

Exercices sur la mise en œuvre des amplificateurs opérationnels

Ce document est une compilation des exercices posés en devoirs surveillés d'électricité au département Génie Electrique et Informatique Industrielle de l'IUT de Nantes. Ces devoirs se sont déroulés généralement sans documents, sans calculatrice et *sans téléphone portable*...

Les devoirs d'une durée de 80 min sont notés sur 20 points. Donc chaque point proposé au barème correspond approximativement à une activité de 4 min.

Ces exercices utilisent les connaissances développées dans la ressource [Baselecpro](#) sur le site [IUTenligne](#).

Un corrigé avec barème de correction est remis aux étudiants en sortie du devoir (C'est souvent le seul moment où ils vont réfléchir à ce qu'ils ont su (ou pas su) faire dans ce devoir)

Personnellement, je me refuse à manipuler le barème d'un devoir lors de la correction dans le but d'obtenir une moyenne présentable. (*ni trop ni trop peu*...)

La moyenne d'un devoir doit refléter l'adéquation entre les objectifs de l'enseignant et les résultats des étudiants.

Les documents proposés ici sont délivrés dans un format qui permet tout assemblage/désassemblage ou modification à la convenance de l'utilisateur. Les dessins et les équations ont été réalisés avec Word97.

Nos étudiants disposent d'une masse considérable d'informations sur internet. Les enseignants sont maintenant soucieux de leur apprendre à utiliser intelligemment cet immense champ de connaissance. Ils leur apprennent notamment à citer les sources...

Ressource [ExercicElecPro](#) proposée sur le site Internet 

Copyright : droits et obligations des utilisateurs

L'auteur ne renonce pas à sa qualité d'auteur et aux droits moraux qui s'y rapportent du fait de la publication de son document.

Les utilisateurs sont autorisés à faire un usage non commercial, personnel ou collectif, de ce document notamment dans les activités d'enseignement, de formation ou de loisirs. Toute ou partie de cette ressource ne doit pas faire l'objet d'une vente - en tout état de cause, une copie ne peut pas être facturée à un montant supérieur à celui de son support.

Pour tout extrait de ce document, l'utilisateur doit maintenir de façon lisible le nom de l'auteur *Michel Piou* et la référence au site Internet *IUT en ligne*. La diffusion de toute ou partie de cette ressource sur un site internet autre que le site IUT en ligne est interdite.

Une version de Baselecpro est disponible sous forme d'un livre aux éditions *Ellipses* dans la collection *Technosup* sous le titre

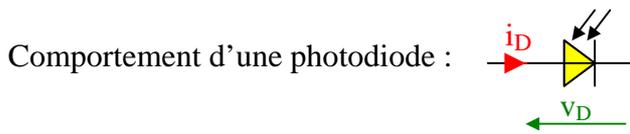
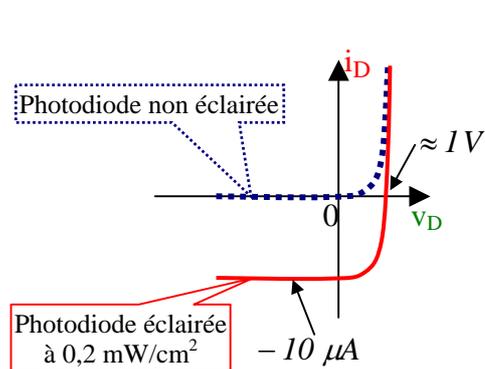
[ÉLECTRICITÉ GÉNÉRALE – Les lois de l'électricité](#)

Michel PIOU - Agrégé de génie électrique – IUT de Nantes – France
11/01/2016

Table des matières

1.	Montage détecteur de lumière à amplificateur opérationnel. (3 pts).....	1
2.	Amplificateur à AOP (1,5 pts).....	2
3.	Amplificateur à AOP en sinusoïdal (2 pts).....	3
4.	Montage à amplificateur opérationnel (3 entrées) (3pts)	4
5.	Montage à amplificateur opérationnel (2 entrées) (5 pts)	5
6.	Amplificateur monotension à AOP alimenté en 0/15V (10 pts)	6
7.	Convertisseur N/A (4,5 pts).....	10
8.	Montage à amplificateur opérationnel à 2 entrées (4 pts)	12
9.	Montages à AOP avec un condensateur en régime quelconque (2 pts)	13
10.	Filtre à amplificateur opérationnel en régime alternatif sinusoïdal (4pts)	13
11.	Autres filtres à AOP :	14

1. Montage détecteur de lumière à amplificateur opérationnel. (3 pts)

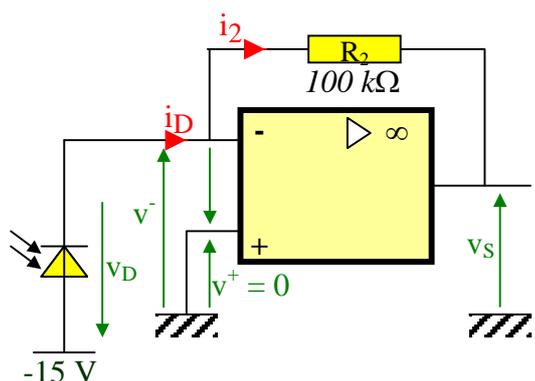


Lorsque la photodiode n'est pas éclairée, elle se comporte comme une diode ordinaire.
 Lorsque la photodiode est éclairée, sa caractéristique se déplace vers les courants négatifs (voir ci-contre).

Cette photodiode est placée dans le montage ci-dessous.
 L'amplificateur opérationnel est alimenté en $+15\text{V}/-15\text{V}$. On lui appliquera le modèle idéal.

a) On suppose l'amplificateur opérationnel en régime linéaire.
 Compléter les cases du tableau ci-dessous (sans justification):

	$V^+ - V^-$	v_D	i_D	i_2	v_s
Photodiode non éclairée					
Photodiode éclairée sous $0,2 \text{ mW/cm}^2$					



b) Quelles sont les conditions nécessaires pour qu'un amplificateur opérationnel idéal soit en régime linéaire ?

Corrigé :

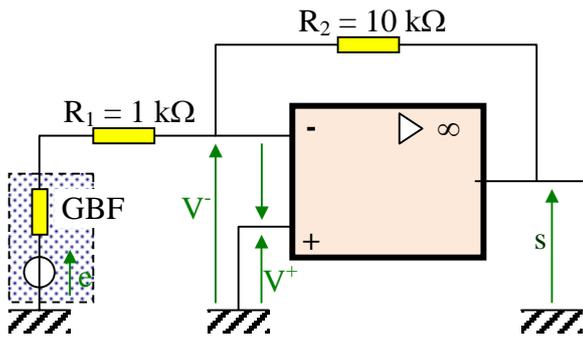
	$V^+ - V^-$	v_D	i_D	i_2	v_s
Photodiode non éclairée	0	-15V	0	0	0
Photodiode éclairée sous $0,2 \text{ mW/cm}^2$	0	-15V	$-10 \mu\text{A}$	$-10 \mu\text{A}$	1 V

a)
 (Toutes les valeurs justes : 1pt)
 (Tous les signes justes : 1pt)

b) Pour qu'un amplificateur opérationnel idéal soit en régime linéaire, il faut que sa sortie soit rebouclée sur l'entrée inverseuse. Cette première condition étant vérifiée, la tension de sortie doit rester à l'intérieur des limites des saturations haute et basse (1pt)

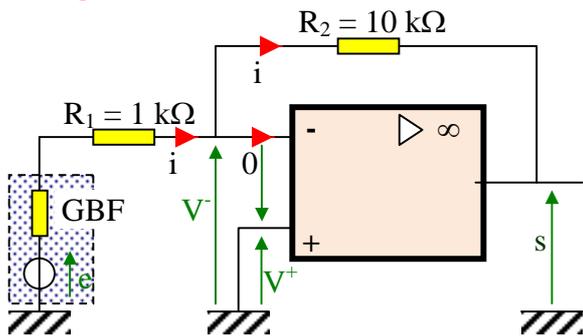
Ces deux conditions sont ici vérifiées, donc l'hypothèse du régime linéaire est justifiée.

2. Amplificateur à AOP (1,5 pts)



Déterminer l'expression numérique $s(t)$ en fonction de $e(t)$ en supposant l'amplificateur opérationnel idéal (non saturé) et en supposant que le **G**énérateur **B**asse **F**réquence présente une résistance interne de 600Ω .

Corrigé :

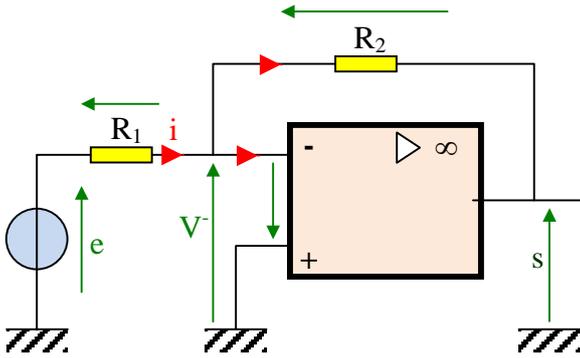


$$e(t) = (R_1 + R_{GBF}) \cdot i ; s(t) = -R_2 \cdot i$$

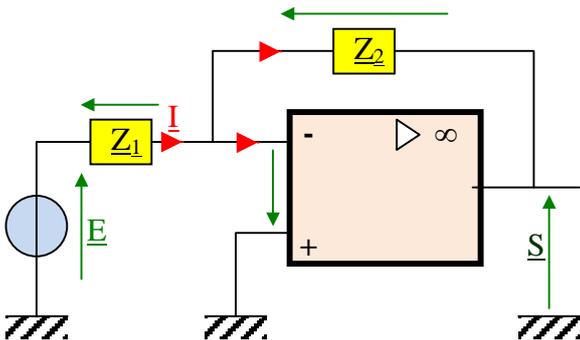
$$\Leftrightarrow s(t) = -\frac{R_2 \cdot e(t)}{R_1 + R_{GBF}} = -\frac{10}{1 + 0,6} \cdot e(t) = -6,25 \cdot e(t)$$

1,5pt

3. Amplificateur à AOP en sinusoïdal (2 pts)



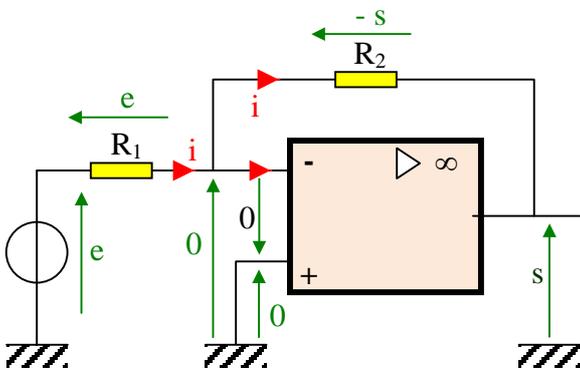
Déterminer l'expression du rapport $\frac{s(t)}{e(t)}$ en fonction des résistances R_1 et R_2 en supposant l'amplificateur opérationnel idéal (non saturé). *Démonstration (1/2 pt), Résultat (1/2 pt)*



Le montage ci-contre fonctionne en régime alternatif sinusoïdal. Il peut donc être étudié en considérant directement les grandeurs complexes.

Déterminer l'expression du rapport $\frac{S}{E}$ en fonction des impédances Z_1 et Z_2 en supposant l'amplificateur opérationnel idéal (non saturé). (1pt)

Corrigé :



$$e(t) = R_1 \cdot i \quad ; \quad s(t) = -R_2 \cdot i$$

$$\Leftrightarrow s(t) = -\frac{R_2 \cdot e(t)}{R_1} \Leftrightarrow \frac{s(t)}{e(t)} = -\frac{R_2}{R_1}$$

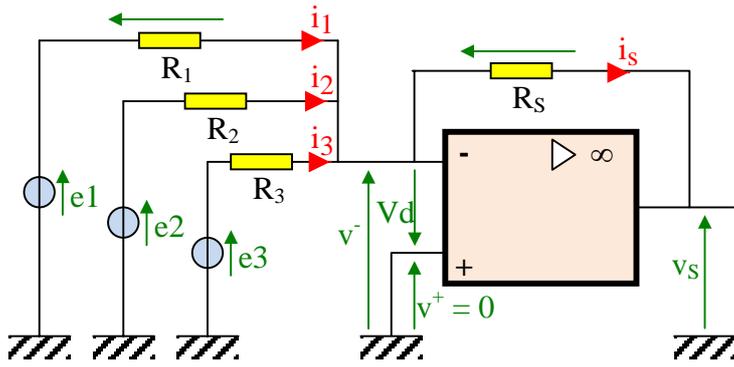
Démonstration 0.5pt

Résultat 0.5pt

Le second montage s'étudie de la même façon que le premier en remplaçant les grandeurs réelles par les grandeurs complexes correspondantes.

$$\text{Donc : } \frac{S}{E} = -\frac{Z_2}{Z_1} \quad \text{1pt}$$

4. Montage à amplificateur opérationnel (3 entrées) (3pts)



On supposera l'amplificateur idéal en fonctionnement linéaire.

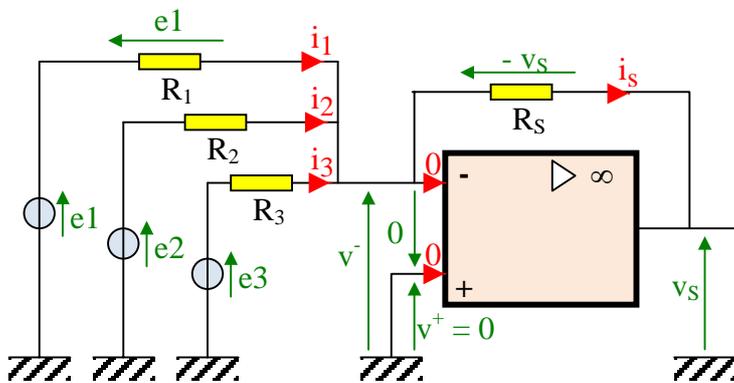
Démontrer l'expression de v_s en fonction de e_1 , e_2 et e_3 , et des valeurs des résistances.

La méthode de démonstration n'est pas imposée. On peut, par exemple, exprimer i_s en fonction des tensions d'entrée et des valeurs des résistances et en déduire v_s

On peut également utiliser le théorème de Millman

pour exprimer v^- en fonction de e_1 , e_2 , e_3 et v_s et des valeurs des résistances puis en déduire v_s

Corrigé :



En linéaire : $i_s = i_1 + i_2 + i_3$, donc

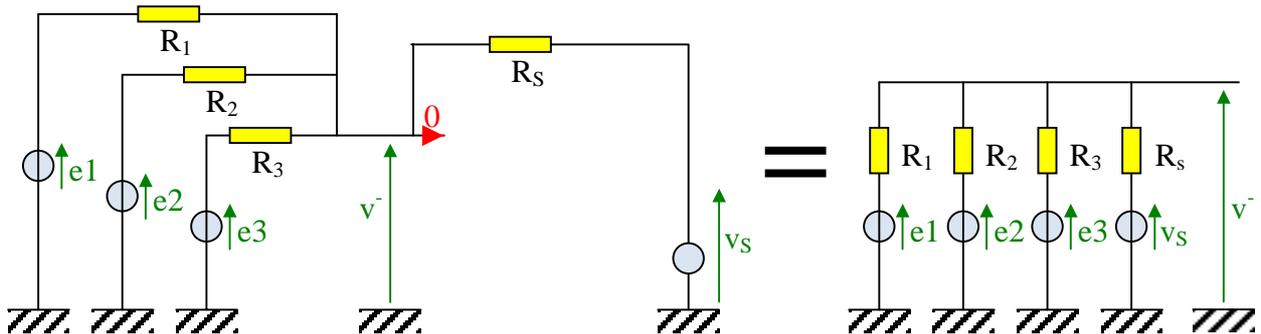
$$i_s = \frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2} + \frac{e_3}{R_3} \text{ et } i_s = \frac{-v_s}{R_s}$$

Donc

$$\frac{-v_s}{R_s} = \frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2} + \frac{e_3}{R_3}$$

$$\Leftrightarrow v_s = -R_s \cdot \left(\frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2} + \frac{e_3}{R_3} \right)$$

e) On peut reconstruire la tension $v_s(t)$ avec une source de tension. Ceci ne change pas les autres tensions et courant du montage. Ensuite, on peut calculer v^- à l'aide du théorème de Millman :

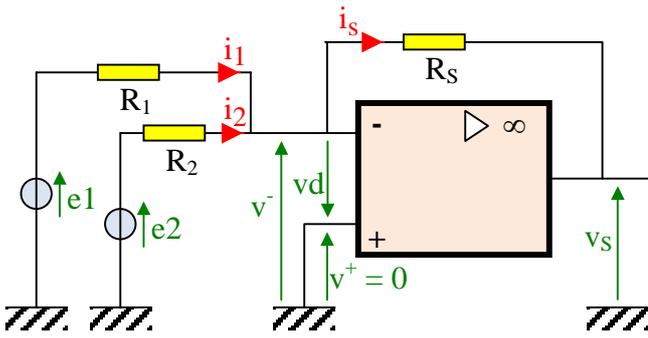


$$v^- = \frac{\frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2} + \frac{e_3}{R_3} + \frac{v_s}{R_s}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_s}} \text{ avec } v^- = v^+ = 0 \Rightarrow \frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2} + \frac{e_3}{R_3} + \frac{v_s}{R_s} = 0$$

$$\Leftrightarrow v_s = -R_s \cdot \left(\frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2} + \frac{e_3}{R_3} \right) \text{ Ce montage est un sommateur inverseur.}$$

5. Montage à amplificateur opérationnel (2 entrées) (5 pts)

On supposera l'amplificateur idéal.



a) Comment reconnaît-on que l'AOP ci-contre peut fonctionner en régime linéaire ? Pour la suite, on le supposera en fonctionnement linéaire. Que vaut v_d dans ce cas ?

b) Le montage reçoit en entrées deux tensions : « e_1 » et « e_2 ». Trouver une relation entre i_1 , i_2 et i_s . En déduire la relation exprimant v_s en fonction de e_1 , e_2 , R_1 , R_2 et R_s

c) Application numérique :

$e_1 = 5\text{ V}$ continu, $e_2(t) = 2 \cdot \sin(\omega t)$, $R_1 = R_2 = R_s = 1\text{ k}\Omega$.

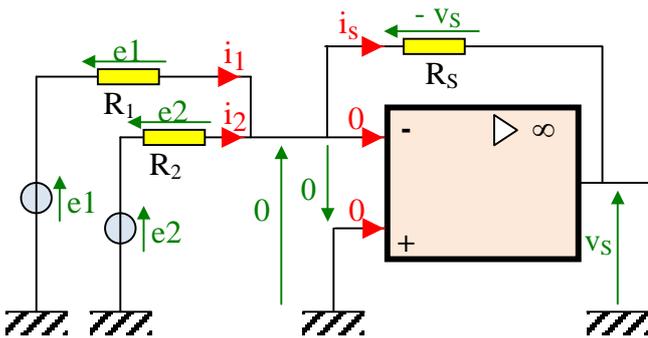
Exprimer $v_s(t)$

Corrigé :

a) La sortie de l'AOP est rebouclée sur l'entrée « - ». C'est la condition pour que l'AOP puisse fonctionner en régime linéaire.

Dans ce cas $v_d \approx 0$

1 pt



b) $i_s = i_1 + i_2$ (loi des nœuds)

1 pt

$$\Rightarrow \frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2} = \frac{-v_s}{R_s}$$

1 pt

$$\Leftrightarrow v_s = - \left(e_1 \cdot \frac{R_s}{R_1} + e_2 \cdot \frac{R_s}{R_2} \right)$$

1 pt

Le montage réalise une fonction sommateur inverseur

c) Application numérique : $v_s = -(e_1 + e_2) = -5 - 2 \cdot \sin(\omega t)$

1 pt

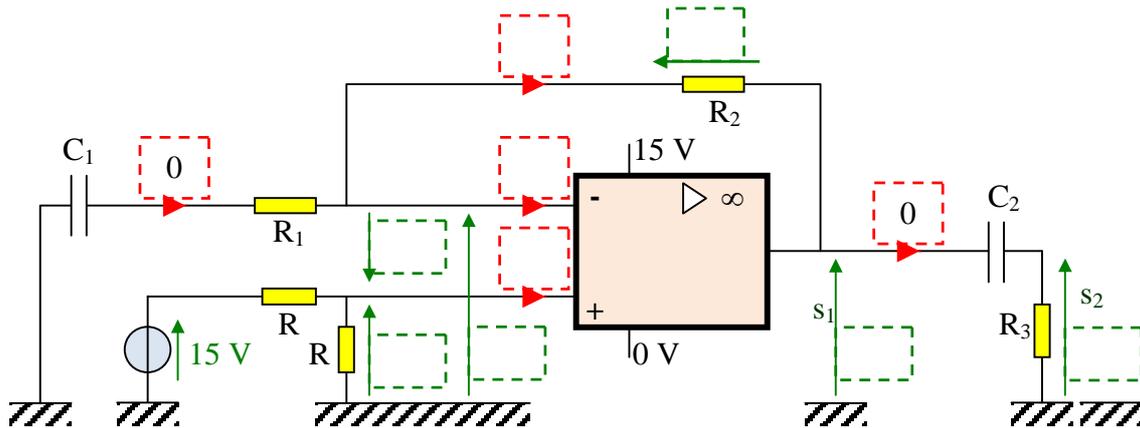
6. Amplificateur monotension à AOP alimenté en 0/15V (10 pts)

a) Comment reconnaît-on que l'AOP ci-dessous peut fonctionner en régime linéaire ?
 Pour toute la suite du problème, on le supposera **idéal** et en fonctionnement **linéaire**.

Dans toute la suite de l'exercice, les deux résistances « R » sont identiques.

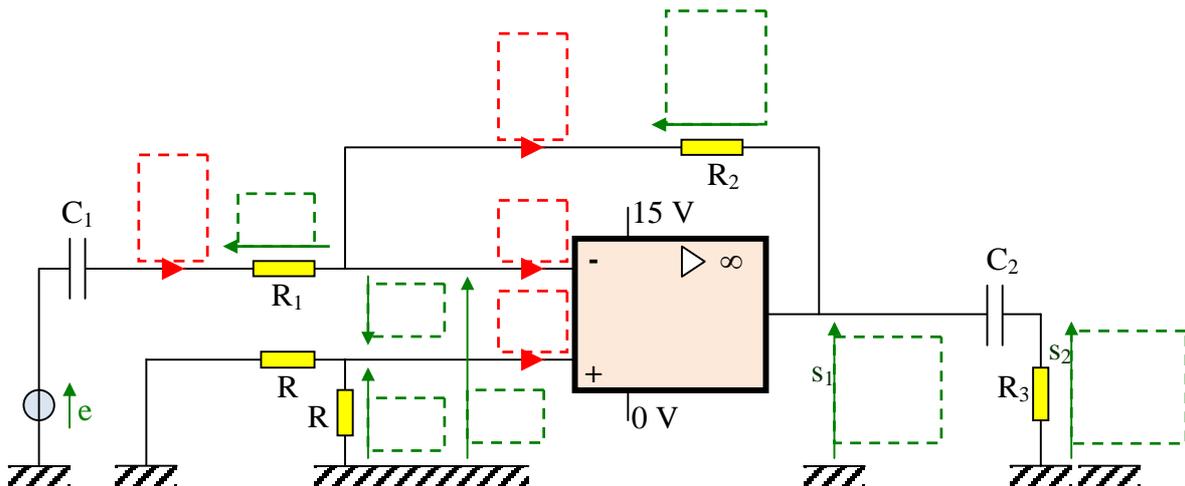
b) Toutes les sources qui agissent sur le montage ci-dessous sont des sources de tension continue et le réseau électrique est linéaire. Donc, en régime permanent, toutes les tensions et tous les courants sont continus. Les condensateurs se comportent donc comme des circuits ouverts.

Sans aucune justification, indiquer sur le schéma ci-dessous, la valeur numérique des tensions et des courants représentés.



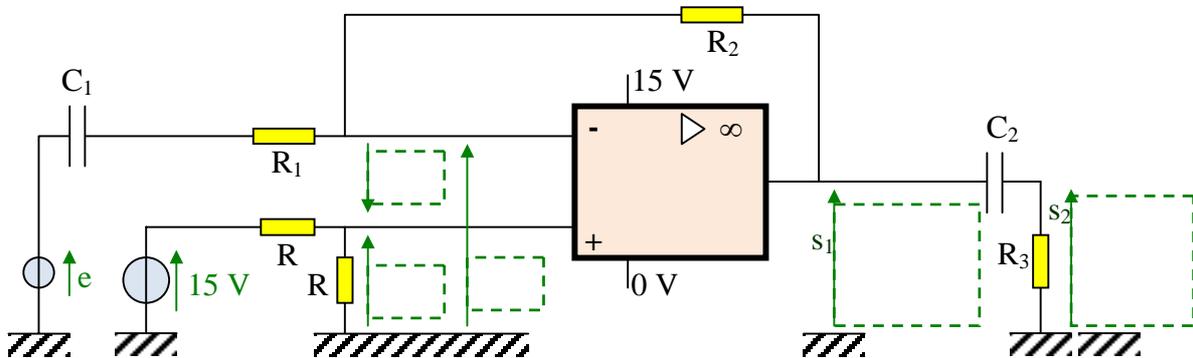
c) La source de tension « e » ci-dessous est alternative sinusoïdale. Sa fréquence est suffisamment élevée pour que l'impédance du condensateur C_1 soit négligeable par rapport à la résistance R_1 . De même l'impédance du condensateur C_2 est négligeable par rapport à la résistance R_3 . On considèrera donc que les condensateurs C_1 et C_2 se comportent comme des **courts-circuits**.

Sans aucune justification, indiquer sur le schéma ci-dessous, l'expression ou la valeur des tensions et des courants représentés. On utilisera si nécessaire les paramètres « e », R_1 , R_2 , R_3 ou R .

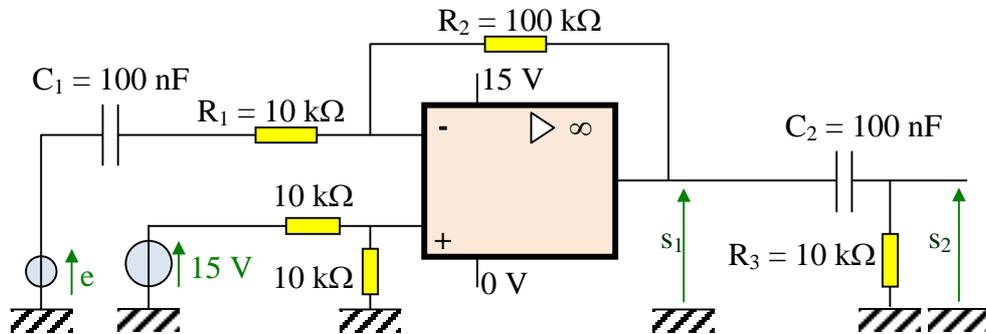


d) Dans le montage ci-dessous, on associe la source de signal « e » de la question c) et la source de tension continue de 15 V de la question b). Le réseau électrique est supposé linéaire, on peut donc appliquer le théorème de superposition

Sans aucune justification, indiquer sur le schéma ci-dessous, l'expression ou la valeur des tensions et des courants représentés. On utilisera si nécessaire les paramètres « e », R_1 , R_2 , R_3 ou R .



e) Application numérique :



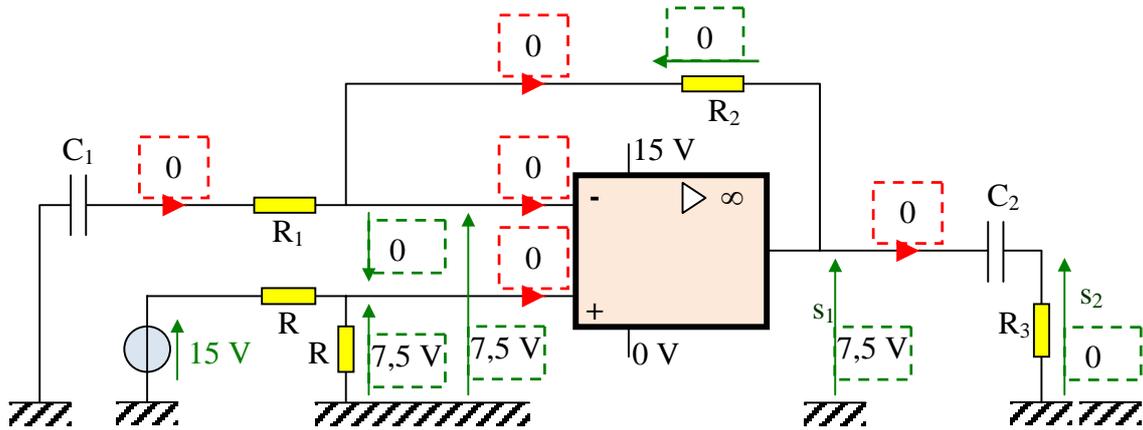
$e(t) = 0,5 \cdot \cos(6000 \cdot \pi \cdot t)$; $\left(\frac{1}{C_1 \cdot \omega} = 530 \Omega \right) \ll 10 \text{ k}\Omega$. Exprimer $s_1(t)$ et $s_2(t)$.

L'hypothèse « l'amplificateur opérationnel n'est pas saturé mais en fonctionnement linéaire » est-elle vérifiée ? Justifier en quelques mots.

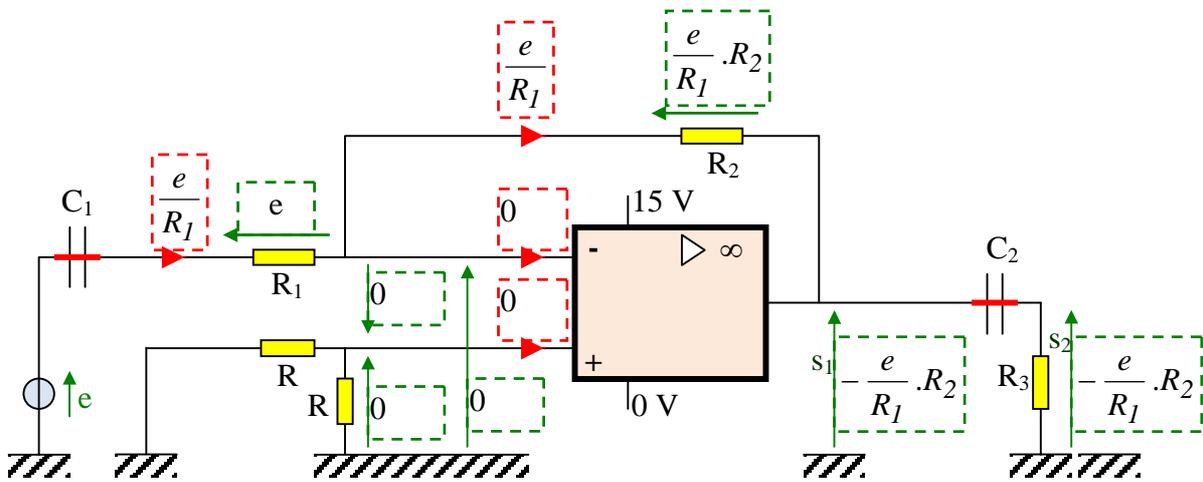
Corrigé :

a) L'AOP ci-dessous peut fonctionner en régime linéaire car sa sortie est rebouclée sur son entrée « - »

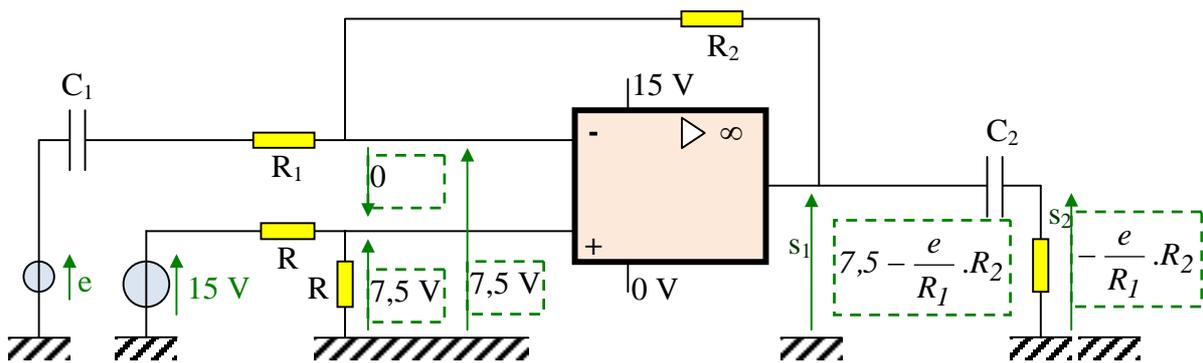
3 pts

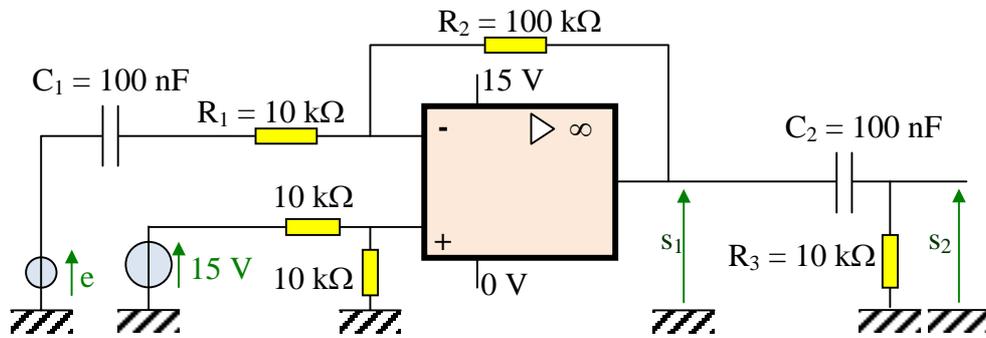


3 pts



2 pts



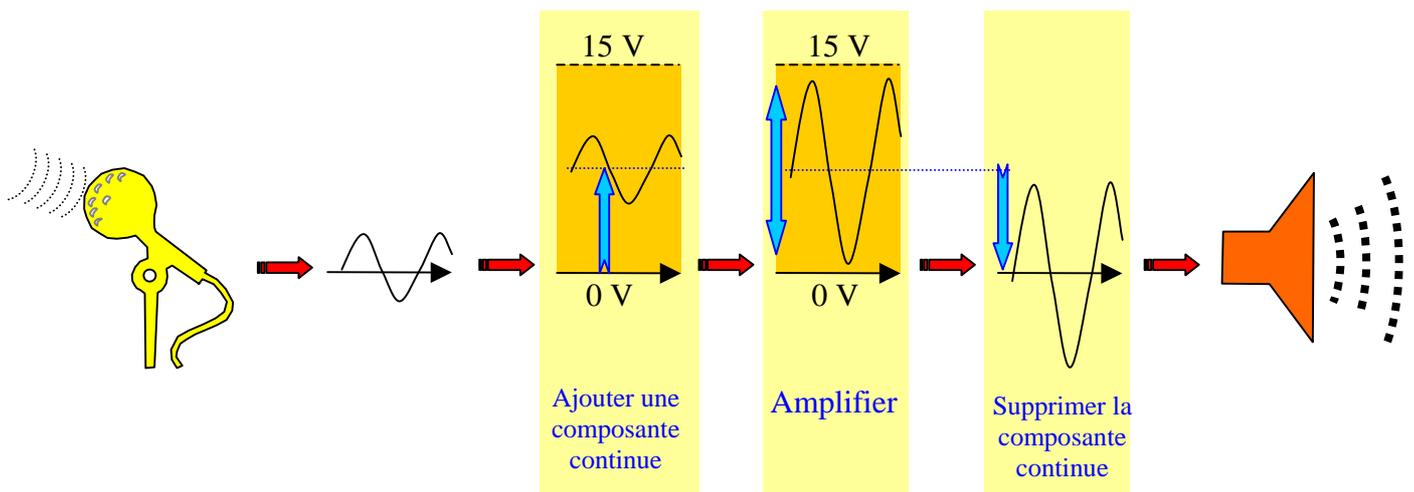


$$e(t) = 0,5 \cdot \cos(6000 \cdot \pi \cdot t) \Rightarrow s_1(t) = 7,5 - \frac{e \cdot R_2}{R_1} = 7,5 - 5 \cdot \cos(6000 \cdot \pi \cdot t) \text{ et } s_2(t) = -5 \cdot \cos(6000 \cdot \pi \cdot t) \quad 1\text{pt}$$

La tension $s_1(t)$ est bien comprise entre les tensions d'alimentation : $0 < 2,5 \text{ V} < s_1(t) < 12,5 \text{ V} < 15 \text{ V}$. Il n'y a donc pas de saturation. 1pt

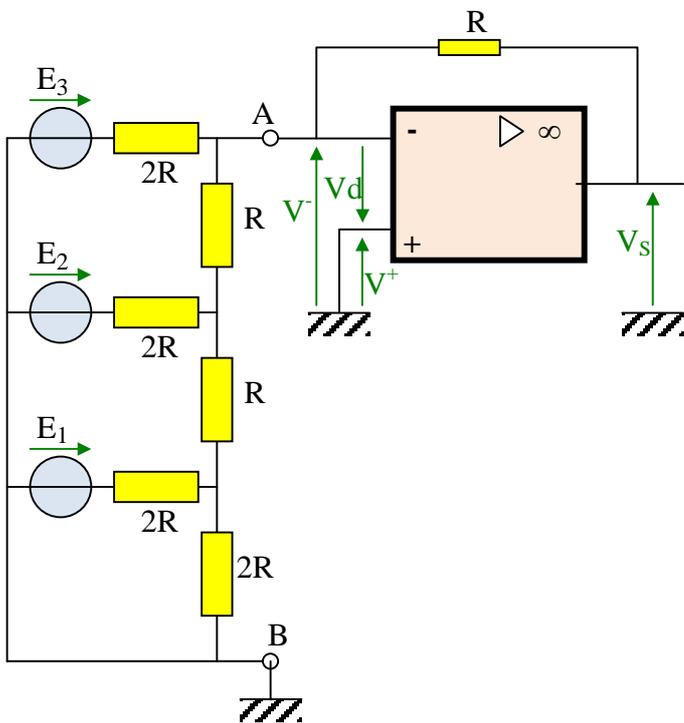
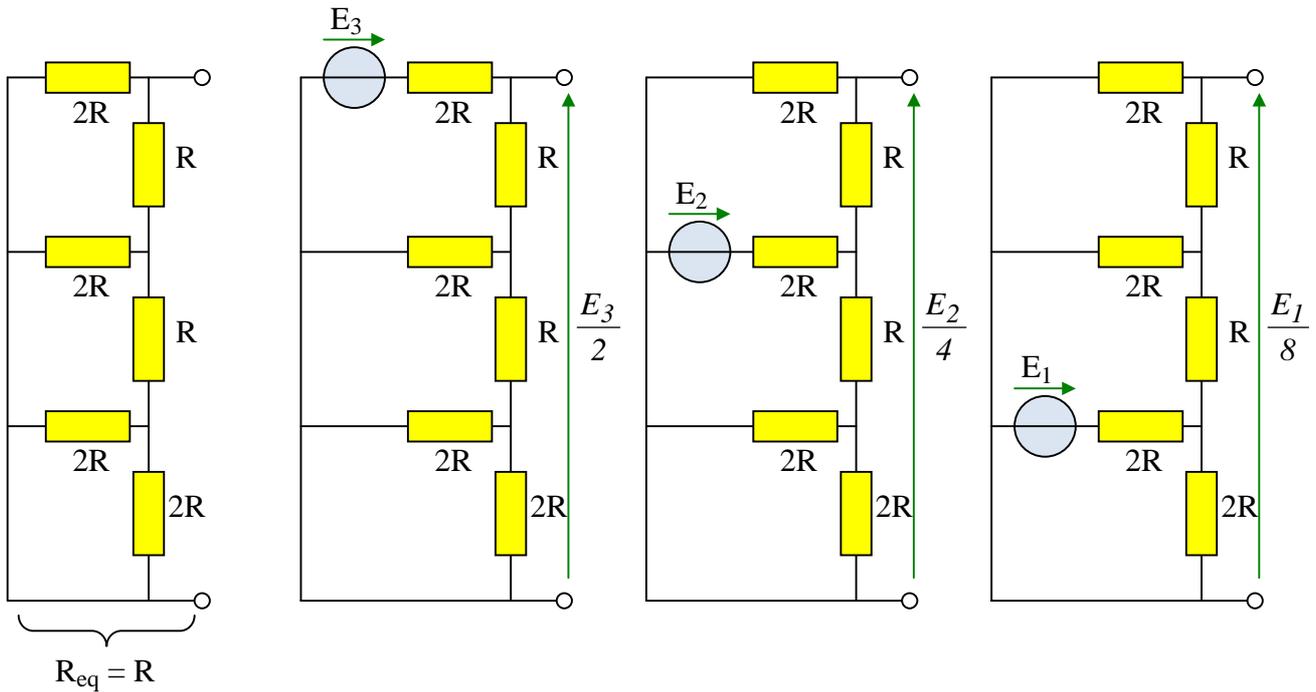
Le montage constitue un amplificateur inverseur de gain 10 alimenté en monotension.

Principe de l'amplification monotension alimenté en 0/15V:



7. Convertisseur N/A (4,5 pts)

On rappelle les résultats suivants (On ne demande pas de les redémontrer). (Les résistances « 2R » ont une valeur double des résistances « R »)



A partir des résultats rappelés ci-dessus, déterminer le modèle équivalent de Thévenin du dipôle « A-B » (à gauche des points A et B ci-contre). Expliquer la démarche en quelques mots.

Redessiner le schéma ci contre en remplaçant le dipôle « A-B » par son modèle équivalent de Thévenin. En déduire V_s en fonction de E_1 , E_2 et E_3

E_1 , E_2 et E_3 sont des tensions issues des sorties d'un circuit numérique. Elles peuvent prendre seulement deux valeurs : 0 ou V_{cc} . On écrit : $E_1 = a_1 \cdot V_{cc}$, $E_2 = a_2 \cdot V_{cc}$ et $E_3 = a_3 \cdot V_{cc}$ avec les variables numériques a_1 , a_2 et a_3 qui peuvent prendre les valeurs 0 ou 1.

Compléter l'expression de la tension V_s en fonction de a_1 , a_2 et a_3 sous la forme

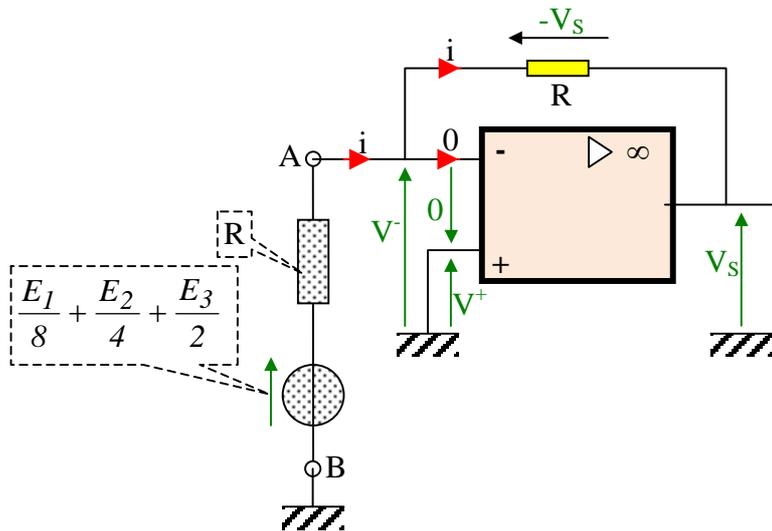
$$V_s = -\frac{V_{cc}}{8} \cdot \left(\dots \dots \dots \right)$$

Corrigé :

* En appliquant le **théorème de superposition**, la tension aux bornes du dipôle AB à vides est

$$V_{AB} = \frac{E_1}{8} + \frac{E_2}{4} + \frac{E_3}{2}. \text{ C'est sa tension équivalente de Thévenin.} \quad \text{0.5pt}$$

* La résistance équivalente du dipôle AB est la résistance vue entre ses bornes lorsque les sources indépendantes (E_1 , E_2 et E_3) sont remplacées par leur résistance interne. Donc $R_{eq} = R$ 0.5pt



* $i = \frac{E_1}{8} + \frac{E_2}{4} + \frac{E_3}{2}$ et $i = \frac{-V_s}{R}$. Donc

$$V_s = -\left(\frac{E_1}{8} + \frac{E_2}{4} + \frac{E_3}{2}\right) \quad \text{2pt}$$

* $V_s = -\frac{V_{cc}}{8} \cdot (a_1 + 2.a_2 + 4.a_3)$ 1pt

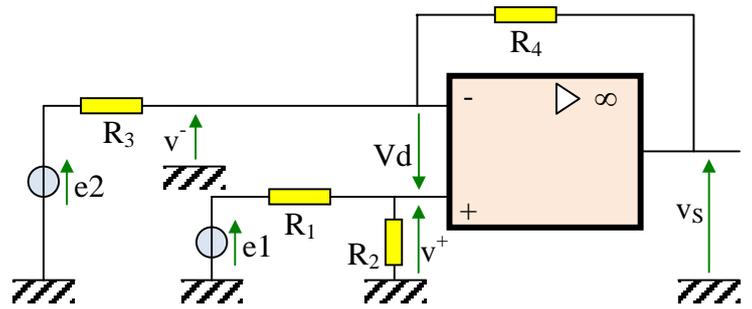
Nous obtenons un convertisseur numérique/analogique de trois bits. La résistance équivalente vue de la sortie de l'amplificateur opérationnel est nulle.

On peut généraliser la méthode sur n bits. On appelle ce type de convertisseur un CNA R/2R

8. Montage à amplificateur opérationnel à 2 entrées (4 pts)

On adoptera le modèle idéal pour l'amplificateur opérationnel ci-contre.

- A quoi reconnaît-on que le montage peut fonctionner en régime linéaire ?
- Exprimer V^+ en fonction de e_1 et des résistances présentes dans le montage.
- Exprimer V^- en fonction de e_2 , v_s et des résistances présentes dans le montage.
- En déduire, lorsque le fonctionnement est linéaire, v_s en fonction de e_1 , e_2 et des résistances du montage.
- Que devient cette relation lorsque $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$?



Corrigé :

Modèle idéal : $i^+ = i^- = 0$

La sortie est rebouclée sur l'entrée « - » donc l'amplificateur opérationnel fonctionne en régime linéaire tant qu'il n'est pas saturé.

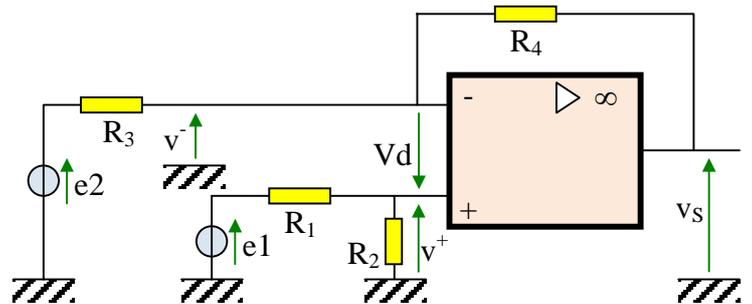
$$V^+ = \frac{e_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \text{ Pont diviseur de tension}$$

$$V^- = \frac{e_2 \cdot R_4 + v_s \cdot R_3}{R_3 + R_4} \text{ Théorème de superposition ou théorème de Millman}$$

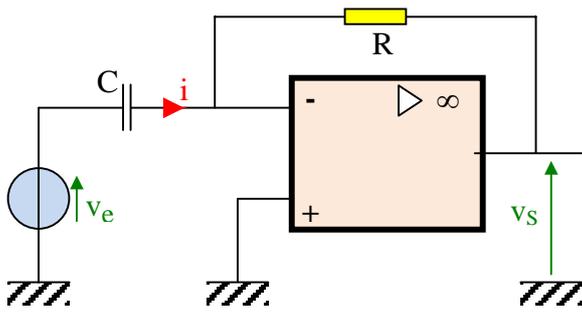
$$Vd = 0 \Leftrightarrow V^+ = V^- \Leftrightarrow \frac{e_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{e_2 \cdot R_4 + v_s \cdot R_3}{R_3 + R_4} \Leftrightarrow v_s = \left(\frac{e_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} - \frac{e_2 \cdot R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot \frac{R_3 + R_4}{R_3}$$

$$\text{Ou } v_s = e_1 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) - e_2 \cdot \frac{R_4}{R_3}$$

Lorsque $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$: $v_s = e_1 - e_2$. C'est la fonction soustracteur.



9. Montages à AOP avec un condensateur en régime quelconque (2 pts)



L'amplificateur opérationnel ci-contre est supposé idéal non saturé.

Exprimer la relation entre $\frac{d(v_e(t))}{dt}$ et $v_s(t)$.

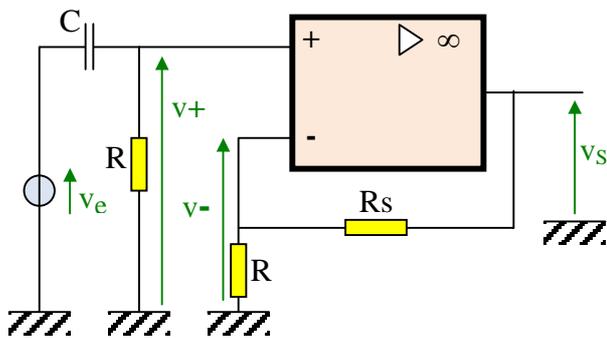
Quelle est la fonction réalisée par ce montage ?

Corrigé :

$$i = C \cdot \frac{d(v_e(t))}{dt} = \frac{-v_s(t)}{R} \Leftrightarrow \frac{d(v_e(t))}{dt} = -\frac{v_s(t)}{R \cdot C} \quad \text{1,5pt}$$

Ce montage est un « dérivateur » 0,5pt

10. Filtre à amplificateur opérationnel en régime alternatif sinusoïdal (4pts)



On suppose l'amplificateur opérationnel ci-contre idéal et en régime linéaire.

Soit $v_e(t) = V_{max} \cdot \cos(\omega \cdot t)$, on lui associe le complexe

$$\underline{V_e} = V_{max} \cdot e^{-j0}$$

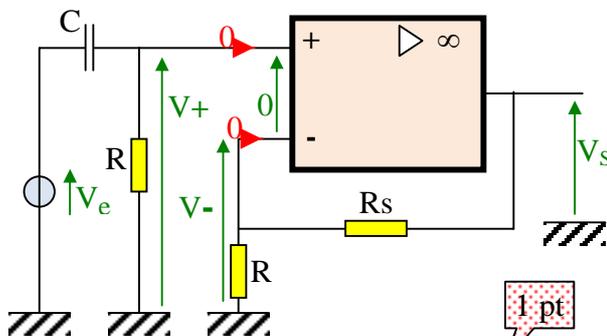
Les deux résistances « R » ont le même nom et donc la même valeur.

Exprimer $\underline{V_+}$ en fonction de $\underline{V_e}$ et des impédances de R et C

Exprimer $\underline{V_-}$ en fonction de $\underline{V_s}$ et des impédances de R et R_s

En déduire le rapport complexe $\frac{\underline{V_s}}{\underline{V_e}}$ en fonction des impédances des éléments du montage

Corrigé :



En appliquant la formule du pont diviseur de tension sur chaque entrée de l'AOP :

$$\underline{V_+} = \frac{\underline{V_e} \cdot R}{R + \frac{1}{j \cdot C \cdot \omega}} = \frac{\underline{V_e} \cdot j \cdot RC \cdot \omega}{j \cdot RC \cdot \omega + 1} \quad \text{1 pt}$$

$$\underline{V_-} = \frac{\underline{V_s} \cdot R}{R + R_s} \quad \text{1 pt}$$

$$\underline{V_d} = 0 \Leftrightarrow \underline{V_+} = \underline{V_-} \Leftrightarrow \frac{\underline{V_e} \cdot j \cdot RC \cdot \omega}{j \cdot RC \cdot \omega + 1} = \frac{\underline{V_s} \cdot R}{R + R_s} \Leftrightarrow \frac{\underline{V_s}}{\underline{V_e}} = \frac{j \cdot RC \cdot \omega \cdot (R + R_s)}{(j \cdot RC \cdot \omega + 1) \cdot R} = \frac{j \cdot C \cdot \omega \cdot (R + R_s)}{1 + j \cdot RC \cdot \omega} \quad \text{1 pt}$$

11. Autres filtres à AOP :

Voir dans le chapitre « 05-Bode »