

PHS1102 – CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

DEVOIR

À faire en groupe de deux étudiants du même groupe de travaux pratiques.

À remettre avant 23h59 le jour de la remise (voir calendrier du cours) dans le dépôt Moodle prévu à cet effet.

Nom du fichier : **gX_matricule1_matricule2.pdf**, où **X** est votre numéro de groupe de TP.

La figure 1 illustre un transistor à effet de champ JFET (*junction field effect transistor*) formé d'un matériau semi-conducteur de résistivité $\rho = 0,065 \Omega \cdot \text{cm}$, de largeur $a = 1,20 \mu\text{m}$, de hauteur $b = 0,80 \mu\text{m}$ et de profondeur $e = 16 \mu\text{m}$.

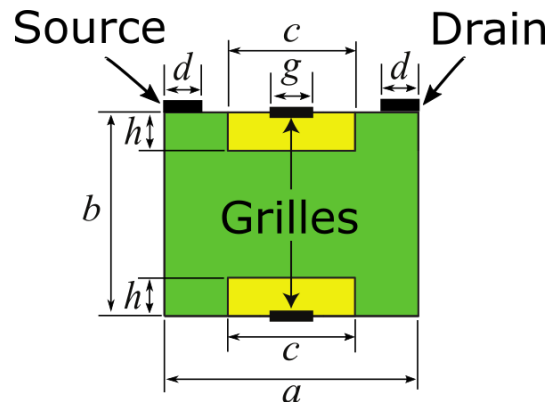


Figure 1 – Géométrie du transistor JFET étudié.

On a déposé quatre rubans métalliques sur les faces du transistor : la source située à la gauche de la face du haut, le drain situé à la droite de la face du haut et deux grilles de largeur $g = 0,10 \mu\text{m}$ centrées sur les faces du haut et du bas. La position des différentes bandes métalliques est indiquée sur la figure 1 par des traits noirs d'épaisseur prononcée. La source et le drain possèdent la même largeur $d = 0,30 \mu\text{m}$.

Le bloc est entouré d'air (conductivité $\sigma = 0$). Sous la grille du haut et au-dessus de la grille du bas, des zones de déplétion de charge (en jaune, conductivité $\sigma = 0$) se forment à cause du potentiel appliqué aux grilles. Ces zones rectangulaires (en première approximation) ont une largeur $c = 0,40 \mu\text{m}$, une hauteur $h = 0,25 \mu\text{m}$ et une profondeur e . La source et le drain sont à des potentiels de $+V_0$ et $-V_0$ respectivement, où $V_0 = 200 \text{ mV}$.

Estimation de la résistance source-drain par cartographie des champs

1. (6 pts) Les quatre esquisses de la page 3 représentent différentes cartographies des champs de la région conductrice du transistor. En vous basant sur ces esquisses :
 - i. (1 pt) Décrire ce que représentent les lignes pleines et les lignes en pointillé ;
 - ii. (2 pts) Laquelle des esquisses cartographie le plus fidèlement et le plus précisément le champ dans la région conductrice du transistor ? Justifier votre choix.
 - iii. (3 pts) Estimer la valeur numérique de la résistance R entre la source et le drain en vous basant sur la figure choisie précédemment. Justifier votre démarche.

Calcul numérique de la résistance source-drain par la méthode des différences finies

2. (7 pts) En utilisant la technique des différences finies, calculer la distribution de potentiel dans le transistor avec un maillage à intervalle constant entre les points de $0,05 \mu\text{m}$ selon x et selon y et une tolérance de $0,001 \text{ mV}$. Utiliser un tableau de 25 colonnes \times 17 lignes pour représenter le potentiel (il y a 24×16 cellules carrées, mais les valeurs du potentiel sont calculées sur les nœuds du maillage et non pas au centre des cellules).

Les zones de déplétion sont **exclues** des calculs, car il n'y passe aucun courant. Les conditions aux frontières sont :

- Conditions de Dirichlet avec un potentiel de $+V_0$ sur le ruban source et de $-V_0$ sur le ruban drain ;
- Condition de Neumann avec dérivée normale du potentiel nulle sur les autres frontières (régions de conductivité nulle $\sigma = 0$).

Vous avez *le choix* d'utiliser l'*une* des deux approches suivantes :

- Écrire un programme dans un langage de programmation au choix et remettre le tableau de potentiel ainsi que l'intégralité du code que vous avez rédigé et utilisé pour calculer le potentiel ;
- Utiliser le chiffrier Excel (approche suggérée) et remettre le tableau de potentiel avec une liste des formules de différences finies accompagnée d'un dessin illustrant leur position dans le tableau. Pour utiliser Excel, il faut activer la fonction de calcul itératif. La procédure d'activation dépend de la version d'Excel (2007, 2010, 2013 ou 2016). Pour Excel 2016, il faut aller dans **Fichier** ▶ **Options** ▶ , onglet **Formules** ▶ , cocher l'option **Activer le calcul itératif** et entrer les valeurs du nombre maximal d'itérations (**10000**) et de l'écart maximal (**0,001**).

3. (7 pts) En utilisant le tableau de potentiel précédent, calculer :

- (3 pts) Le courant total I qui circule entre la source et le drain (voir remarques ci-dessous) ;
- (1 pt) La densité de courant moyenne J_{moy} sur le ruban source (en module) ;
- (3 pts) La résistance R entre la source et le drain, puis discuter de l'écart entre cette valeur et la valeur obtenue à la question 1 (cartographie des champs). Qu'est-ce qui peut expliquer cet écart?

Remarques sur le calcul du courant

Pour déterminer le courant I circulant entre la source et le drain, il faudrait rigoureusement calculer l'intégrale de la densité de courant sur une surface S qui intercepte tout le courant. Ici, parce que nous avons utilisé une méthode de résolution numérique, on obtient une approximation de cette intégrale en sommant la densité de courant sur l'ensemble des éléments de surface $\Delta \vec{S}_i$ composant S :

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \approx \sum_i \vec{J}_i \cdot \Delta \vec{S}_i.$$

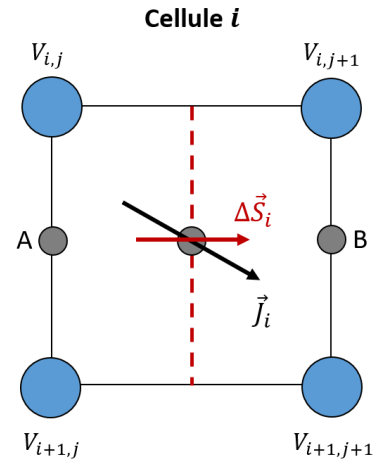
La manière la plus simple de calculer cette somme est de choisir une surface S verticale qui traverse le canal du transistor (zone verte entre les deux zones de déplétion en jaune), car tout le courant traverse nécessairement le canal. Les éléments de surface $\Delta \vec{S}_i$ sont alors orientés selon x et seule la composante J_x de la densité de courant contribue au courant (à cause du produit scalaire dans la somme).

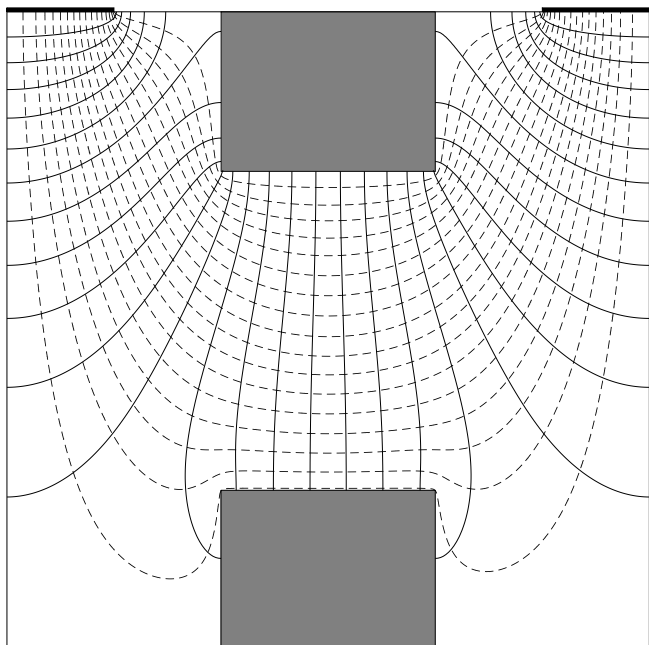
Nous vous suggérons d'utiliser une surface S située à mi-chemin entre deux colonnes de nœuds consécutives (voir figure ci-contre). Il faut alors calculer la valeur de $J_{x,i}$ au centre de l'élément de surface ΔS_i , puis faire la somme prescrite dans l'équation précédente. On obtient d'abord le champ électrique $E_{x,i}$ selon x en évaluant numériquement la dérivée du potentiel par rapport à x au centre de la cellule i :

$$E_{x,i} = -\frac{\partial V_i}{\partial x} \approx -\frac{\Delta V_i}{\Delta x_i},$$

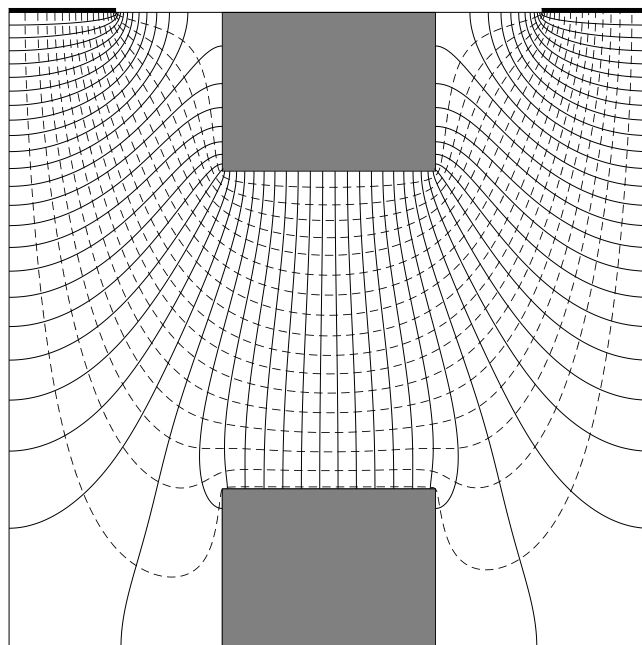
où Δx_i est la largeur de la cellule et ΔV_i est la différence de potentiel entre le centre de la face droite de la cellule et le centre de sa face gauche (points A et B sur la figure). La surface ΔS_i correspond au produit de la hauteur d'une cellule Δy_i par la profondeur e du bloc. Ainsi, dans le cas d'un maillage carré ($\Delta x_i = \Delta y_i$), on obtient :

$$I \approx \sum_i \sigma E_{x,i} \Delta S_{x,i} = -\sigma e \sum_i \frac{\Delta V_i}{\Delta x_i} \Delta y_i = -\sigma e \sum_i \Delta V_i.$$

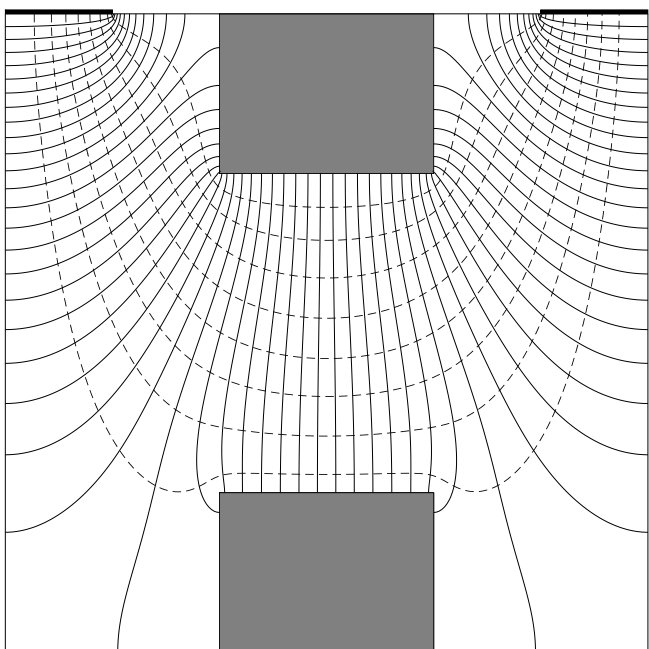




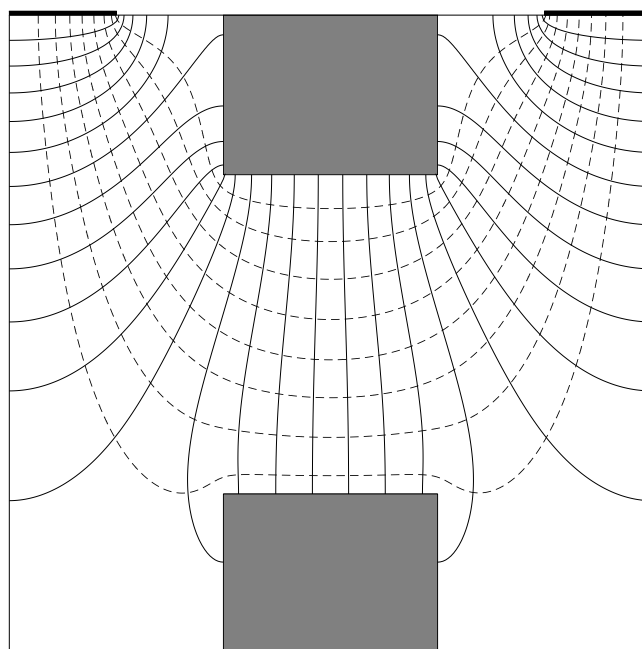
Esquisse A



Esquisse B



Esquisse C



Esquisse D

Figure 1 – Différentes cartographies des champs du transistor