

# TRANSISTORS J-FET, MES-FET, HEMT

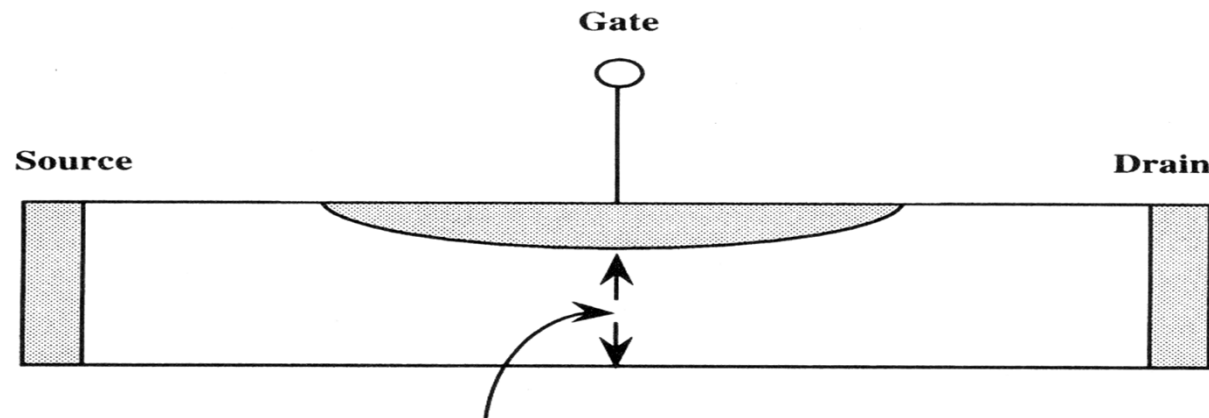
---

# Transistors à effet de champ

- Importance des FET et les différents types
- Une image physique de « comment ça marche »
- J-FET et MES-FET
- Les MOD-FET ou HEMT
- Les forces motrices pour les FETs modernes

# Transistors à effet de champ

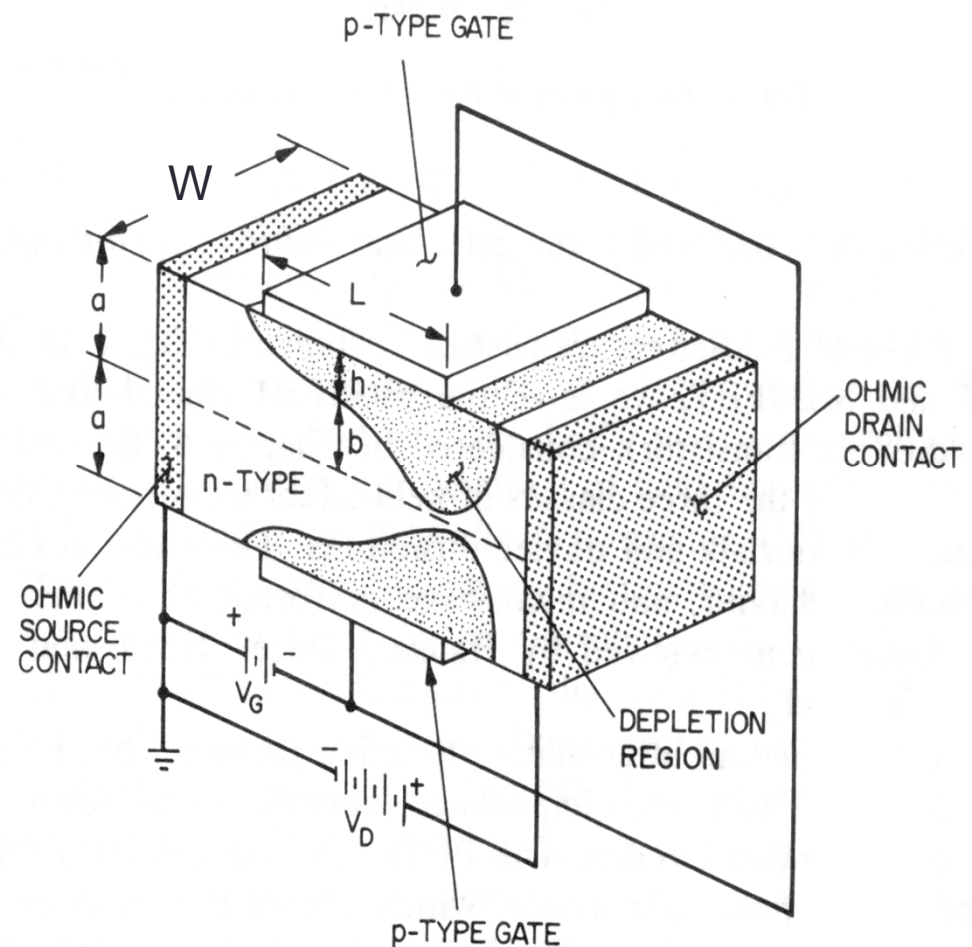
- L'effet de champ est la variation de la conductance d'un canal, dans un semi-conducteur, par l'application d'un champ électrique.



*Grille contrôle le canal*

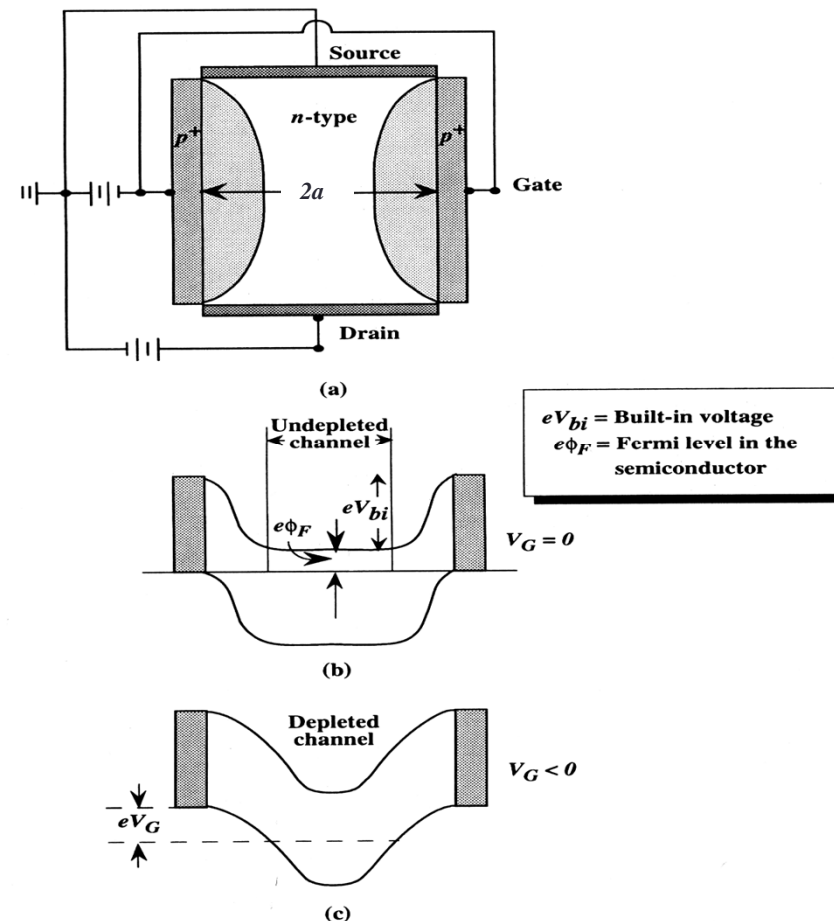
# Coupe schématique d'un J-FET

- $a$  : largeur (hauteur) maximale du canal, c'est la largeur «métallurgique ».
- $W$  : profondeur du composant.
- $h$  est la largeur de la ZCE sous la grille dans le canal.
- $b$  largeur effective du canal.
- $L$  longueur de grille

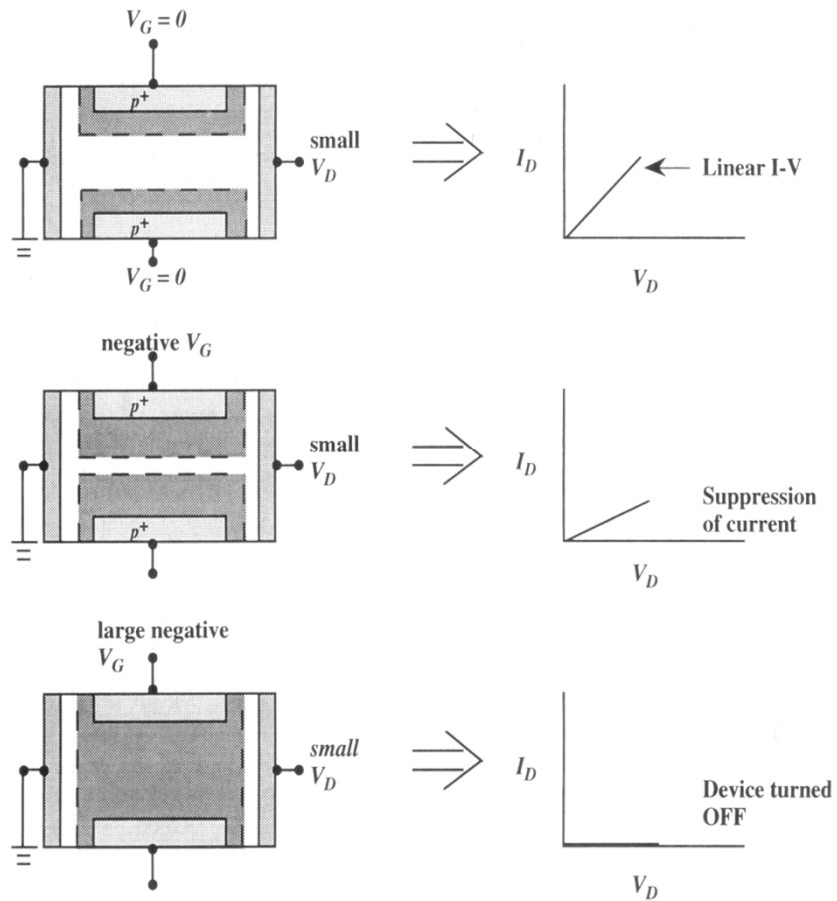


# Transistors à effet de champ à jonction : J-FET

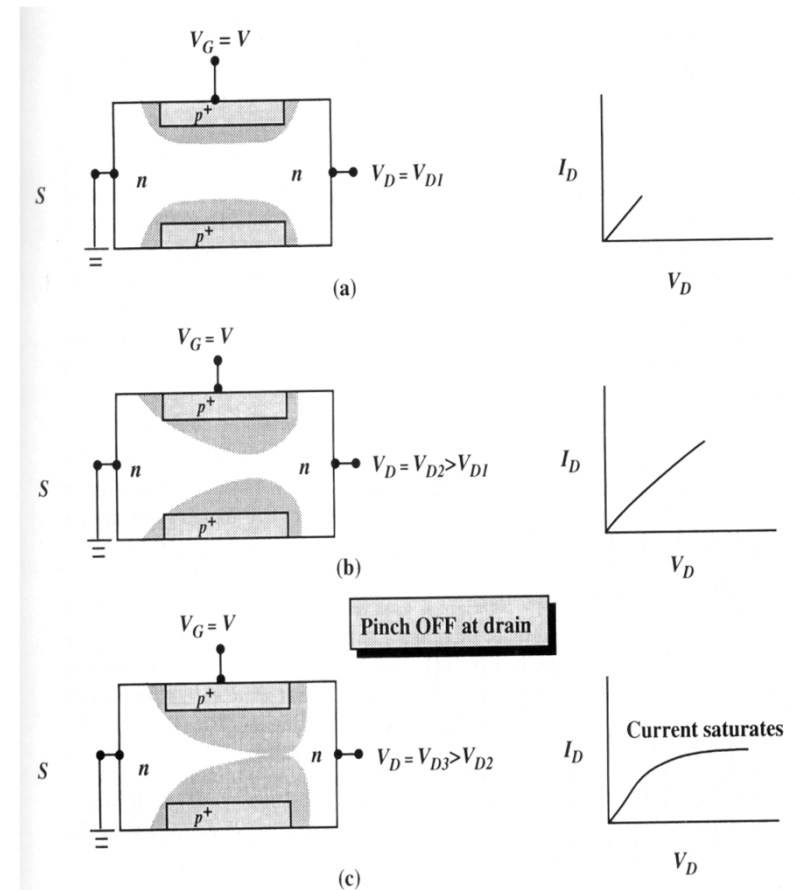
- Dispo 3 contacts
  - Source
  - Drain
  - Grille (« gate »)
- Rôle de la grille (gate)
  - Contrôle la largeur du canal



# J-FET: transistor à jonction



*Influence de la tension  
de grille*



*Influence de la tension  
de drain-source*

# Caractéristiques courant - tension

- Hypothèses simplificatrices:
  - Mobilité des porteurs cte dans le canal
  - Approximation du canal graduel (  $L \gg h \Rightarrow E(x) \ll E(y)$  )  $\Rightarrow$  Eq. de Poisson à 1D:

$$\frac{d^2V}{dy^2} = -\frac{\rho(y)}{\epsilon_{sc}} = -\frac{eN_D}{\epsilon_{sc}}$$

- Approximation de ZCE abrupte

- D'après jonction PN:

$$h = \sqrt{\frac{2\epsilon_{sc}}{eN_B} (V_{bi} - V_G)}$$

- En un point  $x \Rightarrow h(x)$ :

$$h(x) = \sqrt{\frac{2\epsilon_{sc}}{eN_D} (V_{bi} - V_G(x))}$$

$$h(x) = \sqrt{\frac{2\epsilon_{sc}}{eN_D} (V_{bi} - V_G + V(x))}$$

$V(x)$  est le potentiel dans le canal:

$$V(0) = V_S = 0 \text{ V}$$

$$V(L) = V_D = V_{DS}$$

# Caractéristiques courant - tension

- Tension interne de pincement : la tension aux bornes de la ZCE nécessaire pour déserrer tout le canal



$$V_p = \frac{eN_D a^2}{2\epsilon_{sc}}$$

- la tension de grille à appliquer est donc



$$V_T = V_{bi} - V_p$$

*Tension de seuil ou de pincement*



# Caractéristiques courant - tension

- Courant de drain (suivant x):
  - $J_x = \text{densité de charge} \times \text{mobilité} \times \text{champ électrique}$

- courant I: 
$$J(x) = -eN_D\mu_n \left(-\frac{dV}{dx}\right)$$

$$I_D = 2W[a - h(x)]eN_D\mu_n \frac{dV}{dx}$$



$$I_D \int_0^L dx = e\mu_n N_D 2W \int_0^{V_D} \left[ a - \left\{ \frac{2\varepsilon_{SC}[V(x) + V_{bi} - V_G]}{eN_D} \right\}^{1/2} \right] dV$$

# Caractéristiques courant – tension

*En intégrant on obtient finalement:*

$$I_D = \frac{2W}{L} e \mu_n N_D a \left\{ V_{DS} - \frac{2[(V_{DS} + V_{bi} - V_{GS})^{3/2} - (V_{bi} - V_{GS})^{3/2}]}{3(eN_D a^2 / 2\varepsilon)^{1/2}} \right\}$$

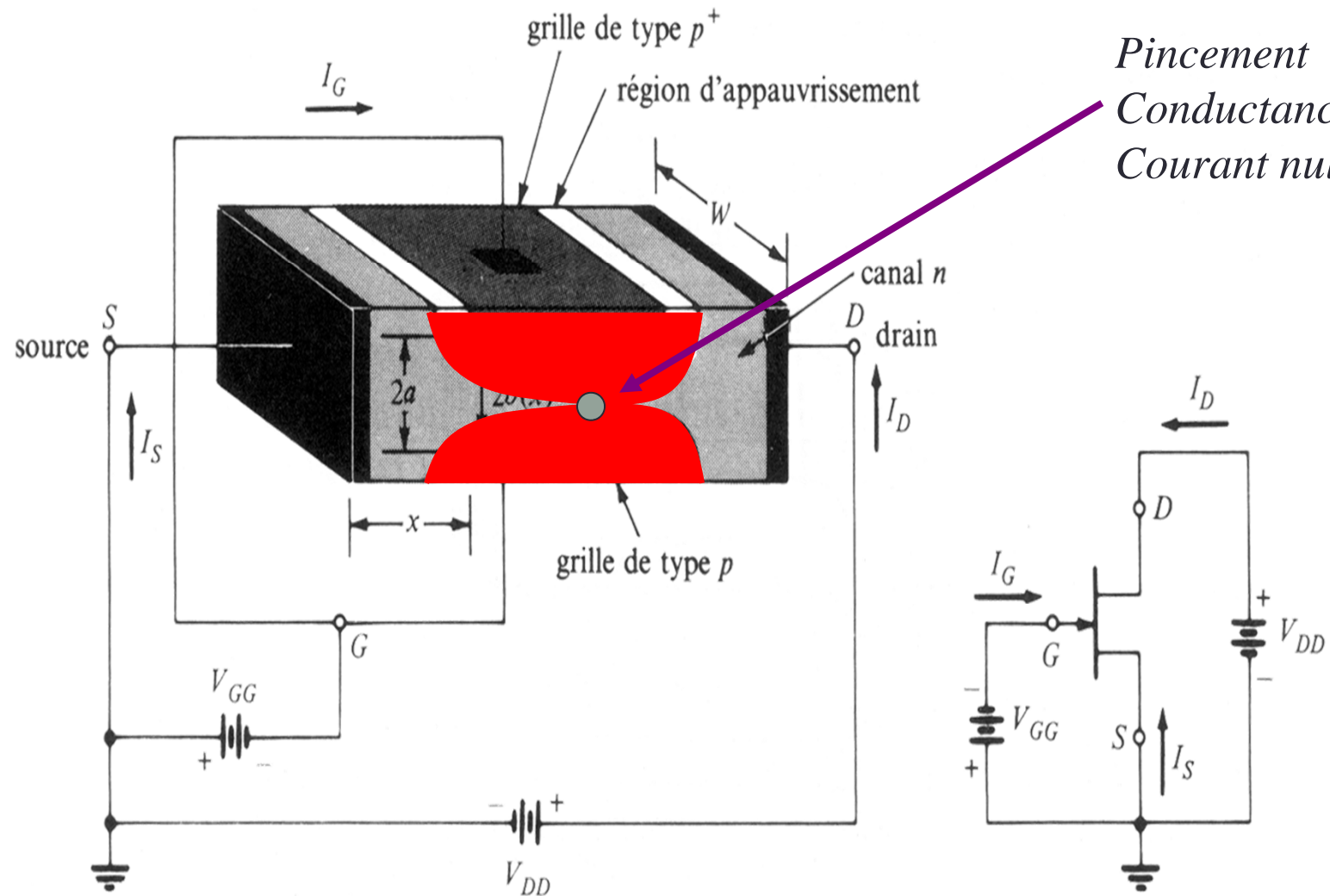
$$I_D = G_0 \left\{ V_{DS} - \frac{2[(V_{DS} + V_{bi} - V_{GS})^{3/2} - (V_{bi} - V_{GS})^{3/2}]}{3V_p^{1/2}} \right\}$$

*Avec :*

$$G_0 = \frac{2W}{L} e \mu_n N_D a$$

Conductance max du canal

# Régime pincé – saturation du courant



*Pincement*  
*Conductance nulle*  
*Courant nul !*

Vitesse

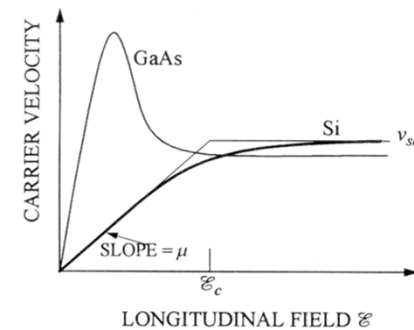
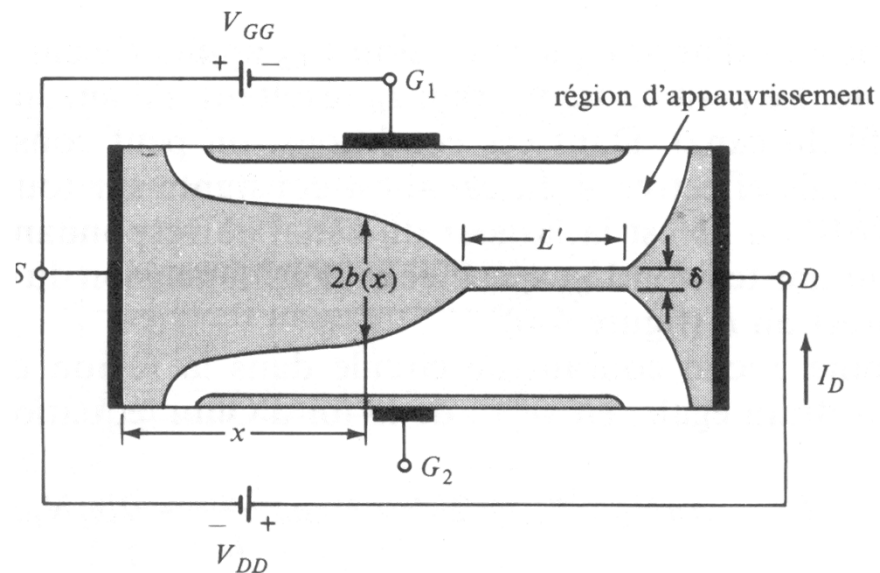
$$I_D = 2b(x)n(x)eW\mu_n \frac{V_{DS}}{L}$$

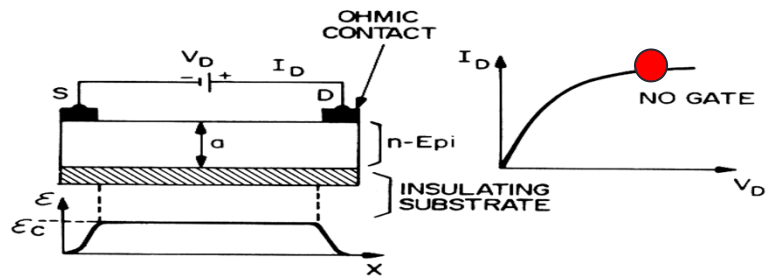
Si  $b(x)=0$ ,  $J$  tend vers l'infini : *impossible*

$$J = \frac{I_D}{2b(x)W}$$

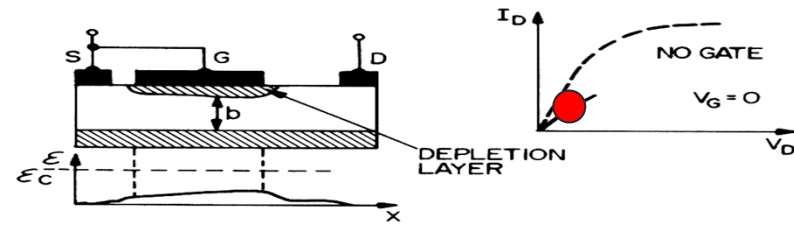
Seules solutions pour maintenir  $I=\text{cte}$   
Augmenter  $v(x)$  et/ou  $n(x)$

1 seule :  $n(x) \Leftrightarrow$  couche  
d'accumulation qui « ouvre » le canal.

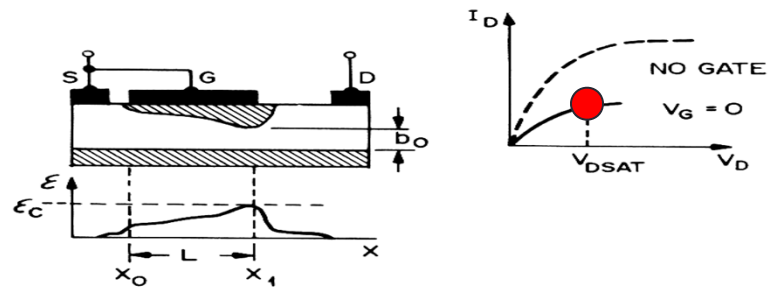




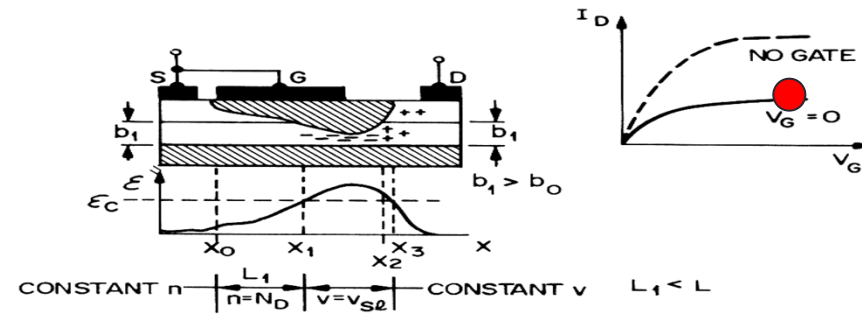
(a)



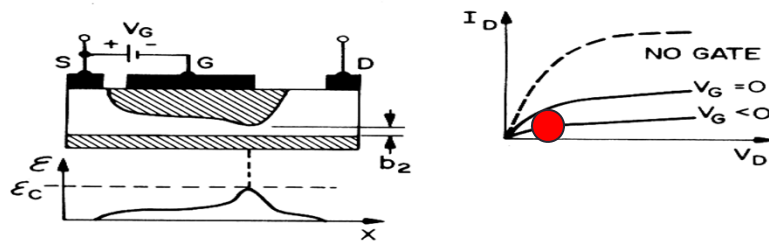
(b)



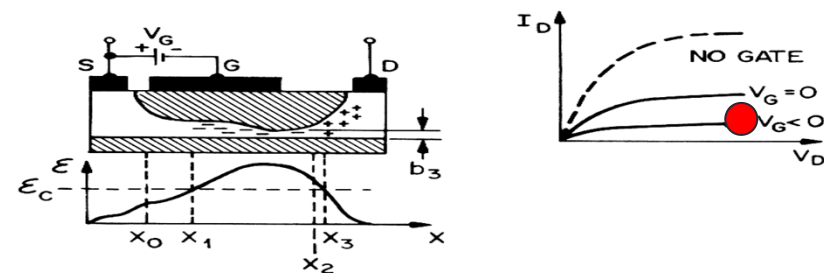
(c)



(d)



(e)



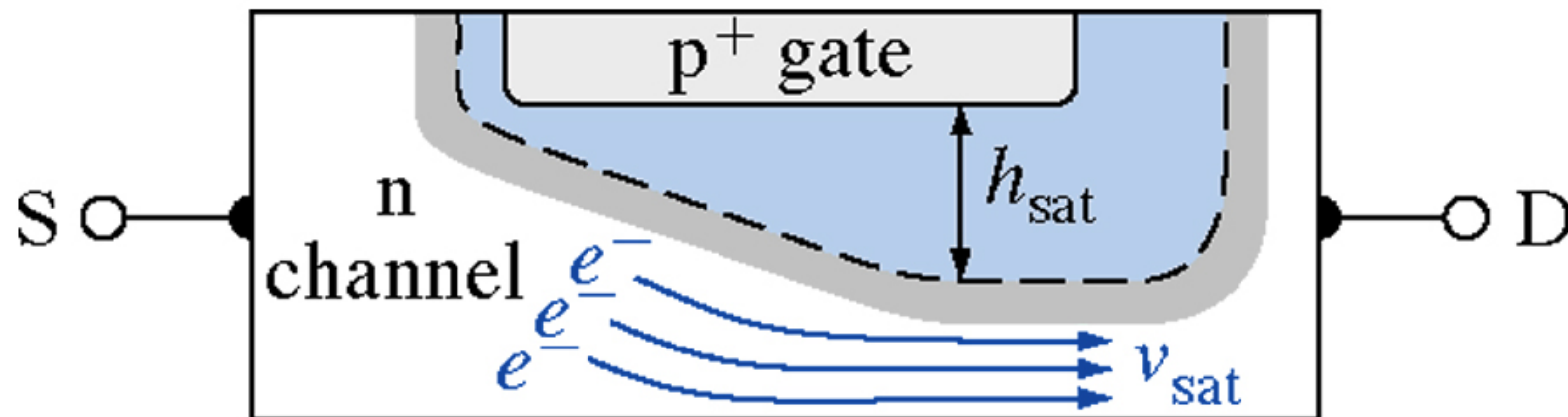
(f)

# Courant en régime saturé

$$I_{Dsat} = G_0 \left[ \frac{V_p}{3} - V_{bi} + V_{GS} + \frac{2(V_{bi} - V_{GS})^{3/2}}{3V_p^{1/2}} \right]$$

$$V_{Dsat} = V_p - V_{bi} + V_{GS} = V_{GS} - V_T$$

# Saturation par la vitesse



$$I_d(sat) = eN_d v_{sat} (a - h_{sat})W$$

# Transconductance

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_{V_D} = G_0 \frac{(V_D + V_{bi} - V_{GS})^{1/2} - (V_{bi} - V_{GS})^{1/2}}{V_p^{1/2}}$$

- Régime linéaire:

$$I_D = G_0 \left[ 1 - \frac{(V_{bi} - V_{GS})^{1/2}}{V_p^{1/2}} \right] V_{DS}$$

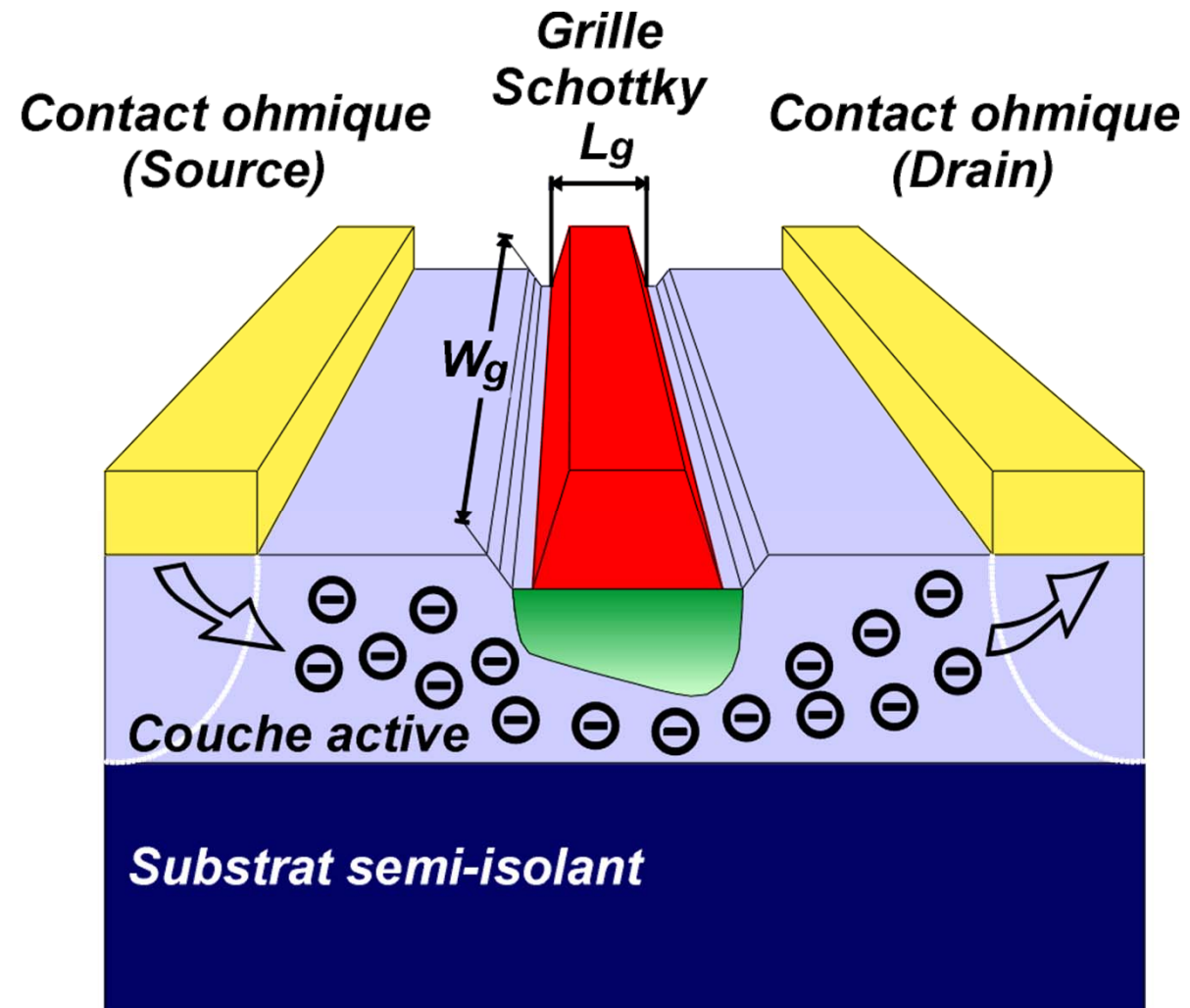
$$g_{m,lin} = \frac{G_0 V_{DS}}{2V_p^{1/2} (V_{bi} - V_{GS})^{1/2}}$$

- Régime saturé:

$$g_{msat} = G_0 \left[ 1 - \frac{(V_{bi} - V_{GS})^{1/2}}{V_p^{1/2}} \right]$$



# MES-FET



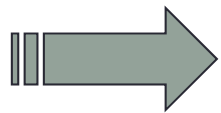
# Fonctionnement en HF

*Calcul dans le cas du MES-FET:*

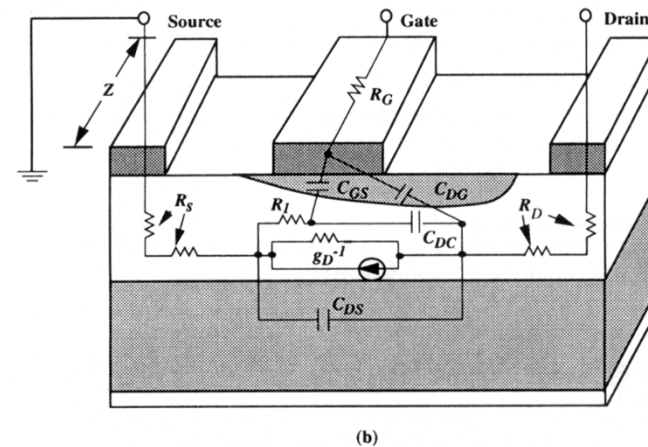
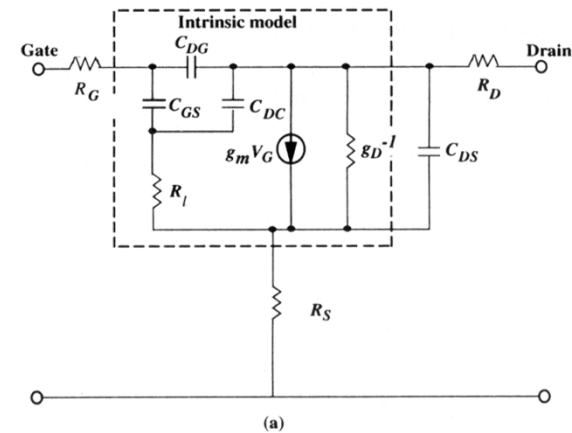
Variation de charge :  $\Delta Q$

Neutralité  $\Leftrightarrow \Delta Q$  dans le canal

temps de « réaction »  $\Delta t$



$$\Delta I_D = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$



# Fonctionnement en HF

- $\Delta t$  est fonction de la longueur du canal  $\Leftrightarrow$  temps de transit des électrons dans le dispositif.
- 2 cas:
  - Modèle mobilité constante

$$\tau_r = \frac{L^2}{\mu V_{DS}}$$

- Régime de saturation de vitesse

$$\tau_r = \frac{L}{v_{sat}}$$

# Fonctionnement en HF

$$C_G = C_{GS} + C_{GD}$$

$$g_m = \frac{C_G}{\tau_r}$$

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi C_G} = \frac{1}{2\pi \tau_r}$$

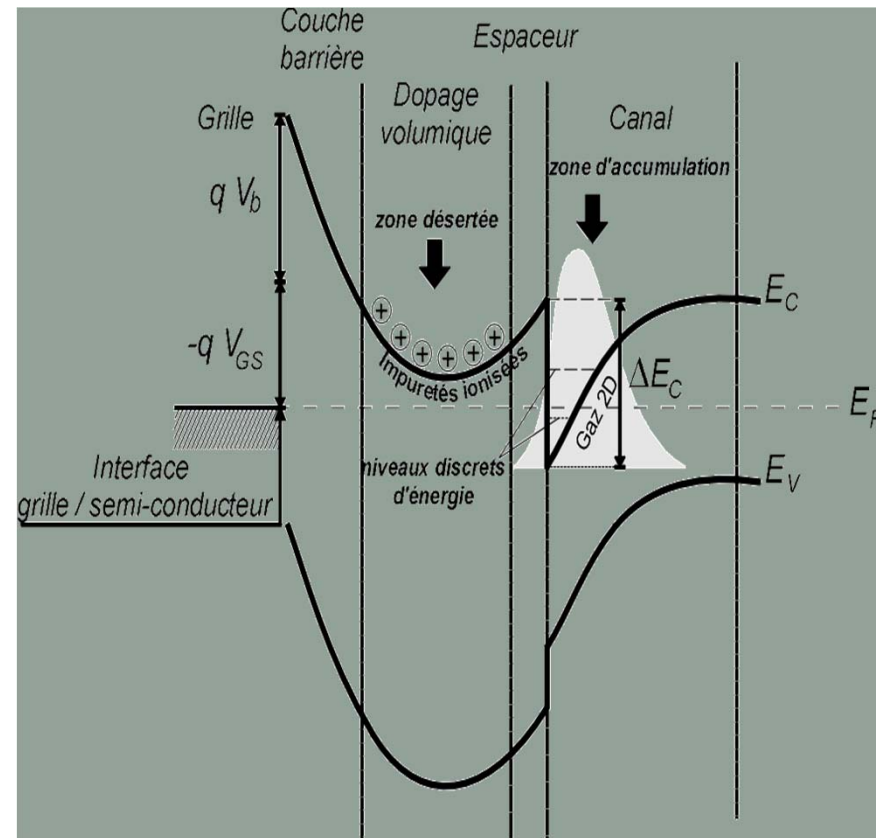
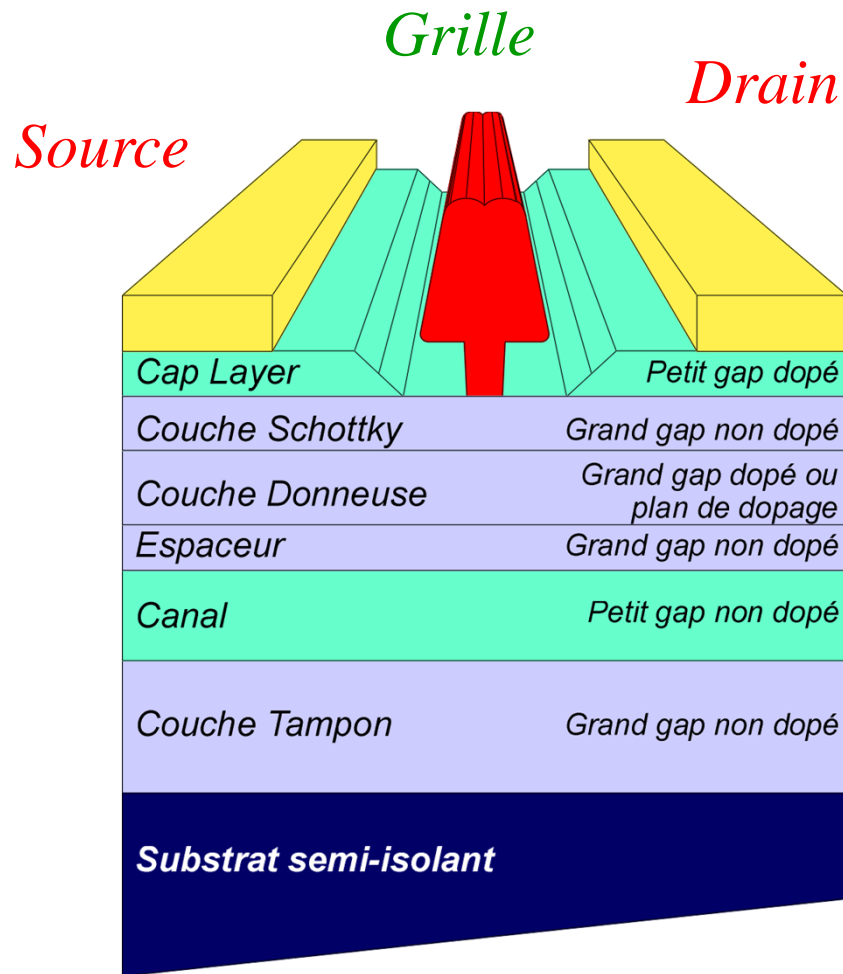
*Réduction de la taille des composants  $\Leftrightarrow$  modèle qui  
« colle » à la réalité  $\Leftrightarrow$  « à saturation de vitesse » et  
s'écrit :*

$$f_T = \frac{v_{sat}}{2\pi L}$$

*Dans le cas contraire:*

$$f_{T(\max)} = \frac{e\mu_n N_D a^2}{2\pi \epsilon L^2}$$

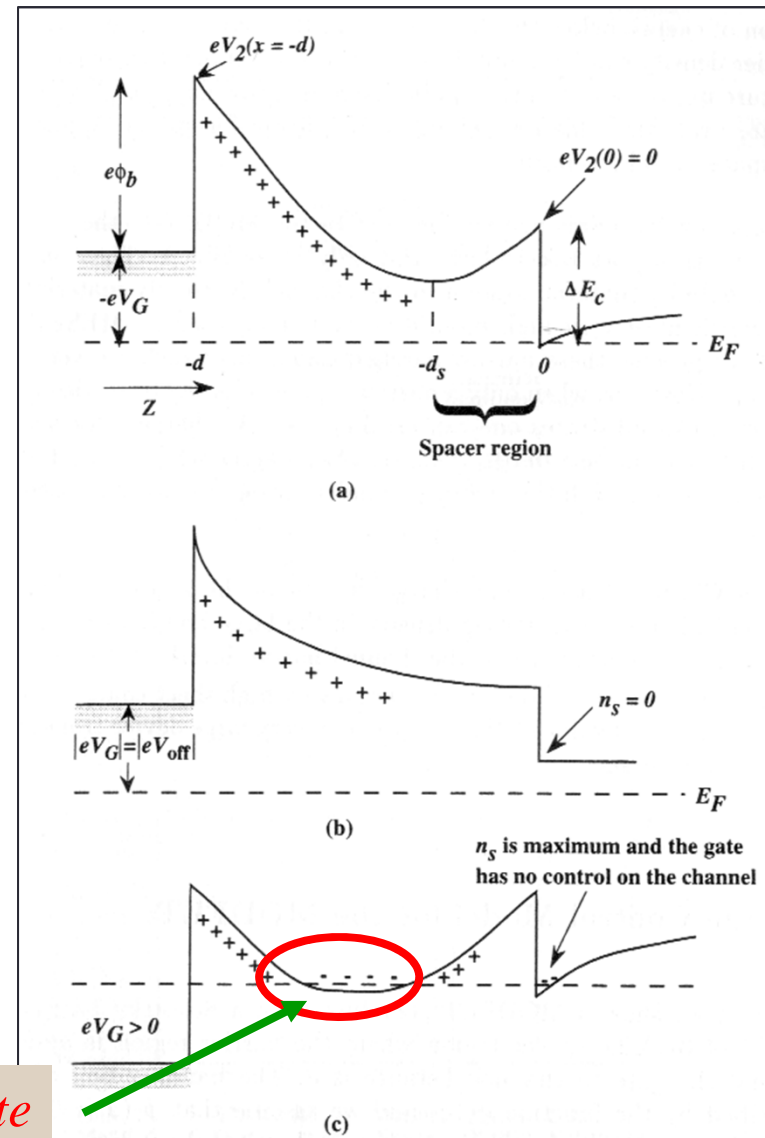
# Transistor à hétérostructure : HEMT



# HEMT

- $d$  largeur du semi-conducteur « grand gap »
- $d_s$  largeur du « spacer »
- $d_d$  largeur du semi-conducteur « grand gap » dopé
- $e\phi_b$  hauteur de la barrière Schottky
- $\Delta E_c$  discontinuité des bandes de conduction
- $V_2(z)$  courbure de potentiel dans la zone 2 «grand gap» (la barrière)

*MES-FET Parasite*



# HEMT

pour plus de détails : H. Mathieu

$$V_{off} = \phi_b - \frac{\Delta E_C}{e} + \frac{E_F}{e} - V_{P_2} \qquad V_{P_2} = \frac{eN_D}{2\epsilon_b} d_d^2$$

$$I_D = \frac{We\mu_n\beta}{L} \left( (V_g - V_t)V_D - \frac{V_D^2}{2} \right)$$

$$\beta = \frac{2\epsilon_b em_e}{2de^2 m_e + \epsilon_b \pi \hbar^2}$$

$$I_{dsat} \approx \frac{g_0 (V_g - V_t)^2}{2V_s} \qquad \text{Canal long}$$

$$I_{dsat} \approx g_0 (V_g - V_T) \qquad \text{Canal court}$$

# Idées forces pour la technologie FET

## Forces directrices

## Motivations et solutions

### Miniaturisation

- Pb de lithographie => optique, rayons X
- Modèles nouveaux pour le dessin des dispo

### Technologie mixte

- GaAs + Si: vitesse + densité
- CMOS + BJT : densité + puissance

### Nouveaux matériaux

- Matériaux à forte mobilité  
Si => GaAs => InGaAs => InAs
- Puissance / haute température  
Si => GaAs => GaN => SiC

### Nouveaux concepts

- Associer Effet tunnel et FET
- Interférence quantique



## Bibliographie

- S.M. Sze « Physics of semiconductors devices », 2° édition, Wiley, New York, 1981
- H.Mathieu, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », 4° édition, Masson 1998.
- J. Singh, « semiconductors devices : an introduction », McGraw-Hill, Inc 1994.
- Y.Taur et T.H. Ning, « Fundamentals of Modern VLSI devices », Cambridge University Press, 1998.
- K.K. Ng, « complete guide to semiconductor devices », McGraw-Hill, Inc
- F. Ali et A. Gupta, Eds., « HEMts &HBTs :devices, fabrication, and circuits »,Artech House, Boston, 1991.