

LABORATOIRE DE PHYSIQUE II A
(ÉLECTRONIQUE)

Notes de Cours

TP3

JEAN-MICHEL SALLESE
CÉDRIC MEINEN
DANIELE MARI



TP 3. BASES D'ANALYSE DES CIRCUITS

L'Ampli Op en tant que Comparateur

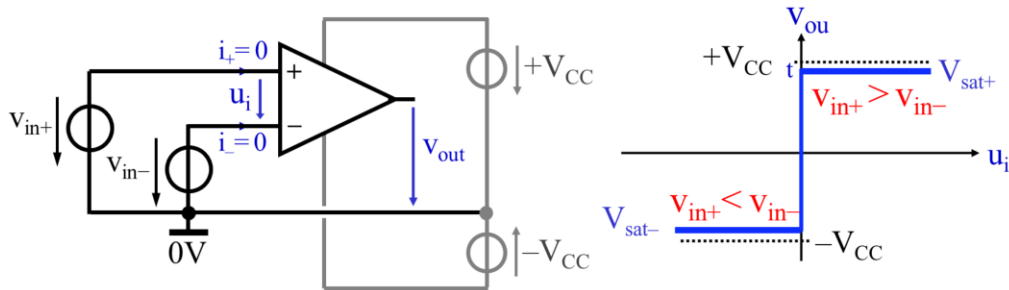
L'Ampli Op en réaction positive

Générateur de signaux triangulaires et carrés

LE COMPAREUR

L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL EN COMPAREUR SIMPLE

Vu le gain élevé de l'amplificateur opérationnel, en l'absence de réaction négative, sa sortie peut être considérée comme binaire: $V_{\text{sat}+}$ ou $V_{\text{sat}-}$, suivant que u_i est positive ou négative, donc que le potentiel de l'entrée + est supérieur ou inférieur à celui de l'entrée -.

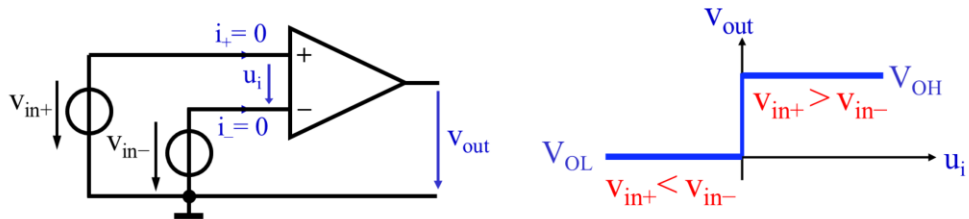


En l'absence de réaction négative, l'amplificateur opérationnel fonctionne en comparateur simple.

Les tensions de saturation à la sortie de l'AO sont proches des tensions d'alimentation (mais toujours inférieures).

LE "COMPARATEUR"

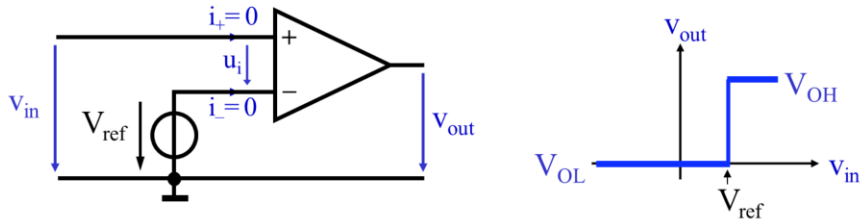
Les "comparateurs" sont des circuits assez semblables à des amplificateurs opérationnels, mais dont les caractéristiques sont optimisées pour la fonction de comparaison. En particulier la sortie d'un comparateur sature à deux valeurs V_{OH} et V_{OL} adaptées à la commande de circuits logiques (par ex. $V_{OH} = +5\text{ V}$ et $V_{OL} = 0\text{ V}$).



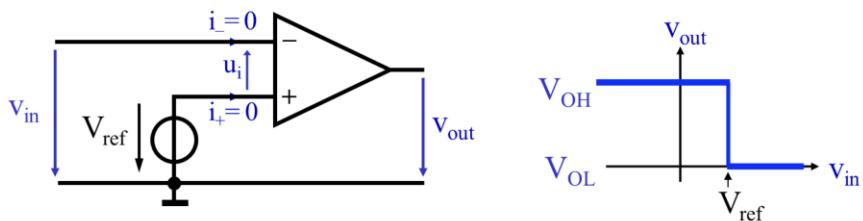
Un amplificateur opérationnel peut parfois remplacer un comparateur, mais un comparateur ne peut pas fonctionner en réaction négative comme un ampli op.

Les comparateurs sont plus rapides que les AO de part leur architecture interne. Ils peuvent avoir des temps de réponse bien inférieurs à la nanoseconde.

COMPARATEUR SIMPLE NON-INVERSEUR



COMPARATEUR SIMPLE INVERSEUR



Pour effectuer une comparaison, il est donc préférable d'utiliser un circuit dédié dit "comparateur", plutôt qu'un ampli op

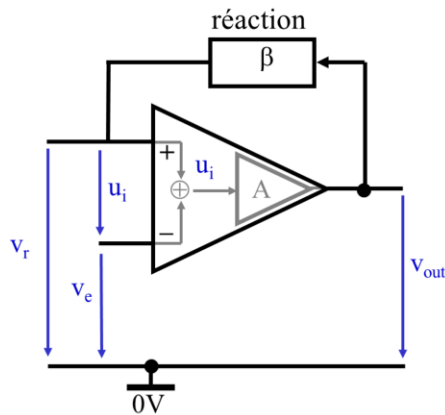
En effet, pour rappel l'ampli-op a une 'vitesse limite' de la tension de sortie, appelée Slew Rate: les temps de montée et de descente de la tension de sortie peuvent ne pas être suffisant courts et créer des distorsions.

Selon que le signal à comparer est appliqué à l'entrée + ou -, on a un comparateur à mode non-inverseur ou inverseur.

L'AO EN RÉACTION POSITIVE

L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL EN RÉACTION POSITIVE

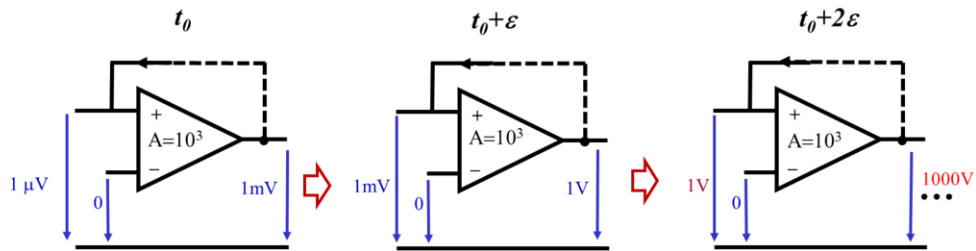
La réaction positive est un principe qui consiste à ramener une image du signal de sortie pour **l'additionner au signal initial d'entrée**.



Le système n'aura pas d'état d'équilibre; il va diverger vers la saturation positive ou négative suivant que $u_i = v_r - v_e$ est positive ou négative.

La réaction positive consiste à ramener la sortie de l'AO vers l'entrée '+'.

L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL EN RÉACTION POSITIVE



Toute tension résiduelle sur l'une des entrées finira par créer une tension de sortie qui divergera.

Le système est instable, il amplifie 'à l'infini' le moindre 'bruit' électrique.

Lorsque l'amplificateur opérationnel (ou le comparateur) est en réaction positive :

- la sortie ne peut prendre que deux valeurs $V_{\text{sat}+}$ (V_{OH}) ou $V_{\text{sat}-}$ (V_{OL})
- la sortie change d'état lorsque u_i change de signe, donc passe par zéro

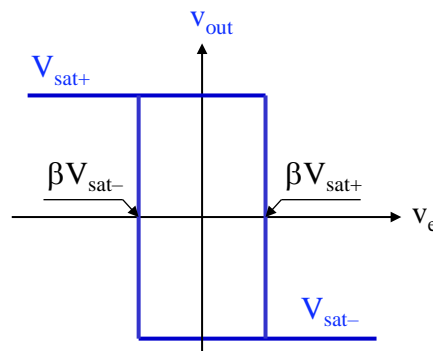
(si intéressé-e par une démonstration rigoureuse, voir [10.13140/RG.2.2.18337.83049/1](#))

L'ampli op en réaction positive n'a pas d'état d'équilibre stable.

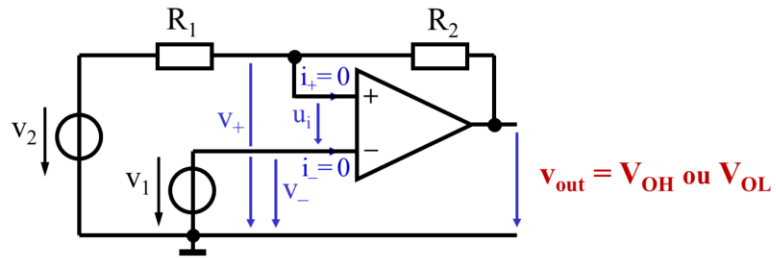
En effet supposons un état d'équilibre à un instant donné, toute augmentation de v_{out} (à cause de fluctuations (bruit électronique) ...), aussi infime soit-elle, entraîne une augmentation de u_i , qui multipliée par le très grand gain A provoque une augmentation de v_{out} , et ainsi de suite jusqu'à la saturation.

Une fois que la sortie est en saturation $V_{\text{sat}+}$ ou $V_{\text{sat}-}$, v_r est constante, égale à $\beta V_{\text{sat}+}$ ou $\beta V_{\text{sat}-}$. Pour que la sortie change d'état, il faut que u_i change de signe, ce qui n'est possible qu'en modifiant v_e pour le qu'il soit supérieur à $\beta V_{\text{sat}+}$ ou inférieur à $\beta V_{\text{sat}-}$.

Ceci donne une caractéristique à hystérèse.



L'AMPLI OP EN RÉACTION POSITIVE, ANALYSE DU CAS GÉNÉRAL



Superposition: →

$$v_+ = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \cdot v_2 + \frac{R_1}{R_2 + R_1} \cdot v_{\text{out}}$$

$$v_- = v_1$$

La sortie change d'état si u_i change de signe, donc pour $u_i = v_+ - v_- = 0$

lorsque la sortie est à V_{OH} , elle bascule si : $\frac{R_2}{R_2 + R_1} \cdot v_2 + \frac{R_1}{R_2 + R_1} \cdot V_{\text{OH}} = v_1$

lorsque la sortie est à V_{OL} , elle bascule si : $\frac{R_2}{R_2 + R_1} \cdot v_2 + \frac{R_1}{R_2 + R_1} \cdot V_{\text{OL}} = v_1$

Dans le cas général on a deux variables v_1 et v_2 , ainsi qu'une **constante** v_{out} qui ne peut prendre que deux valeurs possibles V_{OH} ou V_{OL} .

v_- est directement égale à v_1 .

v_+ dépend de v_2 et de v_{out} selon la relation ci-dessus que l'on peut obtenir en utilisant le théorème de superposition.

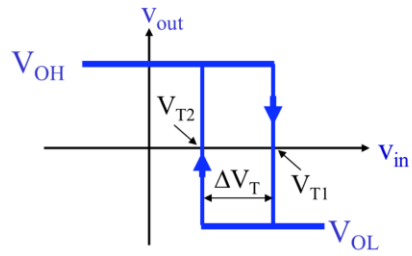
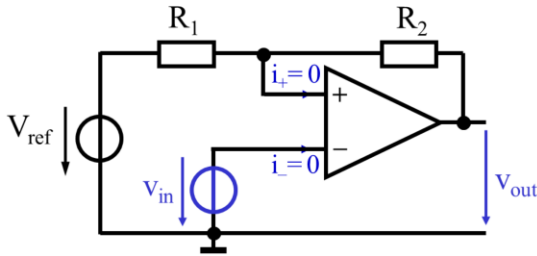
La condition de changement d'état (basculement) impose que u_i change de signe, donc passe par $u_i = 0$, donc que $v_+ = v_-$.

Ceci donne deux états pour la sortie :

- $v_{\text{out}} = V_{\text{OH}}$

- $v_{\text{out}} = V_{\text{OL}}$

L'AMPLI OP EN RÉACTION POSITIVE : MODE INVERSEUR



Inverseur : v_{in} 'vers le '-'

la sortie descend de V_{OH} à V_{OL} pour : $v_{in} = V_{T1} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \cdot V_{ref} + \frac{R_1}{R_2 + R_1} \cdot V_{OH}$

la sortie monte de V_{OL} à V_{OH} pour : $v_{in} = V_{T2} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \cdot V_{ref} + \frac{R_1}{R_2 + R_1} \cdot V_{OL}$

l'hystérèse vaut : $\Delta V_T = \frac{R_1}{R_2 + R_1} \cdot (V_{OH} - V_{OL})$

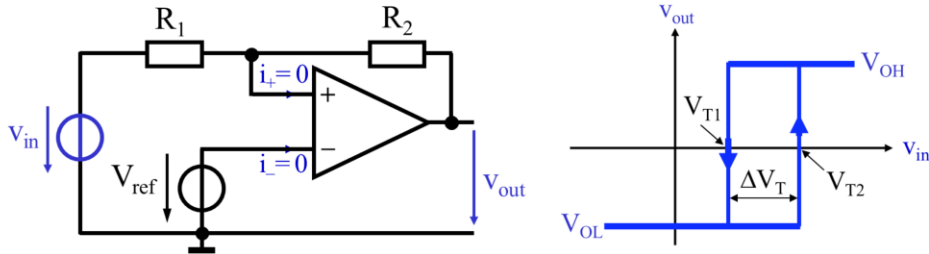
$$V_{T2} < V_{T1}$$

Par rapport au cas général, v_1 est la variable d'entrée v_{in} et v_2 la tension de référence.

Comme par définition $V_{OH} > V_{OL}$, on a toujours $V_{T1} > V_{T2}$

Si dans ce cas on pose $V_{ref} = 0$, on retrouve le schéma de principe de la réaction positive avec $\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$

L'AMPLI OP EN RÉACTION POSITIVE : MODE NON-INVERSEUR



Non-Inverseur : V_{in} 'vers le '+'

la sortie descend de V_{OH} à V_{OL} pour : $v_{in} = V_{T1} = \frac{R_2 + R_1}{R_2} \cdot V_{ref} - \frac{R_1}{R_2} \cdot V_{OH}$

la sortie monte de V_{OL} à V_{OH} pour : $v_{in} = V_{T2} = \frac{R_2 + R_1}{R_2} \cdot V_{ref} - \frac{R_1}{R_2} \cdot V_{OL}$

l'hystérèse vaut : $\Delta V_T = \frac{R_1}{R_2} \cdot (V_{OH} - V_{OL})$

$$V_{T2} > V_{T1}$$

Si la sortie est à V_{OH} , elle bascule pour: $\frac{R_2}{R_2 + R_1} v_{in} + \frac{R_1}{R_2 + R_1} V_{OH} = V_{ref}$

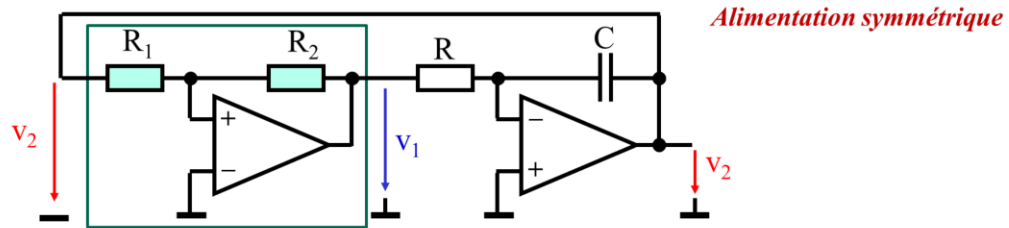
Si la sortie est à V_{OL} , elle bascule pour: $\frac{R_2}{R_2 + R_1} v_{in} + \frac{R_1}{R_2 + R_1} V_{OL} = V_{ref}$

D'où l'on tire les deux valeurs particulières de v_{in} (V_{T1} et V_{T2}) qui font basculer la sortie.

Comme par définition $V_{OH} > V_{OL}$, on a toujours $V_{T1} < V_{T2}$

**GÉNÉRATEUR DE SIGNAUX
TRIANGULAIRES ET CARRÉES**

GÉNÉRATEUR DE TRIANGLE ET CARRÉ À 2 AOS

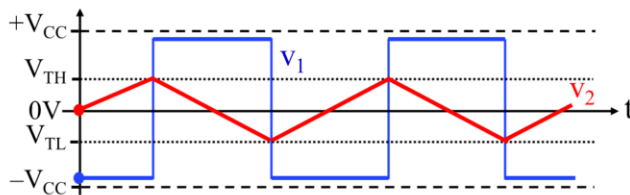


Comparateur à seuils **non-inverseur**

$$\begin{aligned} V_{\text{sat}+} &\approx +V_{\text{CC}} & V_{\text{TL}} &= -V_{\text{sat}+} \cdot R_1/R_2 \\ V_{\text{sat}-} &\approx -V_{\text{CC}} & V_{\text{TH}} &= -V_{\text{sat}-} \cdot R_1/R_2 \end{aligned}$$

Intégrateur inverseur

$$v_2(t) = v_2(0) - \frac{1}{RC} \int v_1(t) dt$$



$$T_H \approx T_L \approx 2 \cdot RC \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

$$T \approx 4 \cdot RC \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

2 signaux de sortie disponibles : Triangle et Carré

La mise en série d'un comparateur à seuils non-inverseur avec un intégrateur inverseur, lui-même rebouclé sur le comparateur, n'a pas d'état stable.

Les sorties du comparateur et de l'intégrateur varient de façon périodique dans le temps.

Tandis que la sortie du premier étage est carrée, la sortie du second étage est triangulaire.

GÉNÉRATEUR DE TRIANGLE ET CARRÉ À 2 AO

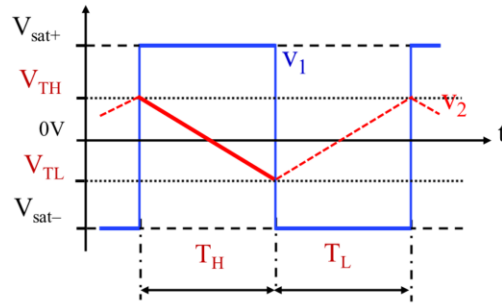
Rappel intégrateur inverseur

$$V_2(t) = V_2(0) - \frac{1}{RC} \int V_1(t) dt$$

Tension de sortie V_1 ne peut prendre que 2 valeurs. On suppose ici $V_1 = V_{Sat+}$

$$V_2(t) = V_2(0) - \frac{1}{RC} V_{Sat+} t$$

$$V_2(T_H) = V_{TH} - \frac{1}{RC} V_{Sat+} T_H \rightarrow = V_{TL}$$



Temps nécessaire pour atteindre la valeur de basculement V_{TL}

$$T_H = \frac{V_{TH} - V_{TL}}{V_{Sat+}} RC = \frac{R_1}{R_2} \frac{V_{Sat-} - V_{Sat+}}{V_{Sat-}} RC$$

$$V_{Sat+} \cong -V_{Sat-} \cong V_{CC} \quad \Longrightarrow \quad T_H \cong \frac{R_1}{R_2} 2 RC$$

On peut raisonner ainsi:

pour une capacité chargée ou déchargée à courant constant:

$$\Delta u_C = \frac{I \cdot \Delta t}{C} \Rightarrow \Delta t = \frac{C \cdot \Delta u_C}{I}$$

$$\text{avec: } |Du_C| = |Dv_2| = V_{TH} - V_{TL} = DV_T = \frac{R_1}{R_2} (V_{sat+} - V_{sat-})$$

$$\text{et } I = \frac{v_1}{R} = \frac{V_{sat\pm}}{R} \Rightarrow |I| = \frac{V_{sat+}}{R} \text{ ou } \frac{-V_{sat-}}{R}$$

$$T_H = RC \frac{R_1}{R_2} \frac{V_{sat+} - V_{sat-}}{V_{sat+}}$$

$$T_L = RC \frac{R_1}{R_2} \frac{V_{sat+} - V_{sat-}}{-V_{sat-}}$$

$$\text{Si } V_{sat+} = -V_{sat-} \quad \text{alors} \quad T_H = T_L = 2RC \frac{R_1}{R_2}$$

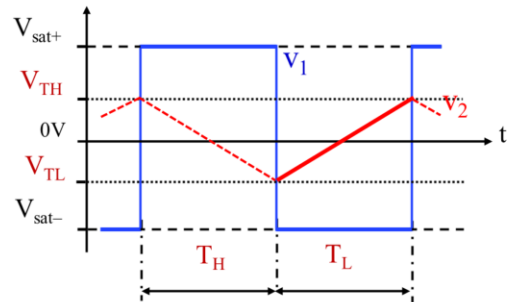
GÉNÉRATEUR DE TRIANGLE ET CARRÉ À 2 AO

La tension de sortie V_1 bascule à T_H :

$$V_1 = V_{Sat-}$$

$$V_2(t) = V_2(0) - \frac{1}{RC} V_{Sat-} t$$

$$V_2(T_L) = V_{TL} - \frac{1}{RC} V_{Sat+} T_L \rightarrow = V_{TH}$$



Temps nécessaire pour atteindre la valeur de basculement V_{TH}

$$T_L = \frac{V_{TL} - V_{TH}}{V_{Sat-}} RC = \frac{R_1}{R_2} \frac{V_{Sat+} - V_{Sat-}}{V_{Sat+}} RC$$

$$V_{Sat+} \cong -V_{Sat-} \cong V_{CC} \quad \Longrightarrow \quad T_L \cong \frac{R_1}{R_2} 2 RC$$

La période totale est donc

$$T_L \cong 4 \frac{R_1}{R_2} RC$$

On peut raisonner ainsi:

pour une capacité chargée ou déchargée à courant constant:

$$\Delta u_C = \frac{I \cdot \Delta t}{C} \Rightarrow \Delta t = \frac{C \cdot \Delta u_C}{I}$$

$$\text{avec: } |\Delta u_C| = |\Delta v_2| = V_{TH} - V_{TL} = \Delta v_T = \frac{R_1}{R_2} (V_{sat+} - V_{sat-})$$

$$\text{et } I = \frac{v_1}{R} = \frac{V_{sat\pm}}{R} \Rightarrow |I| = \frac{V_{sat+}}{R} \text{ ou } \frac{-V_{sat-}}{R}$$

$$T_H = RC \frac{R_1}{R_2} \frac{V_{sat+} - V_{sat-}}{V_{sat+}}$$

$$T_L = RC \frac{R_1}{R_2} \frac{V_{sat+} - V_{sat-}}{-V_{sat-}}$$

$$\text{Si } V_{sat+} = -V_{sat-} \quad \text{alors} \quad T_L = T_H = 2RC \frac{R_1}{R_2}$$