

---

# Chap. 7 - Les transistors

## Plan du chapitre

---

- ▶ Plan du chapitre
  - ◆ 7.1 – Le transistor: généralités
  - ◆ 7.2 – Le transistor MOS utilisé en amplification
  - ◆ 7.3 – Le transistor bipolaire utilisé en amplification
  - ◆ 7.4 – Compléments

## 7.1 – Le transistor: généralités

## Généralités

---

- ▶ L'invention du transistor en 1948 a lancé une véritable révolution technologique qui se poursuit aujourd'hui
- ▶ Le transistor est fondamentalement un composant qui peut être utilisé de deux manières différentes
  - ◆ en amplification
    - on a déjà illustré l'importance de la fonction d'amplification
    - relève de l'électronique analogique (première partie du cours)
  - ◆ en commutation
    - base de toute l'électronique numérique (seconde partie du cours)

## Généralités

---

- ▶ Il existe deux "familles" de transistors répondant à des principes de fonctionnement différents
  - ◆ les [transistors bipolaires](#)
    - inventé en 1948
  - ◆ les [transistors à effet de champ](#)
    - dominant aujourd'hui
  
- ▶ Parmi les transistors à effet de champ, il existe de nombreuses variantes
  - ◆ nous expliquerons l'utilisation du transistor sur base du modèle le plus courant aujourd'hui: le [NMOS à enrichissement](#)

## **7.2 – Le transistor MOS utilisé en amplification**

## Plan du chapitre

---

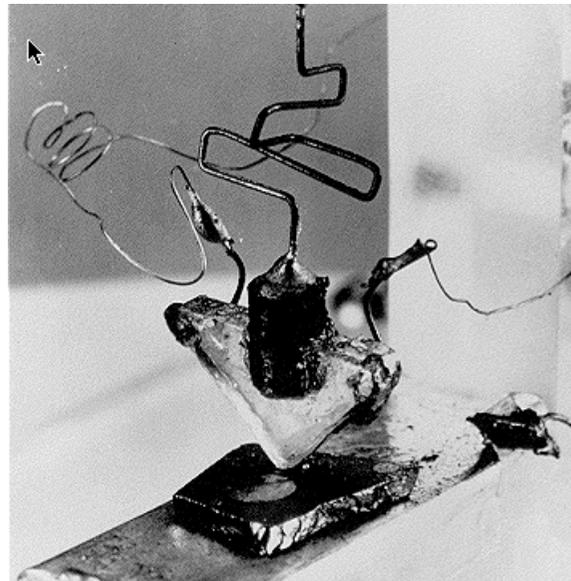
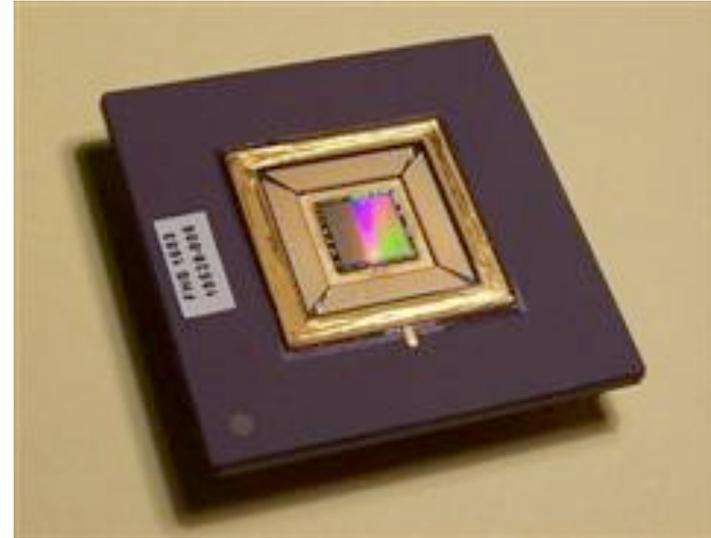
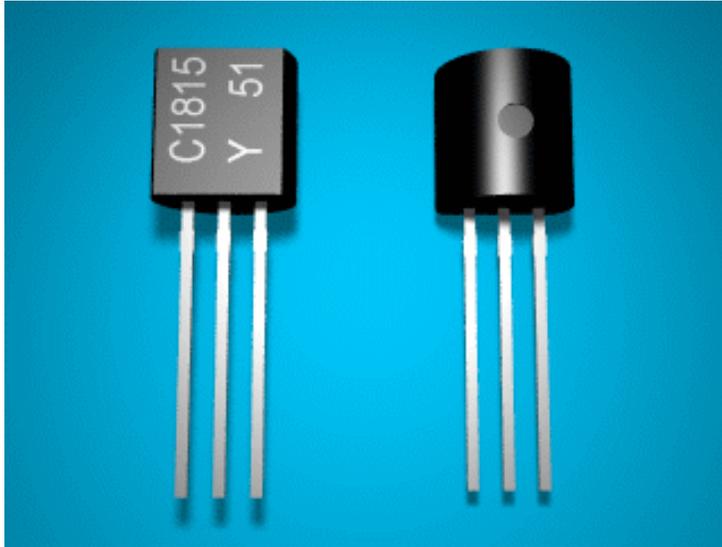
- ▶ Plan du chapitre
  - ◆ 7.2.1 – Transistor MOS: propriétés de base
  - ◆ 7.2.2 – Transistor MOS: structure interne
  - ◆ 7.2.3 – Etage amplificateur à transistor MOS: principe
  - ◆ [7.2.4 – Etage amplificateur à transistor MOS: calcul]
  - ◆ 7.2.5 – Autres types de transistors à effet de champ
  - ◆ 7.2.6 – Précautions d'utilisation des transistors à effet de champ

Chap. 7 – Les transistors  
7.2 - Le transistor MOS en amplification

---

**7.2.1 – Transistor MOS:  
propriétés de base**

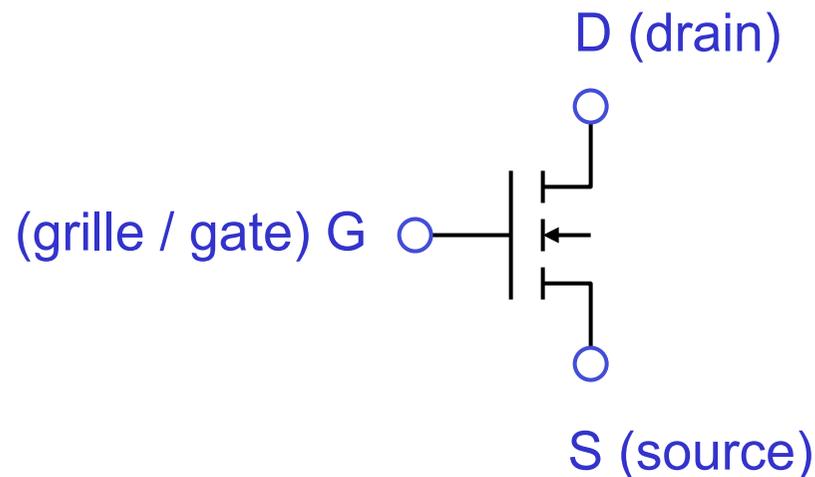
## Introduction



## Introduction

---

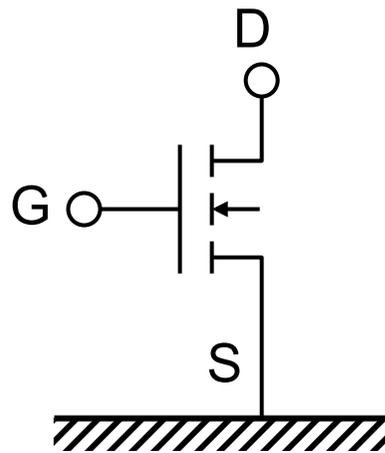
- ▶ Un transistor est un composant à trois bornes
- ▶ Les bornes du NMOS (voir symbole ci-dessous) s'appellent
  - ◆ le drain (D)
  - ◆ la source (S)
  - ◆ la grille (G)
    - gate en anglais



### Introduction

---

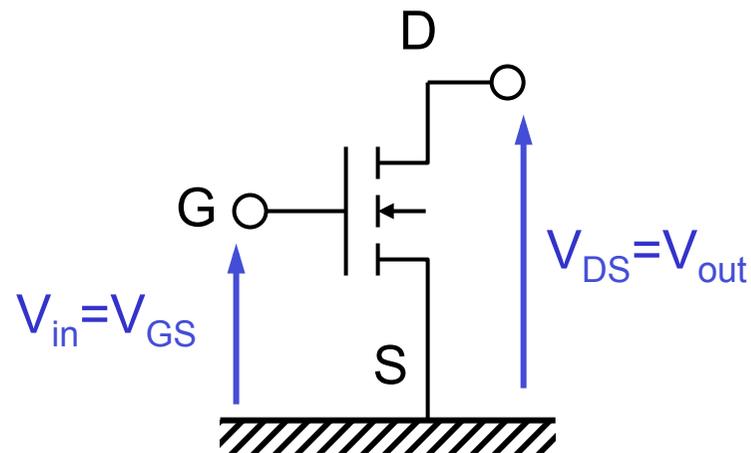
- ▶ Compte tenu de l'existence de ces trois bornes, il existe plusieurs manières d'utiliser ce transistor
- ▶ Dans de nombreux montages, on utilise la source comme référence de tension par rapport à la grille et au drain: on parle alors de source commune
  - ◆ la source est connectée à la masse, servant de référence commune entre l'entrée et la sortie du montage
    - voir aussi slide suivant



## Introduction

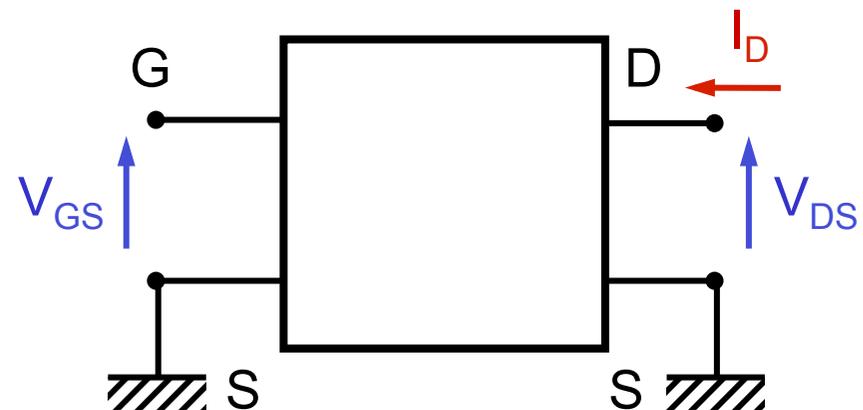
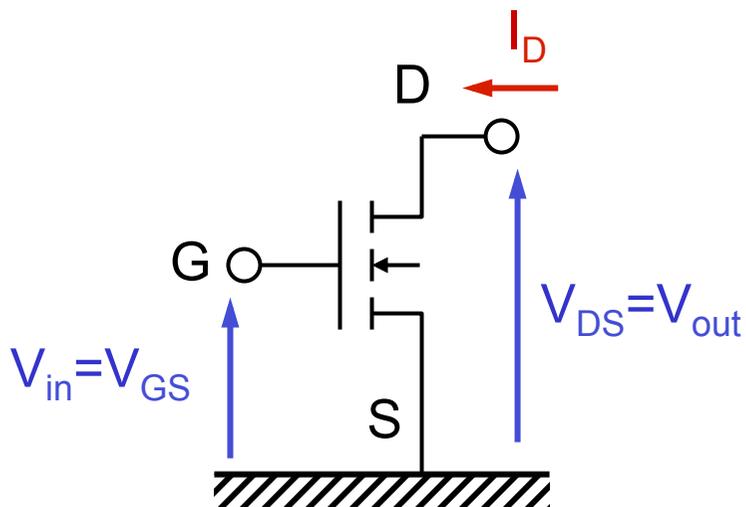
---

- ▶ Dans le montage à source commune...
- ▶ ...on applique au transistor une tension  $V_{GS}$ 
  - ◆ = tension "gate/source"
  - ◆ considérée comme signal d'entrée
- ▶ ...et on recueille une tension  $V_{DS}$ 
  - ◆ = tension "drain/source"
  - ◆ considérée comme signal de sortie



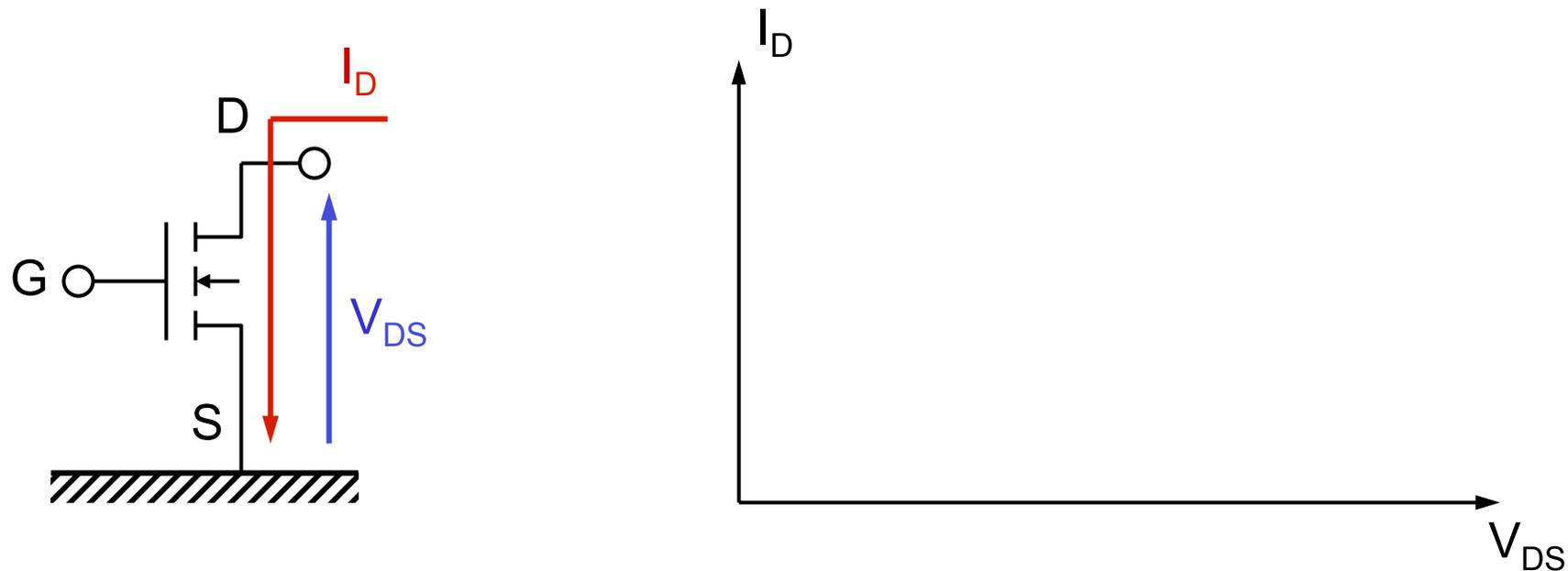
## Introduction

- ▶ Dans cette configuration, on peut assimiler le transistor à un quadripôle
  - ◆ dont une des bornes (source) est commune à l'entrée et à la sortie
- ▶ Quelles sont les propriétés de ce composant/quadripôle?
  - ◆ => caractéristiques
    - caractéristique de transfert ( $I_D, V_{GS}$ )
    - caractéristique de sortie ( $I_D, V_{DS}$ )



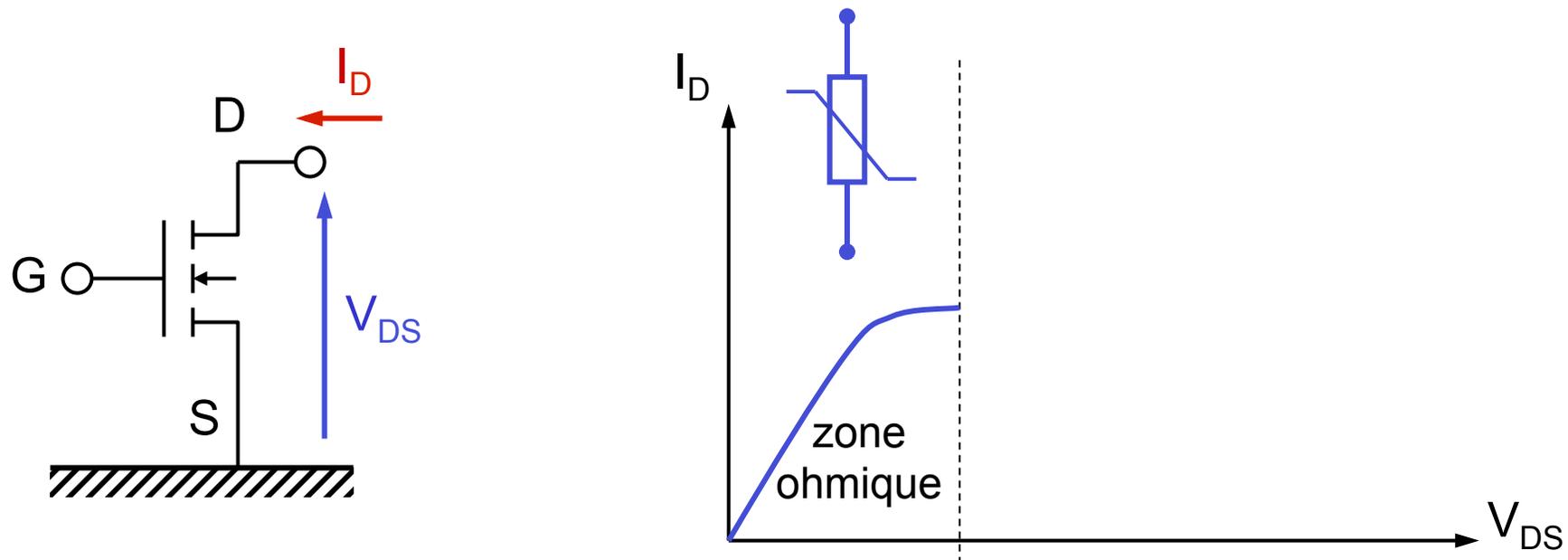
## Caractéristique de sortie

- ▶ Pour comprendre le comportement du NMOS, commençons par analyser sa caractéristique de sortie
  - ◆ courbe décrivant le comportement électrique du transistor dans le plan ( $I_D$ ,  $V_{DS}$ )
    - $I_D$  = courant de drain = courant traversant le transistor du drain vers la source



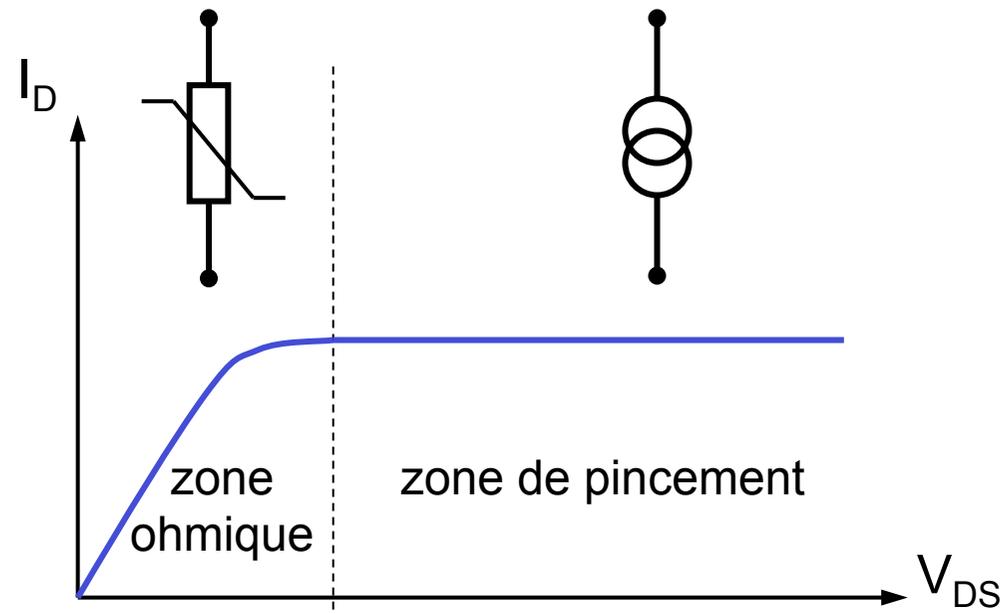
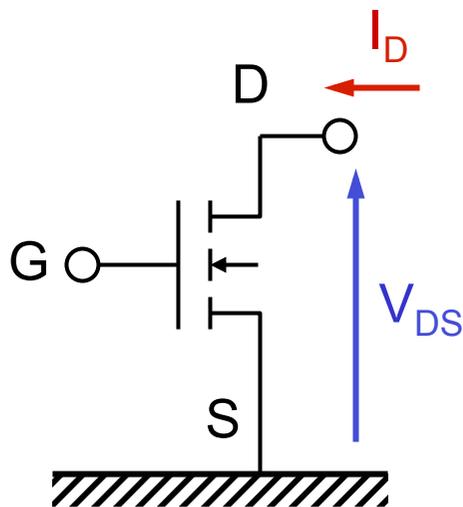
## Caractéristique de sortie

- ▶ La caractéristique de sortie comporte une première zone appelée zone ohmique
  - ◆ faible valeurs de  $V_{DS}$
  - ◆ dans cette zone, le comportement du transistor peut être assimilé à celui d'une résistance non-linéaire
    - résistance car "droite" passant par l'origine ( $V=RI$ )
    - non-linéaire car cette droite s'incurve



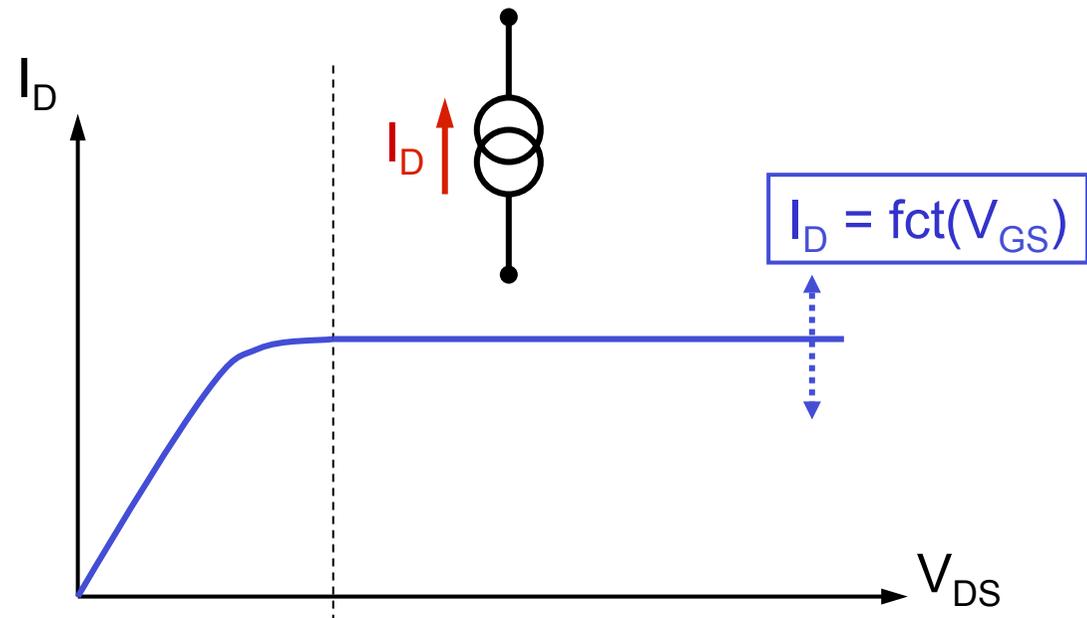
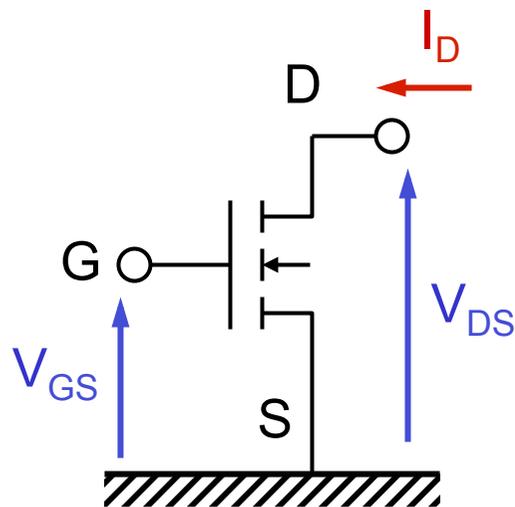
## Caractéristique de sortie

- ▶ Pour des valeurs plus élevées de  $V_{DS}$ , la caractéristique de sortie est horizontale
  - ◆ assimilable à une caractéristique de source de courant
  - ◆ zone la plus intéressante de la caractéristique du transistor
- ▶ => transistor = source de courant
  - ◆ pour autant qu'on lui applique une tension  $V_{DS}$  suffisante



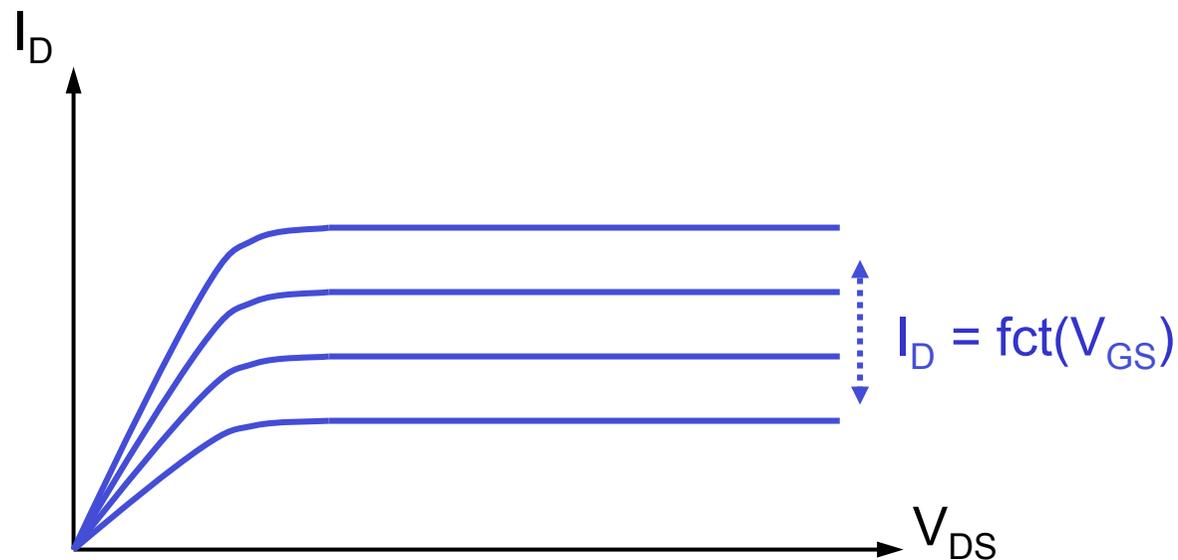
## Caractéristique de sortie

- ▶ La valeur du courant de drain dépend de la tension  $V_{GS}$  appliquée au transistor
  - ◆ dépendance non-linéaire
- ▶ => transistor = source de courant commandée (non-linéairement) en tension



## Caractéristique de sortie

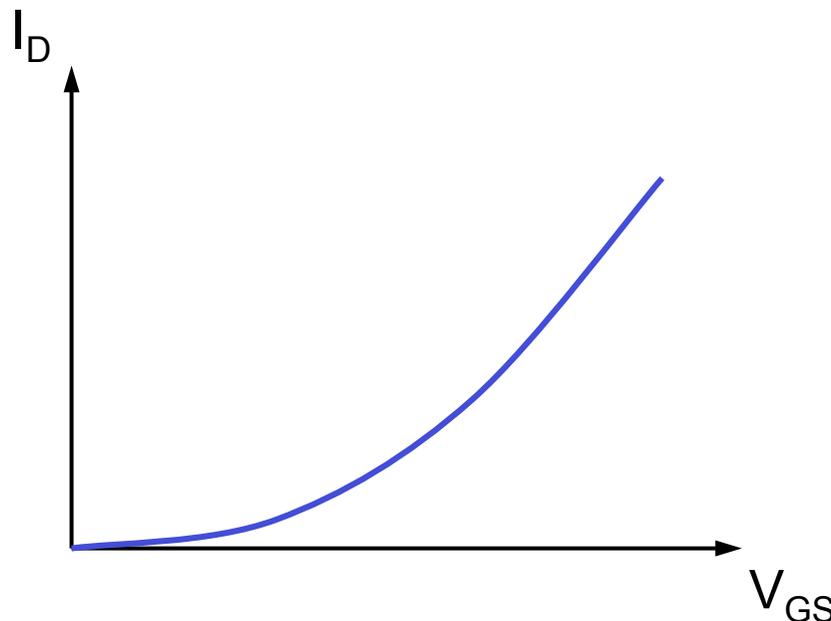
- ▶ Compte tenu de cette dépendance de  $I_D$  en fonction de  $V_{GS}$ , la caractéristique de sortie se représente classiquement sous la forme d'un réseau de courbes
  - ◆ une seule courbe valable à un instant donné!



## Caractéristique de transfert

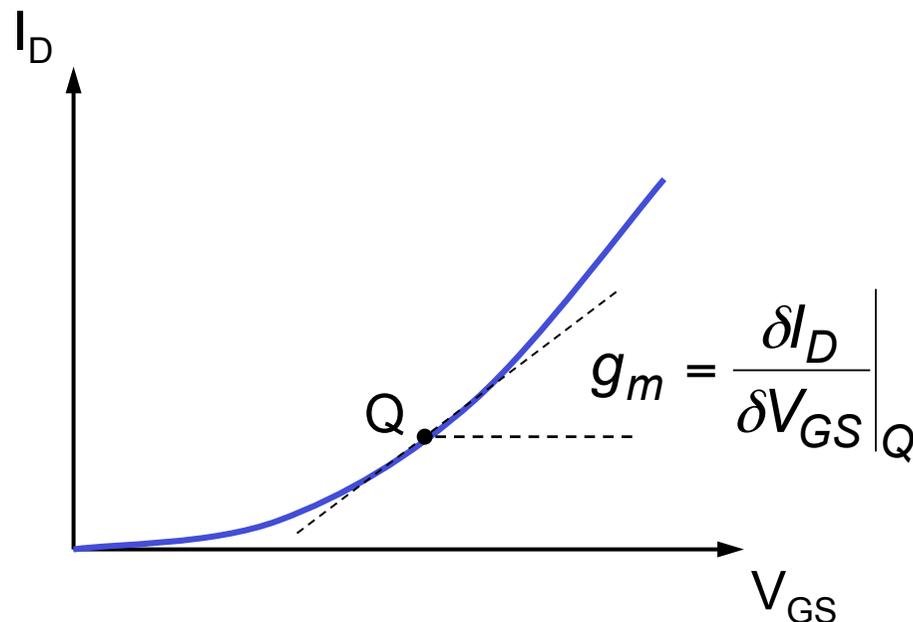
---

- ▶ La représentation graphique de la dépendance entre  $I_D$  et  $V_{GS}$  n'est rien d'autre que la caractéristique de transfert du transistor
  - ◆  $I_D$  = grandeur de sortie (ordonnée)
  - ◆  $V_{GS}$  = grandeur d'entrée (abscisse)
  - ◆ effectivement non linéaire
  - ◆ ici représentée uniquement avec pincement



## Caractéristique de transfert: transconductance

- ▶ La pente de la caractéristique de transfert est appelée transconductance ( $g_m$ )
  - ◆ varie en fonction du point Q considéré
  - ◆ "transconductance"
    - unités d'une conductance ( $[A]/[V] = [\Omega^{-1}]$ )
    - "trans" car entre entrée et sortie du transistor



## Synthèse

- ▶ Transistor NMOS
  - ◆ symbole et bornes
- ▶ Comportement
  - ◆ caractéristique de sortie
    - zone ohmique
    - zone de pincement
  - ◆ caractéristique de transfert
  - ◆ transconductance
- ▶ Interprétation
  - ◆ transistor (pincement) = source de courant ( $I_D$ ) commandée en tension ( $V_{GS}$ )

Chap. 7 – Les transistors  
7.2 - Le transistor MOS en amplification

---

**7.2.2 – Transistor MOS:  
structure interne**

## **7.2.3 – Etage amplificateur à transistor MOS: principe**

## Etage amplificateur

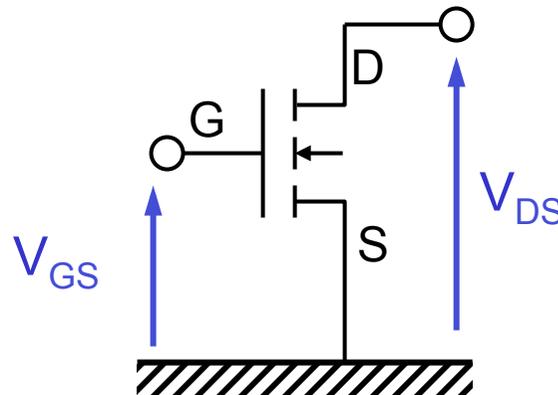
---

- ▶ Intrinsèquement, le transistor NMOS se comporte comme une source de courant commandée en tension

- ▶ Q: Comment en faire une source de tension commandée en tension?

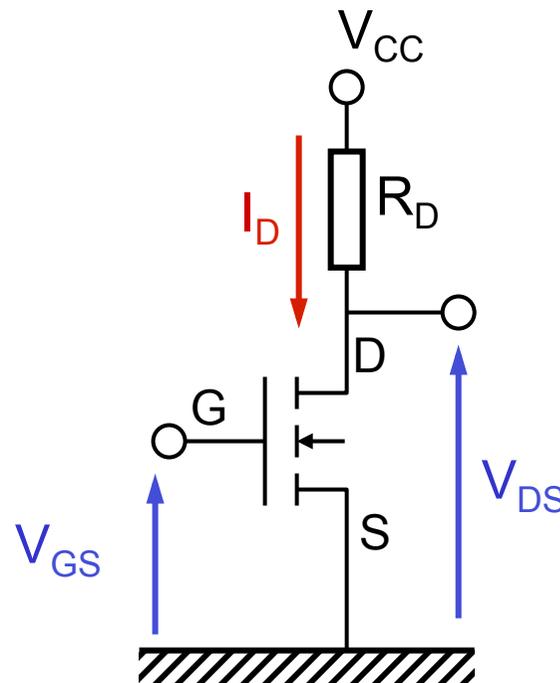
- ◆ amplificateur = gain entre deux tensions

- ▶ R: il "suffit" d'ajouter une résistance



## Etage amplificateur

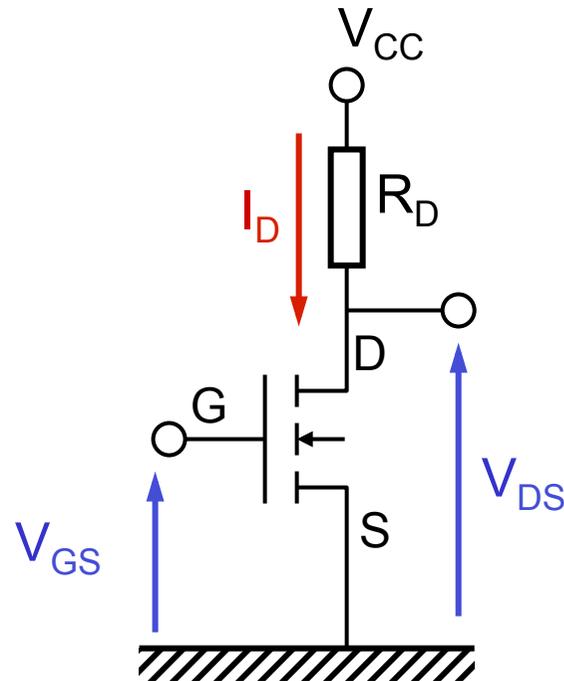
- ▶ Le schéma ci-dessous est celui de l'étage amplificateur à source commune
  - ◆ on ajoute une résistance  $R_D$  entre le drain et une source de tension continue  $V_{CC}$
  - ◆ schéma de base pour amplifier au moyen d'un transistor



## Etage amplificateur: remarques

---

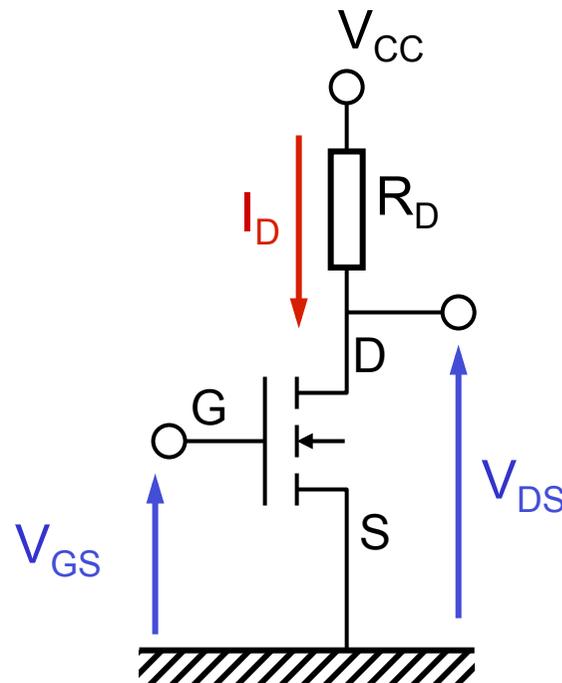
- ▶ 1) la source de tension externe  $V_{CC}$  joue le rôle de réserve d'énergie
  - ◆ énergie qui va être "dosée" par le transistor
  - ◆ => le transistor est un composant actif
    - doit être alimenté
    - contrôle d'un signal d'énergie élevée par un signal plus faible



## Etage amplificateur: remarques

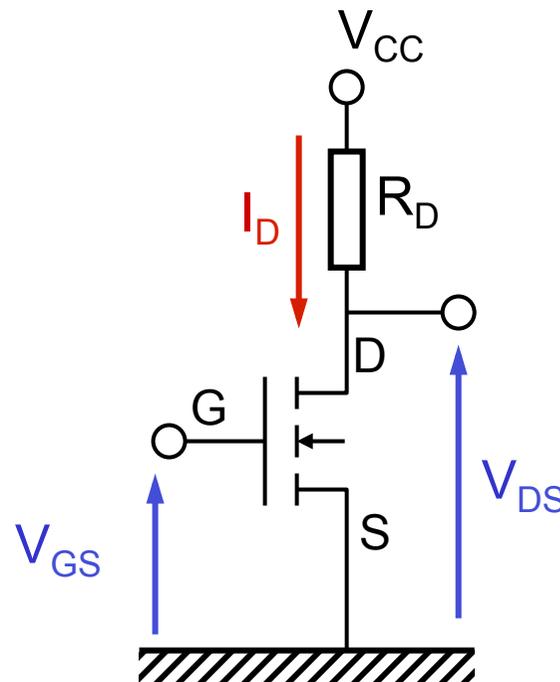
---

- ▶ 2) on suppose pour l'instant que le montage est à vide
  - ◆ pas de charge
  - ◆ => le courant traversant la résistance est le même que celui traversant le transistor entre drain et source ( $I_D$ )



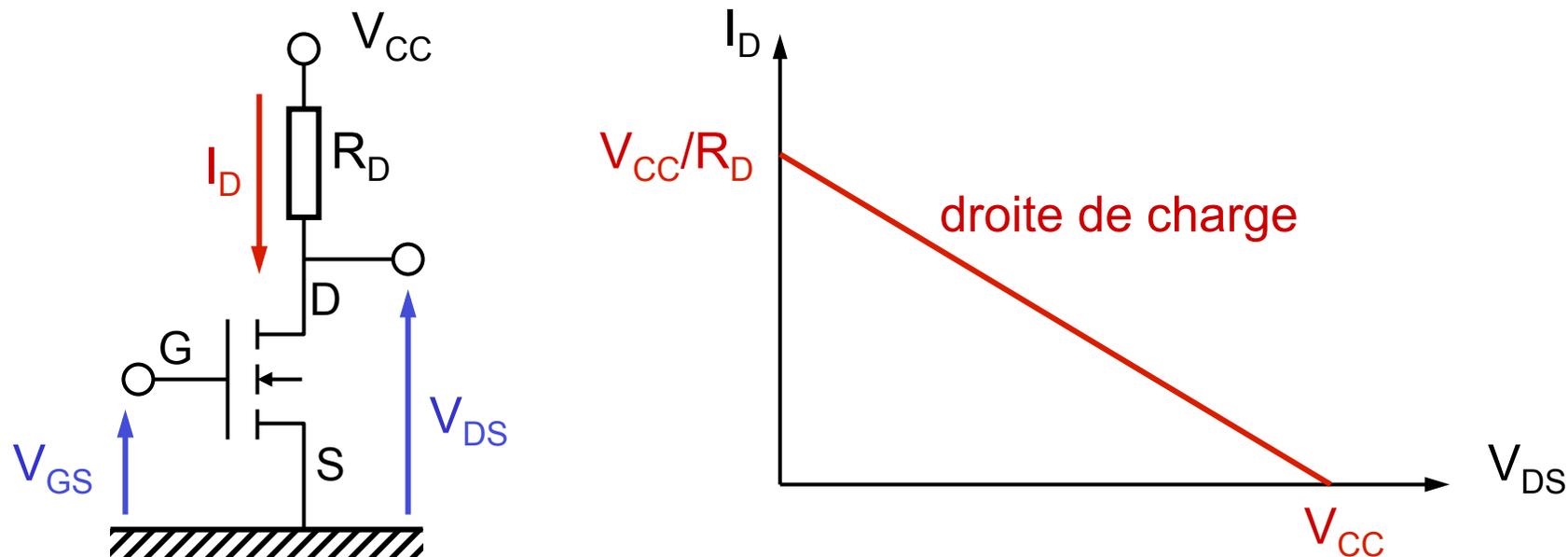
## Etage amplificateur: résolution graphique

- ▶ Q: Comment fonctionne cet étage à transistor?
  - ◆ Que vaut  $V_{DS}$ ?
  
- ▶ R: deux démarches complémentaires
  - ◆ résolution graphique (caractéristiques)
  - ◆ résolution analytique
    - difficile car transistor non linéaire



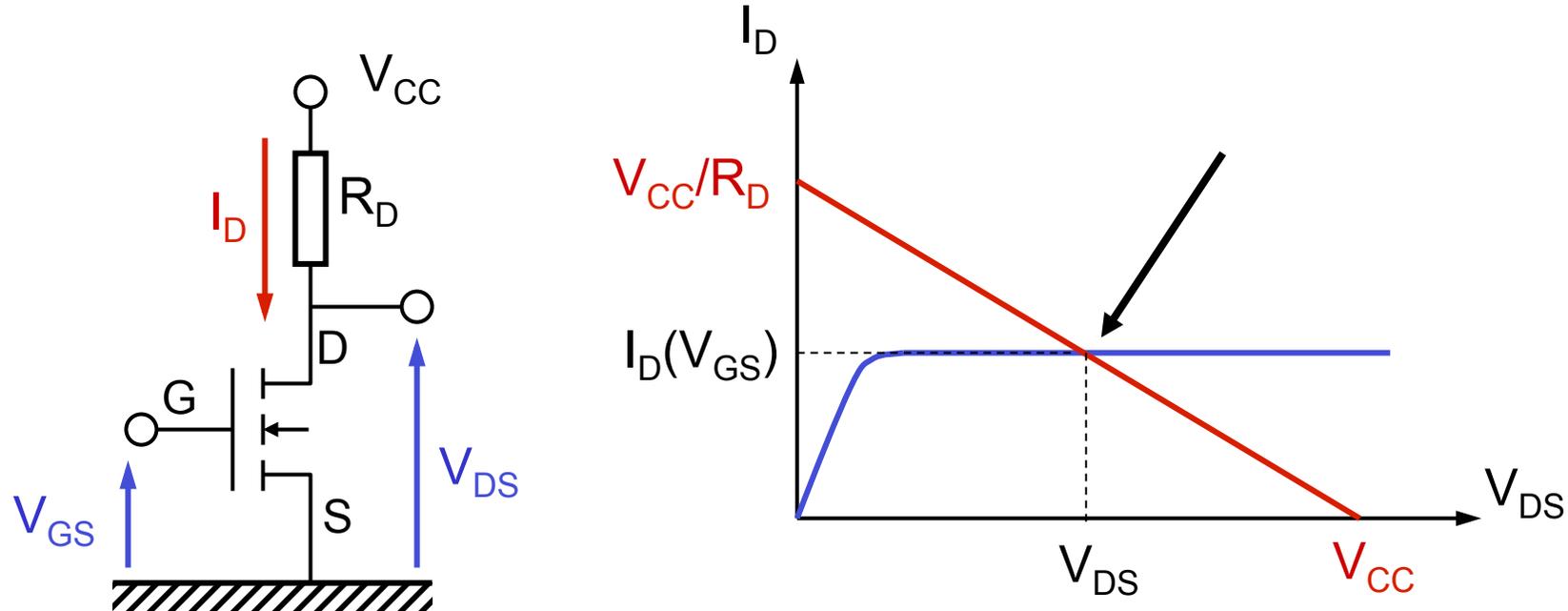
## Etage amplificateur: résolution graphique

- ▶ La résistance impose une contrainte
  - ◆ la ddp à ses bornes vaut  $V=R_D \cdot I_D$
- ▶ On peut donc écrire:  $V_{DS}=V_{CC}-R_D \cdot I_D$ 
  - ◆ exprime simplement la chute de tension sur  $R_D$
- ▶ Cette dernière relation se traduit graphiquement par la droite ci-dessous, appelée droite de charge



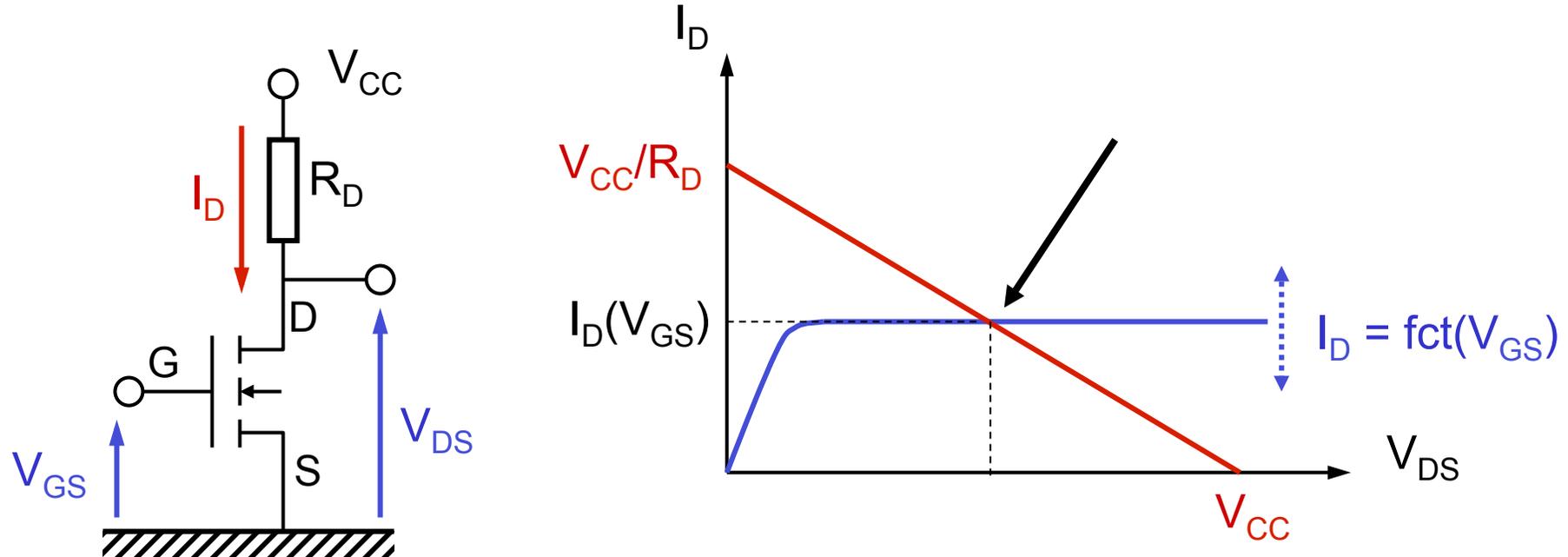
## Etage amplificateur: résolution graphique

- ▶ Graphiquement, la valeur de  $V_{DS}$  s'obtient par l'intersection des deux caractéristiques ci-dessous
  - ◆ la caractéristique de sortie du transistor
  - ◆ la droite de charge



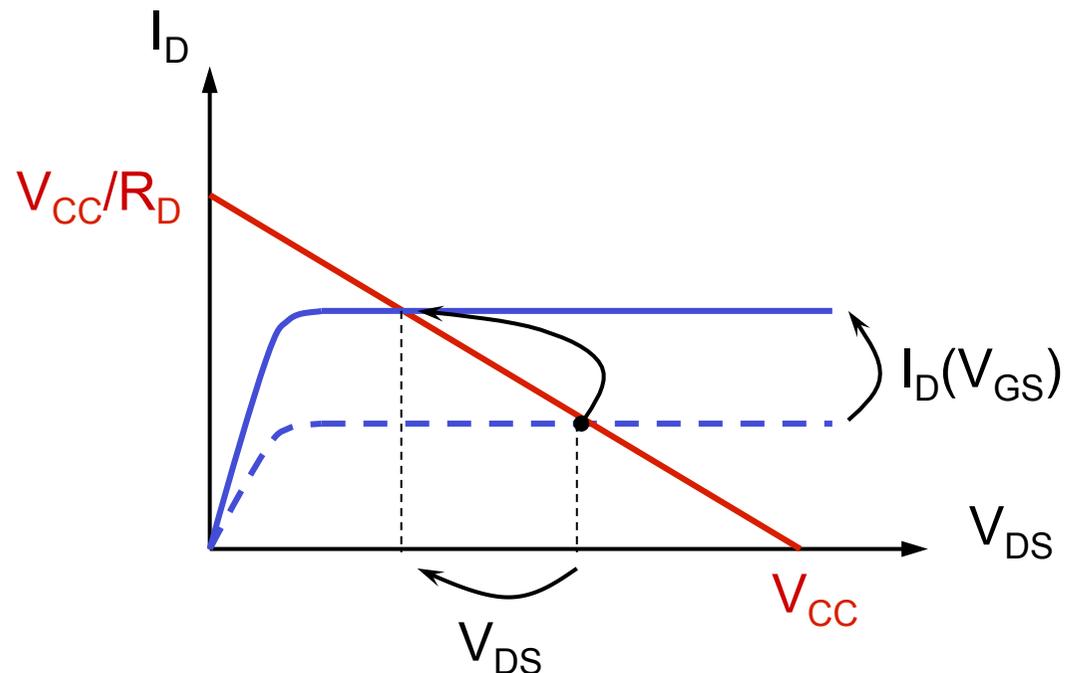
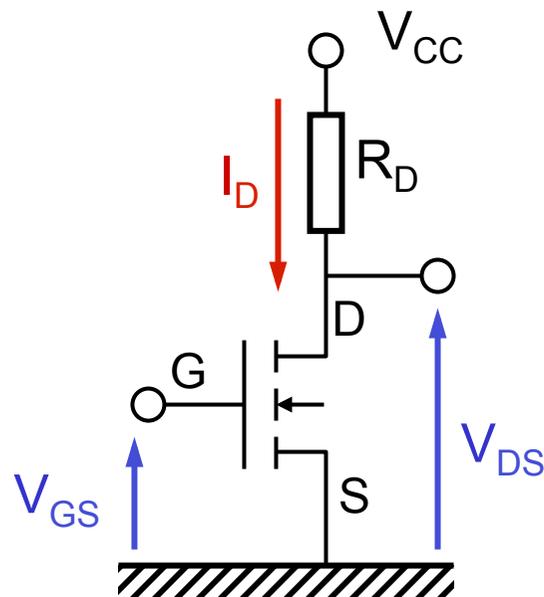
## Etage amplificateur: résolution graphique

- ▶ Particularité: la position de la caractéristique de sortie dépend de la valeur de la tension de grille  $V_{GS}$ 
  - ◆ l'intersection n'est donc pas fixe: elle dépend de la tension d'entrée du montage



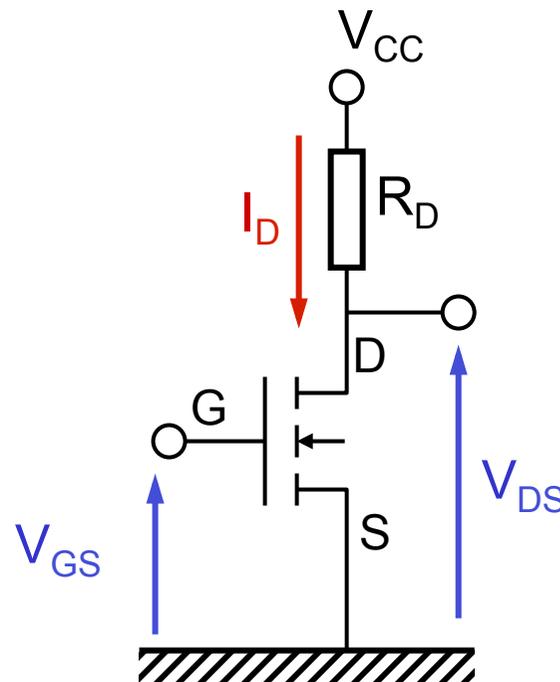
## Etage amplificateur: interprétation

- ▶ **Fonctionnement de l'étage à transistor:**
  - ◆ quand on augmente  $V_{GS}$ ...
  - ◆ ...le transistor consomme davantage de courant  $I_D$ 
    - la caractéristique de sortie du transistor "monte" dans le graphe
  - ◆ => la chute de tension sur  $R_D$  augmente
  - ◆ =>  $V_{DS}$  diminue
  
- ▶ **et inversement**



## Etage amplificateur: difficultés

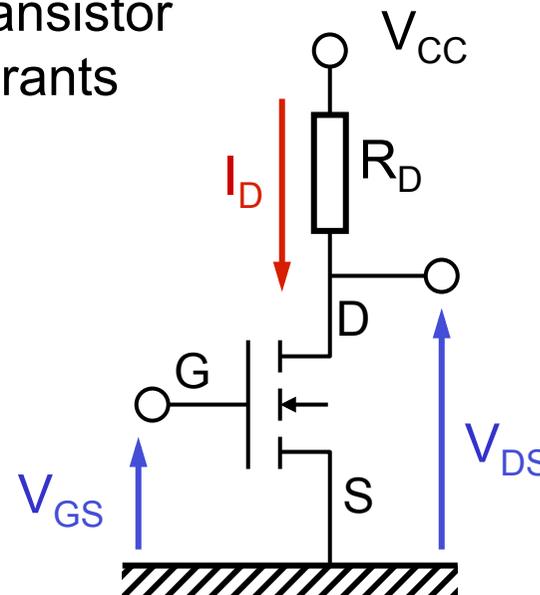
- ▶ Q: A-t-on réalisé une amplification?
  - ◆ Que vaut  $V_{DS}$  par rapport à  $V_{GS}$ ?
- ▶ R: pas vraiment



## Etage amplificateur: difficultés

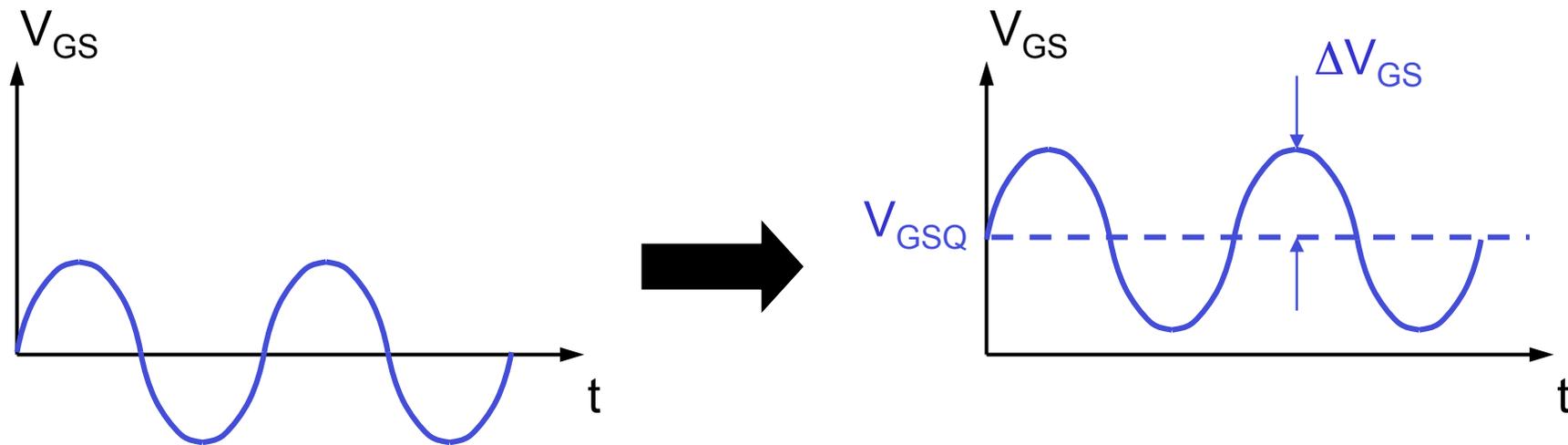
---

- ▶ Trois difficultés...
- ▶ 1) le gain en tension est négatif
  - ◆ quand  $V_{GS}$  augmente,  $V_{DS}$  diminue
- ▶ 2) l'amplification est non-linéaire
  - ◆ dû à la caractéristique de transfert du transistor
- ▶ 3) pas d'amplification si  $V_{GS} < 0$ 
  - ◆ dû à la structure interne du transistor
  - ◆ or signaux alternatifs très courants



## Polarisation

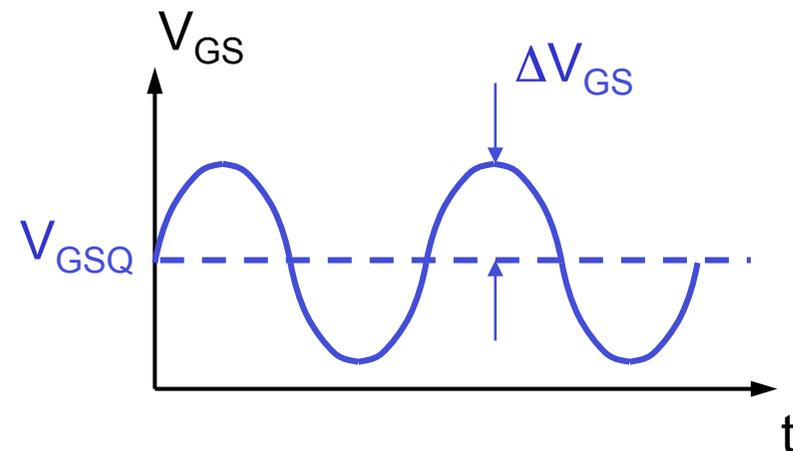
- ▶ Problème n°3: pas d'amplification si  $V_{GS} < 0$ 
  - ◆ => on ne peut pas appliquer directement un signal alternatif à l'entrée de l'étage
- ▶ Solution: il suffit de décaler  $V_{GS}$  pour que toutes les valeurs soient positives



## Polarisation

---

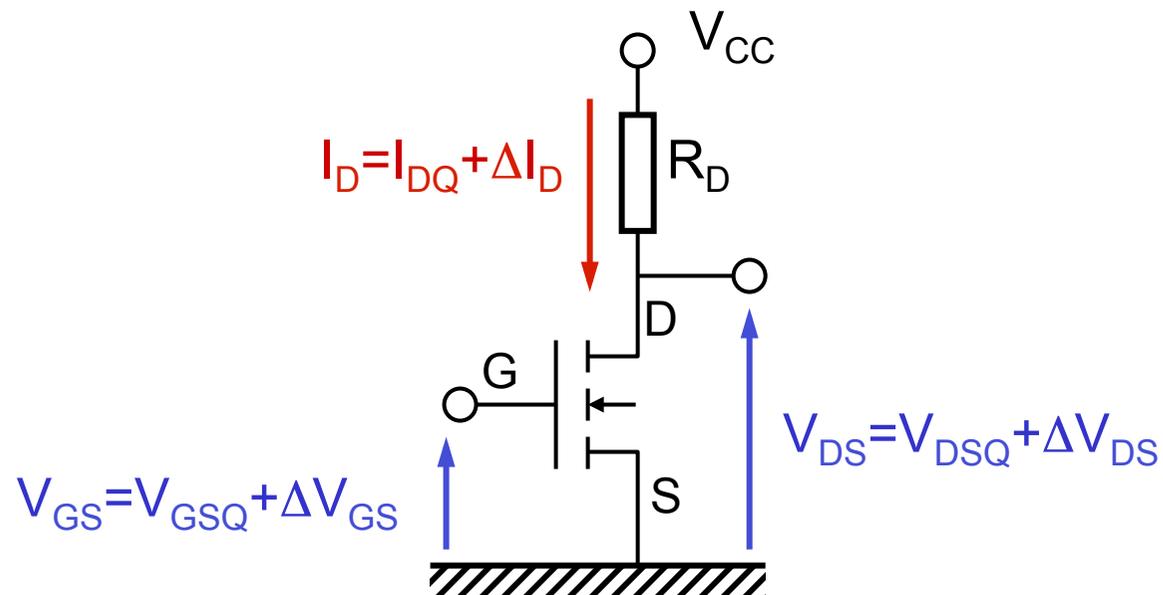
- ▶ Le signal d'entrée comporte alors deux composantes
  - ◆ une composante  $V_{GSQ}$ 
    - tension continue = moyenne du signal  $V_{GS}$
  - ◆ une composante alternative  $\Delta V_{GS}$ 
    - portant l'information utile



## Polarisation

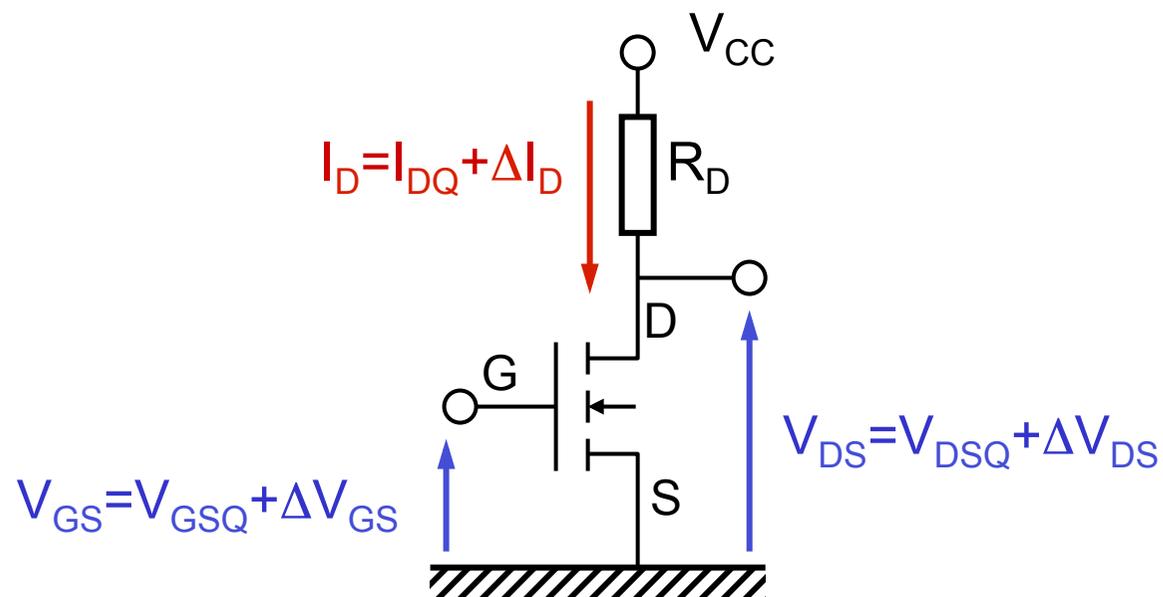
---

- ▶ L'existence de deux composantes s'étend aux autres grandeurs électriques:  $I_D$  et  $V_{DS}$



## Polarisation

- ▶ La composante continue de ces signaux (indice Q) est appelée polarisation
  - ◆ elle ne porte aucune information utile
  - ◆ la polarisation sert à placer le transistor dans des conditions électriques données
  - ◆ le point de polarisation est le point correspondant aux valeurs moyennes des signaux électriques



## Petits signaux

---

- ▶ Problème n°2: l'amplification est non-linéaire
  - ◆ or une non-linéarité déforme (modification du contenu fréquentiel) et donc dégrade le signal
    - ex audio: distorsion
  
- ▶ Solution: linéariser le système en travaillant avec des signaux très faibles
  - ◆ variations suffisamment faibles pour pouvoir assimiler la courbe à sa tangente
  - ◆ concerne uniquement le signal utile (les variations) autour de la caractéristique non-linéaire
    - non-linéarité = caractéristique de transfert
  
- ▶ => le signal  $\Delta V_{GS}$  doit être très faible
  - ◆ ordre de grandeur: qqes mV
  - ◆ par opposition à la polarisation (composante continue), les composantes alternatives sont désignées par le terme de "petits signaux"

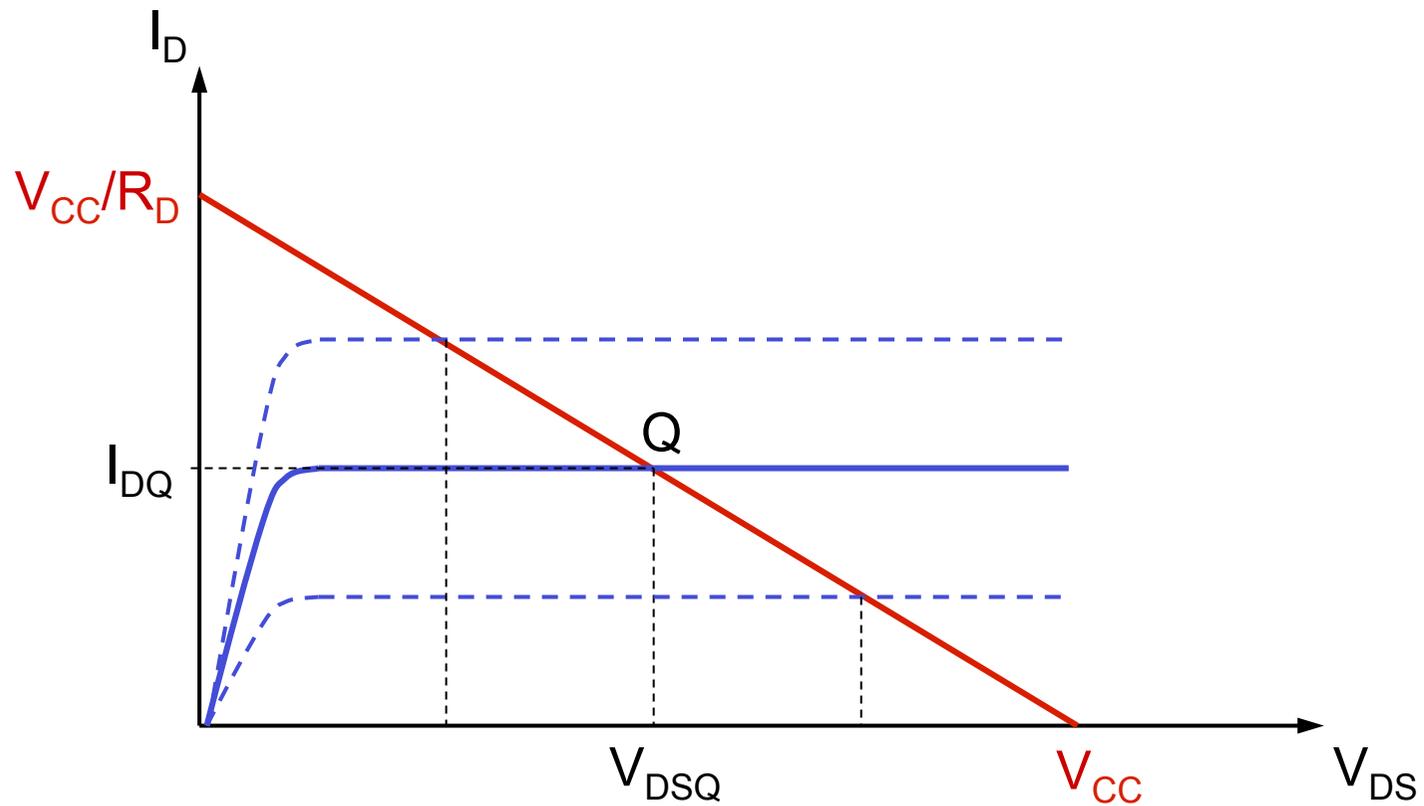
## Petits signaux

---

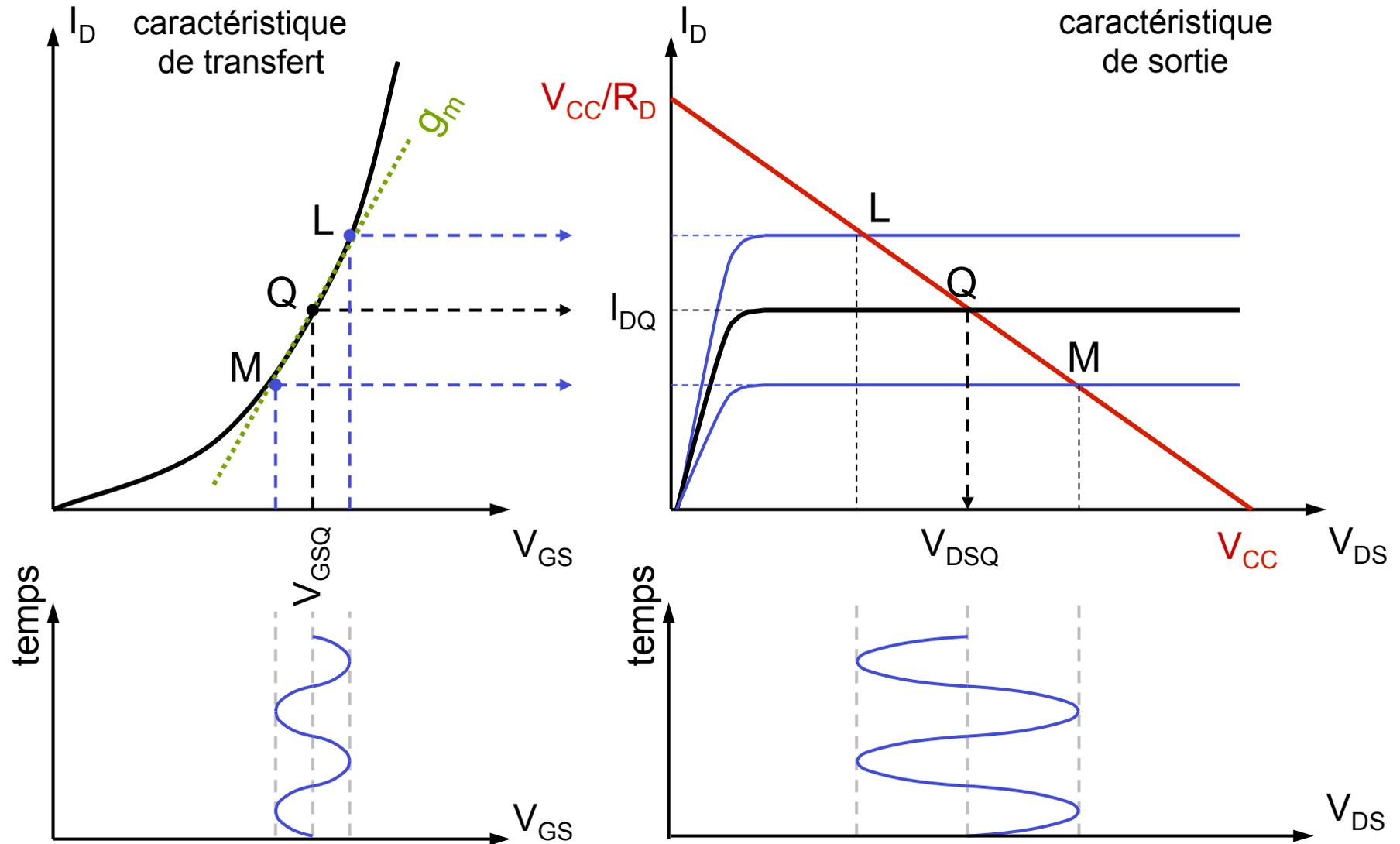
- ▶ Problème n°1: le gain est négatif
- ▶ Solution
  - ◆ 1) pas forcément gênant
  - ◆ 2) si gênant: ajouter un second étage amplificateur pour réinverser le signal

## Etage amplificateur: interprétation

---



## Etage amplificateur: interprétation



## Synthèse

- ▶ Pour amplifier au moyen d'un transistor MOS, il suffit d'ajouter une source de tension continue externe et une résistance au transistor
  - ◆ étage à source commune
  - ◆ principe de fonctionnement et caractéristiques
    - droite de charge
  
- ▶ Le montage obtenu ne permet pas d'amplifier directement une tension alternative
  - ◆ les alternances négatives ne sont pas amplifiées
  - ◆ le signal est déformé (non-linéarité de la caractéristique de transfert)
  
- ▶ La solution consiste à utiliser simultanément
  - ◆ 1) la polarisation (ajout d'une composante continue à l'info utile)
  - ◆ 2) les petits signaux (signaux alternatifs très faibles)