

## Chapitre 1 : Le transistor à effet de champ JFET

### 1. Introduction

Un transistor à effet de champ à jonction, TEC en français et se nomme JFET en anglais (Junction Field Effect Transistor). Contrairement aux transistors bipolaires dont le fonctionnement repose sur deux types de porteurs les trous et les électrons, les transistors unipolaires fonctionnent avec un seul type de charges, les trous ou les électrons. Ils possèdent trois électrodes : la source (S), le drain (D) et une électrode de commande appelée grille(G).

### 2. Partie I : Transistor J-FET

Sur un substrat de type P (Grille) fortement dopé ( $P^+$ ) sont déposées : Une zone N faiblement dopée qui constitue le canal, deux zones N fortement dopées ( $N^+$ ) qui constituent des bornes d'entrée (Source) et de sortie du canal (Drain). Si on inverse le dopage on obtient un transistor à effet de champ à canal P.

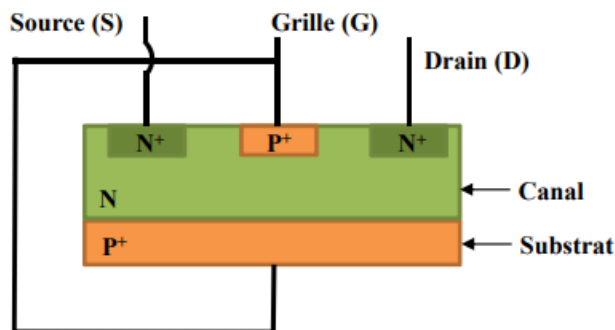


Figure 1 : Structure de base du transistor JFET à canal N

Le transistor JFET est composé de trois électrodes :

- 1) Une électrode qui injecte les porteurs dans la structure : la source (Source).
- 2) Une électrode qui recueille les porteurs : le drain (Drain).
- 3) Une électrode où est appliquée la tension de commande : la grille (Gate).

## 2.1. Symbole

La figure suivante illustre la structure de base d'un transistor JFET.

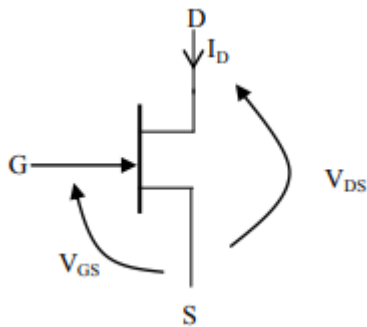
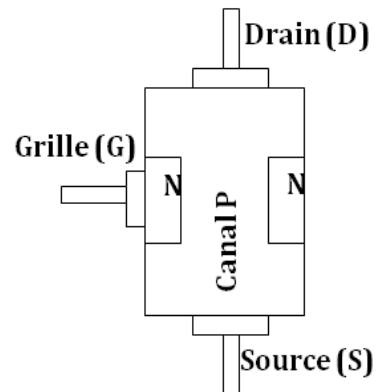
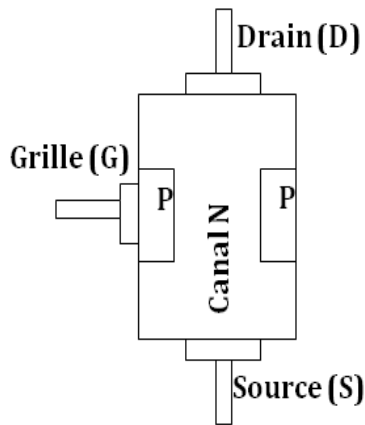


Figure 2 : FET à canal N

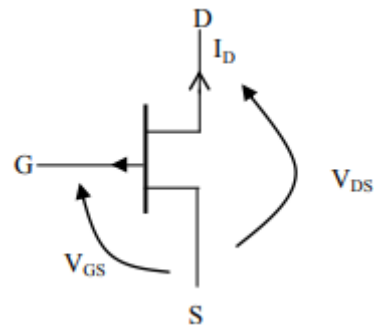


Figure 3 : FET à canal P

- ✓ Si on mis un FET sous une tension  $V_{GS}$ , on vient agrandir ou rétrécir le canal permettant la circulation des électrons entre le drain et la source.
- ✓ On parle de canal N lorsque le dopage de ce canal est de type N, et de canal P dans le cas inverse.
- ✓ Selon le type de canal, le signe de  $V_{GS}$  permet de modifier sa taille.

## 2.2. Tensions et courants

Le transistor JFET possédant trois bornes, il faut définir trois courants et trois tensions :

Pour un JFET à canal N en fonctionnement normal :

- 1) La tension  $V_{DS}$  est positive
- 2) La tension  $V_{GS}$  est négative ou faiblement positive ( $< 0,6 \text{ V}$ )
- 3) Le courant de grille est quasiment nul  $I_G = 0$ . Loi des nœuds :  $I_S = I_D$

- 4) Le courant entre dans le transistor par le drain ( $I_D$ )
- 5) Le courant sort du transistor par la source ( $I_S$ )

### 2.3. Fonctionnement

La commande du transistor à effet de champ à canal N se fait par l'application d'une tension Grille Source  $V_{GS}$  :

- $V_{GS}$  négative dans le cas d'un type N, et le drain soit polarisé positivement par rapport à la source.  $V_{GS}$  positive dans le cas d'un type P.
- L'espace drain-source reçoit une tension de polarisation (tension  $V_{DS}$ )

Le JFET conduit si  $V_{GS} \geq V_P$ ,  $V_P$  est la tension de pincement (canal fermé,  $I_D=0$ ), c'est une tension inverse négative.

## 3. Les caractéristiques du JFET à canal N

Dans cette section on va traiter les caractéristiques d'un transistor JFET :

### 3.1. Caractéristique de sortie $I_D=f(V_{DS})$ à $V_{GS}$ constant

Lorsqu'on fixe par exemple  $V_{GS}=0$ , le canal N se comporte comme une résistance  $R_D$  et on constate que le courant drain  $I_D$  augmente avec la tension drain source  $V_{DS}$  de façon pratiquement linéaire jusqu'à une valeur égale à  $V_P$  (tension de pincement).

A partir de cette tension (tension de pincement) le courant  $I_D$  ne varie plus et garde une valeur pratiquement constante égale à  $I_{DSS}$  (courant max pour un JFET). Dans ce cas on dit que la plage de saturation est atteinte.

Remarque : Il faut remarquer que la tension  $V_{DS}$  ne peut augmenter indéfiniment sans risque de détruire le transistor. On limite donc  $V_{DS}$  à une tension maximale qu'on note  $V_{DS\ max}$ .

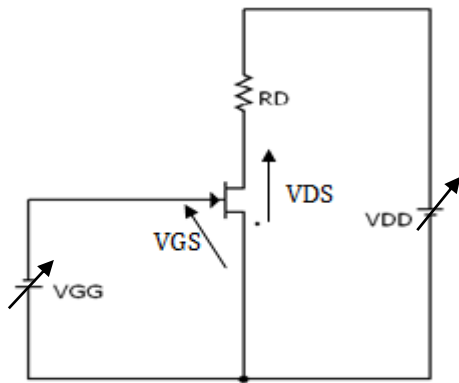


Figure 4 : Montage de polarisation

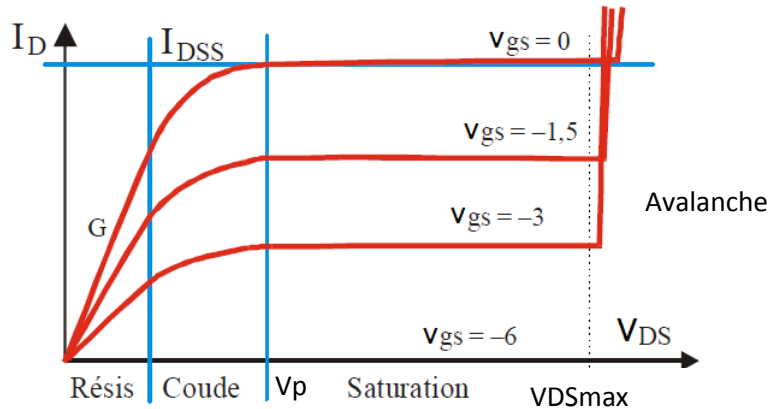


Figure 5 : Caractéristique de sortie d'un JFET

- La région active du JFET se situe entre les tensions  $V_P$  et  $V_{DSmax}$ .
- $V_P$  : tension de pincement (canal fermé  $I_D=0$  pour  $V_{GS}=V_P$ ).  $V_P$  est la valeur de  $V_{DS}$  pour laquelle le courant du drain devient constant est toujours mesuré lorsque  $V_{GS}=0$
- $V_{GSoff}$  et  $V_P$  sont toujours égales mais de signe contraires
- $I_{DSS}$  représente le courant entre le drain et la source lorsque la grille est reliée à la source (grille court-circuitée) ; c'est le courant maximal que le JFET peut produire.

La Figure ci-dessus définit les quatre zones de travail d'un JFET :

1. La **zone ohmique** (Ohmic region): Lorsque  $V_{DS}$  est très petite, le JFET fonctionne comme une résistance contrôlée.
2. La **zone de blocage** (Cutoff region): Lorsque la tension  $V_{GS}$  est suffisamment négative, le canal est fermé et le courant  $I_D=0$ . Le JFET est alors similaire à un circuit ouvert.
3. La **zone active ou de saturation** (Active or saturation region):
  - C'est dans cette zone que l'on utilisera le TEC.
  - Le JFET agit comme une source de courant contrôlée par la tension de grille.
4. La **zone de claquage** (breakdown region): La tension  $V_{DS}$  entre le drain et la source est suffisamment élevée pour créer un claquage du canal résistif. Le courant  $I_D$  augmente alors de manière incontrôlée.

### 3.2. Caractéristique de transfert $ID=f(VGS)$ à $VDS$ constant

L'évolution du courant drain  $ID$  en fonction de  $VGS$  avec  $VDS = Cste$  est représentée par la figure 6.

L'équation de définition de cette courbe est donnée par :

$$ID = IDSS \left[ 1 - \frac{VGS}{VGSoff} \right]^2$$

$IDSS$  : courant drain source pour  $VGS=0$ .

$$VGSoff = -Vp$$

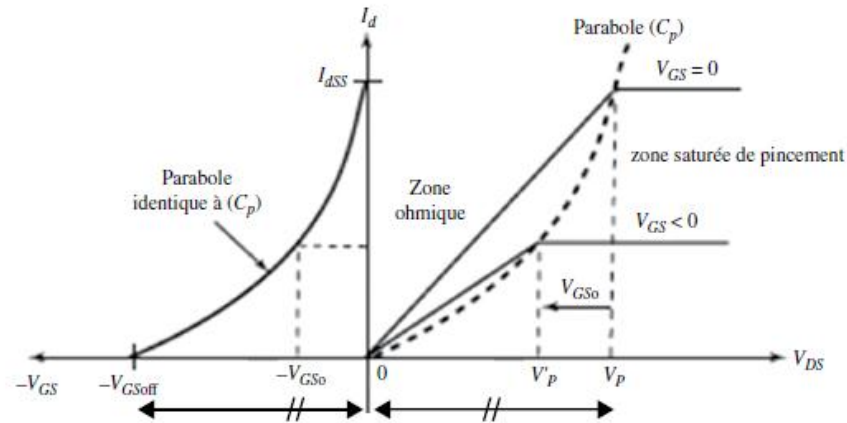


Figure 6 : Caractéristique de transfert  $ID = f(VGS)$

A partir de la courbe  $ID = f(VGS)$ , on définit ce que l'on appelle la pente ou la transconductance  $gm$  (AC) d'un transistor à effet de champ.

$$gm = \frac{\Delta ID}{\Delta VGS} = \frac{dID}{dVGS}$$

$$gm = gm0 \left( 1 - \frac{VGS}{VGSoff} \right) \text{ avec}$$

$$gm0 = -2IDSS / VGSoff$$

$gm0$  : Transconductance à  $VGS=0$

## 4. Etude statique d'un transistor JFET

### 4.1. Droite de charge statique et point de repos

- 1) La droite de charge statique s'exprime par :  $I_D = f(V_{DS})$ .
- 2) Le point de fonctionnement définit par le point d'intersection entre la droite de charge statique et la caractéristique.
- 3) Le point de fonctionnement (repos) est fixé par une ordonnée  $I_{DQ}$ , et une abscisse  $V_{DSQ}$ .

### 4.2. Circuits de polarisation d'un transistor JFET

De la même façon que pour le transistor bipolaire il nous faut choisir un point de fonctionnement avant de définir les paramètres petits signaux car ceux-ci seront fonction de ce point de fonctionnement. Pour cela, il faut polariser le transistor.

#### 4.2.1. Polarisation automatique

Dans le cas de la polarisation automatique, une seule source est appliquée ( $V_{DD}$ ) comme le montre la figure ci-dessous :

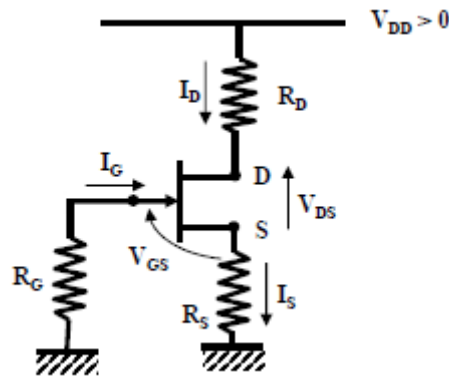


Figure 7 : Polarisation automatique d'un JFET

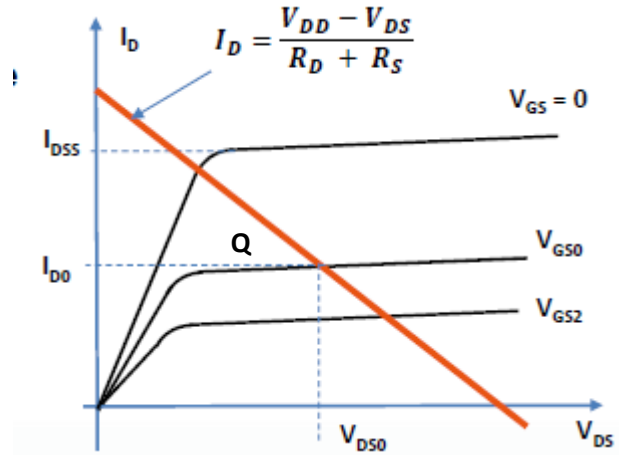
Travail demandé : écrire l'équation de la droite de charge.

➤ Equation de la droite de charge :

$$V_{DD} - V_{DS} = R_D I_D - R_S I_D$$

$$I_S = I_D \Rightarrow I_D = (V_{DD} - V_{DS}) / (R_S + R_D)$$

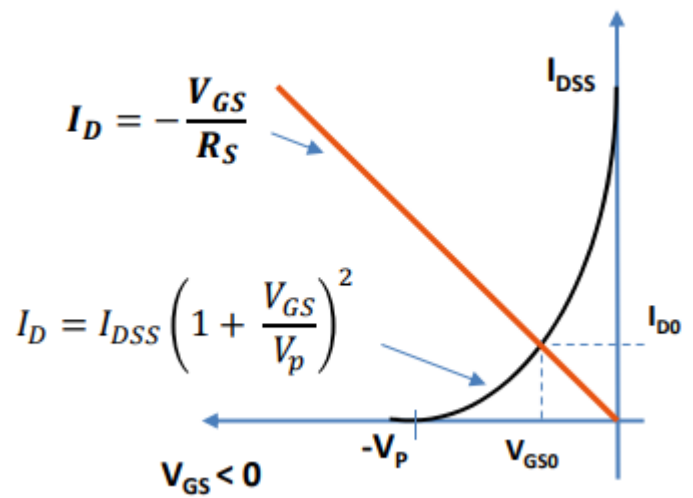
Le point de fonctionnement est décrit par le point Q, et schématisé sur le graphe.



➤ Equation de la droite d'attaque :

$$V_{GS} = -R_{G1} I_G - R_S I_S \quad (I_G \approx 0) \Rightarrow$$

$$I_D = -V_{GS} / R_S$$



#### 4.2.2. Polarisation par deux générateurs indépendants

Dans ce type de polarisation deux générateurs de tension sont appliqués ; l'un au niveau de la grille et l'autre au niveau de la borne Drain.

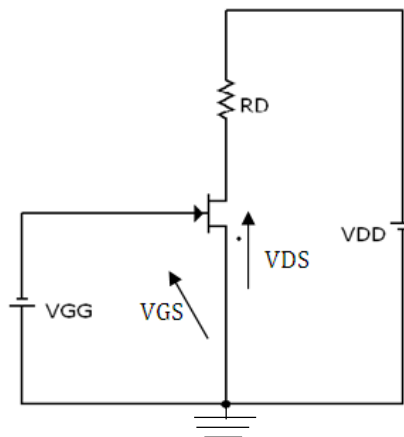


Figure 8 : Polarisation d'un JFET par deux générateurs indépendants

La droite de charge peut s'écrire comme suit :

$$ID = (VDD - VDS)/RD$$

#### 4.2.3. Polarisation avec une seule source de tension

Dans ce type de polarisation une seule source est appliquée au niveau de la grille et du drain.

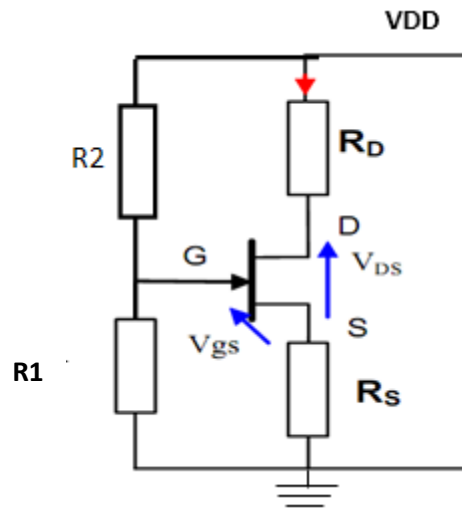


Figure 9 : Polarisation d'un JFET

La droite de charge peut s'écrire comme suit :  $ID = (VDD - VDS)/(RD + RS)$

### 5. Schéma équivalent d'un JFET petit signaux en basse fréquence

Le schéma équivalent du JFET en régime de petits signaux et en basse fréquence est donné sur la figure suivante :

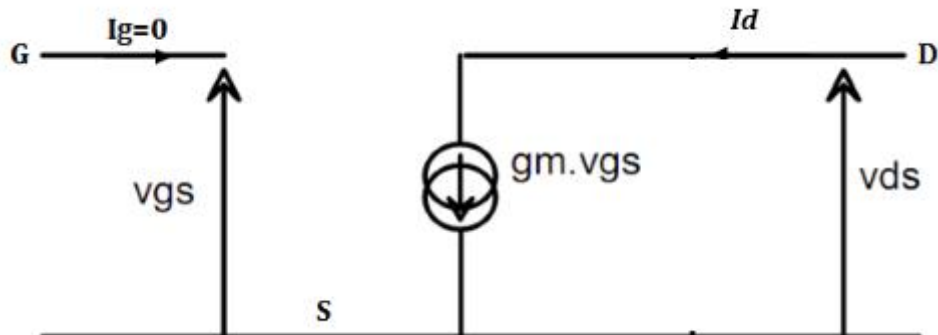


Figure 10 : Schéma équivalent basses fréquences d'un JFET

$gm$  : la transconductance du transistor, est la pente de la caractéristique de transfert  $ID (VGS)$ .



L'exploitation du schéma équivalent du transistor permettra de calculer les grandeurs suivantes :

- L'amplification en tension  $A_v = \frac{v_2}{v_1}$
- Impédance d'entrée  $Z_e = \frac{v_1}{i_1}$
- Impédance de sortie  $Z_s = \frac{v_2}{i_2}$

Remarque :

Dans le régime dynamique :

- ✓ Les condensateurs C sont remplacés par des courts circuits à la fréquence du signal.
- ✓ La source de tension continue est remplacée par la mise à la terre.

### 5.3. Amplificateurs à FET à faible signaux

Comme pour le transistor bipolaire, il existe trois montages types pour le TEC. L'étude des performances de ces montages se fait par l'évaluation du gain en tension, et des impédances d'entrée et de sortie.

#### 5.3.1. Amplificateur FET à source commune

Soit à étudier l'amplificateur FET à source commune donnée par la figure ci-dessous :

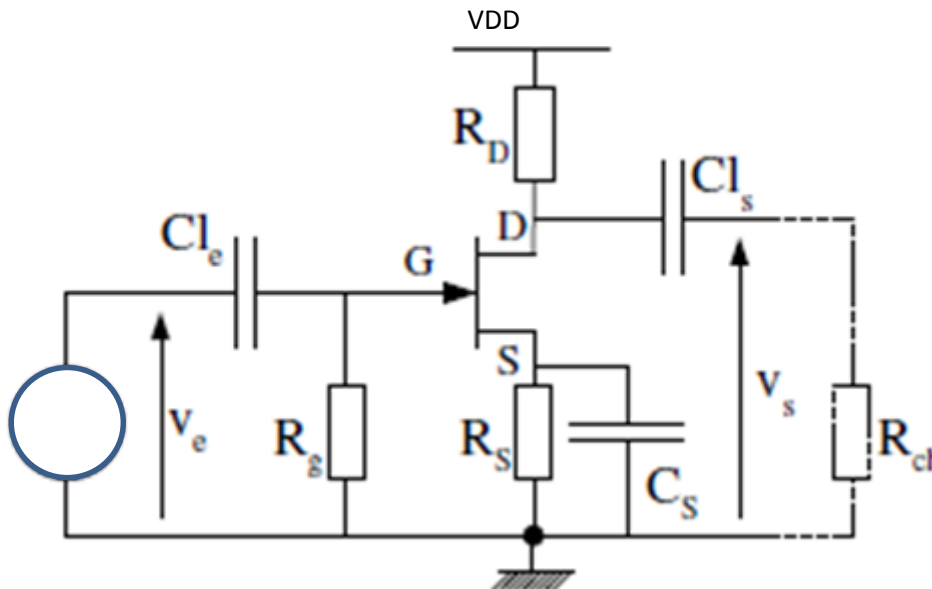
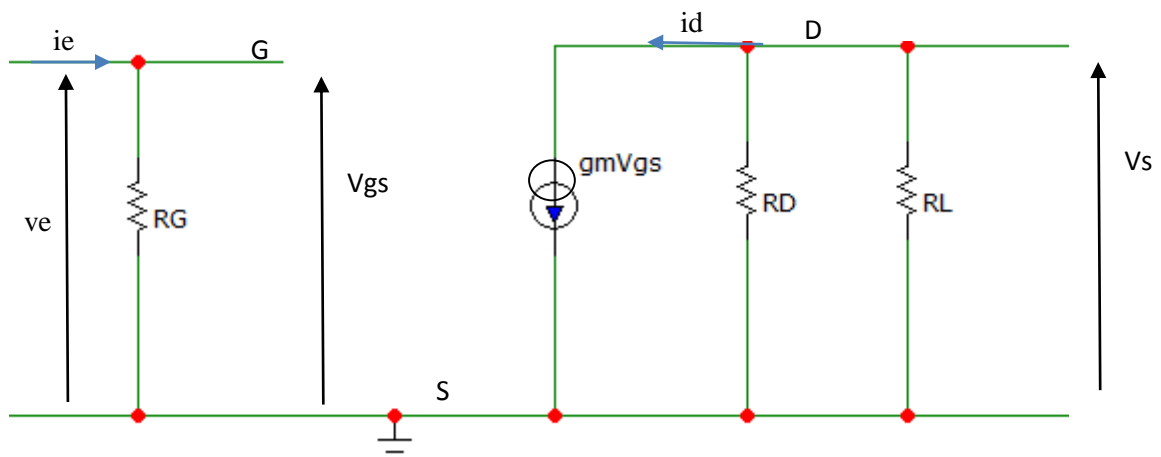


Figure 11 : FET à source commune

**Travail demandé : Calculer  $A_v$ ,  $Z_e$  et  $Z_s$ .**

- 1) Schéma équivalent en dynamique



2) Amplification en tension  $A_v = ?$

On pose :  $R_d = R_D // R_L$

$$i_d = g_m V_{gs} \quad (1)$$

$$v_e = v_{gs} \quad (2)$$

$$v_s = -r_d \cdot i_d \quad (3)$$

$$\text{L'équation (1) dans l'équation (3)} \Rightarrow v_s = -r_d \cdot g_m \cdot v_e \quad (4)$$

Le rapport des équations  $\frac{4}{1}$  donne  $A_v = -r_d \cdot g_m$

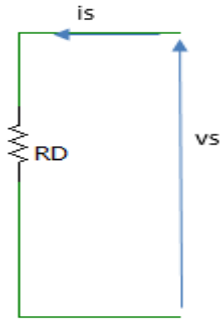
3) La résistance d'entrée  $R_e = \frac{v_e}{i_e}$

$$v_e = R_g \cdot i_e \Rightarrow \frac{v_e}{i_e} = R_g$$

4) Calcul de la résistance de sortie  $R_s = ?$

Pour cela il faut :

- Enlever la charge  $R_L$
- Annuler le générateur d'entrée  $e_g$  (cc toutes les sources de tension)
- Appliquer à la place de  $R_L$  un générateur de tension
- Calculer  $Z_s = \frac{v_s}{i_s}$



$$R_s = \frac{V_s}{i_s} = R_D$$

### 5.3.2. Amplificateur FET à drain commun

Soit l'amplificateur FET à drain commun suivant :

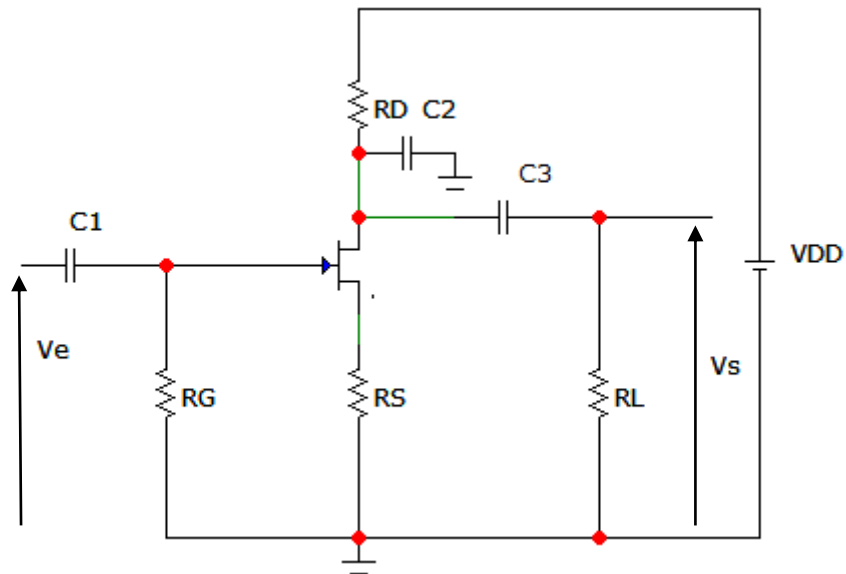
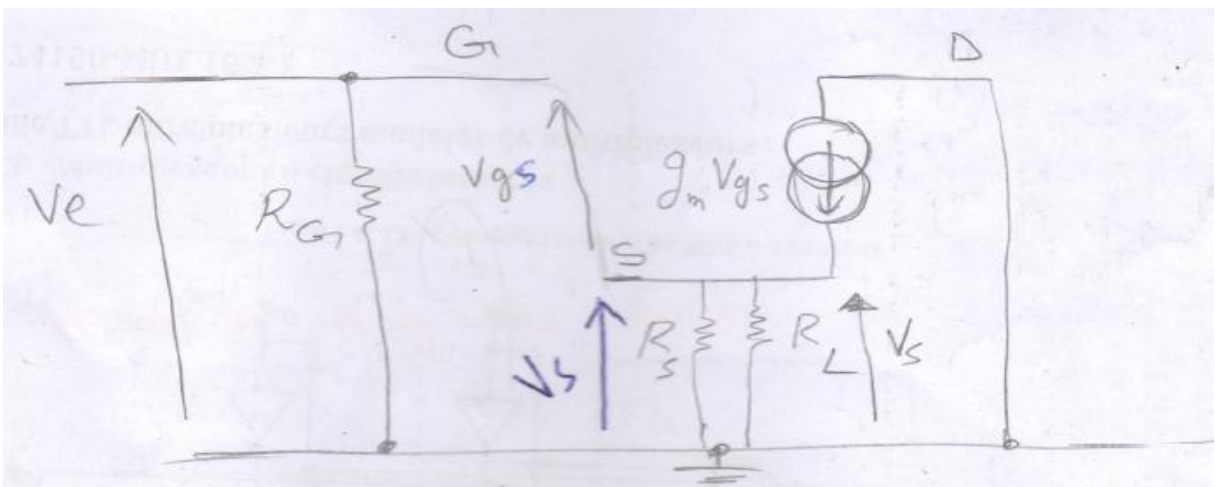


Figure 12 : FET à drain commun

**Travail demandé : Calculer  $A_v$ ,  $Z_e$  et  $Z_s$ .**

- 1) Le schéma équivalent en alternatif



**Travail demandé : Calculer  $A_v$ ,  $R_e$  et  $R_s$ .**

1) Gain en tension  $A_v = \frac{V_s}{V_e}$

On pose :  $r_s = R_s // R_L$

$$V_e = V_{gs} + V_s \quad (1)$$

$$V_s = r_s g_m V_{gs} \quad (2)$$

L'éq (2) dans l'éq (1) on obtient :

$$V_e = V_{gs}(1 + r_s g_m) \quad (3)$$

(2)/(3) donne :  $A_v = \frac{g_m r_s}{1 + r_s g_m}$

2) Calcul de la résistance d'entrée  $R_e = \frac{V_e}{i_e}$

$$R_e = R_G$$

3) Calcul de la résistance de sortie  $R_s = \frac{v_s}{i_s}$

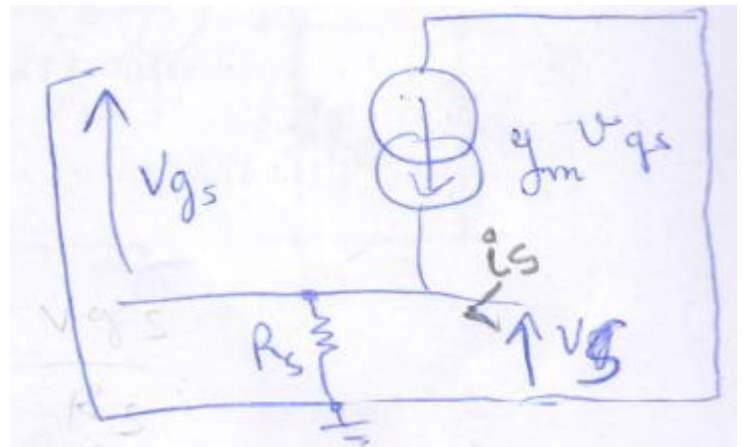
$$V_s = (i_s + g_m v_{gs}) R_s \quad (4)$$

$$V_s = -V_{gs} \quad (5)$$

On remplace l'équation (5) dans (6), on obtient :

$$i_s - g_m V_s - \frac{V_s}{R_s} = 0 \Rightarrow i_s = v_s \left( g_m + \frac{1}{R_s} \right)$$

$$\rightarrow R_s = \frac{1}{g_m + \frac{1}{R_s}}$$



### 5.3.3. Amplificateur FET à grille commune

Soit l'amplificateur FET à grille commune suivant :

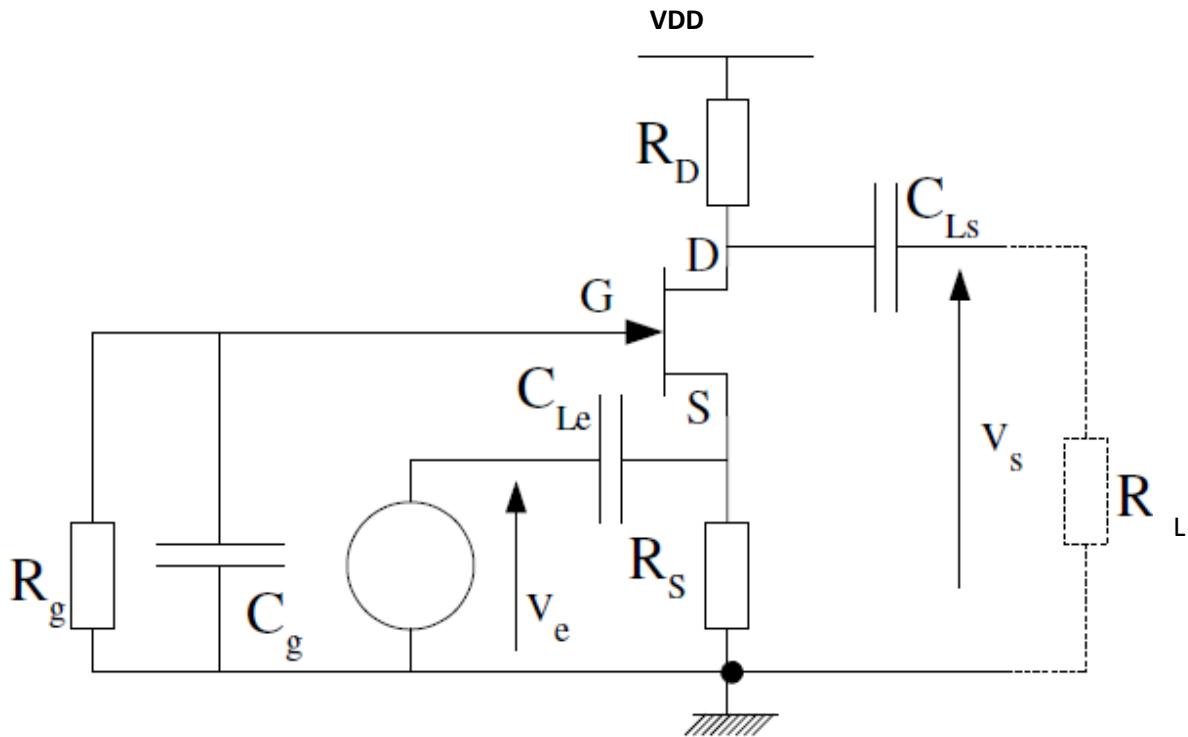
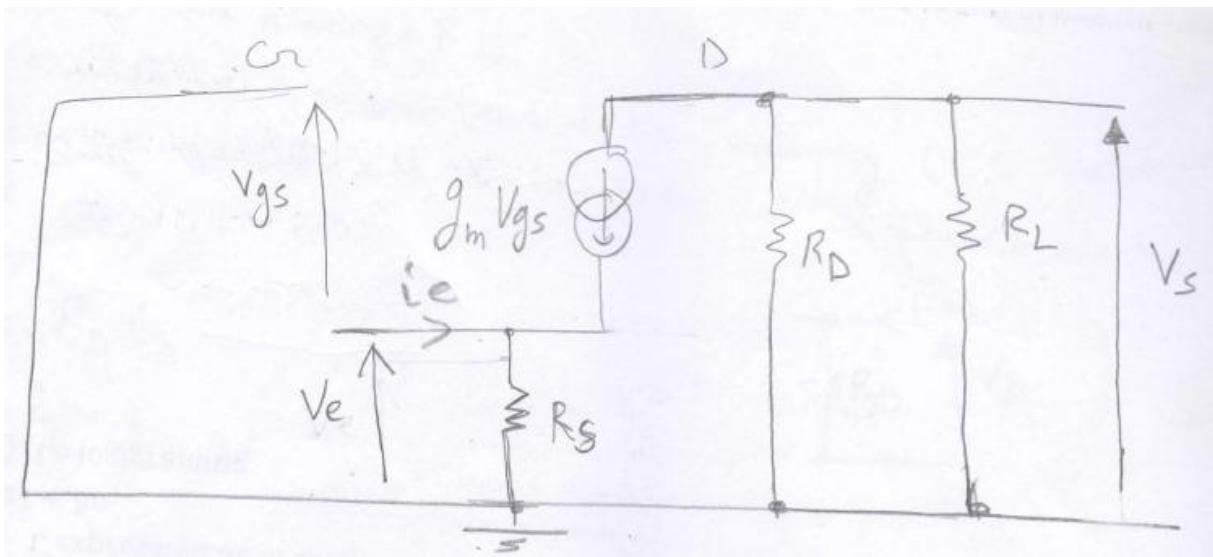


Figure 13 :FET à grille commune

**Travail demandé : Calculer  $A_v$ ,  $Z_e$  et  $Z_s$ .**

1. Schéma équivalent du FET à grille commune en dynamique



**On a :**  $V_s = -V_{gs}$

- 1) L'amplification en tension

On pose :  $r_d = R_D // R_L$

On a :

$$v_e = -v_{gs} \quad (1)$$

$$V_s = -r_d g_m V_{gs} \quad (2)$$

L'éq 1/l'éq 2, on obtient :  $\frac{V_s}{v_e} = \frac{V_s}{V_{gs}} = r_d g_m$

$$A_V = g_m r_d$$

2) Calcul de la résistance d'entrée  $R_e = \frac{v_e}{i_e}$

$$V_e = R_s (i_e + g_m V_{gs})$$

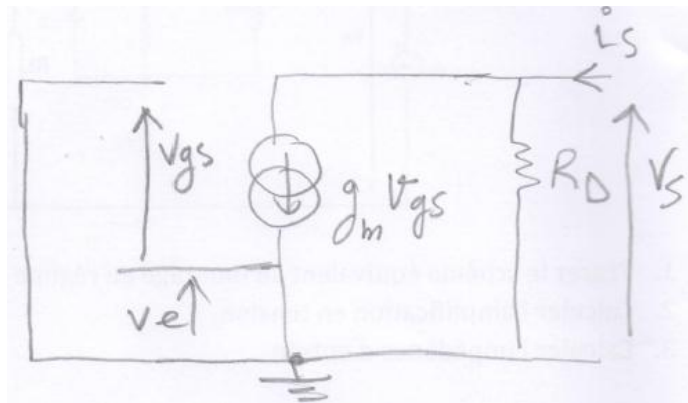
$$V_e = -V_{gs}$$

$$i_e + V_{gs} \left( g_m + \frac{1}{R_s} \right) = 0$$

$$i_e = -V_{gs} \left( g_m + \frac{1}{R_s} \right) \rightarrow R_e = \frac{v_e}{i_e} = \frac{1}{g_m + \frac{1}{R_s}}$$

3) Calcul de la résistance de sortie

- Enlever la charge  $R_L$
- Annuler le générateur de tension  $e_g$  (on court-circuit les sources de tension)
- Placer le générateur de tension à la place de  $R_L$



$$v_{gs} = 0 \Rightarrow g_m v_{gs} = 0$$

$$V_s = R_D i_s \Rightarrow R_s = \frac{v_s}{i_s} = R_D$$

