LYCÉE D'EXCELLENCE
MOHAMMED VI
LEM6 - CASABLANCA

Classes préparatoires aux grandes écoles
**MPSI — Physique-chimie**
Année 2026-2027

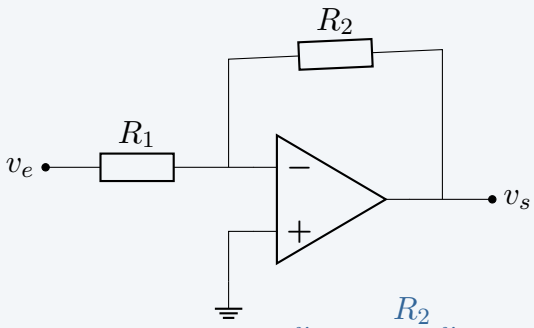
**FICHE RÉSUMÉ**

# E6

## ÉLECTRONIQUE

# Amplificateur linéaire intégré

Modèle de l'ALI idéal — Rétroaction et stabilité — Montages linéaires : suiveur, amplificateurs, intégrateur, filtres actifs — Limitations — Comparateurs et astable




$$v_s = -\frac{R_2}{R_1}\, v_e$$

> *Le premier principe est que vous ne devez pas vous tromper vous-même, et vous êtes la personne la plus facile à tromper.*
>
> — Richard Feynman, discours *Cargo Cult Science*, Caltech (1974)

physionova
physionova.academy

**Pr. CHARIFI**
professeurcharifi@gmail.com

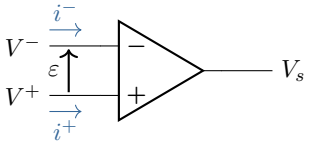
Simulation associée sur **PhysioNova**
« Montages à ALI »

# E6 — Fiche résumé

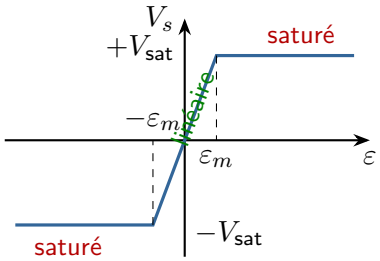
### L'essentiel en trois phrases

L'ALI est un amplificateur différentiel de gain énorme ($\mu_0 \sim 10^5$) dont la sortie est bornée par $\pm V_{\text{sat}}$ ; on le modélise idéal : $i^+ = i^- = 0$. Avec une **rétroaction sur l'entrée inverseuse**, il fonctionne en **régime linéaire** et impose $V^+ = V^-$ : on réalise alors amplificateurs, sommateur, intégrateur, filtres actifs. Sans rétroaction ou avec une rétroaction sur l'entrée non inverseuse, il est en **régime saturé** ($v_s = \pm V_{\text{sat}}$ selon le signe de $\varepsilon$) : comparateurs, trigger de Schmitt, oscillateur astable.

## I Présentation et modèle de l'ALI




$(-)$ inverseuse, $(+)$ non inverseuse ; $\varepsilon = V^+ - V^-$ ; alimentation $\pm 15\,\text{V}$ non représentée.




Caractéristique statique : $V_s = \mu_0 \varepsilon$ si $|\varepsilon| < \varepsilon_m = V_{\text{sat}}/\mu_0 \sim 0{,}1\,\text{mV}$.

### ALI idéal R

$$i^+ = i^- = 0 \qquad \text{linéaire : } \varepsilon = 0 \ (V^+ = V^-) \qquad \text{saturé : } v_s = V_{\text{sat}}\,\text{signe}(\varepsilon)$$

Résistance d'entrée infinie, résistance de sortie nulle ($v_s$ indépendante de la charge, dans la limite du courant de saturation), gain infini. « Idéal » et « linéaire » ne sont pas synonymes : un ALI idéal peut être saturé.

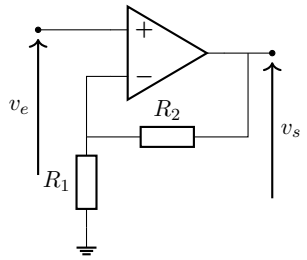
### Rétroaction et régime de fonctionnement R D

| Rétroaction | Régime |
|---|---|
| aucune | saturé (comparateur) |
| sur $(-)$ seule | linéaire (vérifier $\lvert v_s\rvert < V_{\text{sat}}$) |
| sur $(+)$ seule | saturé |
| sur les deux | pas de conclusion a priori |

Modèle dynamique $\tau \dot{V}_s + V_s = \mu_0 \varepsilon$ avec retour $\beta V_s$ : sur $(-)$, $\tau \dot{V}_s + (1 + \mu_0\beta) V_s = \mu_0 e$, solution homogène **décroissante** : linéaire stable, $V_s \to e/\beta$ ; sur $(+)$, coefficient $1 - \mu_0\beta < 0$ : divergence jusqu'à la **saturation**.

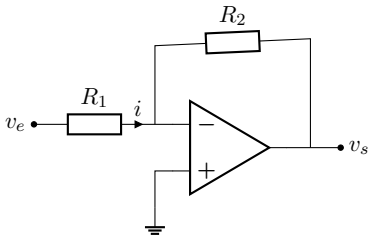
## II Montages en régime linéaire

### Amplificateur non inverseur




$V^+ = v_e$, $V^- = \frac{R_1}{R_1+R_2} v_s$ (diviseur)

### Amplificateur inverseur




$V^+ = 0 = V^-$ : **masse virtuelle** ; même $i = v_e/R_1$ dans $R_1$ et $R_2$

### ★ À retenir

| Montage | Constitution | Relation | Propriété |
|---|---|---|---|
| **Suiveur** | sortie reliée à $(-)$, $v_e$ sur $(+)$ | $v_s = v_e$ | $R_e$ infinie, $R_s$ nulle : **adaptation d'impédance** |
| **Non inverseur** | $v_e$ sur $(+)$ ; $R_2$ de $s$ vers $(-)$, $R_1$ de $(-)$ à la masse | $v_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_e$ | gain $\geq 1$, $R_e$ infinie |
| **Inverseur** | $v_e$ via $R_1$ sur $(-)$ ; $R_2$ de $s$ vers $(-)$ ; $(+)$ à la masse | $v_s = -\frac{R_2}{R_1} v_e$ | résistance d'entrée $R_1$ |
| **Sommateur** | $v_1$, $v_2$ via $R$ sur $(-)$ ; $R$ en contre-réaction | $v_s = -(v_1 + v_2)$ | loi des nœuds en $V^- = 0$ |
| **Soustracteur** | $v_1$ sur $(-)$ via $R$, $v_2$ sur $(+)$ via un pont | $v_s = v_2 - v_1$ | amplifie une différence (pont de Wheatstone) |
| **Intégrateur** | $R$ en entrée, $C$ en contre-réaction | $v_s = v_s(0) - \frac{1}{RC}\int_0^t v_e \, \mathrm{d}t'$ | $\underline{H} = -\frac{1}{\mathrm{j}RC\omega}$ |
| **Dérivateur** | $C$ en entrée, $R$ en contre-réaction | $v_s = -RC\frac{\mathrm{d}v_e}{\mathrm{d}t}$ | $\underline{H} = -\mathrm{j}RC\omega$ |
| **Passe-bas actif** | inverseur avec $R_2 \parallel C$ en contre-réaction | $\underline{H} = \frac{-R_2/R_1}{1 + \mathrm{j}R_2C\omega}$ | gain réglable, $R_s$ nulle (cascade) |
| **Courant-tension** | source de courant $i$ sur $(-)$, $R$ en contre-réaction | $v_s = -Ri$ | transimpédance (photodiode) |

### Démonstrations types D

- **Non inverseur** : $V^+ = v_e$ et, par diviseur ($i^- = 0$), $V^- = \frac{R_1}{R_1+R_2} v_s$ ; $V^+ = V^-$ donne $v_s = (1 + R_2/R_1) v_e$.
- **Inverseur** : loi des nœuds en potentiels en $V^- = 0$ : $\frac{v_e - 0}{R_1} + \frac{v_s - 0}{R_2} = 0$.
- **Intégrateur** : $i = v_e/R$ traverse $C$, dont la tension vaut $0 - v_s$ : $\frac{v_e}{R} = -C\frac{\mathrm{d}v_s}{\mathrm{d}t}$. Ne pas oublier la constante $v_s(0)$.

# III Limitations de l'ALI réel

## Produit gain-bande R D

L'ALI réel est un passe-bas du premier ordre : $\underline{\mu} = \dfrac{\mu_0}{1+\mathrm{j}\omega/\omega_c}$, $\mu_0 \sim 10^5$, $f_c \sim 10\,\mathrm{Hz}$. Non inverseur de retour $\beta = \frac{R_1}{R_1+R_2}$ : $\underline{H} = \dfrac{\underline{\mu}}{1+\beta\underline{\mu}} = \dfrac{G_0}{1+\mathrm{j}\omega/\omega_c'}$, avec $G_0 \approx 1/\beta$ et $\omega_c' = \omega_c(1+\beta\mu_0)$ :

$$G_0\, f_c' = \mu_0\, f_c \sim 1\,\mathrm{MHz}$$

Augmenter le gain réduit d'autant la bande passante (cascader des étages si besoin).

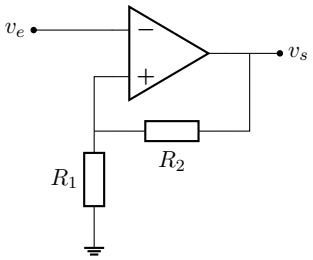
**Remarque**

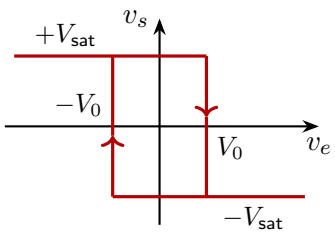
**Autres limitations.** Saturation en tension ($|v_s| \leq V_{\text{sat}} \approx 14\,\mathrm{V}$, écrêtage) et en courant ($|i_s| \lesssim 20\,\mathrm{mA}$ : une charge trop faible écrête la sortie). **Vitesse de balayage** $\sigma = |\mathrm{d}v_s/\mathrm{d}t|_{\max} \sim 1$ à $10\,\mathrm{V\cdot\mu s^{-1}}$ : $V_m \sin\omega t$ est triangularisé si $V_m\omega > \sigma$ (effet non linéaire, dépend de l'amplitude). Tension de décalage (quelques mV) : un intégrateur pur dérive et sature ; on place $R'$ en parallèle sur $C$ (**pseudo-intégrateur**, intégrateur pour $\omega \gg 1/R'C$). Le dérivateur pur amplifie le bruit HF : on ajoute une résistance en série avec $C$.

# IV Montages en régime saturé

## Définition — Comparateur simple R

Sans rétroaction, $v_e$ sur $(+)$ et $V_{\text{réf}}$ sur $(-)$ : $v_s = +V_{\text{sat}}$ si $v_e > V_{\text{réf}}$, $-V_{\text{sat}}$ sinon. Transforme une sinusoïde en créneau, mais bascule de façon erratique si $v_e$ est bruitée autour de $V_{\text{réf}}$.




Rétroaction sur $(+)$ : saturé. $V^+ = \dfrac{R_1}{R_1+R_2}v_s = \pm V_0$. Si $v_s = +V_{\text{sat}}$, bascule quand $v_e$ **dépasse** $V_0$ ; si $v_s = -V_{\text{sat}}$, quand $v_e$ **descend sous** $-V_0$.

## Comparateur à hystérésis (trigger de Schmitt), astable R D

$$V_0 = \frac{R_1}{R_1+R_2}\,V_{\text{sat}} \qquad T_{\text{astable}} = 2RC\ln\frac{V_{\text{sat}}+V_0}{V_{\text{sat}}-V_0} = 2RC\ln\left(1+\frac{2R_1}{R_2}\right)$$

- Pour $-V_0 < v_e < V_0$, deux états de sortie sont possibles : montage **bistable** (mémoire) ; un bruit d'amplitude $< 2V_0$ ne provoque pas de basculement. Version non inverseuse ($v_e$ sur $(+)$ via $R_1$, $(-)$ à la masse) : cycle parcouru en sens inverse, seuils $\pm\frac{R_1}{R_2}V_{\text{sat}}$.
- **Astable** : on remplace $v_e$ par la tension d'un condensateur $C$ chargé à travers $R$ depuis la sortie. $C$ se charge vers $\pm V_{\text{sat}}$ jusqu'à $\pm V_0$, la sortie bascule, etc. : $v_s$ est un **créneau**, $u_C$ quasi triangulaire. Sur une demi-période, $u_C = V_{\text{sat}} - (V_{\text{sat}}+V_0)\mathrm{e}^{-t/RC}$ (E3) atteint $V_0$ en $T/2$.

**Ordres de grandeur**

$\mu_0 \sim 10^5$ ; $V_{\text{sat}} \approx 14\,\text{V}$ pour $\pm 15\,\text{V}$ ; $\varepsilon_m \sim 0{,}1\,\text{mV}$ ; résistance d'entrée $1\,\text{M}\Omega$ à $10^{12}\,\Omega$ (TL081), de sortie $50$ à $100\,\Omega$ ; courants d'entrée : pA à nA ; courant de sortie $\sim 20\,\text{mA}$ ; vitesse de balayage $1$ à $10\,\text{V}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ ; produit gain-bande $\sim 1\,\text{MHz}$ ; temps de réponse en boucle ouverte $\tau \sim 10\,\text{ms}$.

## V Méthodes et pièges

### ☞ Méthode — Étudier un montage à ALI M

1. Identifier la rétroaction : sur $(-)$ seule $\Rightarrow$ régime linéaire ; aucune ou sur $(+)$ $\Rightarrow$ régime saturé.
2. **Linéaire** : écrire $i^{\pm} = 0$ et $V^+ = V^-$, exprimer $V^+$ et $V^-$ (diviseur, loi des nœuds en potentiels) ; vérifier ensuite $|v_s| < V_{\text{sat}}$ et le courant de sortie.
3. **Saturé** : supposer $v_s = +V_{\text{sat}}$ $(\varepsilon > 0)$ ou $-V_{\text{sat}}$ $(\varepsilon < 0)$ ; exprimer $\varepsilon$ $(\neq 0\,!)$ ; le seuil de basculement est la valeur de l'entrée qui annule $\varepsilon$ ; tracer le cycle.

### ✗ Attention, erreurs fréquentes

- Ne jamais écrire $V^+ = V^-$ pour un montage saturé.
- Ne jamais écrire la loi des nœuds à la sortie de l'ALI : son courant est inconnu (il revient par l'alimentation).
- Ne pas confondre $\varepsilon = V^+ - V^-$ avec la tension d'entrée du montage, ni inverser les rôles de $(+)$ et $(-)$.
- Penser à vérifier a posteriori la non-saturation, et à la constante d'intégration de l'intégrateur.

### Savoir-faire : je coche quand je sais

- ☐ Je connais le symbole, la caractéristique statique et les ordres de grandeur d'un ALI.
- ☐ Je sais énoncer le modèle de l'ALI idéal et relier le régime à la nature de la rétroaction.
- ☐ Je sais établir les relations du suiveur, des amplificateurs inverseur et non inverseur, du sommateur.
- ☐ Je sais établir celles de l'intégrateur, du dérivateur et d'un filtre actif simple.
- ☐ Je sais exploiter le produit gain-bande et reconnaître les effets de saturation et de vitesse de balayage.
- ☐ Je sais déterminer les seuils et tracer le cycle d'un comparateur à hystérésis.
- ☐ Je sais expliquer le fonctionnement de l'astable et établir sa période.