

# Amplificateur linéaire intégré

## Prérequis et constantes utiles

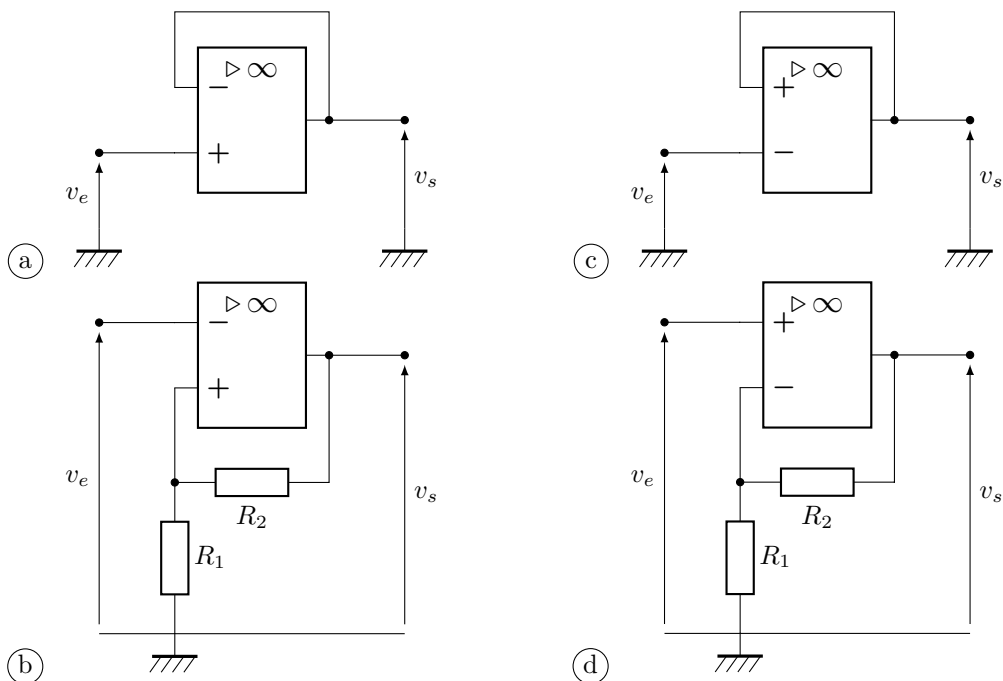
Loi des nœuds, loi des mailles, loi d'Ohm, impédance complexe, diviseur de tension.

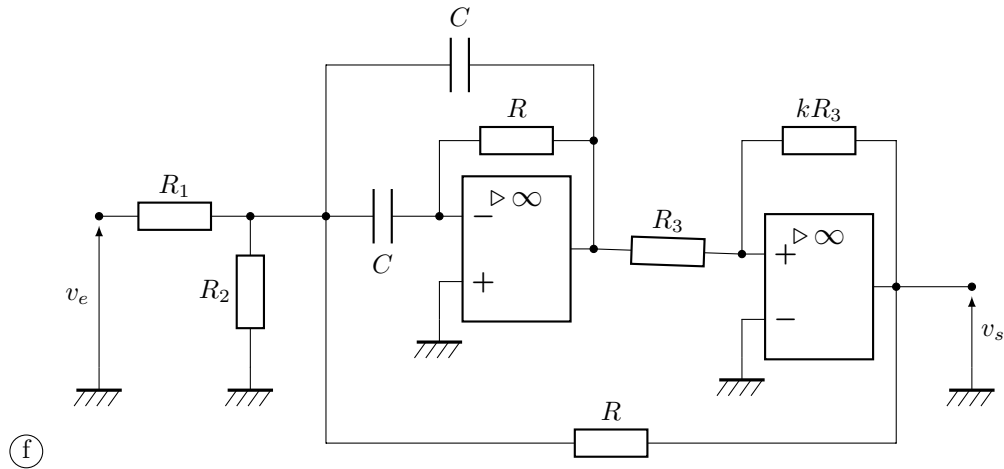
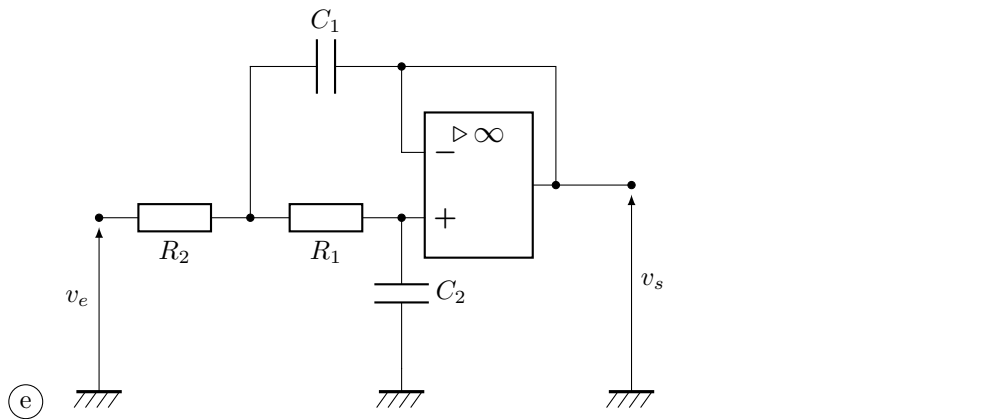
## Régime linéaire

### QCM Entraînement 1.1



Parmi les circuits suivants, lesquels peuvent fonctionner en régime linéaire ?



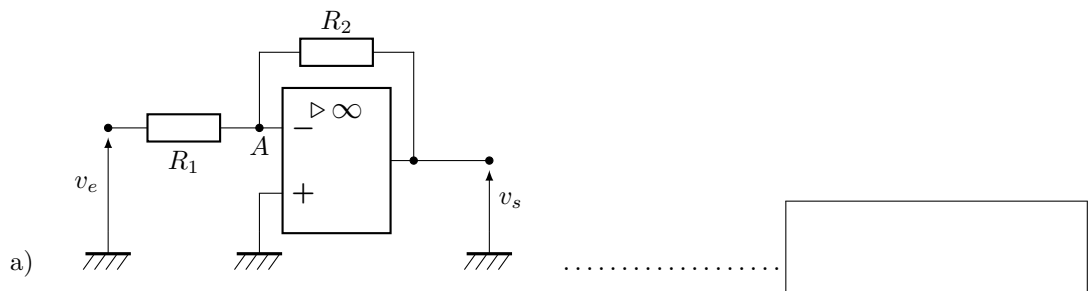


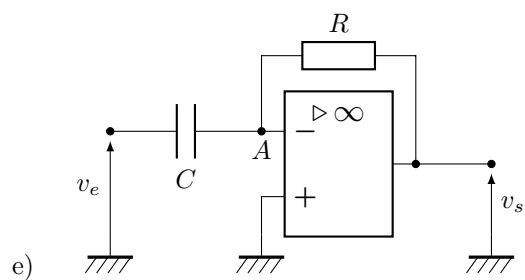
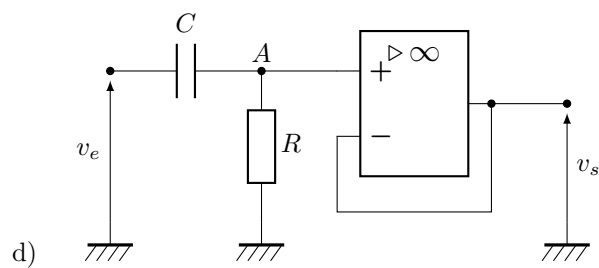
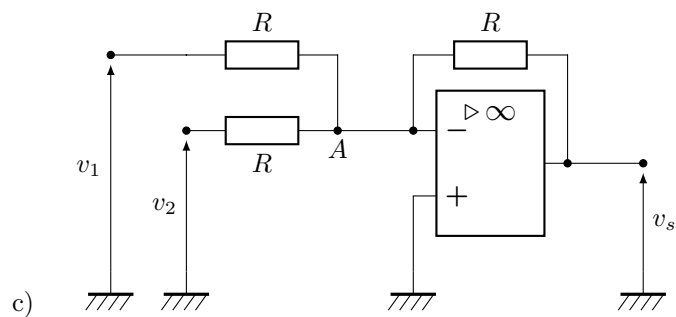
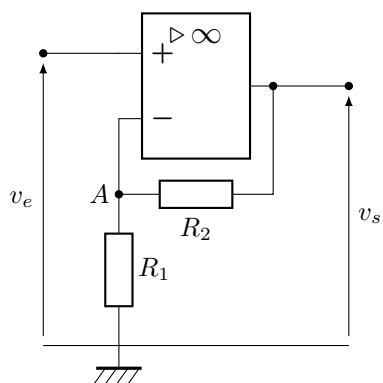
.....

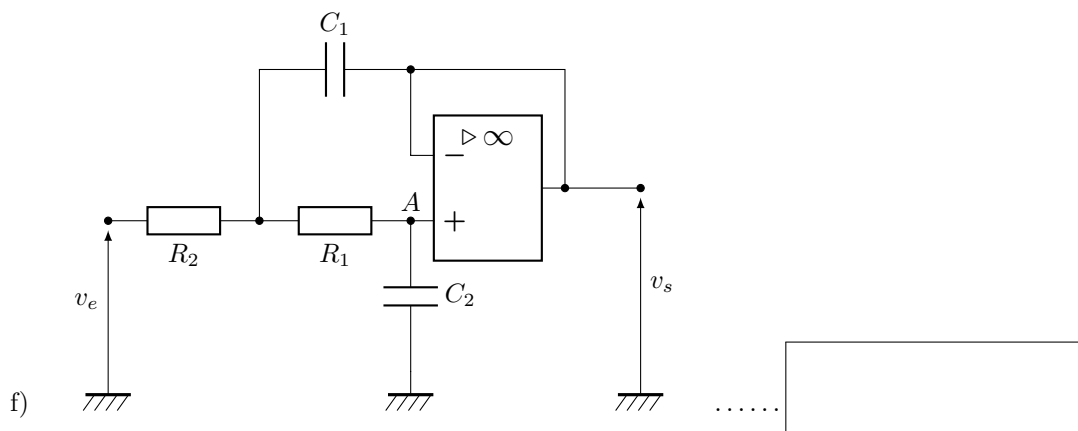
### 🍏 Entraînement 1.2



Tous les ALI de cet exercice sont supposés fonctionner en régime linéaire. Donner, pour chaque montage, les potentiels  $V_A$  des points A en fonction de  $v_e$  ou de  $v_s$ . Le potentiel peut également être nul.



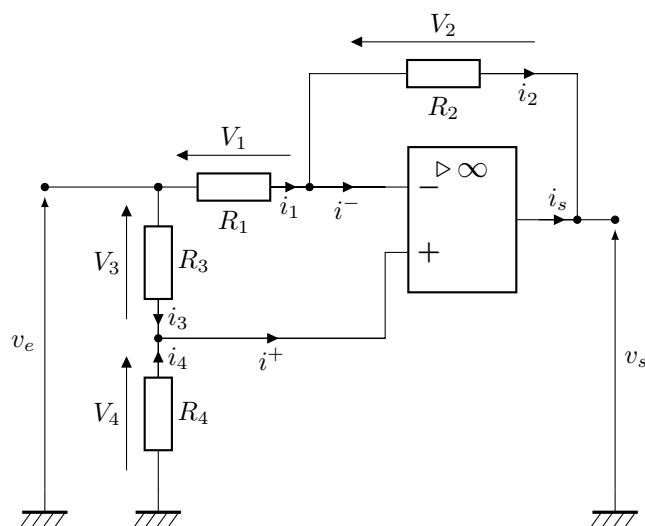




### Entraînement 1.3



On considère le montage ci-dessous dans lequel l'ALI est idéal et fonctionne en régime linéaire.



Pour chaque affirmation, répondre par vrai ou faux.

a) Toutes les résistances sont en convention récepteur. ....

b) Les courants d'entrées  $i^+$  et  $i^-$  de l'ALI sont nuls. ....

c) Le courant de sortie  $i_s$  de l'ALI est toujours nul. ....

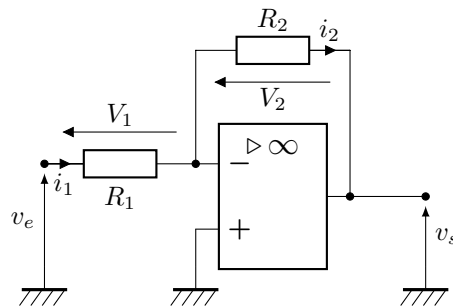
- d) La loi des nœuds assure  $i_1 = i_2$ . ....
- e) La loi des nœuds assure  $i_3 = i_4$ . ....
- f) Les résistances  $R_1$  et  $R_2$  sont en série. ....
- g) Les résistances  $R_1$  et  $R_3$  sont en série. ....
- h) Les résistances  $R_3$  et  $R_4$  sont en série. ....
- i) Les tensions  $V_1$  et  $V_3$  sont égales. ....
- j) Les tensions  $V_2$  et  $V_4$  sont égales. ....

## Circuits usuels

### 🍏 Entraînement 1.4 — Amplificateur inverseur.



On considère le montage amplificateur inverseur ci-dessous. L'ALI est idéal et supposé fonctionner en régime linéaire.



- a) Quelle est la relation entre  $i_1$  et  $i_2$ ? ....
- b) Quelles sont les expressions des tensions  $V_1$  et  $V_2$ ? ....
- c) Exprimer les intensités  $i_1$  et  $i_2$  en fonction des tensions  $v_e$  et  $v_s$ .

d) Déterminer le gain  $G = \frac{v_s}{v_e}$  de ce montage. ....

e) Quel couple de résistance permet d'obtenir le gain le plus important en valeur absolue ?

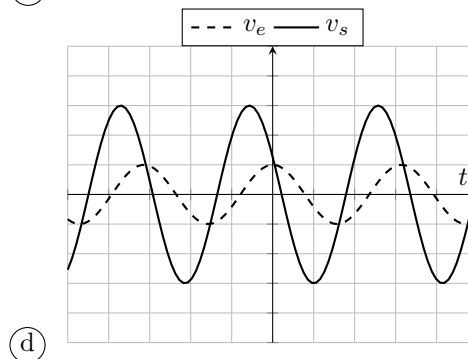
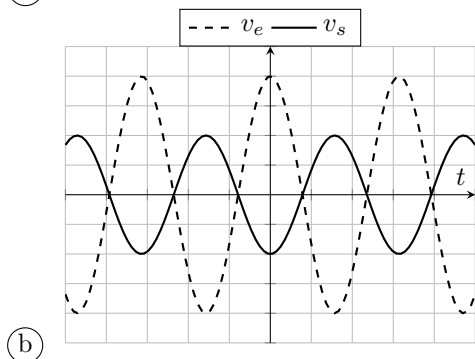
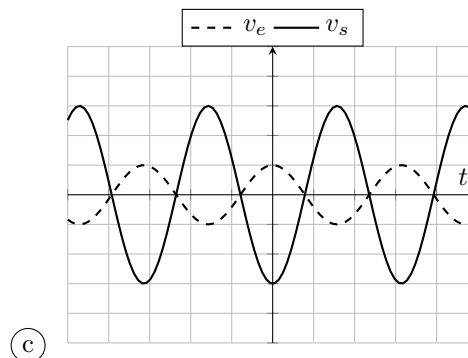
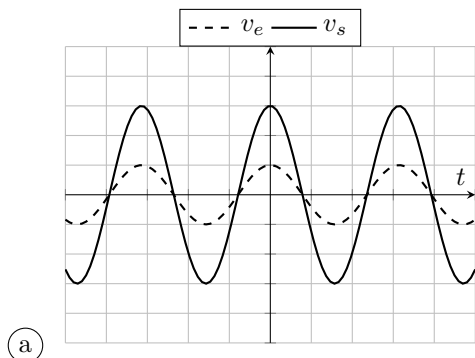
( $R_1 = 3,3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 8,2 \text{ k}\Omega$ ) ou ( $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 3,3 \text{ k}\Omega$ ) ? .....

**QCM** Entraînement 1.5 — Amplificateur inverseur.



Les courbes suivantes, ci-dessous, représentent des allures temporelles de  $v_e$  (en pointillés) et  $v_s$  (en trait plein) en fonction du temps.

Quelles sont celles qui peuvent correspondre au montage amplificateur inverseur ?



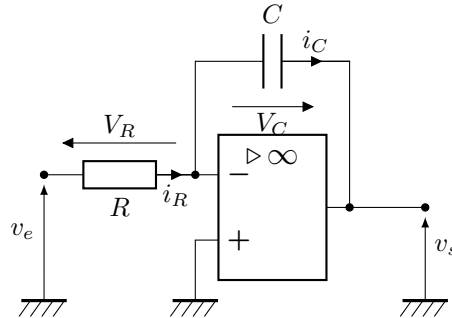
.....



## Entraînement 1.6 — Montage intégrateur inverseur.



On considère le montage ci-dessous. L'ALI est idéal.



a) Pour quelle fréquence l'ALI ne fonctionne-t-il pas en régime linéaire ?

On suppose maintenant que l'ALI fonctionne en régime linéaire.

On se place en régime sinusoïdal.

b) Exprimer la tension  $V_R$  en fonction de  $v_e$  et/ou  $v_s$ . .....

c) Exprimer la tension  $V_C$  en fonction de  $v_e$  et/ou  $v_s$ . .....

d) Quelle est la relation entre  $i_R$  et  $i_C$  ? .....

e) Quelle est la relation entre les grandeurs complexes  $\underline{i_C}$  et  $\underline{V_C}$  ? ..

f) Donner la fonction de transfert  $\underline{H}$  du montage. ....

g) Quel est le déphasage de la tension de sortie  $v_s$  par rapport à  $v_e$  ?

h) Donner l'équation différentielle reliant les tensions  $v_e$  et  $v_s$ . ....

i) Quelle est l'unité de la grandeur  $RC$  ? .....

j) On prend  $R = 10 \text{ k}\Omega$  et  $C = 10 \text{ nF}$ . Que vaut  $RC$  ? .....

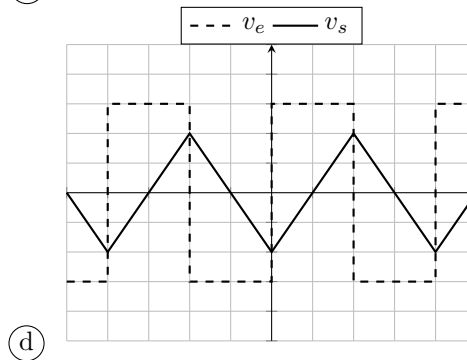
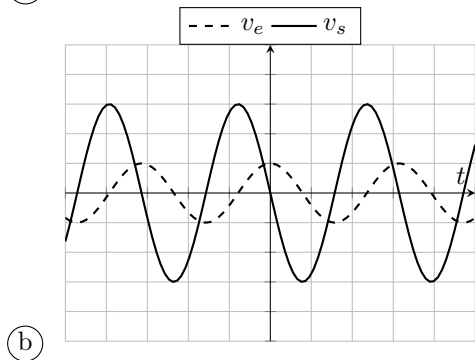
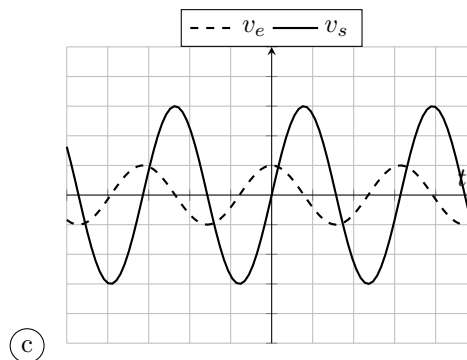
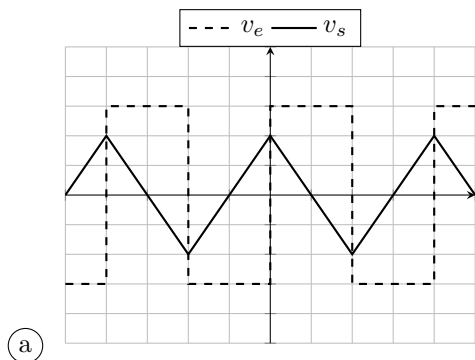
k) Pour  $v_e = E \cos(\omega t)$ , donner l'expression de  $v_s$ . ....

l) Pour quelle pulsation  $\omega$  l'amplitude de  $v_s$  trouvée à la question précédente est-elle égale à  $E$ ? .....

**QCM** Entraînement 1.7 — Montage intégrateur inverseur.



Les courbes suivantes représentent des allures temporelles de  $v_e$  (en pointillés) et  $v_s$  (en trait plein) en fonction du temps pour le montage intégrateur inverseur. Quelles sont celles qui peuvent correspondre au montage intégrateur inverseur ?



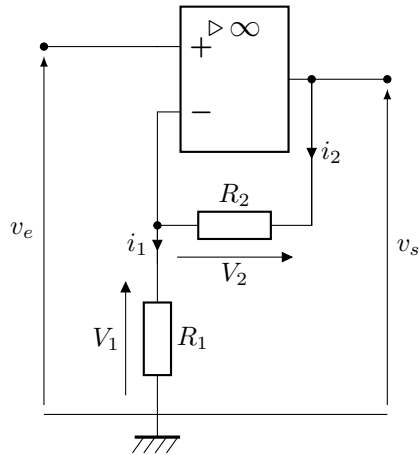
.....



🍏 **Entraînement 1.8 — Montage non inverseur.**



On considère le montage ci-dessous. L'ALI est idéal.



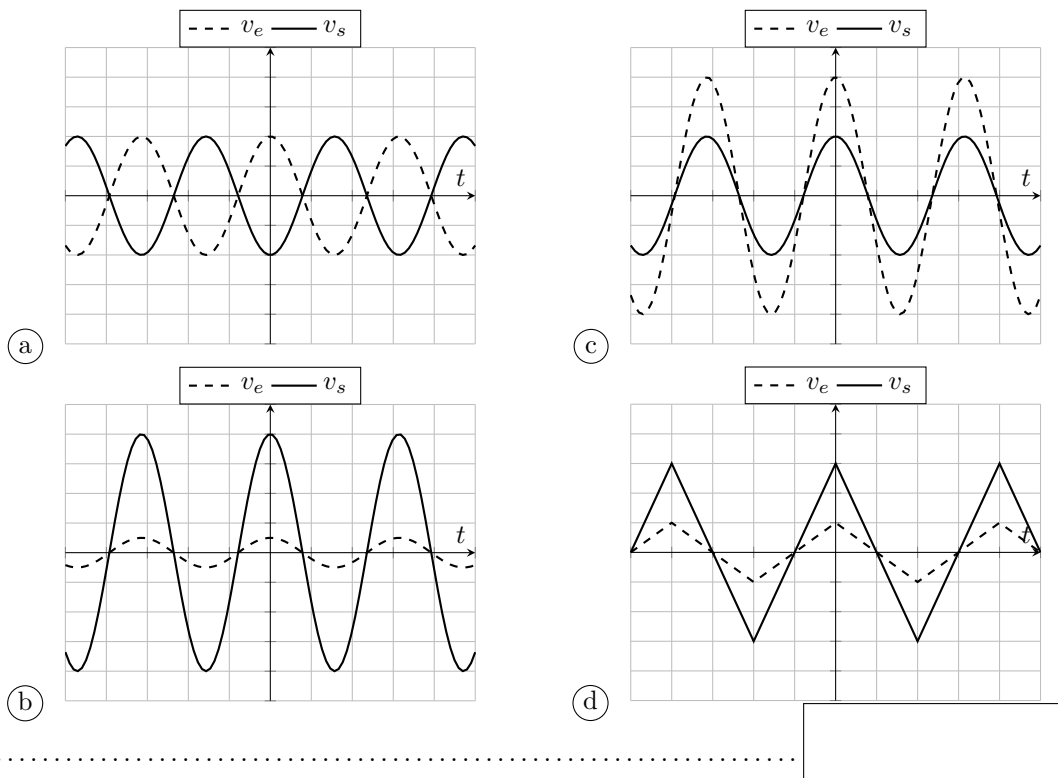
- Que peut-on dire des intensités  $i_1$  et  $i_2$ ? .....
- Exprimer la tension  $V_1$  en fonction de  $v_s$ . .....
- Exprimer  $V_1$  en fonction de  $v_e$ . .....
- Exprimer le gain  $G$  du montage non inverseur? .....
- Donner la valeur de  $G$  pour  $R_1 = 2,2 \text{ k}\Omega$  et  $R_2 = 33 \text{ k}\Omega$  .....

**QCM** Entraînement 1.9 — Montage non inverseur.



Les courbes suivantes représentent des allures temporelles de  $v_e$  (en pointillés) et  $v_s$  (en trait plein) en fonction du temps.

Quelles sont celles qui peuvent correspondre au montage non inverseur ?



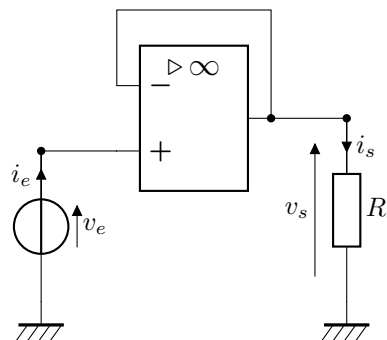
## Impédances d'entrée

**Entraînement 1.10 — Montage suiveur.**



On considère le montage suiveur représenté ci-contre. Le suiveur est alimenté par une source idéale de tension  $v_e$  de fréquence variable, la charge est une résistance  $R_c$ .

L'ALI est idéal et fonctionne en régime linéaire.



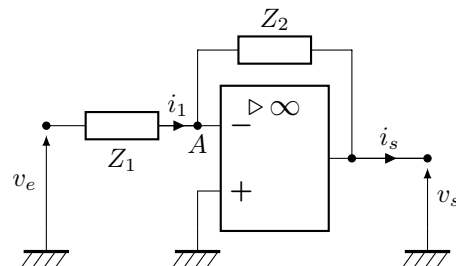
- a) Quelle est la relation entre  $v_e$  et  $v_s$ ? .....
- b) Quelle est l'impédance d'entrée d'un ALI idéal? .....
- c) Exprimer l'intensité  $i_e$  traversant la source de tension. ....
- d) Quelle est l'impédance d'entrée du montage suiveur? .....
- e) Quelle est la puissance délivrée par la source de tension? ....
- f) Quelle est la puissance instantanée reçue par la résistance  $R_C$ ?
- g) Quelle est la valeur de cette puissance pour une tension d'entrée constante  $v_e = 5,0\text{ V}$  et  $R_C = 1,0\text{ k}\Omega$ . ....
- h) D'où provient la différence entre ces deux puissances? .....

### Entraînement 1.11 — Circuits inverseurs.



On considère le quadripôle représenté ci-contre. Les impédances  $Z_1$  et  $Z_2$  sont quelconques et la tension d'entrée  $v_e$  est sinusoïdale de pulsation  $\omega$ .

L'ALI est idéal et fonctionne en régime linéaire.



- a) Exprimer l'intensité  $i_1$  circulant dans l'impédance  $Z_1$ . ....
- b) Exprimer l'intensité  $i_2$  circulant dans l'impédance  $Z_2$ . ....
- c) Donner la fonction de transfert  $H = \frac{v_s}{v_e}$  de ce circuit. ....
- d) Donner l'impédance d'entrée du circuit. ....

La tension d'entrée est constante égale à 10 V.

e) Donner l'impédance d'entrée si  $Z_1$  est un condensateur. ....

f) Donner l'impédance d'entrée si  $Z_1$  est une bobine. ....

La tension d'entrée est maintenant sinusoïdale de pulsation  $\omega = 6,0 \cdot 10^3 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ .

g) Pour quel dipôle  $Z_1$  l'impédance d'entrée a-t-elle le plus grand module : un condensateur

$C = 10 \text{ nF}$  ou une résistance  $R = 15 \text{ k}\Omega$  ? .....

### Réponses mélangées

|                        |                             |  |                     |  |                                      |
|------------------------|-----------------------------|--|---------------------|--|--------------------------------------|
| $G = -\frac{R_2}{R_1}$ | $f \neq 0 \text{ Hz}$       | $i_R = i_C$  | $v_e$               | $1 \cdot 10^4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ | Vrai                                 |
| 0                      | 0 V                         | Vrai   | $v_e$               | Vrai   | $v_s = v_e$                          |
| $-\frac{1}{jRC\omega}$ | Faux                        | 0 V  | Vrai                | $-\frac{Z_2}{Z_1}$                             | $-\frac{E}{RC\omega} \sin(\omega t)$ |
| Vrai                   | $\frac{R_1}{R_1 + R_2} v_s$ | $i_1 = \frac{v_e}{R_1}$ et<br>$i_2 = -\frac{v_s}{R_2}$ | Faux                | $v_e$  | De l'alimen-<br>tation de l'ALI      |
| $\frac{\pi}{2}$        | $\infty$                    | (a) (d) (e)  | $\frac{v_e}{Z_1}$   | 16   | $\infty$                             |
| (b) (d)                | 25 mW                       | $1 + \frac{R_2}{R_1}$                                  | $C = 10 \text{ nF}$ | $\frac{v_s^2}{R}$                              | 0,1 ms                               |
| Faux                   | $v_s$                       | (a) (b)  | $Z_1$               | $-\frac{v_s}{Z_2}$                             | Faux                                 |
| (b) (c)                | seconde                     | 0 A  | 0 W                 | $i_1 = i_2$                                    | $v_s$                                |
|                        |                             |  |                     |  | $v_e = -RC \frac{dv_s}{dt}$          |

► Réponses et corrigés page 13

# Fiche n° 1. Amplificateur linéaire intégré

## Réponses

- 1.1 .....  $\boxed{\text{a} \text{ d} \text{ e}}$
- 1.2 a) .....  $\boxed{0 \text{ V}}$
- 1.2 b) .....  $\boxed{v_e}$
- 1.2 c) .....  $\boxed{0 \text{ V}}$
- 1.2 d) .....  $\boxed{v_s}$
- 1.2 e) .....  $\boxed{0 \text{ V}}$
- 1.2 f) .....  $\boxed{v_s}$
- 1.3 a) .....  $\boxed{\text{Faux}}$
- 1.3 b) .....  $\boxed{\text{Vrai}}$
- 1.3 c) .....  $\boxed{\text{Faux}}$
- 1.3 d) .....  $\boxed{\text{Vrai}}$
- 1.3 e) .....  $\boxed{\text{Faux}}$
- 1.3 f) .....  $\boxed{\text{Vrai}}$
- 1.3 g) .....  $\boxed{\text{Faux}}$
- 1.3 h) .....  $\boxed{\text{Vrai}}$
- 1.3 i) .....  $\boxed{\text{Vrai}}$
- 1.3 j) .....  $\boxed{\text{Faux}}$
- 1.4 a) .....  $\boxed{i_1 = i_2}$
- 1.4 b) .....  $\boxed{V_1 = v_e \text{ et } V_2 = -v_s}$
- 1.4 c) .....  $\boxed{i_1 = \frac{v_e}{R_1} \text{ et } i_2 = -\frac{v_s}{R_2}}$
- 1.4 d) .....  $\boxed{G = -\frac{R_2}{R_1}}$
- 1.4 e) ..  $\boxed{R_1 = 3,3k\Omega \text{ et } R_2 = 8,2k\Omega}$
- 1.5 .....  $\boxed{\text{b} \text{ c}}$
- 1.6 a) .....  $\boxed{f \neq 0 \text{ Hz}}$
- 1.6 b) .....  $\boxed{v_e}$
- 1.6 c) .....  $\boxed{v_s}$
- 1.6 d) .....  $\boxed{i_R = i_C}$
- 1.6 e) .....  $\boxed{\underline{i_C} = -jC\omega \underline{V_C}}$
- 1.6 f) .....  $\boxed{-\frac{1}{jRC\omega}}$
- 1.6 g) .....  $\boxed{\frac{\pi}{2}}$
- 1.6 h) ....  $\boxed{v_e = -RC \frac{dv_s}{dt}}$
- 1.6 i) .....  $\boxed{\text{seconde}}$
- 1.6 j) .....  $\boxed{0,1 \text{ ms}}$
- 1.6 k) ....  $\boxed{-\frac{E}{RC\omega} \sin(\omega t)}$
- 1.6 l) .....  $\boxed{1 \cdot 10^4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}}$
- 1.7 .....  $\boxed{\text{a} \text{ b}}$
- 1.8 a) .....  $\boxed{i_1 = i_2}$
- 1.8 b) .....  $\boxed{\frac{R_1}{R_1 + R_2} v_s}$
- 1.8 c) .....  $\boxed{v_e}$
- 1.8 d) .....  $\boxed{1 + \frac{R_2}{R_1}}$
- 1.8 e) .....  $\boxed{16}$
- 1.9 .....  $\boxed{\text{b} \text{ d}}$
- 1.10 a) .....  $\boxed{v_s = v_e}$
- 1.10 b) .....  $\boxed{\infty}$
- 1.10 c) .....  $\boxed{0 \text{ A}}$
- 1.10 d) .....  $\boxed{\infty}$
- 1.10 e) .....  $\boxed{0 \text{ W}}$
- 1.10 f) .....  $\boxed{\frac{v_s^2}{R}}$
- 1.10 g) .....  $\boxed{25 \text{ mW}}$
- 1.10 h)  $\boxed{\text{De l'alimentation de l'ALI}}$
- 1.11 a) .....  $\boxed{\frac{v_e}{Z_1}}$
- 1.11 b) .....  $\boxed{-\frac{v_s}{Z_2}}$
- 1.11 c) .....  $\boxed{-\frac{Z_2}{Z_1}}$
- 1.11 d) .....  $\boxed{Z_1}$
- 1.11 e) .....  $\boxed{\infty}$
- 1.11 f) .....  $\boxed{0}$
- 1.11 g) .....  $\boxed{C = 10 \text{ nF}}$

## Corrigés

**1.1** Pour déterminer les circuits qui peuvent fonctionner en régime linéaire, on utilise le critère qualitatif de présence d'une rétroaction sur l'entrée inverseuse. C'est le cas des circuits (a) et (d). Le circuit (e) présente une rétroaction sur les deux entrées, mais celle sur l'entrée inverseuse est directe alors qu'on passe par  $R_1$  et  $C_1$  pour aller à l'entrée non inverseuse. Avec une rétroaction sur la seule entrée non inverseuse, les montages (b), (c) et (f) (ALI de droite) fonctionnent en régime saturé.

**1.2 a)** L'entrée non inverseuse est reliée à la masse donc  $V^+ = 0$ . Le régime linéaire assure que le potentiel de l'entrée inverseuse est égal à  $V^+$ .

**1.2 b)** Le potentiel de l'entrée non inverseuse est  $v_e$ . Grâce au régime linéaire, on en déduit que le potentiel de l'entrée non inverseuse est également  $v_e$ .

**1.2 c)** Comme pour le premier montage, le potentiel de l'entrée non inverseuse est nul et est égal au potentiel de l'entrée inverseuse en régime linéaire.

**1.2 e)** Ce montage est identique au montage *a* en remplaçant la première résistance par un condensateur.

**1.2 f)** L'entrée inverseuse est reliée à la sortie par un fil donc  $V^- = v_s$ . Le régime linéaire permet d'écrire  $V^+ = V^-$  d'où le résultat.

**1.3 a)** La résistance  $R_4$  est en convention générateur. Les trois autres sont bien en convention récepteur.

**1.3 b)** Les courants d'entrée d'un ALI sont nuls dans le cadre du modèle de l'ALI idéal, ce qui est le cas ici.

**1.3 c)** Le courant de sortie est variable et dépend de la charge du circuit à ALI. Sur l'exemple étudié, si la charge est un circuit ouvert, la loi des nœuds donne  $i_s + i_2 = 0$ .

**1.3 e)** Attention à la convention choisie pour les courants sur la figure.

**1.3 f)** Deux résistances sont en série si elles sont traversées par la même intensité. C'est bien le cas pour  $R_1$  et  $R_2$ .

**1.3 i)** On a  $V_1 = v_e - V^-$  et  $V_3 = v_e - V^+$ . L'ALI fonctionne en régime linéaire donc

$V^+ = V^-$ . On a bien  $V_1 = V_3$ .

.....  
**1.3 j)** On a  $V_4 = V^+$ , mais  $V_2 = V^- - v_s$ .  
.....

**1.4 a)** La loi des nœuds appliquée à l'entrée inverseuse donne  $i_1 = i^- + i_2$ . L'ALI étant idéal, on a  $i^- = 0$  donc  $i_1 = i_2$ .  
.....

**1.4 b)** D'après le schéma,  $V_1 = v_e + V^-$  et  $V_2 = V^- - v_s$ . L'ALI fonctionne en régime linéaire donc  $V^- = V^+ = 0$ . D'où le résultat.  
.....

**1.4 c)** Les deux résistances sont représentées en convention récepteur, on a donc :  $i_i = \frac{V_i}{R_i}$  avec  $i \in \{1, 2\}$ . Avec les expressions de la question précédente, on en déduit le résultat.  
.....

**1.4 d)** D'après la première question  $i_1 = i_2 \Rightarrow \frac{v_e}{R_1} = -\frac{v_s}{R_2}$ . On en déduit le résultat.  
.....

**1.5** La fonction de transfert de l'amplificateur inverseur est réelle négative : les tensions  $v_e$  et  $v_s$  doivent être en opposition de phase, ce qui n'est pas le cas des réponses (a) et (d). En fonction du choix des résistances, le gain peut être inférieur ou supérieur à 1 donc les réponses (b) et (c) conviennent.  
.....

**1.6 a)** En régime constant, un condensateur est équivalent à un circuit ouvert. Il n'y a alors plus de rétroaction sur l'entrée inverseuse et l'ALI ne peut pas fonctionner en régime linéaire.  
.....

**1.6 b)** L'ALI fonctionne en régime linéaire donc  $V^- = V^+ = 0$ .  
.....

**1.6 d)** L'ALI est idéal donc  $i^- = 0$ . La loi des nœuds à l'entrée inverseuse donne  $i_R = i_C$   
.....

**1.6 e)** Le condensateur est représenté en convention générateur donc la loi d'Ohm donne  $\underline{V_C} = -\underline{Z}i_C$  avec  $\underline{Z} = jC\omega$ .  
.....

**1.6 f)** En combinant la loi des nœuds et la loi d'Ohm, on a  $\underline{i_R} = \frac{v_e}{R} = \underline{i_C} = -jC\omega v_s$ . En isolant  $\frac{v_s}{v_e}$ , on trouve le résultat.  
.....

**1.6 g)** Le déphasage demandé est égal à l'argument de la fonction de transfert. Cette dernière est un imaginaire pur de partie imaginaire strictement positive, car  $\underline{H} = -\frac{1}{jRC\omega} = \frac{j}{RC\omega}$ .  
.....

**1.6 h)** D'après la fonction de transfert, on a  $\underline{v_e} = -RCj\omega v_s$ . On sait que la multiplication par  $j\omega$

en complexe correspond à une dérivation temporelle.

1.6 i)  $\frac{dv_s}{dt}$  est homogène à une tension divisée par un temps et  $RC \frac{dv_s}{dt}$  doit être homogène à une tension. On peut également se rappeler que  $\tau = RC$  est la constante de temps d'un circuit  $R - C$ .

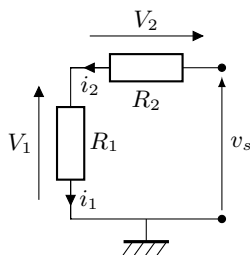
1.6 l) On veut  $RC\omega = 1$ , d'où le résultat.

1.7 D'après l'exercice précédent, le déphasage de  $v_s$  par rapport à  $v_e$  et de  $+\frac{\pi}{2}$  donc la tension de sortie doit être en **avance d'un quart de période** sur la tension d'entrée. C'est le cas sur (b) (alors que la tension de sortie est en retard d'un quart de période sur (c)).

Le montage est un intégrateur inverseur : une tension constante positive  $E$  s'intègre en fonction affine de pente négative  $-E \cdot t + b$ . C'est le cas de (a) alors que (d) présente une pente positive en sortie pour une entrée constante positive.

1.8 a) L'ALI étant idéal, les courants d'entrée sont nuls donc la loi des nœuds à l'entrée inverseuse assure  $i_1 = i_2$ .

1.8 b) Les deux résistances étant parcourues par le même courant, elles sont en série. Le circuit équivalent est alors :



La formule du diviseur de tension aux bornes de  $R_1$  donne le résultat demandé.

1.8 c) L'ALI fonctionne en régime linéaire donc on a  $V^+ = V^-$ .

1.8 d) D'après les questions précédentes, on a  $v_e = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_s$ , d'où le résultat.

1.9 Le gain de l'amplificateur inverseur est réel supérieur ou égal à 1. Par conséquent, la tension de sortie doit être en phase et de plus grande amplitude que la tension d'entrée. Les réponses (a) (tensions en opposition de phase) et (c) (sortie de plus faible amplitude) sont donc exclues.

Le gain obtenu dans l'exercice précédent est valable quelle que soit la forme du signal d'entrée. Les réponses (b) et (d) sont donc possibles.



**1.10 a)** L'ALI fonctionne en régime linéaire donc  $V^+ = V^-$ .

**1.10 b)** Les courants d'entrée de l'ALI idéal étant nuls quels que soient les potentiels des deux entrées, l'ALI se comporte comme un circuit ouvert en entrée. L'impédance d'entrée tend donc vers  $+\infty$ .

**1.10 c)** Les courants d'entrée sont nuls donc  $i_e = 0$  A.

**1.10 d)** L'impédance d'entrée du montage est ici définie par  $\underline{Z}_e = \frac{v_e}{i_e}$ . L'intensité d'entrée étant nulle, l'impédance d'entrée est infinie.

**1.10 e)** La puissance fournie par la source est  $\mathcal{P} = v_e \cdot i_e$  (dipôle en convention générateur). Comme  $i_e = 0$ , la puissance fournie est nulle.

**1.10 f)** La résistance  $R_C$  est représentée en convention récepteur donc la puissance reçue est  $\mathcal{P} = v_s \cdot i_s$ . Avec la loi d'Ohm, on a  $i_s = \frac{v_s}{R_C}$  d'où le résultat.

**1.11 a)** Avec la convention choisie, l'intensité  $i_1$  est  $i_1 = \frac{v_e - V_A}{Z_1}$ . L'ALI fonctionne en régime linéaire donc  $V_A = 0$ .

**1.11 b)** Avec la convention choisie, on a  $i_2 = \frac{V_A - v_s}{Z_2}$ . L'ALI fonctionne en régime linéaire donc  $V_A = 0$ .

**1.11 c)** Le courant d'entrée de l'ALI idéal est nul donc  $i_1 = i_2$ . D'après les deux questions précédentes,  $\frac{v_e}{Z_1} = -\frac{v_s}{Z_2}$ , d'où le résultat.

**1.11 d)** L'impédance d'entrée du circuit est  $Z_e = \frac{v_e}{i_1}$ . D'après la question précédente,  $Z_e = Z_1$ .

**1.11 e)** En régime constant, l'impédance du condensateur tend vers  $+\infty$ .

**1.11 f)** En régime constant, l'impédance d'une inductance tend vers 0.

**1.11 g)** Avec le condensateur, le module de l'impédance d'entrée est  $|Z_e| = \frac{1}{C\omega} \simeq 0,16 \cdot 10^5 \Omega \simeq 16 \text{ k}\Omega$ . Il est donc légèrement plus grand qu'avec la résistance.