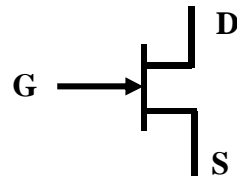


Le transistor à effet de champ (TEC) Field Effect Transistor (FET)

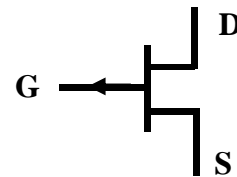
Présentation générale

- **Transistor à effet de champ** se présente comme une résistance variable commandée par une tension extérieure
- **Comparaison avec le transistor bipolaire :**
 - fonctionnement lié au déplacement d'un seul type de porteur (porteur majoritaire)
 - Très forte impédance d'entrée ($M\Omega$)
 - Facteur de bruit inférieur au transistor bipolaire

➤ Transistor à canal N



➤ Transistor PNP



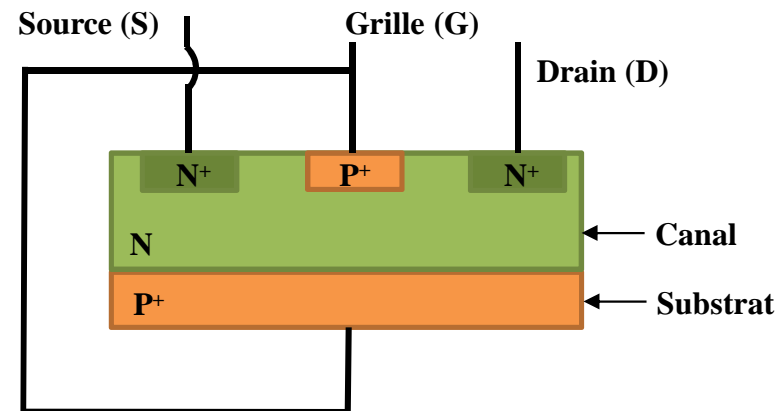
Le sens de la flèche indique le sens du courant de grille

Présentation générale

- **Constitution du TEC à canal N**

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 constitue des bornes d'entrée (**Source**) et de sortie du canal (**Drain**)



- **Élément actif à 3 accès :**

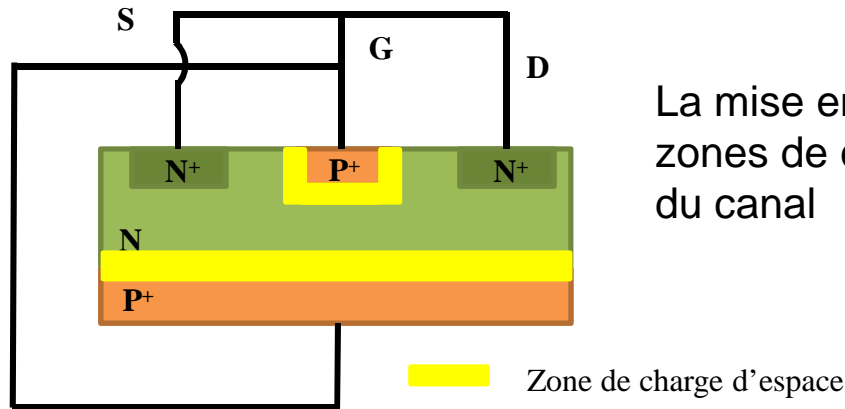
Grille (G) : électrode de commande,

Source (S) : électrode par laquelle les porteurs majoritaires entrent dans le canal,

Drain (D) : électrode par laquelle les porteurs majoritaires quittent le canal.

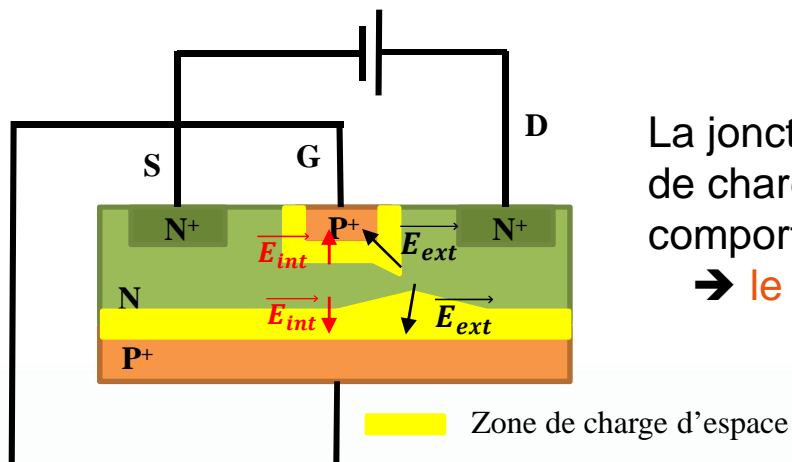
Fonctionnement du transistor à canal N

- $V_{GS} = 0$ V (grille et source reliées) – $V_{DS} = 0$ V



La mise en contact des zones P et N donne naissance à des zones de charges d'espace qui diminuent la largeur effective du canal

- $V_{GS} = 0$ V (grille et source reliées) – $V_{DS} \geq 0$ V faible

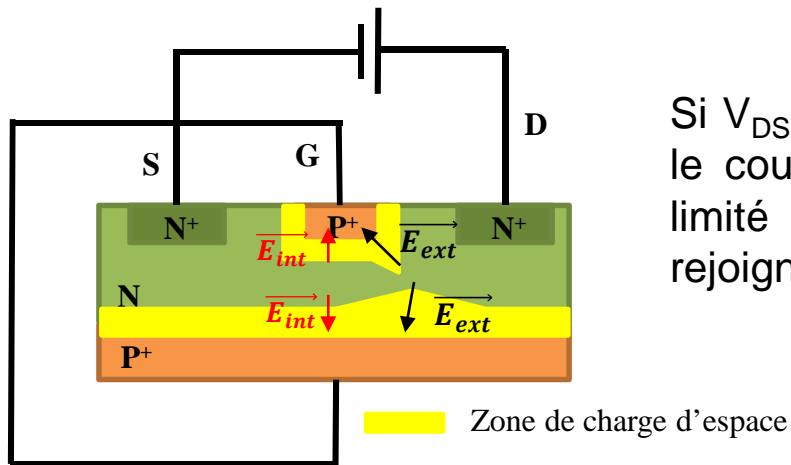


La jonction grille drain est polarisée en inverse – Les zones de charge d'espace augmentent – Si V_{DS} faible, le canal se comporte comme une résistance R_{DS}

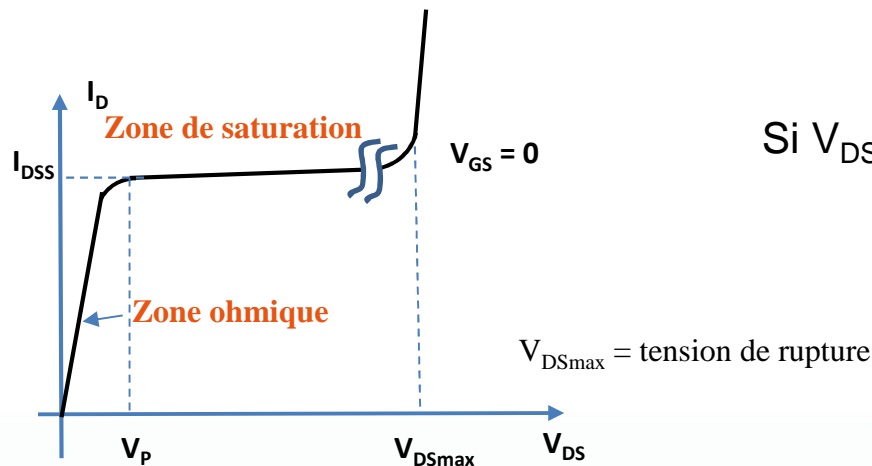
→ le transistor a un comportement ohmique

Fonctionnement du transistor à canal N

- $V_{GS} = 0$ V (grille et source reliées) – $V_{DS} \geq 0$ V élevée



Si $V_{DS} \nearrow$ la section conductrice du canal diminue $\rightarrow R_{DS} \nearrow$ et le courant I_D entre le drain et la source commence à être limité – Lorsque les deux zones de charge d'espace se rejoignent le canal est pincé ($V_{DS} = V_p$)



Si $V_{DS} > V_p \rightarrow I_D$ constant

\rightarrow zone de saturation du transistor

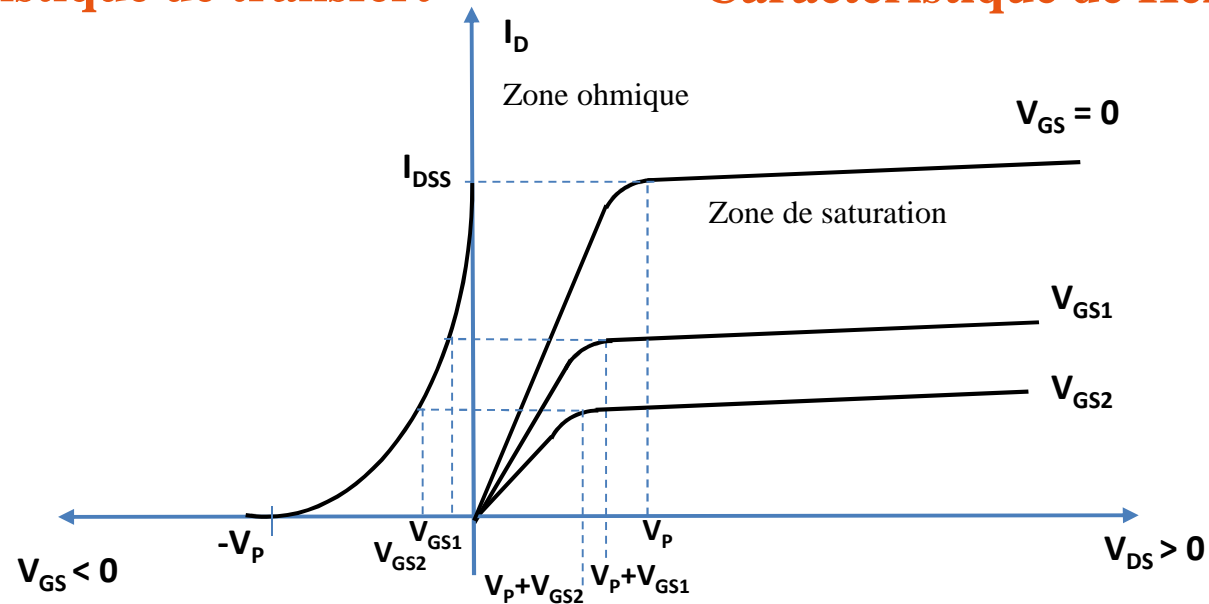
Fonctionnement du transistor à canal N

- $V_{GS} < 0 \text{ V} - V_{DS} = 0 \text{ V}$
 - ✓ Si $|V_{GS}| \nearrow \rightarrow$ l'épaisseur du canal se rétrécit – le canal est totalement pincé lorsque $V_{GS} = -V_p$
- $V_{GS} < 0 \text{ V} - V_{DS} > 0 \text{ V}$
 - ✓ Si $|V_{GS}| < V_p$ le canal ne peut être complètement fermé \rightarrow le courant I_D qui circule dépend de V_{DS} et V_{GS}
 - ✓ Si $V_{DS} > V_{DScoude} = V_p - V_{GS}$ le courant I_D n'augmente plus

Caractéristiques statiques du TEC à canal N

Caractéristique de transfert

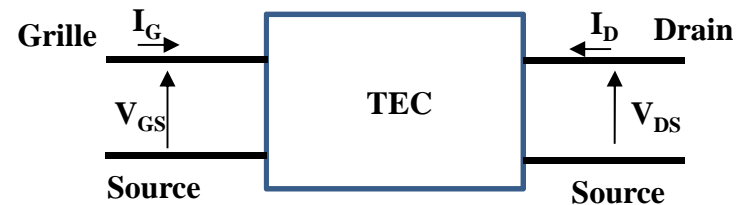
Caractéristique de Kellog



- La caractéristique de transfert est tracée lorsque le transistor est dans la zone de saturation

Paramètres statiques du TEC

Paramètres obtenus en considérant le montage suivant :



- Paramètres d'entrée : I_G et V_{GS}
- Paramètres de sortie : I_D et V_{DS}

La tension V_{GS} est toujours négative

→ la jonction Grille-Source est polarisée en inverse
donc $I_G \approx 0$

Paramètres statiques du TEC

- **Loi de variation du courant I_D**

➤ **Zone ohmique** : $V_{DS} < V_{DScoude} = V_p + V_{GS}$

$$I_D = I_{DSS} \left(\frac{2V_{DS}}{V_p} + \frac{2V_{GS}V_{DS}}{V_p^2} - \frac{V_{DS}^2}{V_p^2} \right) \text{ avec } V_p > 0 \text{ et } V_{GS} < 0$$

➤ **Zone de saturation** : $V_{DS} > V_{DScoude}$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 + \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^2 \text{ avec } V_p > 0 \text{ et } V_{GS} < 0$$

Dans ce cas I_D est indépendant de V_{DS}

- **Résistance Grille-Source**

➔ la jonction Grille-Source est polarisée en inverse donc $I_G \approx 0$

$$R_{GS} = \frac{\Delta V_{GS}}{\Delta I_G} \approx 10 \text{ M}\Omega \rightarrow \text{très grande}$$

Paramètres statiques du TEC

- **Résistance Drain Source**

$$R_{DS} = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} \text{ dépend de la zone d'utilisation du TEC}$$

- **Pente de la caractéristique $I_D = f(V_{GS})$ dans la zone de saturation**

$$g_m = \left(\frac{\Delta V_{GS}}{\Delta I_G} \right)_{V_{DS}=cste} \quad \text{avec} \quad I_D = I_{DSS} \left(1 + \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^2$$

$$\rightarrow g_m = \frac{2I_{DSS}}{V_p} \left(1 + \frac{V_{GS}}{V_p} \right)$$

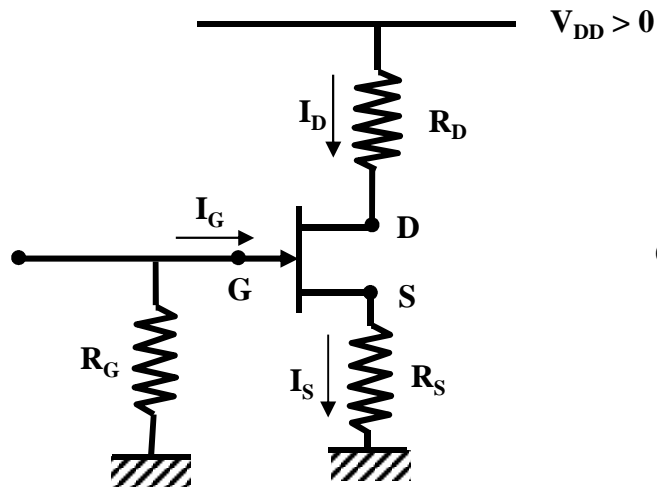
➤ Pour $V_{GS} = 0 \rightarrow I_D = I_{DSS} \rightarrow g_m = g_{m0}$ (valeur maximale)

➤ Pour $-V_p < V_{GS} < 0 \rightarrow g_m = g_{m0} \left(1 + \frac{V_{GS}}{V_p} \right)$

Polarisation du TEC à canal N en zone de saturation

- **Objectif de la polarisation** : Fixer les valeurs des tensions V_{GS0} , V_{DS0} et du courant I_{D0} pour l'utilisation du transistor en alternatif

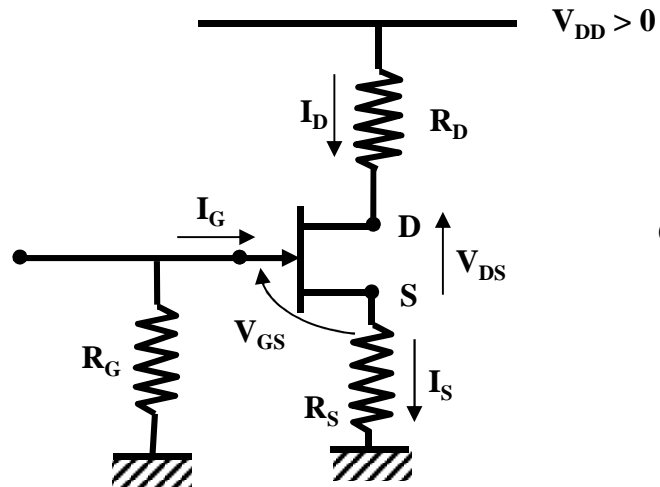
→ **Conditions à respecter** : $-V_p < V_{GS} \leq 0$ et $V_{DS} \geq 0$



Exemple : polarisation automatique en zone de saturation

- ❑ $I_S = I_D + I_G$ avec I_G très faible ($I_G \approx 0$) → $I_S \approx I_D$
- ❑ R_G élevée
- ❑ R_D et R_S servent à limiter le continu

Polarisation du TEC à canal N – Droite de polarisation



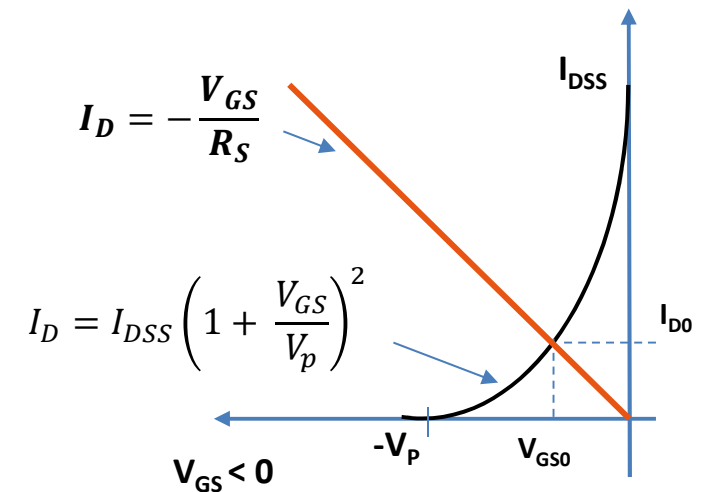
Exemple : polarisation automatique en zone de saturation

□ Equation de la droite de polarisation

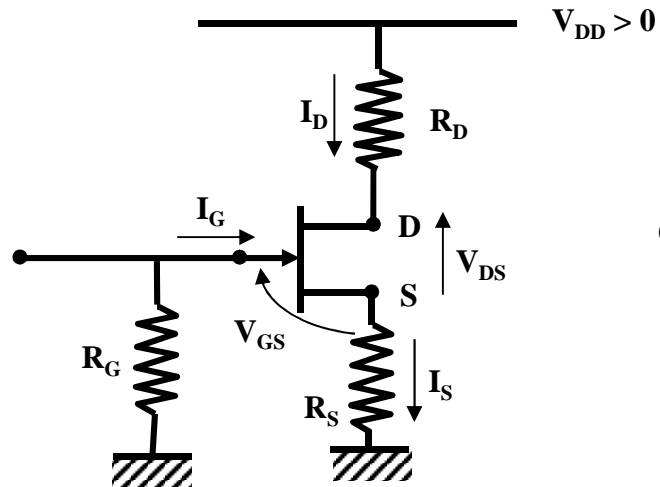
$$V_{GS} = -R_G I_G - R_S I_S$$

or $I_G \approx 0$ et $I_S \approx I_D$

→ $I_D = -\frac{V_{GS}}{R_S}$ *Equation de la droite de polarisation ou droite d'attaque*



Polarisation du TEC à canal N – Droite de charge statique



Exemple : polarisation automatique en zone de saturation

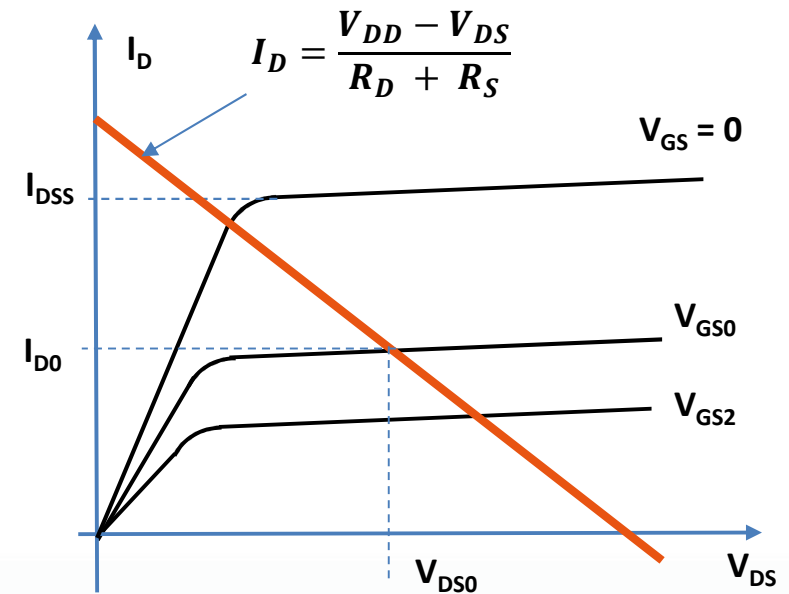
□ Equation de la droite de charge statique

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

Car $I_S \approx I_D$

$$\rightarrow I_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D + R_S}$$

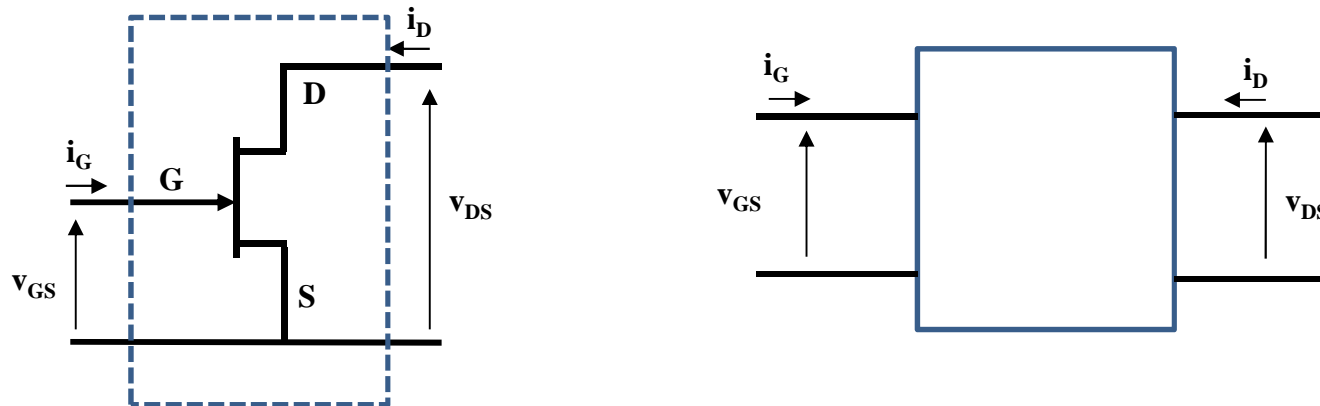
Equation de la droite de charge statique



Le TEC en régime dynamique

- Schéma équivalent du TEC en alternatif dans la zone de saturation

➤ Le transistor est considéré comme un quadripôle



- Le quadripôle est décrit en utilisant les paramètres admittances

$$\begin{cases} i_G = Y_{11}v_{GS} + Y_{12}v_{DS} \\ i_D = Y_{21}v_{GS} + Y_{22}v_{DS} \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{matrix} i_G = \Delta I_G & i_D = \Delta I_D \\ v_{GS} = \Delta V_{GS} & v_{DS} = \Delta V_{DS} \end{matrix}$$

Ces grandeurs représentent de petites variations autour du point de fonctionnement

Le TEC en régime dynamique

- **Schéma équivalent du TEC en alternatif dans la zone de saturation**

$$Y_{11} = \left. \frac{\Delta I_G}{\Delta V_{GS}} \right|_{\Delta V_{DS}=0} = \left. \frac{\Delta I_G}{\Delta V_{GS}} \right|_{V_{DS0}} = \frac{1}{R_{GS}} \quad \rightarrow Y_{11} \approx 0 \text{ car jonction Grille Source polarisée en inverse}$$

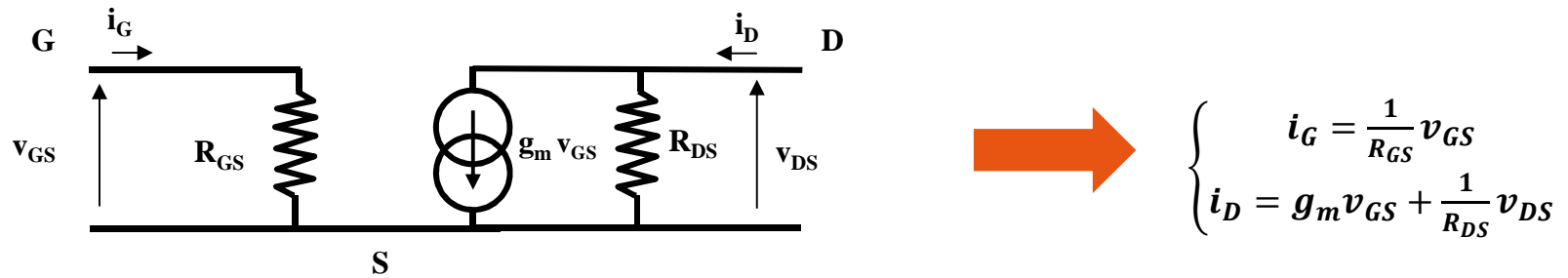
$$Y_{12} = \left. \frac{\Delta I_G}{\Delta V_{DS}} \right|_{\Delta V_{GS}=0} = \left. \frac{\Delta I_G}{\Delta V_{DS}} \right|_{V_{GS0}} \quad \rightarrow Y_{12} \approx 0 \text{ car jonction Grille Source polarisée en inverse}$$

$$Y_{21} = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} \right|_{\Delta V_{DS}=0} = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} \right|_{V_{DS0}} = g_m \quad \rightarrow \text{pente de la caractéristique } I_D = f(V_{GS})$$

$$Y_{22} = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{DS}} \right|_{\Delta V_{GS}=0} = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{DS}} \right|_{V_{GS0}} = \frac{1}{R_{DS}}$$

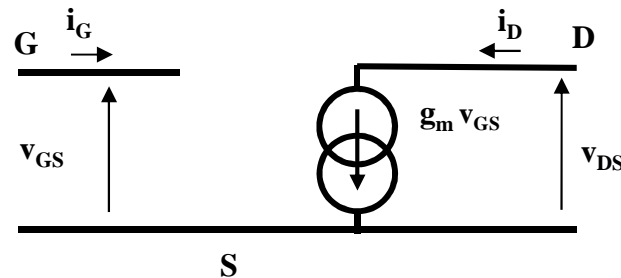
Schéma équivalent du TEC en alternatif BF

- Schéma équivalent général



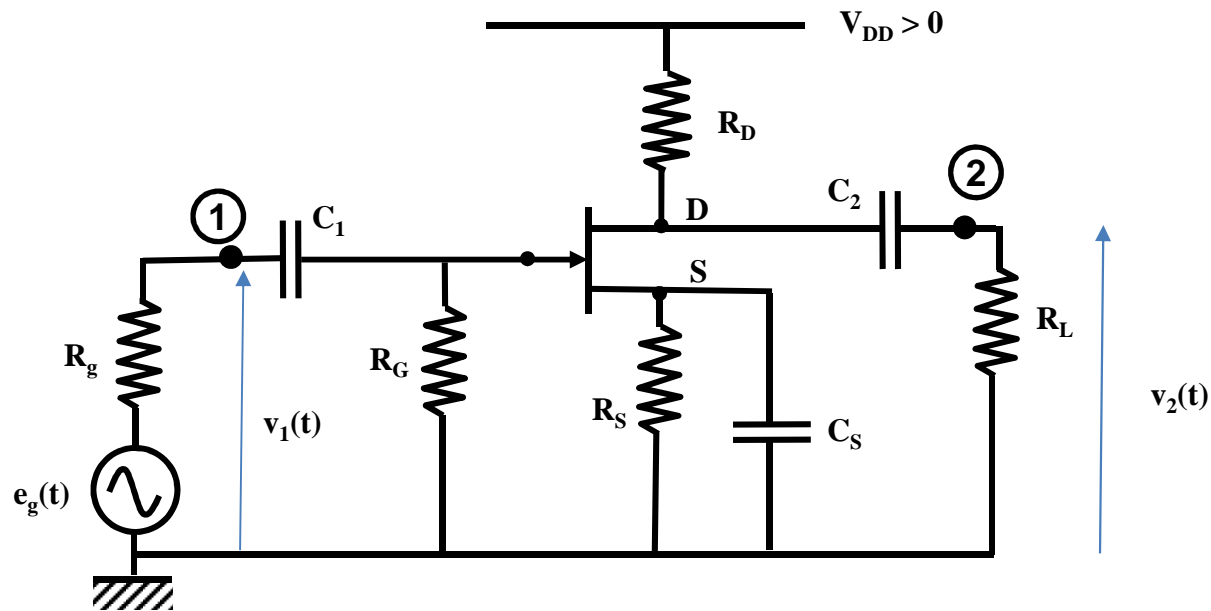
- Schéma équivalent simplifié

$$R_{GS} \rightarrow \infty \text{ et } R_{DS} \rightarrow \infty$$



Amplificateur à TEC à polarisation automatique

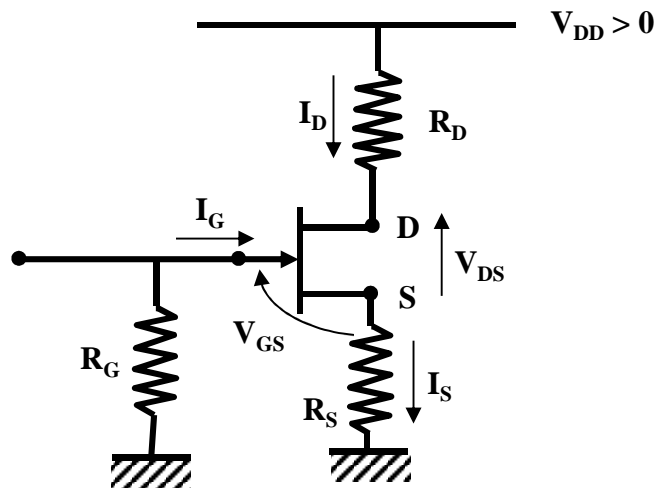
- Montage source commune



- Les accès d'entrée et de sortie sont ① et ②
- Les capacités C_1 , C_2 et C_S sont des capacités de découplage

Etude statique du montage (théorème de superposition)

- Schéma équivalent en continu



Détermination des droites d'attaque et statique de sortie (voir diapositives 12 et 13)

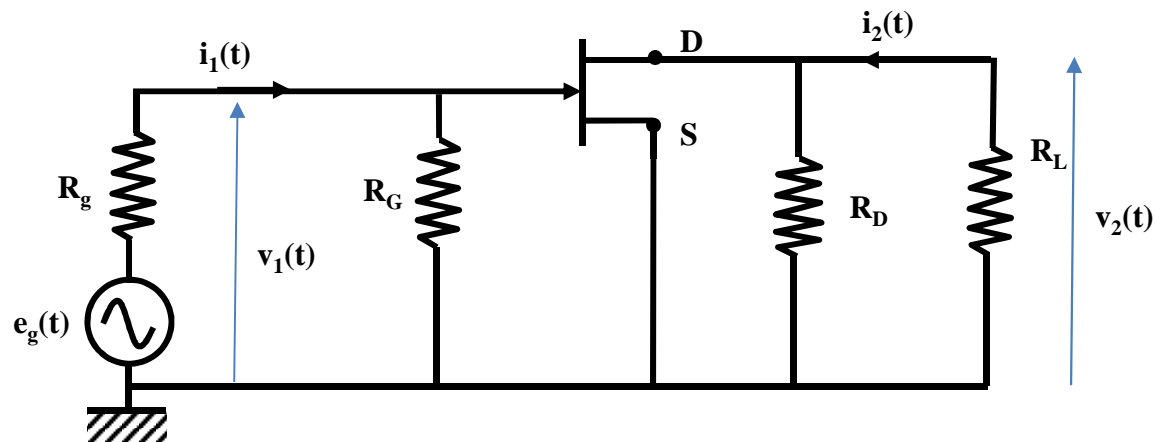


Le point de fonctionnement du transistor est imposé par les éléments du montage

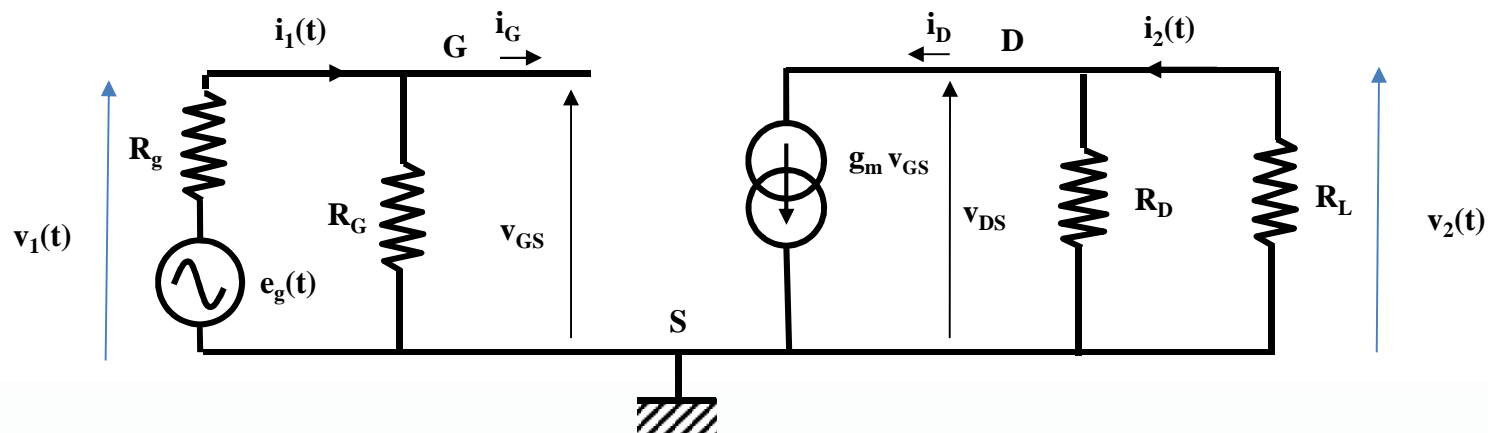
- I_{D0} , V_{GS0} et V_{DS0} sont fixés
- un signal alternatif $v_{GS}(t)$ peut être superposé au signal continu V_{GS0}

Etude dynamique du montage (théorème de superposition)

- Schéma électrique en régime sinusoïdal



- Schéma équivalent (R_{GS} et R_{DS} sont négligées)



Etude dynamique du montage (théorème de superposition)

- Droite de charge dynamique

$$v_{DS} = -\frac{R_L R_D}{R_L + R_D} i_D \quad (\text{d'après le schéma de la diapositive 19})$$

- La droite de charge dynamique Δ est la droite passant par le point de fonctionnement de coordonnées (I_{D0}, V_{DS0}) et de

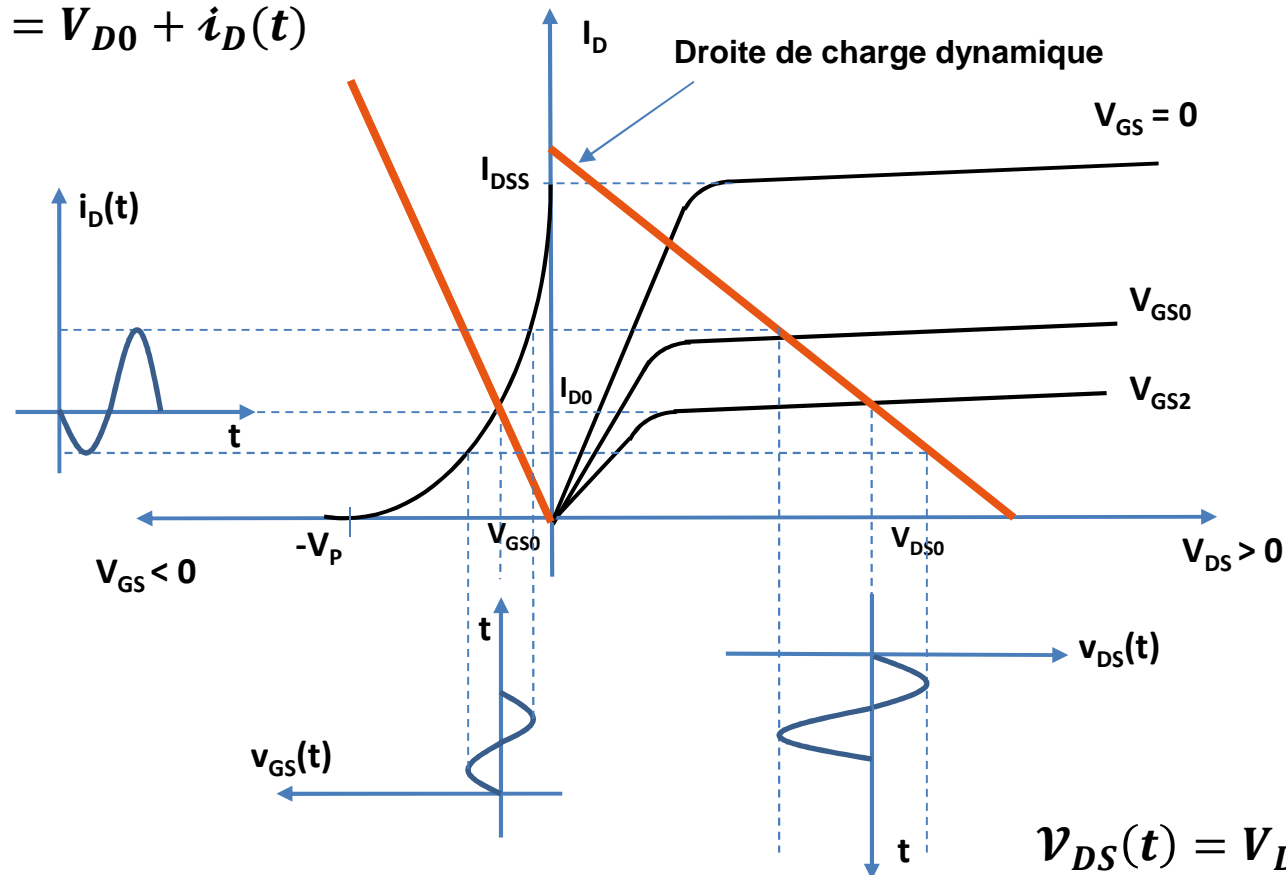
$$\text{pente } \frac{-1}{R_L // R_D} = -\frac{R_L + R_D}{R_L R_D}$$

$$i_D = -\frac{R_L + R_D}{R_L R_D} (v_{DS} - V_{DS0}) + I_{D0} \quad \rightarrow \text{équation de la droite de charge dynamique}$$

- Une petite variation de la tension d'entrée $v_{GS}(t)$ autour de V_{GS0} entraîne des variations de courant $i_{DS}(t)$ autour de I_{D0} et de tensions $v_{DS}(t)$ autour de V_{DS0}

Analyse du circuit : application du théorème de superposition

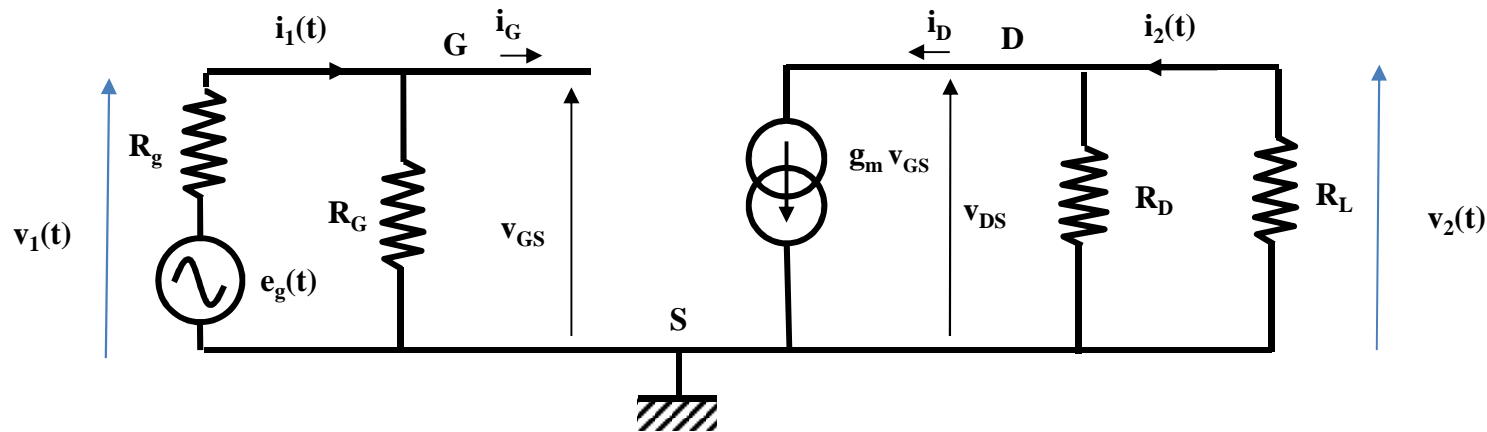
$$I_D(t) = V_{D0} + i_D(t)$$



$$V_{GS}(t) = V_{GS0} + v_{GS}(t)$$

$$V_{DS}(t) = V_{DS0} + v_{DS}(t)$$

Caractéristiques électriques de l'amplificateur en fonctionnement alternatif



➤ Gain en tension G_V

$$G_V = -g_m \frac{R_L R_D}{(R_L + R_D)}$$

➤ Gain en courant G_I

$$G_I = -g_m R_G \frac{R_D}{(R_L + R_D)}$$

➤ Résistance d'entrée R_e

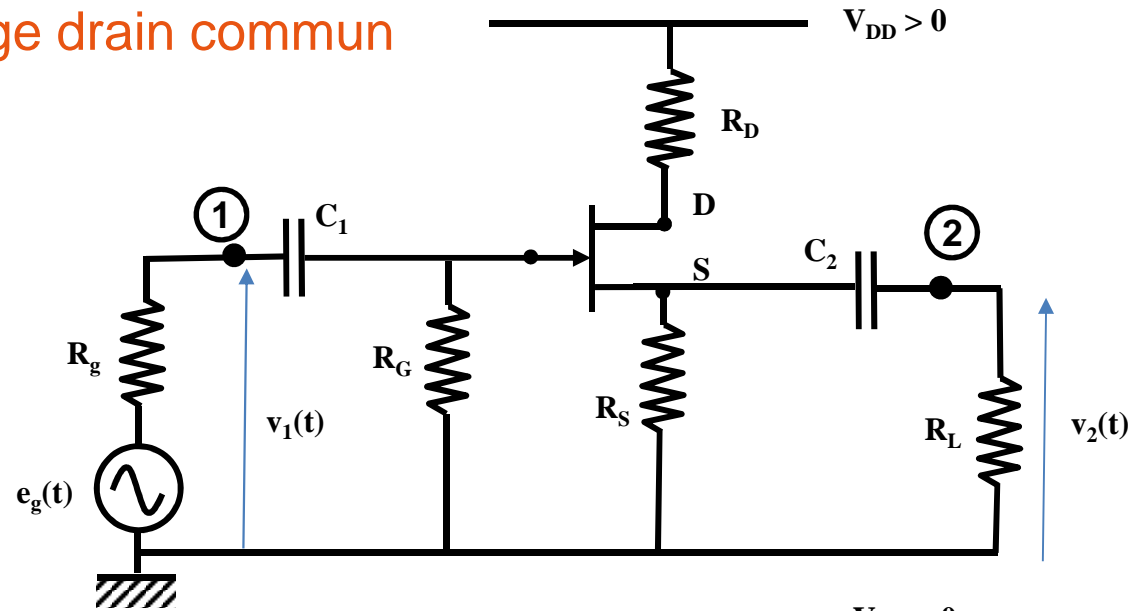
$$R_e = R_G$$

➤ Résistance de sortie R_s

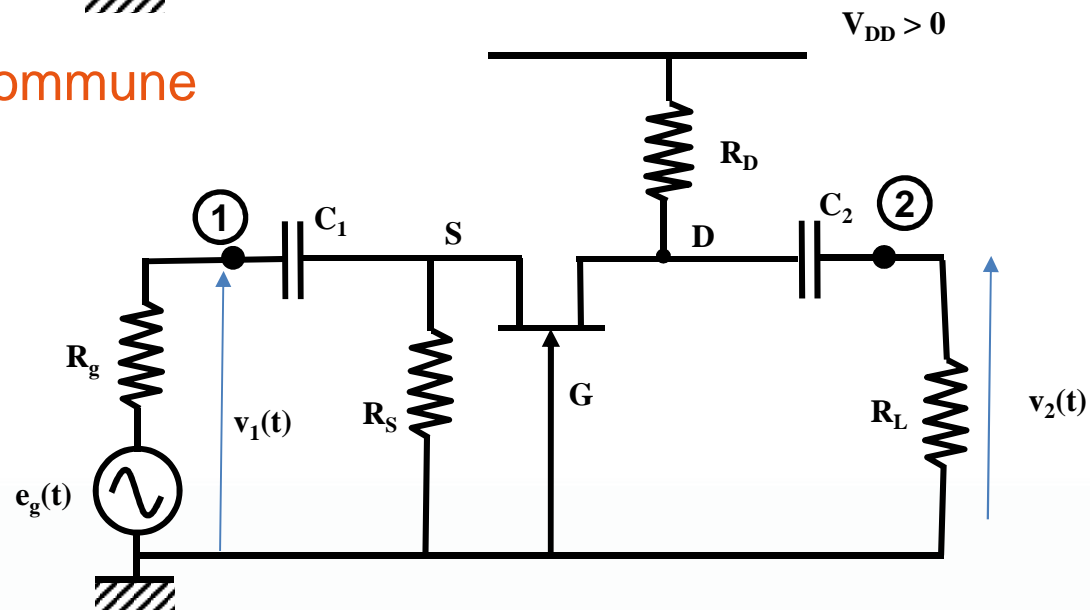
$$R_s = R_D$$

Autres types de montage

- Montage drain commun

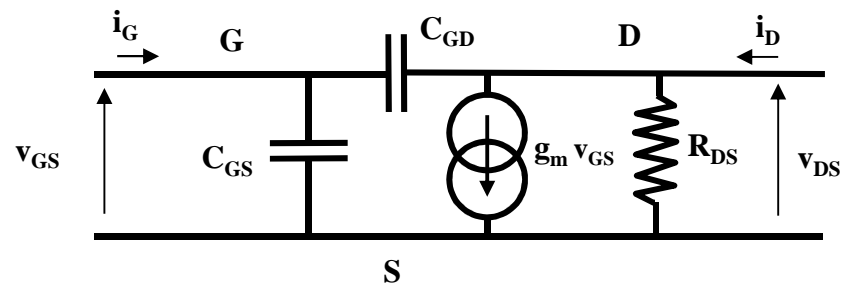


- Grille commune



Comportement du TEC à haute fréquence

- Si la fréquence augmente, des capacités parasites intrinsèques au transistor C_{GS} , C_{GD} et C_{DS} interviennent
 - Les deux premières sont du même ordre de grandeur (qq pF), la dernière plus faible peut être négligée





Fin