

# TRANSISTOR MOSFET

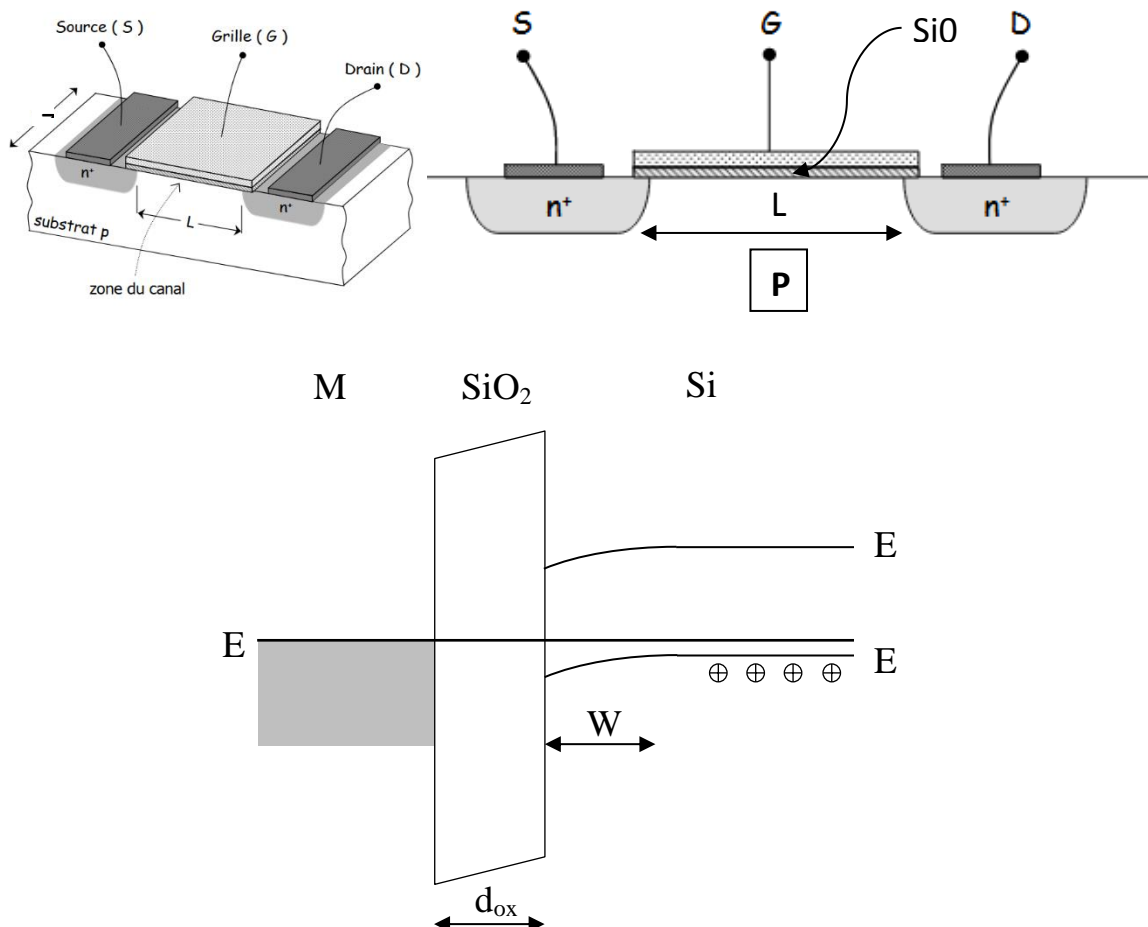
Le transistor MOS est le composant le plus employé de nos jours (en vigueur depuis le début des années 1960 bien que le principe ait été breveté en 1928 par Julius Edgar Lilienfeld). Comme l'antique « triode » (le tube à vide à la base de l'électronique du début du XXe siècle), C'est un composant à 3 électrodes qui permet de moduler un courant électrique, avec de ce fait des avantages décisifs en matière de conception de fonctions électroniques.



**Julius Edgar Lilienfeld**

C'est la maîtrise technologique exceptionnelle de procédés physico-chimiques que permet le silicium, et plus particulièrement la fabrication de couches très minces de Silice ( $\text{SiO}_2$ ), alliée à la pureté remarquable atteignable pour le silicium, qui en ont permis le développement. La structure Métal/Isolant(Oxyde)/Semi-conducteur, que l'on nomme plus communément MOS, permet le contrôle de la quantité de porteurs libres dans le semiconducteur (canal) par une polarisation appliquée à une électrode (« grille ») placée sur l'oxyde (FET = « Field Effect Transistor »). La modulation de la conduction du canal permet ainsi d'avoir une « vanne de courant » connectant les électrodes de « source » et de « drain », que l'on peut ouvrir ou fermer à volonté.

Dans ce qui suit, on va développer un modèle simple du fonctionnement du transistor MOSFET, qui va permettre d'en comprendre assez les caractéristiques essentielles.



On considère ici un transistor NMOS (canal N), fonctionnant en « inversion » : les électrodes de source et de drain sont placées sur des zones fortement dopées  $N^+$  du semiconducteur (contacts ohmiques), celui-ci étant modérément dopé de type P (concentration  $N_A$  en trous libres).

1/ Si on laisse la grille électriquement « flottante », dessiner le diagramme de bande longitudinal reliant les zones  $N^+$ -P- $N^+$  des contacts ohmiques et du canal.

Par analogie avec la diode Schottky, que vous inspire ce diagramme, du point de vue de la conduction électrique entre la source et le drain ?

2/ On s'intéresse maintenant au diagramme de bandes transverse entre la source et la grille.

A l'équilibre, en l'absence de tensions appliquées, expliquer qualitativement la répartition des charges, champ et potentiel électriques dans la structure. Par simplification, on admettra que la permittivité du semiconducteur et de l'isolant sont identiques.

3/ Que se passe-t-il maintenant si on applique une tension positive  $V_G$  sur la grille ? On admettra que le niveau de Fermi reste constant dans le semiconducteur.

Montrez qu'il existe une tension de grille  $V_{th}$  à partir de laquelle un phénomène très particulier se produit à l'interface isolant-semiconducteur.

Que diriez-vous qu'il se passe lorsqu'on augmente la tension de grille au-delà de  $V_{th}$  ? Montrer alors que toute augmentation de la tension « tombe » sur le seul isolant.

En déduire la densité de charge d'inversion dans le canal en fonction de l'écart de tension  $V_G - V_{th}$ , puis la conductance du canal. On notera  $L$  la longueur de grille,  $Z$  sa largeur et  $\mu_n$  la mobilité des électrons dans la couche d'inversion.

4/ On considère maintenant la dépendance du courant  $I_{DS}$  avec la tension  $V_{DS}$  (régime non ohmique). Il se produit alors que l'écart de tension avec la tension de seuil n'est pas uniforme le long du canal. Ecrire l'équation différentielle vérifiée par la tension  $V(y)$  le long du canal, puis montrer qu'elle s'intègre facilement. En déduire l'expression de la caractéristique courant-tension  $I_{DS}(V_{DS})$ .

5/ Montrer qu'à partir d'une certaine tension  $V_{DS}$ , le canal se « pince » au niveau du drain. On admettra qu'alors, le courant  $I_{DS}$  est « saturé » et n'augmente plus avec  $V_{DS}$ . Que vaut  $I_{DSsat}$  ?

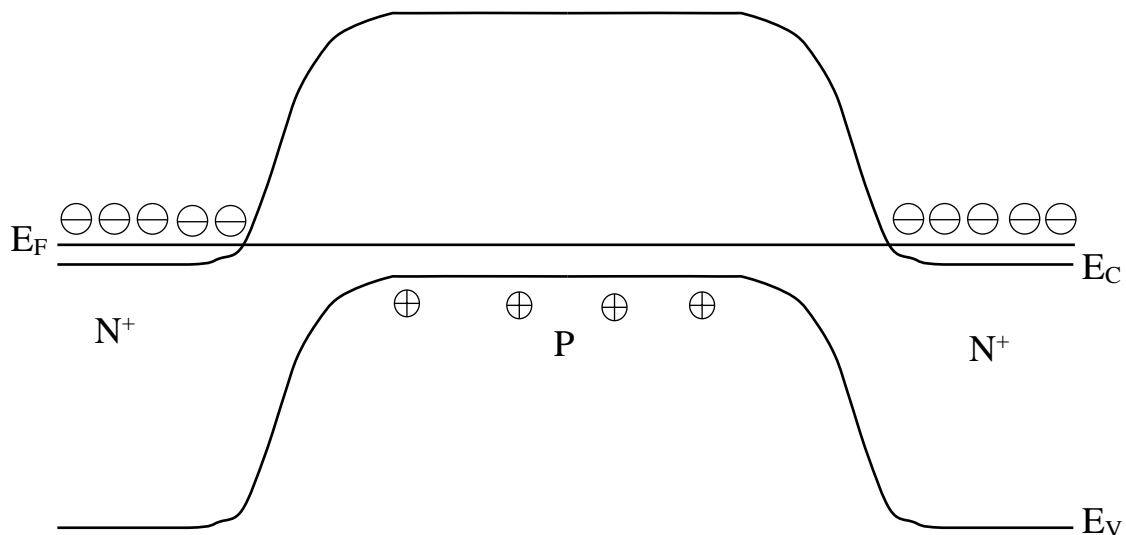
En déduire la forme du faisceau de caractéristiques  $I_{DS}(V_{DS})$  pour des valeurs linéairement incrémentées de  $V_{GS}$ .

# TRANSISTOR MOSFET

## Corrigé

1/ Si on laisse la grille électriquement « flottante », dessiner le diagramme de bande longitudinal reliant les zones  $N^+$ -P- $N^+$  des contacts ohmiques et du canal.

Par analogie avec la diode Schottky, que vous inspire ce diagramme, du point de vue de la conduction électrique entre la source et le drain ?

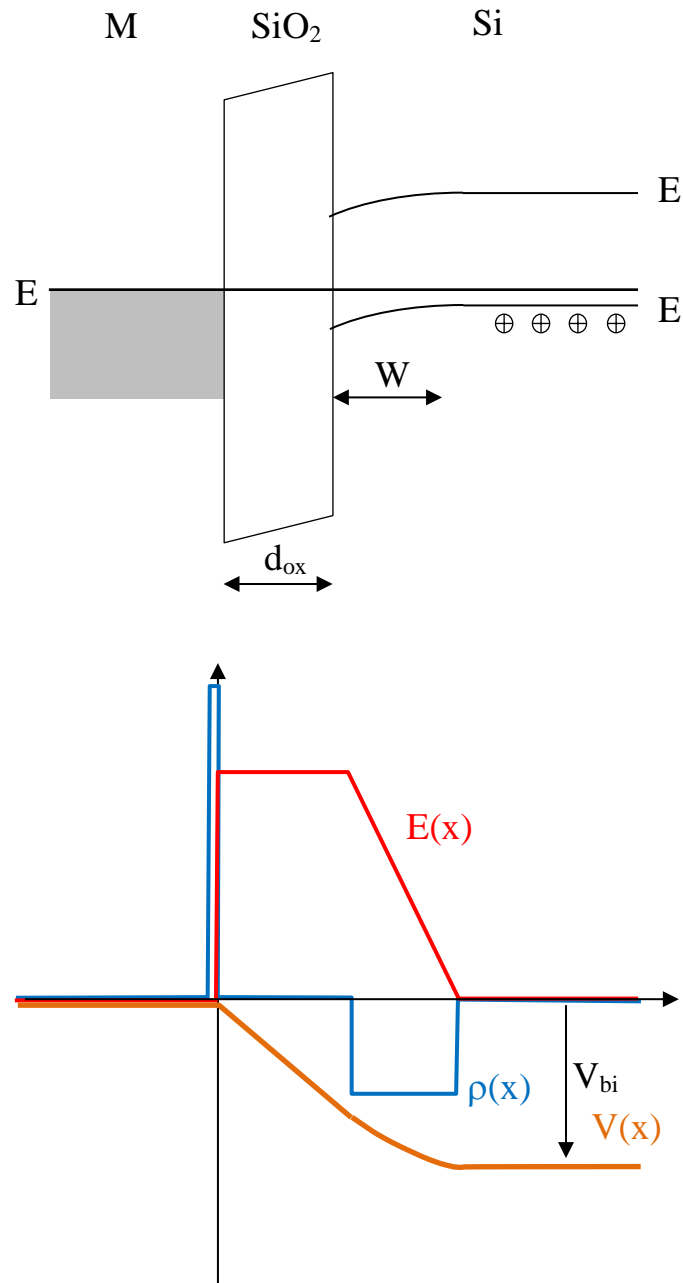


« Avec les mains », on voit bien que la barrière  $N^+ \rightarrow P$  empêche le passage des électrons dans le canal, idem pour les trous du canal vers le contact ohmique. Il y a forcément une des 2 jonctions qui est en inverse quelle que soit la polarisation, même si l'autre est en direct. L'essentiel de la chute de tension se fait donc sur la jonction en inverse, et ça donne quasiment zéro courant.

2/ On s'intéresse maintenant au diagramme de bandes transverse entre la source et la grille.

A l'équilibre, en l'absence de tensions appliquées, expliquer qualitativement la répartition des charges, champ et potentiel électriques dans la structure. Par simplification, on admettra que la permittivité du semiconducteur et de l'isolant sont identiques.

Il y a quelque ressemblance avec la diode Schottky, avec l'isolant en plus. La charge d'espace du semiconducteur P (donc négative) est compensée par un plan d'électrons libres manquants à l'interface métal-isolant. Le champ est constant dans l'isolant. Le potentiel électrique qui se développe est donc la résultante du champ dans l'isolant et du champ dans la zone de charge d'espace (ZCE).



3/ Que se passe-t-il maintenant si on applique une tension positive  $V_G$  sur la grille ? On admettra que le niveau de Fermi reste constant dans le semiconducteur.

Montrez qu'il existe une tension de grille  $V_{th}$  à partir de laquelle un phénomène très particulier se produit à l'interface isolant-semiconducteur.

Que diriez-vous qu'il se passe lorsqu'on augmente la tension de grille au-delà de  $V_{th}$  ? Montrer alors que toute augmentation de la tension « tombe » sur le seul isolant.

En déduire la densité de charge d'inversion dans le canal en fonction de l'écart de tension  $V_G - V_{th}$ , puis la conductance du canal. On notera  $L$  la longueur de grille,  $Z$  sa largeur et  $\mu_n$  la mobilité des électrons dans la couche d'inversion.

Une tension positive sur la grille ( $V_G$ ) revient à une tension négative sur le semiconducteur, donc  $V_{bi}$  est simplement augmenté de  $V_G$ . Aucun courant ne passe, à cause de l'isolant.

La tension de seuil  $V_G = V_{th}$  lorsque  $E_F$  côté semiconducteur atteint le bas de la BC du semiconducteur, amenant à la création d'un plan mince d'électrons libres à l'interface avec l'isolant. C'est une couche d'inversion (puisque le semiconducteur est de type P).

Lorsqu'on augmente  $V_G$  au-delà de  $V_{th}$ ,  $E_F$  à l'interface isolant bouge très peu, car la BC se remplit très rapidement avec une faible variation de  $E_F$  (en conséquence de la distribution de Fermi-Dirac). La ZCE ne varie quasiment plus et l'essentiel de la tension excédentaire se retrouve sur l'isolant. La charge du plan d'électron est compensée par celle (positive) du côté métal (en plus de la compensation de la ZCE). L'ensemble se comporte alors comme un condensateur plan, où les armatures sont d'un côté le métal et de l'autre la couche d'inversion, le semiconducteur se comportant comme un conducteur ordinaire. Par conséquent, la charge de la couche d'inversion est déterminée par la capacité de ce condensateur, sous la tension  $V_G - V_{th}$ .

$$C = \epsilon L Z / d_{ox} \quad ; \quad Q = \epsilon L Z (V_G - V_{th}) / d_{ox}$$

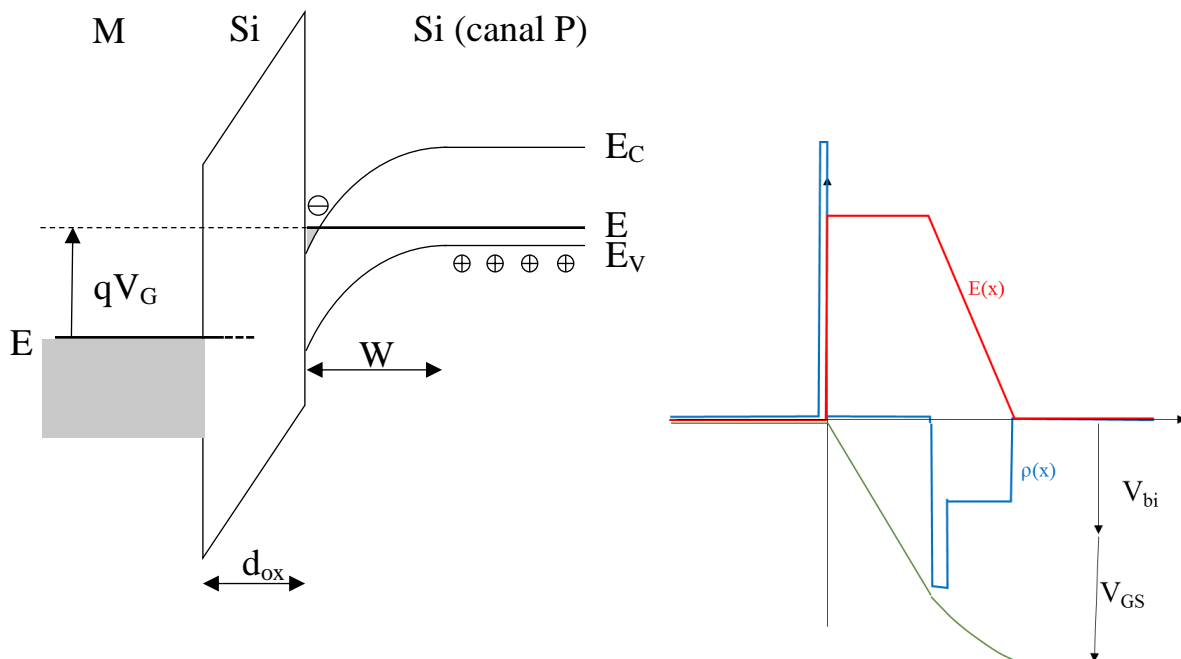
Pour un conducteur volumique on a comme conductivité (en  $\Omega.m$ ) :  $\sigma = \rho \mu_n$ , où  $\rho$  est la densité volumique de charge et  $\mu_n$  la mobilité des électrons (en  $m^2/V.s$ ). Mais comme on raisonne sur un plan d'électrons, la conductivité d'un plan est en  $\Omega$ ,  $\rho$  est une densité surfacique de charge et la formule de la résistance ne fait plus intervenir l'épaisseur du plan :

$$\rho = Q / LZ = \epsilon (V_G - V_{th}) / d_{ox} \quad ; \quad \sigma = \epsilon \mu_n (V_G - V_{th}) / d_{ox}$$

Résistance du canal :  $R = L / (Z\sigma)$  ; conductance du canal :  $Z\sigma / L = \epsilon \mu_n (V_G - V_{th}) Z / (L d_{ox})$

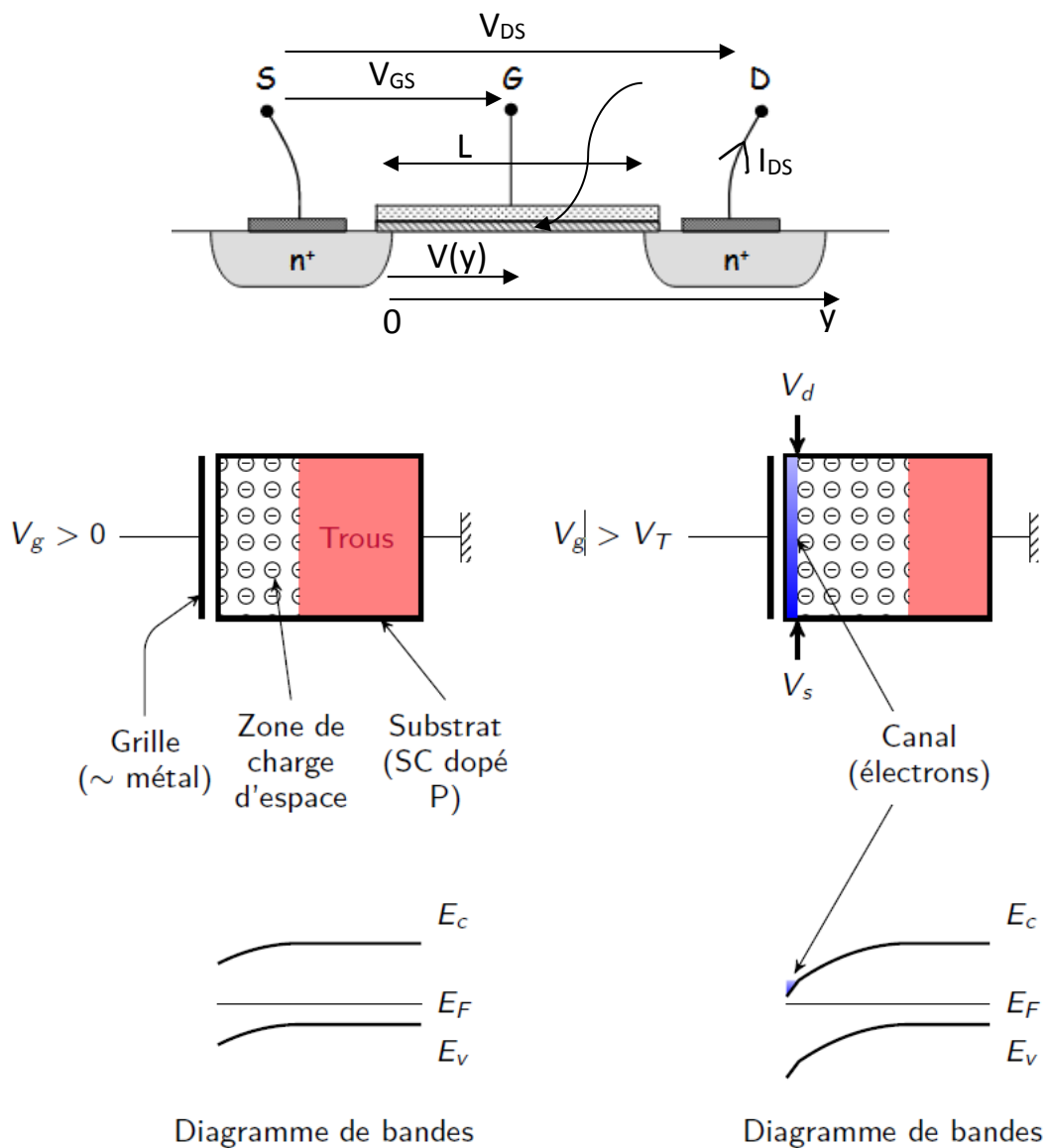
On arrive donc à la formule du courant de drain  $I_{DS}$  (= courant drain-source) en fonction de la tension de drain (régime ohmique) et de l'écart à la tension de seuil de la grille :

$$I_{DS} = \epsilon \mu_n Z (L d_{ox})^{-1} (V_G - V_{th}) V_D$$



4/ On considère maintenant la dépendance du courant  $I_{DS}$  avec la tension  $V_{DS}$  (régime non ohmique). Il se produit alors que l'écart de tension avec la tension de seuil n'est pas uniforme le long du canal. Ecrire l'équation différentielle vérifiée par la tension  $V(y)$  le long du canal,

puis montrer qu'elle s'intègre facilement. En déduire l'expression de la caractéristique courant-tension  $I_{DS}(V_{DS})$ .



Le long d'un élément infinitésimal  $dy$  le long du canal, on a :

$$dV = I_{DS} \cdot dy / (Z\sigma)$$

qui n'est rien d'autre que la loi d'Ohm sur ce petit segment.

$$\text{Or } \sigma = \epsilon \mu_n (V_G - V_{th} - V(y)) / d_{ox}$$

Car au point  $y$  du canal, la chute de tension entre la grille et le canal est réduite de  $V(y)$ .

$$\text{Donc } I_{DS} \cdot dy = \epsilon \mu_n Z [(V_G - V_{th} - V(y)) / d_{ox}] \cdot dV$$

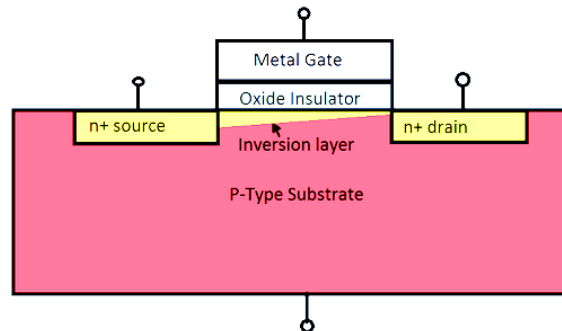
C'est une équation à variables séparées qui s'intègre instantanément entre  $y=0$  et  $y=L$ .

$$\text{On arrive alors à ce résultat pour le courant } I_{DS} : I_{DS} = \epsilon \mu_n Z (L d_{ox})^{-1} [(V_{GS} - V_{th}) - V_{DS}/2] V_{DS}$$

5/ Montrer qu'à partir d'une certaine tension  $V_{DS}$ , le canal se « pince » au niveau du drain. On admettra qu'alors, le courant  $I_{DS}$  est « saturé » et n'augmente plus avec  $V_{DS}$ . Que vaut  $I_{DSsat}$  ?

La formule ci-dessus fait apparaître une sous-linéarité lorsque  $V_{DS}$  augmente. La saturation est obtenue lorsque la dérivée s'annule, soit  $V_{DS} = (V_{GS} - V_{th})$ . Au-delà de cette valeur, le modèle ci-dessus n'est plus correct. Le canal est « pincé » du côté drain, et ce pincement s'étend progressivement vers la source à partir du drain. Le courant se maintient et ne décroît pas comme le laisserait penser la formule.

On a donc  $I_{DSsat} = \epsilon \mu_n Z (L_{ox})^{-1} (V_{GS} - V_{th})^2 / 2$

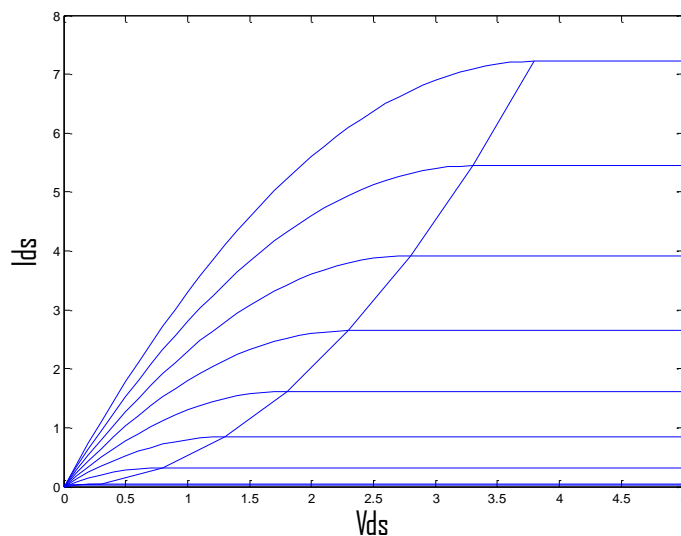


MOSFET à inversion avec canal « pincé »

En déduire la forme du faisceau de caractéristiques  $V_{DS}(V_{DS})$  pour des valeurs linéairement incrémentées de  $V_{GS}$ .

Lorsqu'on augmente  $V_{GS}$  par incréments constants, au départ (en dessous du seuil) le courant est nul, puis on voit apparaître des courbes saturantes, avec des courants de saturation augmentant comme le carré de l'écart au seuil.

Il est à noter que le point de saturation a pour abscisse  $(V_{GS} - V_{th})$  et une ordonnée qui varie comme  $(V_{GS} - V_{th})^2$ , il décrit donc une parabole lorsqu'on augmente la tension de grille  $V_{GS}$ .



```

vds=0:.1:5; nn=length(vds); vth=1.2; vgs=1:.5:5; qq=length(vgs);
vsat=vgs-vth; vsat=max(vsat,0); clear ids isat
for ll=1:qq
    kk=find(vds<=(vgs(ll)-vth)); kk=max(kk);
    isat(ll)=((vgs(ll)-vth)^2/2);
    for jj=1:nn;
        if jj<=kk
            ids(ll,jj)=((vgs(ll)-vth)-vds(jj)/2).*vds(jj);
        else
            ids(ll,jj)=isat(ll);
        end
    end
    plot(vds,ids(ll,1:nn)); hold on;
end
plot(vsat,isat)
xlabel('Vds'); ylabel('Ids')
hold off

```

### **Compléments (pour les très curieux)**

[https://les-electroniciens.com/sites/default/files/cours/transistor\\_mos\\_et\\_amplificateurs.pdf](https://les-electroniciens.com/sites/default/files/cours/transistor_mos_et_amplificateurs.pdf)