

4.2 – Deux montages amplificateurs

Plan du module

- ▶ Plan du module

- ◆ 4.2.1 – Ampli non-inverseur
- ◆ 4.2.2 – Ampli inverseur
- ◆ 4.2.3 – Calcul rapide par le principe du zéro virtuel
- ◆ 4.2.4 – Analyse de la rétroaction
- ◆ (4.2.5 – Compléments sur la rétroaction)

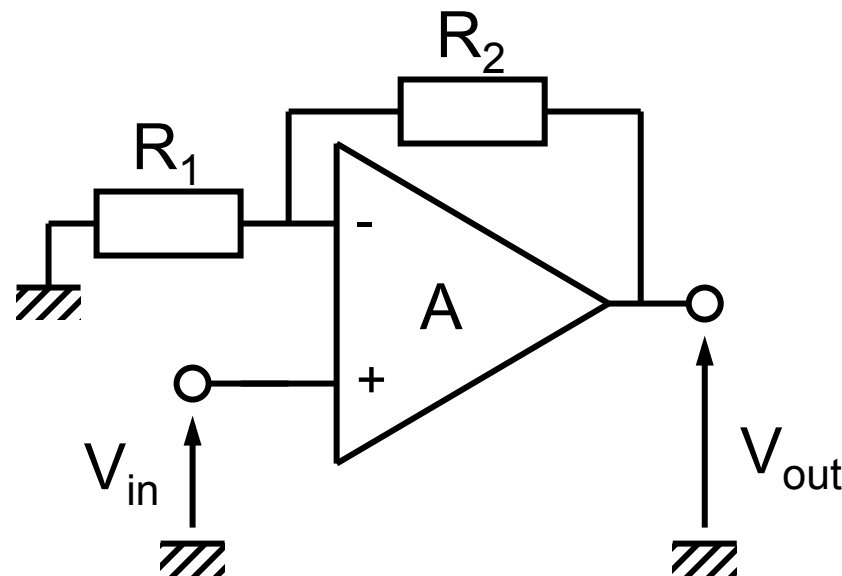
4.2.1 – L'ampli non-inverseur (calcul classique)

Introduction

- ▶ Dans le module 4.1.3, nous avons vu qu'un ampli-op ne s'utilise pas "tel quel" pour amplifier un signal
 - ◆ dans ce cas, on a en effet toutes les chances de le faire saturer
- ▶ Nous allons maintenant voir les deux montages de base qui sont utilisés pour amplifier un signal au moyen d'un ampli-op
 - ◆ le montage "amplificateur non-inverseur"
 - ◆ le montage "amplificateur inverseur"
- ▶ Nous en profiterons pour dégager une méthode de calcul des circuits à ampli-op
 - ◆ que nous appellerons méthode de calcul "classique"

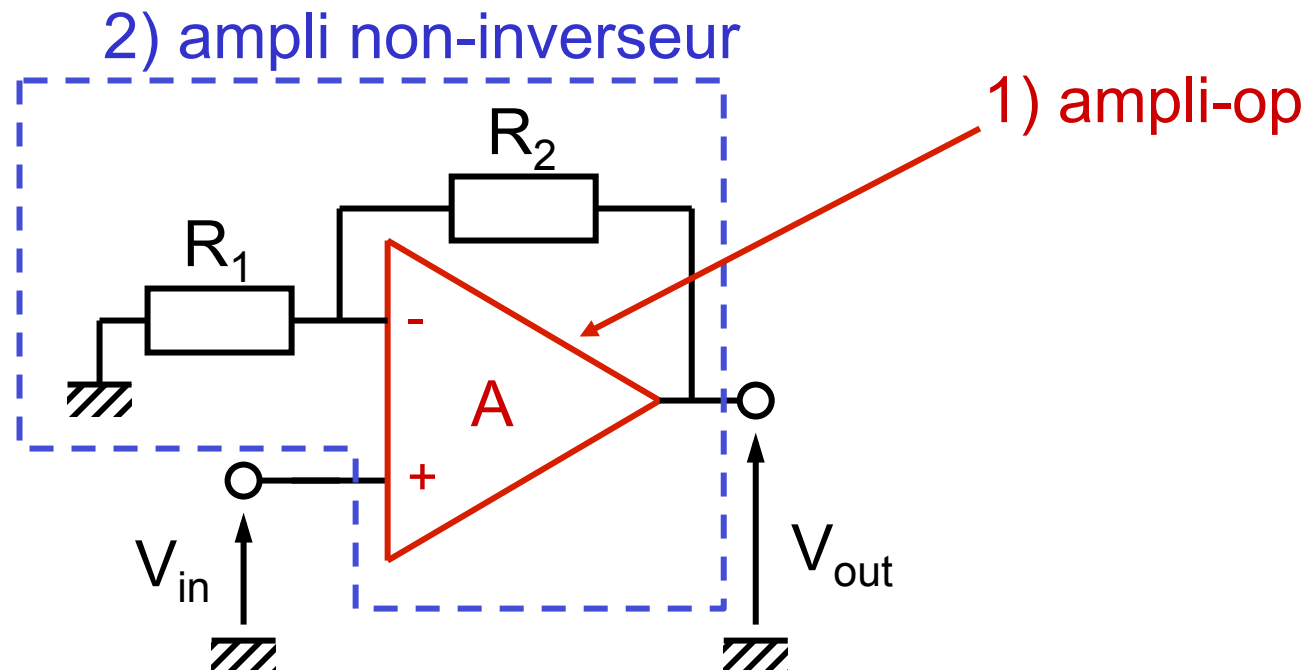
Schéma de l'amplificateur non-inverseur

- ▶ Voici le schéma d'un montage amplificateur non-inverseur
- ▶ Il s'agit simplement d'un ampli-op auquel on a ajouté deux résistances R_1 et R_2
- ▶ nous allons analyser ce montage un peu plus en détail



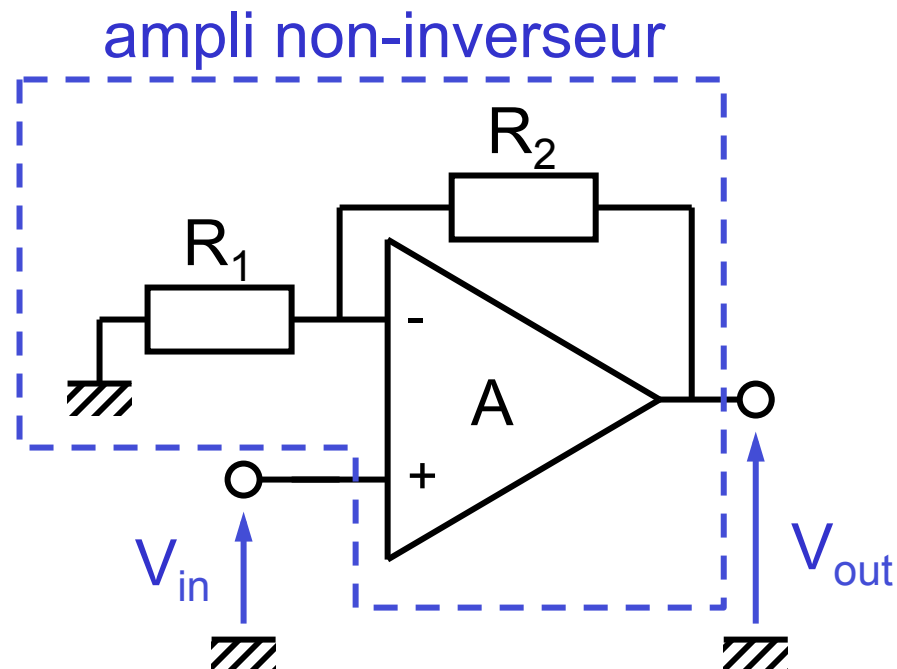
Montage $\triangleright\triangleleft$ composant

- ▶ Tout d'abord, il est fondamental de bien faire la différence entre deux "niveaux" différents dans ce schéma:
 - ◆ 1) **l'amplificateur opérationnel**
 - = composant
 - ◆ 2) le montage construit sur base de cet ampli opérationnel
 - = encadré pointillé contenant l'ampli-op et les deux résistances



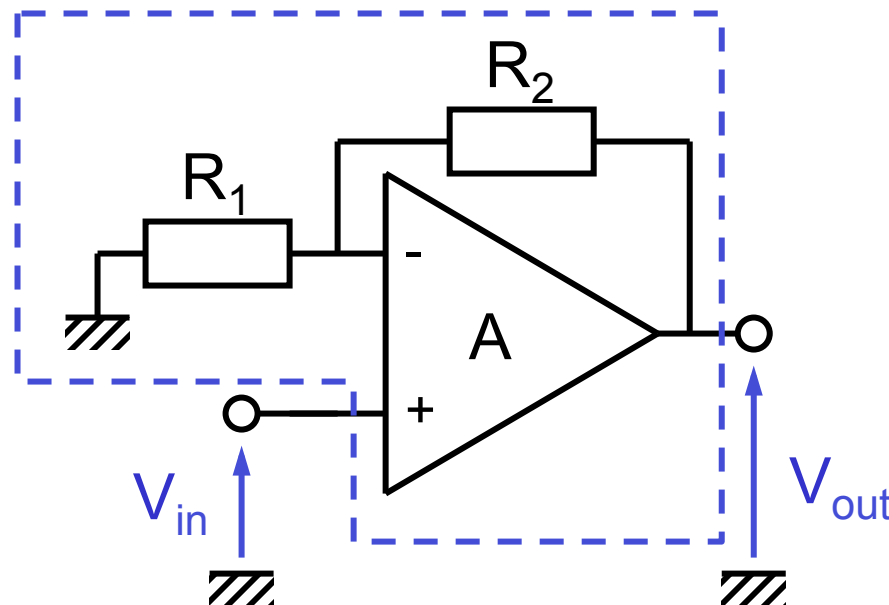
Montage >< composant

- ▶ C'est l'ensemble du montage qu'on appelle "amplificateur non-inverseur"
 - ◆ son signal d'entrée est V_{in}
 - ◆ son signal de sortie est V_{out}
 - ◆ ces deux tensions sont référencées à la masse
 - = non différentielles



Montage $\triangleright<$ composant

- ▶ Chacun des deux "niveaux" est un amplificateur (ampli-op et ampli non-inverseur) et possède ses propres propriétés
 - ◆ un gain
 - ◆ des signaux d'entrée et de sortie
 - N.B.: V_{out} est à la fois la sortie du montage et celle de l'ampli-op
 - ◆ des impédances d'entrée et de sortie
 - ◆ etc

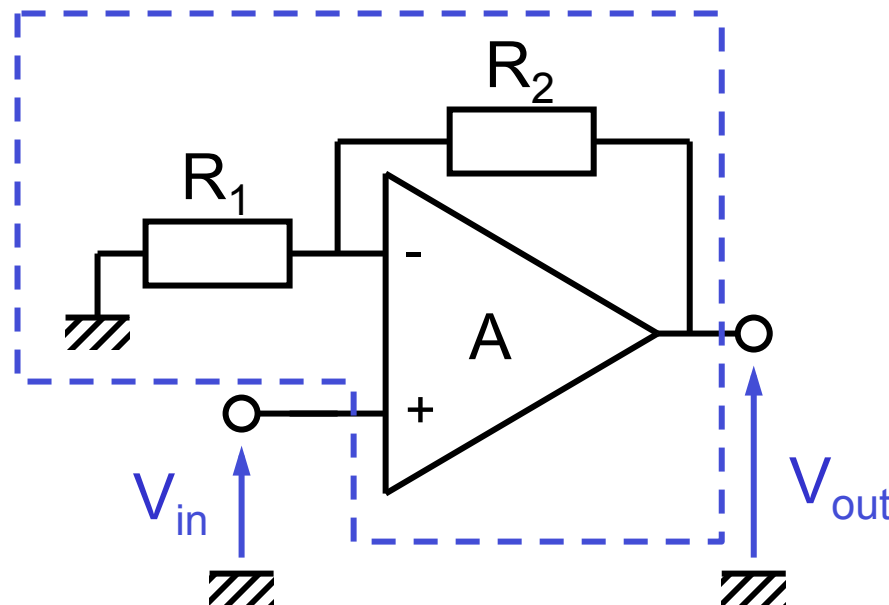


Montage $><$ composant



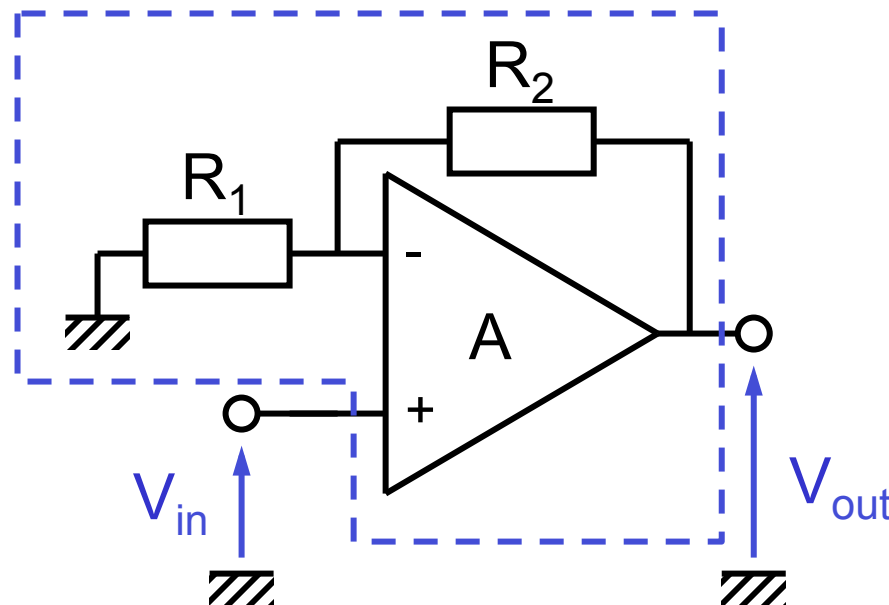
Montage $><$ composant: remarques

- ▶ Remarques...
- ▶ 1) Une distinction de ce type apparaîtra souvent dans les montages
- ▶ 2) Ne pas confondre les deux niveaux implique d'utiliser des notations distinctes
 - ◆ ex: dans le montage ci-dessous, il y a deux gains différents



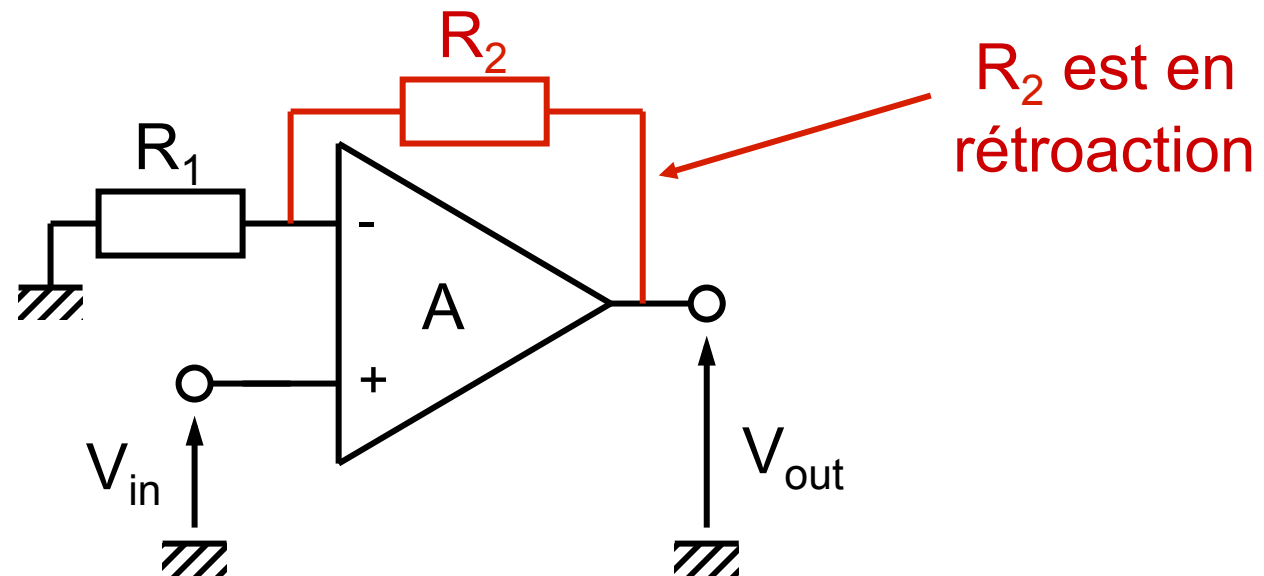
Montage >< composant

- ▶ Nous connaissons déjà les propriétés d'un ampli-op
 - ◆ cfr module 4.1
- ▶ Nous essayons maintenant de déduire du schéma ci-dessous les propriétés du montage
 - ◆ et en particulier le gain existant entre V_{in} et V_{out}



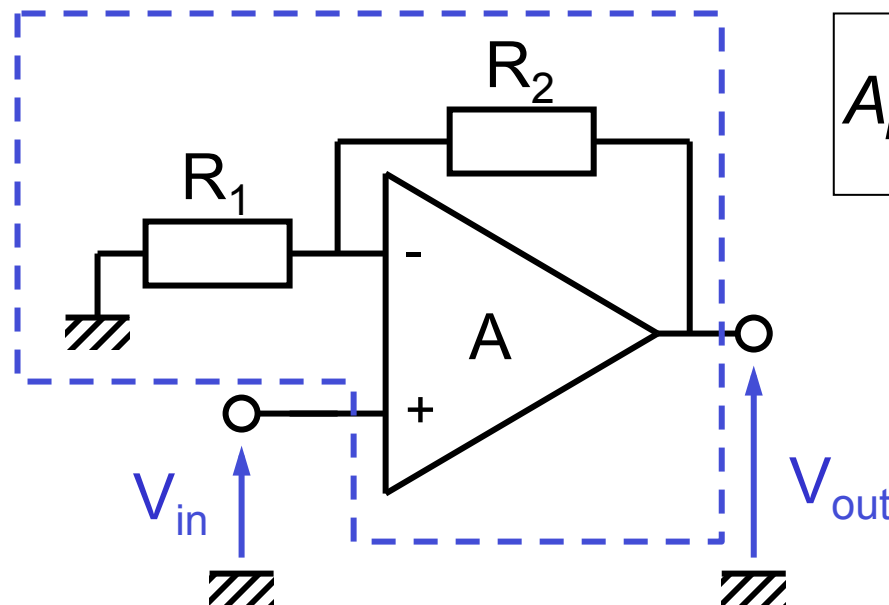
Analyse du schéma: résistance en rétroaction

- ▶ Avant de passer au calcul de ce schéma, notez la position des résistances:
 - ◆ R_2 est placée entre la sortie de l'ampli-op et son entrée inverseuse: un tel lien entre la sortie et l'entrée d'un composant est une "rétroaction"
 - nous y reviendrons...
 - ◆ R_1 est placée entre l'entrée inverseuse et la masse



Calcul du gain A_{non_inv}

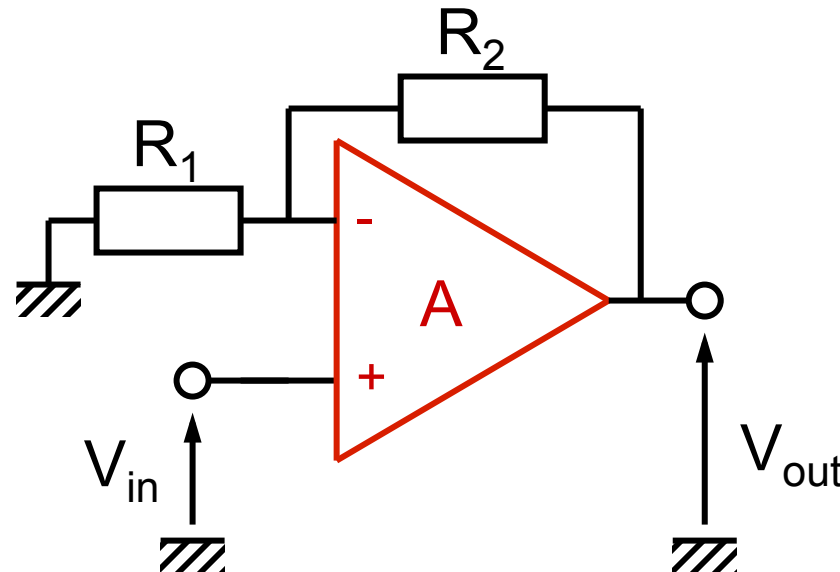
- ▶ Passons maintenant au calcul du schéma. On cherche le gain du montage, défini comme dans l'encadré ci-dessous
 - ◆ rem: A_{non_inv} est le gain "à vide" car on suppose qu'aucune charge n'est connectée en sortie du montage
 - cas du dessin ci-dessous



$$A_{non_inv} = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

Calcul du gain $A_{\text{non_inv}}$: hypothèses

- ▶ Pour commencer, il faut choisir le modèle d'ampli-op qu'on utilise dans les calculs
 - ◆ cfr profondeur de modèle
- ▶ Faisons les hypothèses suivantes:
 - ◆ le gain A de l'ampli-op est fini
 - = élevé mais pas infini
 - ◆ son impédance d'entrée différentielle Z_d est infinie
 - ◆ son impédance de sortie est nulle

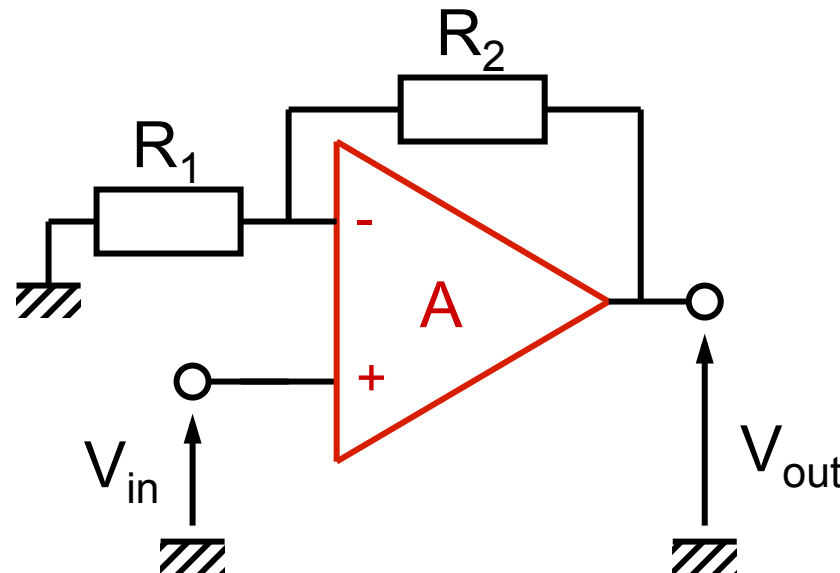


Calcul du gain $A_{\text{non_inv}}$: 1^{re} équation

- ▶ Comme point de départ, nous pouvons écrire les deux relations fondamentales de l'ampli-op...

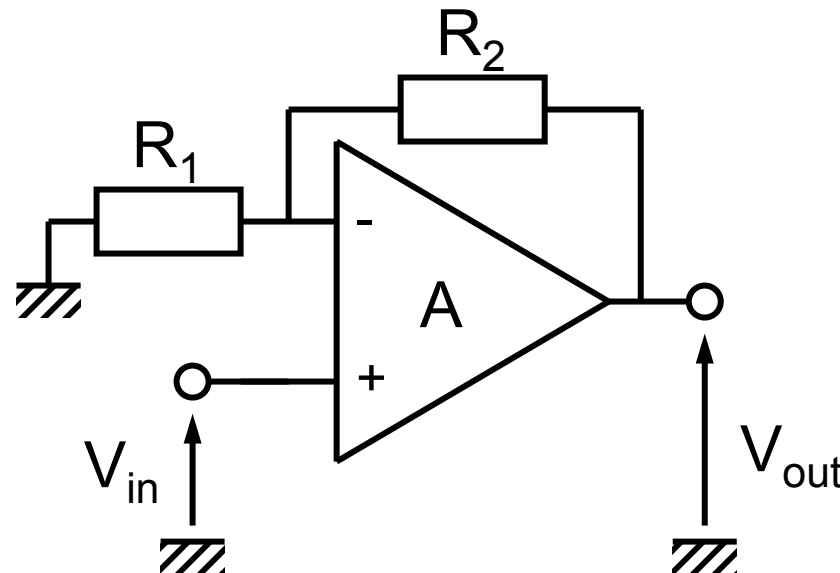
- ◆ $V_{\text{out}} = A \cdot V_d$
- ◆ $V_d = V^+ - V^-$

- ▶ ...qu'on peut résumer en une seule relation: $V_{\text{out}} = A \cdot (V^+ - V^-)$
- ◆ c'est notre première équation



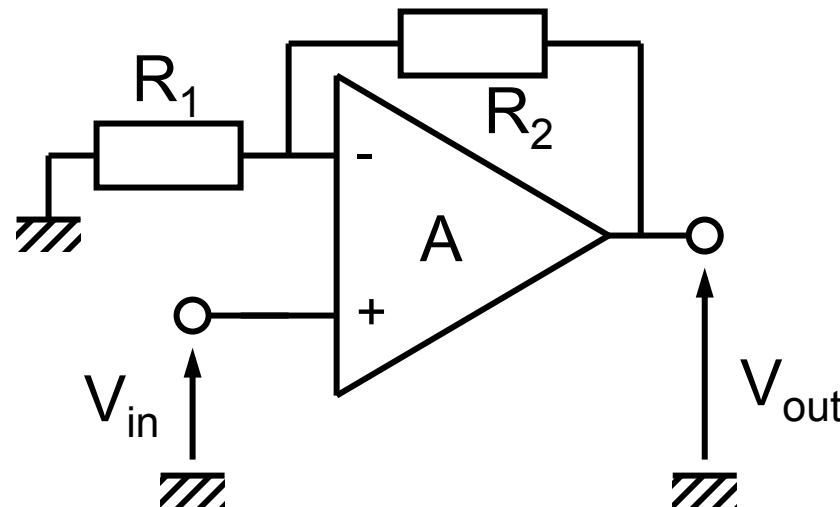
Calcul du gain $A_{\text{non_inv}}$: 2^e équation

- ▶ il faut ensuite essayer d'éliminer/exprimer V^+ et V^-
 - ◆ rappel: V_{in} et V_{out} sont les variables à garder en finale
- ▶ Pour V^+ , on peut écrire: $V^+ = V_{\text{in}}$
 - ◆ car V_{in} est directement appliqué à l'entrée "+" de l'ampli-op
 - ◆ c'est notre deuxième équation



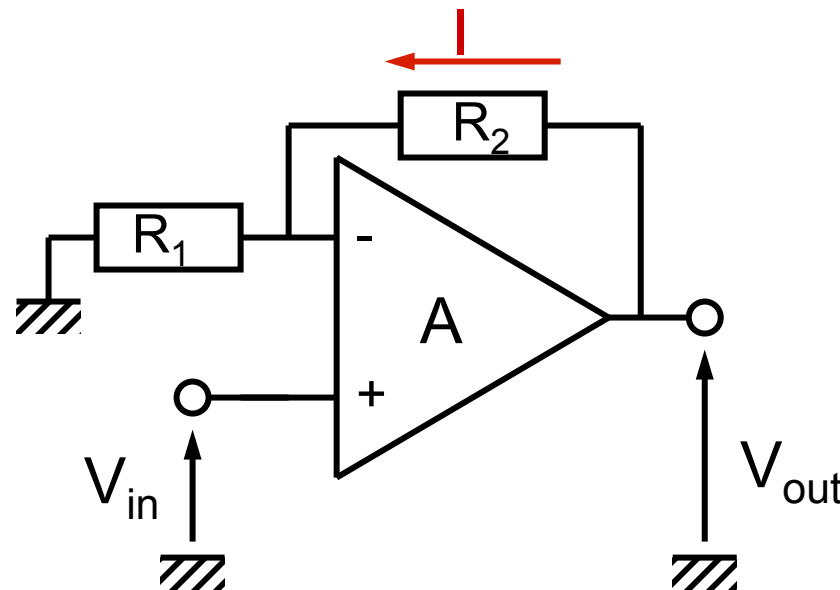
Calcul du gain $A_{\text{non_inv}}$: 3^e équation

- ▶ pour V^- , c'est un peu plus difficile!
- ▶ on pourrait résoudre globalement le circuit par la méthode des courants de branche
 - ◆ = méthode "de référence" pour résoudre un circuit quelconque
- ▶ mais compte tenu des propriétés de l'ampli-op, on peut aller un tout petit peu plus vite
 - ◆ voir dia suivante



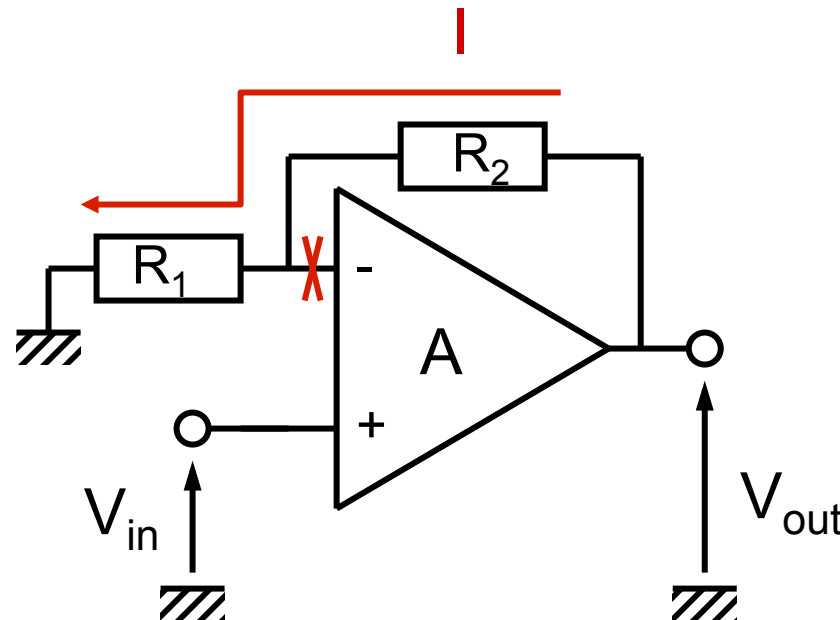
Calcul du gain $A_{\text{non_inv}}$: 3^e équation

- ▶ posons simplement qu'il existe un courant I dans la résistance R_2
 - ◆ c'est en fait une des étapes de la méthode des courants de branche
 - ◆ si on suppose V_{out} positif, il est logique de diriger a priori I vers la masse, donc vers la gauche



Calcul du gain $A_{\text{non_inv}}$: 3^e équation

- ▶ Lorsqu'il quitte R_2 , le courant I ne peut entrer dans l'ampli-op car la résistance d'entrée Z_d de celui-ci est infinie
 - ◆ c'est une de nos hypothèses de départ sur l'ampli-op
 - ◆ illustre l'utilité de l'équivalent de Thévenin...
- ▶ I doit donc passer en totalité dans la résistance R_1
 - ◆ conclusion: le courant dans R_1 est le même que celui dans R_2



Calcul du gain $A_{\text{non_inv}}$: 3^e équation

- ▶ En exprimant la loi d'Ohm sur chacune des résistances, on trouve

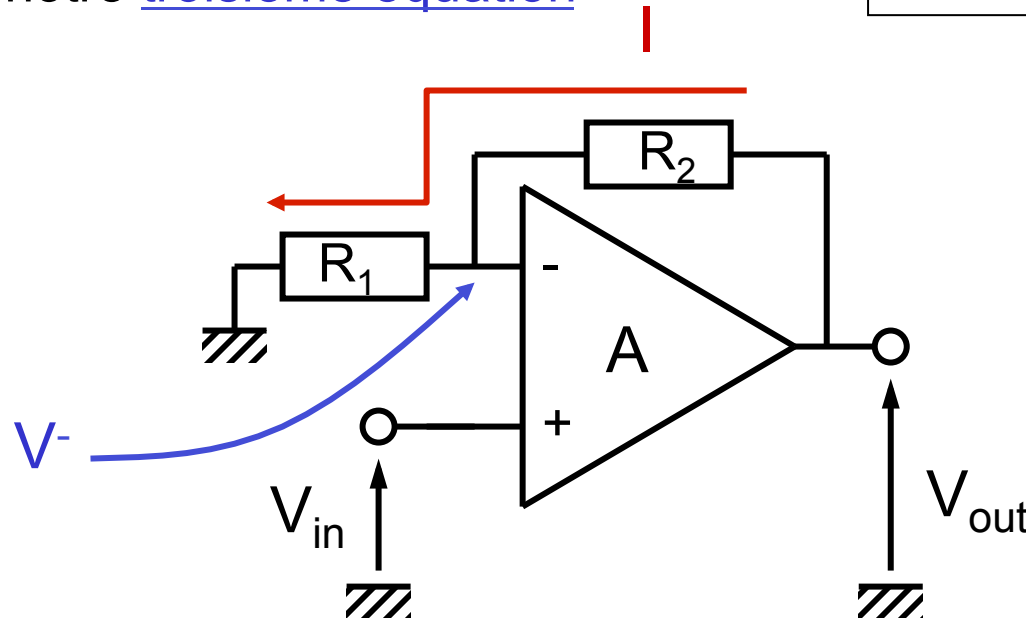
- ◆ sur R_1 : $V^- = R_1 \cdot I$

- ◆ sur R_2 : $V_{\text{out}} - V^- = R_2 \cdot I$ ou encore: $V_{\text{out}} = (R_1 + R_2) \cdot I$

- ◆ et finalement en éliminant I :

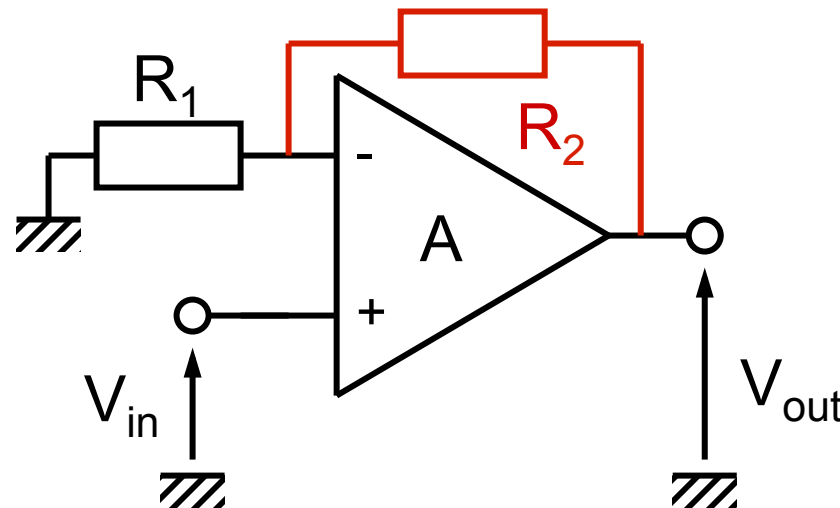
- ◆ c'est notre troisième équation

$$V^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{\text{out}}$$



Calcul du gain $A_{\text{non_inv}}$: 3^e équation

- ▶ Remarques...
- ▶ 1) on aurait pu trouver tout de suite cette troisième équation en notant que R_1 et R_2 forment un diviseur résistif
 - ♦ => apprenez à reconnaître les diviseurs résistifs pour gagner du temps
- ▶ 2) cette relation n'est valable que sous l'hypothèse de l'impédance d'entrée infinie...



Calcul du gain $A_{\text{non_inv}}$: système d'équations

- ▶ Nous avons donc obtenu trois équations:
 - ♦ une pour l'ampli-op

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

- ♦ et deux pour le montage:

$$V^+ = V_{in}$$

$$V^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{out}$$

- ▶ En remplaçant dans la première équation V^+ et V^- par leurs valeurs, on obtient:

$$V_{out} = A.\left(V_{in} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{out}\right)$$

Calcul du gain A_{non_inv} : résultat final

- ▶ ...qu'il suffit de réarranger pour obtenir le gain recherché:

$$A_{non_inv} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A.(R_1 + R_2)}{AR_1 + R_1 + R_2}$$

- ▶ allons plus loin: A étant très élevé, on peut négliger R_1 et R_2 devant AR_1 au dénominateur:
 - ♦ N.B.: négliger R_1 et R_2 revient en fait à supposer A infini

$$A_{non_inv} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \approx \frac{A.(R_1 + R_2)}{AR_1 + \cancel{R_1} + \cancel{R_2}}$$

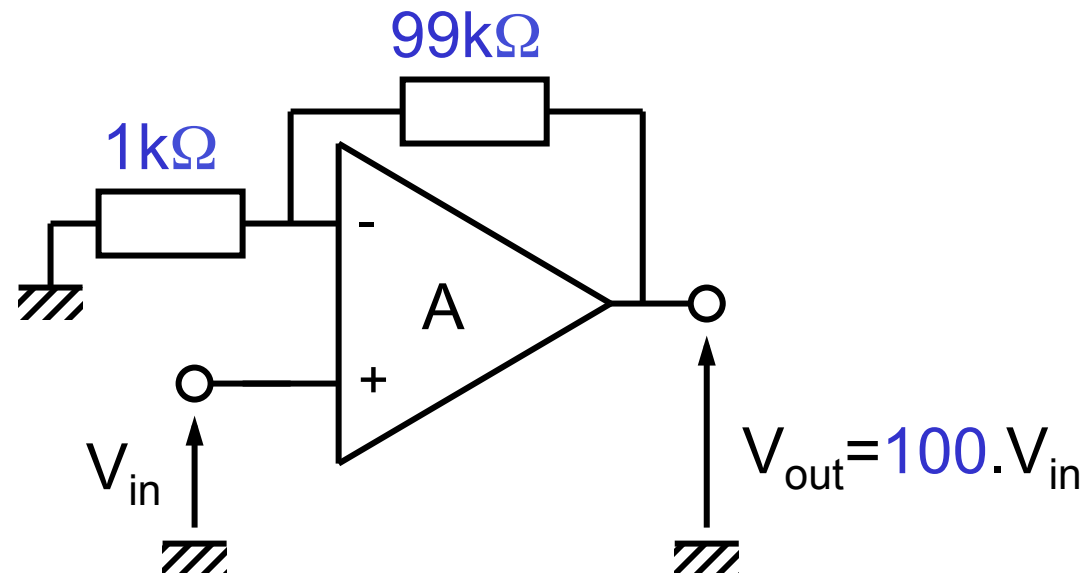
- ▶ et finalement simplifier le facteur A pour obtenir:

$$A_{non_inv} \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

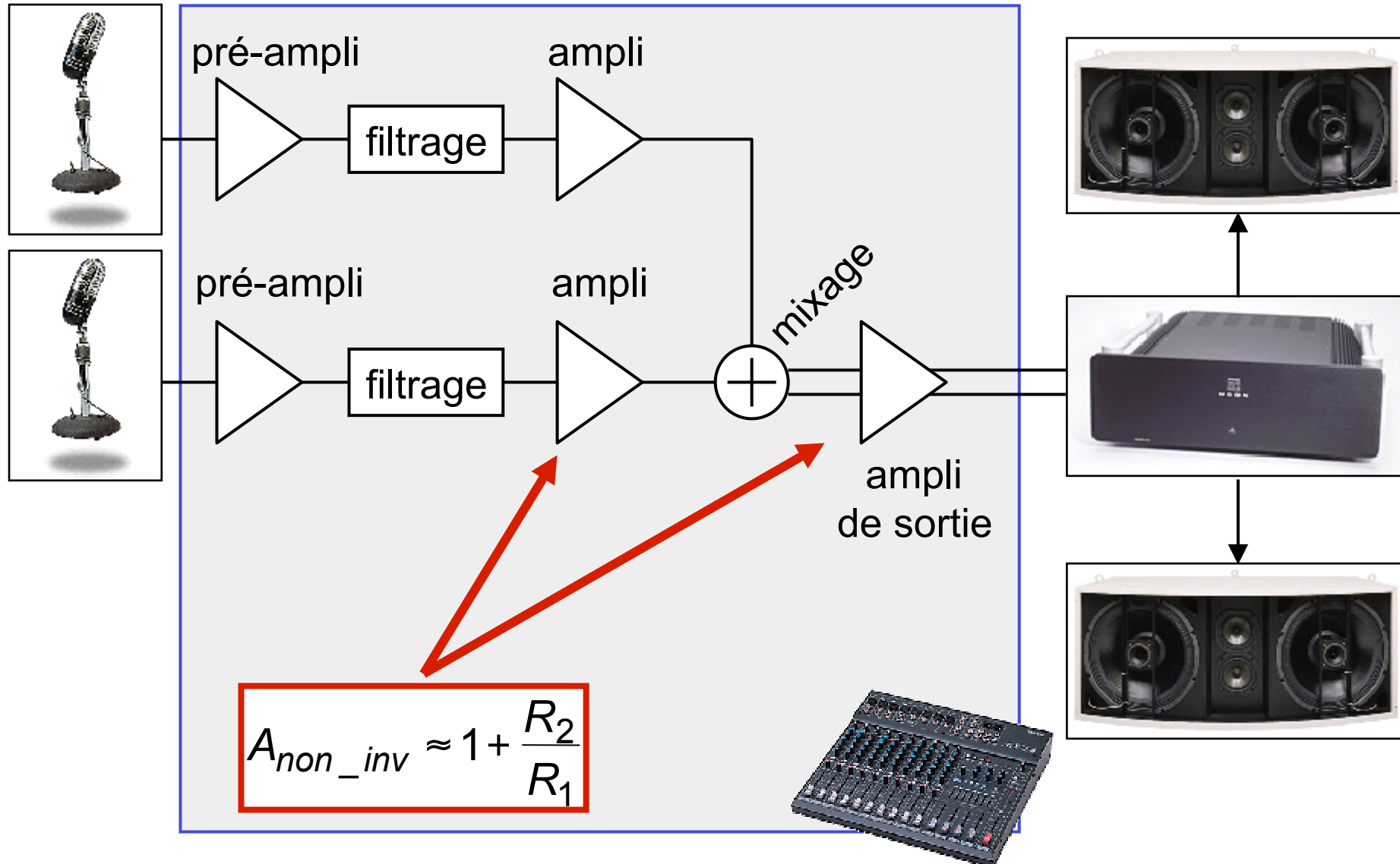
Calcul du gain A_{non_inv} : exemple numérique

- ▶ par exemple, pour amplifier 100 fois V_{in} , il suffit de prendre:
 - ♦ $R_1 = 1\text{ k}\Omega$
 - ♦ $R_2 = 99\text{ k}\Omega$

$$A_{non_inv} \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



Ca y est: vous êtes capables de dimensionner un ampli!



Calcul du gain A_{non_inv} : analyse de l'approximation

- ▶ le résultat précédent résulte d'une approximation
 - ◆ on a supposé A infini pour négliger R_1 et R_2 au dénominateur
- ▶ on peut vérifier la "qualité" de cette approximation en reprenant la formule non approchée

$$A_{non_inv} = \frac{A.(R_1 + R_2)}{AR_1 + R_1 + R_2}$$

- ▶ on obtient:
 - ◆ $A_{non_inv} = 99,67$ (pour $R_1=1\text{ k}\Omega$, $R_2=99\text{ k}\Omega$ et $A = 30000$)
 - ◆ $A_{non_inv} = 99,90$ (pour $R_1=1\text{ k}\Omega$, $R_2=99\text{ k}\Omega$ et $A = 100000$)
 - ◆ au lieu de $A_{non_inv} = 100$ (A infini)
- ▶ l'erreur faite en utilisant la formule approchée est donc minime... pour autant que A soit très grand
 - ◆ c'est toujours le cas pour un ampli-op

Amplificateur non-inverseur: remarques

- ▶ Remarques...
- ▶ 1) l'amplificateur non-inverseur est un montage très couramment utilisé pour amplifier un signal. On l'appelle "non-inverseur" car le gain A_{non_inv} est positif

$$A_{non_inv} \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

- ▶ 2) A a disparu de l'expression de A_{non_inv} => le gain du montage ne dépend pas du gain de l'ampli-op mais uniquement des valeurs des deux résistances
 - ◆ on peut le vérifier dans l'exemple numérique du slide précédent
 - ◆ comment l'expliquer? nous y reviendrons...

Synthèse de la méthode de calcul "classique"

- ▶ Récapitulons la démarche de calcul que nous avons utilisée pour trouver le gain du montage. Celle-ci comprend quatre étapes:
 - ▶ 1) choisir une modélisation de l'ampli-op
 - ◆ modèle utilisé: impédances idéales (Z_d infinie, Z_{out} nulle) mais A fini
 - ▶ 2) exprimer la loi fondamentale de l'ampli-op
 - ◆ c'était notre 1^{re} équation
 - ▶ 3) exprimer V^+ et V^-
 - ◆ nos 2^e et 3^e équations
 - ◆ ces équations dépendent du schéma utilisé
 - ▶ 4) éliminier V^+ et V^- dans les trois équations précédentes pour trouver le gain à vide V_{out}/V_{in}

Synthèse de la méthode de calcul "classique"

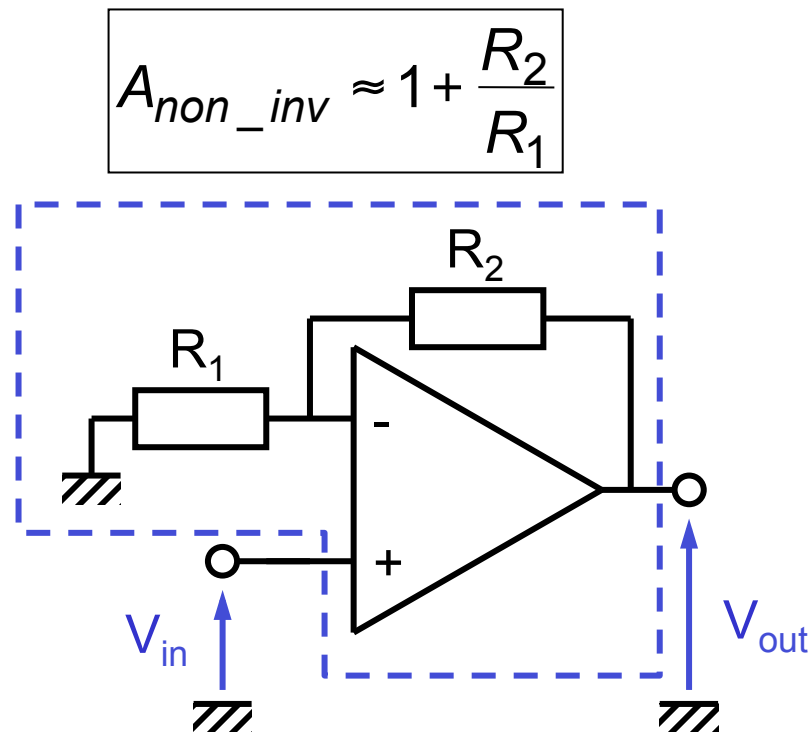
- ▶ Deux hypothèses sont intervenues en cours de calcul:
- ▶ 1) Z_d étant infinie, aucun courant ne rentre par l'entrée "-" de l'ampli-op
 - ◆ cette hypothèse nous a permis de calculer facilement V^- car dans ces conditions R_1 et R_2 forment un diviseur résistif
- ▶ 2) A est très élevé
 - ◆ cette hypothèse nous a permis de simplifier l'expression finale du gain
 - plus exactement: après avoir réalisé tout les calculs en supposant A quelconque (fini), nous avons fait tout à la fin l'approximation que A est infini, ce qui nous a permis une simplification supplémentaire
- ▶ Il est important de bien voir où chacune de ces hypothèses intervient dans le calcul...

Autres propriétés de l'ampli non-inverseur

- ▶ Après avoir calculé le gain de ce montage, intéressons-nous maintenant à deux de ses propriétés:
- ▶ 1) la possibilité d'avoir un gain variable
 - ◆ rappel: un des intérêts d'amplifier un signal, c'est de pouvoir régler son niveau
- ▶ 2) l'impédance d'entrée

Montage non-inverseur à gain variable

- ▶ nous avons supposé jusqu'à présent que R_1 et R_2 sont des résistances de valeur fixe



Montage non-inverseur à gain variable

- ▶ il est souvent intéressant de pouvoir régler le gain d'un amplificateur, c'est-à-dire de faire varier ce gain au choix de l'utilisateur
 - ◆ soit pour obtenir un niveau variable du signal de sortie
 - ◆ soit pour obtenir un niveau constant du signal de sortie lorsque le niveau du signal d'entrée varie
- ▶ exemple: pour un signal audio, le "réglage de volume" est simplement un réglage du gain de l'amplificateur audio

Montage non-inverseur à gain variable

- ▶ pour obtenir un tel réglage du gain, il suffit de remplacer une des deux résistances du montage par un potentiomètre

- ▶ rappel: un potentiomètre est une résistance variable dont l'utilisateur règle la valeur via un curseur mécanique.

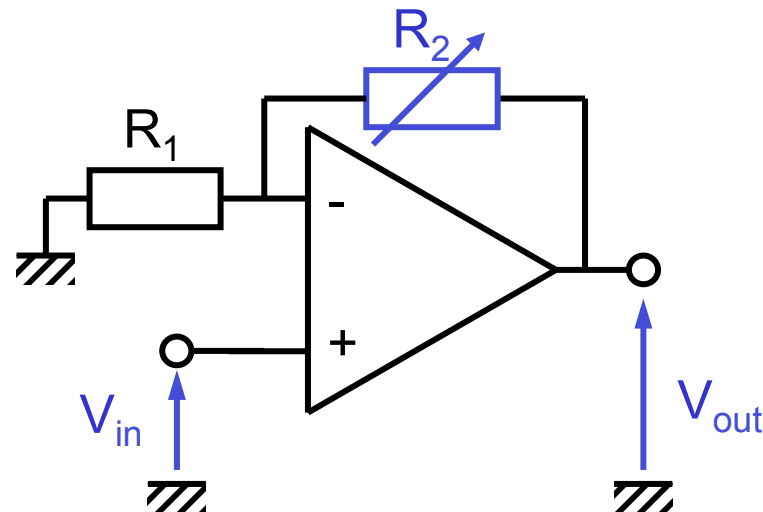
- ▶ N.B.

- ◆ on choisira le plus souvent R_2 car elle se trouve au numérateur dans les deux expressions du gain et donne donc une variation linéaire du gain en fonction de la valeur du potentiomètre

$$A_{non_inv} \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

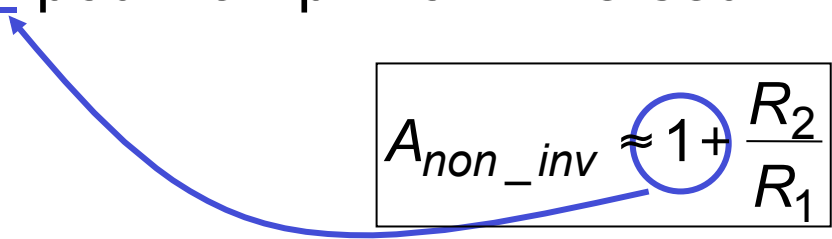
Montage non-inverseur à gain variable

- ▶ en pratique, on obtiendra donc le schéma suivant
 - ◆ la flèche sur R_2 indique que R_2 est un potentiomètre



Montage non-inverseur à gain variable

- ▶ dans ce contexte, il est intéressant de remarquer que la valeur minimale du gain (en valeur absolue) du montage...
 - ♦ obtenue pour la valeur $R_2=0\Omega$
- ▶ ...vaut 1 pour l'ampli non-inverseur


$$A_{non_inv} \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

- ▶ conclusion: on ne peut pas annuler totalement le gain d'un ampli non-inverseur

Montage non-inverseur: impédance d'entrée

- ▶ En utilisant la méthode classique, nous avons calculé le gain du montage amplificateur...
- ▶ L'impédance d'entrée est une autre propriété fondamentale d'un montage. Calculons-là pour le montage amplificateur.
 - ◆ N.B.: on parle ici de l'impédance d'entrée du montage (et non de celle de l'ampli-op)

Montage non-inverseur: impédance d'entrée

► rappel

- ◆ l'impédance d'entrée est une impédance fictive représentant le comportement externe du montage
- ◆ sa valeur est définie par la formule ci-dessous où...
 - V_{in} est la tension d'entrée du montage
 - I_{in} est le courant qui entre dans le montage par la borne où on applique V_{in}
 - I_{out} est le courant circulant dans la borne de sortie du montage

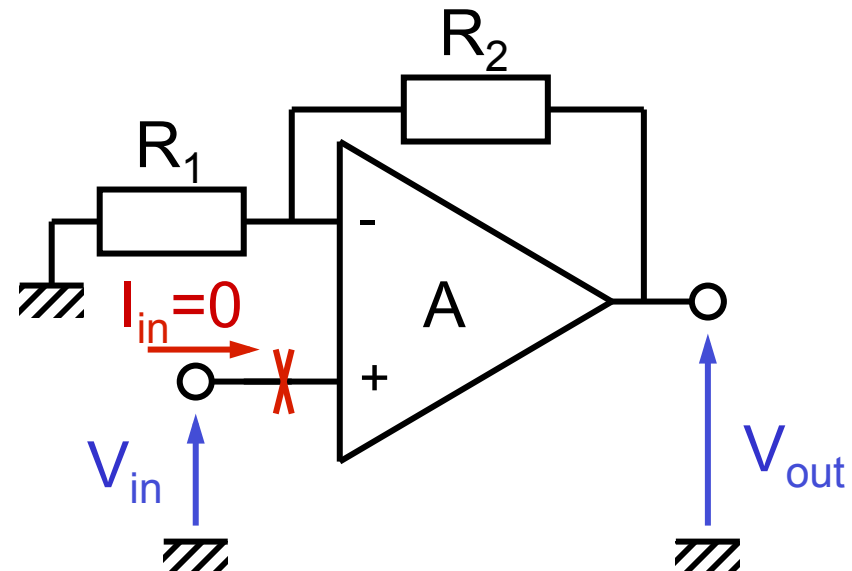
$$Z_{in} = \left. \frac{V_{in}}{I_{in}} \right|_{I_{out}=0}$$



Montage non-inverseur: impédance d'entrée

- ▶ en faisant l'hypothèse que l'ampli-op possède lui-même une impédance d'entrée Z_d infinie...
- ▶ ...on peut faire le raisonnement suivant:
 - ◆ 1) V_{in} est appliquée à l'entrée non-inverseuse de l'ampli-op
 - ◆ 2) comme l'impédance d'entrée de l'ampli-op est infinie, aucun courant ne peut rentrer par cette borne $\Rightarrow I_{in}=0$
 - ◆ 3) l'impédance d'entrée du montage est donc elle même infinie

$$Z_{in} = \left. \frac{V_{in}}{I_{in}} \right|_{I_{out}=0} = \frac{V_{in}}{0} = \infty$$



Synthèse

- ▶ en remplaçant R_2 (ou R_1) par un potentiomètre, on obtient un amplificateur non-inverseur à gain variable
 - ◆ c'est notamment une des manières de réaliser un réglage de volume pour un signal audio
 - ◆ le gain minimum d'un ampli non-inverseur vaut 1
- ▶ l'impédance d'entrée d'un montage non-inverseur est infinie
 - ◆ résultat obtenu en faisant l'hypothèse que l'impédance d'entrée de l'ampli-op est elle-même infinie

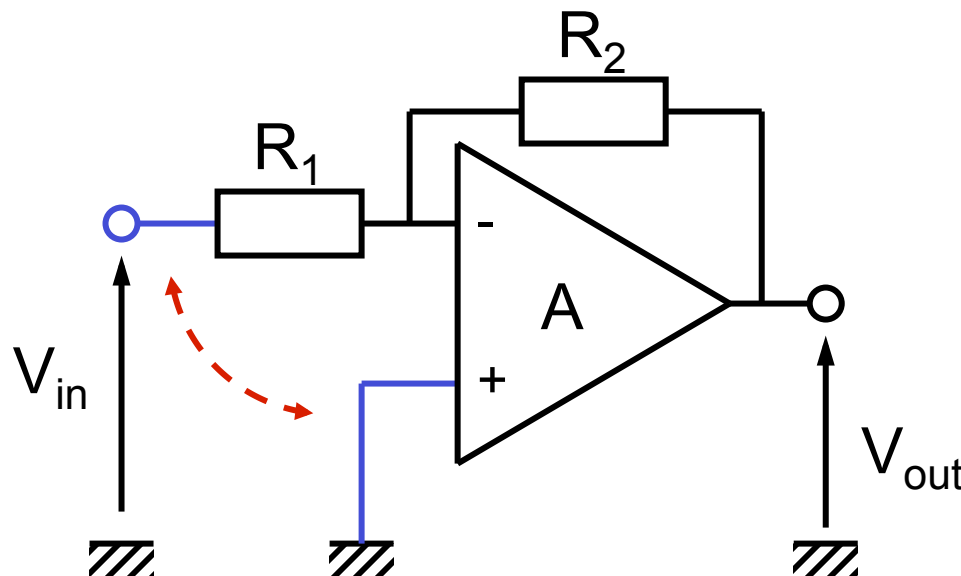
4.2.2 – L'ampli inverseur (calcul classique)

Introduction

- ▶ Dans le module précédent...
- ▶ ...nous avons vu comment construire un amplificateur non-inverseur (montage) sur base d'un ampli-op (composant)
- ▶ ... en utilisant quelques hypothèses bien maîtrisées ainsi qu'une méthode de calcul "classique", nous avons calculé deux propriétés du montage non-inverseur
 - ◆ le gain
 - ◆ l'impédance d'entrée
- ▶ ...nous avons aussi vu qu'on pouvait facilement rendre le gain du montage variable en utilisant un potentiomètre

Amplificateur inverseur: schéma

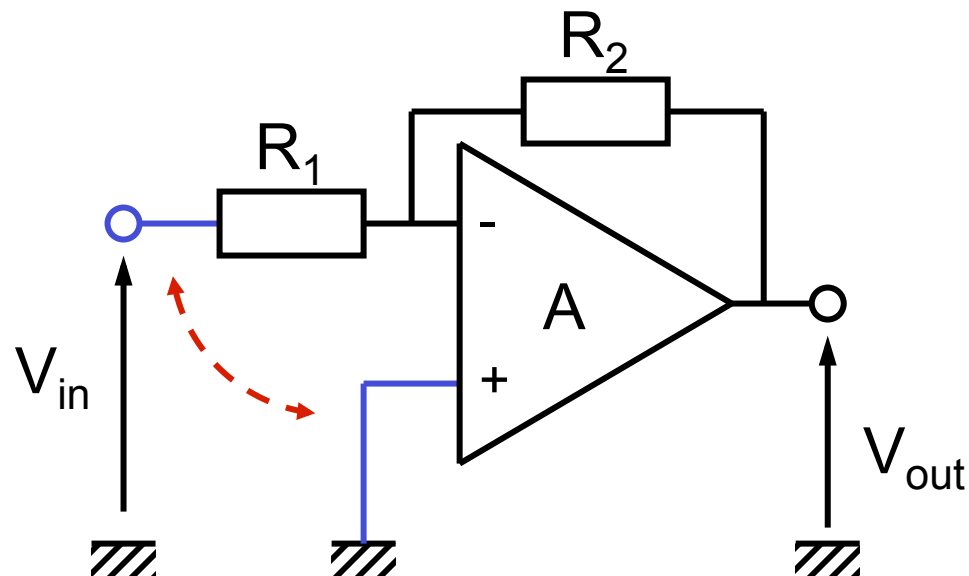
- ▶ Voici maintenant un second montage à base d'un ampli-op: le montage amplificateur inverseur
- ▶ Il est quasiment identique au non-inverseur: on a simplement permuté le rôle de la masse et de l'entrée V_{in}
 - ♦ V_{in} est maintenant connectée à R_1 au lieu d'être connectée à l'entrée "+"
 - ♦ l'entrée "+" est maintenant mise directement à la masse



Amplificateur inverseur: schéma

► Remarques

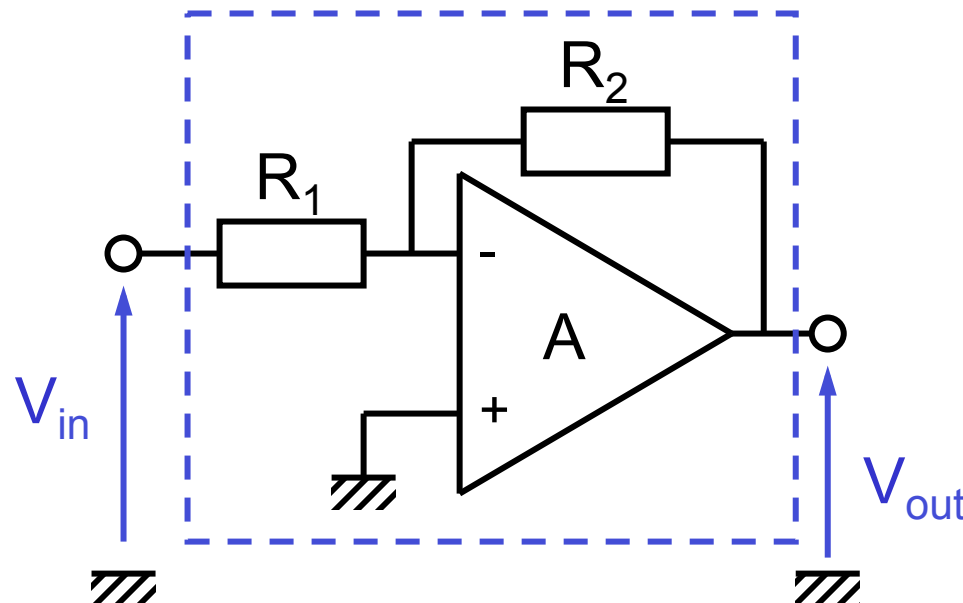
- ◆ R_2 est toujours montée en rétroaction (entre l'entrée et la sortie)
- ◆ R_1 et R_2 forment toujours un diviseur résistif
 - en tous cas si on suppose l'impédance d'entrée de l'ampli-op infinie
 - attention: il s'agit d'un diviseur résistif un peu particulier car aucune des deux extrémités n'est à la masse!!!



Calcul du gain A_{inv}

- Q: en utilisant la méthode de calcul classique du module précédent (mêmes hypothèses pour l'ampli-op et même démarche de calcul en quatre étapes), calculez le gain à vide du montage ci-dessous, c'est-à-dire:

$$A_{inv} = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$



Calcul du gain A_{inv}

- ▶ réponse:
- ▶ vous devriez obtenir le résultat suivant:

$$A_{inv} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-AR_2}{AR_1 + R_1 + R_2}$$

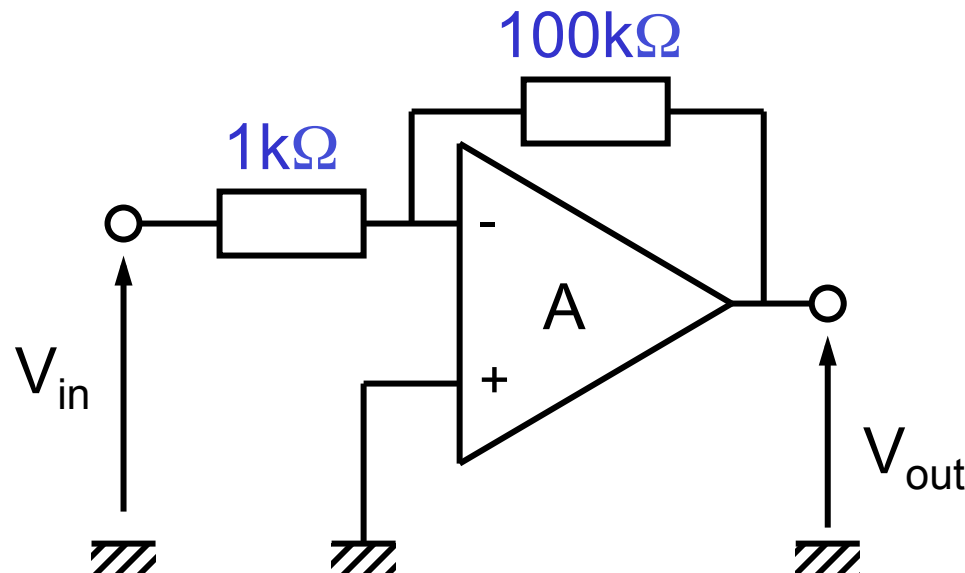
- ▶ dont la version approchée (A infini) est:

$$A_{inv} \approx -\frac{R_2}{R_1}$$

Calcul du gain A_{inv}

- ▶ imaginons qu'on prenne $R_2=100k\Omega$ et $R_1=1k\Omega$, on obtient $A_{inv} = -100$
- ▶ ce gain est négatif
 - ♦ c'est la raison pour laquelle ce montage est appelé "inverseur"

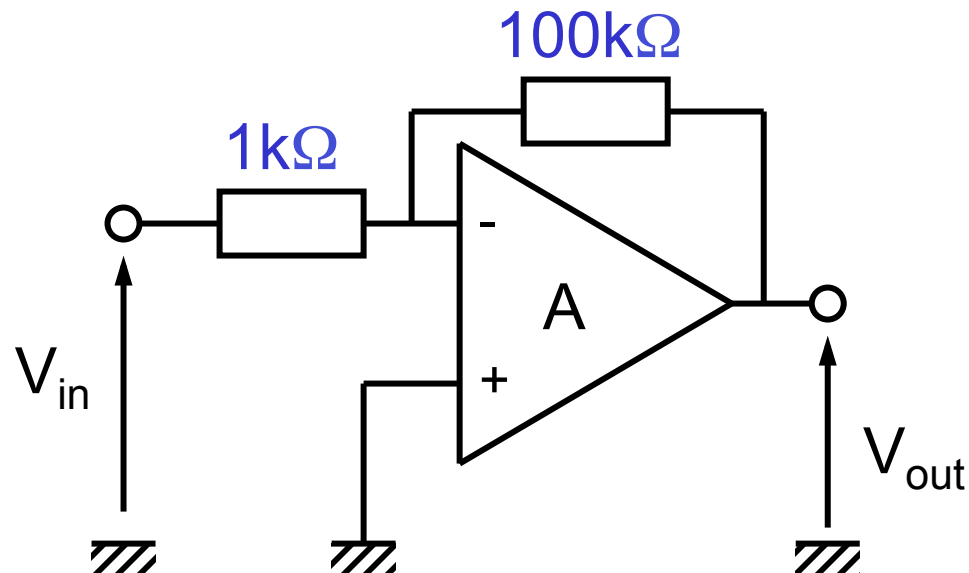
$$A_{inv} \approx - \frac{100k\Omega}{1k\Omega} = - 100$$



Calcul du gain A_{inv}

- Q: que signifie concrètement un gain négatif?

$$A_{inv} \approx - \frac{100k\Omega}{1k\Omega} = - 100$$



Calcul du gain A_{inv} : remarques

- ▶ 1) Comme l'ampli non-inverseur, ce montage est également très couramment utilisé pour amplifier un signal
 - ◆ ses propriétés sont légèrement différentes de celles de l'ampli non-inverseur: nous récapitulerons les propriétés des deux montages plus tard
- ▶ 2) comme pour l'ampli non-inverseur, A a également disparu de l'expression de A_{inv}
 - ◆ ici aussi le gain du montage ne dépend pas du gain de l'ampli-op mais uniquement des valeurs des deux résistances

$$A_{inv} \approx - \frac{R_2}{R_1}$$

Calcul du gain A_{inv} : remarques

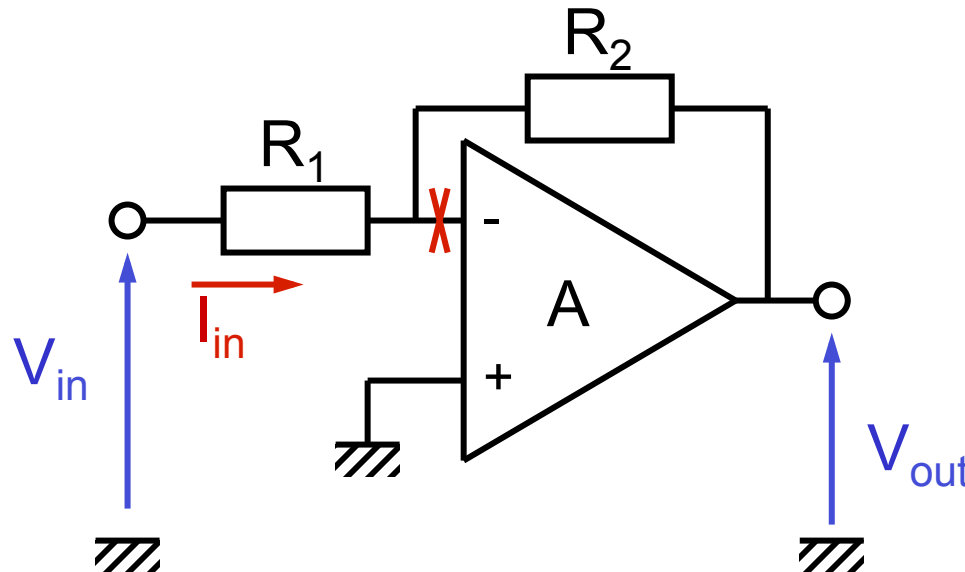
- ▶ 3) Le gain de l'ampli inverseur peut également être rendu variable en remplaçant une des deux résistances fixes par un potentiomètre
 - ♦ dans ce cas, le gain minimal est 0: on peut donc annuler totalement le gain d'un ampli inverseur

$$A_{inv} \approx - \frac{R_2}{R_1}$$

Impédance d'entrée: calcul

- ▶ Calculons maintenant l'impédance d'entrée du montage inverseur
 - ◆ voir formule ci-dessous
- ▶ 1) le courant I_{in} n'est autre que le courant circulant dans R_1
 - ◆ voir schéma ci-dessous
- ▶ 2) c'est également le courant circulant dans R_2
 - ◆ car l'impédance d'entrée de l'ampli-op est infinie

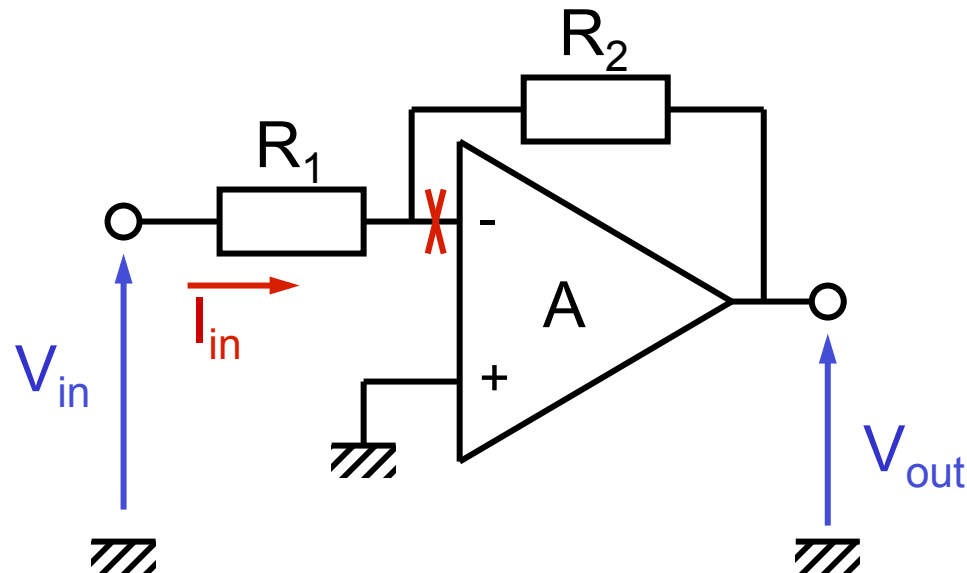
$$Z_{in} = \left. \frac{V_{in}}{I_{in}} \right|_{I_{out}=0}$$



Impédance d'entrée: calcul

- ▶ 3) on peut donc écrire que ce courant vaut:
 - ◆ suivant la loi d'Ohm sur l'ensemble des deux résistances (en faisant attention aux conventions de signe)

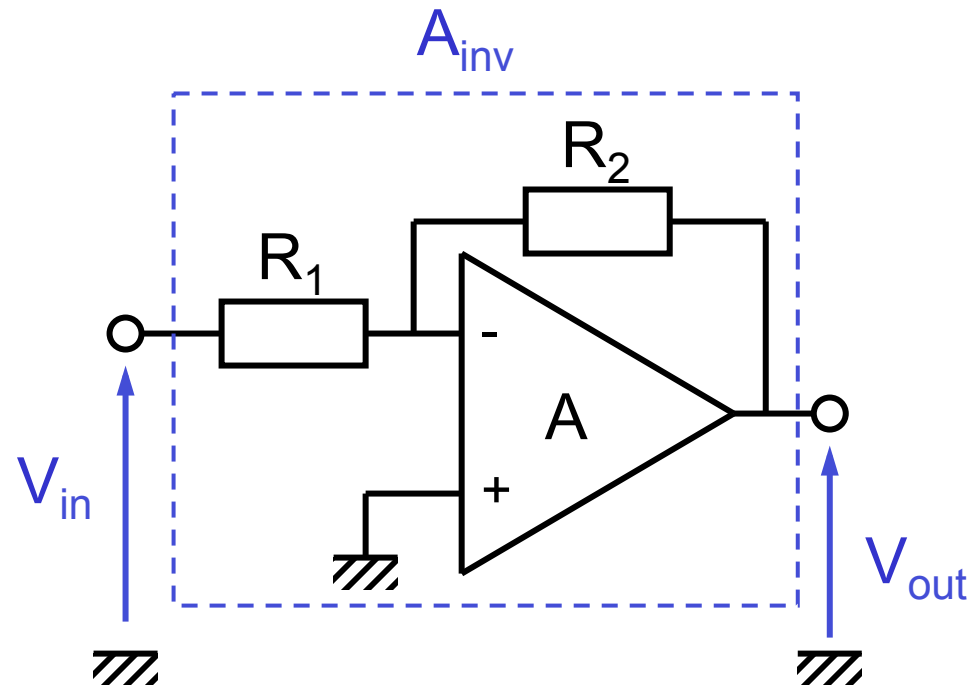
$$I_{in} = \frac{V_{in} - V_{out}}{R_1 + R_2}$$



Impédance d'entrée: calcul

- ▶ 4) par définition de l'ampli inverseur, V_{out} vaut lui-même:

$$V_{out} = A_{inv} \cdot V_{in} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_{in}$$



Impédance d'entrée: calcul

- ▶ 5) en combinant les deux équations encadrées précédentes, on trouve la valeur du courant I_{in} ...
- ▶ ...et donc finalement la valeur de l'impédance d'entrée Z_{in} du montage
- ▶ conclusion: l'impédance d'entrée du montage inverseur vaut R_1
 - ♦ voir slide suivant

$$I_{in} = \frac{V_{in} + \frac{R_2}{R_1} \cdot V_{in}}{R_1 + R_2} = \frac{V_{in}}{R_1}$$

$$Z_{in} = \left. \frac{V_{in}}{I_{in}} \right|_{I_{out}=0} = \frac{V_{in}}{V_{in}/R_1} = R_1$$

Impédance d'entrée: remarques

- ▶ 1) L'impédance d'entrée d'un montage est en principe une valeur fictive, apparente. Or nous arrivons ici à la conclusion que l'impédance d'entrée du montage inverseur est une des résistances de ce montage (R_1)
- ▶ Q: Comment résoudre ce paradoxe?

Impédance d'entrée: remarques

- ▶ Q: Comment résoudre ce paradoxe?
- ▶ R: il s'agit d'un des cas particuliers où l'impédance apparente du montage, définie par la relation $Z_{in} = V_{in} / I_{in}$, correspond numériquement à la valeur d'une des impédances réelles du montage
 - ◆ n'en concluez surtout pas que l'impédance d'entrée du montage, c'est "l'impédance qui se trouve à l'entrée du montage": ce résultat est totalement faux dans le cas général!
 - ◆ il faudrait d'ailleurs plutôt dire que l'impédance d'entrée Z_{in} a la même valeur que R_1 (sans être R_1).
 - ◆ nous reviendrons sur ce cas particulier dans le chapitre "application du principe du zéro virtuel".

Impédance d'entrée: remarques

- ▶ 2) L'impédance d'entrée du montage se trouve donc dans la gamme de valeur des résistances réelles...
 - ◆ puisqu'elle est égale à R_1
- ▶ ...sa valeur est donc relativement faible pour une impédance d'entrée, qu'on s'attendrait à voir très élevée
 - ◆ rappelons que le montage non-inverseur possède lui une impédance d'entrée infinie (en première approximation)
- ▶ Cette impédance d'entrée faible doit être vue comme un inconvénient du montage inverseur

Impédance d'entrée: remarques

- ▶ 3) Pour calculer l'impédance d'entrée, nous avons fondamentalement appliqué la même méthode de calcul que pour calculer le gain
 - ◆ hypothèse sur l'ampli-op
 - ◆ équation de l'ampli-op
 - ◆ équations propres au montage
 - ◆ élimination des variables non désirées
 - ◆ simplification finale éventuelle
- ▶ => la méthode de calcul classique ne sert pas qu'à calculer le gain

Amplificateurs "inverseur" et "non-inverseur" (synthèse)

- ▶ Vous connaissez maintenant les deux montages de base qui permettent d'amplifier un signal au moyen d'un ampli-op
- ▶ ces deux montages présentent beaucoup de points communs:
 - ◆ 1) une structure très proche
 - chaque montage est constitué d'un ampli-op et de deux résistances
 - la résistance R_2 est montée en rétroaction sur l'entrée inverseuse
 - R_2 forme avec R_1 un diviseur résistif
 - l'entrée non-inverseuse est directement connectée soit à la masse soit à la tension d'entrée
 - ◆ 2) un gain ne dépendant quasiment que des valeurs de R_1 et R_2
 - et pas du gain de l'ampli-op
 - ◆ 3) la possibilité d'utiliser un potentiomètre pour obtenir un gain variable

Amplificateurs "inverseur" et "non-inverseur" (synthèse)

- ▶ les deux montages présentent aussi des différences:
- ▶ les propriétés du montage non-inverseur sont:
 - ◆ un gain positif
 - ◆ un gain minimum valant 1
 - ◆ une impédance d'entrée très élevée (infinie)

$$A_{non_inv} \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

- ▶ les propriétés du montage inverseur sont:
 - ◆ un gain négatif
 - ◆ un gain minimum (en valeur absolue) valant 0
 - ◆ une impédance d'entrée faible (valant R_1)

$$A_{inv} \approx - \frac{R_2}{R_1}$$

Amplificateurs "inverseur" et "non-inverseur" (synthèse)

- ▶ Vous avez également vu la méthode de calcul "classique" permettant de résoudre un circuit à ampli-op avec rétroaction
 - ◆ cette méthode a été utilisée pour calculer le gain à vide des deux montages
 - ◆ on l'a également utilisée pour calculer les impédances d'entrée des deux montages
 - ◆ dans les deux cas, on a utilisé l'hypothèse d'une impédance d'entrée infinie pour l'ampli-op
 - appliquée parfois sur l'entrée "+" parfois sur l'entrée "-"

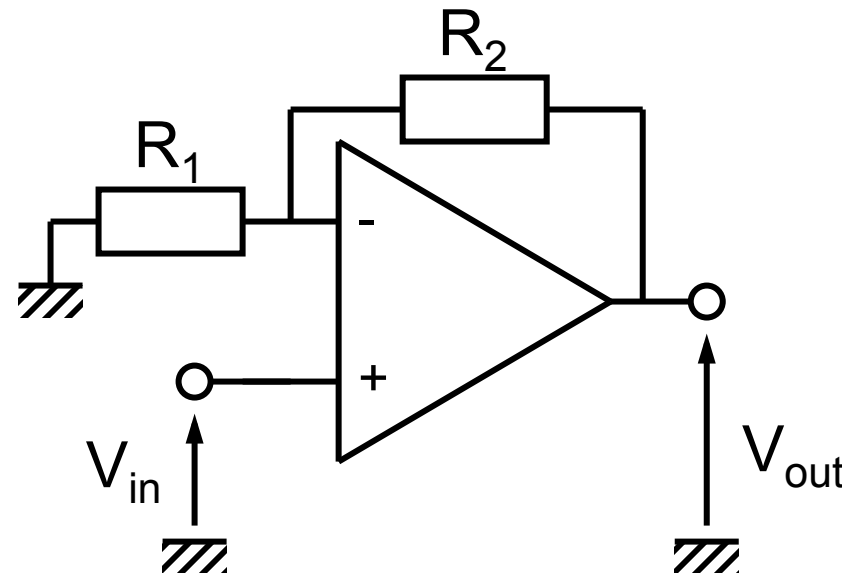
4.2.3 – Calcul rapide: appliquer le principe du zéro virtuel

Introduction

- ▶ Vous souvenez-vous du principe du zéro virtuel?
- ▶ "tant qu'un ampli-op ne sature pas, sa tension différentielle d'entrée est virtuellement nulle"
 - ◆ zéro virtuel = double approximation (A et V_d)
- ▶ Dans la méthode classique, on suppose au départ que le gain A de l'ampli-op est élevé mais fini
- ▶ Nous allons maintenant montrer qu'on peut calculer beaucoup plus rapidement en utilisant le principe du zéro virtuel
 - ◆ c'est-à-dire en supposant A infini dès le départ

Calcul du gain de l'ampli non-inverseur

- ▶ Reprenons le montage de l'amplificateur non-inverseur
- ▶ Nous faisons les hypothèses suivantes sur l'ampli-op:
 - ◆ l'impédance d'entrée différentielle Z_d est infinie
 - ◆ l'impédance de sortie est nulle
 - ◆ on a un zéro virtuel $\Rightarrow$ le gain de l'ampli-op est infini et V_d est nulle



Calcul du gain de l'ampli non-inverseur

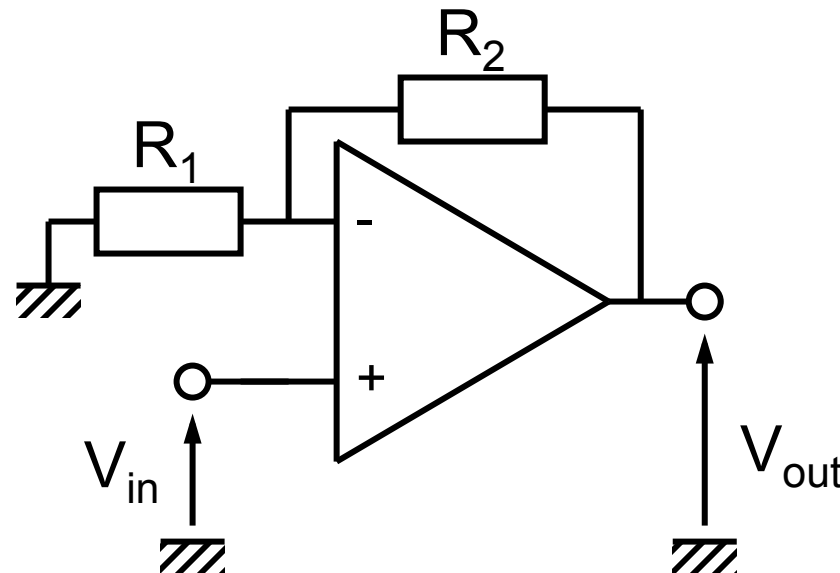
- ▶ Concernant l'ampli-op...
- ▶ écrire $V_{\text{out}} = A \cdot V_d$ ne nous apporte plus aucun renseignement
 - ◆ puisque par hypothèse, on connaît A et V_d
 - ◆ au contraire, il ne faut surtout plus introduire A dans les calculs car sa valeur infinie amène des incohérences! (💣)
- ▶ ayant un zéro virtuel, on peut écrire à la place: $V^+ = V^-$
- ▶ c'est désormais cette équation qui doit nous servir de "première équation" rendant compte du comportement de l'ampli-op
 - ◆ N.B.: on verra plus tard qu'en fait ce n'est pas réellement l'ampli-op qui "force" les tensions V^+ et V^- à être égales

Calcul du gain de l'ampli non-inverseur

- ▶ Concernant le montage, les équations 2 et 3 sont inchangées:

$$V^+ = V_{in}$$

$$V^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{out}$$



Calcul du gain de l'ampli non-inverseur

- ▶ Le système de trois équations est donc cette fois:

$$V^+ = V^-$$

$$V^+ = V_{in}$$

$$V^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{out}$$

- ▶ en vertu de la première équation, on peut immédiatement égaliser les deux équations de droite, ce qui donne:

$$V_{in} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{out}$$

- ▶ et on trouve immédiatement le gain du montage:

$$A_{non_inv} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

- ▶ qui est bien le même que celui trouvé par la méthode classique

Calcul du gain de l'ampli non-inverseur

- ▶ La seule différence entre les deux méthodes, c'est le moment où on fait l'approximation $A=\infty$:
- ▶ en toute fin de calcul pour la méthode classique
 - ◆ lorsqu'on néglige R_1 et R_2 au dénominateur

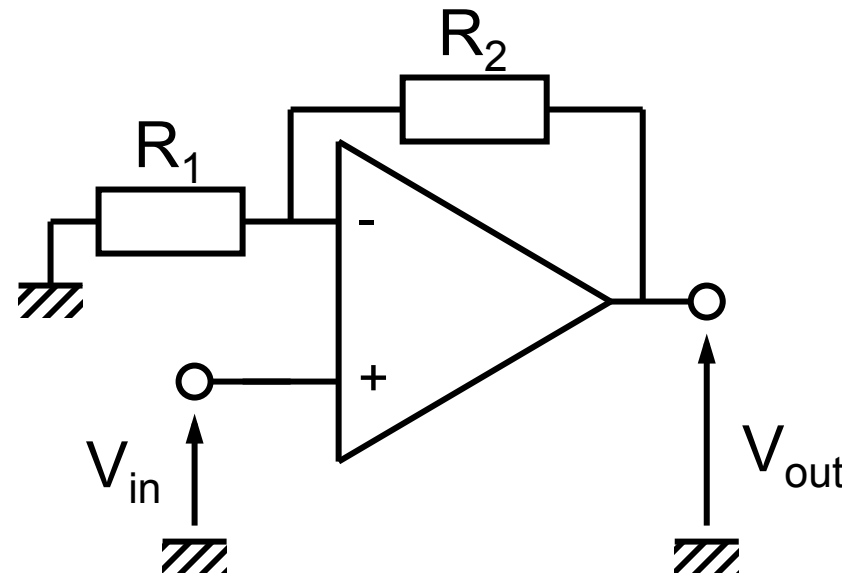
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A.(R_1 + R_2)}{AR_1 + \cancel{R_1} + \cancel{R_2}} \longrightarrow A_{non_inv} \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

- ▶ avant tout calcul pour la méthode rapide
 - ◆ ce qui permet de travailler dès le départ sur des expressions plus simples

$$V_{in} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{out} \longrightarrow A_{non_inv} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

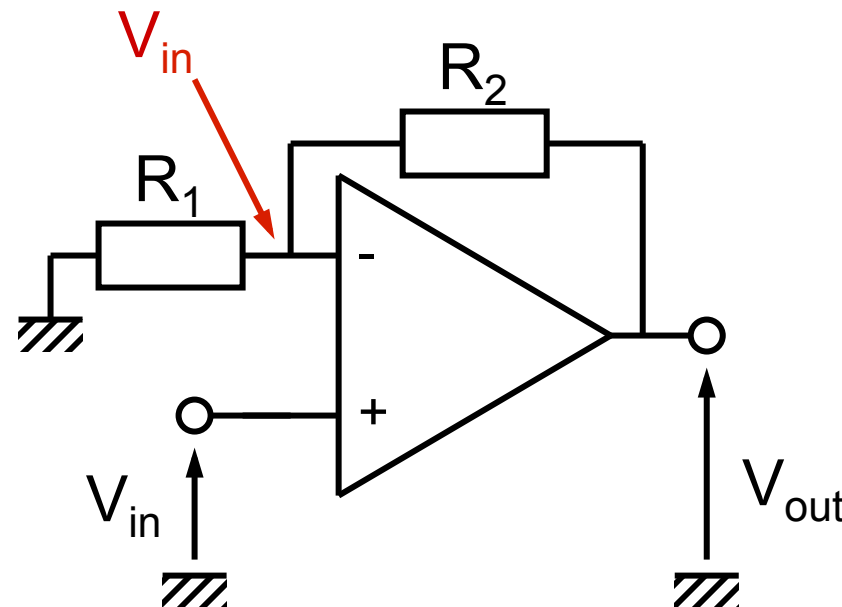
Calcul du gain de l'ampli non-inverseur "sur schéma"

- ▶ on peut encore faire mieux: la technique du zéro virtuel se prête particulièrement bien à raisonner "directement sur le schéma", en limitant au maximum les développements mathématiques
- ▶ Reprenons le schéma de l'amplificateur non-inverseur...



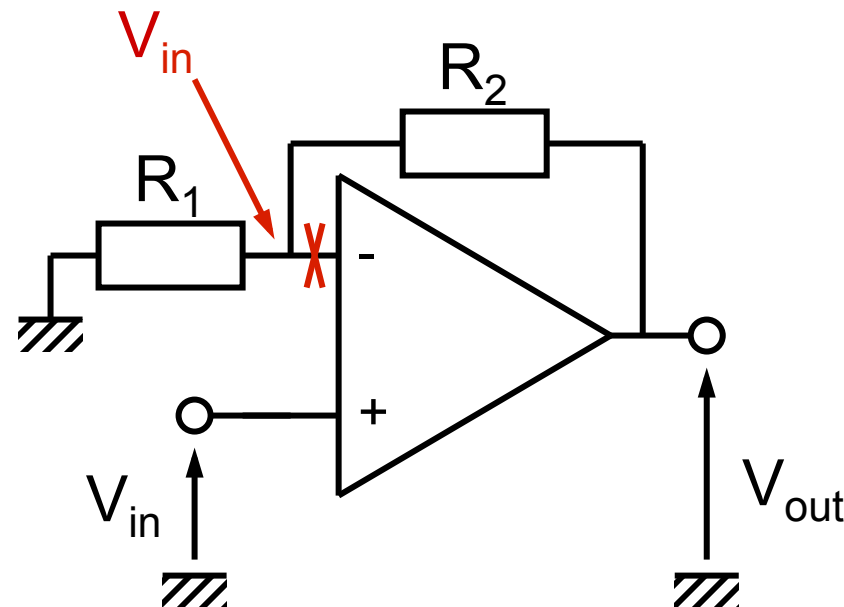
Calcul du gain de l'ampli non-inverseur "sur schéma"

- ▶ voici le raisonnement qu'on peut faire:
- ▶ 1) dans l'hypothèse du zéro virtuel, V^- vaut V^+
- ▶ 2) or V^+ vaut V_{in}
 - ◆ connexion directe
- ▶ 3) donc V^- vaut V_{in}



Calcul du gain de l'ampli non-inverseur "sur schéma"

- ▶ 4) par ailleurs, R_1 et R_2 forment un diviseur résistif
 - ◆ car aucun courant ne peut entrer dans l'ampli-op qui possède une impédance d'entrée Z_d infinie



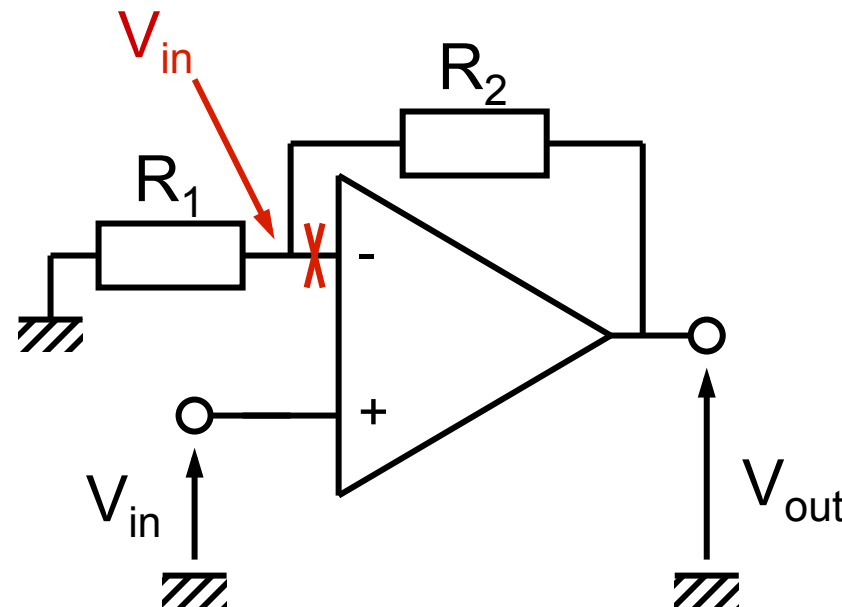
Calcul du gain de l'ampli non-inverseur "sur schéma"

- ▶ 5) pour ce diviseur résistif, on peut donc écrire:

$$V_{in} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{out}$$

- ▶ dont on déduit directement le gain:

$$A_{non_inv} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

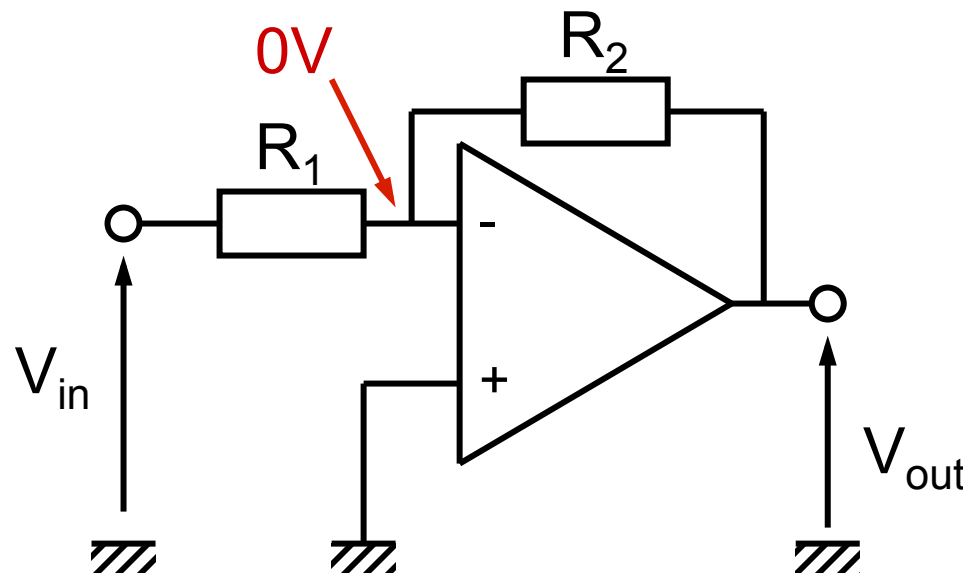


Calcul du gain de l'ampli non-inverseur "sur schéma"

- ▶ en termes de rapidité, un tel calcul "sur schéma" est imbattable
- ▶ il faut cependant faire attention à bien maîtriser les différents concepts et à les appliquer au bon moment:
 - ◆ le zéro virtuel
 - et la double approximation sous-jacente
 - ◆ l'hypothèse d'une impédance d'entrée infinie
 - qui n'est pas du tout équivalente au zéro virtuel!
 - ◆ le diviseur résistif
 - pour lequel il faut être sûr qu'aucun courant ne rentre dans l'ampli-op

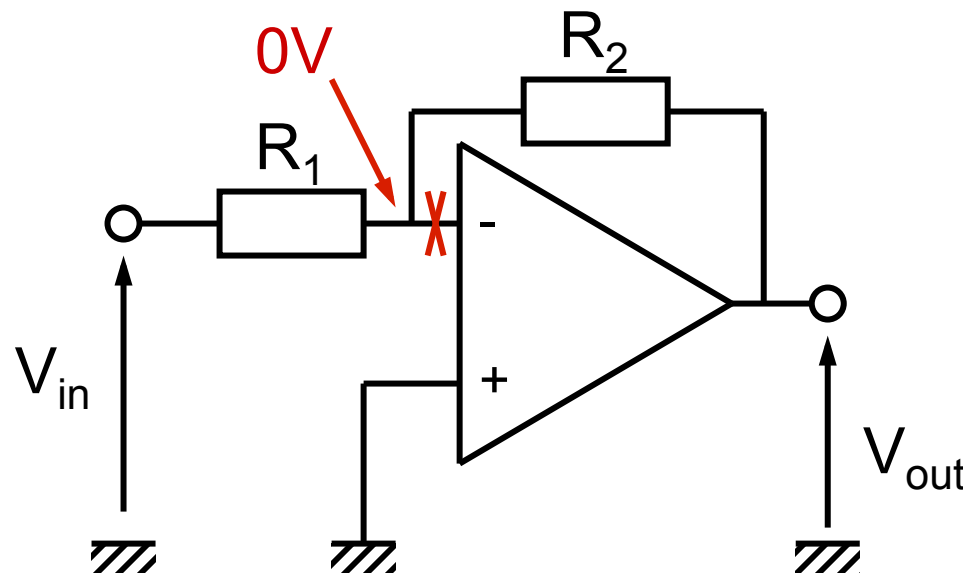
Calcul du gain de l'ampli inverseur

- ▶ Voici maintenant un calcul "sur schéma" du montage amplificateur inverseur:
- ▶ 1) dans l'hypothèse du zéro virtuel, V^- vaut V^+
- ▶ 2) or V^+ vaut 0V
 - ◆ connexion directe à la masse
- ▶ 3) donc V^- vaut 0V (on parle de "masse virtuelle")



Calcul du gain de l'ampli inverseur

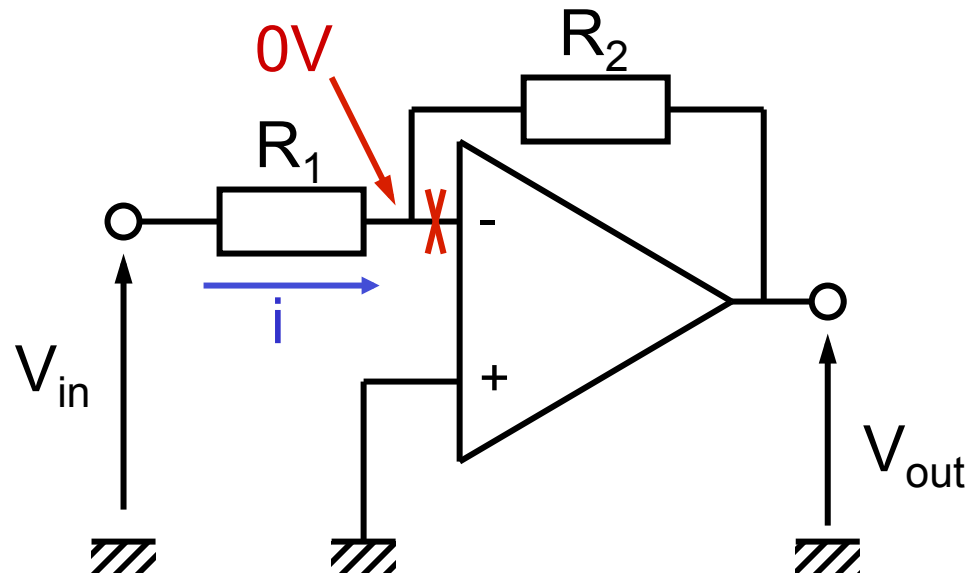
- ▶ 4) par ailleurs, le courant dans R_1 est forcément le même que le courant dans R_2
 - ◆ car aucun courant ne peut entrer dans l'ampli-op qui possède une impédance d'entrée Z_d infinie
 - ◆ il ne s'agit cependant pas d'un diviseur résistif "classique" car on a 0V au milieu des deux résistances...



Calcul du gain de l'ampli inverseur

- ▶ 5) mais le courant dans R_1 est facile à trouver: il vaut V_{in}/R_1
 - ◆ comme l'extrémité droite de R_1 est (virtuellement) à la masse, la ddp sur R_1 vaut bien $V_{in}-0V=V_{in}$

$$I = \frac{V_{in}}{R_1}$$



Calcul du gain de l'ampli inverseur

- ▶ 6) comme ce même courant passe dans R_2 , on peut écrire:

$$0V - V_{out} = R_2 \cdot I$$

- ▶ et on trouve donc finalement:

$$V_{out} = -R_2 \cdot I = -R_2 \cdot \left(\frac{V_{in}}{R_1} \right)$$

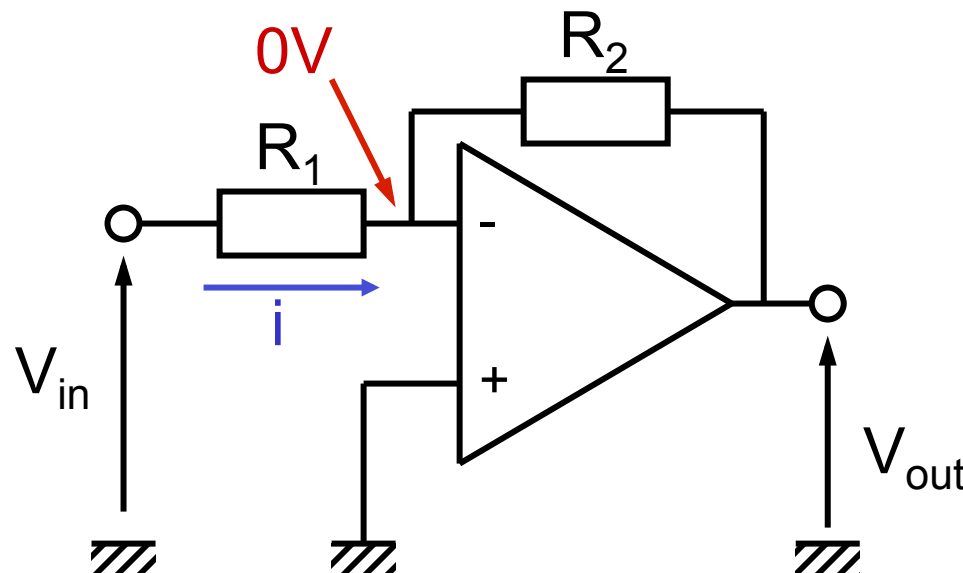
- ▶ ou encore

$$A_{inv} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

- ▶ qui est bien le même résultat que celui du calcul "classique"

Impédance d'entrée de l'ampli inverseur

- ▶ Dans un montage inverseur, l'impédance d'entrée vaut R_1
 - ◆ c'est un cas particulier
- ▶ on voit ici l'explication: la borne de droite de cette impédance est (virtuellement) au potentiel 0V
 - ◆ à cause du zéro virtuel



Utilisation du principe du zéro virtuel: synthèse

- ▶ Le principe du zéro virtuel permet d'accélérer très nettement le calcul d'un montage à ampli-op
 - ◆ en particulier pour un calcul "sur schéma"
- ▶ en ce sens, il fait partie des techniques à maîtriser pour faire efficacement de l'électronique

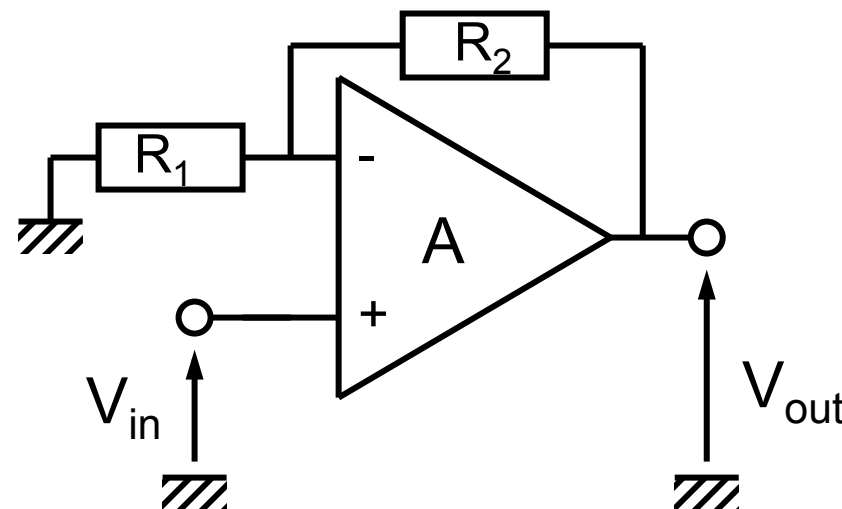
Utilisation du principe du zéro virtuel: synthèse

- ▶ A retenir pour bien appliquer le principe du zéro virtuel:
- ▶ faute classique n°1:
 - ◆ introduire A dans les calculs tout en appliquant le principe du zéro virtuel
 - A est infini et ça mène à des incohérences
 - ◆ **utilisez soit le calcul classique soit le zéro virtuel mais ne mélangez pas les deux techniques!**
- ▶ faute classique n°2
 - ◆ confondre l'hypothèse du zéro virtuel avec l'hypothèse de l'impédance d'entrée infinie
 - ces deux hypothèses n'ont rien à voir, elles sont mêmes plutôt contradictoires!

4.2.4 – Analyse de la rétroaction

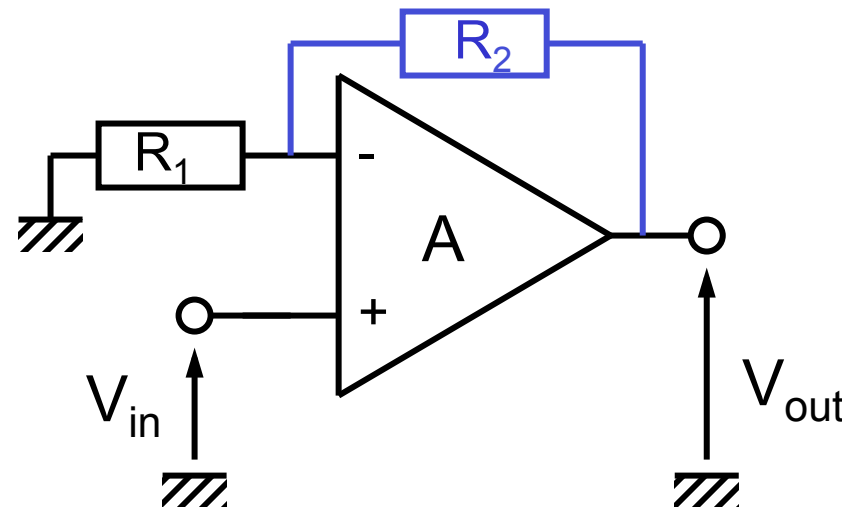
Introduction

- ▶ Dans les modules précédents, nous avons vu deux montages permettant d'amplifier un signal
 - ♦ l'amplificateur non-inverseur (schéma ci-dessous) et
 - ♦ l'amplificateur inverseur



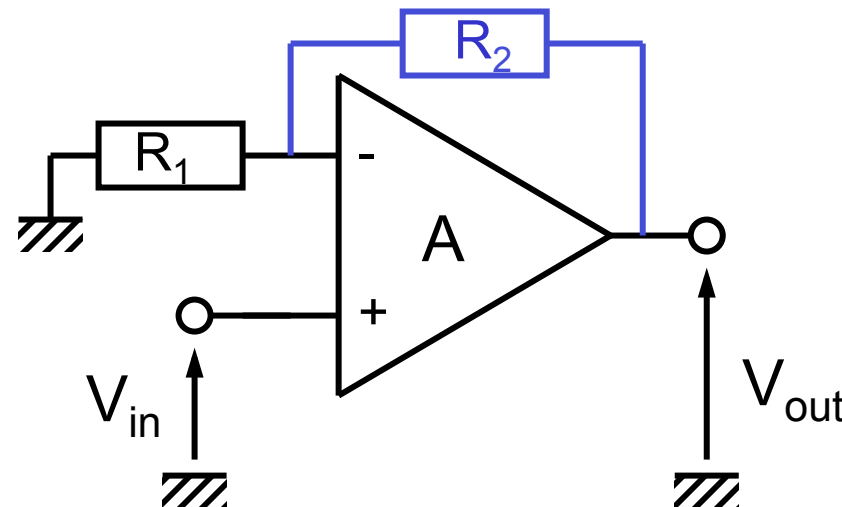
Introduction

- ▶ Ces montages comportent tous deux une résistance R_2 en rétroaction sur l'ampli-op
 - ♦ c'est probablement la première fois que vous rencontrez un schéma comportant une telle "rétroaction"
- ▶ Nous allons essayer de clarifier le fonctionnement un peu particulier de ces deux montages
 - ♦ il nous reste en effet quelques questions en suspens...



Introduction

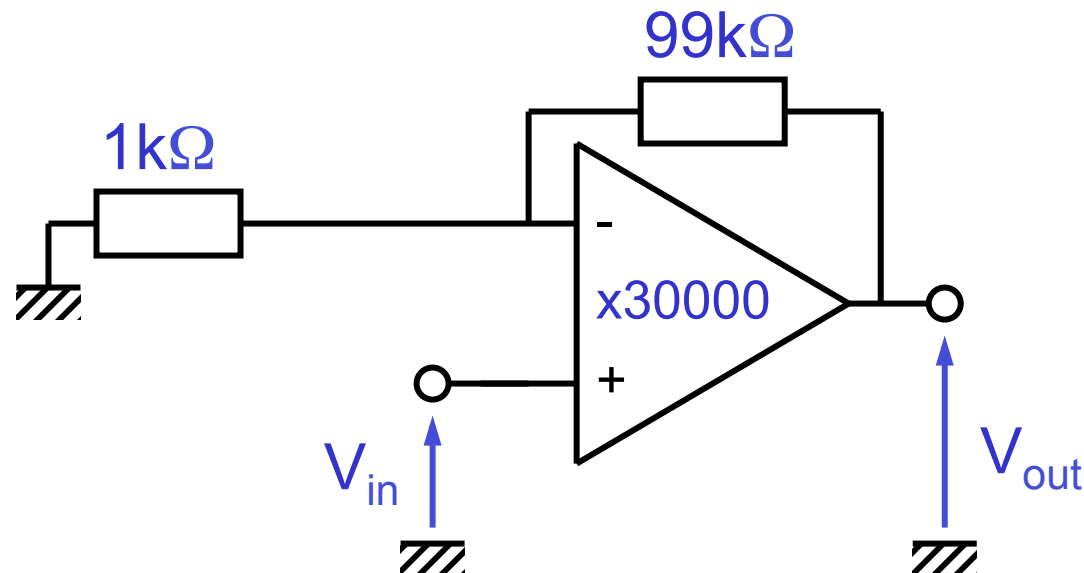
- ▶ Q: comment ça marche?
 - ◆ l'ampli-op n'amplifie pas V_{in} mais $(V^+ - V^-)$
 - ◆ quel est son lien avec V_{in}
 - ◆ que vaut cette ddp (qui en plus est virtuellement nulle)?
- ▶ Q: qu'est-ce qui justifie l'hypothèse du zéro virtuel?
 - ◆ les montages ont été calculés (méthode classique ou rapide) en supposant que l'ampli ne sature pas



Exemple de départ

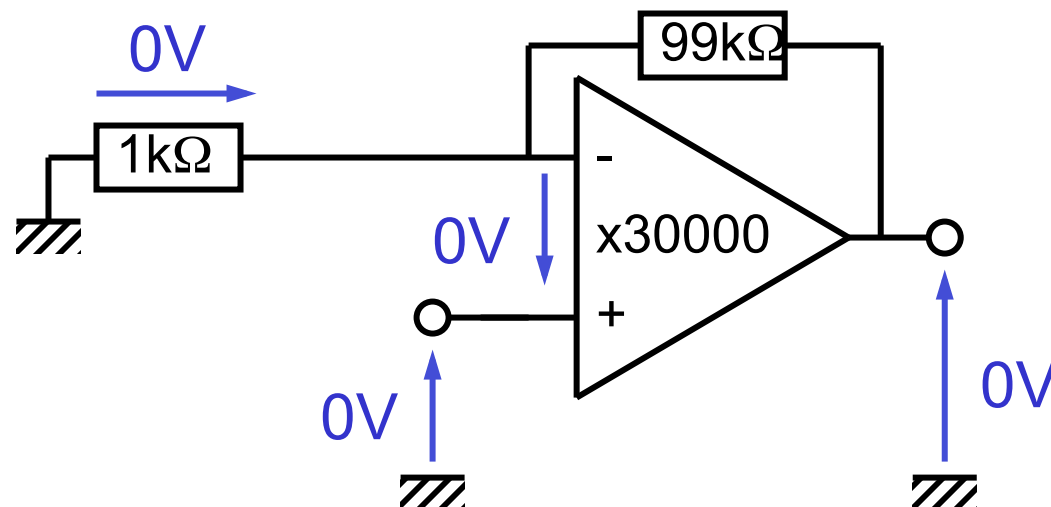
- ▶ Prenons le cas d'un ampli non-inverseur de gain ≈ 100
 - ◆ par ex: $R_1 = 1\text{k}\Omega$ et $R_2 = 99\text{k}\Omega$
 - ◆ gain de l'ampli-op = 30000
- ▶ => gain exact du montage = 99,666...

$$A_{non_inv} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A \cdot (R_1 + R_2)}{AR_1 + R_1 + R_2}$$



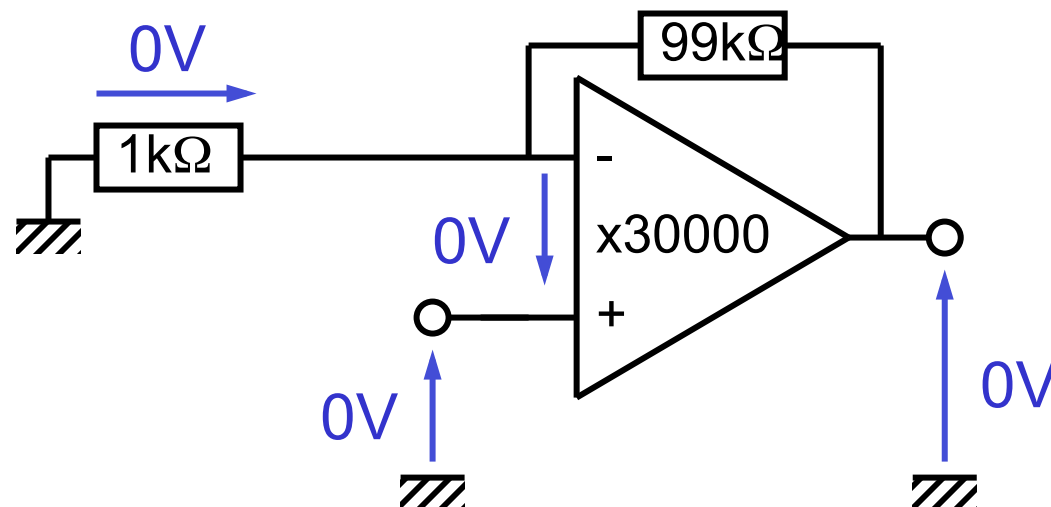
Analyse de la rétroaction: principe

- ▶ Partons par hypothèse de la situation où toutes les tensions du montage sont nulles
 - ◆ conditions initiales du problème (voir schéma ci-dessous)
- ▶ pour comprendre le fonctionnement du montage, nous allons modifier la tension d'entrée V_{in} et voir l'impact de cette modification sur les autres tensions
 - ◆ échelon sur la tension d'entrée V_{in}



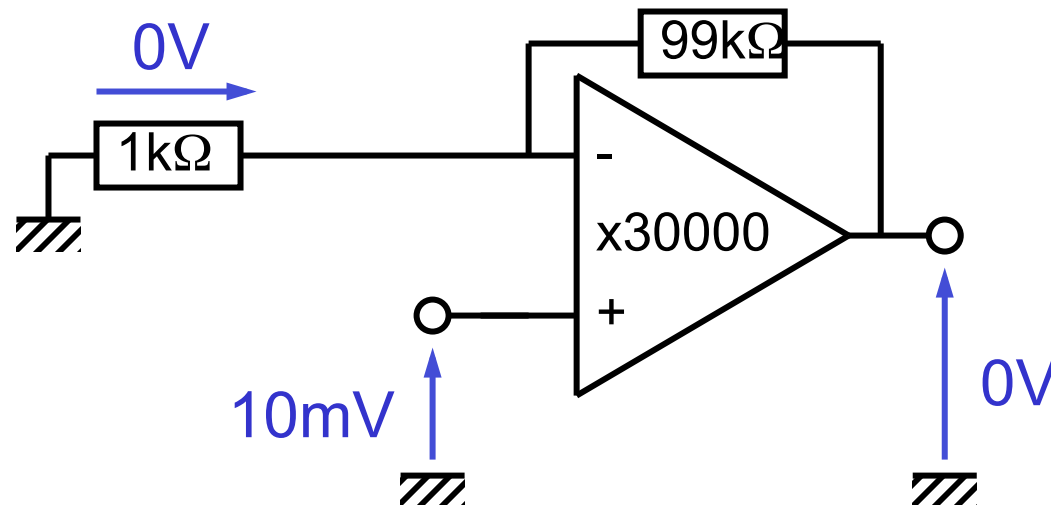
Analyse de la rétroaction: principe

- ▶ nous observerons deux règles dans notre raisonnement:
- ▶ 1) raisonner strictement en termes de "cause" et "d'effet"
 - ◆ quelle action déclenche quelle autre action?
- ▶ 2) l'ampli-op réagit avec un certain délai
 - ◆ raisonnons "plus vite" que l'ampli-op pour bien voir ce qui se passe
 - ◆ plus exactement: nous supposons que la tension de sortie de l'ampli-op ne peut pas subir de discontinuité (échelon)
 - hypothèse réaliste



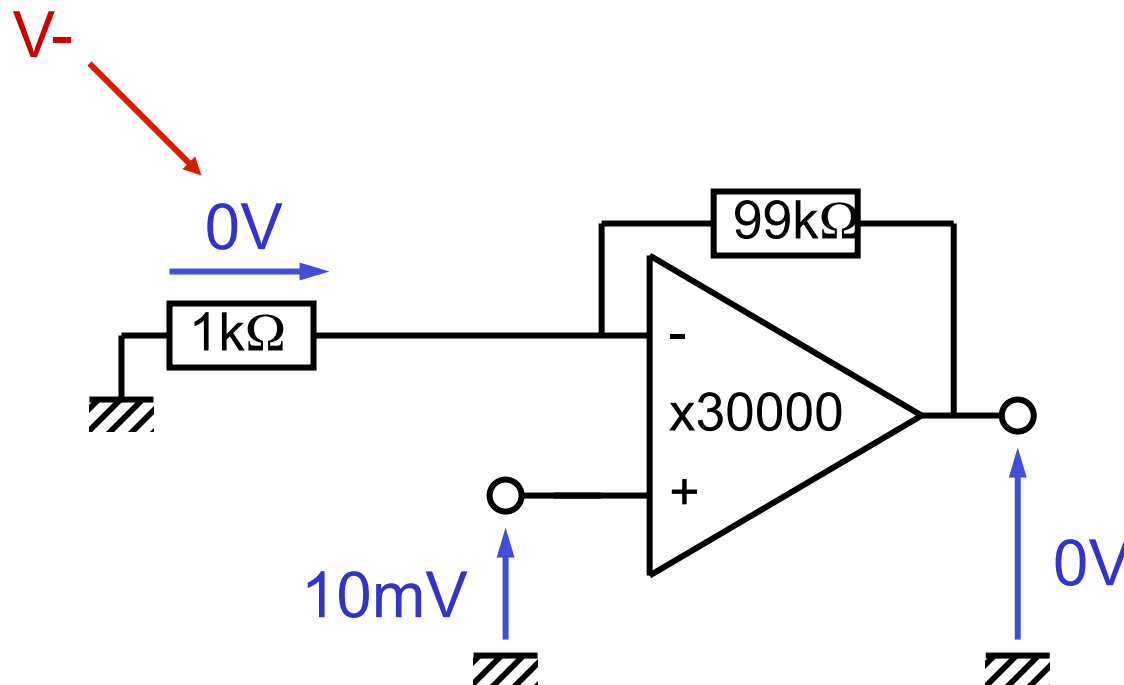
Echelon sur V_{in}

- ▶ Appliquons un échelon de 10mV sur V_{in}
 - ◆ N.B.: a priori, on devra obtenir en finale une tension de $10\text{mV} \times 100 = 1\text{V}$ en sortie du montage
- ▶ Quelle est la conséquence directe de cet échelon?



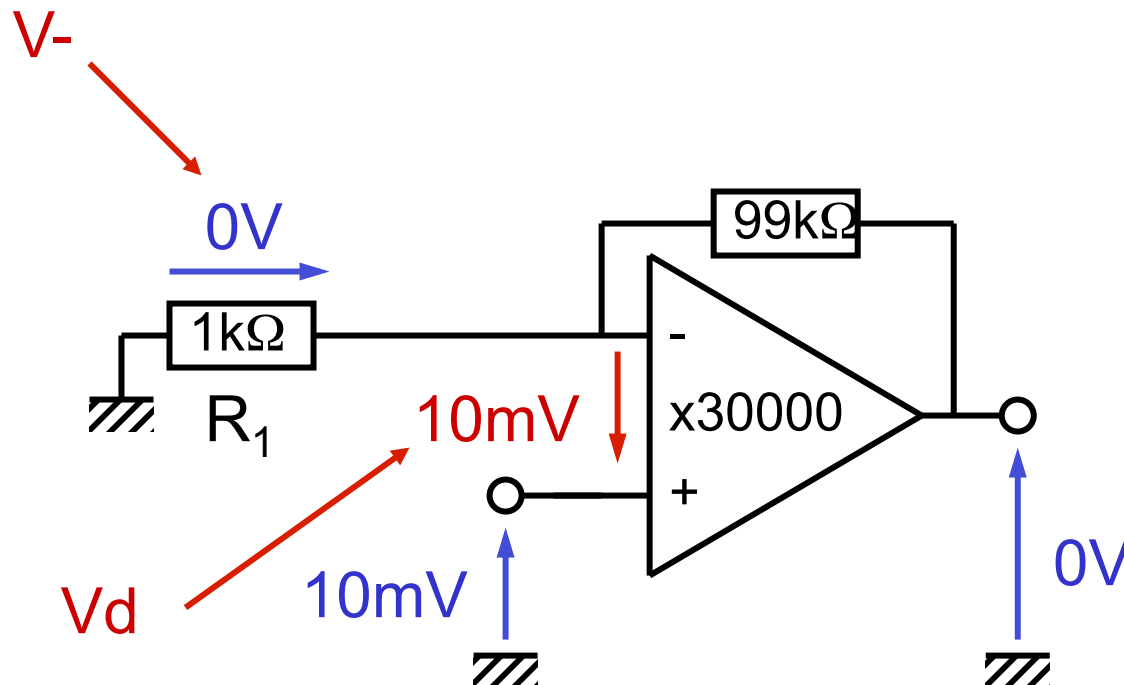
Conséquence de l'échelon: V^-

- ▶ Dans l'immédiat: il n'y a pas de raison pour que V^- change car nous (utilisateur) n'avons aucune action sur V^-
 - ♦ $\Rightarrow V^-$ reste à 0V



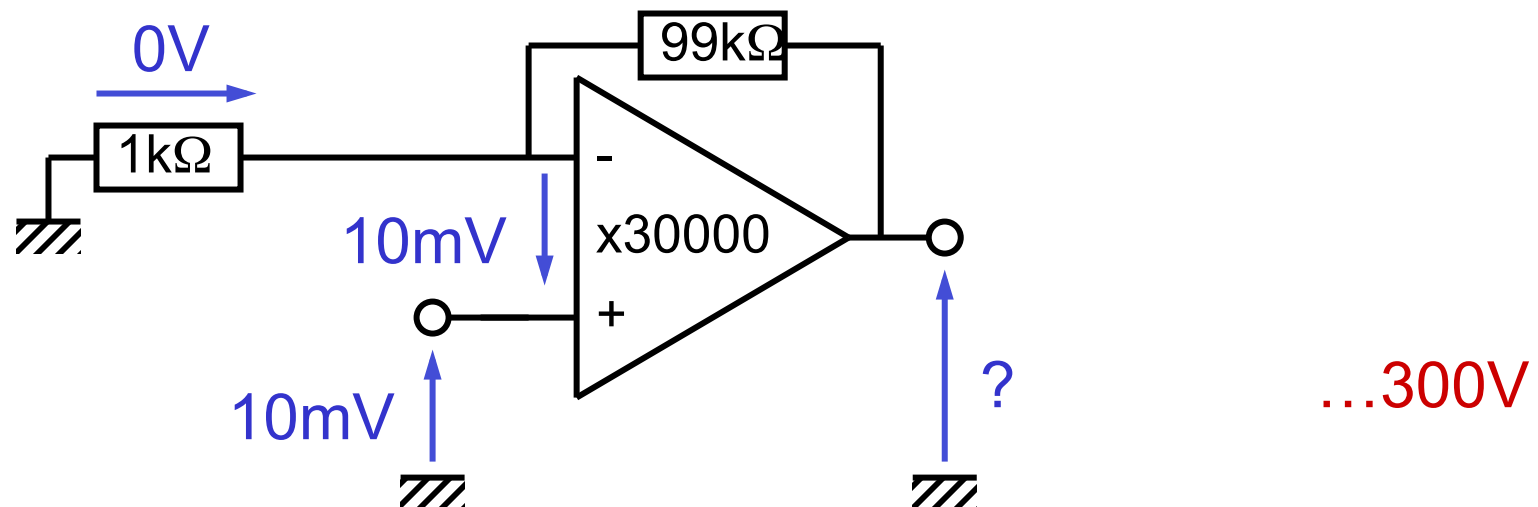
Conséquence de l'échelon: V_d

- ▶ V_d est par contre instantanément modifiée
 - ◆ $V_d = V^+ - V^- = 10\text{mV} - 0\text{V} = 10\text{mV}$
- ▶ => l'augmentation de V_{in} a comme première conséquence l'augmentation de V_d



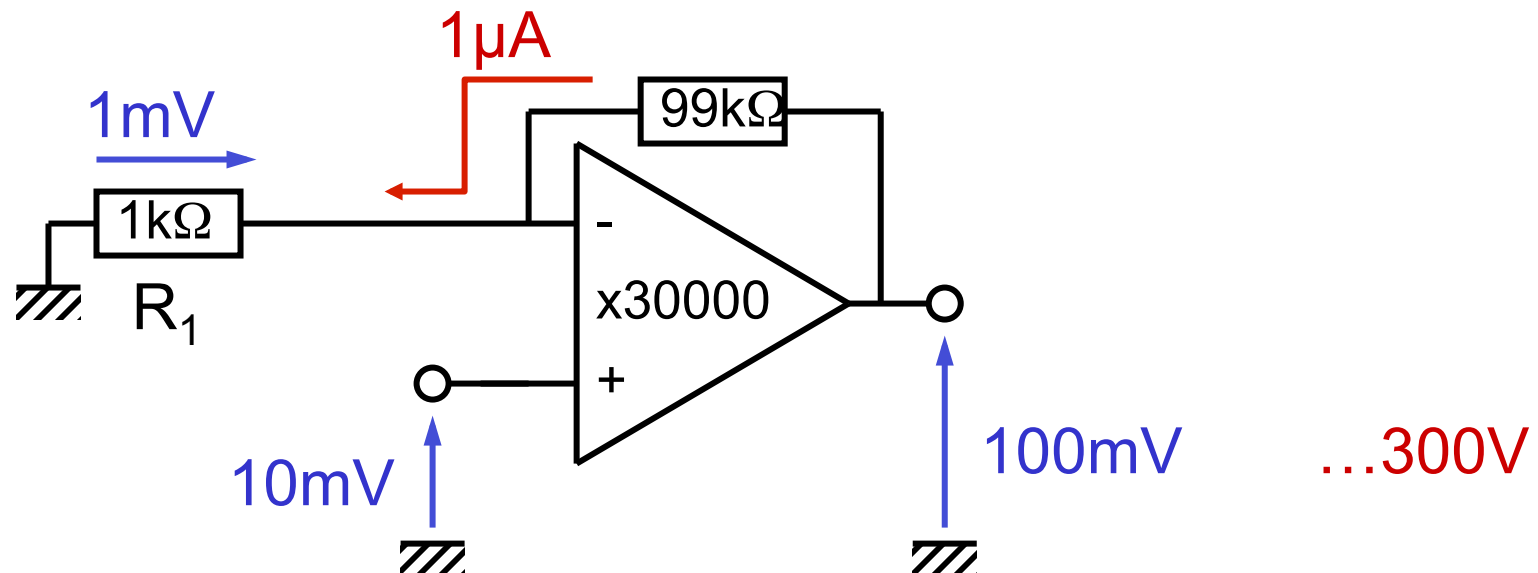
Conséquence de l'échelon: V_{out}

- ▶ V_d étant non nulle...
 - ◆ ...a priori, la tension de sortie de l'ampli-op devrait atteindre $V_d \cdot A = 10\text{mV} \times 30000 = 300\text{V}$
 - ce n'est pas réaliste car l'ampli-op saturera avant...
 - ...mais il se passe de toute façon aussi autre chose: c'est ici qu'intervient l'hypothèse que la tension de sortie de l'ampli-op ne peut pas varier instantanément
 - ◆ nous considérons que la sortie de l'ampli-op croît linéairement et analysons en particulier le moment où V_{out} vaut déjà 100mV



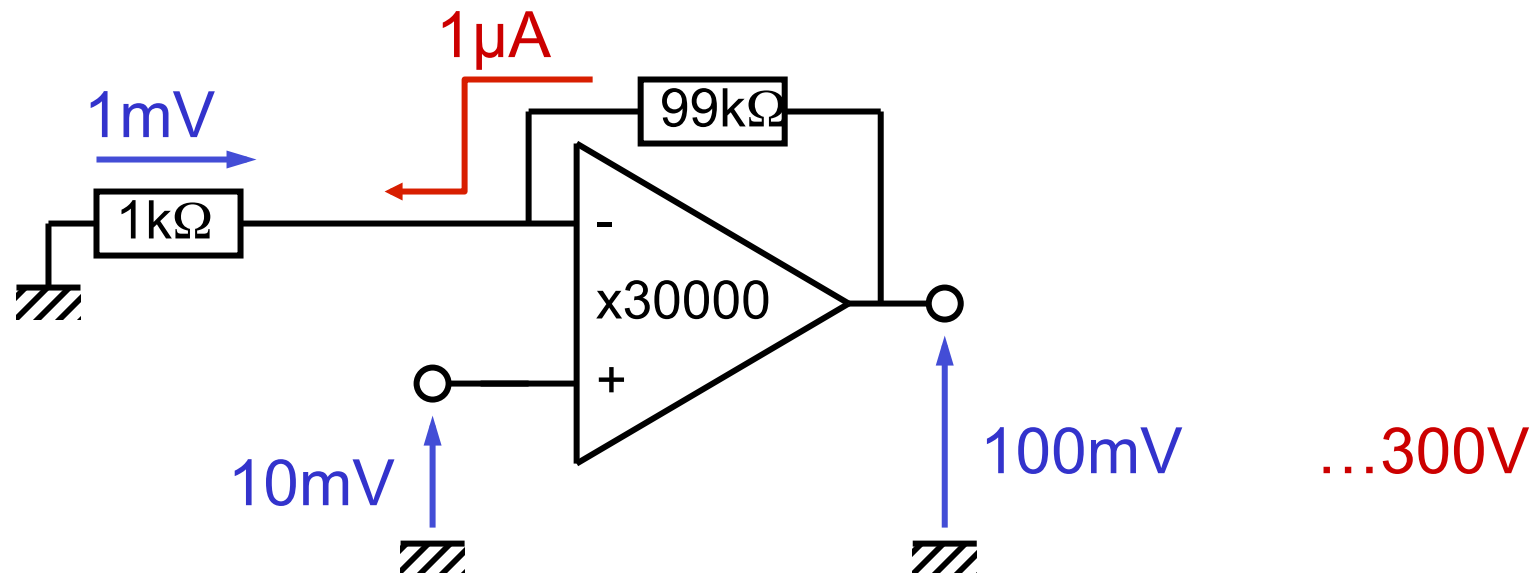
Conséquence de l'échelon: I et V-

- ▶ au moment où V_{out} vaut 100mV...
 - ◆ V_{out} étant non nulle, un courant circule dans les deux résistances
- ▶ en supposant une impédance d'entrée infinie pour l'ampli-op, ce courant vaut $100\text{mV}/100\text{k}\Omega = 1\mu\text{A}$
 - ◆ ce courant crée sur R_1 une chute de tension de $1\text{k}\Omega \cdot 1\mu\text{A} = 1\text{mV}$
 - ◆ cette chute de tension n'est autre que $V^- \Rightarrow V^-$ vaut 1mV



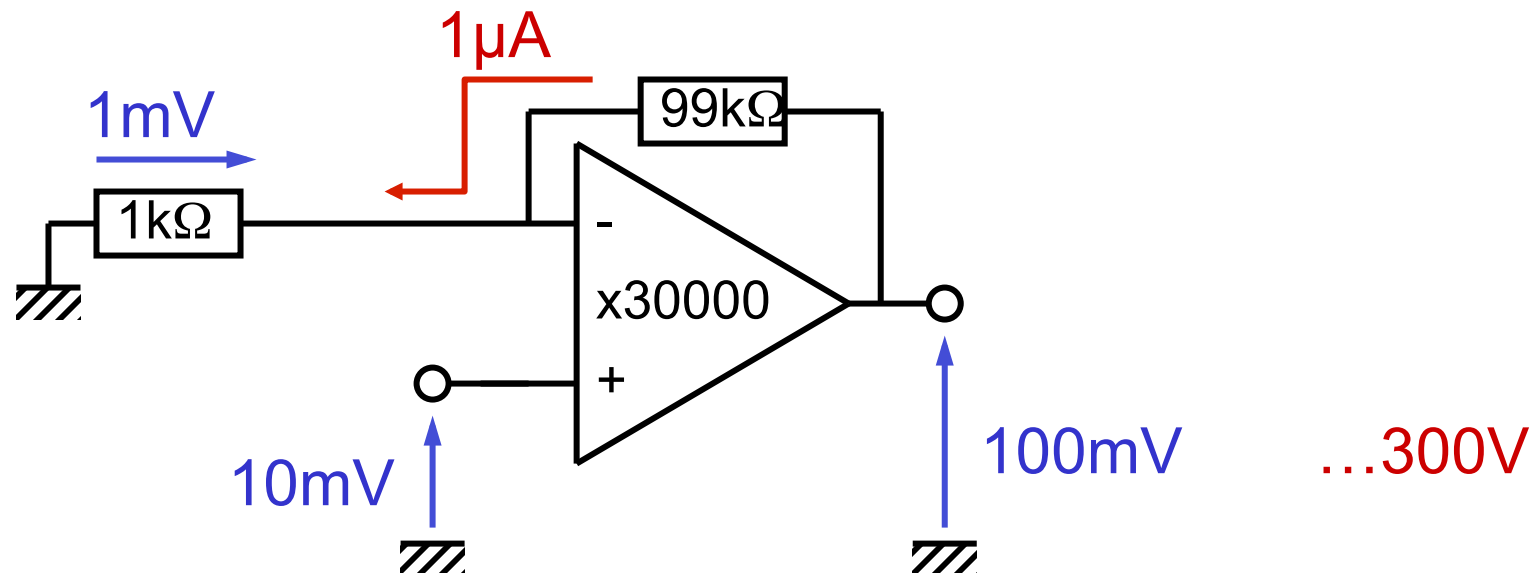
Conséquence de l'échelon: remarques

- ▶ 1) comme d'habitude, R_1 et R_2 forment un diviseur résistif: pour ce montage, V^- sera donc toujours 100 fois plus faible que V_{out}
 - ♦ souvenons-nous en dans la suite des calculs...
 - ♦ l'hypothèse d'une impédance d'entrée infinie est indispensable pour considérer que le courant est identique dans R_1 et dans R_2



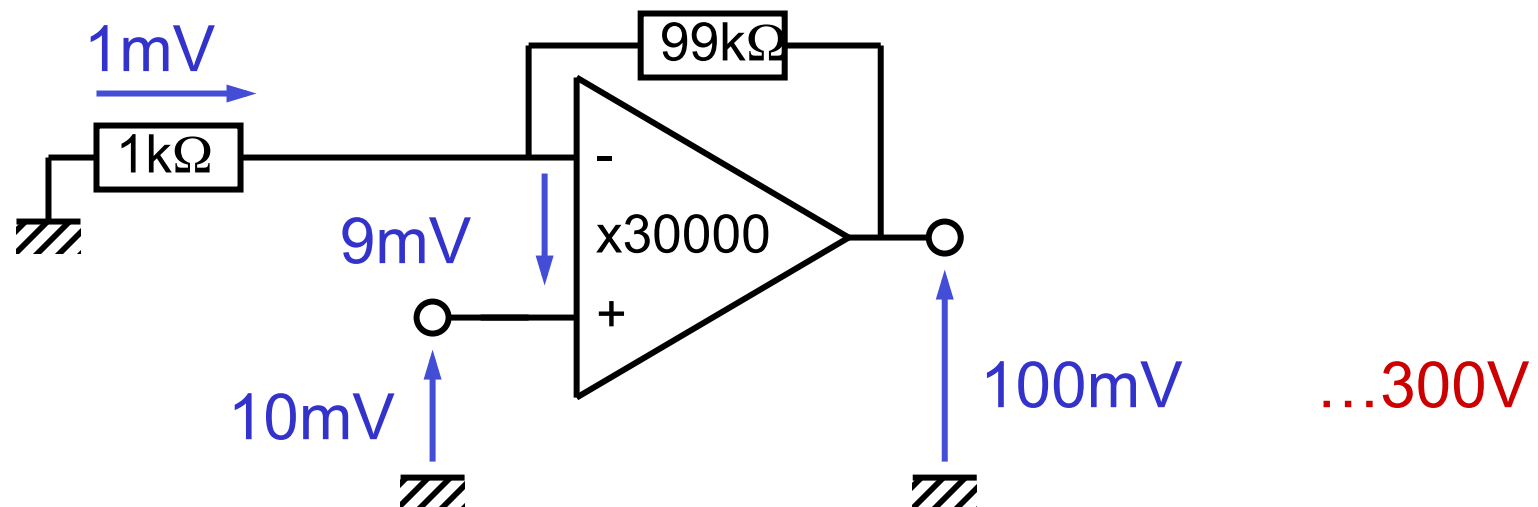
Conséquence de l'échelon: remarques

- ▶ 2) au total, V^- a donc bien été modifiée, mais pas directement par l'échelon sur V_{in}
 - ♦ la modification de V^- est au contraire indirecte: elle a lieu "à travers" l'ampli-op et la rétroaction



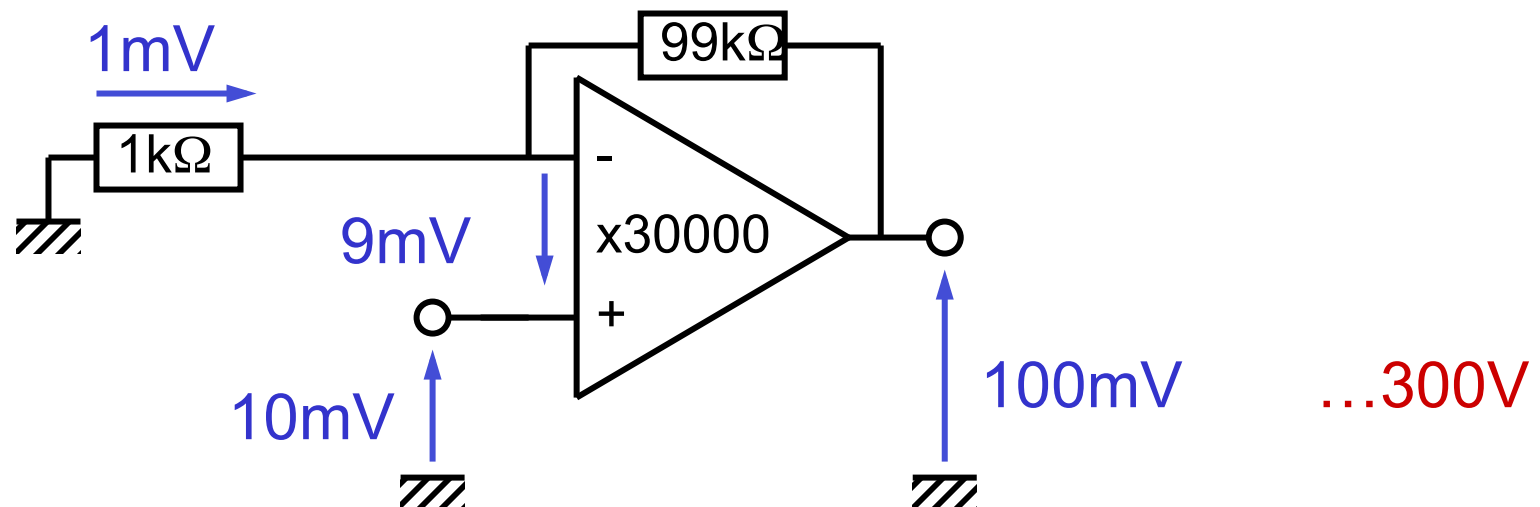
Conséquence de l'échelon: V_d (bis)

- ▶ Enfin puisque V^- change, V_d change également à nouveau
 - ◆ mais cette fois-ci V_d diminue
 - alors qu'elle avait augmenté quand on touchait à V_{in}
 - ◆ V_d vaut maintenant $10\text{mV} - 1\text{mV} = 9\text{mV}$



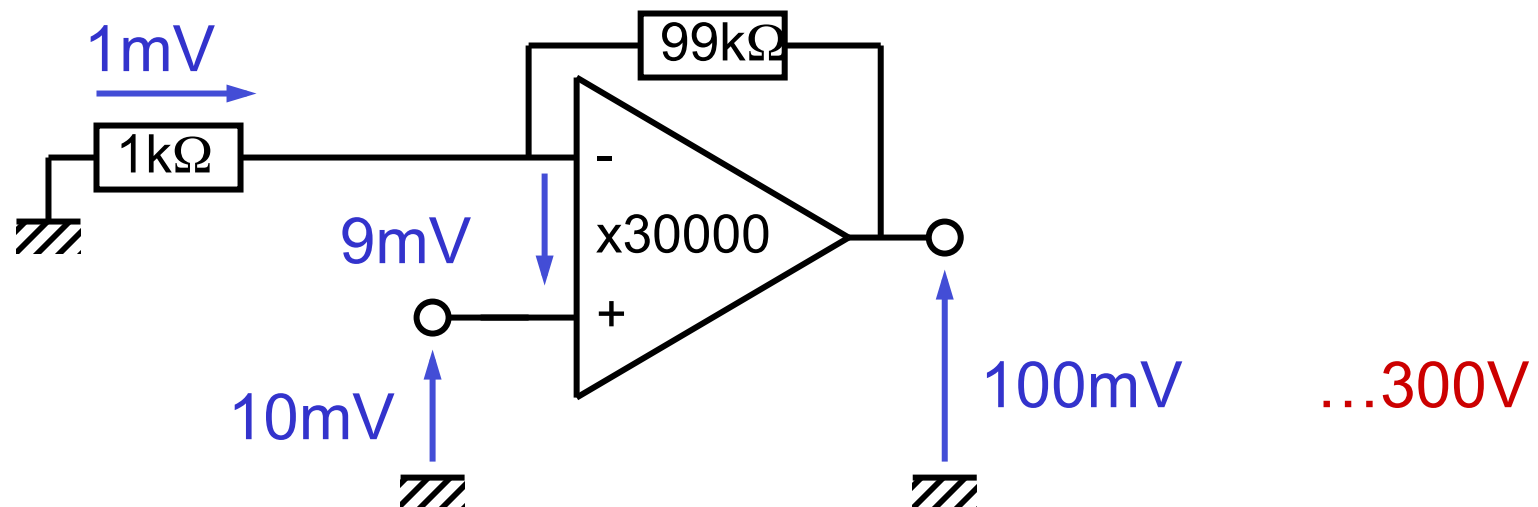
Conséquence de l'échelon: analyse

- ▶ On constate donc...
- ▶ 1) ...que quand on augmente V^+ (et donc V_d), la rétroaction réagit en sens inverse, c'est-à-dire fait diminuer V_d via une augmentation de V^-
 - ♦ cette constatation peut être généralisée et explique la raison pour laquelle ce type de rétroaction est aussi appelée "contre-réaction"



Conséquence de l'échelon: analyse

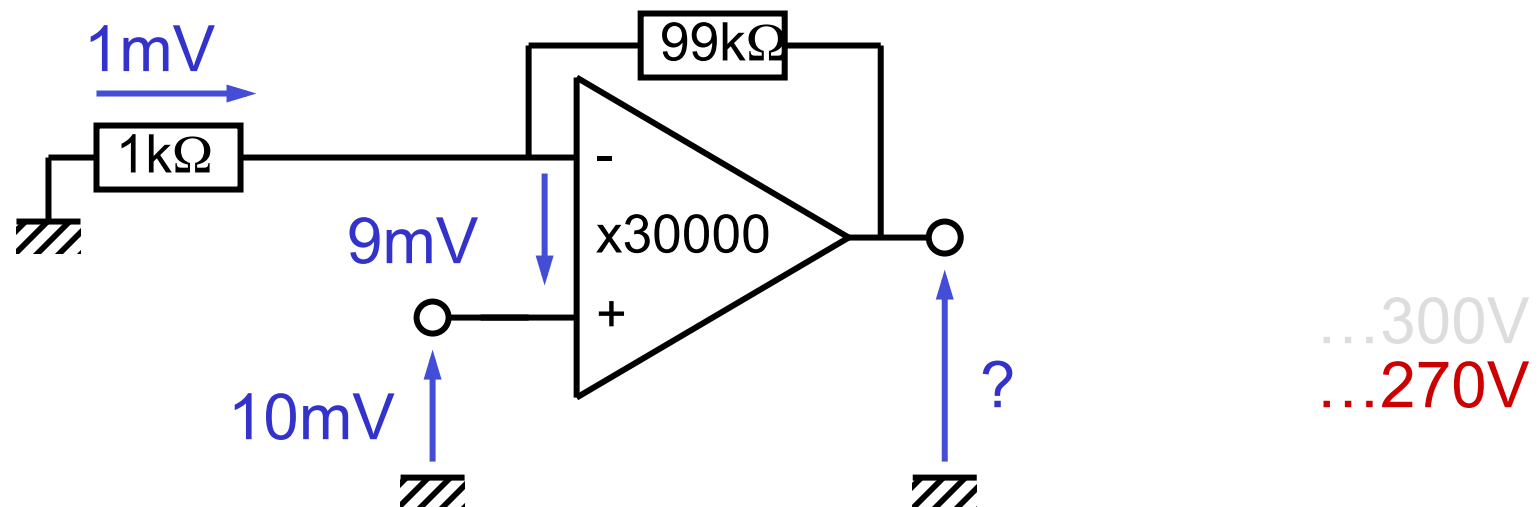
- ▶ On constate donc...
- ▶ 2) ...qu'un "cycle" s'est formé
 - ♦ augmentation de V^+
 - ♦ $\Rightarrow$ augmentation de V_d
 - ♦ $\Rightarrow$ augmentation de V_{out}
 - ♦ $\Rightarrow$ augmentation de V^-
 - ♦ $\Rightarrow$ diminution de V_d



Phase de "convergence"

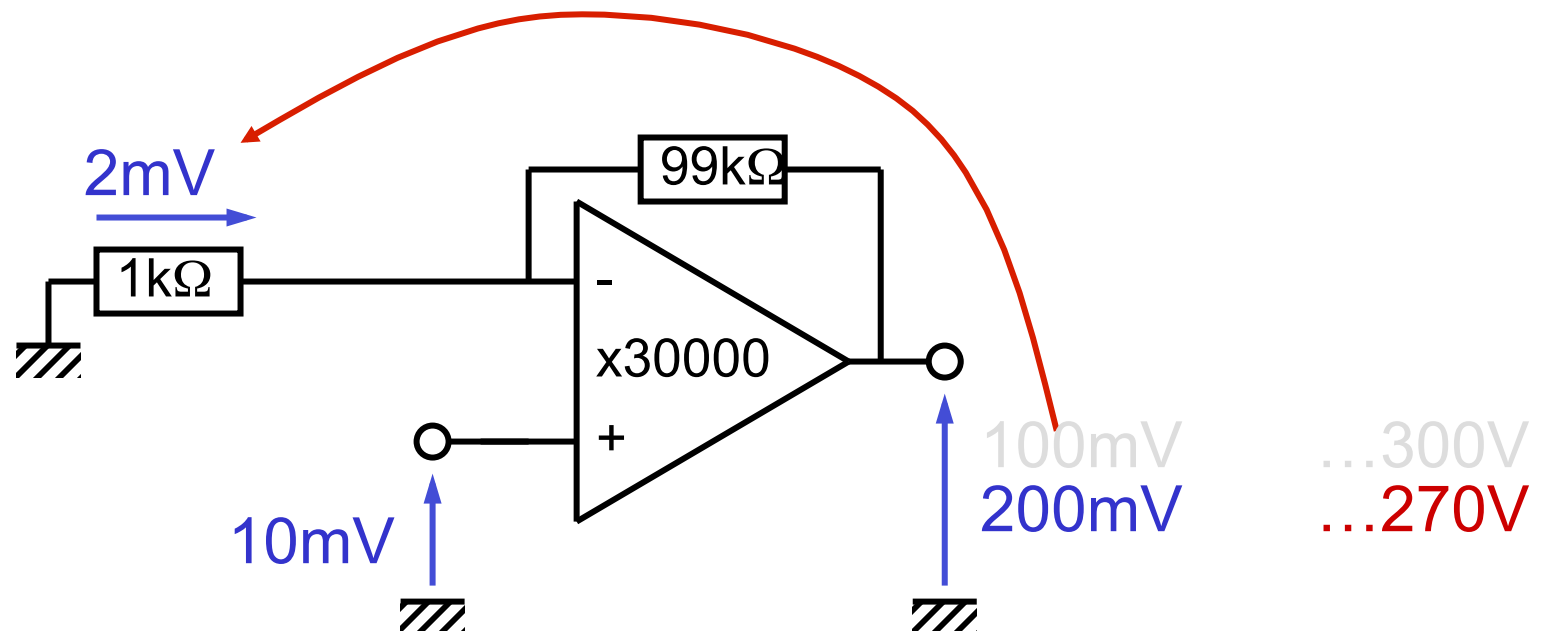
► Q: Et ensuite?

- maintenant qu'il n'y a plus que 9mV à l'entrée de l'ampli-op, celui-ci ne doit plus atteindre que 270V (au lieu de 300V)
 - ♦ => sa tension de sortie doit encore monter...
 - mais moins qu'avant
 - ♦ => considérons une tension de sortie de 200mV



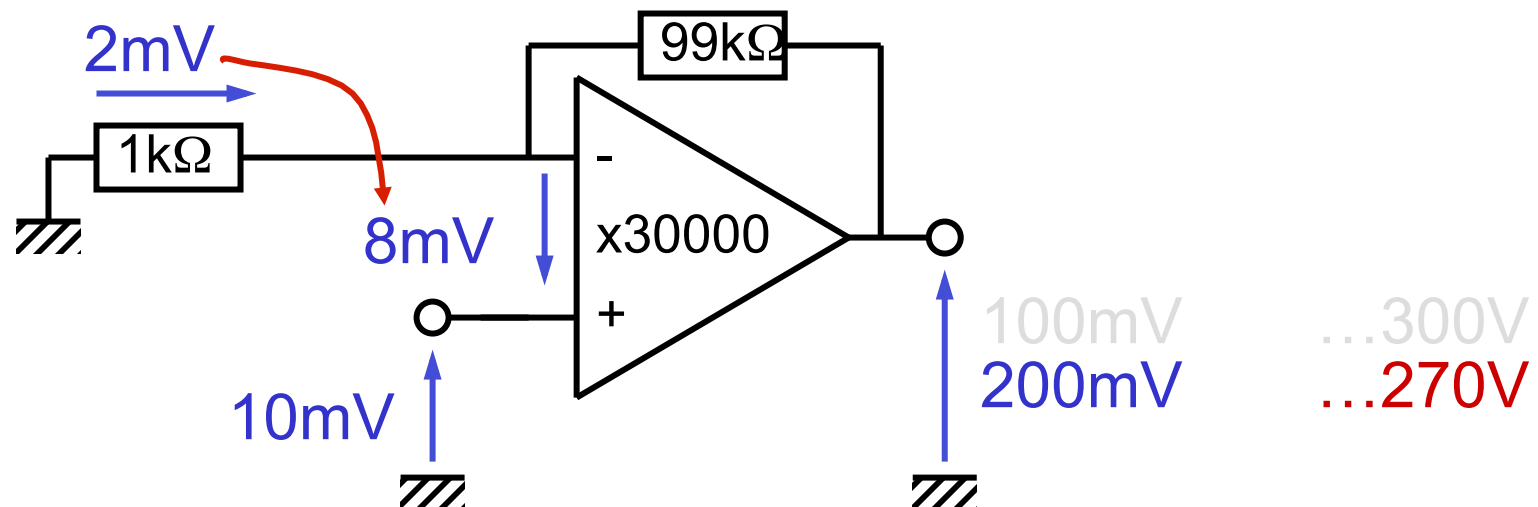
Phase de "convergence"

- ▶ Lorsque V_{out} atteint 200mV...
- ▶ ... V^- est 100 fois plus faible $\Rightarrow V^- = 2\text{mV}$



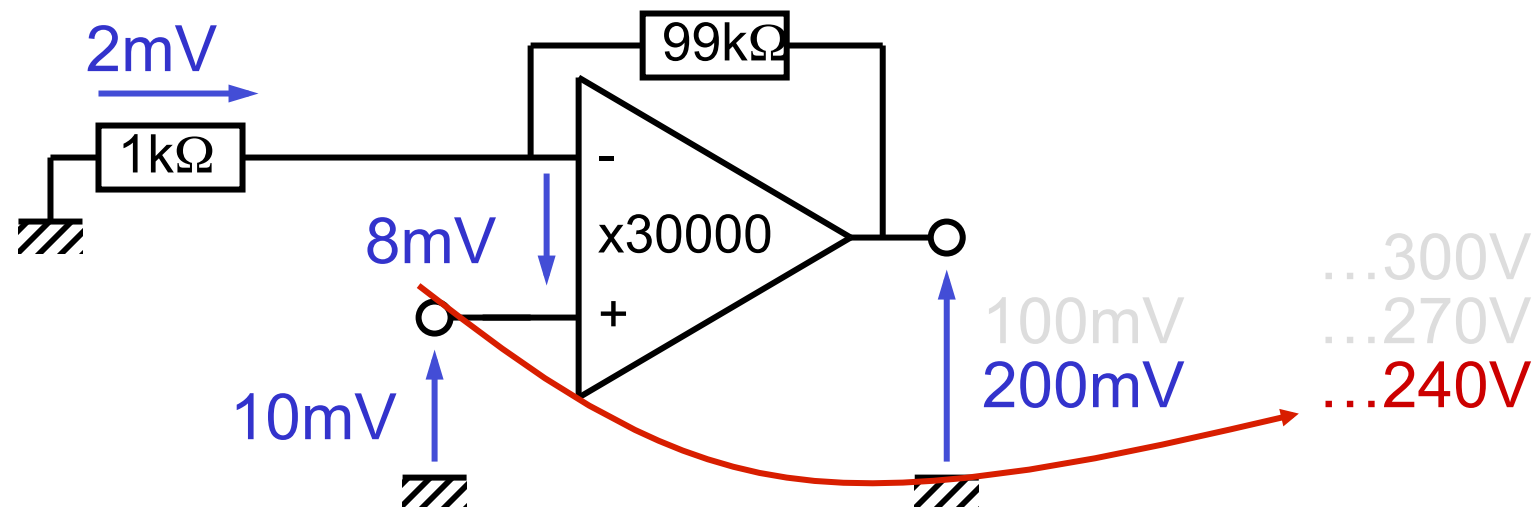
Phase de "convergence"

- ▶ Lorsque V_{out} atteint 200mV...
- ▶ ... V^- est 100 fois plus faible $\Rightarrow V^- = 2\text{mV}$...
- ▶ ...et V_d ne vaut plus que $10\text{mV} - 2\text{mV} = 8\text{mV}$
- ▶ $\Rightarrow$ à mesure que V_{out} augmente, V_d diminue



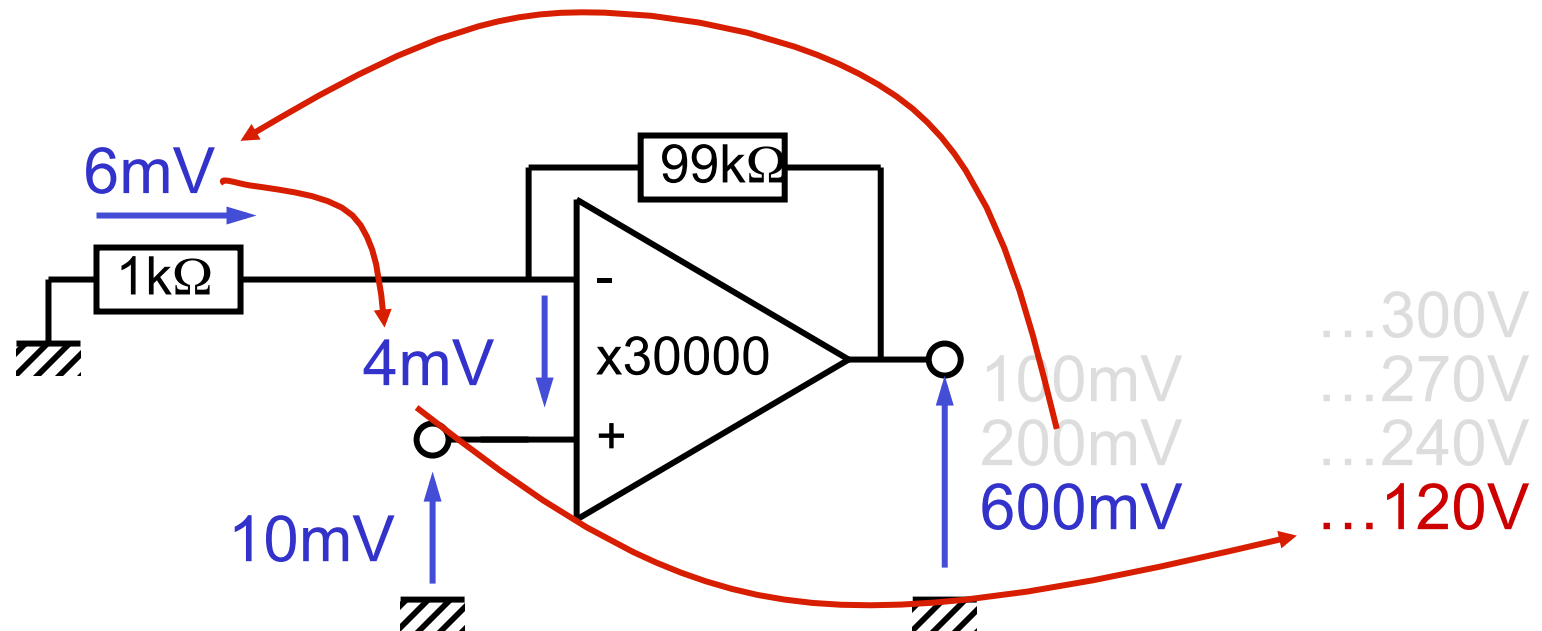
Phase de "convergence"

- ▶ Maintenant qu'il n'y a plus que **8mV** à l'entrée de l'ampli-op, celui-ci ne doit plus atteindre que **240V**
 - ◆ => sa tension de sortie doit encore monter...
 - mais moins qu'avant
 - ◆ => considérons une tension de sortie de 600mV



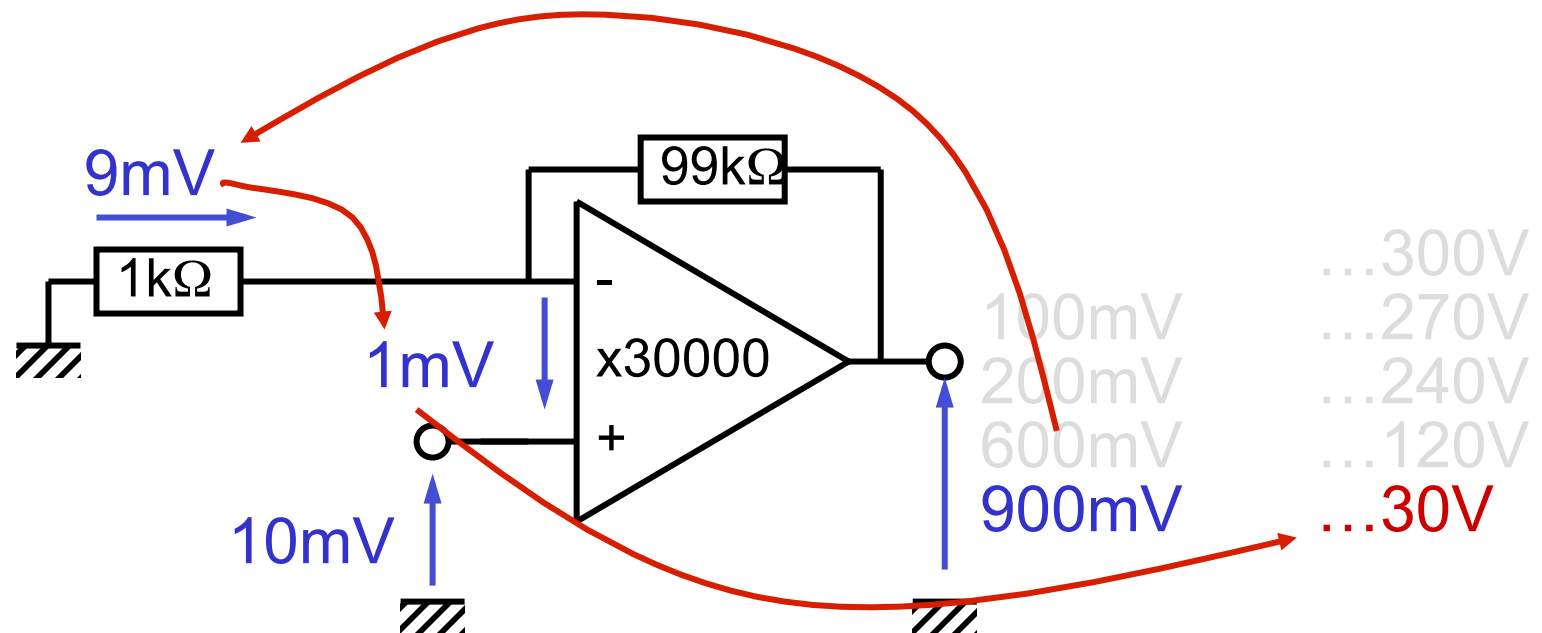
Phase de "convergence"

- ▶ et ça continue...



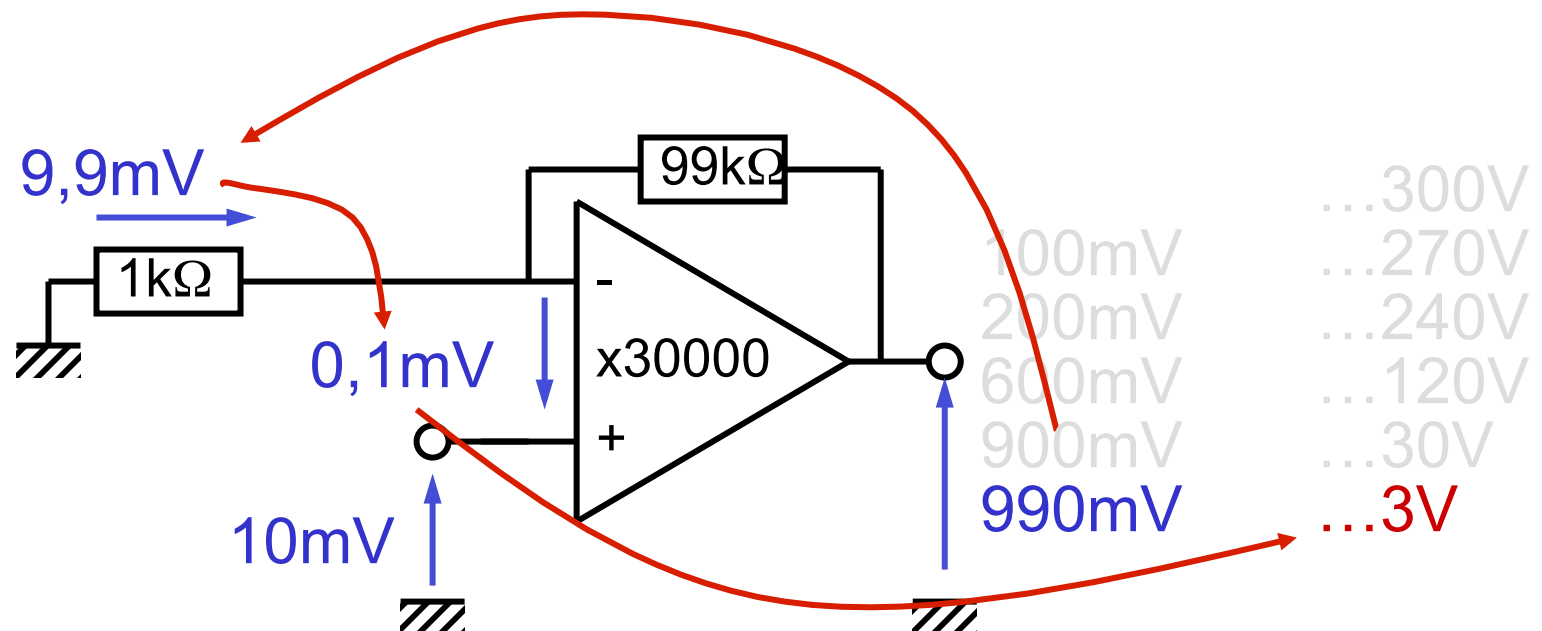
Phase de "convergence"

- ▶ et ça continue...



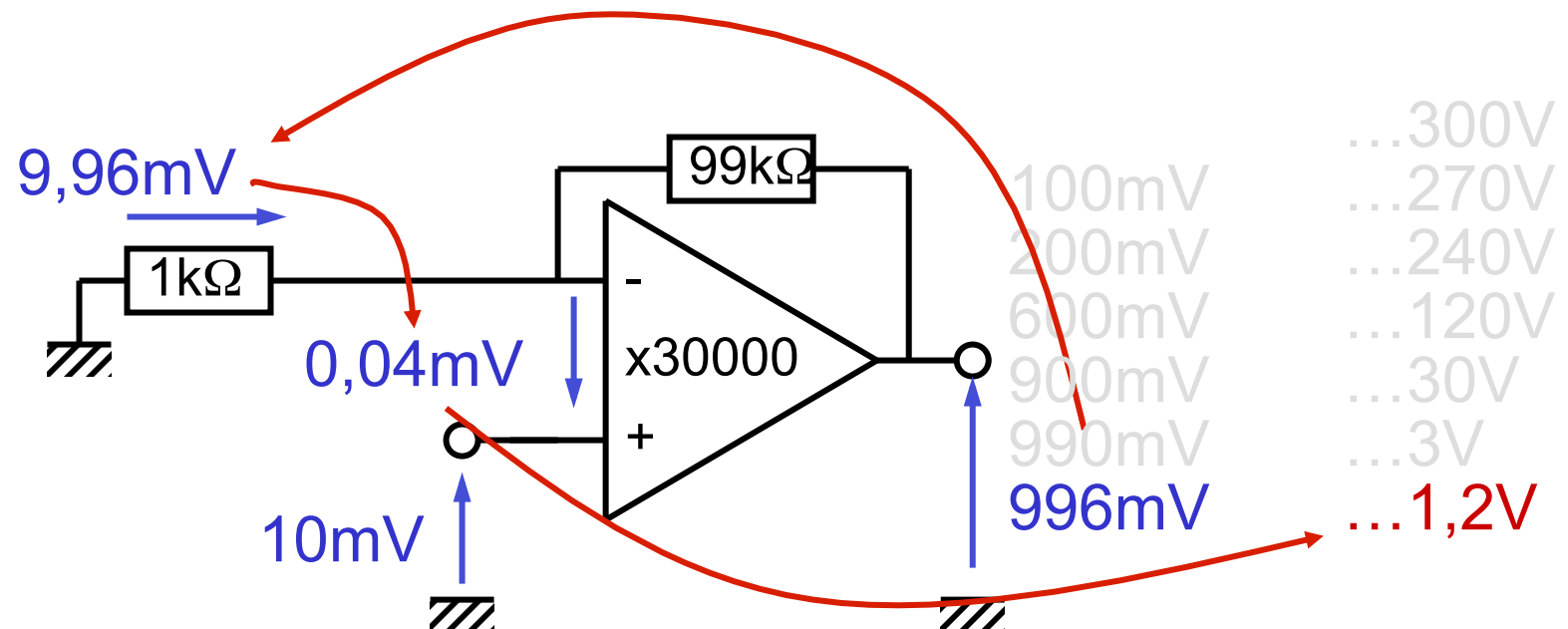
Phase de "convergence"

- ▶ et ça continue...



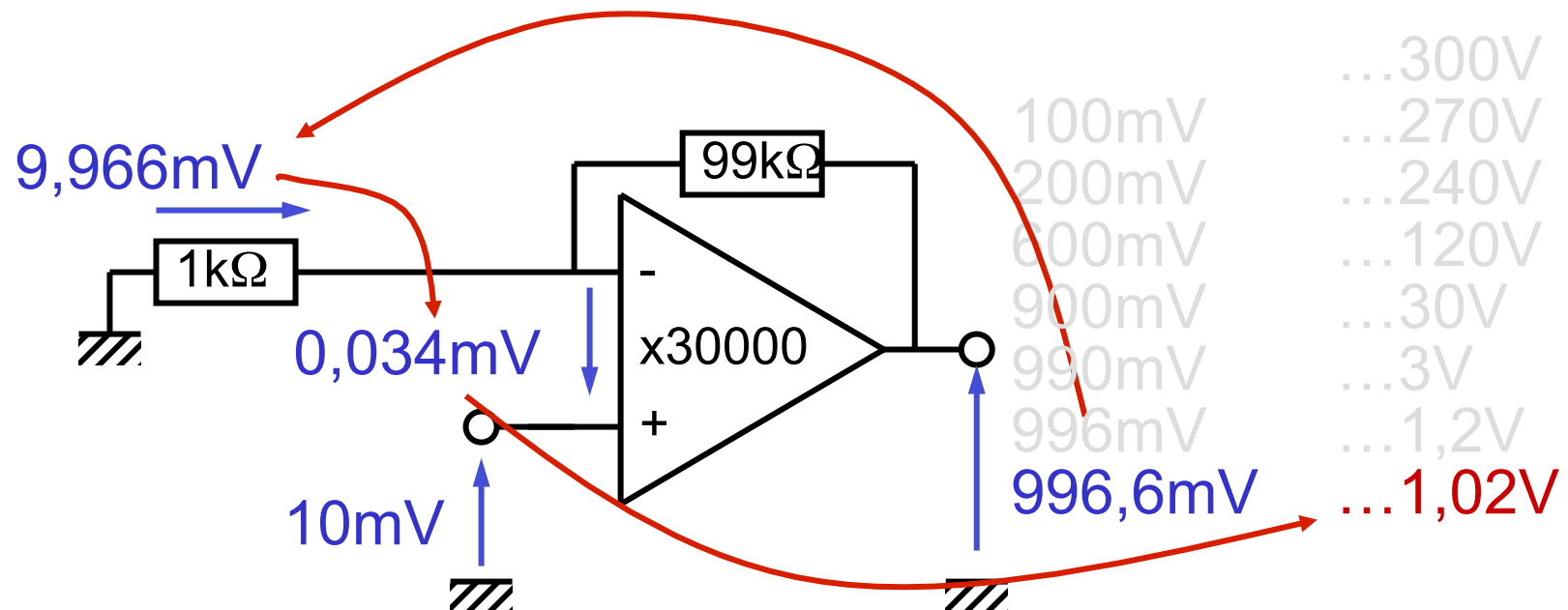
Phase de "convergence"

- ▶ et ça continue...



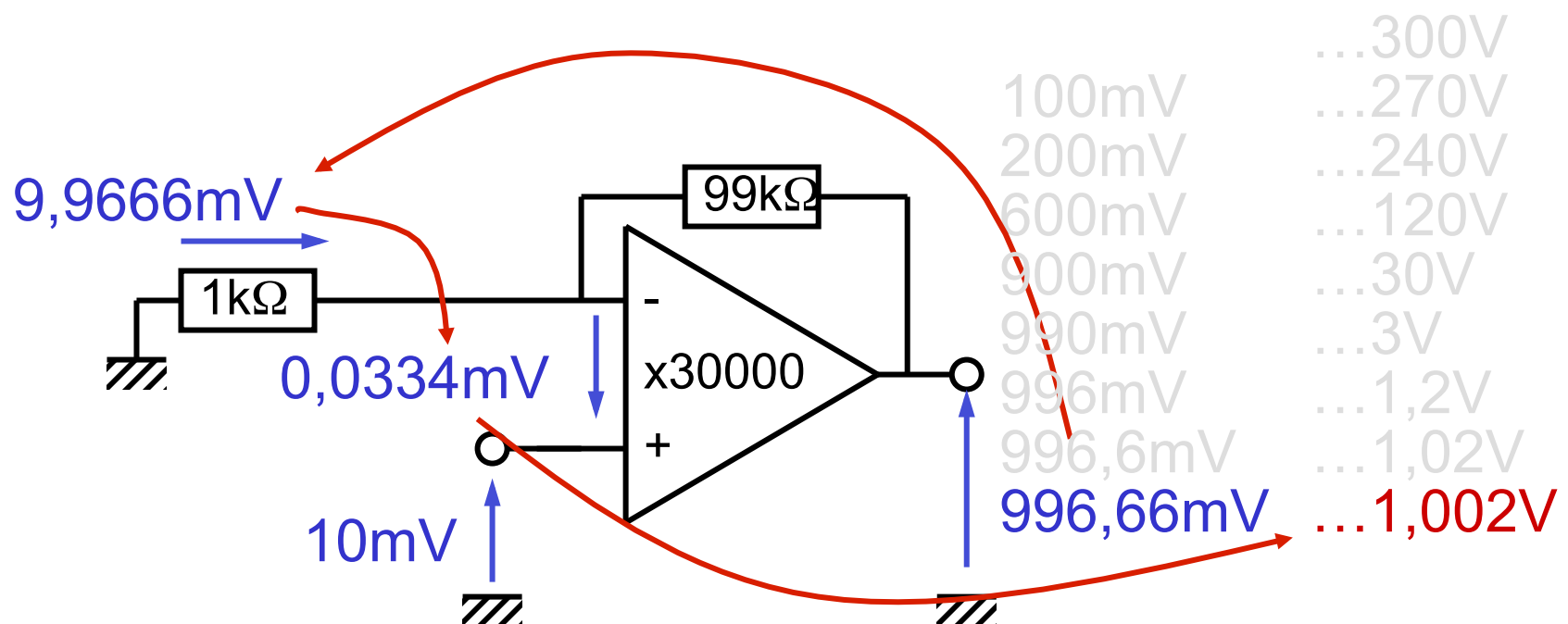
Phase de "convergence"

- ▶ et ça continue...



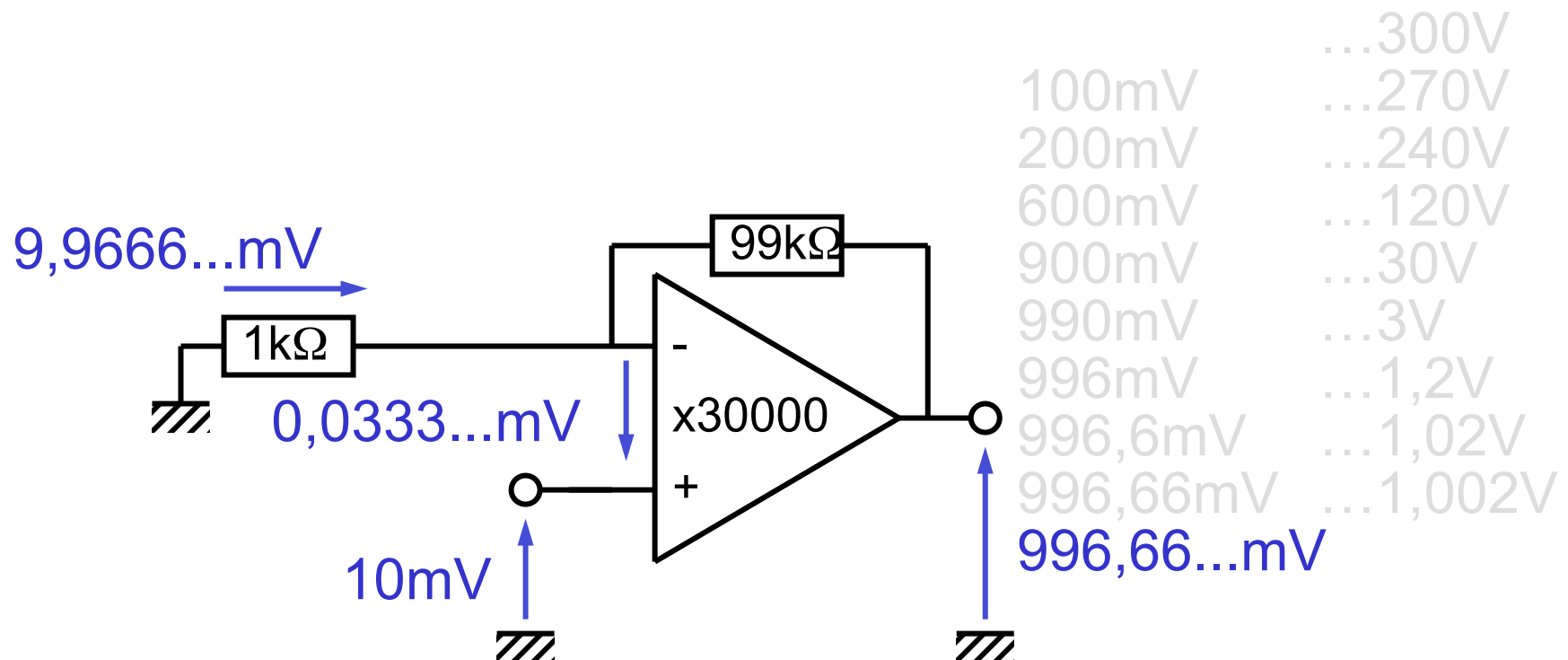
Phase de "convergence"

- ▶ Q: Quand est-ce qu'on s'arrête?
- ▶ R: la tension de sortie de l'ampli-op continue à monter tant qu'elle n'atteint pas 30000 fois la tension V_d
 - ◆ mais plus V_{out} monte plus V_d diminue
 - ◆ en même temps, V^- se rapproche de plus en plus de V^+



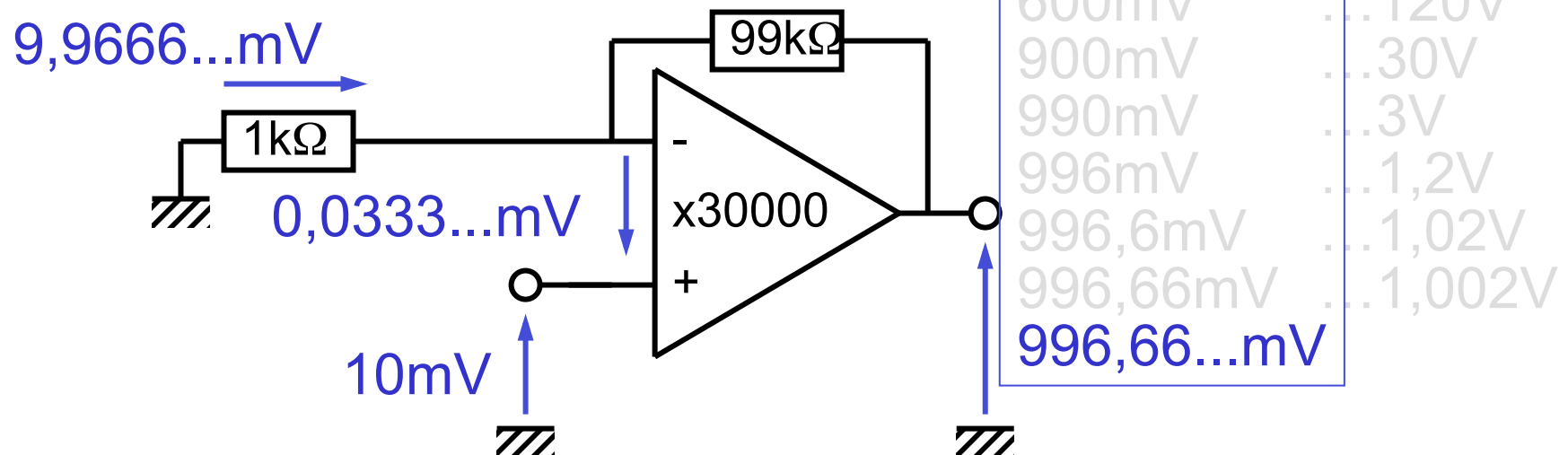
Situation finale

- ▶ Le processus s'arrête quand le système a convergé, c'est-à-dire quand la tension de sortie de l'ampli-op est exactement égale à 30000 fois V_d
 - ♦ c'est la situation représentée ci-dessous



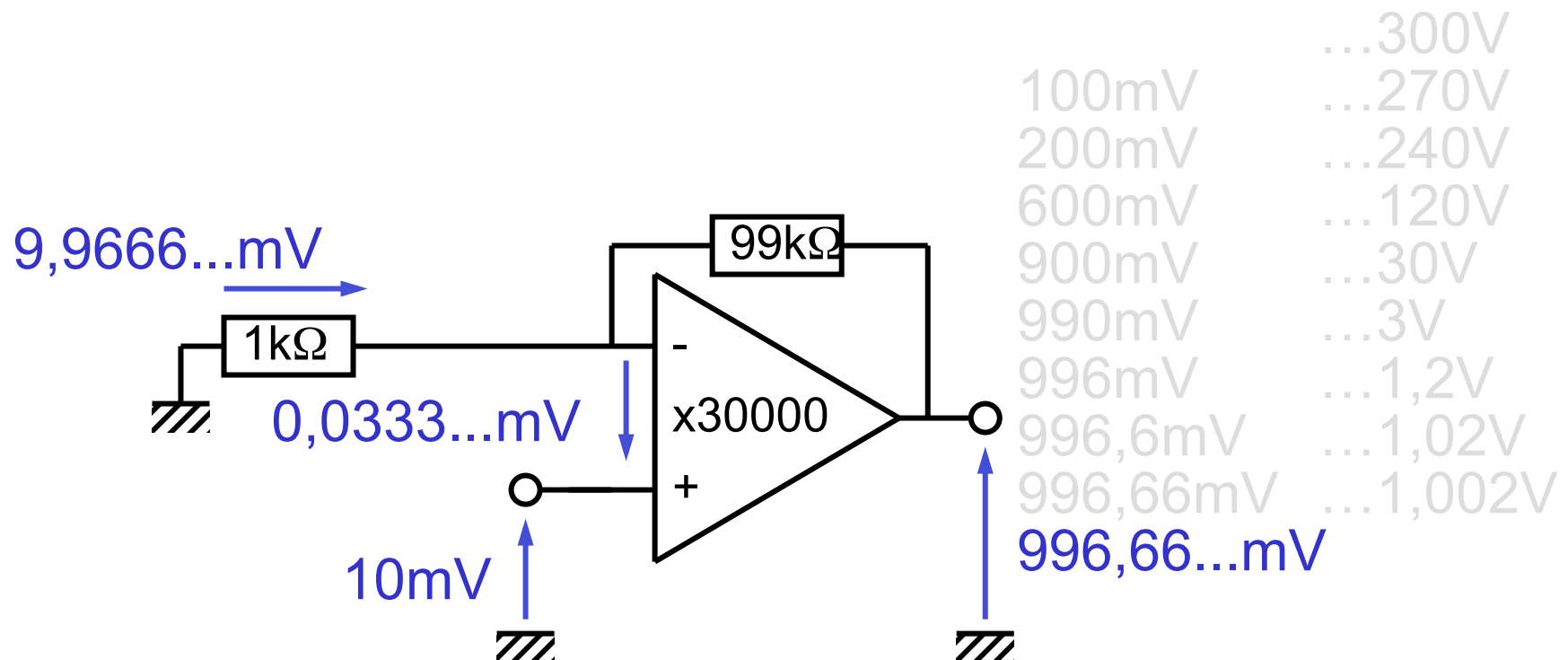
Situation finale: remarques

- ▶ 1) V_{out} vaut bien 100 fois (99,666... fois) V_{in}
 - ◆ on retrouve bien le gain du montage ($1+R_2/R_1$)
- ▶ 2) la sortie de l'ampli-op n'a jamais atteint la saturation
 - ◆ elle n'a même jamais dépassé 1V
 - justifie le zéro virtuel!



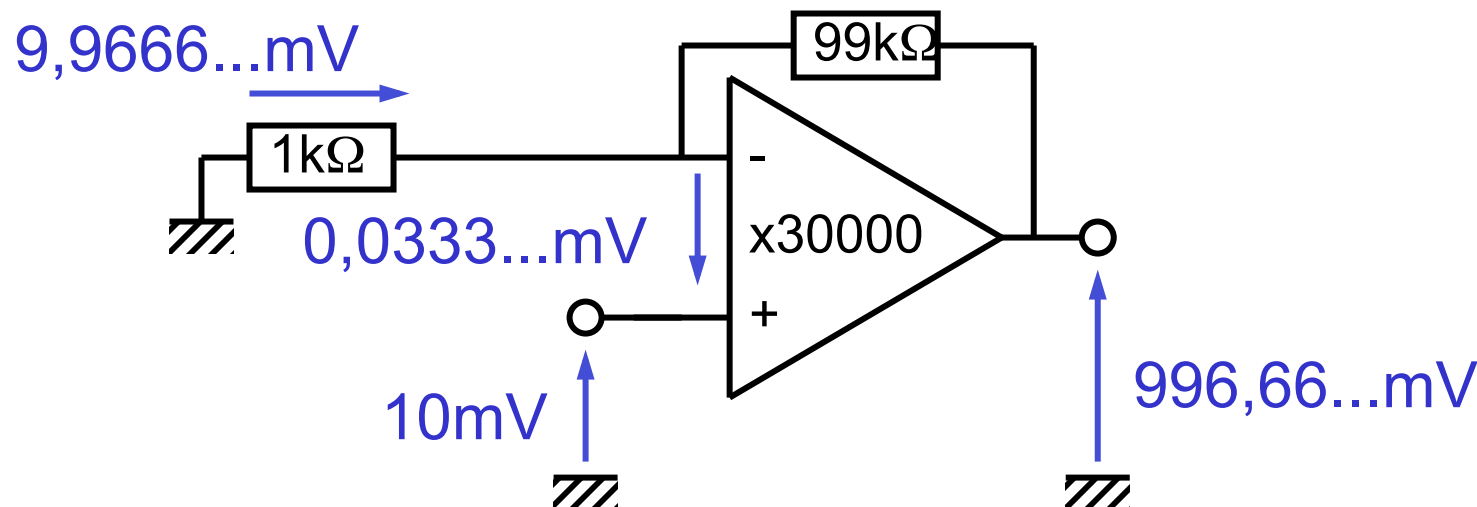
Situation finale: remarques

- ▶ 3) la tension V_d est bien extrêmement faible
 - ◆ nettement en-dessous du mV!
 - ◆ on a bien un zéro virtuel!
- ▶ 4) la tension V^- est bien (quasiment) égale à V^+



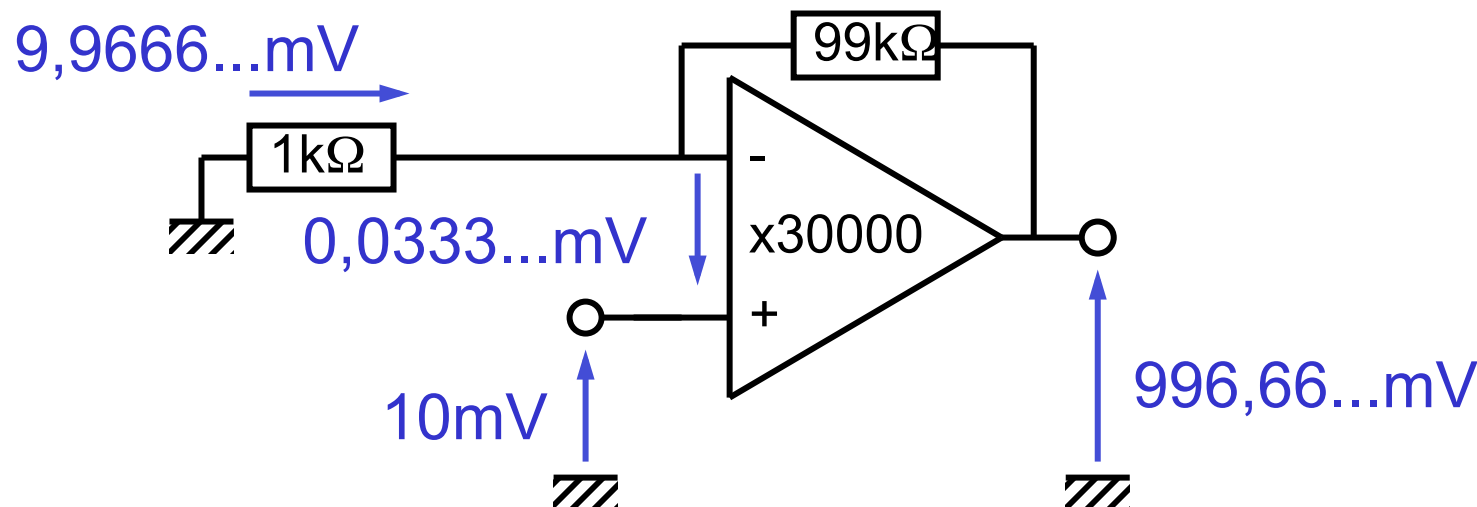
Situation finale: remarques

- ▶ 5) en réalité, le phénomène est très rapide: dès que la tension V_d augmente (via V_{in}), la rétroaction réagit pour la diminuer (via V^-)
 - ◆ en réalité, lorsqu'on regarde V^+ et V^- à l'oscilloscope, on voit deux signaux identiques: le "rattrapage" est trop rapide pour être vu!



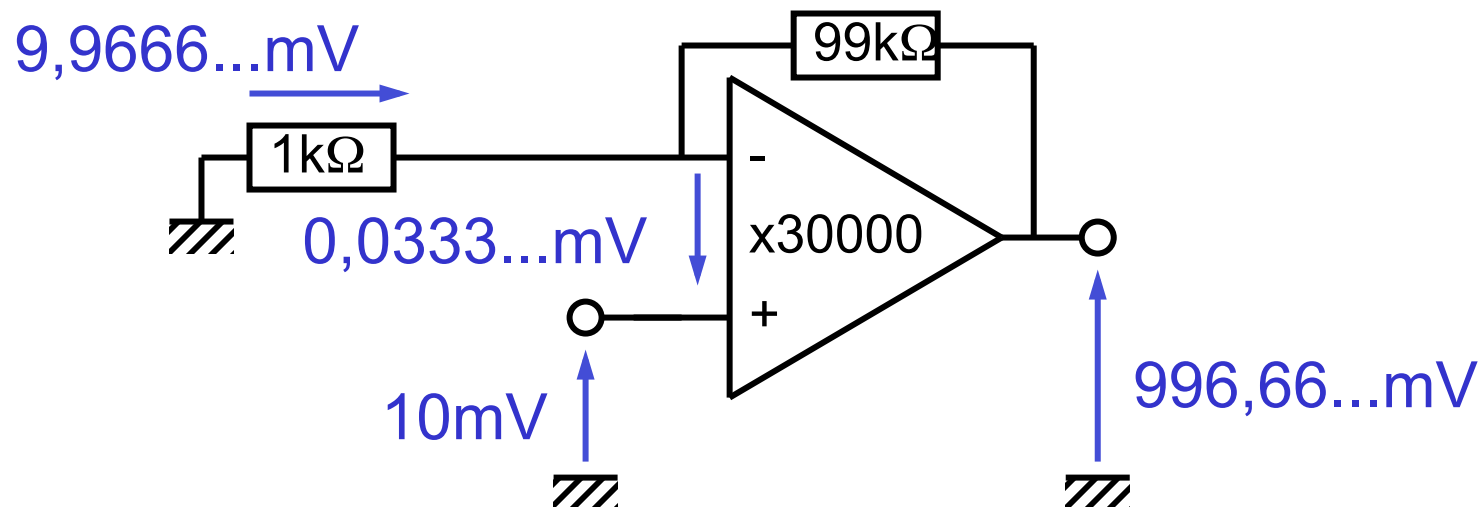
Situation finale: remarques

- ▶ 6) les équations (méthode classique ou rapide) ne vous donnent que l'équilibre final du système
 - ◆ il n'y a aucune notion de délai dans les équations
 - ◆ or la notion de rétroaction ne peut être comprise qu'en analysant l'évolution temporelle du système
 - d'où le "film au ralenti" des diapos précédentes



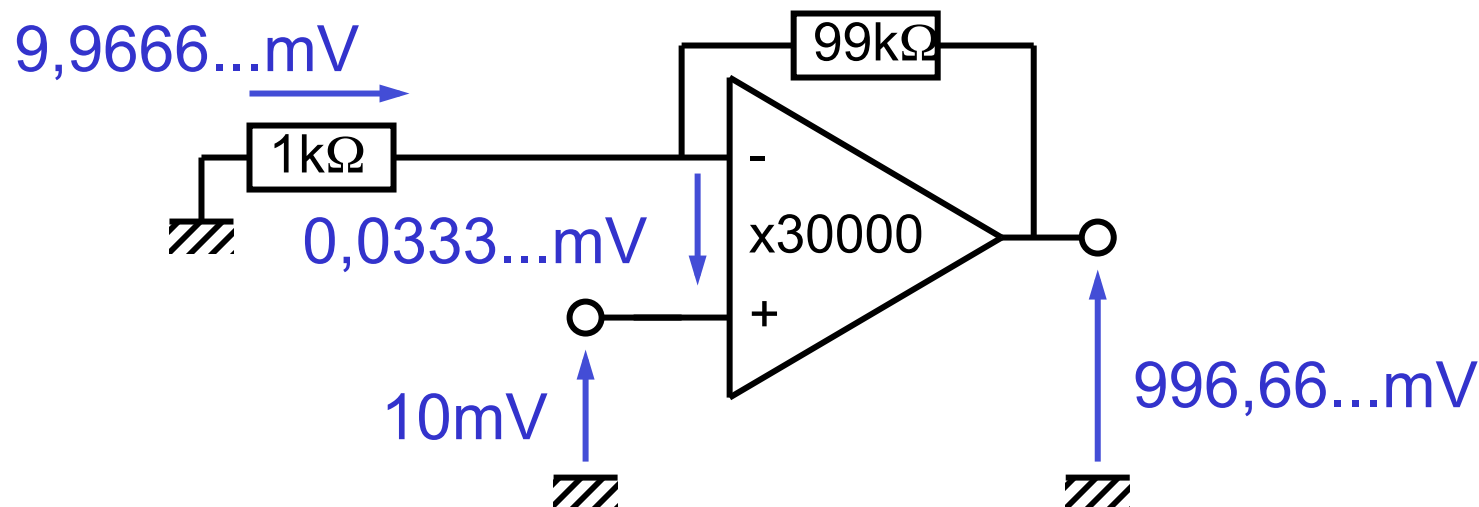
Conclusion

- ▶ Q: à quoi sert la rétroaction par la résistance R_2 ?
- ▶ R:
 - ◆ qualitativement, elle assure que V^- "poursuit" V^+
 - c'est elle qui assure le zéro virtuel
 - ◆ quantitativement, c'est elle qui fixe (diviseur résistif) le gain entre V^- (donc indirectement V^+) et V_{out}



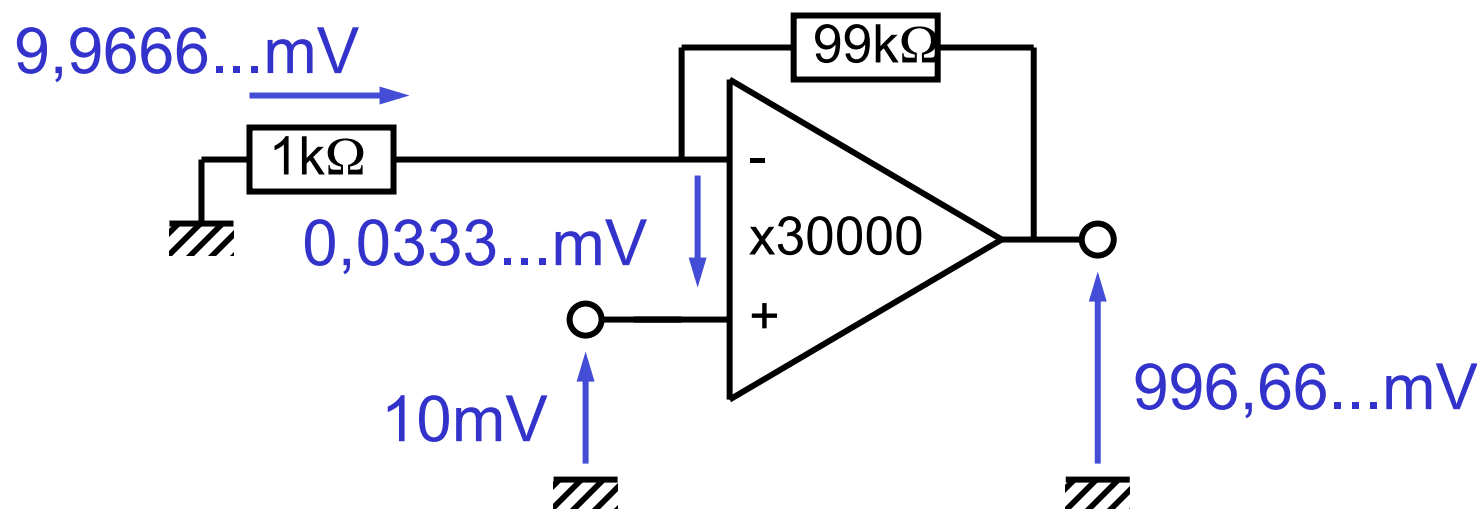
Conclusion

- ▶ Q: à quoi sert l'ampli-op?
- ▶ R:
 - ◆ il assure simplement que V_{out} augmente quand V_d augmente
 - la valeur précise de son gain A est sans importance



Notion de rétroaction négative

- ▶ La rétroaction ci-dessous est dite "rétroaction négative"
 - ◆ car elle contrecarre toute variation de V_d
 - ◆ lié au fait que la rétroaction entre sur l'entrée inverseuse de l'ampli-op
- ▶ Une rétroaction qui amplifierait les variations de V_d serait appelée "rétroaction positive"



Questions complémentaires

- ▶ Q: que se passerait-il si A n'était pas "très grand"?
 - ◆ ex: $A=10$
- ▶ Q: Etes-vous capable de faire la même analyse pour le montage inverseur?
- ▶ Q: Reprenez le raisonnement précédent et indiquez dans quelles conditions l'ampli-op sature

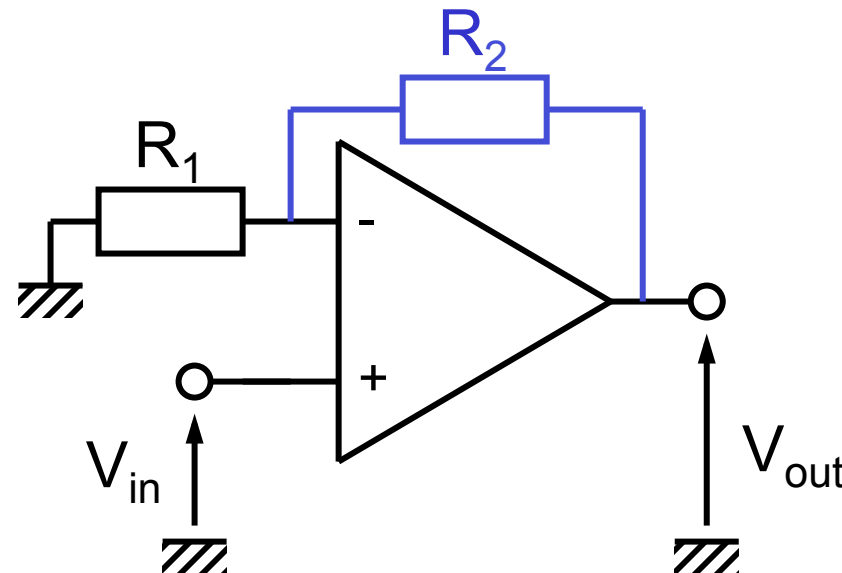
Synthèse

- ▶ Notions vues dans ce module...
 - ◆ fonctionnement de la rétroaction
 - ◆ justification du zéro virtuel
 - absence de saturation
 - ◆ notion de rétroaction négative

4.2.5 – Compléments sur la rétroaction

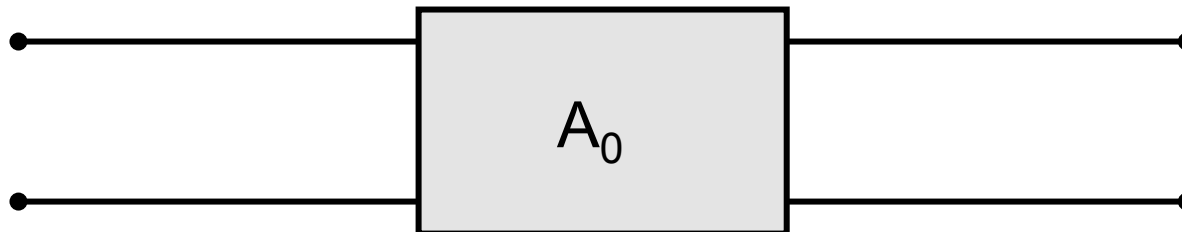
Introduction

- ▶ Les montages "ampli non-inverseur" et "ampli inverseur" comprennent tous les deux une résistance en rétroaction
 - ◆ Cette rétroaction est un des éléments fondamentaux du fonctionnement de ces montages
- ▶ Nous allons maintenant généraliser la notion de rétroaction et l'analyser un peu plus en détail



Montage "A"

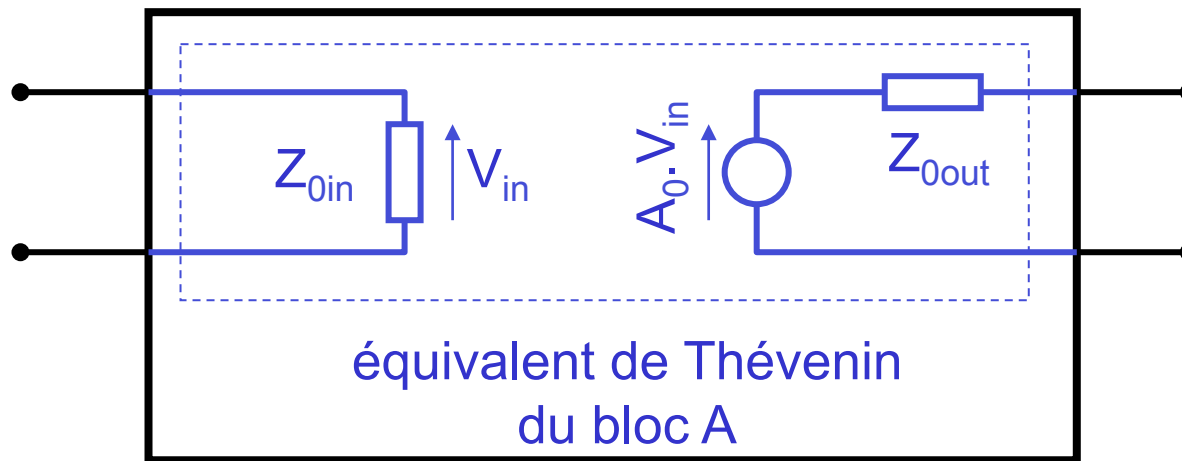
- ▶ Soit un montage "A" de gain A_0
- ▶ exemples
 - ◆ ampli-op (ex: $A_0=30000$)
 - ◆ montage amplificateur non-inverseur (ex: $A_0=50$)
 - ◆ montage amplificateur inverseur (ex: $A_0=-100$)
 - ◆ etc



Montage "A"

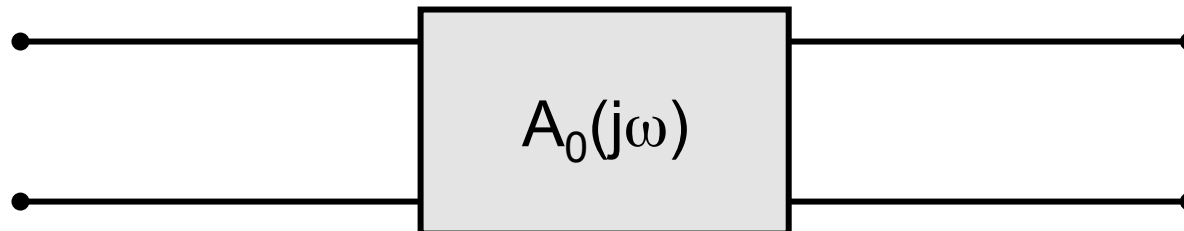
- ▶ Le bloc A est classiquement défini via son équivalent de Thévenin

- ♦ impédance d'entrée Z_{0in}
- ♦ impédance de sortie Z_{0out}
- ♦ gain A_0



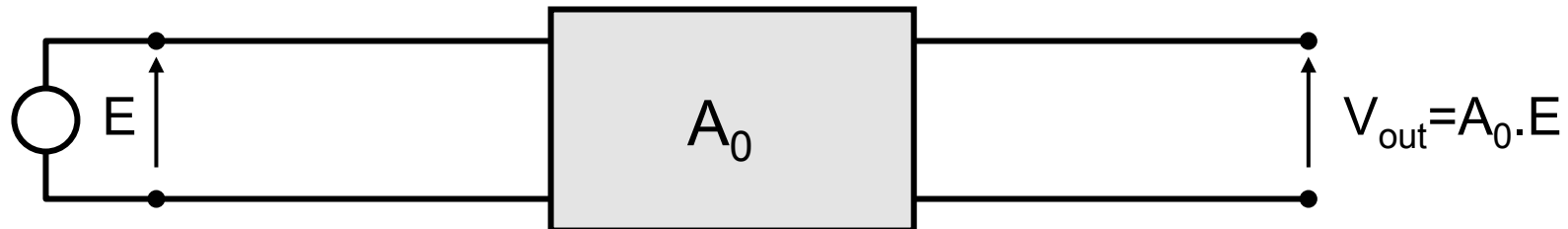
Montage "A"

- ▶ pour simplifier: supposons momentanément que...
 - ◆ A_0 est une simple constante réelle
- ▶ mais plus généralement (système linéaire)...
 - ◆ le "gain" est une fonction de transfert $A_0(j\omega)$
 - nombre complexe (module et phase)
 - variable en fréquence



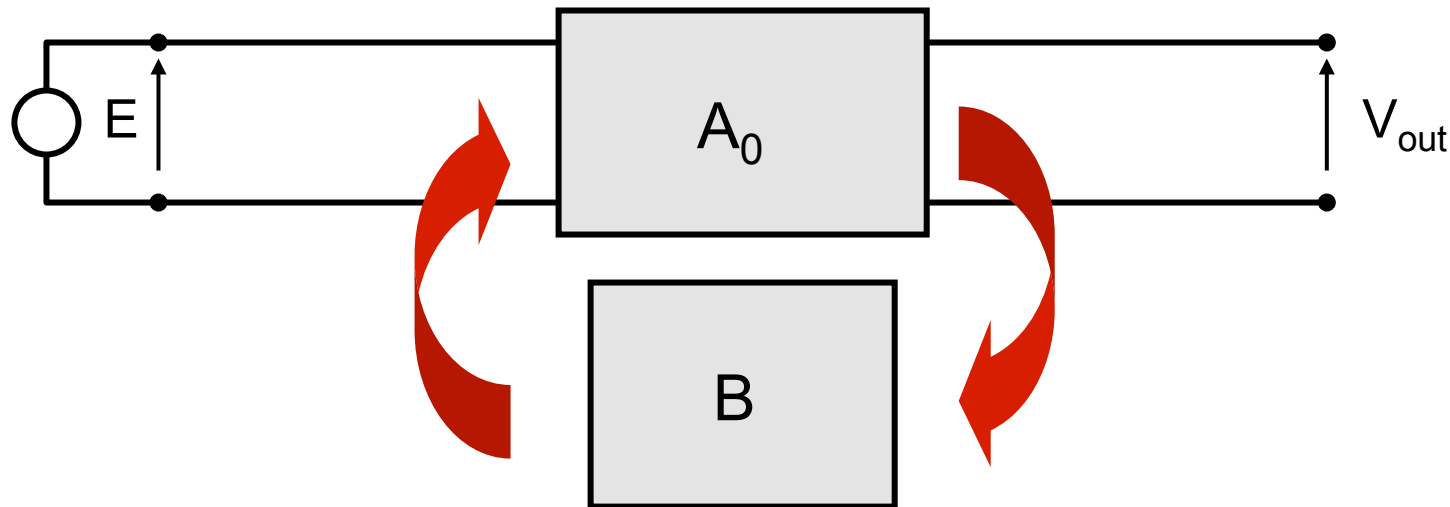
Gain en boucle ouverte

- ▶ Lorsque nous appliquons un signal E au bloc A , ce signal est multiplié par le gain A_0
 - ◆ on suppose que l'impédance de sortie de la source E est négligeable
- ▶ Dans le contexte de la rétroaction, nous rebaptisons A_0 le gain en boucle ouverte



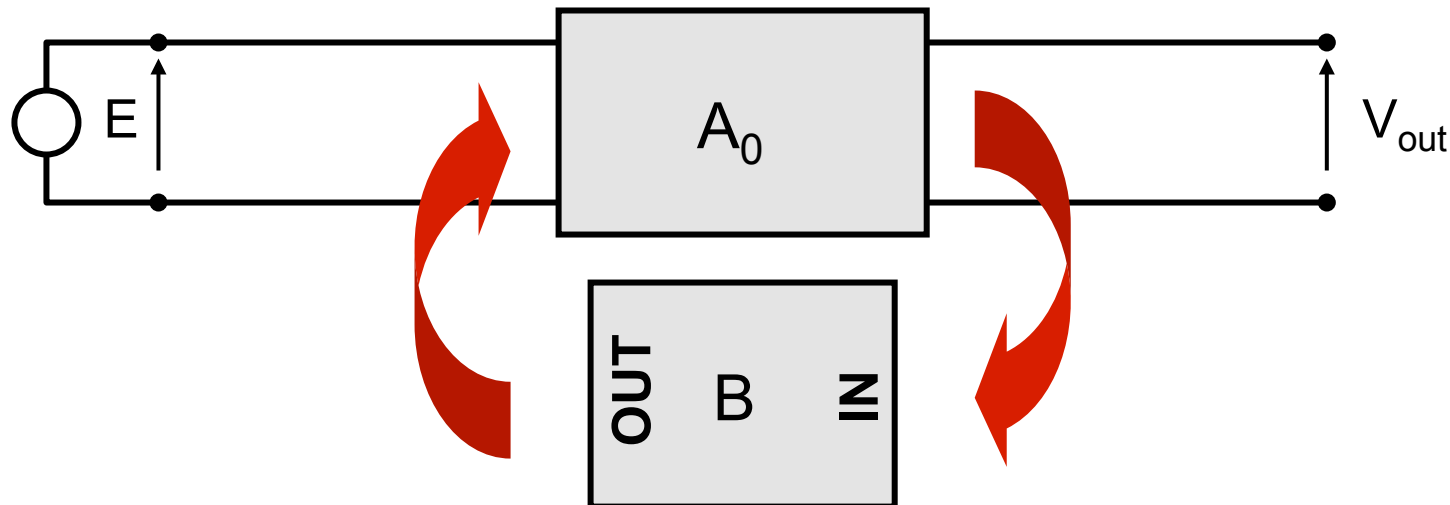
La rétroaction: définition

- ▶ Appliquer une rétroaction sur le bloc A, c'est prélever sa grandeur de sortie (tension ou courant) pour la réinjecter, après passage dans un bloc B, à l'entrée du bloc A
 - ♦ en toute généralité, le comportement du bloc B est également défini par une fonction de transfert $B(j\omega)$



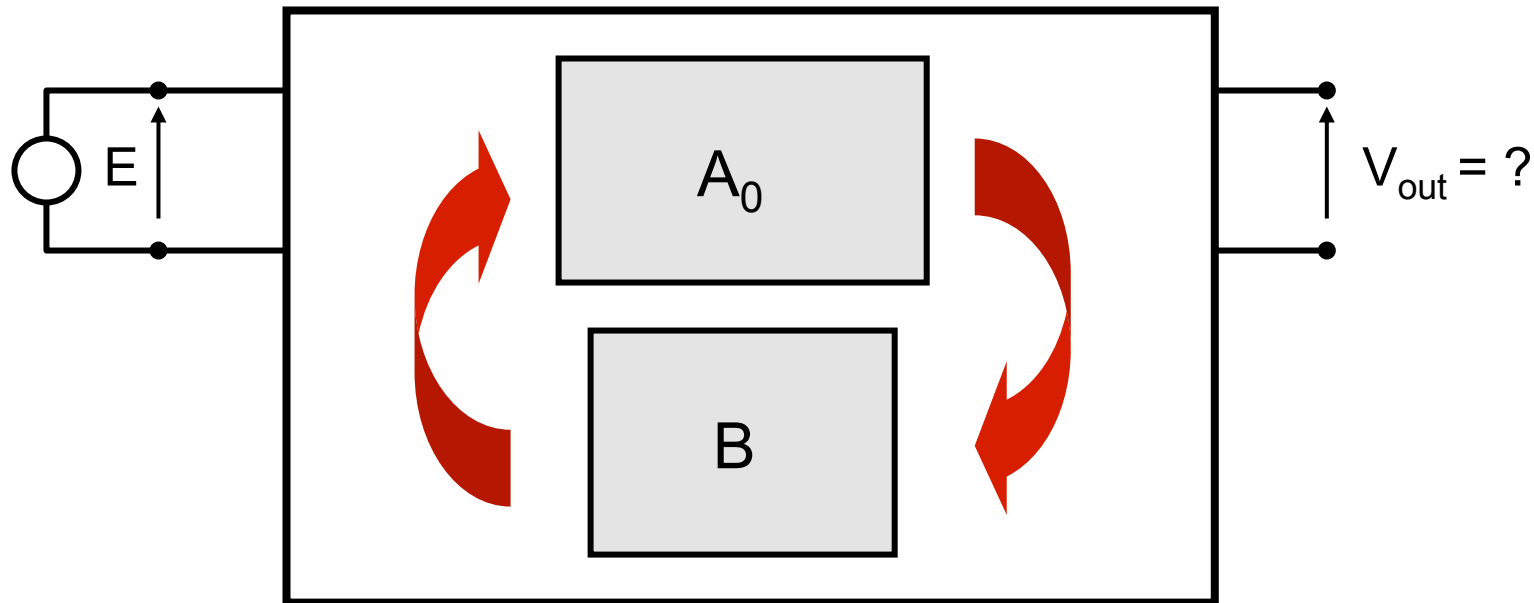
La rétroaction: remarques

- ▶ Remarques...
- ▶ 1) l'entrée du bloc B est à droite et sa sortie à gauche!
- ▶ 2) en appliquant la rétroaction, on forme une boucle fermée
 - ♦ typique des rétroactions et donc un bon indice pour les reconnaître



La rétroaction: remarques

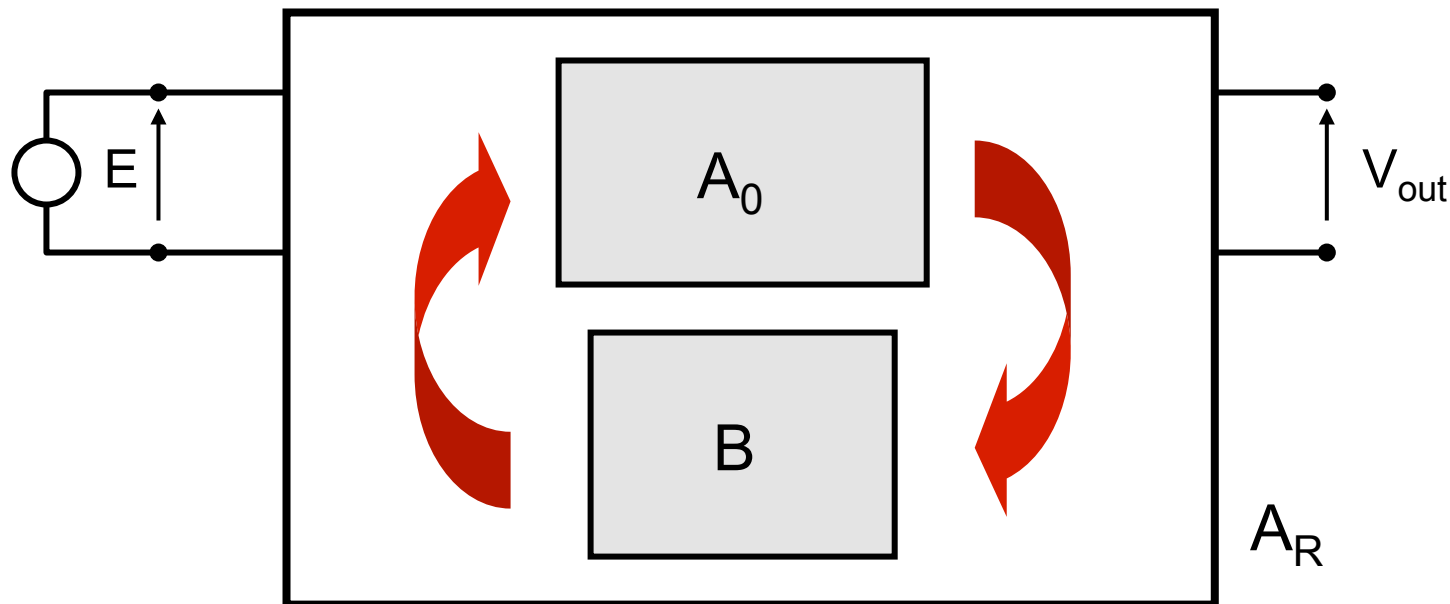
- ▶ 3) en appliquant la rétroaction, on crée un nouveau montage dont les propriétés sont différentes de celles du seul bloc A
 - ♦ c'est l'intérêt de la rétroaction
 - ♦ "propriétés": gain, impédance d'entrée, impédance de sortie, etc



La rétroaction: remarques

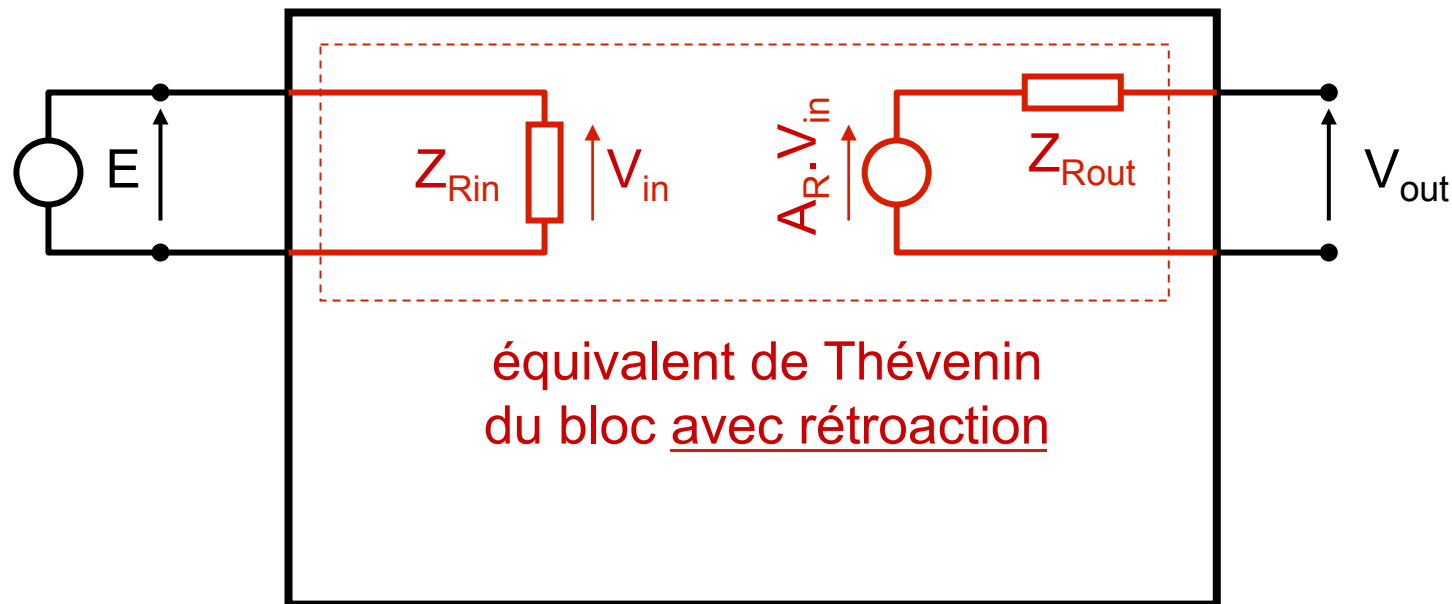
► 4) vocabulaire:

- ◆ le gain en boucle ouverte, c'est-à-dire A_0 , est donc le gain en l'absence de rétroaction
- ◆ par opposition, le gain en boucle fermée désigne le gain du nouveau montage obtenu en appliquant la rétroaction
 - nous devons encore le calculer
 - nous le notons A_R pour le distinguer du gain en boucle ouverte



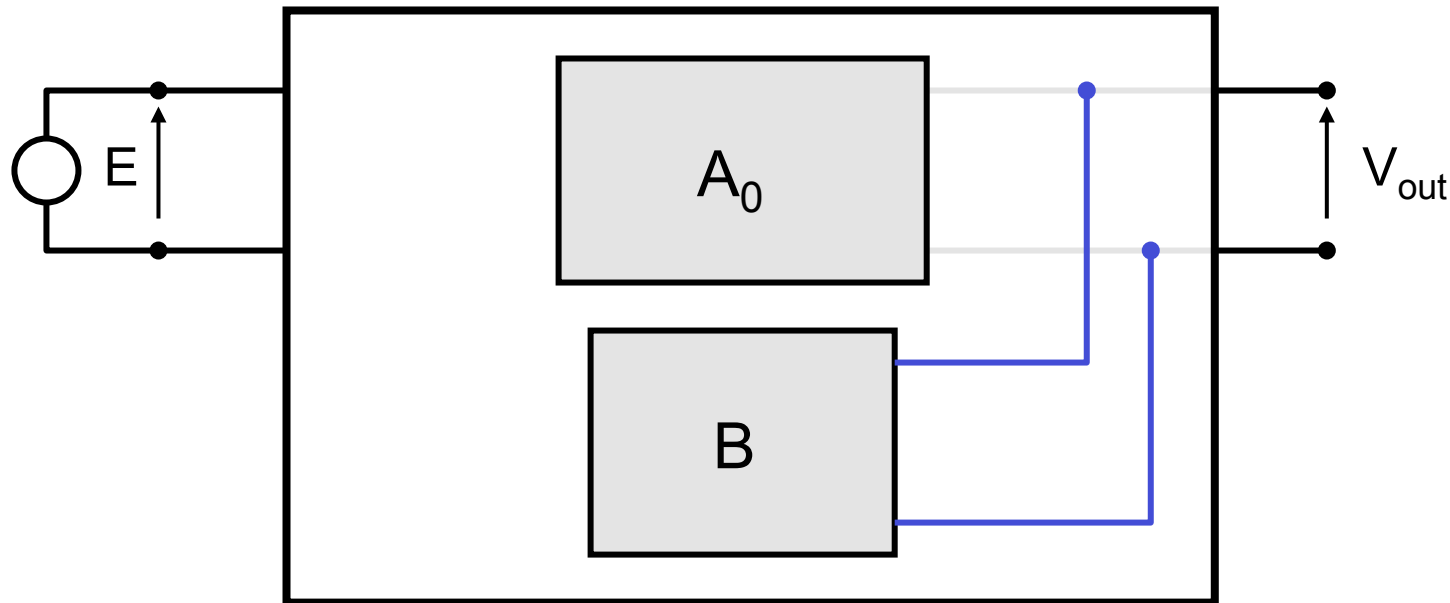
Montage avec rétroaction

- ▶ Nous allons maintenant calculer les propriétés du montage avec rétroaction
 - ◆ défini lui aussi par un équivalent de Thévenin
 - indices "R" pour distinguer du montage A



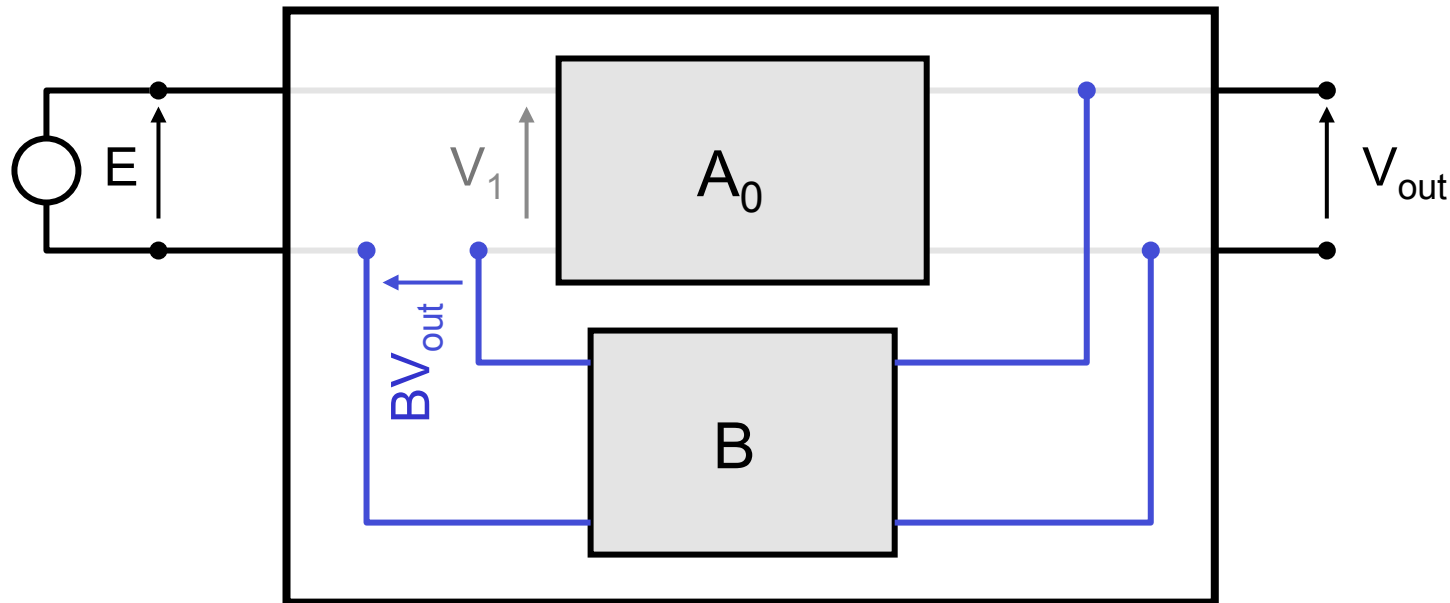
Rétroaction de tension: montage

- ▶ Voici comment on réalise une rétroaction de tension
- ▶ à droite...
 - ◆ ...on prélève la **tension** de sortie du bloc A_0 (c'est-à-dire V_{out}) pour la réinjecter à l'entrée du bloc B



Rétroaction de tension: montage

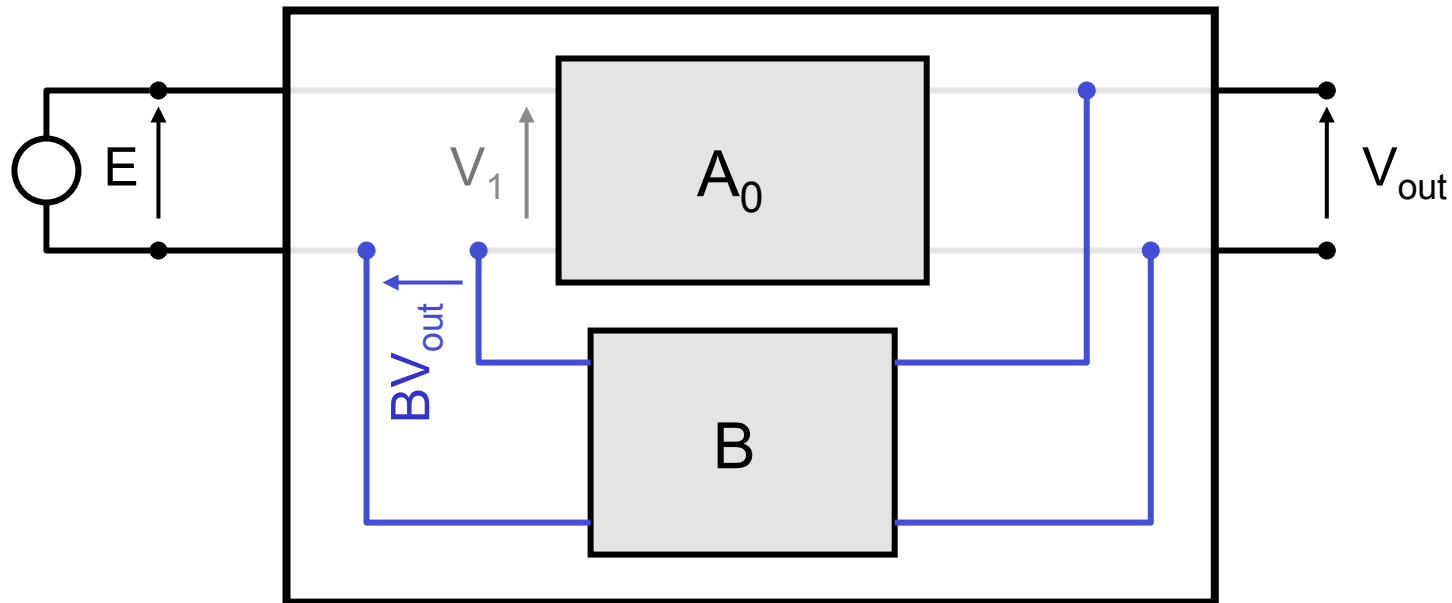
- ▶ à gauche...
 - ◆ ...on réinjecte la tension de sortie du bloc B (c'est-à-dire $B.V_{\text{out}}$) en série avec la tension de la source E
 - ◆ on doit pour cela interrompre la connexion entre E et le bloc A_0



Rétroaction de tension: calcul du gain A_R

- ▶ le gain en boucle fermée A_R est défini comme:

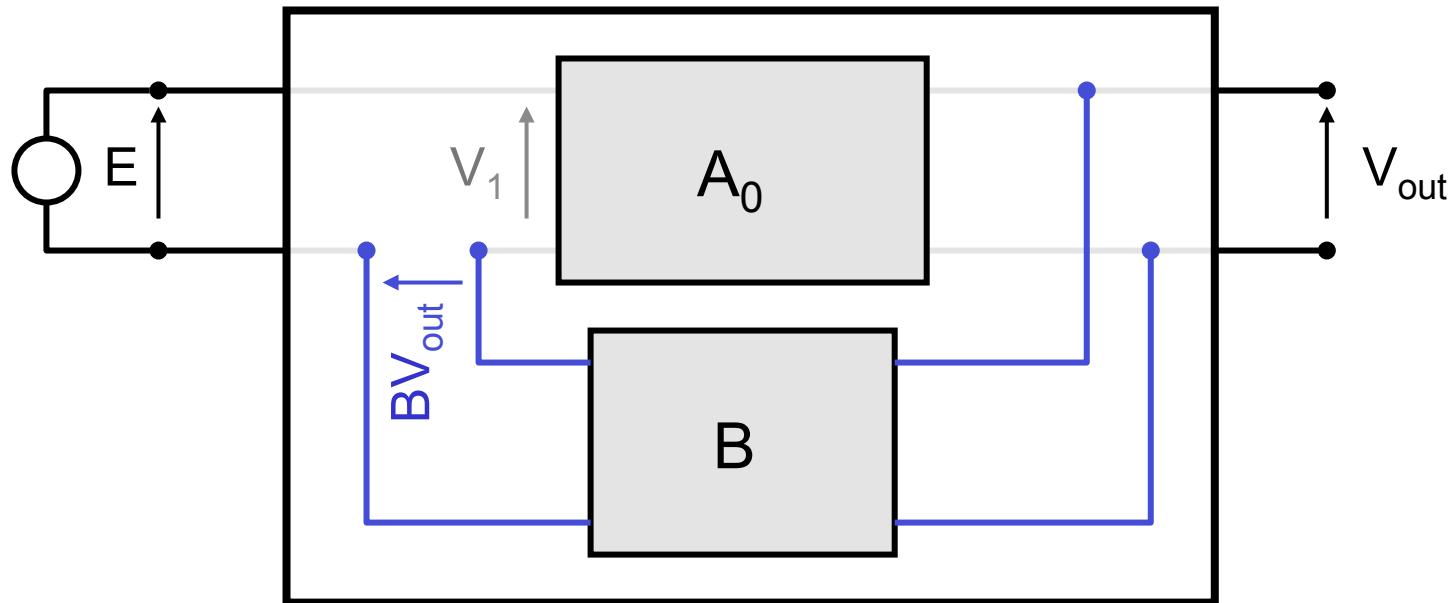
$$A_R = \left. \frac{V_{out}}{E} \right|_{I_{out}=0}$$



Rétroaction de tension: calcul du gain A_R

- ▶ on a: $V_{out} = A_0 \cdot V_1$
 - ◆ V_1 étant le signal d'entrée du bloc A
 - ◆ V_{out} étant aussi le signal de sortie du bloc A

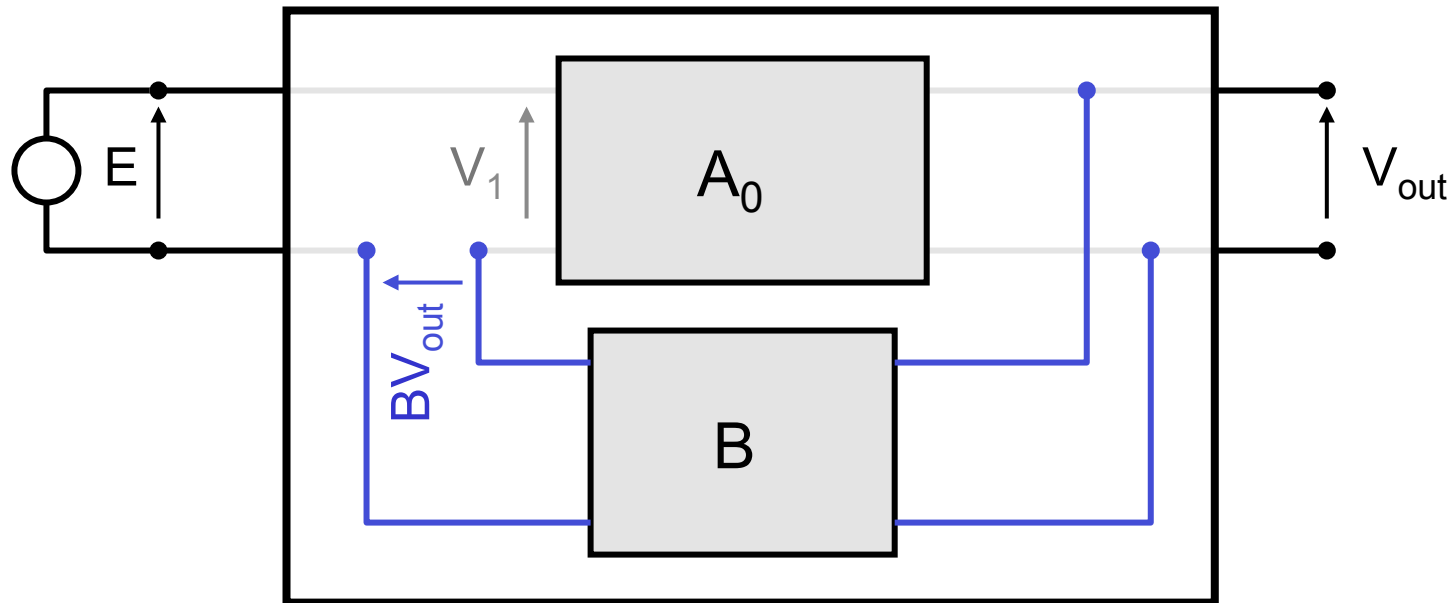
$$V_{out} = A_0 \cdot V_1$$



Rétroaction de tension: calcul du gain A_R

- ▶ d'autre part: $V_1 = E + B.V_{out}$
 - ◆ addition par la loi des mailles
 - ◆ $B.V_{out}$ étant le signal de sortie du bloc B

$$V_1 = E + B.V_{out}$$



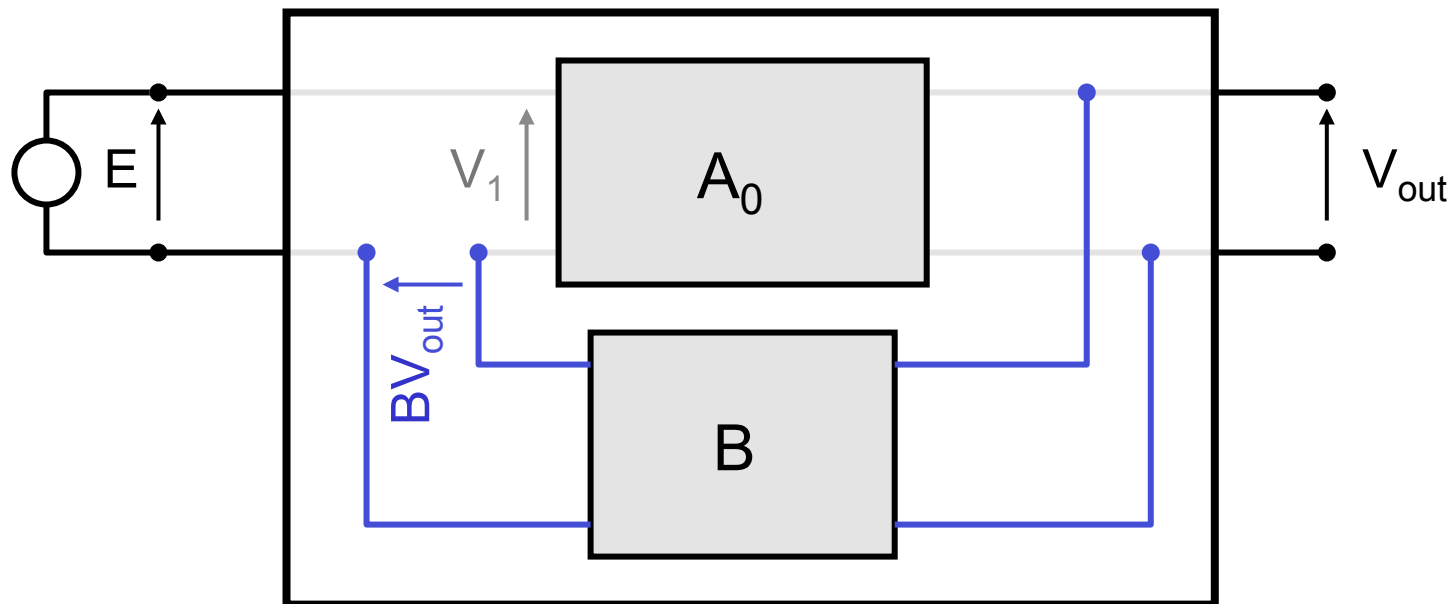
Rétroaction de tension: calcul du gain A_R

- ▶ en combinant les deux relations, on trouve:

$$V_{out} = A_0 \cdot V_1 \qquad V_1 = E + B \cdot V_{out}$$

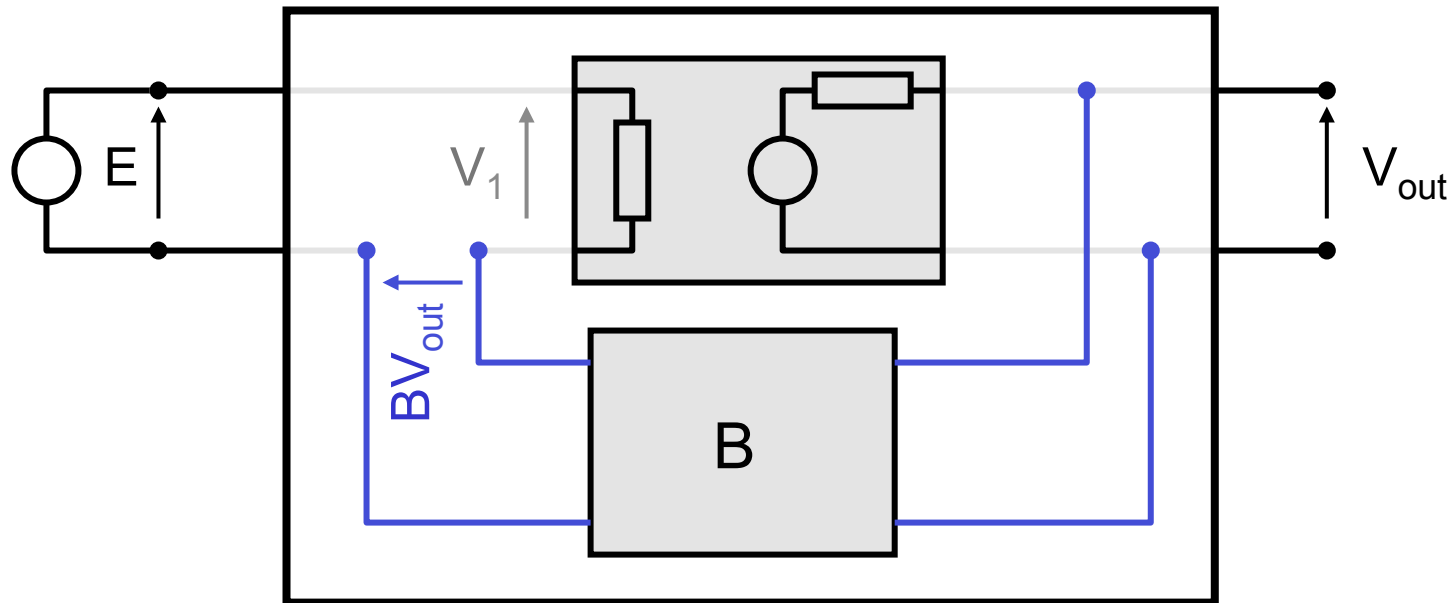
$$V_{out} = A_0 \cdot (E + B \cdot V_{out})$$

$$A_R = \frac{V_{out}}{E} = \frac{A_0}{1 - A_0 B}$$



Rétroaction de tension: impédances

- ▶ intéressons-nous maintenant aux impédances d'entrée et de sortie
 - ◆ plus exactement: comment les impédances d'entrée et de sortie du bloc A sont-elles modifiées par l'ajout d'une rétroaction?
 - N.B.: on idéalise les impédances du bloc B pour une adaptation en tension: $Z_{B_{in}}$ est infinie et $Z_{B_{out}}$ est nulle

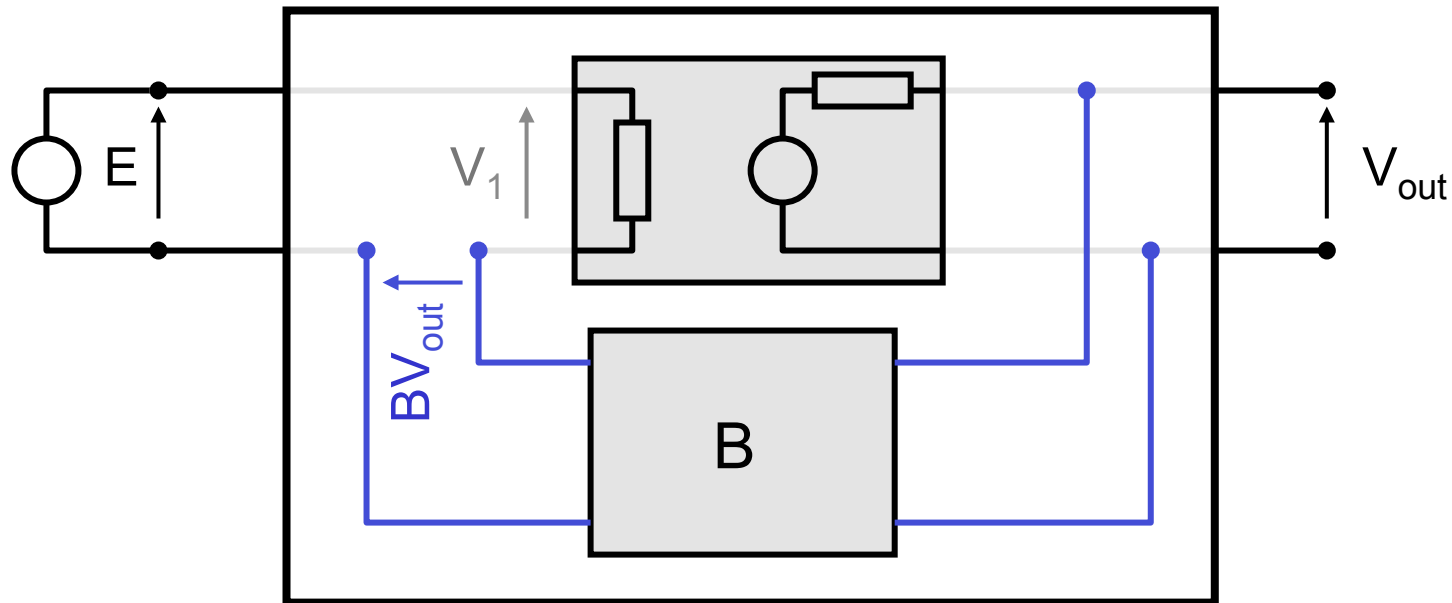


Rétroaction de tension: impédances

- ▶ on peut montrer que:

$$Z_{Rin} = (1 - A_0 \cdot B) Z_{0in}$$

$$Z_{Rout} = \frac{Z_{0out}}{1 - A_0 \cdot B}$$



Rétroaction de tension: conclusions

- ▶ Pour toute rétroaction de tension, l'effet de la rétroaction à travers un bloc B consiste à...
- ▶ ...diviser le gain par le facteur $1-A_0B$
- ▶ ...diviser l'impédance de sortie par le même facteur $1-A_0B$
- ▶ ...multiplier l'impédance d'entrée par $1-A_0B$

$$A_R = \frac{A_0}{1 - A_0 B}$$

$$Z_{Rin} = (1 - A_0 \cdot B) Z_{0in}$$

$$Z_{Rout} = \frac{Z_{0out}}{1 - A_0 \cdot B}$$

Rétroaction négative

- ▶ Lorsque $B < 0$, la rétroaction est dite négative (condition suffisante)
 - ◆ en supposant $A_0 > 0$
- ▶ Propriétés: une rétroaction négative...
 - ◆ ...diminue le gain
 - $B < 0 \Rightarrow (1 - A_0 B) > 1 \Rightarrow A_R < A_0$
 - plutôt un inconvénient
 - ◆ ...mais améliore les impédances (pour une adaptation en tension)
 - $Z_{Rin} > Z_{0in}$
 - $Z_{Rout} > Z_{0out}$

$$A_R = \frac{A_0}{1 - A_0 B}$$

$$Z_{Rin} = (1 - A_0 \cdot B) Z_{0in}$$

$$Z_{Rout} = \frac{Z_{0out}}{1 - A_0 \cdot B}$$

Rétroaction négative: ampli non-inverseur

- ▶ Le montage non-inverseur est un cas particulier de rétroaction négative:

- ♦ équation de l'ampli non-inverseur:

$$V_{out} = A(V^+ - V^-) = A\left(V_{in} - \frac{R_1}{R_1 + R_2}V_{out}\right)$$

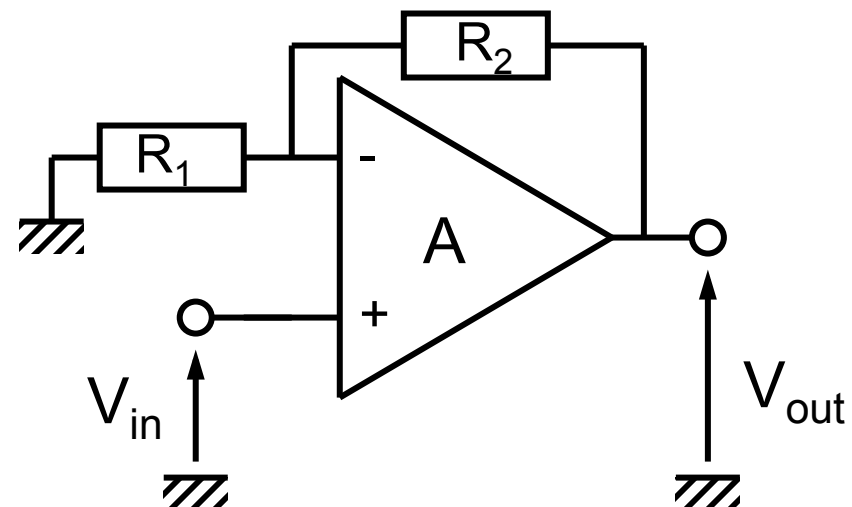
- ♦ équation générale de la rétroaction de tension:

$$V_{out} = A_0.(E + B.V_{out})$$

- ♦ identification:

$$\begin{cases} A_0 = A \\ B = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

$$A_R = \frac{A_0}{1 - A_0 B} = \frac{A(R_1 + R_2)}{AR_1 + R_1 + R_2}$$



Forte rétroaction négative

- ▶ Lorsque $A_0|B| \gg 1$, la rétroaction est dite fortement négative
 - ♦ dans ce cas: $1 - A_0B = A_0|B|$
- ▶ propriétés
 - ♦ idem rétroaction négative
 - ♦ + le gain devient indépendant de A_0

$$A_R = \frac{A_0}{1 - A_0B} \approx \frac{1}{|B|}$$

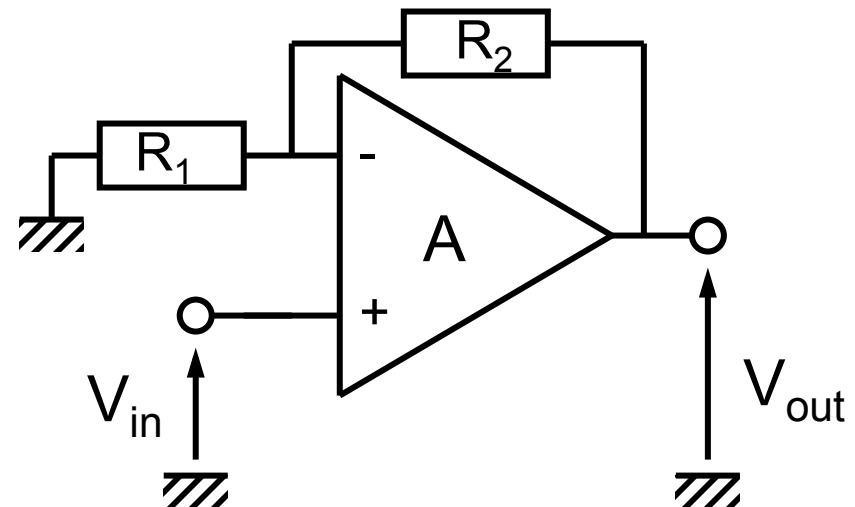
$$Z_{Rin} \approx A_0|B|.Z_{0in}$$

$$Z_{Rout} = \frac{Z_{0out}}{A_0|B|}$$

Forte rétroaction négative: ampli non-inverseur

- ▶ Le montage non-inverseur correspond à une forte rétroaction négative de tension
 - ♦ B est négatif
 - ♦ $A_0 \cdot |B| \gg 1$ car A très élevé
- ▶ en appliquant directement la formule du gain en boucle fermée, on retrouve bien le gain de l'ampli non-inverseur

$$A_R = \frac{1}{|B|} = \frac{1}{-\frac{R_1}{R_1 + R_2}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = A_{non_inv}$$



Rétroaction positive: définition intuitive

- ▶ Rétroaction négative: $(1-A_0B)>1$
 - ◆ le gain diminue
 - ◆ la rétroaction tend à s'opposer aux perturbations du signal d'entrée
 - ◆ on cherche à minimiser une "erreur" (régulations)
 - ◆ le système est rendu plus "stable"
- ▶ Rétroaction positive: $(1-A_0B)<1$
 - ◆ le gain augmente
 - ◆ la rétroaction tend à amplifier les perturbations du signal d'entrée
 - ◆ le système est rendu plus "instable"
 - parfois utile!

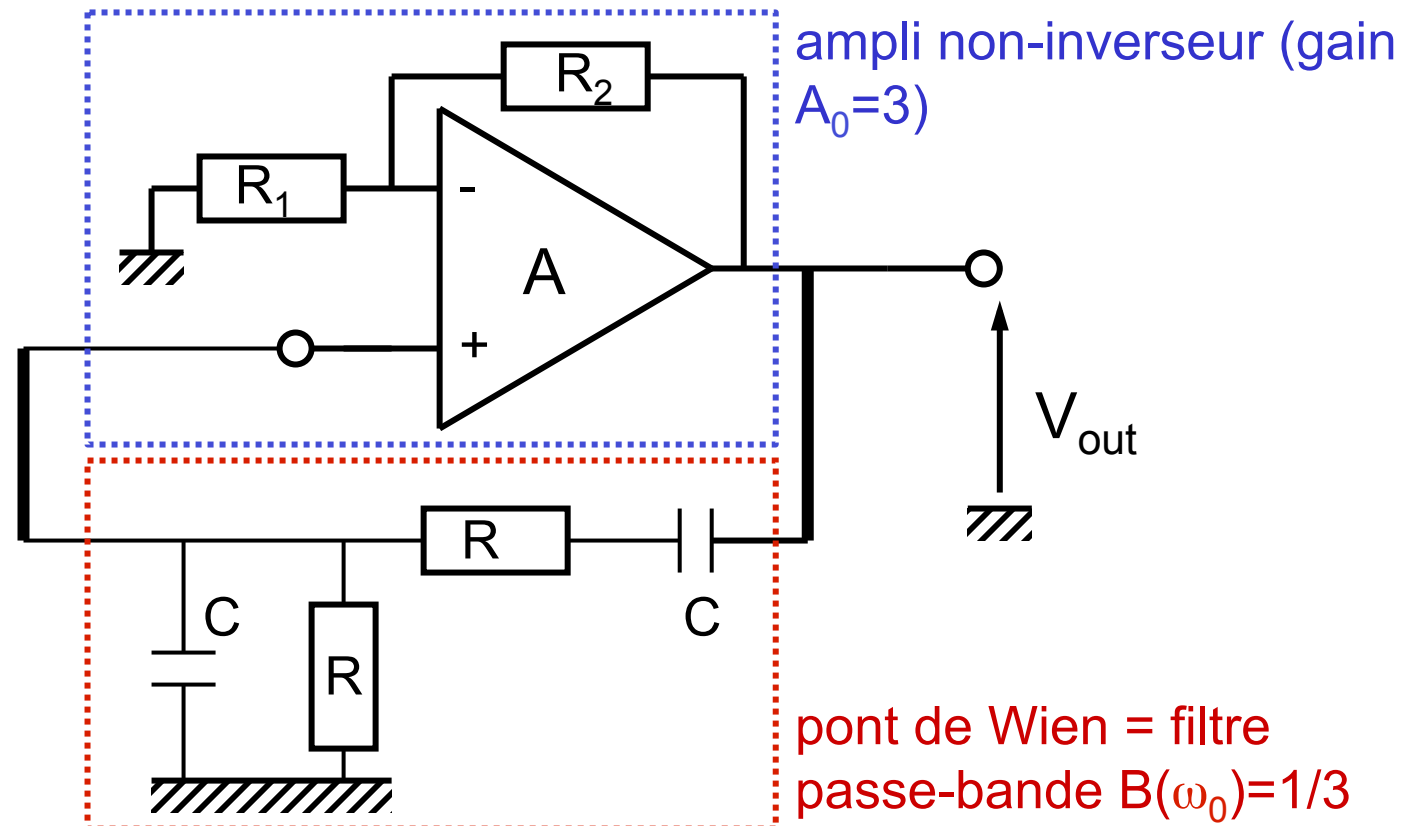
$$A_R = \frac{A_0}{1 - A_0 B}$$

$$Z_{Rin} = (1 - A_0 \cdot B) Z_{0in}$$

$$Z_{Rout} = \frac{Z_{0out}}{1 - A_0 \cdot B}$$

Cas des oscillateurs

- ▶ Condition d'oscillation: A_0 , B et ω tels que $A_0(j\omega).B(j\omega) = 1$
 - ◆ si condition d'oscillation satisfaite: sortie du montage = sinusoïde de fréquence ω
- ▶ Exemple: oscillateur sinusoïdal à pont de Wien



$$A_R = \frac{A_0}{1 - A_0 B} = \infty$$

Synthèse

- ▶ **Rétroaction**
 - ◆ rétroaction en tension
 - ◆ formules générales
- ▶ **Rétroaction négative**
 - ◆ formules particulières
 - ◆ forte rétroaction négative de tension
 - ◆ propriétés: améliore les impédances mais diminue le gain
- ▶ **Rétroaction positive**
 - ◆ augmente le gain mais dégrade les impédances
 - ◆ rend le montage instable
- ▶ **Oscillateurs**
 - ◆ cas limite intermédiaire
 - ◆ condition d'oscillation