

L'amplificateur opérationnel ou A.O. est un circuit "bourré" de transistors, mais vu de l'extérieur, il présente des caractéristiques quasi idéales examinées dans le cours.

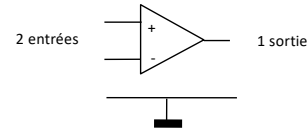
Il sera exploité telle une boîte noire, grâce à laquelle, une énorme quantité de fonctionnalités électroniques seront analysées et facilement mises en œuvre lors des laboratoires.

Les montages de base seront regroupés en plusieurs catégories.

## L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL (A.O.)

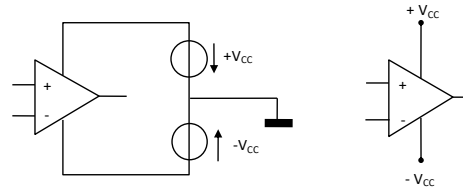
### Observations

Symbole



Structure interne de l'AO: Environ 20 transistors

Alimentation DC:  
 $V_{CC}$ , généralement de  
l'ordre de 15 à 18 V



2

L'A.O. est un "amplificateur différentiel", c'est à dire qu'il amplifie la différence de potentiel existant entre deux signaux appliqués sur deux bornes appelées  $V_+$  et  $V_-$ .

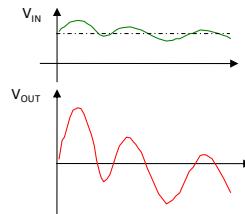
Selon le type et les performances de l'A.O., le nombre de transistors est très variable. En général, on compte une vingtaine de transistors.

Outre ses deux entrées et sa sortie, il faut disposer de deux sources d'énergie symétriques  $+V_{CC}$  et  $-V_{CC}$  afin de réaliser une amplification. Généralement ces deux sources correspondent à des tensions comprises, en valeur absolue, entre 15 et 18V.

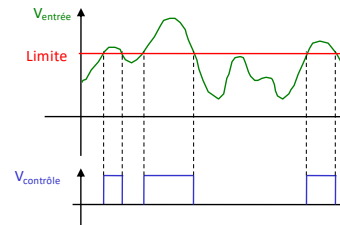
L'A.O. est en fait une puce à 8 pattes. Les autres pattes servent à compenser un certain nombre d'imperfections vues ultérieurement dans le cours. Dans sa vision idéale, seules les 5 pattes citées ( $V_+$ ,  $V_-$ , Sortie,  $+V_{CC}$  et  $-V_{CC}$ ) seront exploitées.

## Applications [1]

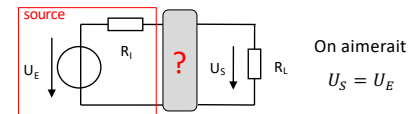
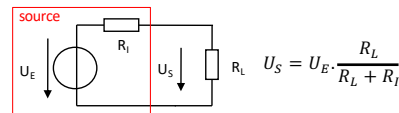
### Amplification



### Détecteur de seuil



### Adaptation d'impédance



3

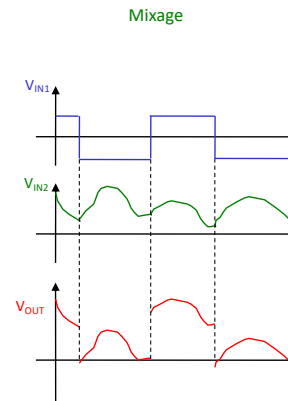
Les applications qui exploitent l'A.O. sont innombrables.

L'**amplification** est l'un des domaines les plus importants en électronique. Nous verrons qu'il est naturellement l'un des premiers étudiés avec l'A.O. et très facilement mis en œuvre.

La **détection de seuil** dont le principe a déjà été évoqué avec les diodes, permet de déclencher des actions lorsqu'un phénomène physique a atteint une certaine limite. Par exemple, le déclenchement d'un thermostat à une température donnée.

Une des applications les plus utiles est représentée par l'**adaptation d'impédance**. Elle se manifeste lorsqu'une source présente une impédance (résistance) interne dont la grandeur est comparable à la charge attaquée. Dans une telle configuration, la tension  $U_S$  qui est réellement exploitée par la charge devient bien inférieure à la tension  $U_E$  de la source (diviseur résistif). L'adaptation d'impédance, dans sa vision idéale, permet d'exploiter toute la tension  $U_E$  sur la charge. Le principe du montage doit permettre d'assimiler la résistance interne de la source à une résistance nulle vis à vis de la charge, ou de considérer la charge comme infinie vis à vis de la résistance interne.

## Applications [2]



Analyses mathématiques  
(dérivées, intégrales)

Fonctions arithmétiques  
(Exp, log, sh, ch,  $y^x$ )

Filtres actifs  
(passe-bas, passe-haut, passe-bande, coupe-bande)

Redresseurs

Modulation (AM - Somme, FM - Produit)

Générateurs de signaux (carrés, triangles)

Bascules

Oscillateurs (sin - orgue électrique)

4

D'autres domaines exploitent l'A.O.

Le mixage qui correspond à la somme de plusieurs signaux est très utile dans le domaine de l'audio.

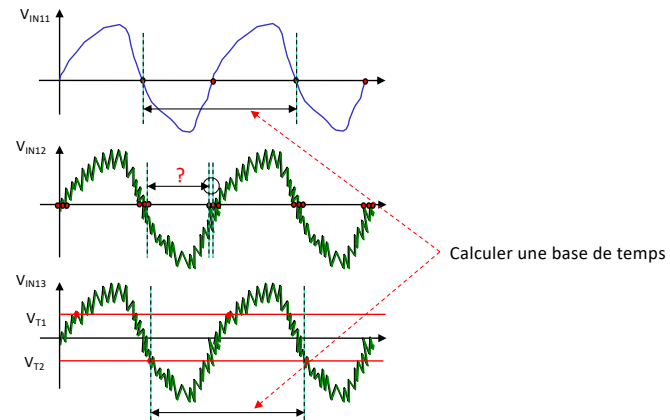
Des disciplines dont on ne soupçonnait pas la moindre relation avec l'électronique peuvent être traitées grâce à l'A.O. C'est le cas en particulier des mathématiques.

Des circuits ou des concepts déjà vus en électronique seront améliorés avec l'A.O.

Des domaines de l'électronique, apparemment délicats, trouveront des résolutions simples avec l'A.O.

## Applications [3]

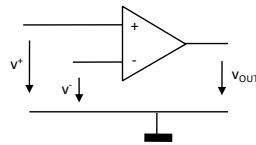
### Triggers



5

Le Trigger est un type de circuit particulièrement intéressant, dont on a évoqué l'existence dans les oscilloscopes. Il permet de synchroniser le balayage de l'oscilloscope sur le signal utile à analyser et non pas sur le bruit.

## Propriétés idéales de l'A.O.



$$V_{out} = A(v^+ - v^-)$$

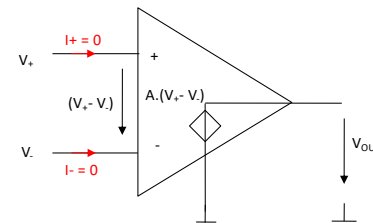
$$A \rightarrow \infty \quad (A > 100.000)$$

$$Z_{out} = 0$$

$$Z_{in} = \infty$$

si  $v^+ = v^-$ ,  $V_{out} = 0$ .

- L'ampli. différentiel amplifie aussi bien les signaux continus (DC) qu'alternatifs (AC).



Circuit équivalent de l'AO idéal

6

Outre sa fonction d'amplificateur différentiel, l'A.O. présente 3 caractéristiques fondamentales:

- le gain  $A_v$
- l'impédance d'entrée  $Z_{IN}$
- l'impédance de sortie  $Z_{OUT}$

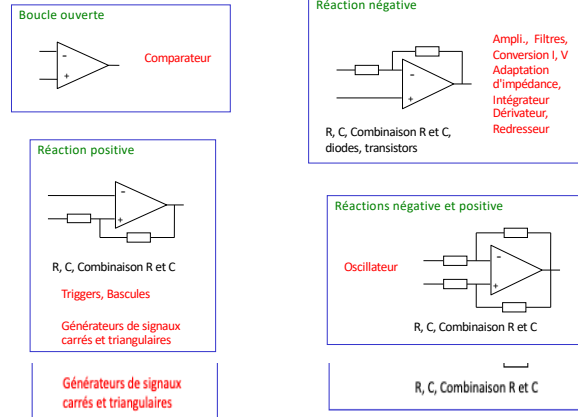
Dans la vision idéale, les trois caractéristiques sont respectivement infini, infini et nulle.

$Z_{IN} = \infty$  se traduit par des courants d'entrée  $i^+$  et  $i^-$  nuls.

C'est une conséquence importante pour la suite.

## A.O. les différentes familles de montages

### A.O. les différentes familles de montages



7

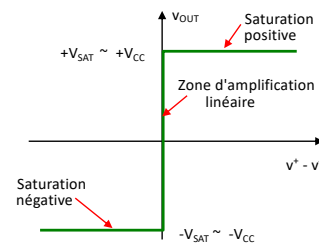
7

Quatre types de montages seront analysés. Chaque type étant associé à des domaines d'application spécifiques.

L'environnement qui complète l'A.O. est fondamental pour spécifier la nature de l'application souhaitée.

Cet environnement implique une combinaison de composants, principalement des résistances, des capacités, des diodes et des transistors, interconnectés selon des configurations particulières.

## L'ampli. opérationnel en boucle ouverte

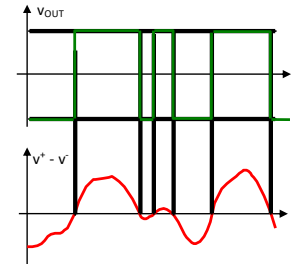


### Zone linéaire

$V_{out} = A(v^+ - v^-)$   
avec  $A = \infty$  on a  $v^+ - v^- = 0$

### Zone de saturation

$V_{out} = \pm V_{sat} \approx \pm V_{CC}$



Fonctionnement de l'AO en boucle ouverte :  
Fonctionnement en **comparateur**

8

Si le gain était infini, le moindre écart (un  $\varepsilon$ ) entre  $v^+$  et  $v^-$  sature la sortie ( $+V_{CC}$  ou  $-V_{CC}$  qui ne peuvent être dépassées - limites en tension du montage).

Avec un gain non infini (circuit réel), il est possible de mettre en évidence une gamme (très restreinte) de différence de tension ( $v^+ - v^-$ ), donnant une sortie non saturée. La zone mettant en évidence ce type de tension de sortie, s'appelle la zone d'amplification linéaire.

Compte tenu de son gain très élevé, l'usage d'un A.O. en boucle ouverte, est très utile pour réaliser des comparateurs de deux signaux  $v^+$  et  $v^-$ .

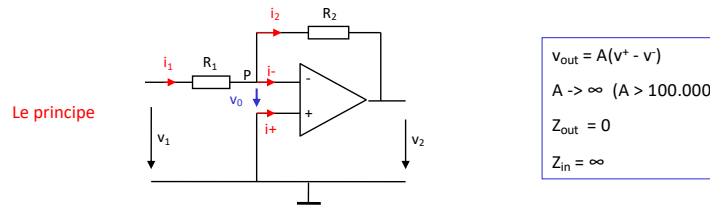
Si  $v^+ > v^-$  alors la sortie vaut  $+V_{CC}$

Si  $v^+ < v^-$  alors la sortie vaut  $-V_{CC}$

C'est pratiquement un comparateur logique qui vient d'être décrit.



## La réaction négative ou "contre-réaction"



### Réflexes

- 1)  $i^+ = i^- = 0 \Rightarrow i_1 = i_2$
- 2) Il faut admettre :  $v_0 \approx 0$  et  $v_2 = A(v_+ - v_-) = A.v_0$

9

La réaction négative est probablement le type de montage le plus important. Il repose sur un concept (la contre-réaction) qui n'est pas si simple, mais dont on exploitera les propriétés.

Si un chemin permet de relier électriquement la sortie de l'A.O. à la borne négative de l'A.O., alors on peut parler de réaction négative.

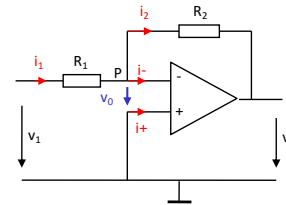
Le montage le plus simple à étudier en réaction négative est constitué de deux résistances. La borne "+" est reliée à la masse et l'entrée  $v_1$  est reliée à la résistance  $R_1$ . La réaction est assurée par la résistance  $R_2$  qui relie électriquement la sortie et la borne "-".

On admettra par la suite, au même titre que  $U = RI$  est admis, que dans cette configuration, la différence de potentiel entre  $v_+$  et  $v_-$  est quasiment nulle.

Il faudra adopter un certain nombre de **réflexes** pour démontrer les applications qui utilisent ce type de construction.

## MONTAGE LINÉAIRE À GAIN CONSTANT EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE

Amplificateur inverseur



En effet, on exploite deux réflexes

1.  $i_+ = i_- = 0$  et  $i_1 = i_2$
2.  $v_0 = -v_2/A \rightarrow 0$  (négligeable)

On pose :  $i_2 = \frac{(v_0 - v_2)}{R_2} = -\frac{v_2}{R_2}$  et  $i_1 = \frac{(v_1 - v_0)}{R_1} = \frac{v_1}{R_1}$

On trouve finalement:

$$\frac{v_2}{v_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Gain:

- négatif,
- réduit ( $\ll A$ ),
- indépendant de A

Le nœud P est une masse virtuelle

$$\underline{Z}_{IN} = \frac{v_1}{i_1} = R_1$$

10

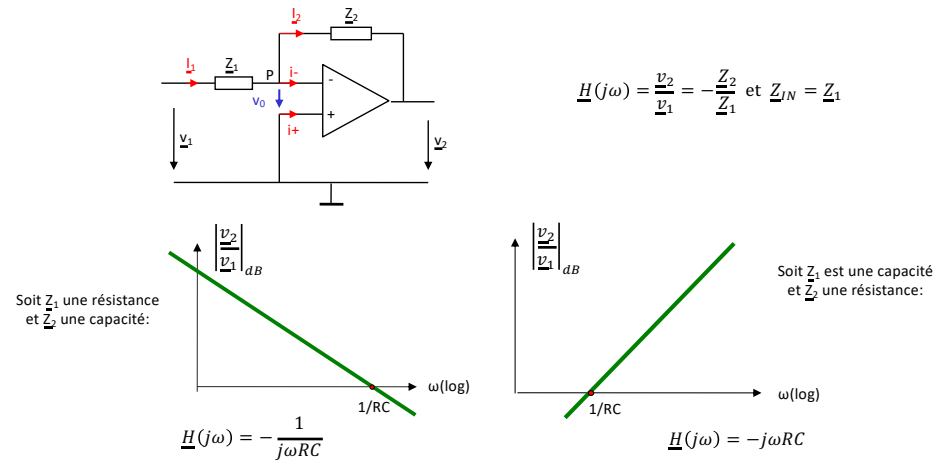
Avec le montage de base, on démontre aisément qu'il s'agit d'un amplificateur à gain constant quelle que soit la fréquence.

Le gain fait apparaître un signe "-" indiquant un déphasage de  $\pi$  entre la sortie et l'entrée.

Puisqu'il n'y a pas de différence de potentiel entre les bornes "+" et "-" on dira que v- est une masse virtuelle.

Enfin, l'impédance d'entrée du montage se dégrade car elle n'est plus infinie (comme dans l'A.O. isolé) mais vaut  $R_1$ .

## Réaction négative avec des impédances (voir semaine suivante)

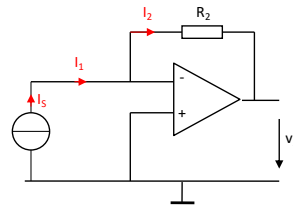


11

Pour anticiper le cours de la prochaine séance, on substitue les résistances  $R_1$  et  $R_2$ , par des impédances. Le gain est alors remplacé par l'expression d'une fonction de transfert.

Dans le cas où l'on combine une résistance avec un condensateur, on obtient, selon le placement des deux composants, un intégrateur et un dérivateur.

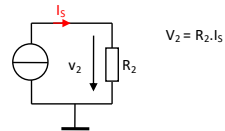
## Conversion courant/tension



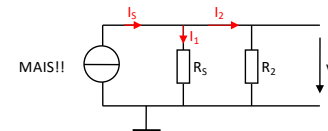
$$I_S = I_1 = I_2$$

$$I_2 = -\frac{v_2}{R_2} \Rightarrow v_2 = -R_2 \cdot I_S$$

Pourquoi ne pas avoir réalisé la conversion courant tension à l'aide d'une simple résistance, puisque, par application de la loi d'Ohm, on aurait directement :



$$V_2 = R_2 \cdot I_S$$



$$I_2 = I_S \cdot \frac{R_S}{R_S + R_2} \text{ et } v_2 = R_2 \cdot I_2 = I_S \cdot \frac{R_2 \cdot R_S}{R_S + R_2}$$

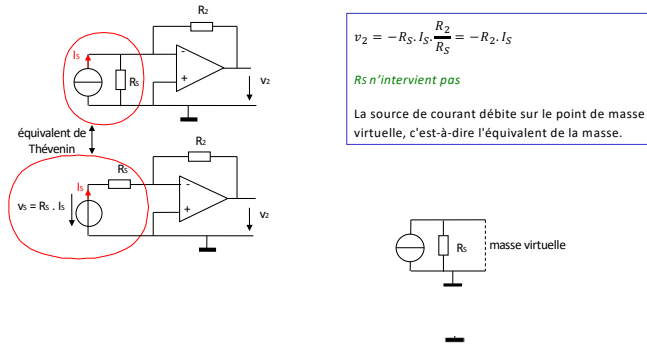
12

Si une source génère un courant, il est très simple de convertir ce courant en tension avec le principe de la réaction négative.

Cette conversion aurait pu être réalisée via la loi d'ohm, donc via une simple résistance, mais à condition uniquement que la source soit parfaite, ou encore que sa résistance interne soit infinie.

## Conversion courant/tension: Avec l'Ampli. Op.

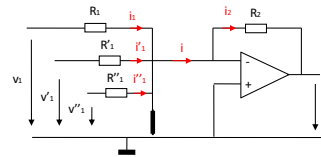
### Conversion courant/tension: Avec l'Ampli. Op.



Avec une réaction négative, on démontre que quelle que soit l'ordre de grandeur de la résistance de source, celle-ci n'intervient pas dans l'expression de la conversion. Cette résistance n'absorbe aucun courant car est virtuellement court-circuitée à la masse. Le courant passe alors dans le court-circuit.

## Le sommateur

### Le sommateur



$$i_1 = \frac{v_1}{R_1}, i'_1 = \frac{v'_1}{R'_1}, i''_1 = \frac{v''_1}{R''_1} \quad v_2 = -R_2 \cdot I_2 = -R_2 \cdot I$$

$$i = i_1 + i'_1 + i''_1 + \dots = \frac{v_1}{R_1} + \frac{v'_1}{R'_1} + \frac{v''_1}{R''_1} + \dots \quad v_2 = -R_2 \cdot \left[ \frac{v_1}{R_1} + \frac{v'_1}{R'_1} + \frac{v''_1}{R''_1} + \dots \right]$$

$$\begin{bmatrix} v_1 & v'_1 & v''_1 & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & \frac{1}{R'_1} & \frac{1}{R''_1} & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -R_2 \end{bmatrix}$$

14

14

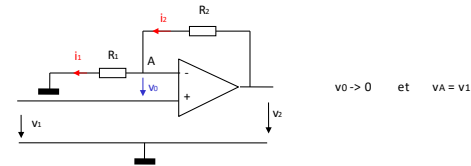
Grâce au théorème de superposition, on démontre qu'avec différents signaux connectés au montage A.O. (via des résistances), on obtient une somme **pondérée** de ces signaux. La pondération dépend du choix des résistances  $R_1, R'_1, R''_1, \dots$  et de la résistance  $R_2$  placée dans la réaction.

Au même titre que l'amplificateur inverseur, le sommateur présente un déphasage de  $\pi$  entre sortie et entrée. Nous dirons qu'il donne une somme de signaux d'entrée pondérés négativement.

Remarque: Tous les signaux d'entrée débitant sur le point de masse virtuel, dont le potentiel est fixe et proche de zéro, ils ne s'influencent pas l'un l'autre.

## Ampli non-inverseur

### Ampli non-inverseur



$$v_0 \rightarrow 0 \quad \text{et} \quad v_A = v_1$$

$$\left. \begin{array}{l} i_2 = \frac{(v_2 - v_1)}{R_2} \\ i_1 = \frac{v_1}{R_1} \end{array} \right\} i_1 = i_2 \quad \frac{(v_2 - v_1)}{R_2} = \frac{v_1}{R_1} \Rightarrow \frac{v_2}{R_2} = v_1 \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

$$A_V = \frac{v_2}{v_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

- 1 gain positif > 1
- 2  $Z_{in} \rightarrow \infty$  :  
Ce point est un avantage vis-à-vis de l'ampli. inverseur
- 3 cas particulier très important :  $R_1 \rightarrow \infty \quad R_2 = 0$

15

$$v_1 \quad R_1$$

- 3 cas particulier très important :  $R_1 \rightarrow \infty \quad R_2 = 0$

15

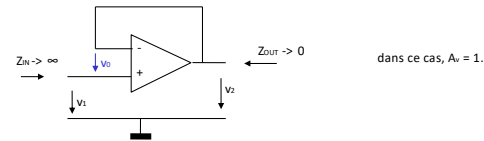
Avec le circuit analysé précédemment, il est possible de permuter l'entrée V1 (connectée sur la borne "-") et la masse (connectée à R1).

On obtient alors un amplificateur dont les propriétés sont les suivantes:

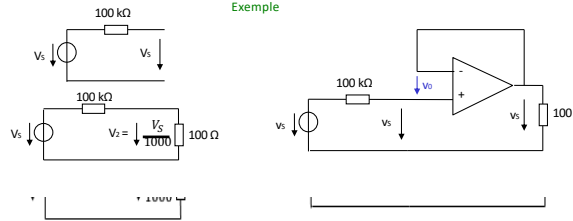
- le gain est toujours supérieur ou égal à 1
- il n'y a plus de déphasage entre la sortie et l'entrée, ce qui justifie le nom de l'amplificateur non inverseur.
- l'impédance d'entrée du montage (directement connectée sur la borne "-") est dorénavant infinie, comme dans la vision idéale de l'A.O.

## le "suiveur de tension" ou "voltage follower"

### le "suiveur de tension" ou "voltage follower"



Exemple



16

16

Un cas particulier du montage non inverseur s'appelle le suiveur en tension.

La résistance R1 est remplacée par un circuit ouvert et la résistance R2 est remplacée par un court-circuit. Le gain vaut alors 1.

Quel est l'intérêt d'un tel circuit et pourquoi ne pas le remplacer par un simple fil?

En fait il s'agit d'un adaptateur d'impédance évoqué en début de cours. Son impédance d'entrée étant infinie et son impédance de sortie étant nulle (vision idéale), la tension de source est entièrement appliquée sur la charge, quel que soit le rapport des résistances de source et de charge.

- 1)  $Z_{IN}$  infinie permet de préserver  $V_S$  à l'entrée du suiveur.
- 2) La réaction négative garantit virtuellement  $V_S$  sur la borne "-", donc aussi à la sortie de l'A.O.
- 3) Comme l'impédance de sortie de l'A.O. est nulle,  $V_S$  n'est pas dégradée par la charge, quelle que soit la valeur de celle-ci.

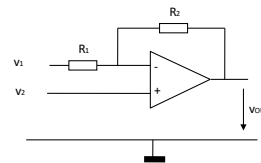


## Cas général

### Cas général

Les 2 entrées de l'ampli. sont utilisées simultanément.  
Le principe de superposition est applicable, puisqu'on est en régime linéaire.

Résultats de l'ampli inverseur et non-inverseur



$$V_{OUT} = V_2 \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} - V_1 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$V_{OUT} = V_2 \cdot \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - V_1 \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

17

17

Le cas général permet de combiner (via le théorème de superposition) les expressions des montages inverseurs et non inverseurs.

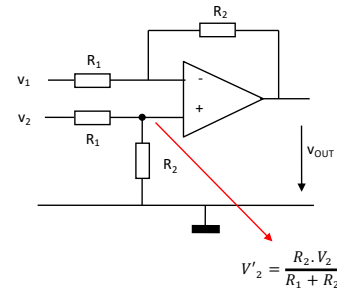
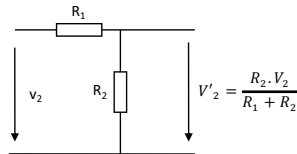
Il faut pour cela deux entrées respectivement sur la résistance R1 (idem montage inverseur) et sur la borne "+" (idem montage non inverseur).

Remarque: Pourquoi a-t-on le droit d'exploiter le théorème de superposition.  
Parce que le circuit complet est linéaire.

## Application : l'amplificateur différentiel

On souhaite obtenir une relation du type  $v_{out} = A_D (v_2 - v_1)$

Le gain  $V_2 \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1}$  doit être multiplié par  $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$  pour trouver le facteur  $\frac{R_2}{R_1}$  (idem  $V_1 \cdot \frac{R_2}{R_1}$ )



$$V_{OUT} = (V_2 - V_1) \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

et Impédance d'entrée différentielle  $Z_{in} = 2 R_1$

18

Il est très facile à partir du circuit précédent de réaliser un différentiateur (ou ampli différentiel) donnant  $v_{OUT} = A_D (v_2 - v_1)$ , très utile en instrumentation.

Il faut simplement rajouter un diviseur résistif  $R_2, R_1$  avec des résistances identiques à celles figurant dans la réaction négative.

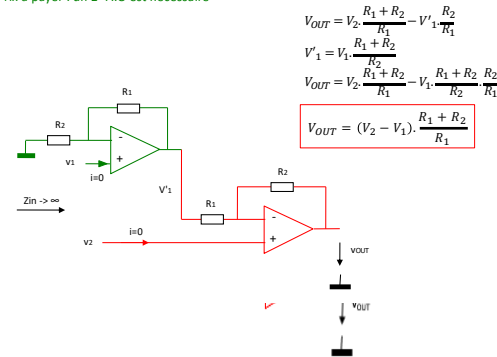
On obtient  $A_D = R_2/R_1$

Le seul défaut de ce montage est lié à l'impédance d'entrée différentielle qui n'est pas infinie (en fait  $Z_{IN} = 2R_1$ )

## Amplificateur différentiel - variante à deux A.O.

### Amplificateur différentiel - variante à deux A.O. avec impédance d'entrée infinie

Prix à payer : un 2<sup>e</sup> A.O est nécessaire



Le montage suivant permet d'améliorer l'impédance d'entrée de l'ampli différentiel.

Il est réalisé par la mise en cascade de deux montages amplificateurs:

- le premier est un montage non inverseur.
- le second est un montage "cas général" dont l'entrée "-" est reliée à la sortie du montage précédent.

La relation obtenue avec deux couples de résistances (R2, R1) correspond bien à l'expression du montage différentiel précédent.

Mais v1 et v2 attaquent respectivement les bornes "+" du premier montage et "+" du second montage, ce qui signifie que  $Z_{IN} = \infty$ .