
Chap. 4 - L'amplificateur opérationnel

Plan du chapitre

- ▶ Plan du chapitre
 - ◆ 4.0 - Pourquoi amplifier?
 - ◆ 4.1 - Ampli-op: propriétés de base
 - ◆ 4.2 - Deux montages amplificateurs
 - ◆ 4.3 - Montages à ampli-op
 - ◆ 4.4 – Ampli-op: propriétés avancées

4.0 – Pourquoi amplifier ?

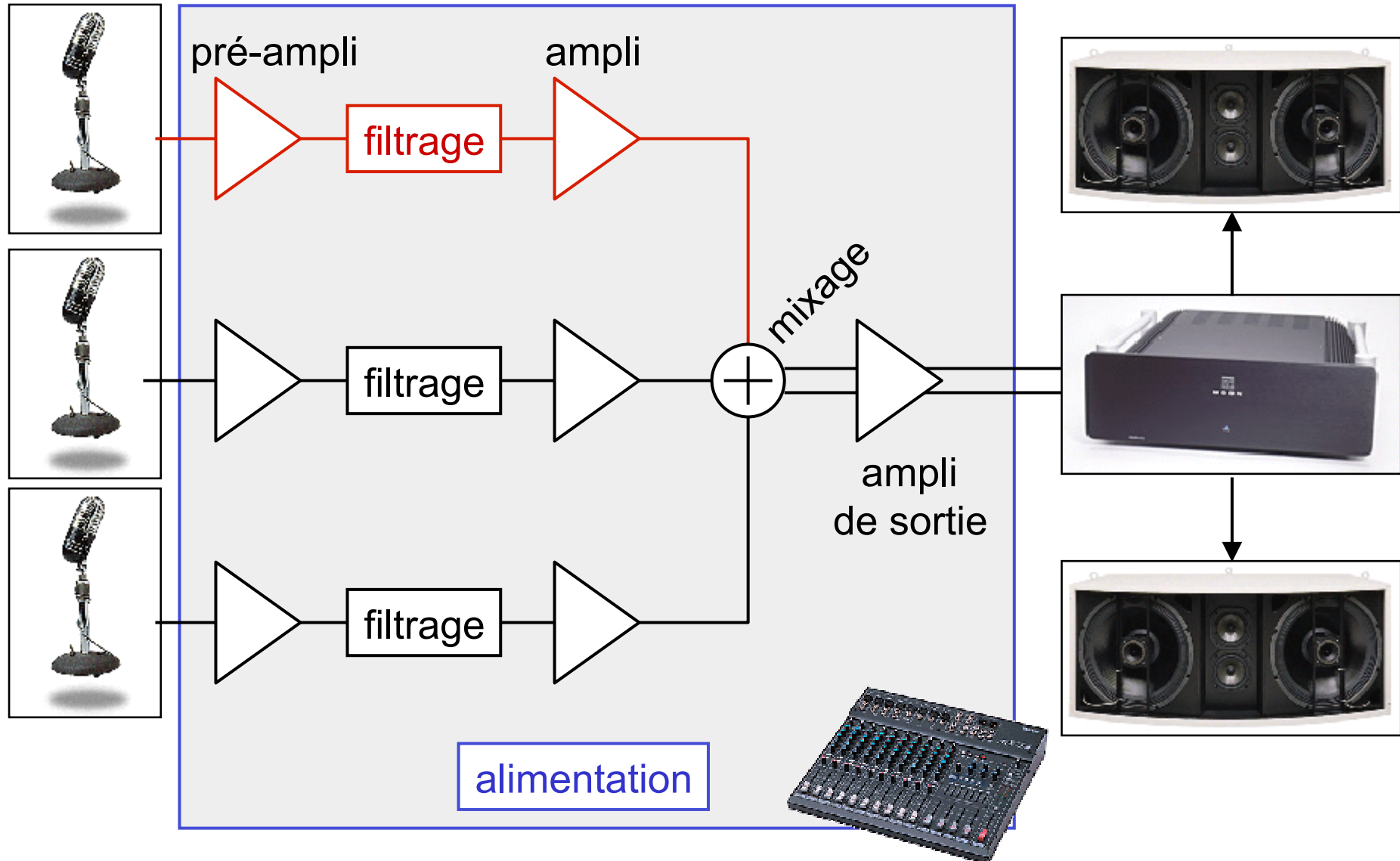
Introduction

- ▶ L'amplification est une fonction fondamentale: elle est omniprésente en électronique analogique
 - ◆ l'ampli-opérationnel (composant) est fondamentalement un amplificateur
 - ◆ le transistor est également fondamentalement un amplificateur
 - son invention en 1947 a lancé une réelle révolution technique
- ▶ Pourquoi amplifier est-il si important?

Introduction

- ▶ Il existe de nombreuses raisons d'amplifier un signal. En voici trois:
 - ◆ 1) signaux très faibles
 - ◆ 2) réglage de niveau
 - ◆ 3) amplification en amont d'un CAN
 - CAN = convertisseur analogique/numérique
- ▶ Remarque
 - ◆ à chacune de ces raisons correspond éventuellement un montage amplificateur différent

Structure (théorique) d'une table de mixage analogique



Structure (théorique) d'une table de mixage analogique

- ▶ Les pré-amplis servent à augmenter le niveau du signal vis-à-vis des parasites
 - ◆ le signal délivré par le micro est assez faible
- ▶ Les amplis dans chaque voie et l'ampli de sortie servent essentiellement à régler le niveau des signaux
 - ◆ globalement (ampli de sortie)
 - ◆ ou l'un vis-à-vis de l'autre (voies) = mixage
- ▶ Ces deux types d'amplification utilisent des solutions techniques différentes

4.1 - L'ampli-op: propriétés de base

Plan du module

- ▶ Plan du module
 - ◆ 4.1.1 - Qu'est-ce qu'un ampli-op?
 - ◆ 4.1.2 - Impédances d'entrée et de sortie
 - ◆ 4.1.3 - Caractéristique de transfert et principe du zéro virtuel

4.1.1 - Qu'est-ce qu'un ampli-op?

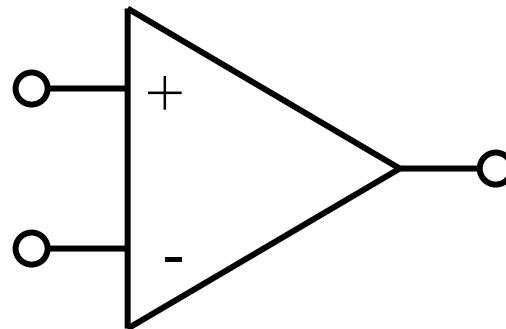
Introduction: composant réel

- ▶ Voici la photo d'un ampli-op très utilisé: le 741
- ▶ Un ampli-op se présente le plus classiquement sous forme d'un circuit intégré à 8 "pattes"
 - ◆ rappel: "circuit intégré" = le boîtier ci-dessous comprend une "puce" en silicium



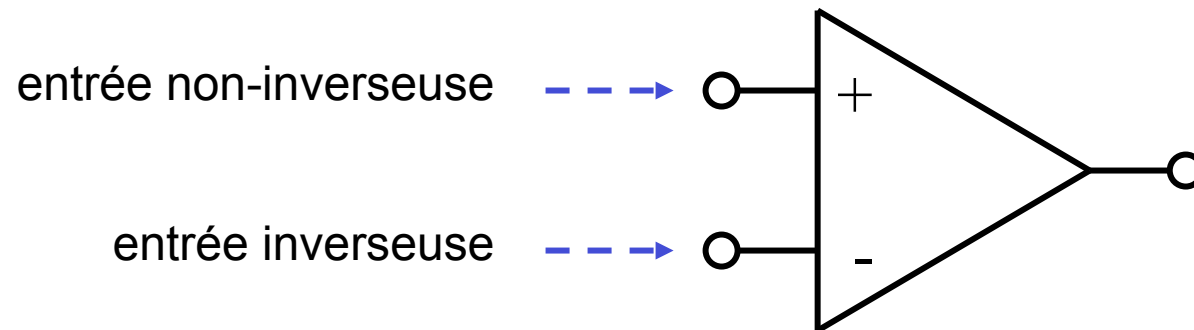
Symbole de l'ampli-op

- ▶ L'amplificateur opérationnel (ou "ampli-op") est un composant à deux bornes d'entrée et une borne de sortie
- ▶ voici son symbole:
 - ◆ N.B.: en électronique analogique, le triangle est le symbole générique pour représenter un amplificateur



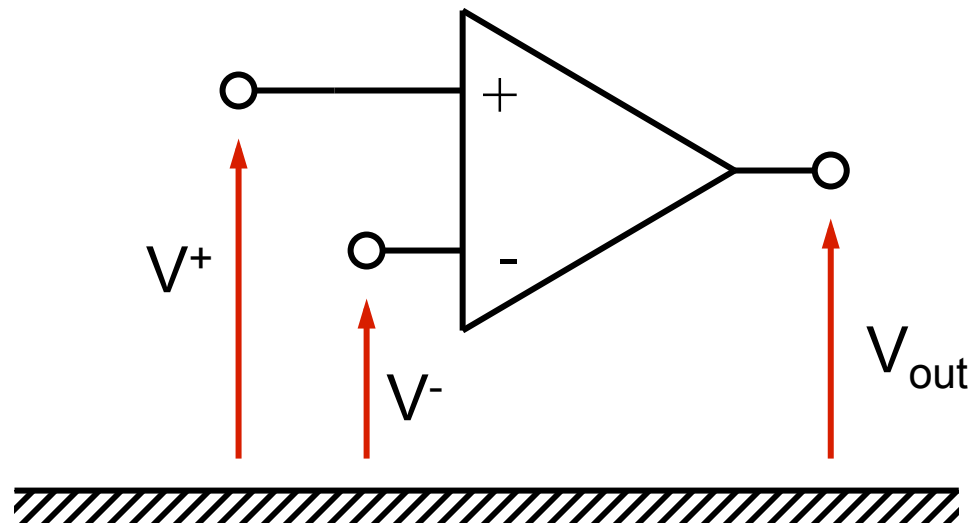
Symbole de l'ampli-op

- ▶ Les deux bornes d'entrée sont respectivement notées "+" et "-":
 - ♦ l'entrée "-" est l'entrée inverseuse
 - ♦ l'entrée "+" est l'entrée non-inverseuse



Tensions d'entrée et de sortie

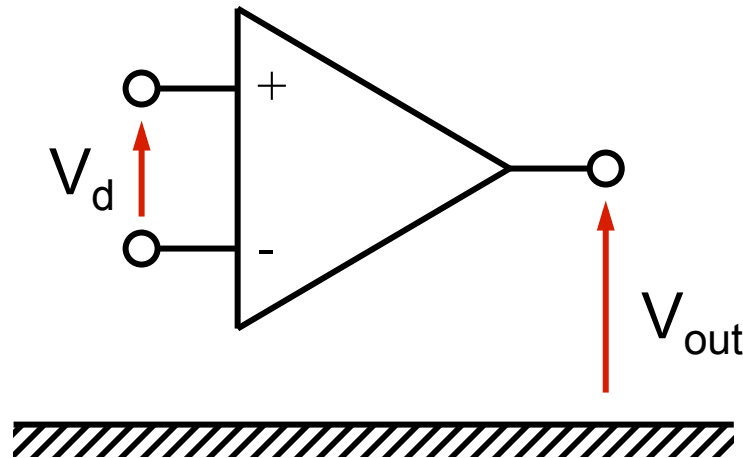
- ▶ Chacune des entrées reçoit un signal de tension mesuré par rapport à la masse
 - ♦ signaux V^+ et V^-
- ▶ La tension de sortie est souvent également mesurée par rapport à la même masse
 - ♦ signal V_{out}



Tensions d'entrée et de sortie

- ▶ La fonction d'un ampli opérationnel est d'amplifier la différence des tensions présentes à ses bornes d'entrée
- ▶ cette différence (V_d) est appelée "tension d'entrée différentielle"
 - ♦ "différentielle" = aucune des deux bornes n'est la masse
 - contrairement à V^+ , V^- ou V_{out} qui sont trois tensions référencées à la masse

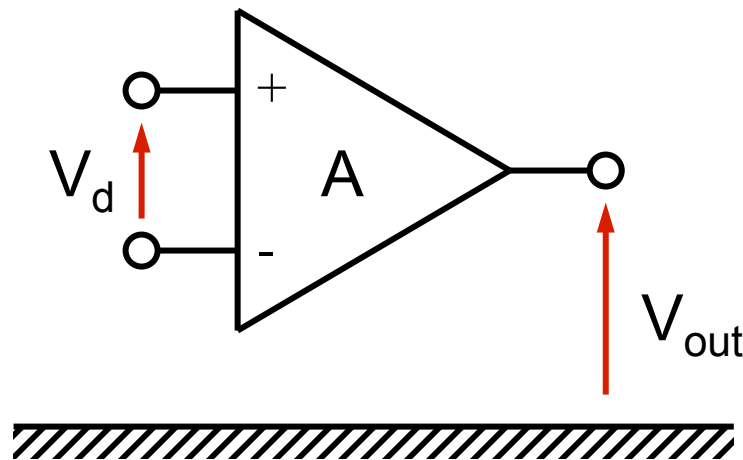
$$V_d = V^+ - V^-$$



Loi fondamentale et gain

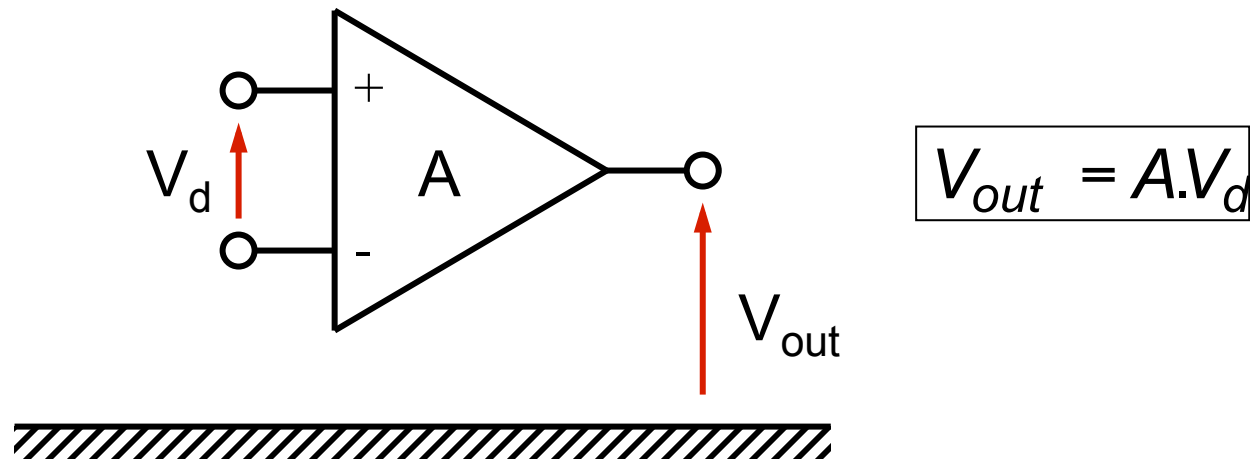
- ▶ La fonction d'amplification réalisée par l'ampli-op, se traduit mathématiquement par la loi ci-dessous
- ▶ A est le gain de l'ampli-op, c'est-à-dire le facteur d'amplification entre son entrée différentielle et sa sortie
 - ♦ A est sans dimension

$$V_{out} = A.V_d$$



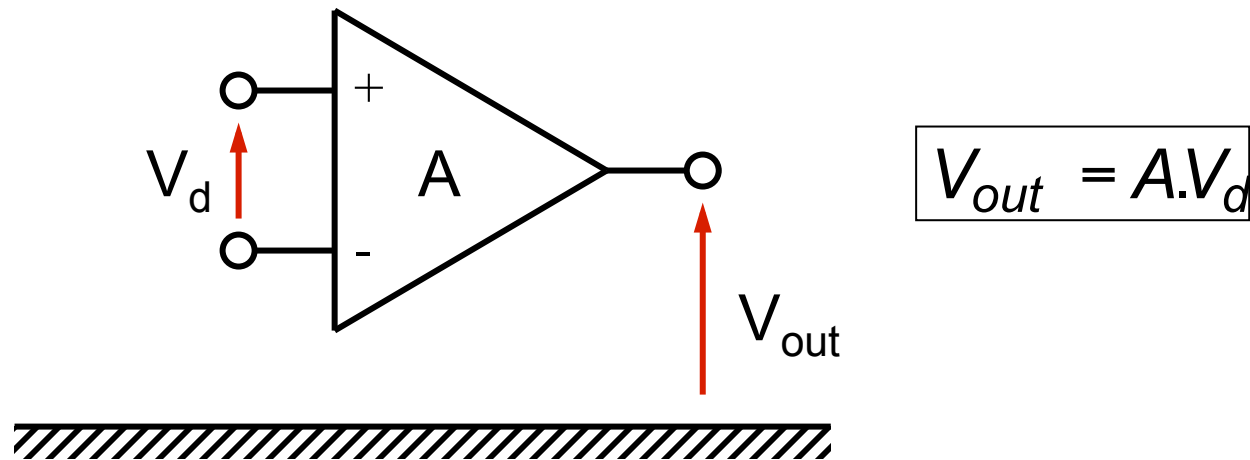
Loi fondamentale et gain

- ▶ Quelques remarques importantes...
- ▶ 1) Le gain A d'un ampli-op est toujours très élevé: il vaut typiquement 30000 à 100000
 - ♦ on fait parfois l'approximation que ce gain est infini: nous y reviendrons...



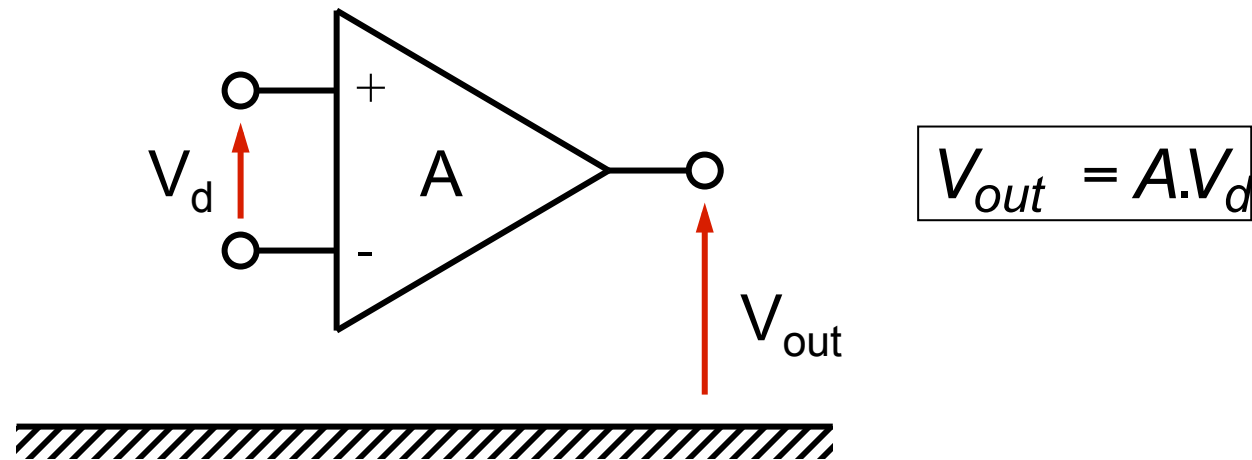
Loi fondamentale et gain

- ▶ 2) Un tel gain n'a de sens que si le signal d'entrée est très faible
 - ♦ c'est le cas de la tension V_d : nous verrons en effet qu'elle est nettement inférieure à 1mV
 - ♦ le signal de sortie V_{out} a par contre un ordre de grandeur de l'ordre du volt



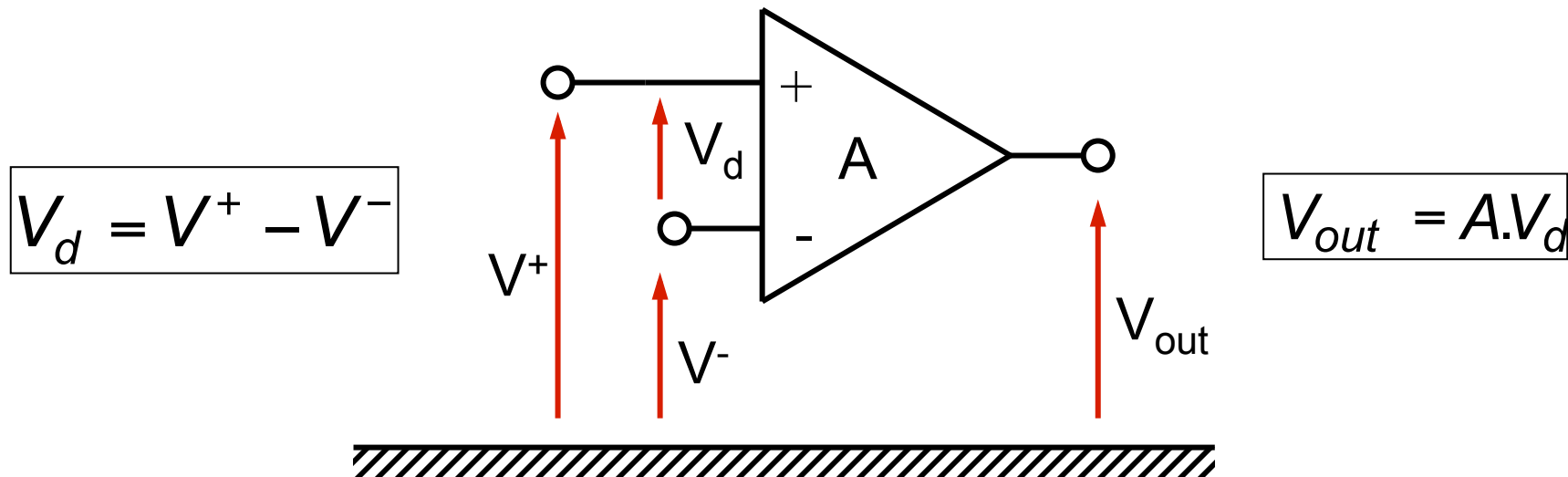
Loi fondamentale et gain

- ▶ 3) Les tensions V_d et V_{out} peuvent être aussi bien positives que négatives
 - ♦ il peut notamment s'agir de signaux alternatifs



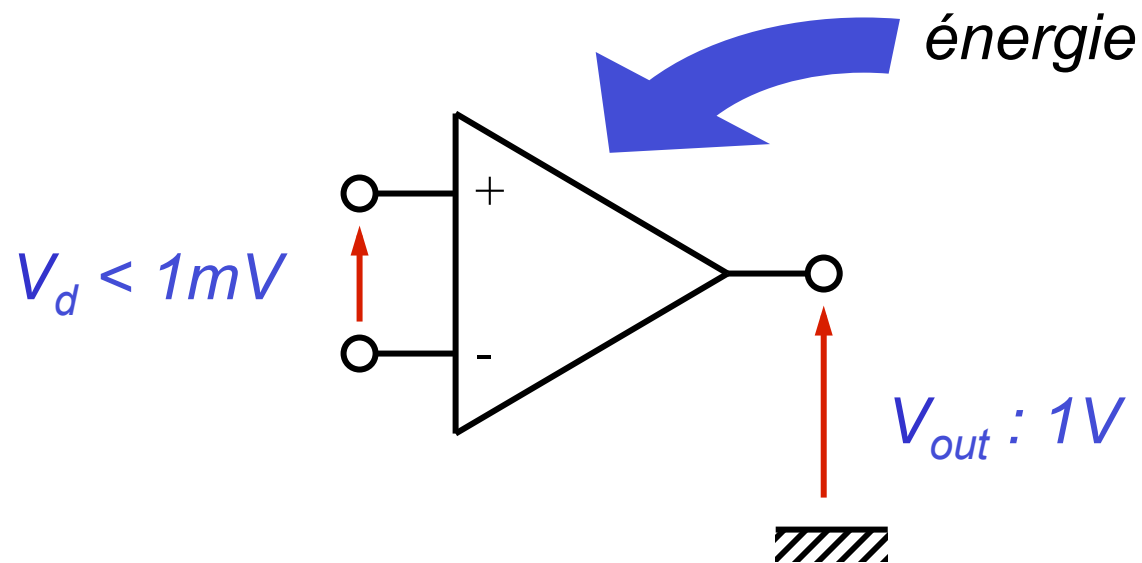
Synthèse (I)

- ▶ L'ampli opérationnel est donc fondamentalement un composant ayant pour fonction d'amplifier fortement une tension d'entrée différentielle très faible
- ▶ le schéma ci-dessous récapitule les concepts précédents et les deux relations à retenir:



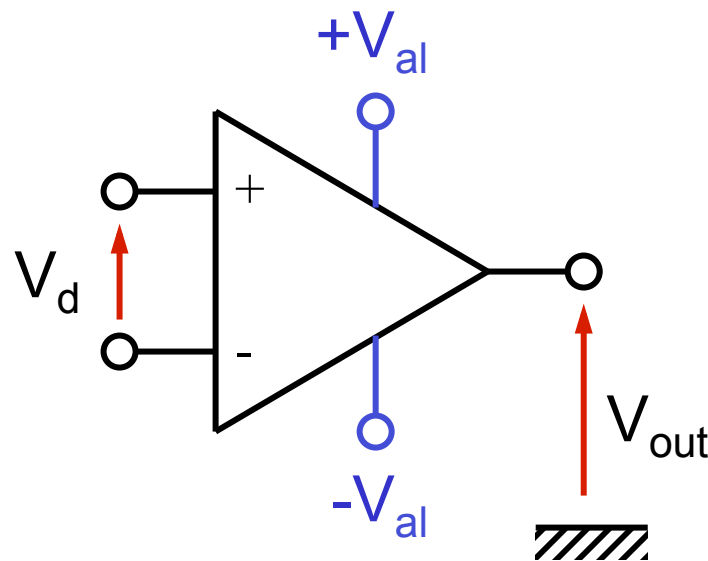
Tensions et bornes d'alimentation

- ▶ Pour amplifier le signal présent à son entrée, l'ampli-op doit lui-même être alimenté en énergie
 - ♦ sinon, d'où le signal de sortie (amplifié) tirerait-il son énergie ?



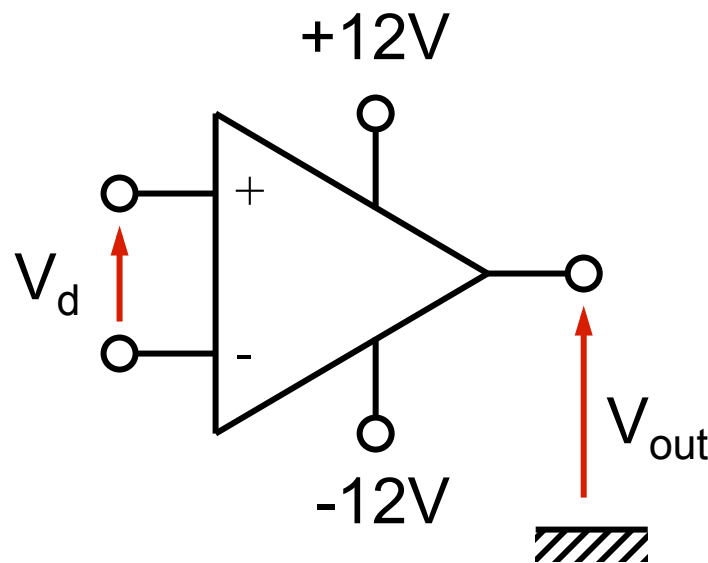
Tensions et bornes d'alimentation

- ▶ En plus de ses bornes d'entrée et de sortie, un ampli-op possède donc des bornes d'alimentation...
 - ♦ notées ici " $+V_{al}$ " et " $-V_{al}$ "
- ▶ ...auxquelles il faut connecter des sources de tension extérieures pour que l'ampli-op fonctionne



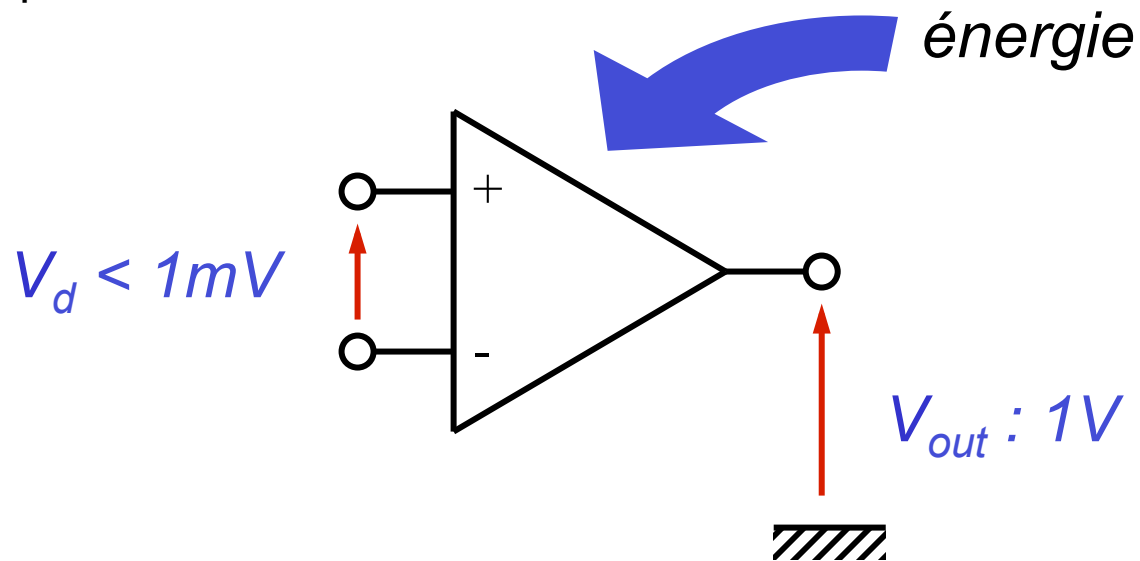
Tensions et bornes d'alimentation

- ▶ Les tensions d'alimentation $+V_{al}$ et $-V_{al}$ à fournir à l'ampli-op sont le plus souvent symétriques
 - ♦ c'est-à-dire de signes opposés mais de même valeur absolue
- ▶ elles valent typiquement: **+12V** et **-12V**, ou +15V et -15V



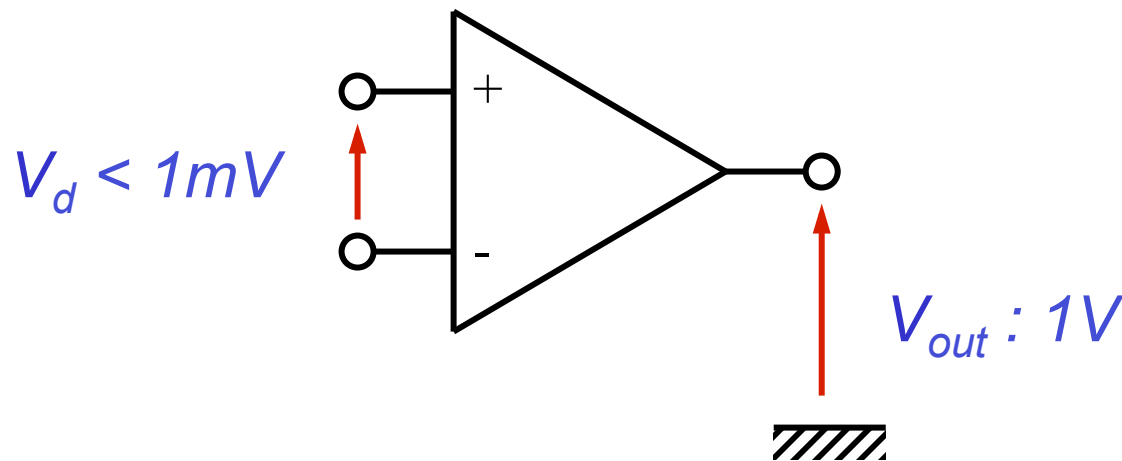
Tensions et bornes d'alimentation: quadripôle actif

- ▶ Propriété: l'ampli-op est un composant actif
- ▶ intuitivement...
 - ◆ nous avons défini un dipôle actif comme un dipôle générant une puissance électrique (sources)
 - ◆ de manière analogue, l'ampli-op délivre un signal de puissance plus élevée que celui qu'on lui fournit en entrée
 - la différence de puissance est fournie par les alimentations de l'ampli-op



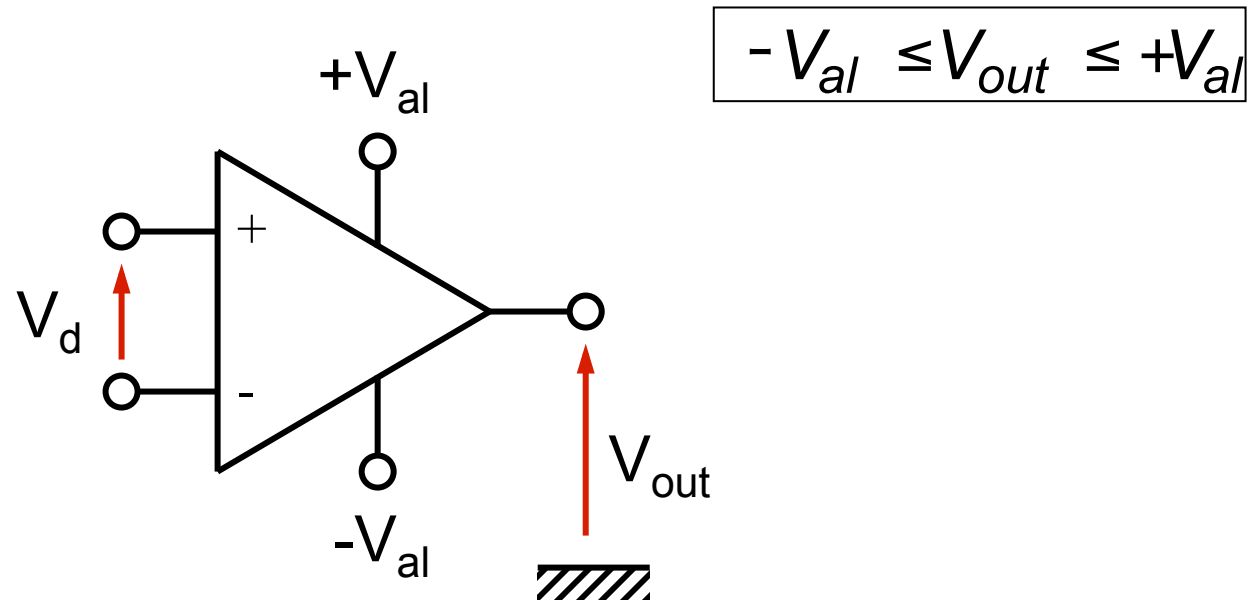
Tensions et bornes d'alimentation: quadripôle actif

- ▶ Plus généralement, un quadripôle actif est défini par le fait qu'un signal de puissance élevée (sortie) est contrôlé par un signal de puissance plus faible (entrée)
- ▶ remarque
 - ◆ l'amplification est un exemple typique de cette situation: le signal de sortie possède la même allure que le signal d'entrée...
 - la sortie est donc bien "contrôlée" par l'entrée
 - ◆ ...mais à un niveau de puissance beaucoup plus élevé



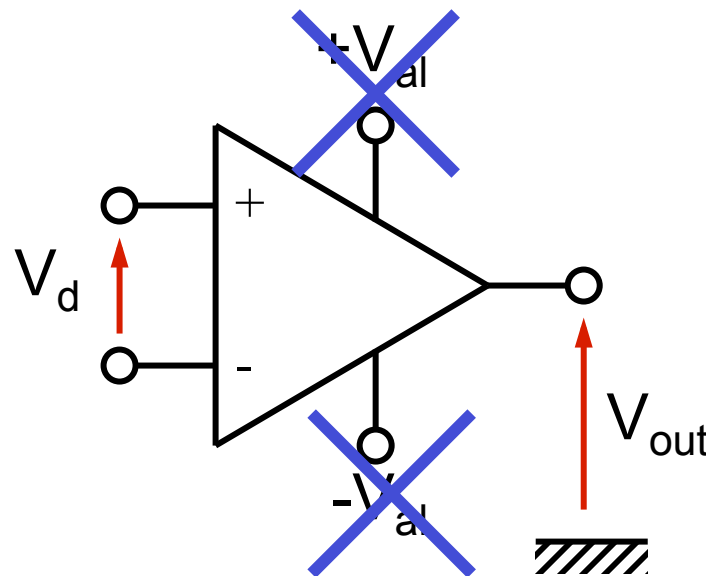
Tensions et bornes d'alimentation: propriété

- ▶ Propriété: La tension de sortie ne peut pas sortir de la gamme fixée par ces tensions d'alimentation
 - ◆ sans démonstration, mais on peut l'admettre intuitivement en remarquant que l'énergie du signal de sortie vient fondamentalement des sources de tension $+V_{al}$ et $-V_{al}$,
- ▶ => mathématiquement, on a la condition:



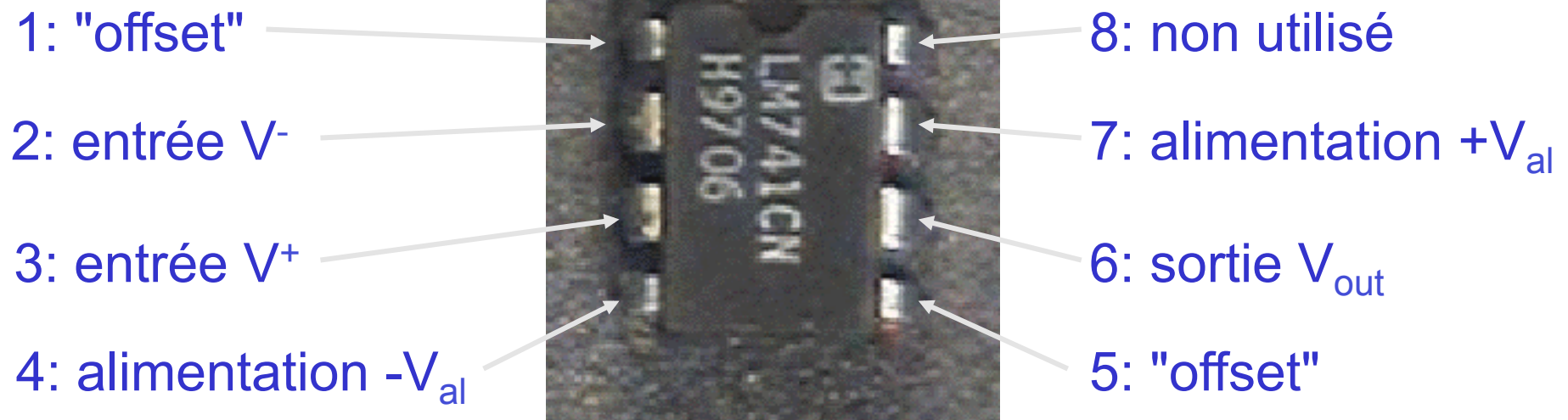
Tensions et bornes d'alimentation

- ▶ Rem: pour simplifier les schémas, on omet souvent volontairement de représenter les bornes d'alimentation...
 - ◆ c'est ce que nous avons fait au début de ce chapitre
- ▶ mais n'oubliez pas qu'un ampli-op doit être alimenté!



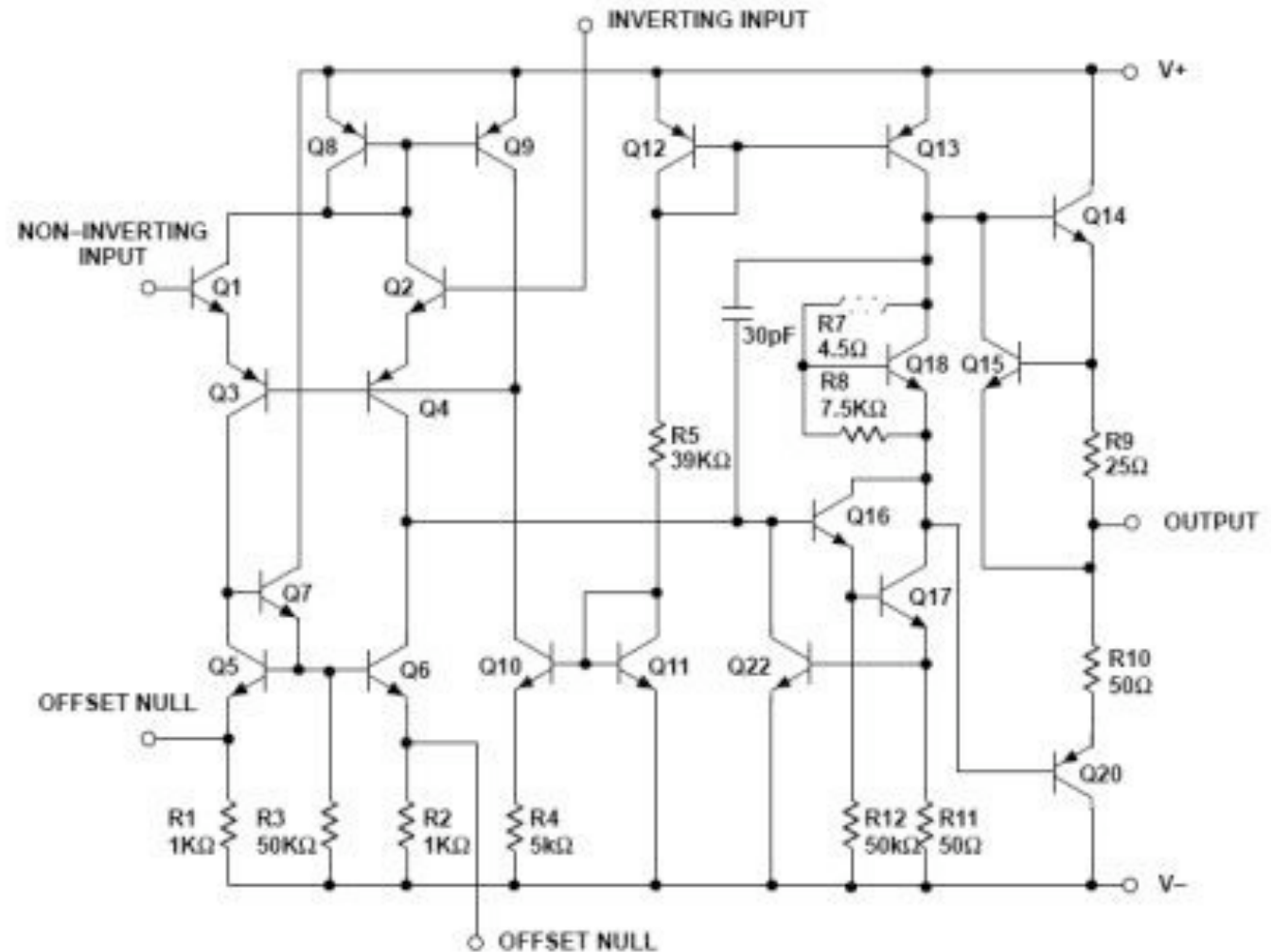
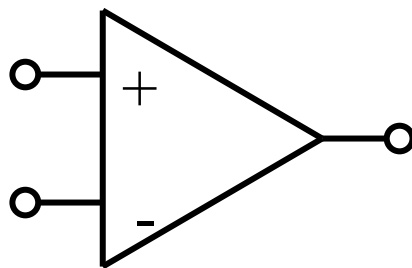
Composant réel: brochage du 741

- ▶ Revenons au 741 "réel": vous connaissez maintenant la fonction de 5 de ses 8 pattes
 - ◆ "brochage" ou "pinning" = fonction attribuée à chaque patte
 - la fonction des pattes "offset" sera expliquée plus tard
 - ◆ remarquez la numérotation des pattes en sens anti-horlogique



Composant réel: schéma interne

- Voici ce que contient réellement un ampli-op 741...



Composant réel: schéma interne

- ▶ Vous n'en savez pas assez en électronique pour comprendre le schéma précédent, mais vous pouvez quand même en retenir deux choses...
- ▶ 1) Un ampli-op est fait à base de transistors
 - ◆ il y en a 24 dans le schéma précédent
- ▶ 2) il n'est pas question d'avoir un schéma pareil en tête chaque fois qu'on doit réfléchir à un ampli-op
 - ◆ heureusement, nous connaissons deux outils pour décrire le comportement d'un composant sans se soucier de son fonctionnement interne:
 - ◆ a) l'équivalent de Thévenin (4.1.2)
 - ◆ b) les caractéristiques (4.1.3)

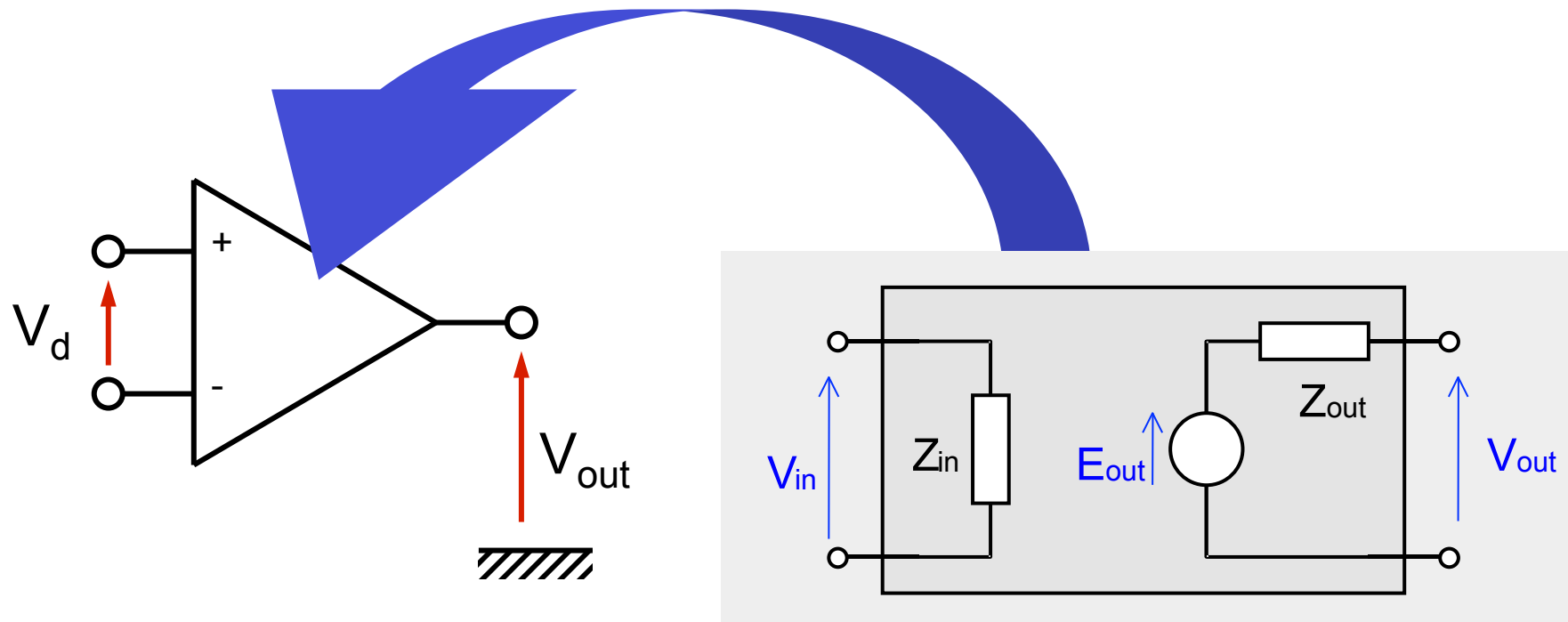
4.1.2 - Impédances d'entrée et de sortie

Introduction

- ▶ L'impédance d'entrée et l'impédance de sortie sont des propriétés essentielles de tout composant
- ▶ C'est aussi le cas pour l'ampli-op:
 - ◆ elles permettent de résumer l'ampli-op en un schéma très simple
 - ◆ elles seront essentielles lorsqu'il s'agira de connecter l'ampli-op à d'autres composants pour réaliser des montages
- ▶ Dans ce module, nous nous intéressons à la valeur particulière de ces grandeurs dans le cas de l'ampli-op
 - ◆ c'est également l'occasion d'illustrer une fois de plus la notion d'équivalent de Thévenin

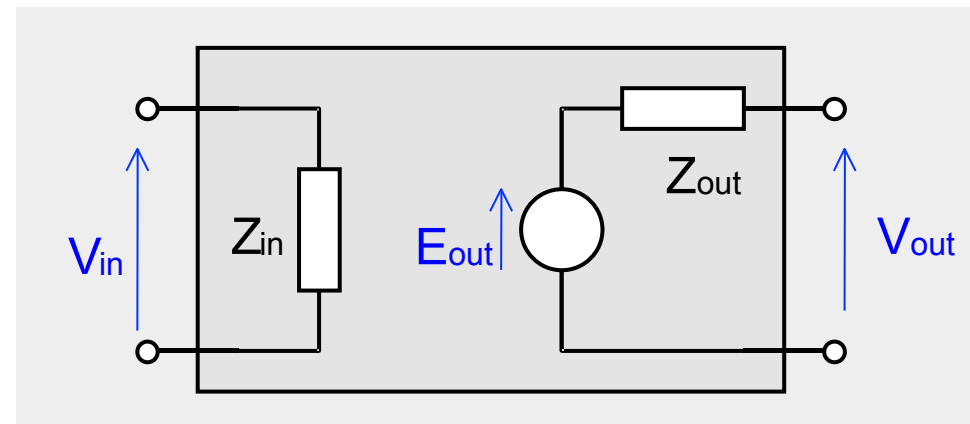
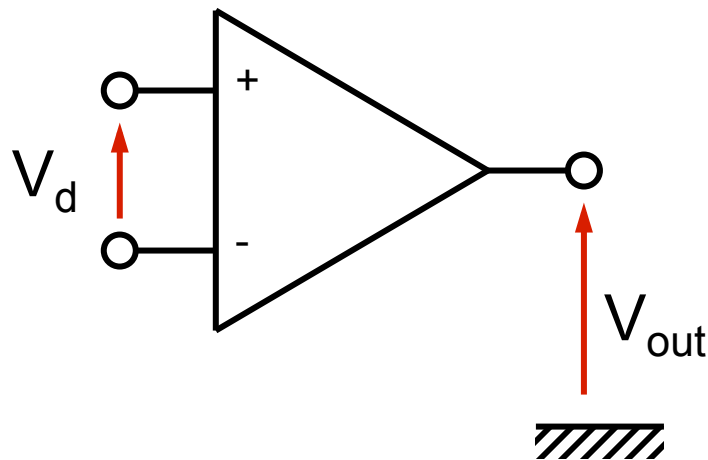
Introduction

- ▶ Modéliser l'ampli-op sous forme d'un équivalent de Thévenin revient à "faire comme si" l'ampli-op contenait le schéma de droite
 - ◆ au lieu du schéma à 24 transistors montré précédemment



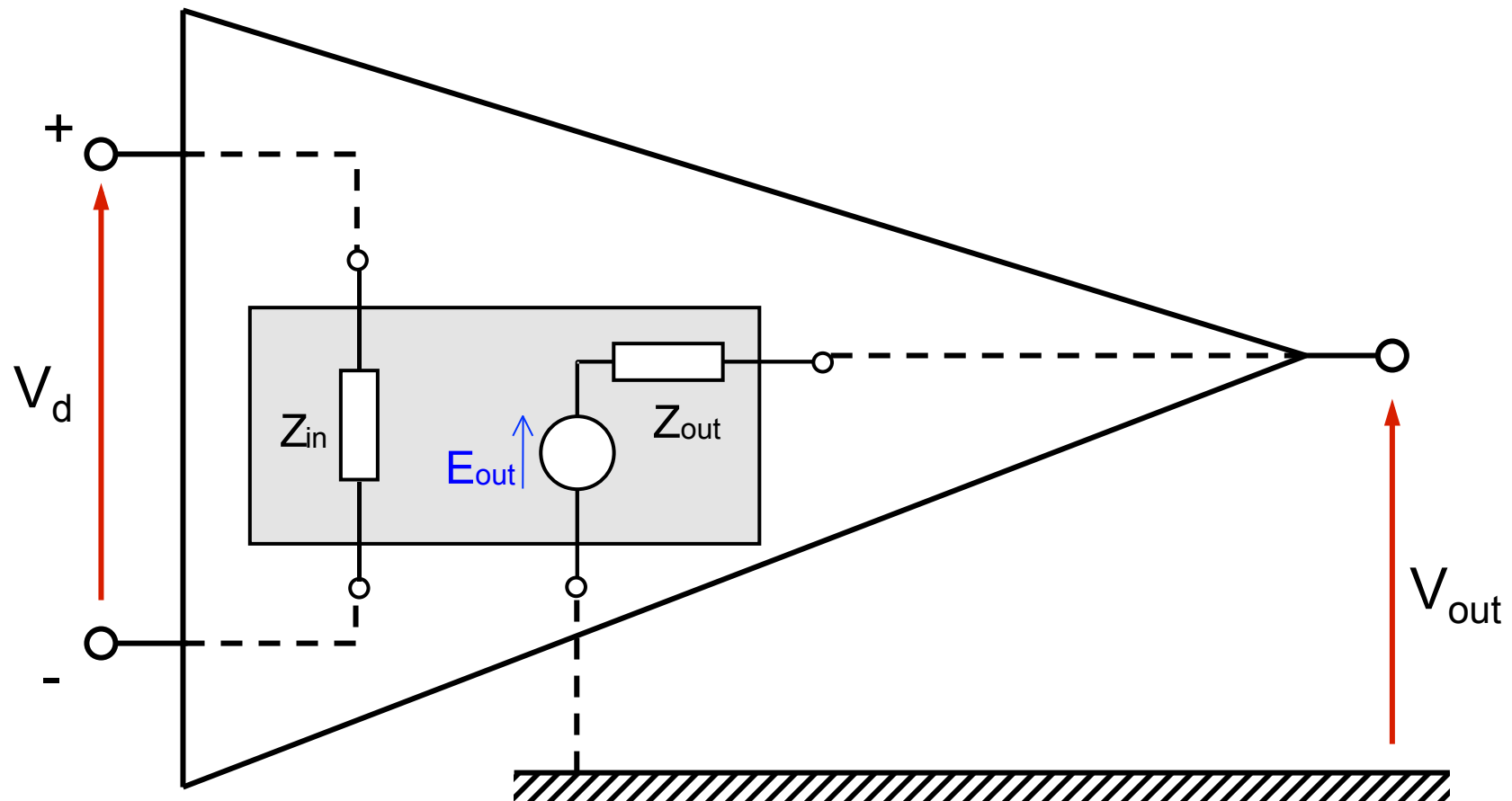
Equivalent de Thévenin

- ▶ Particularités de l'ampli-op:
 - ▶ 1) l'impédance d'entrée Z_{in} est dans le cas de l'ampli-op une impédance d'entrée différentielle
 - ◆ comme le signal V_d , aucune de ses bornes n'est à la masse
 - ▶ 2) au contraire, la source E_{out} est référencée à la masse
 - ◆ en tous cas dans l'exemple ci-dessous



Equivalent de Thévenin

- ▶ Compte tenu de ces particularités, on arrive au schéma ci-dessous:



Valeur des impédances

- ▶ L'impédance d'entrée (différentielle) d'un ampli opérationnel est très élevée
 - ◆ cela fait partie des propriétés de base d'un ampli-opérationnel
 - ◆ ordre de grandeur typique: $>10\text{M}\Omega$
- ▶ Conséquence
 - ◆ lorsqu'on met un signal à l'entrée de l'ampli-op, le courant qui circule entre la borne "+" et la borne "-" est très faible
- ▶ Rem: cette impédance d'entrée est si élevée qu'on fait souvent l'approximation qu'elle est infinie
 - ◆ nous y reviendrons...

Valeur des impédances

- ▶ L'impédance de sortie d'un ampli opérationnel est très faible
 - ♦ cela fait partie des propriétés de base d'un ampli-opérationnel
 - ♦ ordre de grandeur typique: 1Ω
- ▶ On fait souvent l'approximation que cette impédance de sortie est nulle

Valeur des impédances

- ▶ Grâce aux propriétés précédentes...
 - ◆ impédance d'entrée (très) élevée
 - ◆ impédance de sortie (très) faible
 - ▶ ... un ampli-op convient donc bien, a priori, pour une adaptation d'impédance en tension
- ▶ rappel:
 - ◆ lorsqu'on connecte deux appareils ensemble, il faut vérifier que leurs impédances d'entrée et de sortie sont "adaptées" (c'est d'ailleurs l'intérêt de l'équivalent de Thévenin)
 - ◆ pour transmettre un signal de tension, on recherche précisément une impédance d'entrée élevée (appareil aval) et une impédance de sortie faible (appareil amont)

Source commandée

- ▶ Pour être complets, nous devons encore identifier la source commandée E_{out} de l'équivalent de Thévenin
- ▶ rappel
 - ◆ c'est cette source qui fait le "lien" entre l'entrée et la sortie de l'équivalent de Thévenin et donc qui modélise la "fonction" de l'ampli-op
- ▶ la démarche est la suivante
 - ◆ la loi fondamentale de l'ampli-op est: $V_{out} = A.V_d$
 - ◆ en négligeant Z_{out} (supposée nulle), on peut assimiler V_{out} à E_{out}
 - ◆ et donc $E_{out} = A.V_{in} = A.V_d$

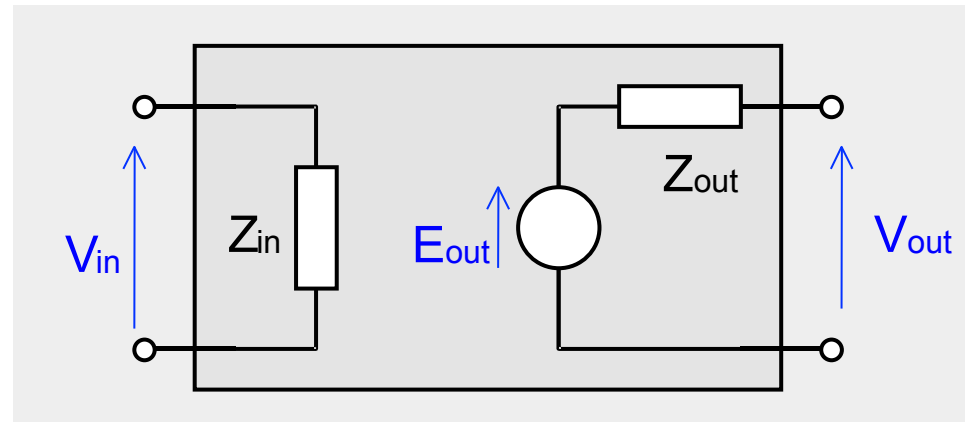
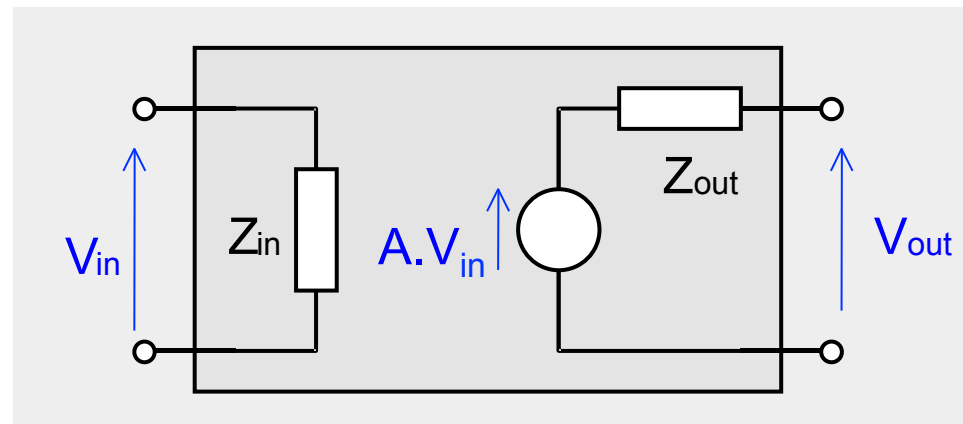


Illustration de la notion de profondeur de modèle

- ▶ L'ampli-op peut être modélisé par le schéma équivalent ci-dessous dans lequel:
 - ◆ le gain A est très élevé ou (idéalement) infini
 - ◆ l'impédance d'entrée Z_{in} est très élevée ou (idéalement) infinie
 - ◆ l'impédance de sortie Z_{out} est très faible ou (idéalement) nulle
- ▶ => il existe plusieurs modèles différents pour le même ampli-op
 - ◆ en fonction des idéalizations que vous choisissiez de faire
 - ◆ c'est un exemple de la notion de "profondeur de modèle"



Synthèse

- ▶ A retenir...
- ▶ 1) plusieurs propriétés essentielles
 - ◆ un ampli-op possède une impédance d'entrée différentielle
 - ◆ cette impédance d'entrée est très élevée
 - approximation courante: elle est infinie
 - ◆ l'impédance de sortie d'un ampli-op est très faible
 - approximation courante: elle est nulle
- ▶ 2) à titre d'exemple, la modélisation d'un ampli-op sous forme d'équivalent de Thévenin
 - ◆ la démarche, son utilité et la signification de cet équivalent de Thévenin
 - ◆ l'idéalisation plus ou moins poussée de cet équivalent de Thévenin

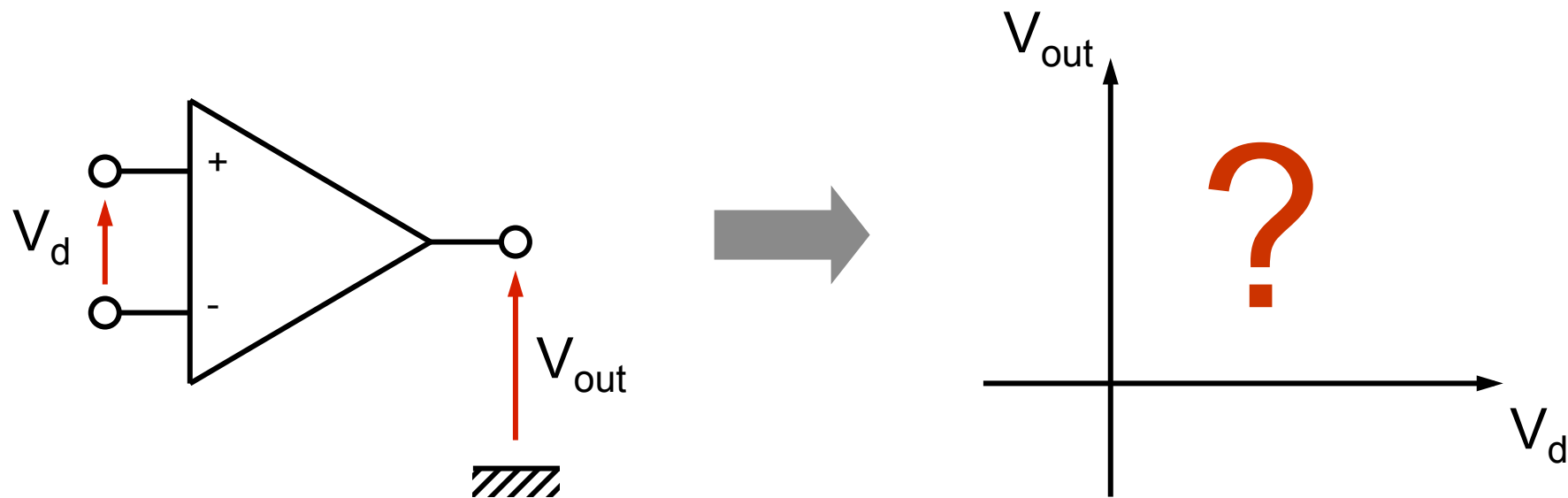
4.1.3 - Caractéristique de transfert et principe du zéro virtuel

Introduction

- ▶ Dans ce module, nous allons compléter notre description de l'ampli-op en étudiant sa caractéristique
- ▶ Nous nous intéresserons ensuite au principe du zéro virtuel qui lui est directement liée

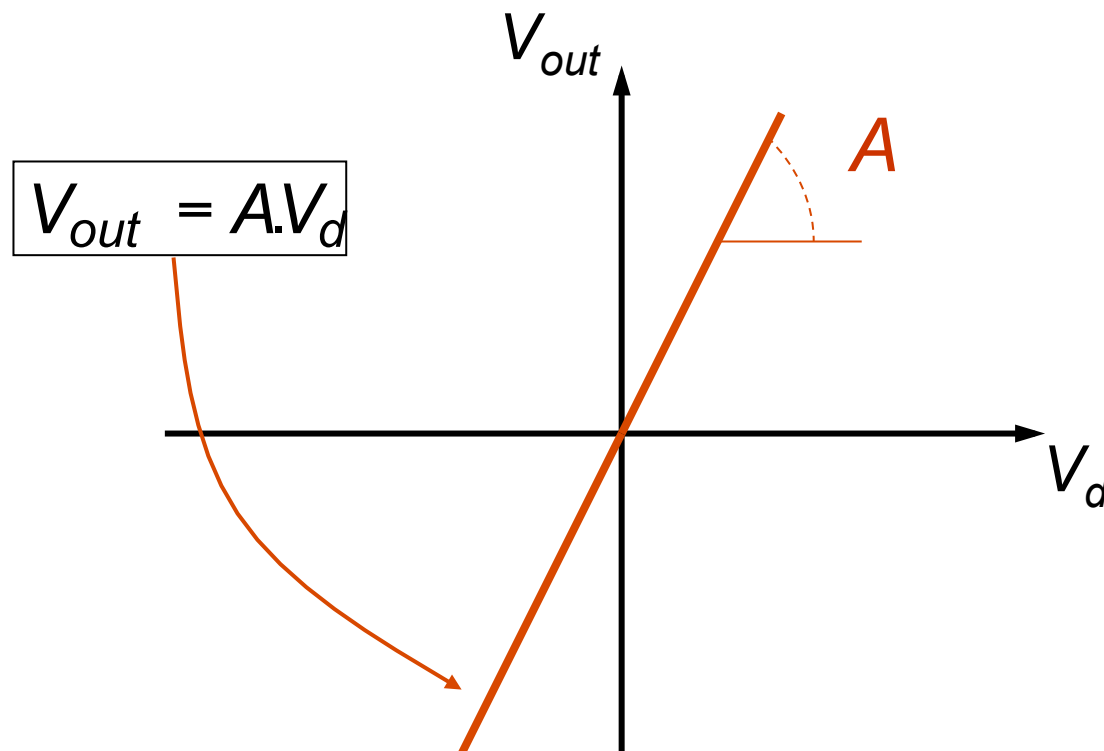
Caractéristique de transfert

- ▶ L'ampli-op possède en fait plusieurs caractéristiques
- ▶ celle qui nous intéresse ici est la caractéristique de transfert
 - ◆ = rapport entre tension d'entrée (V_d) et tension de sortie (V_{out})



Caractéristique: zone linéaire

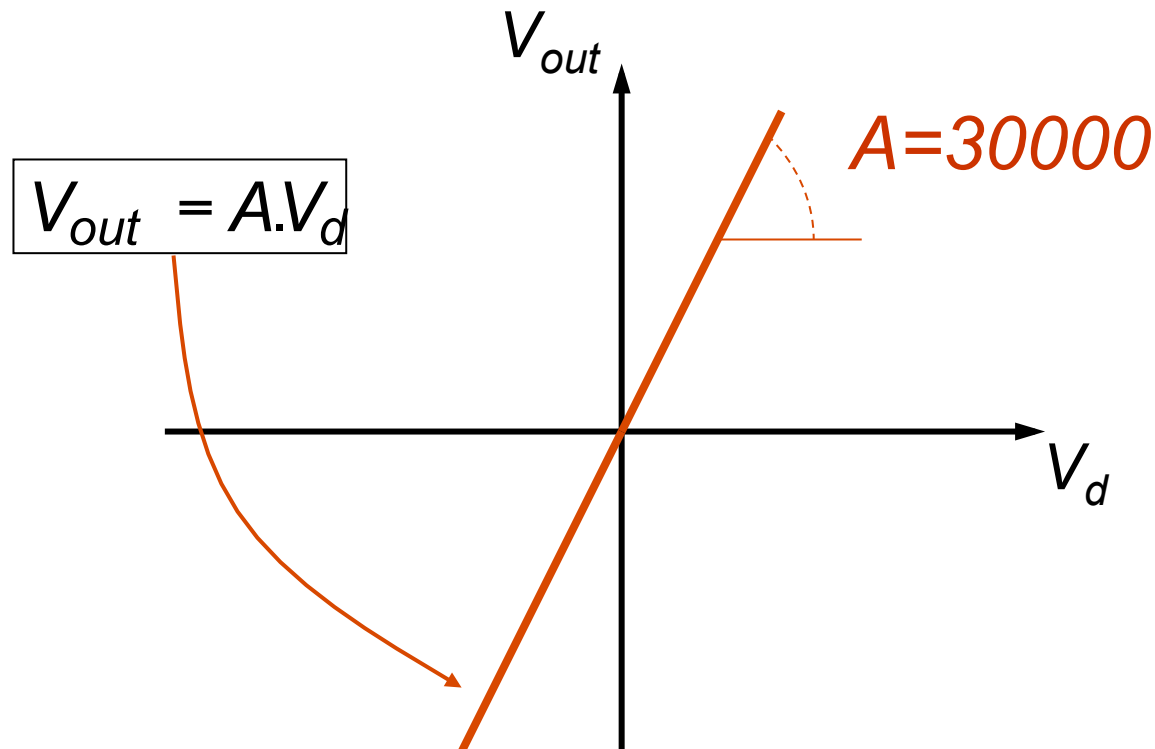
- ▶ La relation mathématique qui lie V_{out} et V_d est déjà connue: c'est la loi fondamentale de l'ampli-op
- ▶ Cette loi se traduit par une simple droite de pente A dans le plan (V_{out}, V_d)



Caractéristique: zone linéaire

► Remarques

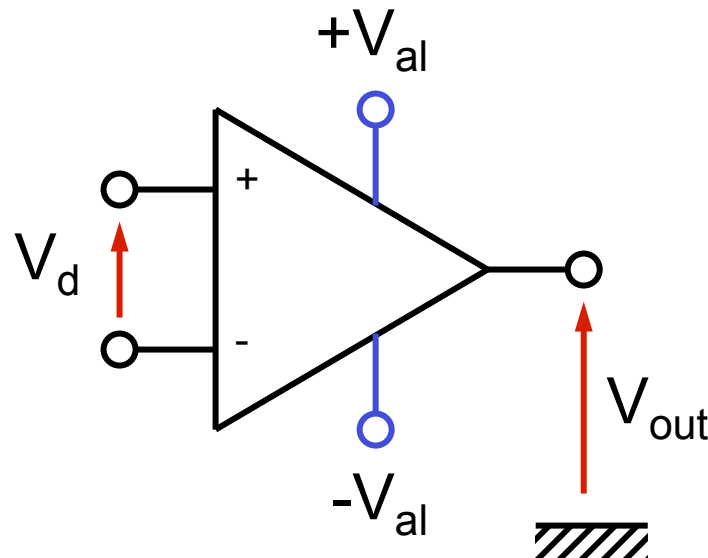
- ◆ la droite est symétrique par rapport à l'origine car V_d et V_{out} peuvent aussi bien être négatives que positives
- ◆ la droite est en fait très raide (quasiment verticale) puisque le gain de l'ampli-op est très élevé



Caractéristique: zone linéaire

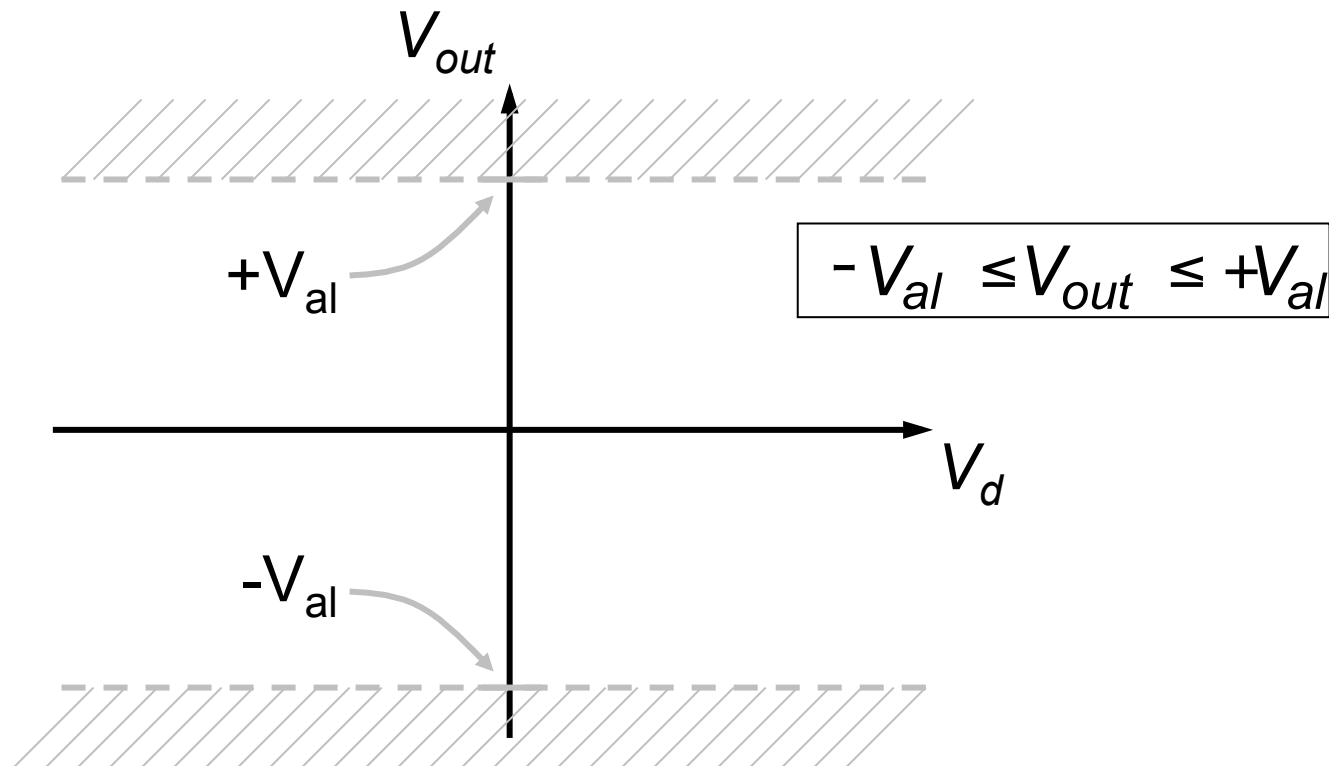
- Il faut cependant tenir compte d'un phénomène supplémentaire déjà cité précédemment: la tension de sortie V_{out} ne peut en aucun cas sortir des limites fixées par les tensions d'alimentation de l'ampli-op

$$-V_{al} \leq V_{out} \leq +V_{al}$$



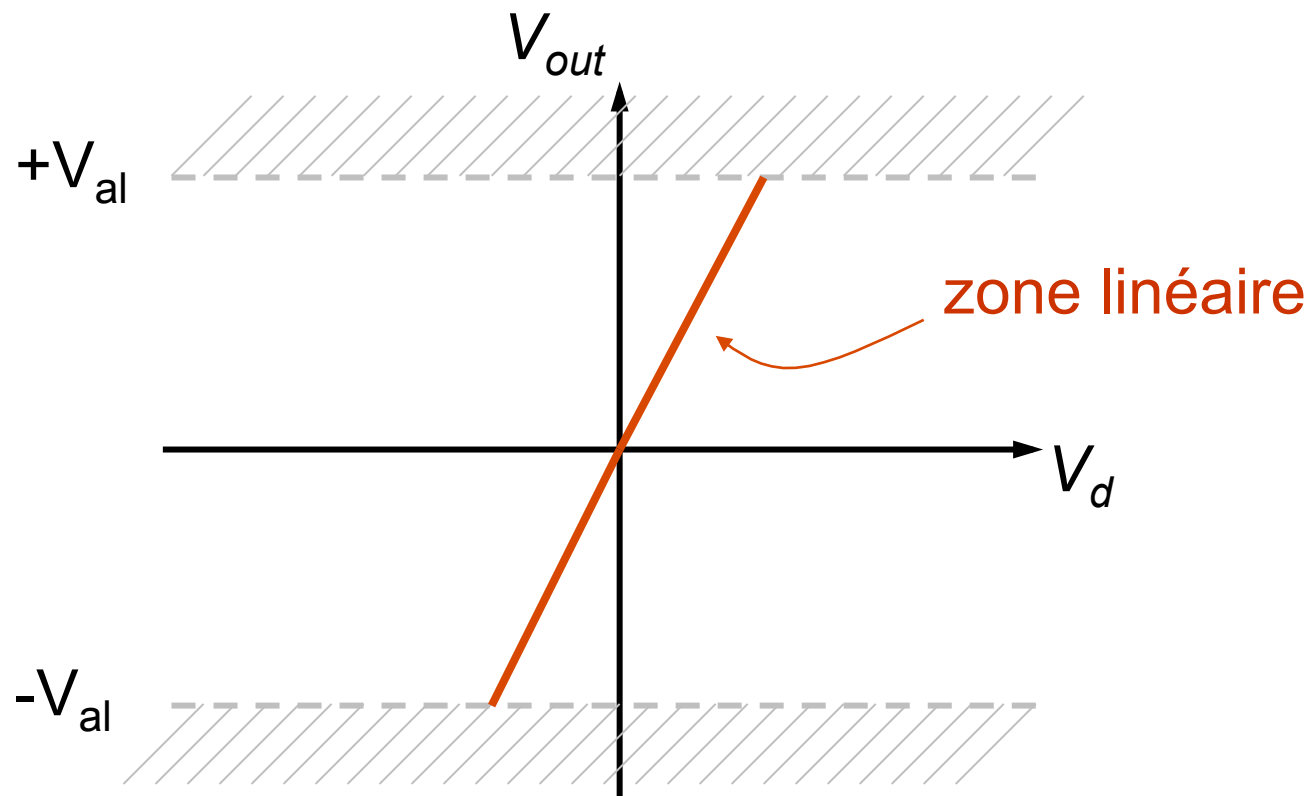
Caractéristique: zone linéaire

- ▶ Ces limites se traduisent par des horizontales dans le plan de la caractéristique
 - ♦ droite horizontale car tension de sortie constante
 - ♦ seule la zone située entre les deux horizontales est "accessible"



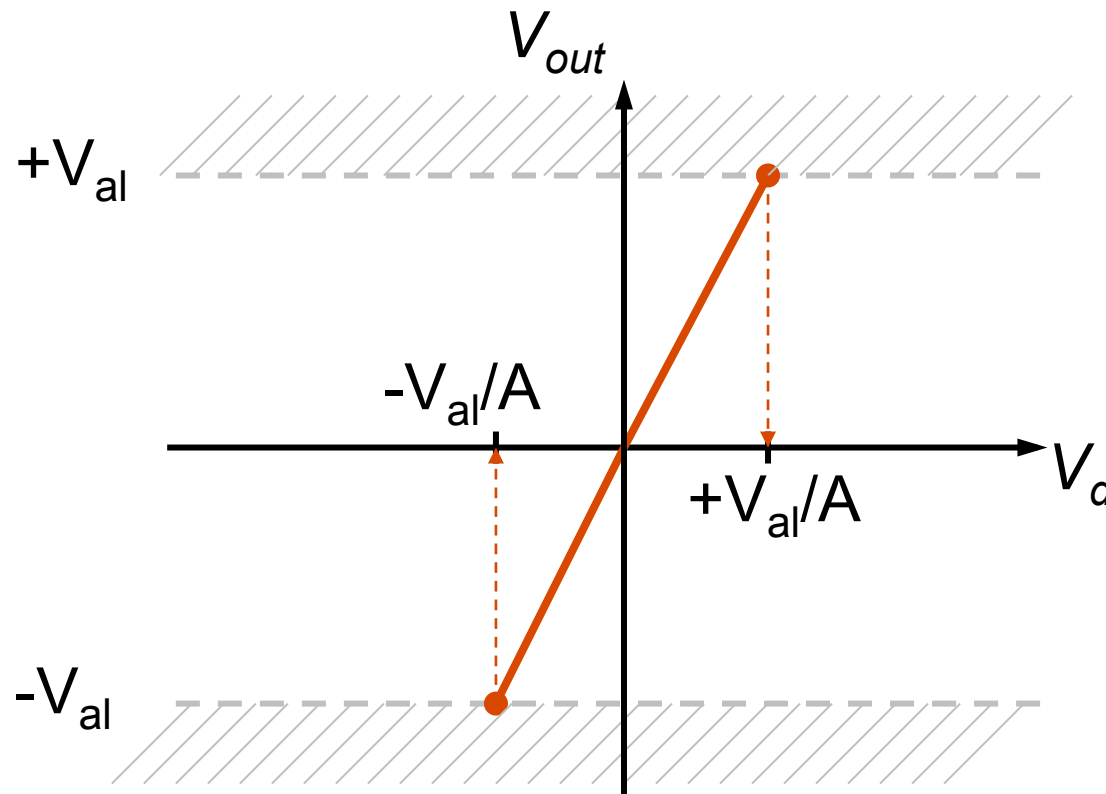
Caractéristique: zone linéaire

- ▶ La loi fondamentale de l'ampli-op n'est donc valable qu'entre ces deux horizontales
- ▶ dans cette plage, l'ampli-op est dit "en zone linéaire"



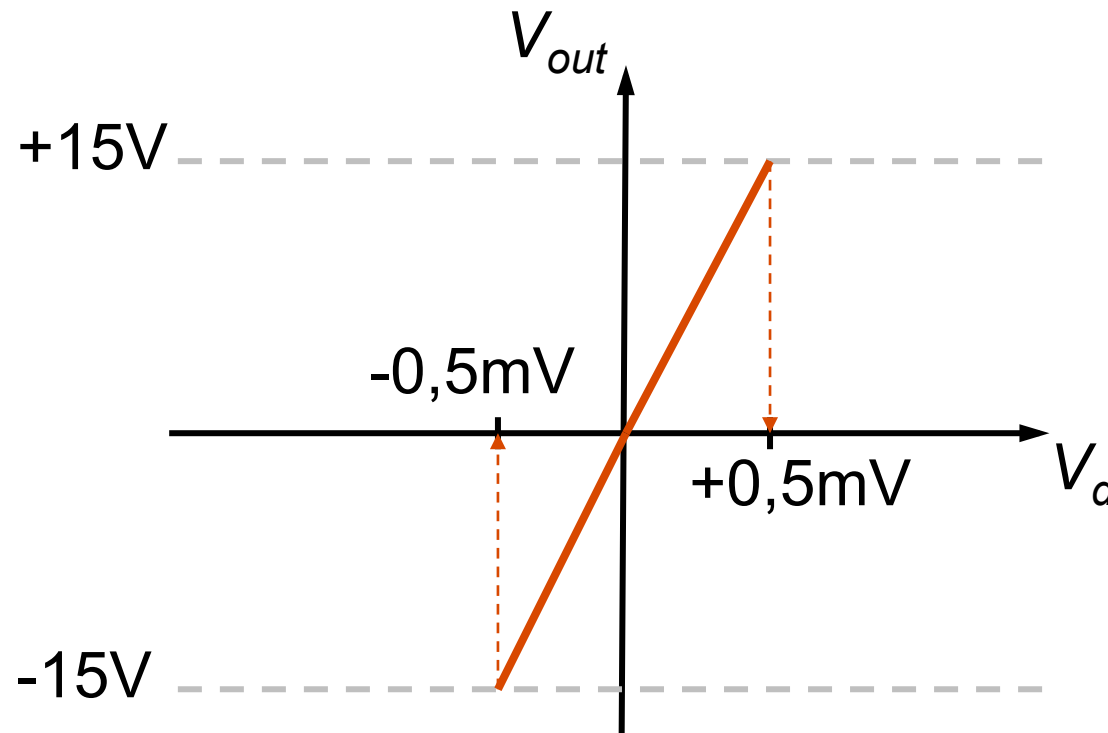
Caractéristique: limites de la zone linéaire

- ▶ Les limites de la zone linéaire sont faciles à calculer:
 - ♦ il s'agit des points pour lesquels V_{out} (sortie) vaut $+V_{al}$ et $-V_{al}$
 - ♦ donc des points pour lesquels V_d (entrée) vaut $+V_{al}/A$ et $-V_{al}/A$



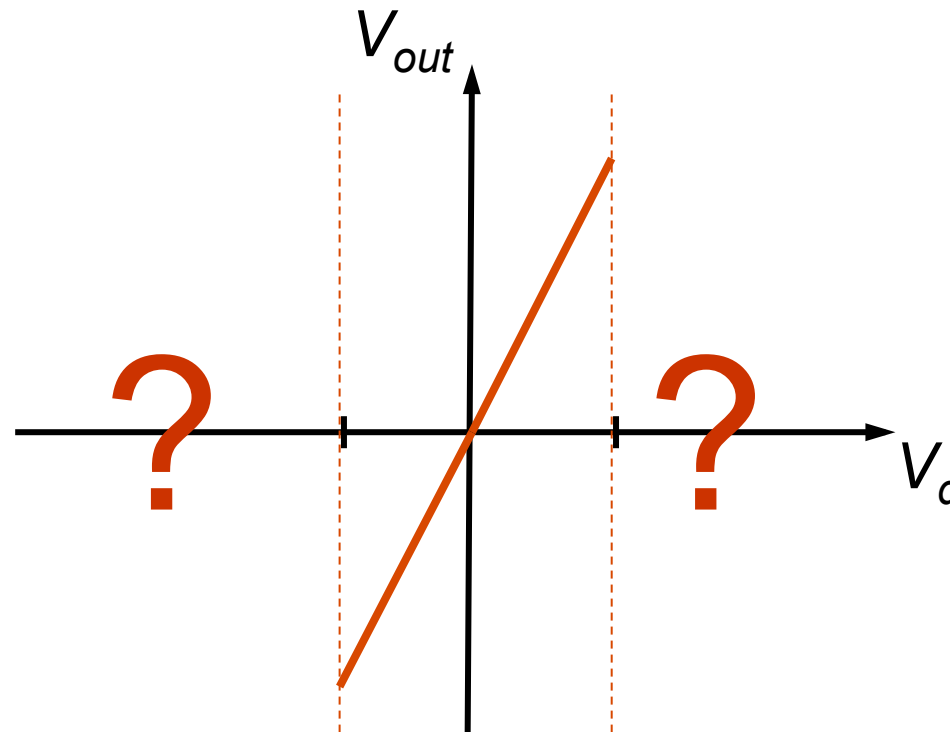
Caractéristique: limites de la zone linéaire

- ▶ Comme A est très élevé, la zone linéaire est en fait très étroite sur l'axe horizontal
 - ♦ exemple: pour $V_{al}=15V$ et $A=30000$ (valeurs courantes), on obtient $+0,5mV$ et $-0,5mV$



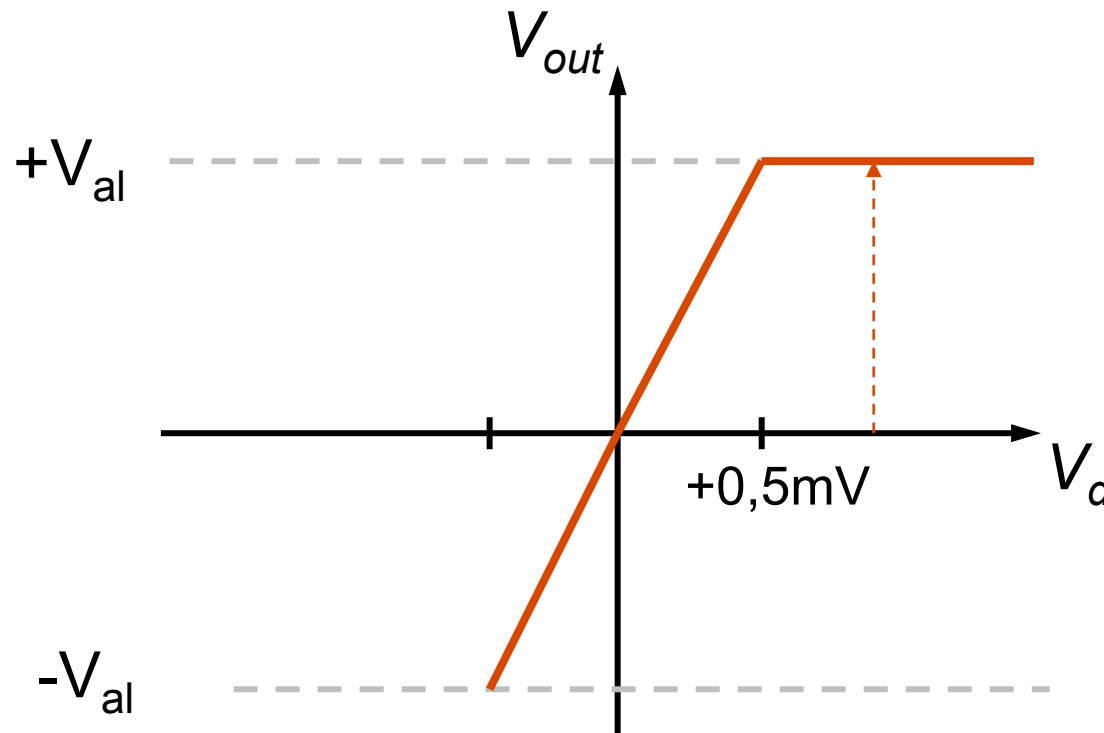
Caractéristique

- Q: que se passe-t-il en dehors de la zone linéaire?



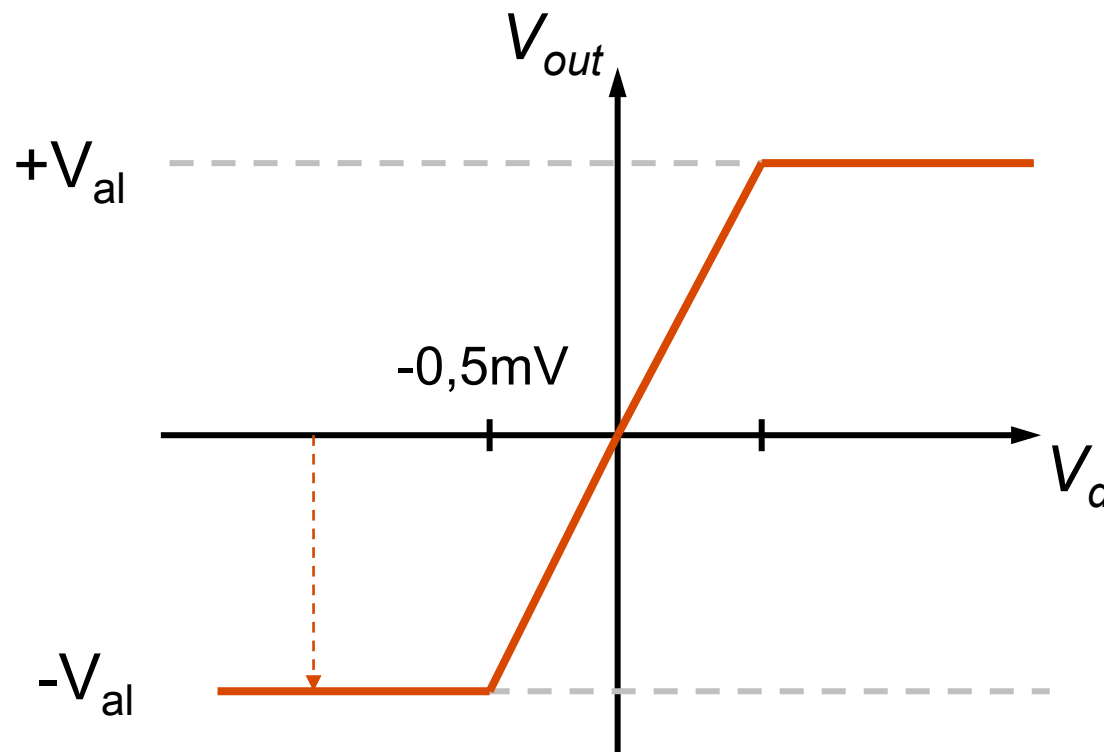
Caractéristique: saturation

- ▶ Si la tension d'entrée est au-dessus de $+V_{al}/A$, la tension de sortie V_{out} est limitée à la valeur $+V_{al}$
 - ♦ car l'ampli-op ne peut monter "au-dessus" de sa propre tension d'alimentation positive
 - ♦ la caractéristique de l'ampli-op suit alors une horizontale



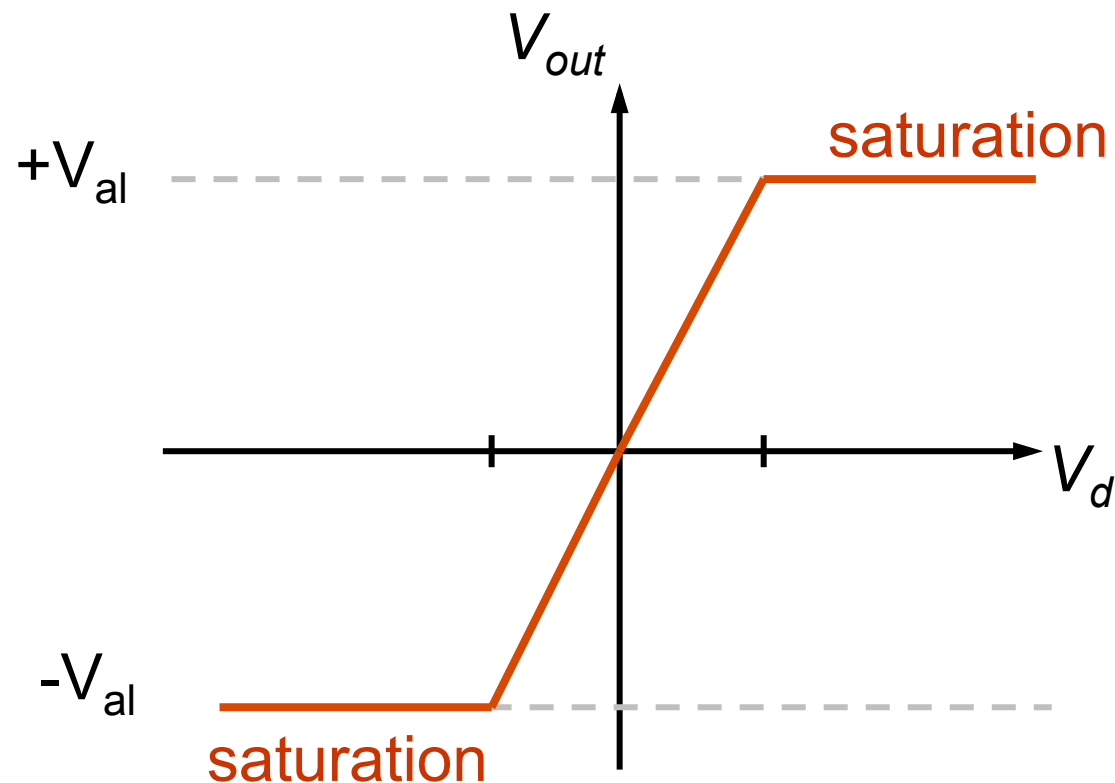
Caractéristique: saturation

- ▶ Si la tension d'entrée est en-dessous de $-V_{al}/A$, la tension de sortie V_{out} est limitée à la valeur $-V_{al}$
 - ♦ car l'ampli-op ne peut descendre "en-dessous" de sa propre tension d'alimentation négative



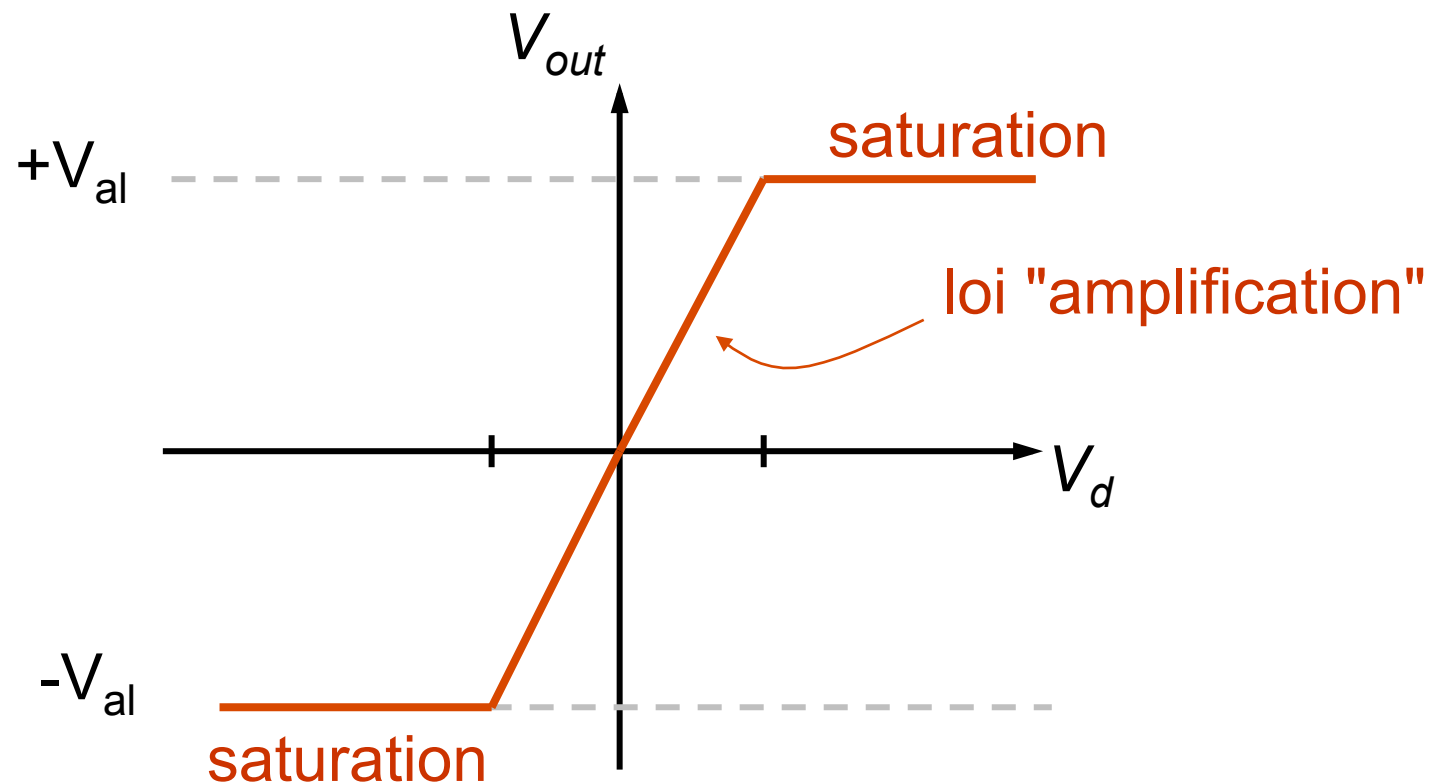
Caractéristique: saturation

- ▶ Dans les deux cas, c'est-à-dire lorsqu'on sort de la zone linéaire, on dit que l'ampli-op sature



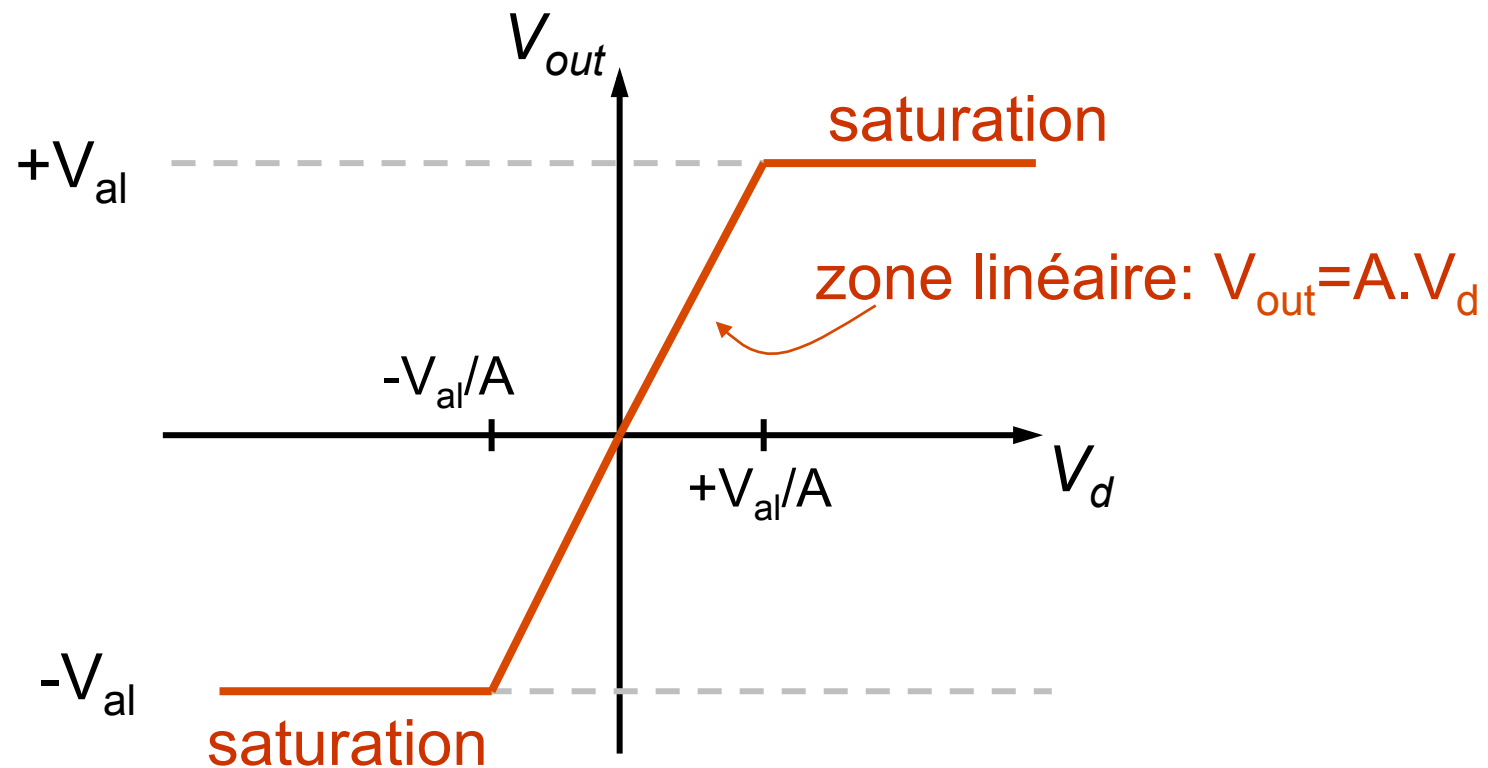
Caractéristique: saturation

- ▶ Remarque importante: dans les zones de saturation, la loi fondamentale $V_{out} = A.V_d$ n'est plus vérifiée
 - ♦ => dans ces zones, l'ampli-op n'amplifie plus!



Synthèse

- ▶ La caractéristique de transfert d'un ampli-op idéal est la suivante:



Synthèse

- ▶ La caractéristique de transfert d'un ampli-op comporte trois zones: la zone linéaire et deux zones de saturation
- ▶ La zone linéaire correspond à la loi fondamentale de l'ampli-op ($V_{\text{out}} = A \cdot V_d$): c'est une droite de pente A
- ▶ Cette zone linéaire est très étroite
 - ♦ car le gain de l'ampli-op est très élevé (droite très raide)
 - ♦ ordre de grandeur typique:

$$|V_d| \leq 1\text{mV}$$

- ▶ Les zones de saturation se marquent par des horizontales
 - ♦ elles traduisent le fait que la tension de sortie de l'ampli-op ne peut pas "sortir" des limites fixées par ses propres tensions d'alimentation $+V_{\text{al}}$ et $-V_{\text{al}}$
 - ♦ Lorsqu'un ampli-op sature, il n'amplifie plus correctement

Principe du zéro virtuel: introduction

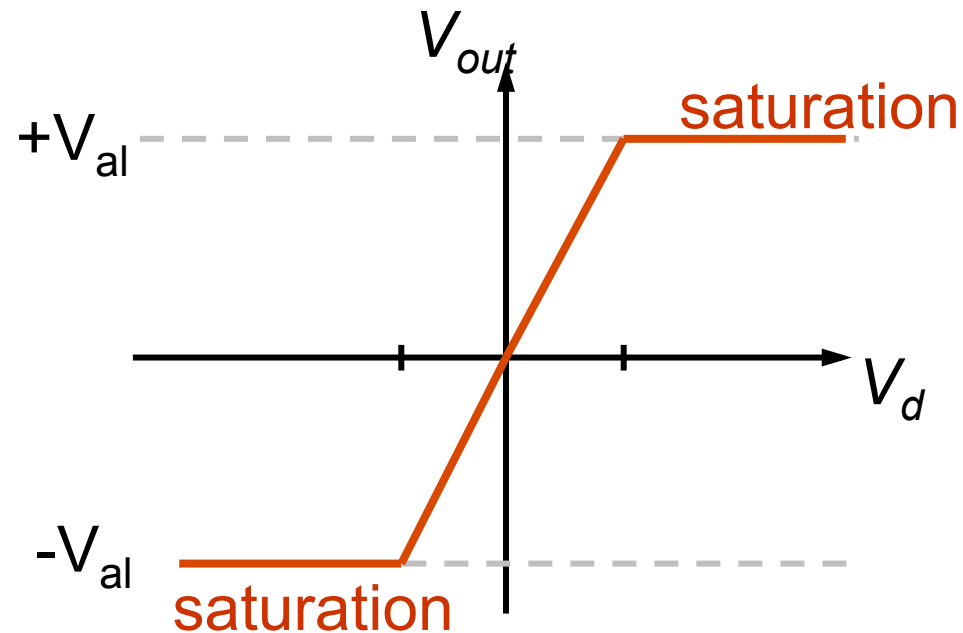
- ▶ Voyons maintenant le principe du zéro virtuel
- ▶ Le "principe du zéro virtuel" est une propriété générale de tous les ampli-ops
 - ◆ cette propriété est directement liée à la caractéristique que nous venons d'étudier
- ▶ Cette propriété est fondamentale car elle permet de gagner beaucoup de temps lorsqu'on raisonne sur un schéma comprenant un ampli-op
 - ◆ voir module correspondant

Principe du zéro virtuel

- ▶ Le "principe du zéro virtuel" s'énonce comme suit...
- ▶ "tant qu'un ampli-op ne sature pas, sa tension différentielle d'entrée est virtuellement nulle"
- ▶ Cet énoncé comporte deux parties que nous allons expliciter successivement

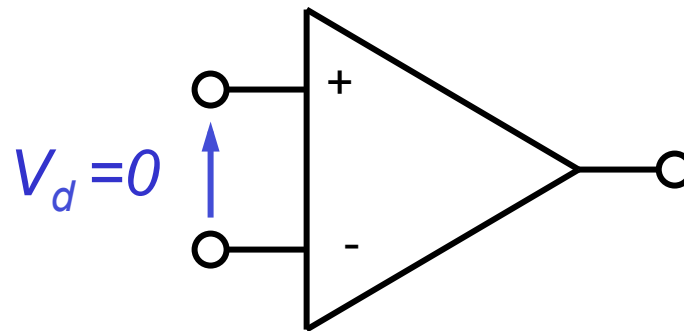
Principe du zéro virtuel

- ▶ "tant qu'un ampli-op ne sature pas..."
- ▶ la première partie de l'énoncé rappelle qu'on n'a un "zéro virtuel" (voir slide suivant) que si l'ampli-op est en zone linéaire
 - ♦ oublier cette condition est une faute classique (💣)



Principe du zéro virtuel

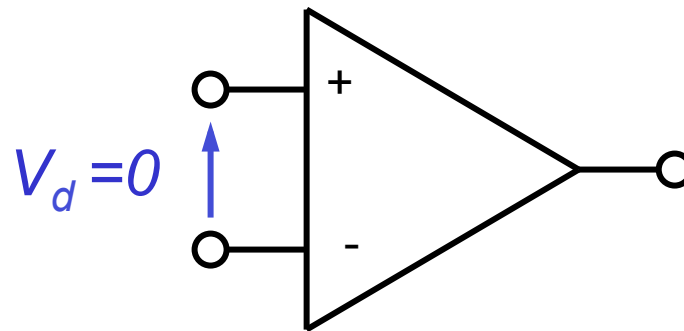
- ▶ ...sa tension différentielle d'entrée est virtuellement nulle"
- ▶ la seconde partie de l'énoncé signifie que, dans cette zone linéaire, la tension d'entrée V_d est tellement faible qu'on peut la négliger devant les autres tensions
 - ◆ on a déjà vu effectivement que V_d est typiquement inférieur à 1mV
- ▶ "négliger V_d " signifie qu'on fait l'approximation $V_d=0$
 - ◆ c'est cette approximation qu'on appelle le zéro virtuel
 - "zéro" car V_d est nulle
 - "virtuel" pour rappeler qu'il s'agit d'une approximation



Principe du zéro virtuel: remarques

- ▶ 1) compte tenu de la définition de V_d , le zéro virtuel revient encore à faire l'approximation $V^+ = V^-$
 - ♦ interprétation: les deux entrées de l'ampli-op sont (virtuellement) au même potentiel

$$V_d = V^+ - V^-$$
$$\boxed{V_d = 0} \quad \longrightarrow \quad \boxed{V^+ = V^-}$$



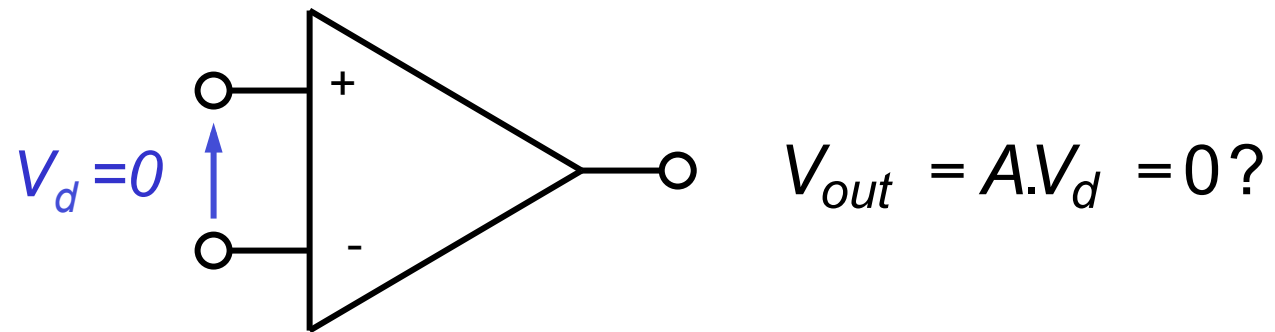
Principe du zéro virtuel: remarques

- ▶ 2) ce qui justifie le principe du zéro virtuel, c'est simplement la valeur très élevée de A
 - ◆ ce principe ne dit rien d'autre que: "dans la zone linéaire, V_d est négligeable", ce que nous avons déjà démontré au moment de tracer la caractéristique de transfert
 - ▶ 3) $\Rightarrow$ le principe du zéro virtuel ne garantit pas que l'ampli-op est dans la zone linéaire
 - ◆ si l'ampli-op sature, la loi $V_{out} = A.V_d$ n'est plus valable $\Rightarrow$ la tension d'entrée V_d peut être quelconque et en particulier non négligeable
- ▶ $\Rightarrow$ Q: comment assurer que l'ampli-op ne sature pas?

 - ◆ R: patience...

Principe du zéro virtuel: remarques

- ▶ 4) Si l'on suit le principe du zéro virtuel, la tension d'entrée de l'ampli-op est nulle dans la zone linéaire...
- ▶ ...or c'est précisément cette tension que l'ampli-op est supposé amplifier
- ▶ Q**: comment résoudre ce paradoxe?



Principe du zéro virtuel: remarques

- ▶ R: Le zéro virtuel consiste à faire simultanément deux approximations:
 - ◆ V_d est nul
 - ◆ A est infini
- ▶ La loi fondamentale devient alors une "forme indéterminée" dont la valeur n'est pas forcément nulle
 - ◆ $\Rightarrow$ il n'y a pas de contradiction
- ▶ remarque importante (💣)
 - ◆ vous avez le choix d'utiliser l'approximation du zéro virtuel ou non, mais si vous faites une des deux approximations que ce principe sous-tend sans faire l'autre, vous courez à la catastrophe!

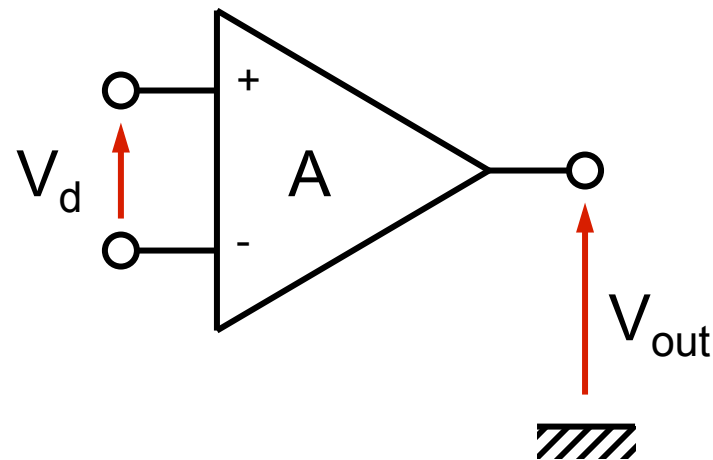
$$V_{out} = A.V_d = 0.\infty \neq 0$$

Synthèse

- ▶ Le principe du zéro virtuel est une propriété des ampli-ops qui s'énonce de la manière suivante:
 - ▶ "tant qu'un ampli-op ne sature pas, sa tension différentielle d'entrée est virtuellement nulle"
- ▶ cette propriété revient à faire simultanément deux approximations: V_d est nulle et A est infini
 - ◆ le "zéro virtuel", c'est l'approximation V_d est nulle
- ▶ ces approximations ne sont valables que si l'ampli-op est dans sa zone linéaire
 - ◆ ce qui n'est pas garanti par le principe du zéro virtuel lui-même

Remarque: ampli-op utilisé seul

- Pour conclure, supposons maintenant que nous utilisions un ampli-op "tel quel" (seul) pour amplifier un signal V_d ...



Remarque: ampli-op utilisé seul

- ▶ En pratique il est très probable que l'ampli-op sature...
 - ◆ non seulement à cause de son gain très élevé
 - il faut que V_d soit vraiment très faible pour que l'ampli-op ne sature pas
 - ◆ mais également à cause du phénomène d'offset (voir + loin)
- ▶ ...et donc que l'amplification ne fonctionne pas
 - ◆ rappel: quand un ampli-op sature, il n'amplifie pas (amplification uniquement en zone linéaire)
- ▶ => conclusion: pour amplifier un signal, un ampli-op est inutilisable tel quel !
 - ◆ N.B.: le montage précédent a néanmoins un intérêt que nous verrons plus tard. L'ampli-op y est utilisé en "comparateur"

▶ => Q: comment utilise-t-on un ampli-op?

▶ R: c'est l'objet du module suivant...

Synthèse générale

- ▶ Dans ce module, nous avons vu...
- ▶ ...la caractéristique d'un ampli-op
 - ◆ son tracé
 - ◆ sa justification
 - ◆ les ordres de grandeur typiques qui s'y rapportent
- ▶ ...le principe du zéro virtuel
 - ◆ son énoncé
 - ◆ son interprétation
 - ◆ sa justification
- ▶ ...qu'un ampli-op utilisé tel quel ne convient pas pour amplifier un signal
 - ◆ et la justification de cette conclusion