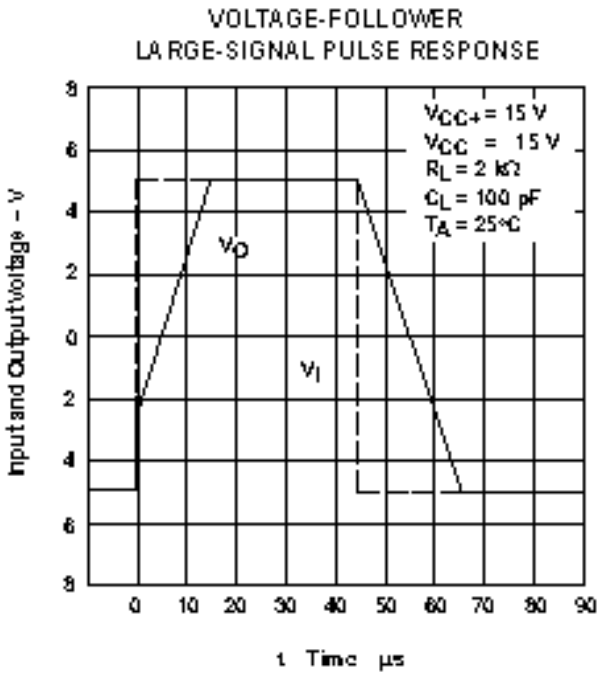
•A0 = 200 000

Les défauts dits « dynamiques » (2):

☞ ***Le slew rate*** :

Il traduit le fait que la vitesse de variation de la tension de sortie est limitée.

Ceci a pour effet de triangulariser le signal de sortie :



- On a : SR = dVs/dt
- Ce rapport s'exprime généralement en V/µS et est généralement donné pour le gain unité.
- Il est typiquement égal à 0,5V/µS pour le µA741.

CONCLUSION:

- L ’AOP est une « amélioration » de l ’amplificateur différentiel.
- Il a 2 modes de fonctionnement:
  - En régime linéaire,
  - En régime non-linéarie.
- Grâce à ses caractéristiques presque idéales, son étude est des plus simple:
  - Il permet d ’amplifier au moins un signal d ’entrée...
  - Il permet la mise en cascade de circuits, sans qu ’aucun n ’interfère les uns sur les autres...
- Il faut cependant faire attention à ses caractéristiques réelles...