

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA - JIJEL  
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

TRAVAUX PRATIQUES  
Destiné aux étudiants de Master 1  
Spécialité : Microélectronique  
Filière : Electronique

Polycopié de Travaux Pratiques :

# **Conception des circuits intégrés analogiques MOS**

TP MIC19 Présenté par : **ZIGHA Chemseddine**

ANNEE 2020

## **Sommaire**

Introduction au Logiciel PSpice .....	1
TP1 : Initiation au logiciel PSPICE : Simulation d'un amplificateur inverseur .....	2
TP2 : Simulation et Analyse des Caractéristiques d'un Transistor MOS.....	12
TP3 : Simulation et Analyse d'un Amplificateur à Source commune .....	14
TP4 : Simulation et Analyse d'un Amplificateur Source de Courant .....	15
TP5 : Initiation au Logiciel MICROWIND Dessin de Masque d'un Transistor MOS.....	16
ANNEXE.....	19

## **Avant-propos**

Ce polycopié se trouve être un support pédagogique de travaux pratiques, destiné aux étudiants de Master1 assurées au département d'électronique. Ce polycopié regroupe un certain nombre de circuits analogiques étudiés dans les différents chapitres du cours conception des circuits intégrés analogiques MOS. L'objectif de ces TP est d'implémenter sous PSPICE les différents circuits pour les simuler, les analyser et mieux les comprendre.

**Attention !!!**

Ce produit pédagogique numérisé est la propriété exclusive de l'université de JIJEL. Il est strictement interdit de la reproduire à des fins commerciales. Seul le téléchargement ou impression pour un usage personnel (1 copie par utilisateur) est permis.

## Introduction au Logiciel PSpice

PSICE est pour programme de simulation pour les circuits de simulation accent. Il s'agit d'un simulateur de circuit électronique. Il est utilisé pour concevoir et prédire le comportement des circuits électroniques analogiques et numériques. Il existe deux types de versions.

- PSICE : Il est utilisé pour les ordinateurs personnels.
- HSPICE: Il est utilisé pour les stations de travail ou les ordinateurs à haute puissance.

### ➤ Types d'analyse avec pspice

Etant sa bibliothèque comporte de nombreux composants électroniques comme les transistors, et beaucoup d'autres. Ainsi, vous pouvez facilement simuler de nombreux circuits électroniques en connectant facilement ces composants intégrés les uns avec les autres. Comme vous le savez, dans l'ingénierie électrique et électronique, vous avez toujours besoin d'une analyse des circuits AC et DC. Ainsi, vous pouvez effectuer les types d'analyse suivants avec l'aide de ce logiciel.

- Analyse linéaire et non linéaire des circuits AC
- Analyse linéaire et non linéaire des circuits DC
- Analyse du bruit des circuits
- analyse de sensibilité des circuits
- Divers types d'analyse des formes d'ondes électriques

Certains des principaux composants sont donnés ci-dessous:

- Sources de tension ac
- Sources de tension DC
- Composants électroniques passifs (résistances, condensateurs, inducteurs, commutateurs)
- Transistors
- Mosfets
- Portes numériques

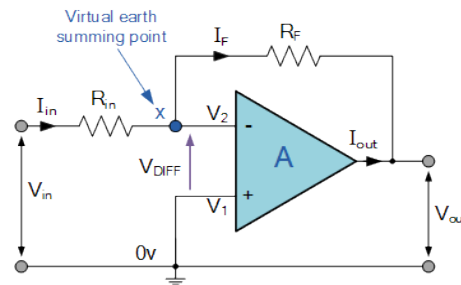
### ➤ Structure de fichier du circuit de simulation

Comme vous le savez pour tous les types de logiciels, il existe un type de format d'entrée et un type de format de sortie à un fichier utilisé pour ce logiciel. Fichier d'entrée pour ce logiciel de conception de circuit est « CIR ». Lorsque nous appuyons sur le bouton de simulation. Le fichier OUT est généré et. Le fichier BIN est exécuté sur l'ordinateur. Ce n'est pas une affaire sensible. Vous devez donner un nom unique à chaque composant. Les composants en double ne laisseront pas la simulation fonctionner. Vous devez également affecter un nœud de référence à chaque circuit pour lequel vous souhaitez simuler le circuit. Vous devez créer à nouveau netlist si vous avez apporté des modifications au circuit.

## TP1 : Initiation au logiciel PSPICE

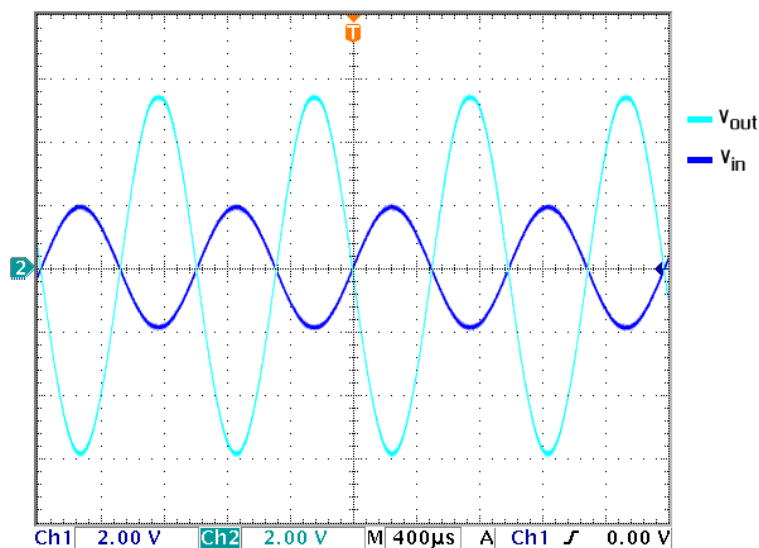
### Simulation d'un amplificateur inverseur

La sortie de l'amplificateur inverseur est la forme inversée du signal d'entrée comme le nom l'indique multiplié par le facteur de gain et est à 180 degrés hors phase en cas d'entrée sinusoïdale. Un diagramme de circuit simple d'un amplificateur d'inversion



**Fig.1** : Amplificateur d'inversion

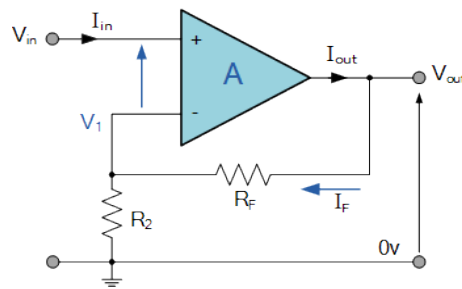
La sortie d'un amplificateur d'inversion est donnée dans la figure ci-dessous,



**Fig. 2** : Sortie de l'amplificateur inverseur

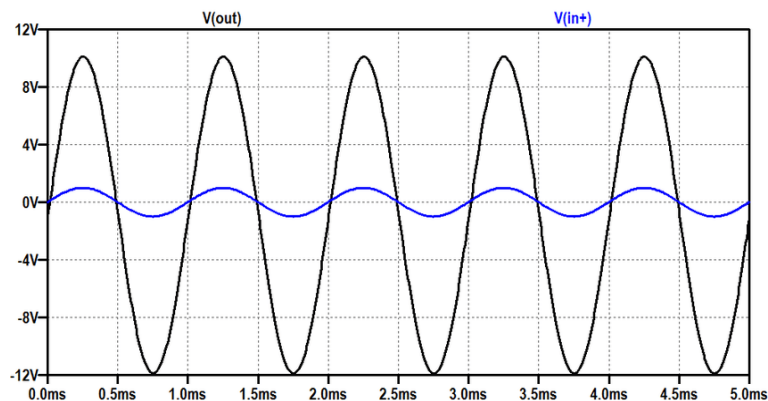
#### 1. Simulation d'amplificateur non-inverseur PSPICE

La sortie de l'amplificateur in non inverseur est la même que le signal d'entrée multiplié par le facteur de gain et est en phase en cas d'entrée sinusoïdale. Un diagramme de circuit simple d'un amplificateur non inverseur est indiqué dans la figure ci-dessous,



**Fig.3** : Amplificateur non-inverseur

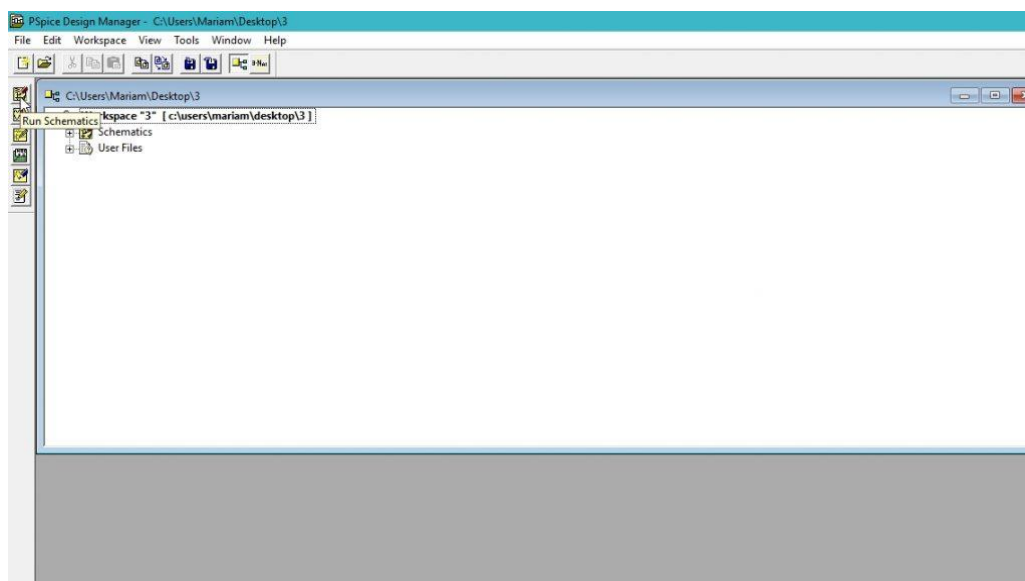
La sortie d'un amplificateur non inversant est donnée dans la figure ci-dessous,



**Fig.4:** Sortie de l'amplificateur non inverseur

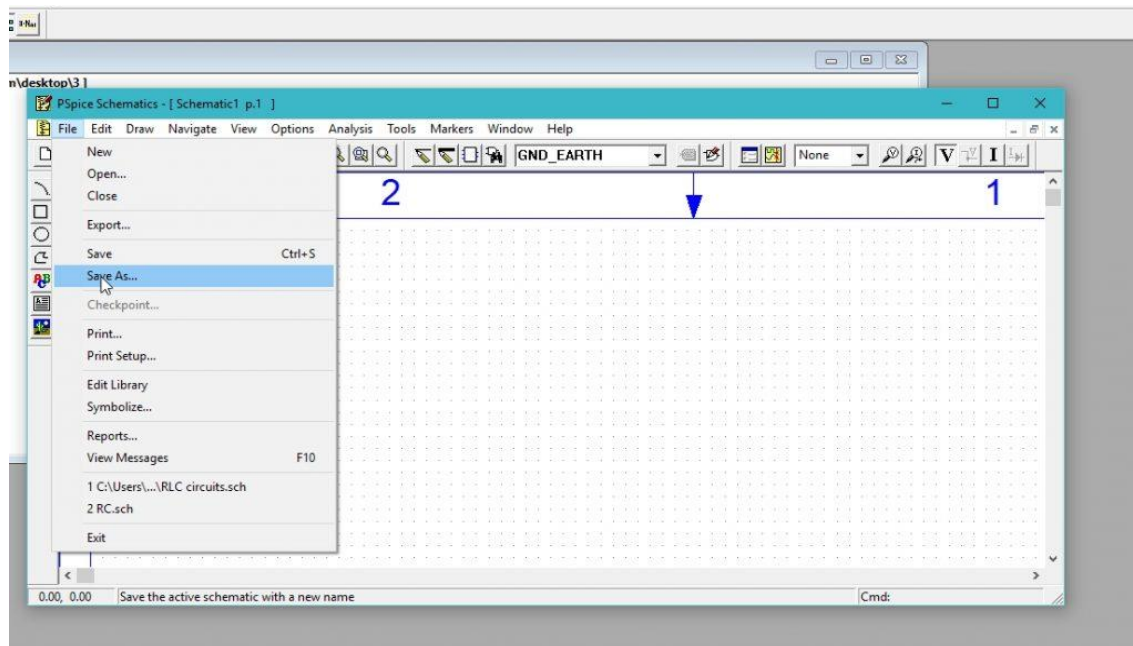
#### ➤ Explication avec exemple de simulation dans PSPICE

Concevoir un circuit simple d'un amplificateur inverseur et non-inversion avec quelques détails fournis est laissé pour vous comme un exercice. Ouvrez le gestionnaire de conception PSPICE sur votre PC en tapant le gestionnaire de conception dans la barre de recherche. Du gestionnaire de conception cliquez sur le bouton **schématique d'exécution** pour ouvrir un nouveau schéma blanc comme indiqué dans la figure ci-dessous,



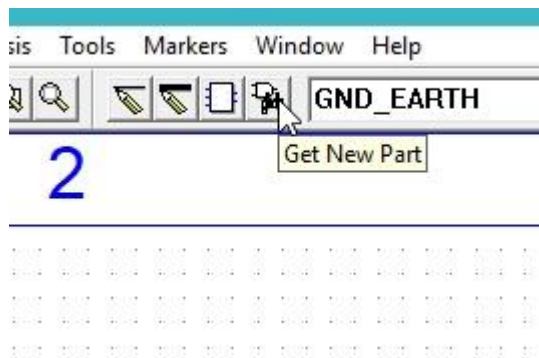
**Fig.5** : Ouverture de Pspice

Après avoir ouvert le nouveau schéma avant de sauter dans la conception d'abord enregistrer le schéma en cliquant sur le bouton **de fichier** dans le coin supérieur gauche, puis en sélectionnant enregistrer afin que nous puissions y accéder à tout moment à l'avenir. Reportez-vous à la figure ci-dessous,



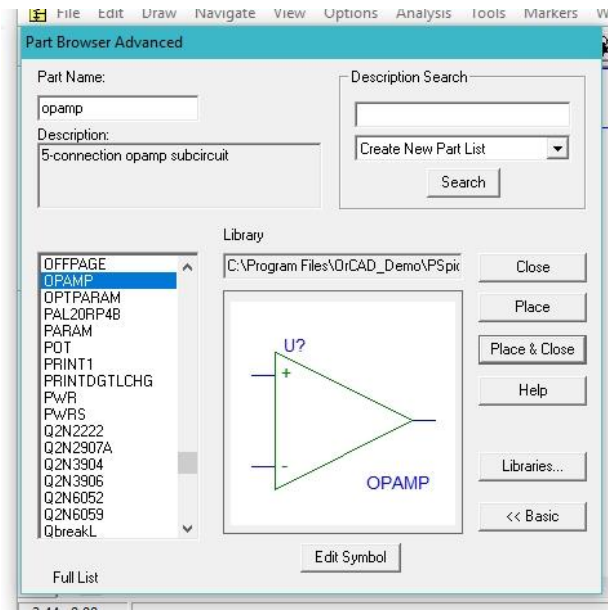
**Fig.6 :** Schéma de sauvgarde

Cliquez sur l'icône obtenir une nouvelle pièce (get new part) à la barre supérieure de la fenêtre schématique afin de rechercher les composants nécessaires à la conception de circuits.



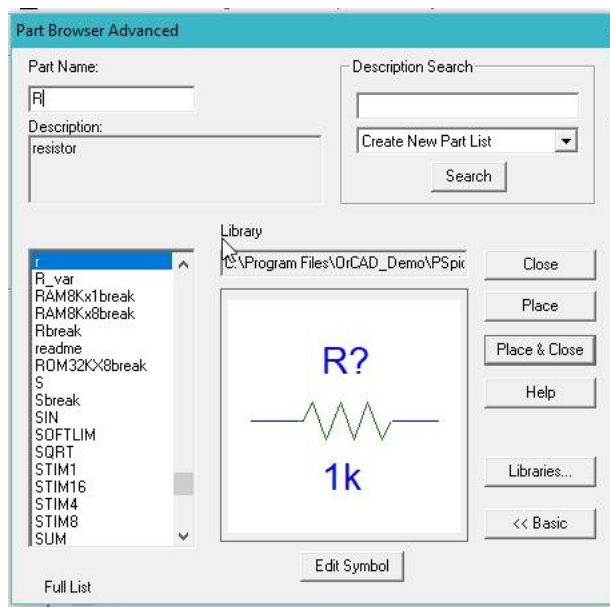
**Fig.7:** Obtenir une nouvelle pièce

Dans la nouvelle fenêtre get new part, tapez '**Opamp**' il affichera un amplificateur disponible dans PSPICE. À partir de cette liste, sélectionnez un opamp simple comme indiqué dans la figure ci-dessous,



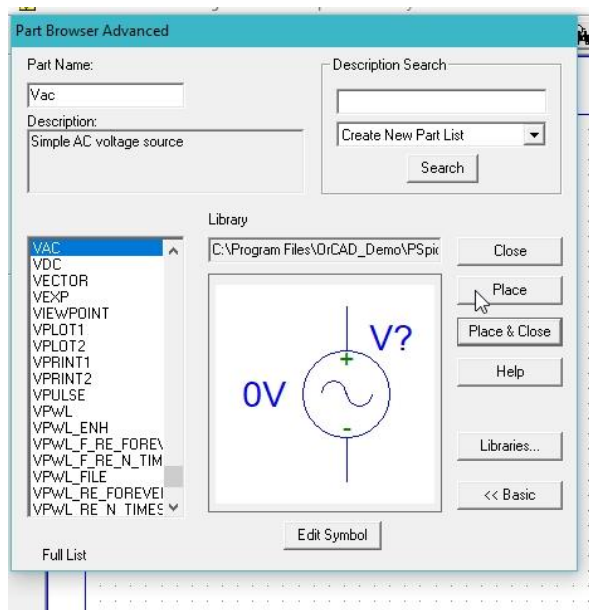
**Fig.8** : Placement d'opamp

Encore une fois ouvrir la fenêtre get new part, sélectionnez la résistance '**R**' de la liste donnée, puis cliquez sur place & fermer comme indiqué dans la figure ci-dessous



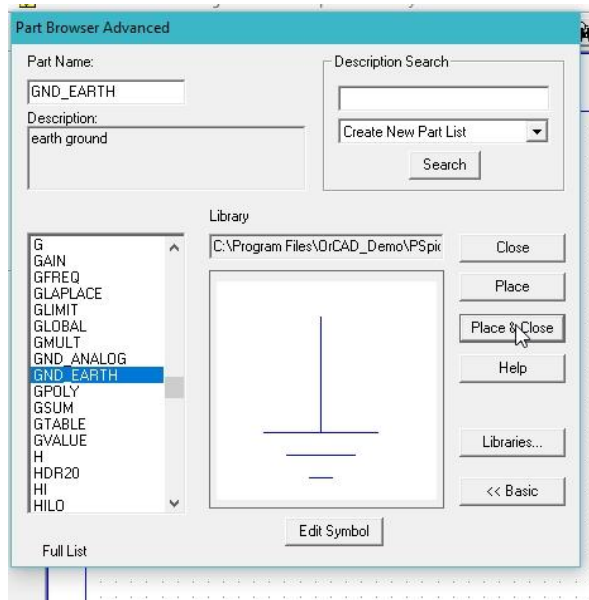
**Fig.9** : placement de la Résistance

Encore une fois ouvrir la fenêtre get new part, sélectionnez la tension **Vsin** de la liste donnée, puis cliquez sur place & fermer comme indiqué dans la figure ci-dessous



**Fig.10:** Placer la tension

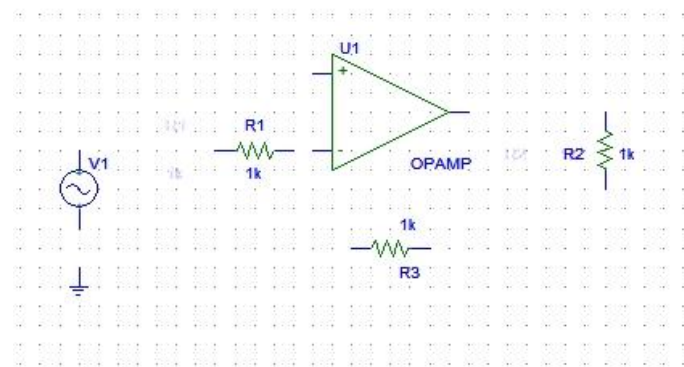
L'étape suivante consiste à placer un terrain, faire la même chose à nouveau et dans le type de pièce **Gnd** et sélectionner la mise à terre, puis cliquez sur place & fermer comme indiqué dans la figure ci-dessous.



**Fig.11:** Mise à terre

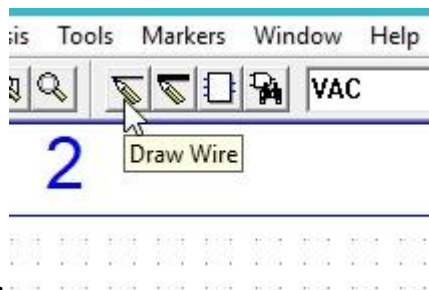


Les composants placés dans la fenêtre schématique sont indiqués dans la figure ci-dessous,



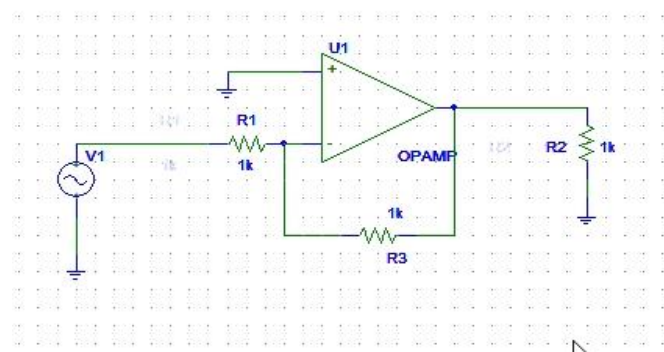
**Fig.12:** Composants placés

Cliquez sur l'icône Draw Wire à la barre supérieure de la fenêtre schématique afin de connecter les composants déjà placés pour la conception du circuit



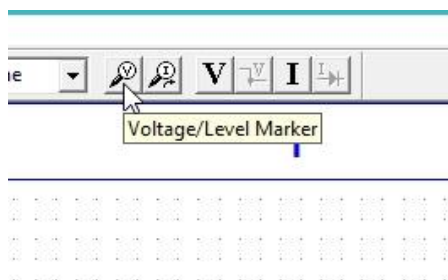
**Fig.13 :** Fil de dessin

Connectez tous les composants pour compléter le diagramme de circuit comme indiqué dans la figure ci-dessous,



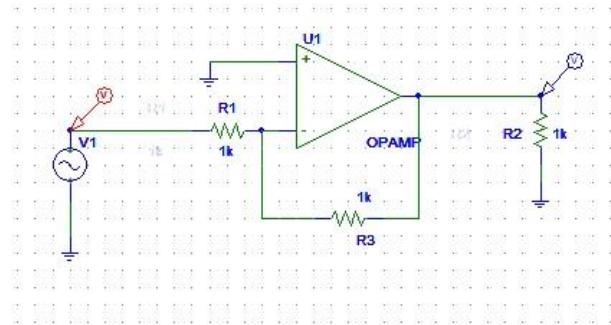
**Fig.14 :** Diagramme complet de circuit

En haut de la fenêtre schématique, cliquez sur le bouton Marqueur de tension/niveau comme, comme indiqué dans la figure ci-dessous,



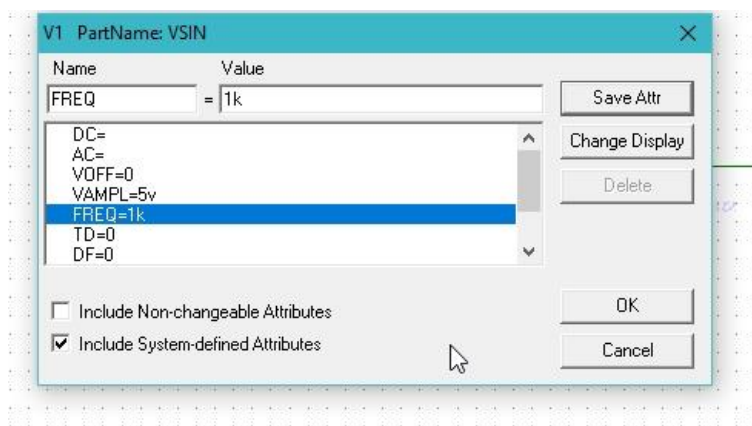
**Fig. 15 :** Marqueur de tension

Placez-le à la résistance de sortie et au nœud d'entrée comme indiqué dans la figure ci-dessous,



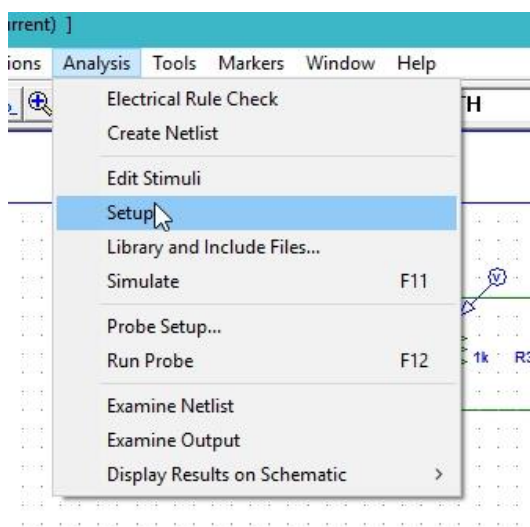
**Fig.16** : Marqueur de tension placé

La prochaine étape consiste à définir les attributs de l'alimentation de tension sinusoïdale d'entrée. Double clic sur l'alimentation d'entrée que vous avez connectée dans le circuit précédemment et réglez la valeur de la tension de l'alimentation à 5V et la tension OFF à 0 comme indiqué dans la figure ci-dessous,



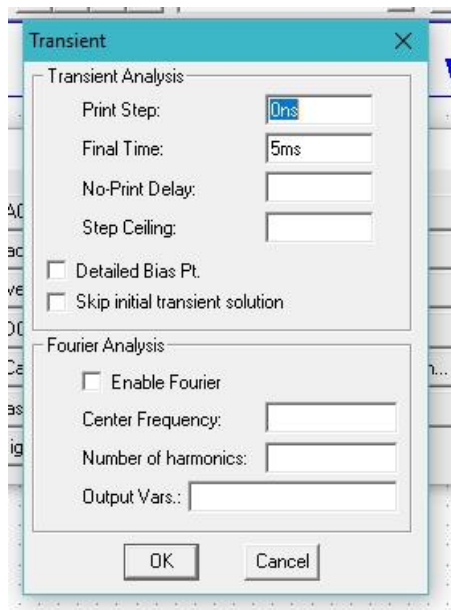
**Fig.17** : Attributs de l'alimentation

La prochaine étape consiste à ajuster les propriétés des simulations afin de produire le graphique de la tension au niveau du marqueur. Cliquez sur l'analyse (analysis), puis cliquez sur Le programme d'installation (setup) comme indiqué dans la figure ci-dessous,



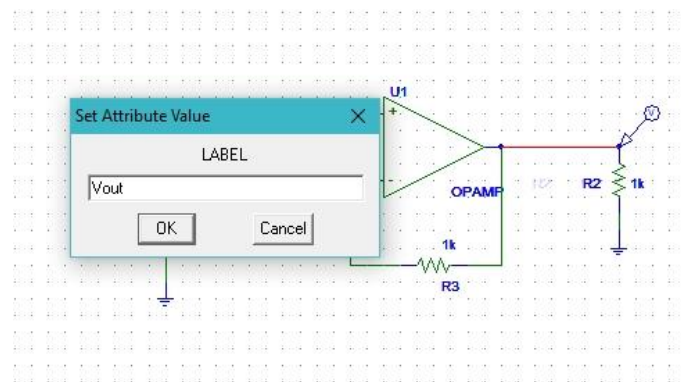
**Fig.18**: Configuration de l'analyse

Une fenêtre apparaîtra, cliquez sur le bloc transitoire sur la fenêtre et ajuster les propriétés de la fenêtre en fonction de votre exigence, se référer à la figure ci-dessous



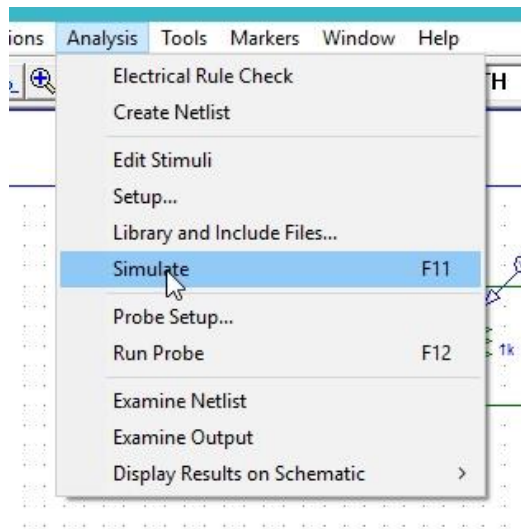
**Fig.19** : Propriétés transitoires

Si nous sommes intéressés à vérifier la tension sur un fil spécifique en dépit de le vérifier à un nœud, double clic sur le fil et auberge de la fenêtre qui apparaît en conséquence, tapez le nom du fil que vous voulez l'étiqueter avec, comme indiqué dans la figure ci-dessous,



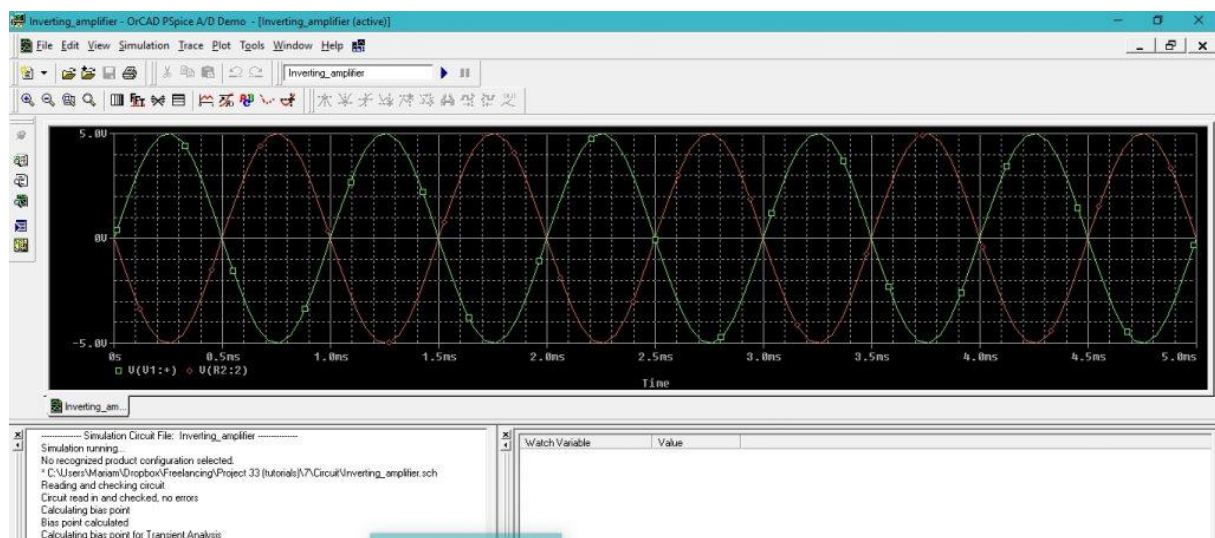
**Fig. 20** : Étiquetage des fils

Maintenant vient la partie de simulation, cliquez sur l'analyse à la barre supérieure de la fenêtre schématique, puis cliquez sur simuler comme indiqué dans la figure ci-dessous,



**Fig. 21 : Simulation**

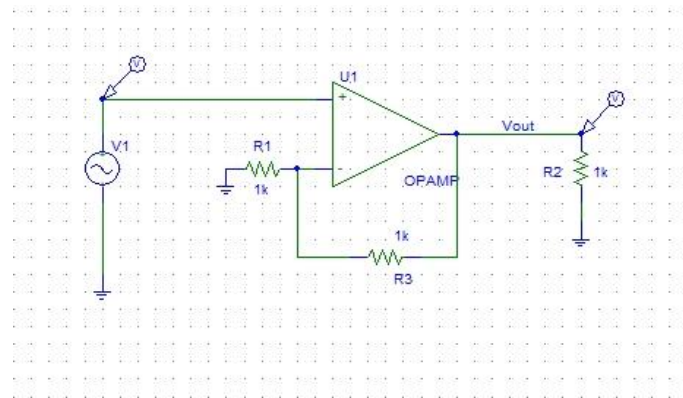
Une fenêtre schématique apparaîtra montrant la tension à travers la résistance de charge comme indiqué dans la figure ci-dessous,



**Fig. 22 : Sortie sur un amplificateur d'inversion**

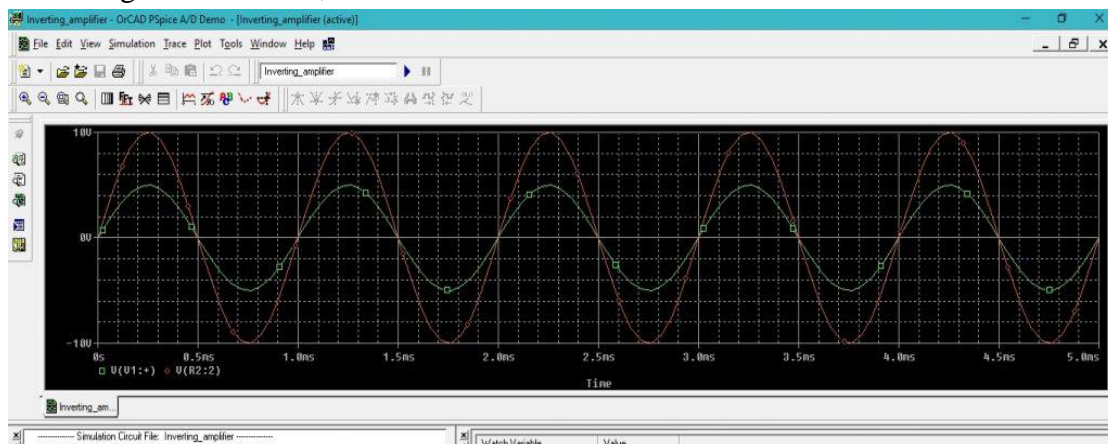
La sortie du circuit est conforme à la sortie prévue. Un amplificateur inverseur comme son nom l'indique inverse la tension appliquée du côté d'entrée de l'amplificateur opérationnel, et l'ampleur de la sortie est amplifiée en fonction du gain de l'amplificateur ajusté avec les résistances reliées à elle. Comme l'alimentation d'entrée est connectée au côté inverseur de l'amplificateur, c'est-à-dire le côté négatif de l'amplificateur, d'où la tension à la sortie est à 180 degrés opposée de la phase de l'entrée.

Déplaçons nous maintenant vers l'amplificateur non-inverseur, le diagramme de circuit d'un amplificateur non-inverseur, simulé dans le schéma de PSPICE est montré dans la figure ci-dessous.



**Fig.23** : Amplificateur non inverseur

Lorsque ce circuit est simulé en fonction des attributs de configuration discutés dans la simulation de circuit non-inverseur, la sortie à la suite de la simulation de circuit est indiquée dans la figure ci-dessous,



**Fig.24** : Amplificateur non inverseur

La sortie de l'amplificateur non inverseur est en phase avec l'entrée et son amplitude est augmentée ou diminuée en fonction du gain de l'amplificateur.

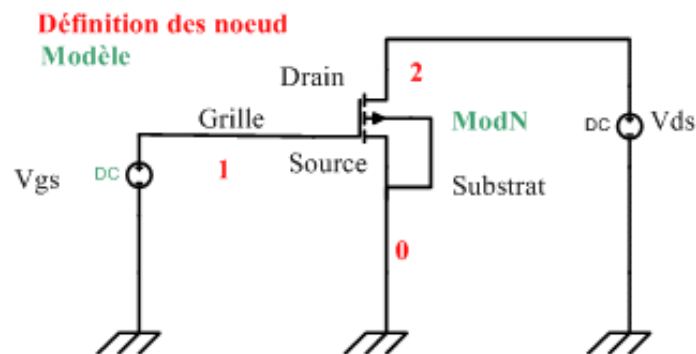
## TP2 : Simulation et Analyse des Caractéristiques d'un Transistor MOS

### 1. Introduction:

L'objectif de ce TP est de réaliser, à travers l'étude des comportements des transistors MOS, une initiation au langage de simulation analogique SPICE.

*fichier de description du circuit "\*.cir"*

L'écriture du fichier spice se fait dans un éditeur de texte quelconque, on choisit pour l'exemple la simulation de la caractéristique statique  $I_d=f(V_{gs})$  d'un transistor Nmos. Voici le schéma de principe



Ce qui donne le fichier de description suivant : "nmos.cir"

```
* transistor Nmos
*****
```

```
* fichier techno
.include cmostm.mod
```

```
* Schema du circuit (netlist)
Vds 2 0 dc 3.3V
Vgs 1 0 dc 1V
M1 2 1 0 0 modn L=0.6U W=2.5U
```

```
* simulation
.dc Vgs 0 3.3v 50mV
.end
```

On remarquera que :

- La techno est définie par la commande **.include**
- Pour le transistor l'ordre des connections ainsi que les paramètres sont donnés par

Mxx	drain	grille	source	substrat	options

- La ligne : **.dc Vgs 0 3.3v 50mV** signifie que l'on fait une simulation statique avec une variation de  $V_{gs}$  entre 0 et 3.3 volts avec un pas de 50mV

## 2. caractérisation des transistors NMOS et PMOS

On souhaite obtenir les caractéristiques courant/tension  $I_{ds} = f(V_{ds}, V_{gs})$  des transistors NMOS et PMOS pour un procédé de fabrication 0.6 micron. Les paramètres définissant le comportement électrique des transistors sont définis sur la figure.

Les tensions d'alimentation nominales sont  $V_{SS} = 0V$  et  $V_{DD} = 3.3 V$ .

Pour les simulations, on prendra:

-  $L_n = 0.6$  micron

/  $W_n = 3.0$  micron

-  $L_p = 0.6$  micron

/  $W_p = 6.0$  micron

### ➤ $I_{ds}$ fonction de $V_{gs}$

Tracer, pour les deux types de transistors, la courbe  $I_{ds}(V_{ds}, V_{gs})$  pour  $V_{ds}$  constant =  $V_{DD}$ , et pour  $V_{gs}$  variant entre  $V_{SS}$  et  $V_{DD}$ . Déterminer graphiquement les tensions de seuil  $V_{tn}$  et  $V_{tp}$  des deux types de transistors.

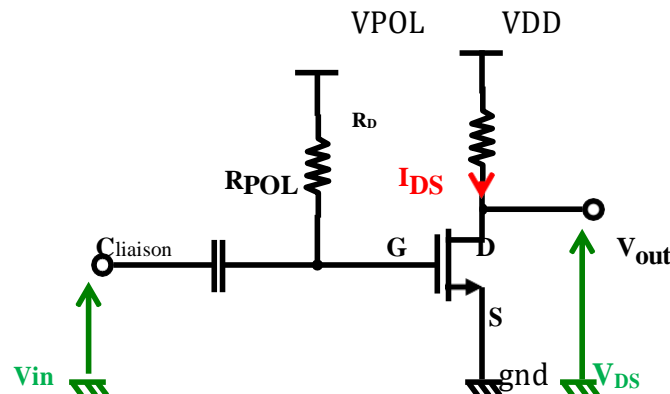
### ➤ $I_{ds}$ fonction de $V_{ds}$

Tracer, pour les deux types de transistors, la courbe  $I_{ds}(V_{ds}, V_{gs})$ , pour  $V_{gs}$  constant et pour  $V_{DS}$  variant entre  $V_{SS}$  et  $V_{DD}$ . On tracera ces courbes pour différentes valeurs de  $V_{gs}$  (on prendra par exemple,  $V_{gs} = 1V$ ,  $V_{gs} = 2V$ ,  $V_{gs} = 3V$ , et  $V_{gs} = V_{DD}$ ) Identifier les régimes linéaire et saturé des deux types de transistor MOS.



## TP 3 : Simulation et Analyse d'un Amplificateur à Source Commune

L'objet de ce TP est de familiariser les étudiants avec la polarisation et l'étude dynamique des transistors MOS (ici NMOS) lorsqu'ils sont utilisés en amplification. Le circuit étudié, présenté figure ci-dessous, est un amplificateur source commune à un transistor : un NMOS. La finalité de ce montage est pédagogique, un circuit *réel* aurait très probablement une architecture différente. La particularité, il y'a le fait que la polarisation soit réalisée avec une 2<sup>ème</sup> source de tension  $V_{POL}$ , en plus de la polarisation principale.



### Liste des composants :

- transistor NMOS,
- $R_D=1\text{ k}\Omega$ , résistance de drain,
- $R_{POL}=10\text{ k}\Omega$ , résistance de polarisation.
- $C_{liaison}=2,2\text{ }\mu\text{F}$ , capacité de liaison.

On Réalisation Le montage sur le schématique PSPICE, On prendra  $V_{DD}=10\text{ V}$ .

### 1. Polarisation (DC) du montage.

On souhaite polariser le montage de telle sorte que  $V_{out} = V_{DS} = V_{DD}/2$ .

- donner les valeurs de  $I_{DS}$  et  $V_{GS}$  correspondantes.
- Pour quelle valeur de  $V_{POL}$  obtient-on cette polarisation ?
- Justifier le choix de  $C_{liaison}$  (valeur et technologie de la capacité).
- Tracer la caractéristique  $I_{DS}=f(V_{DS})$  du transistor pour la valeur de  $V_{GS}$ . (vous tracerez la caractéristique pour  $V_{DS} : 0 - 9\text{ V}$ ).
- En déduire également la résistance  $R_{DS}$  du NMOS dans la zone linéaire du régime triode.
- Tracer la caractéristique  $I_{DS}=f(V_{GS})$  du transistor pour  $V_{DS} = 5\text{ V} = \text{cte}$ .
- En déduire  $g_m$  la transconductance du NMOS au point de polarisation.

### 2. Fonctionnement dynamique (AC) de l'amplificateur

Connecter l'entrée  $V_{in}$  de l'amplificateur à une tension sinusoïdale d'amplitude  $\sim 50\text{ mV}$  à la fréquence  $1\text{ kHz}$ .

- Relever la forme du signal de sortie  $V_{out}$ .
- Que se passe-t-il lorsque l'amplitude du signal sinusoïdal augmente peu ? fortement ?
- Remplacer la résistance  $R_D=1\text{ k}\Omega$  par  $2,2\text{ k}\Omega$ . Reprendre les deux questions précédentes

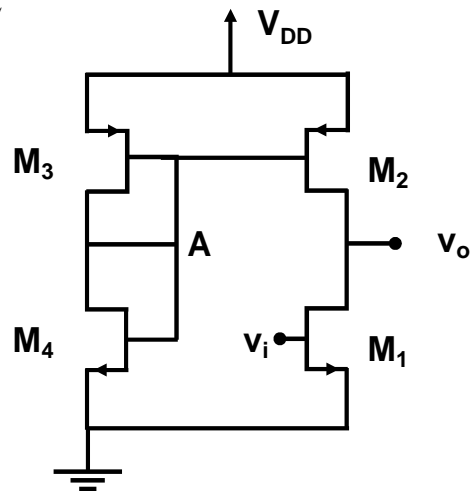


## TP 4 : Simulation et Analyse d'un Amplificateur Source de Courant

Soit la cellule CMOS donnée ci-dessous.

Données concepteur :

- Largeur des transistors  $M_1$  et  $M_2$  :  $W_1=W_2=100\mu\text{m}$  ;
- Tous les transistors sont à la longueur minimale  $L=L_{\min}=10\mu\text{m}$  ;
- $V_{DD}=5\text{V}$ . Paramètres fondeur :
- NMOS :  $V_{TO}=1\text{V}$  ;  $K_P=20\text{e-}6$  ;  $LAMBDA=0.01$  ;  $TOX=200\text{e-}10$  ;  $CGDO=200\text{e-}12$  ;  $CGSO=200\text{e-}12$
- PMOS :  $V_{TO}=-1\text{V}$  ;  $K_P=10\text{e-}6$  ;  $LAMBDA=0.01$  ;  $TOX=200\text{e-}10$  ;  $CGDO=200\text{e-}12$  ;  $CGSO=200\text{e-}12$



### 1. Polarisation

- a) Dimensionnez les transistors  $M_3$  et  $M_4$  de façon à polariser le point A à 3V.

*Aide à la résolution* :  $M_3$  et  $M_4$  ne servent qu'à assurer la polarisation de la grille de  $M_2$  à la valeur souhaitée. Pour déterminer le rapport des largeurs  $W_3/W_4$  des transistors, il faut évaluer les expressions des courants des deux transistors. La relation liant  $V_{DD}$  et les  $V_{GS}$  des transistors donne une seconde équation qui, combinée à la première, permet de trouver la valeur du rapport  $W_3/W_4$ . Sachant que la plus petite dimension possible pour un  $W$  est donnée par la dimension  $L_{\min}$  du fondeur et sachant que l'on cherche à minimiser la surface de silicium, on en déduit les valeurs numériques de  $W_3$  et  $W_4$ .

- b) Calculez les courants qui parcourent tous les transistors du montage.  
 c) Calculez la tension continue à appliquer sur la grille de  $M_1$  pour positionner la sortie  $V_o$  à  $V_{DD}/2$ , en régime continu.  
 d) Calculez les paramètres  $g_m$  et  $g_o$  des quatre transistors.  
 e) Simulation : Implantez le circuit sous pspice, simulez-le et vérifiez toutes les valeurs de polarisation précédemment calculées

### 2. Régime dynamique

Implantez le circuit sous PSPICE et simulez-le. Utilisez la commande ".dc" pour tracer la caractéristique de transfert (tension de sortie) / (tension d'entrée). Commentez.

## TP 5 : Initiation au Logiciel MICROWIND

### Dessin de Masque d'un Transistor MOS

#### 1. Objectifs

- Familiarisation avec le Logiciel **Microwind** qui permet de designer et de simuler des structures électroniques intégrées;
- Simulation et caractérisation du comportement statique et dynamique des transistors;
- Familiarisation avec les divers procédés et les effets d'échelle;
- Premiers contacts avec le dessin de masque, concept de la distance minimale, règles de conception;
- Compréhension des différentes étapes de fabrication d'un CI, coupe et structures 3D résultantes.

#### 2. Technologie et règles de dessin

Les dessins d'un circuit se font sur une grille dont l'unité est le  $\lambda$ . Cette unité est égale à la moitié de la technologie, ainsi la longueur minimale du canal d'un transistor est égale à  $2\lambda$ . Les intérêts d'une telle unité sont :

- le changement facile de technologie ;
- la réutilisation des dessins ;
- la réduction des coûts de dessin ;
- et qu'elle est utilisée par FreeScale.

En revanche il existe quelques inconvénients tels que :

- la production de dessins sous-optimaux ;
- et qu'elle n'est pas utilisée par tous les fondeurs.

Puisque dans notre cas nous utilisons une technologie  $0,25\mu\text{m}$ ,  $\lambda$  est égale à  $0,125\mu\text{m}$ .

#### 3. Niveau modélisation

Il existe plusieurs modèles pour calculer les caractéristiques d'un transistor MOS, plus le modèle est proche du modèle réel plus sa complexité augmente. Ainsi MicroWind implémente différents modèles :

**modèle de premier niveau** : le modèle utilisé est défini à partir de la théorie du transistor MOS idéal et valable uniquement pour des MOS de « grande dimension », c'est-à-dire pour  $L > 10\mu\text{m}$ .

**modèle de deuxième niveau** : le modèle utilisé est défini à partir de phénomènes physiques secondaires mais indispensables pour des technologies actuelles. MicroWind préfère utiliser le modèle du troisième niveau.

**modèle de troisième niveau** : le modèle est défini à partir du modèle de niveau 2 par *linéarisation* en incluant les effets de limitation des canaux étroits. Il est tout de même moins proche de la physique mais plus facile à utiliser. L'un des apports principaux par rapport

au modèle de niveau 1, est la présence d'une tension  $V_{DS_{sat}}$  à partir duquel  $I_{DS}$  est *linéaire*. Ce modèle est considéré comme obsolète à partir d'une technologie  $0,5\mu\text{m}$ .

**modèle de niveau BSIM4 :** le modèle est très proche des transistors actuels. Il tient compte de la réduction des dimensions à l'échelle du nano-mètre et fait apparaître les tensions de claquage. Dans la version « originale » de ce modèle, développé par Berkeley, il existe 200 paramètres. MicroWind permet d'en modifier seulement une vingtaine.

#### 4. Transistor N-MOS

##### a) Dessin

Lorsque nous avons dessiné un transistor N-MOS le plus petit possible la première fois, nous nous sommes rendu compte que la taille minimale du transistor était principalement dépendant de la taille minimale des contacts. En effet, comme nous pouvons le voir sur la figure 5.1, on pourrait dessiner un transistor très petit, mais les contacts nous oblige à *agrandir* ce dernier, comme on peut le voir à la figure 5.2.

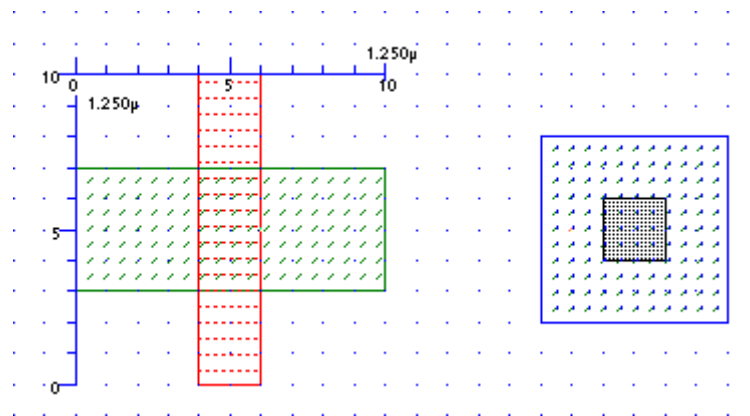


Fig. 5.1 Transistor N-MOS minimal sans contacts

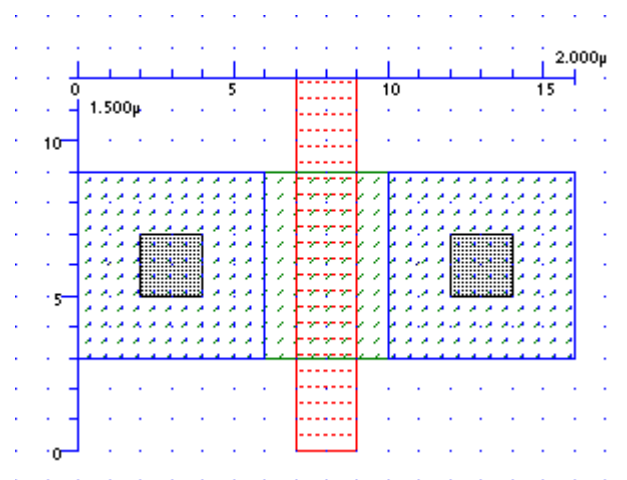


Fig. 5.2 Transistor N-MOS minimal avec contacts

### b) Les différentes couches

Sur la figure 5.3, nous pouvons distinguer plusieurs couches :

- en bleu (m1), le métal 1 ;
- en violet (co), le via du métal 1 jusqu'aux diffusions  $N^+$  ;
- en rouge (po), le poly-silicium de la grille ;
- en vert (n+), les diffusions drain et source ;
- en gris (P-substrate), le substrat  $P^-$ .

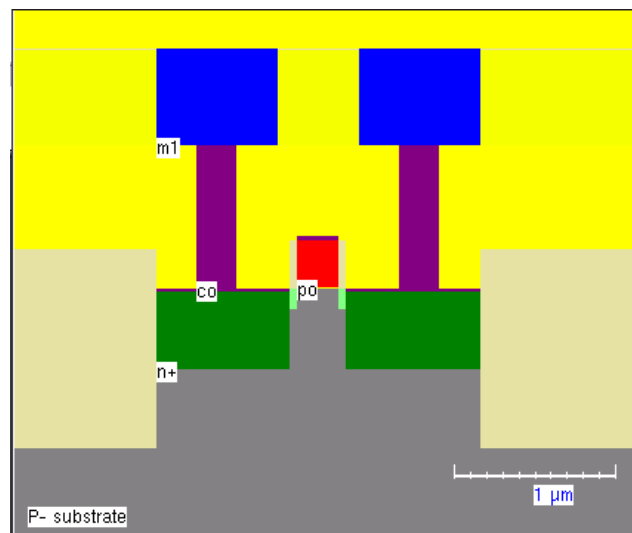


Fig. 53 Transistor N-MOS minimal vu en coupe

### c) Simulation statique

d) tracer les caractéristiques d'un transistor N-MOS de taille  $10 \times 0,25 \mu\text{m}$ , en fonction des différents modèles que nous propose MicroWind.

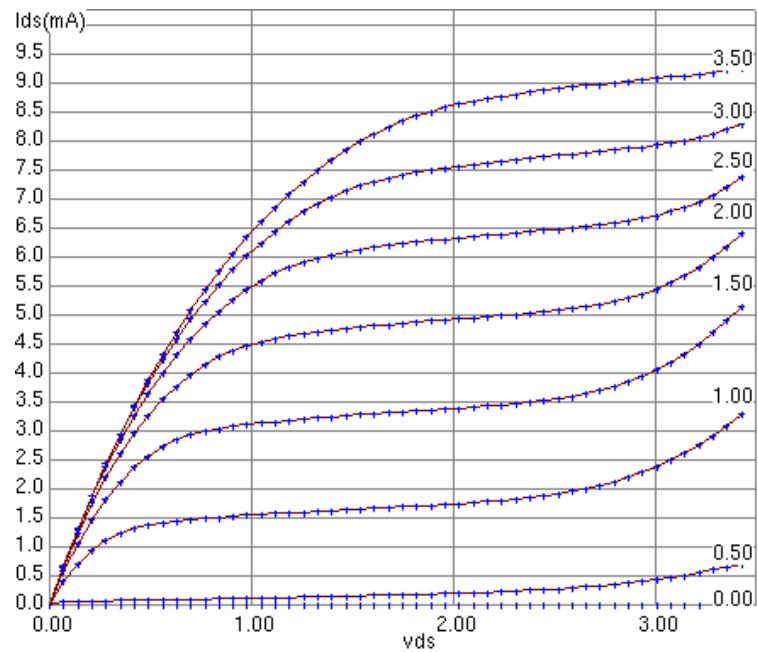
e) les caractéristiques obtenue avec le modèle BSIM4 pour le meme transistor sont donnée par les figures VOIR ANNEX.

Comparer Les figures des différents modèles avec le modèle complexe BSIM4, que remarquez vous ?

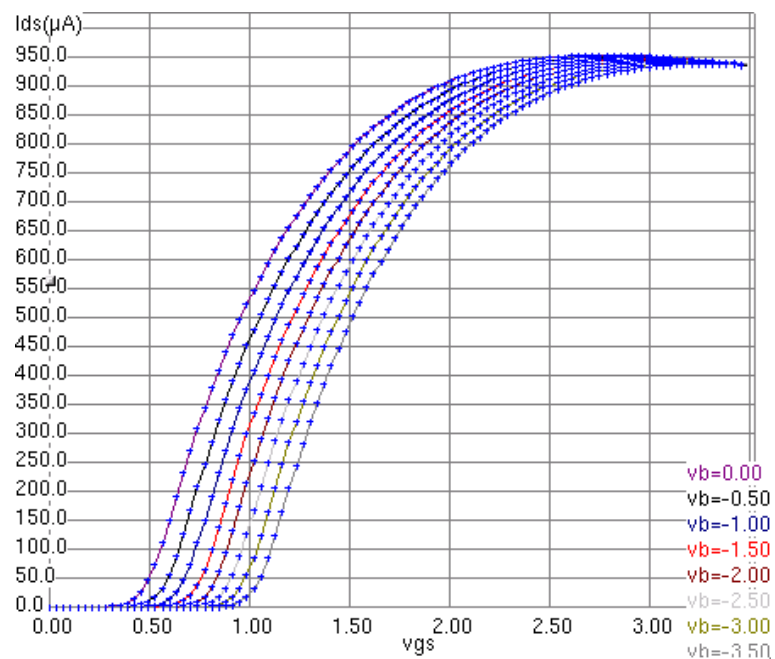
### N.B

*Refaire le même travail pour le transistor **P-MOS** de la même manière que pour le transistor N-MOS, nous nous sommes rendu compte que la taille minimal du transistor était principalement dépendant de la taille minimale des contacts. Il existe toutefois une différence importante, puisque le transistor P-MOS nécessite (dans notre cas) l'ajout d'un puits de diffusion  $N^+$ . Cela a pour conséquence d'utiliser une plus grande surface pour implanter un transistor P-MOS sur MICROWIND.*

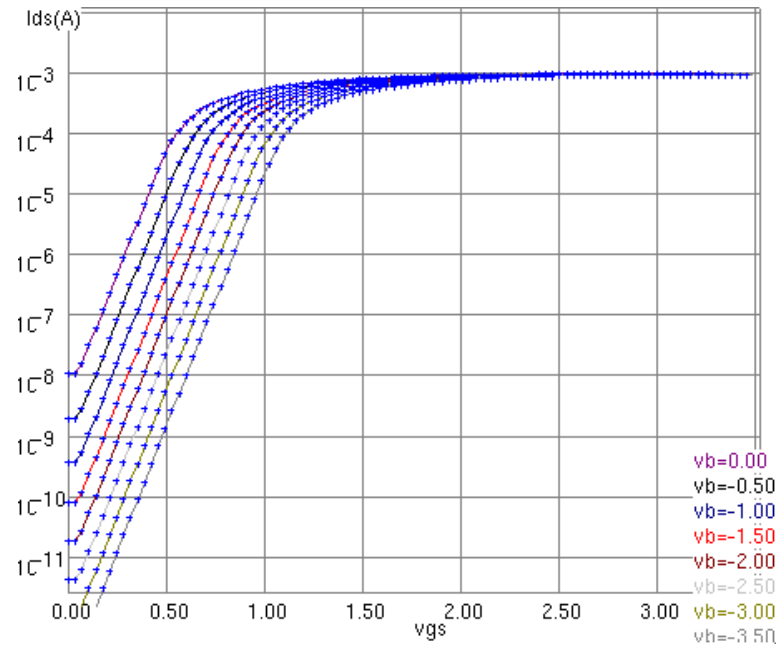
## ANNEXE



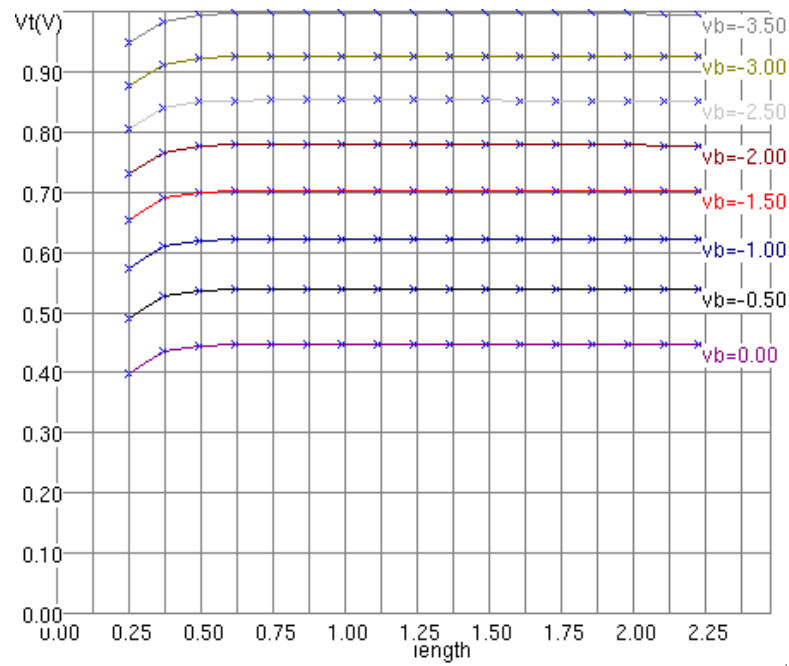
$I_D(V_{DS})$  pour un transistor N-MOS  $10 \times 0,25 \mu\text{m}$ , en BSIM 4



$I_D(V_{GS})$  pour un transistor N-MOS  $10 \times 0,25 \mu\text{m}$ , en BSIM 4



$I_D(\exp(V_{GS}))$  pour un transistor N-MOS  $10 \times 0,25\mu\text{m}$ , en BSIM 4



$V_{TH}$  pour un transistor N-MOS  $10 \times 0,25\mu\text{m}$ , en BSIM 4