

# Séance 3 : Réalisation d'un ampli à transistor

## Corrigé

### 1 Introduction

Les passages nécessitant des pré-déterminations ou des réflexions théoriques sont indiqués par un symbole ⚙️ dans la marge, ceux nécessitant de manipuler du matériel par le symbole 🔧 et les passages informatif par ℹ️.

#### 1.1 But de la manipulation et objectifs d'apprentissage

Le but de ce laboratoire est de réaliser un pré-amplificateur audio pour une radio AM en utilisant un transistor MOS. Ce pré-amplificateur est un amplificateur de classe A, particulièrement apprécié des audiophiles mais ayant un mauvais rendement.

À la fin de ce laboratoire, vous devez être capable :

- de réaliser le pré-amplificateur audio avec un étage source commune
- d'expliquer le fonctionnement de l'étage source commune et sa polarisation.
- d'utiliser le mode XY d'un oscilloscope.

#### 1.2 Prérequis

- Chapitre n° 17 du livre de référence (ed 5)
- Circuit RC du premier ordre.
- TP n° 2, exercice 6 sur la polarisation
- TP n° 5 portant sur les transistors MOS

### 1.3 Matériel

Composant	Valeur	Quantité
Résistance	56 ·	x1
	100 ·	x1
	150 ·	x1
	10 k·	x2
	30 k·	x1
Condensateur	10 nF	x2
Transistor TN0604N3- G		x1

### 1.4 Prédéterminations

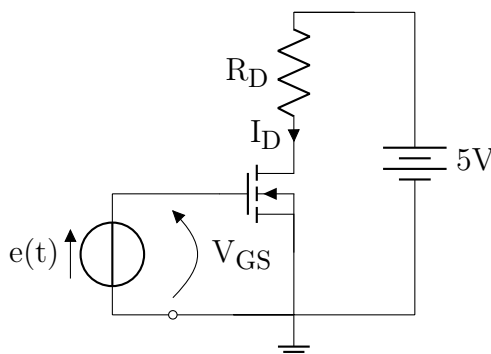
Les déterminations des questions 1, 6 et 9 doivent être faites avant l'arrivée au laboratoire. Le TP 5 portant sur les transistors MOS fait également office de prédéterminations.

## 2 Caractérisation du transistor

Le transistor utilisé dans ce laboratoire est un TN0604N3-G. Référez-vous à sa fiche technique lorsque des résultats analytiques sont demandés. Avant de dimensionner l'étage en source commune, il est nécessaire de caractériser le transistor afin de déterminer sa transconductance  $g_m$ . On cherche en particulier à déterminer sous quelles conditions il se comporte comme une source de courant commandée en tension.

### 2.1 Caractéristique $I_D = f(V_{GS})$

Pour relever la caractéristique  $I_D = f(V_{GS})$ , vous utiliserez le montage suivant. La résistance  $R_D$  sert à limiter le courant traversant le transistor pour ne pas le détruire.



**Question 1.** Déterminez  $R_D$  tel que le transistor ne dissipe pas plus de 65mW.

**Astuce**

Trouvez d'abord l'expression de la puissance dissipée par le transistor en fonction de son courant de drain  $I_D$ . Trouvez ensuite la valeur de  $I_D$  maximisant la puissance.

**Réponse :**

$P_T$  est la puissance dissipée par le **transistor** et  $E$  la tension d'alimentation connectée à  $R_D$ .

$$P_T = V_{DS} \cdot I_D = (E - R_D \cdot I_D) \cdot I_D$$

d'où :

$$P_T = E \cdot I_D - R_D \cdot I_D^2$$

L'extremum (ici : maximum) se trouve en :

$$\frac{\partial P_T}{\partial I_D} = 0 \iff E - 2R_D \cdot I_{D\max} = 0$$

$$\implies I_{D\max} = \frac{E}{2R_D}$$

d'où :

$$P_{T\max} = \frac{E^2}{4 \cdot R_D}$$

finalement :

$$R_D = \frac{E^2}{4 \cdot P_{T\max}}$$

On obtient finalement :

$$R_D = 96\Omega @ E = 5V$$



Assemblez ce montage en utilisant un transistor TN0604N3-G et une résistance  $R_D$  de 100  $\Omega$ .

**Astuce**

Référez-vous à la documentation technique pour connaître la configuration des pattes du transistor. Faites attention à bien identifier la partie *bombée* du composant et ne mélangez pas les pattes !

**Question 2.** Relevez manuellement des points de la caractéristique  $I_D = f(V_{GS})$  pour  $V_{GS}$  compris entre 0V et 2V.

**Astuce**

Pour aller plus loin, vous pouvez directement afficher la caractéristique en utilisant le mode XY de l'oscilloscope. Vous pourrez ainsi observer  $V_{DS}$  en fonction de  $V_{GS}$ . Puisque  $I_D = \frac{E - V_{DS}}{R_D}$ , on peut retrouver la caractéristique par opération graphique.

**Réponse :**



**Question 3.** Cette caractéristique est-elle linéaire ou quadratique ? Peut-on utiliser ce montage pour amplifier des signaux ( $V_{in}$ )

- ☐ de grande amplitude ;
- ☐ de petite amplitude ;
- ☐ de n'importe quelle amplitude.

**Réponse :**

La caractéristique n'est pas linéaire. Étant donné qu'il faut une relation linéaire pour obtenir une amplification sans déformation, ce montage ne peut servir d'amplificateur que pour de petits signaux en entrée. À cette faible amplitude, on pourra approximer la relation comme étant linéaire.



**Question 4.** Quelle est la tension de seuil  $V_{th}$  que vous observez ? Vérifiez que cette valeur est cohérente avec l'intervalle de valeurs donné dans la fiche technique.

**Réponse :**

La fiche technique indique une tension de seuil (Gate threshold voltage) comprise entre 0.6 et 1.65 V.



**Question 5.** Choisissez judicieusement un point de fonctionnement sur le relevé précédent.

Munissez-vous ensuite des caractéristiques de sortie du transistor se trouvant en annexe de cet énoncé et tracez-y la droite de charge du transistor pour une tension d'alimentation de 5V et  $R_D = 100\Omega$ . Indiquez dans quelle zone fonctionne le transistor sur cette droite de charge.

Déduisez-en l'amplitude maximale possible en sortie pour le point de fonctionnement choisi.

**Réponse :**

Un point de fonctionnement judicieux se trouvera dans la zone « passante » du transistor, c'est-à-dire sur la caractéristique de transfert dans l'abscisse est une tension supérieure à la tension de seuil.

### 3 Amplifier avec un montage en source commune

La partie précédente permet de conclure que l'amplification est possible avec un transistor MOS. Nous allons donc construire un montage amplificateur autour du transistor.

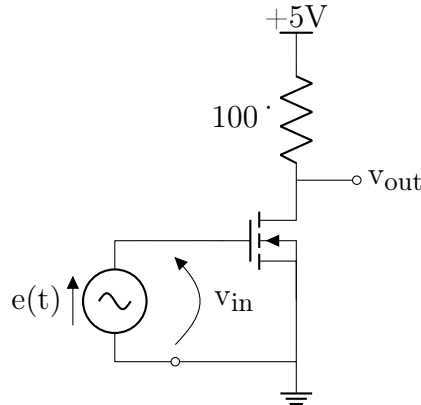


FIGURE 1 – Montage à améliorer

**Question 6.** Déterminez théoriquement la **forme** du signal de sortie  $v_{out}$  pour

$$v_{in} = V_{max} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

avec  $V_{max} = 2V$ ,  $V_{TH} \simeq 0.6V$  et  $f = 10kHz$ .

**Réponse :**

**Question 7.** Vérifiez expérimentalement la forme de  $V_{out}$ .

Donnez **deux raisons** pour lesquelles ce circuit ne convient pas pour réaliser un amplificateur linéaire ? Comment pourriez-vous régler ces problèmes ?

**Réponse :**

1. Le signal de sortie est écrêté et non linéaire.
2. Sa moyenne est non nulle. C'est un problème dans le cadre d'une application audio, un signal de sortie à moyenne non-nulle allant polariser le haut-parleur, l'abîmant ou dégradant la qualité audio.
3. L'amplification est non-linéaire.

Comment les régler :

1. Ajouter une composante continue pour se placer dans la zone de saturation  $\Rightarrow$  ajout d'une tension de polarisation.
2. Ajouter un filtre passe haut en sortie pour filtrer la composante continue.

3. Diminuer l'amplitude du signal d'entrée.



**Question 8.** Manipulez votre signal  $V_{in}$  pour essayer d'améliorer la forme de  $V_{out}$ .

**Astuce**

Le générateur possède une fonctionnalité « *offset* » permettant de décaler le signal positivement ou négativement.

**Réponse :**



**Question 9.**

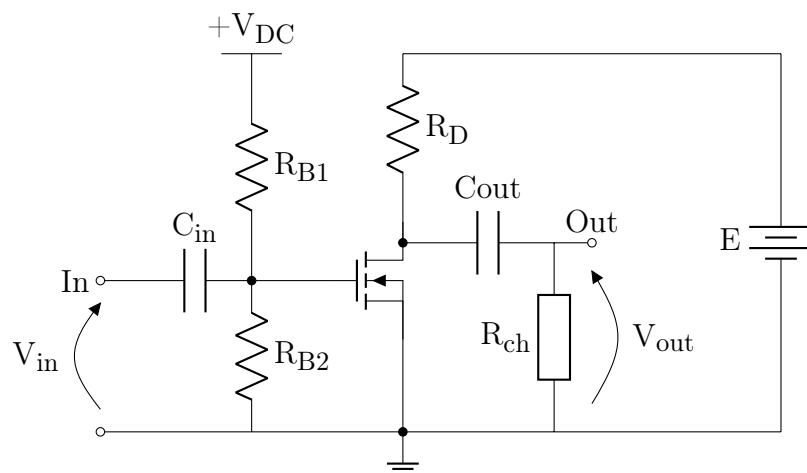
- Comment injecter un signal à moyenne nulle dans ce circuit en considérant les corrections apportées au circuit à la question précédente ?
- De même, que faire pour obtenir une tension de sortie à moyenne nulle ?

**Réponse :**

On ajoute une capacité de découplage en entrée et en sortie et un pont résistif pour la polarisation.



Vous devriez obtenir le montage suivant :



**Question 10.** Réalisez ce montage avec  $V_{DC} = 5V$ ,  $E = 5V$ ,  $C_{in} = C_{out} = 10nF$  et  $R_{B1} = 30k\Omega$ ,  $R_{B2} = 10k\Omega$ . Dans un premier temps, considérez un montage à vide, c'est-à-dire sans résistance de charge  $R_{ch}$ .

**Réponse :**



**Question 11.** Exprimez  $V_{out}$  en fonction de  $V_{in}$  et des différents paramètres de votre montage. Quel est le gain de votre montage ?

**Astuce**

Utilisez une représentation du montage à petit signal.

**Réponse :**

$$V_{out} = V_{ds} = -g_m \cdot R_D \cdot V_{in}$$

Bien que cette relation soit valable quel que soit le régime de fonctionnement du transistor, seule la partie où le  $g_m \neq 0$  est intéressante pour l'application.



**Question 12.** Vérifiez expérimentalement votre résultat.

**Astuce**

Le mode XY de l'oscilloscope vous permet d'afficher directement  $V_{out}$  (i.e.  $V_{ds}$ ) en fonction de  $V_{in}$  (i.e.  $V_{gs}$ ). Chargez votre montage avec  $R_{ch} = 10k\Omega$  pour réduire le déphasage entre les signaux.

Indiquez sur votre relevé les limites d'écartement et de linéarité, comparez avec le résultat de la question 5.

**Réponse :**

Utilisation du mode XY : mettre un signal triangulaire (10kHz, quelques volts) à l'entrée du montage, afficher  $V_{out} = f(V_{in})$  sur l'oscillo.

Il peut être nécessaire de charger un peu la sortie avec une résistance, en particulier pour diminuer la fréquence de coupure du filtre passe-haut en sortie. Étant donné que cette charge est bien plus élevée que l'impédance de sortie de l'étage amplificateur, elle aura un impact limité sur le gain de ce dernier (on obtient  $A = -g_m \cdot (R_D // R_{ch})$ ).

Le mode XY permet de constater l'effet de la polarisation sur le gain et sur l'écartement du signal.

## 4 Impact des paramètres du montage



### Question 13.

- Que se passe-t-il si la résistance de drain  $R_D$  change ?
- Que devient  $g_m$  ?
- La relation déterminée à la question 11 est-elle remise en cause ?

### Réponse :

Étant donné que  $g_m$  dépend de  $I_D$  et que  $I_D$  dépend univoquement de  $V_{GS}$ , si la polarisation ne change pas,  $g_m$  ne change pas non plus. Par contre, le point de fonctionnement de la caractéristique de sortie sera déplacé, étant donné que la pente de la droite de charge aura changé. L'excursion maximale en sortie dépendra donc de  $R_D$ .

La relation de la question 11 n'est donc pas remise en cause.



**Question 14.** Changez  $R_D$  par une résistance de 56 $\Omega$  puis de 150 $\Omega$ . Observez l'impact sur la forme de  $V_{out}$ .

### Réponse :



**Question 15.** Quelle sera la puissance dissipée par le transistor si vous utilisez une charge de 56 $\Omega$  ou 150 $\Omega$  ? En vous référant à la fiche technique du transistor, quelle puissance le TN0604N3-G est-il capable de dissiper ? Était-il raisonnable de vous faire réaliser le montage avec 56 $\Omega$  malgré le dimensionnement de la question 1 ?

### Réponse :

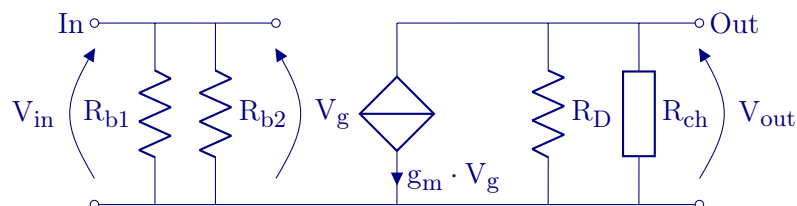
max 0.74 W à 25°C.



**Question 16.** Que se passe-t-il si une charge est branchée en sortie ?

### Réponse :

Le gain diminue. Il suffit d'étudier le schéma petit signal pour s'en convaincre :



Comme le gain dépend de la charge, cet étage n'est pas adapté à l'amplification de puissance.





**Question 17.** Vérifiez expérimentalement vos résultats en branchant les différentes résistances à votre disposition en sortie du montage ( $R_{ch}$ ).

**Réponse :**

## 5 Synthèse – dimensionnement d’un étage

Ce dimensionnement vous est proposé en guise d’exercice supplémentaire. Il n’est pas nécessaire de l’implémenter sur le protoboard.

Cahier des charges :

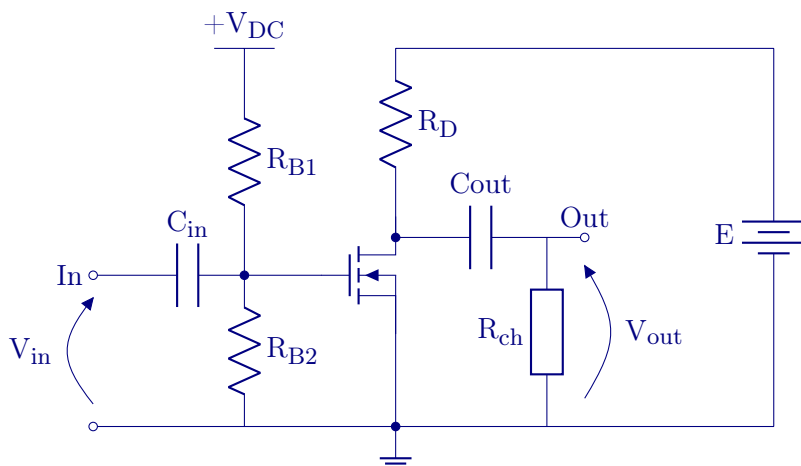
- Transistor : BS170 (caractéristiques en annexe B)
- Bande passante : 20Hz–20kHz
- Gain à vide : 26dB
- Amplitude de l’entrée : 0.1V, sinusoïdale, moyenne nulle
- Tensions de sortie à moyenne nulle
- Impédance d’entrée :  $Z_{in} \geq 10k\Omega$
- Impédance de sortie :  $Z_{out} \leq 1k\Omega$
- Puissance statique dissipée par le transistor :  $P_T \leq 0.5W$
- Alimentation : 12V continue
- Impédance de la charge :  $Z_{ch} \geq 3.3k\Omega$

**Question 18.** *Démarche proposée :*

1. Identifier les contraintes imposées par le cahier des charges.
2. Choisir la topologie de l’amplificateur (= schéma que vous avez obtenu en répondant aux questions précédentes).
3. Identifier les différents paramètres en fonction du cahier des charges (faire un schéma à petit signal).
4. Dimensionner les valeurs des différents composants du circuit sur base des courbes théoriques en annexe.
5. Déterminer la valeur de la tension de polarisation.

**Réponse :**

Nous allons utiliser le même montage à source commune étudié durant la manipulation :



Avec  $E$  et  $V_{DC}$  à 12 V, toutes les résistances et condensateurs devant être dimensionnés. Dans un premier temps, nous considérerons  $R_{ch}$  comme étant infinie afin d'étudier un montage à vide.

→ La première contrainte proposée est le **gain à vide** de 26 dB, ce qui correspond à un gain linéaire de  $10^{26/20} = 20$ .

→ Quelle information pouvons-nous tirer de la puissance maximale  $P_T$  ? Nous pouvons tout d'abord en déduire la tension  $V_{DS}$  à laquelle la puissance dissipée sera maximale :

$$\begin{aligned} P_T &= V_{DS} \cdot I_D \\ &= V_{DS} \cdot \frac{E - V_{DS}}{R_D} \\ &= \frac{E \cdot V_{DS} - V_{DS}^2}{R_D} \\ \Rightarrow \frac{\partial P_T}{\partial V_{DS}} &= \frac{E - 2V_{DS}}{R_D} = 0 \\ \Leftrightarrow V_{DS} &= \frac{E}{2} \end{aligned}$$

Nous pouvons déduire de cette valeur particulière une contrainte sur le courant maximal  $I_D$  :

$$\begin{aligned} P_T &= V_{DS} \cdot I_D \leq 0.5W \\ \Leftrightarrow \frac{E}{2} \cdot I_D &\leq 0.5W \\ \Leftrightarrow I_D &\leq \frac{1}{E}A \\ \Leftrightarrow I_D &\leq 83mA \end{aligned}$$

→ Cette contrainte sur le courant impose une contrainte sur la transconductance  $g_m$ . En utilisant la caractéristique de transfert du BS170 donnée en annexe, on peut trouver qu'à  $I_D \leq 83mA$  on a  $g_m \leq 0.215S$ .

→ Choisissons enfin un point de fonctionnement au repos. Afin de maximiser l'excursion de la tension de sortie, prenons un point au centre de la droite de charge, soit  $V_{DS} = 6V$ <sup>1</sup>.

1. Les plus attentif·ve·s d'entre vous auront remarqué que  $V_{DS} = 6V$  ne correspond pas au centre de la droite de charge *dans la zone de saturation* de la caractéristique de sortie. On est cependant suffisamment proche pour négliger la différence.

→ Nous savons qu'à cette tension,  $I_D \leq 83\text{mA}$ . Étant donné que l'équation de la maille en sortie du transistor est  $E - V_{DS} - R_D \cdot I_D = 0$ , nous avons  $R_D \geq 72\Omega$ . De plus, étant donné que la charge qui sera connectée en sortie du montage a une impédance pouvant descendre jusqu'à  $3.3\text{k}\Omega$ , nous devons choisir une impédance de sortie de notre montage beaucoup plus faible afin d'assurer une bonne adaptation d'impédance. Si nous négligeons l'impact du condensateur de sortie sur l'impédance de sortie du montage,  $Z_{\text{out}} = R_D$ . Il nous faut donc  $R_D \ll 3.3\text{k}\Omega$ , soit  $R_D \leq 330\Omega$ <sup>2</sup>.

→ Cette liste de contraintes établie, nous pouvons chercher une bonne combinaison de paramètres les respectant. En particulier, sachant que le gain du montage à source commune utilisé est  $A_v = -g_m \cdot R_D$ , on peut trouver que pour  $V_{GS} = 3\text{V}$ <sup>3</sup>, nous avons  $I_D = 50\text{mA}$  et  $g_m = 0.17\text{S}$ . Sachant que  $R_D = \frac{E - V_{DS}}{I_D}$ , nous avons en prime  $R_D = 120\Omega$ . Le gain du montage est donc  $A_v = 20.4$ , ce qu'on considérera comme *good enough*.

→ La polarisation à l'entrée du montage fixée, nous pouvons dimensionner les résistances  $R_{B1}$  et  $R_{B2}$  :

1.  $\frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot 12\text{V} = 3\text{V} \Leftrightarrow R_{B1} = 3 \cdot R_{B2}$
2. En négligeant à nouveau l'importance de  $C_{in}$  sur l'expression de l'impédance d'entrée du montage, on a  $Z_{in} = R_{B1} // R_{B2} \geq 10\text{k}\Omega$ , comme imposé par le cahier des charges.

En prenant par exemple  $R_{B1} = 120\text{k}\Omega$  et  $R_{B2} = 40\text{k}\Omega$ , on a bien  $Z_{in} = 30\text{k}\Omega > 10\text{k}\Omega$ .

⇔ Reste à dimensionner les condensateurs de découplage en entrée et en sortie du montage. Étant donné que les deux filtres qu'ils forment sont des passe-hauts, il faut leur choisir une fréquence coupure d'au plus 20Hz.

- Sachant que  $f_{c_{in}} = \frac{1}{2\pi \cdot (R_{B1} // R_{B2}) \cdot C_{in}} \leq 20\text{Hz}$ , on a  $C_{in} \geq 265\text{nF}$ .
- Sachant que  $f_{c_{out}} = \frac{1}{2\pi \cdot (R_D + R_{ch}) \cdot C_{out}} \leq 20\text{Hz}$ , et que  $R_{ch} \geq 3.3\text{k}\Omega$ , on a  $C_{out} \geq 2.32\mu\text{F}$ .

---

2. Le cahier des charges est même moins strict en imposant une impédance de sortie  $Z_{\text{out}} \leq 1\text{k}\Omega$ .

3. Attention, en plaçant  $V_{GS}$  à 3 V, l'intersection entre la droite de charge et la caractéristique de sortie correspondante n'est plus exactement à  $V_{DS} = 6\text{V}$ , mais plutôt aux alentours de  $V_{DS} = 5\text{V}$ . Ce point de fonctionnement au repos est néanmoins acceptable, étant donné qu'on a maximum 2 V d'amplitude pour  $V_{\text{out}}$ , ce que ce point de fonctionnement nous permet encore tout en restant dans la zone de saturation des caractéristiques de sortie.

## A Caractéristiques du TN0604N3-G

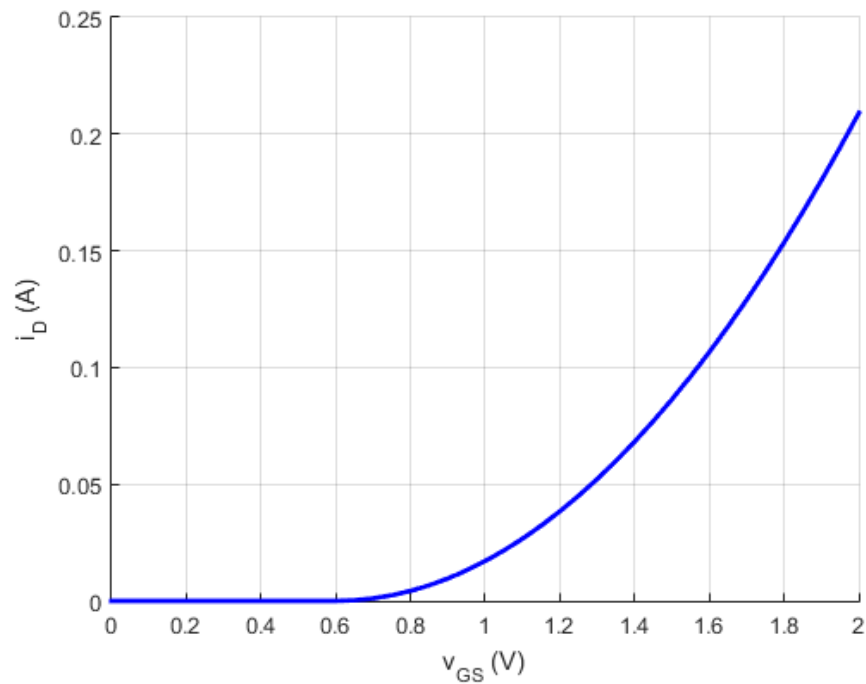


FIGURE 2 – Caractéristique de transfert

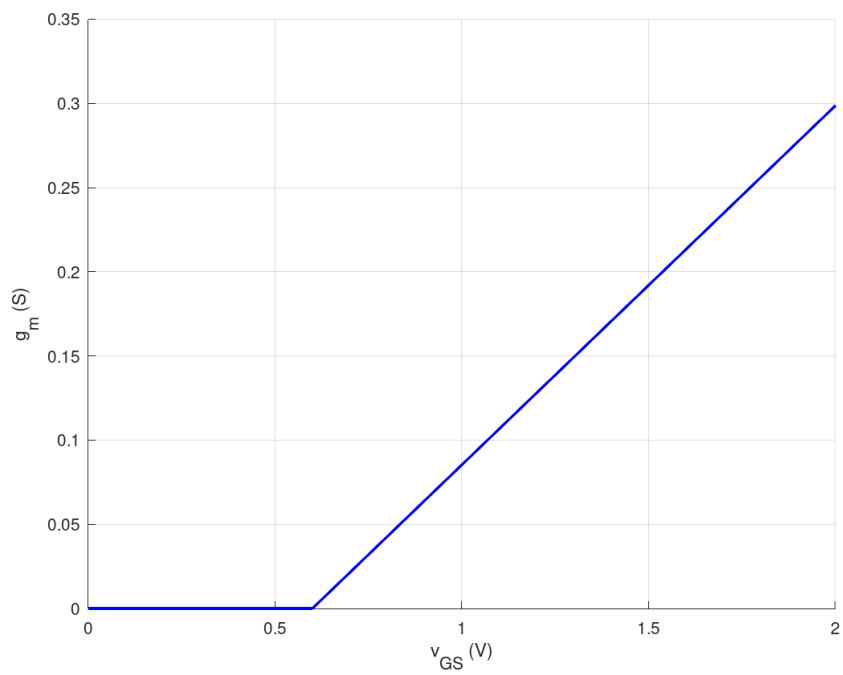


FIGURE 3 – Transconductance

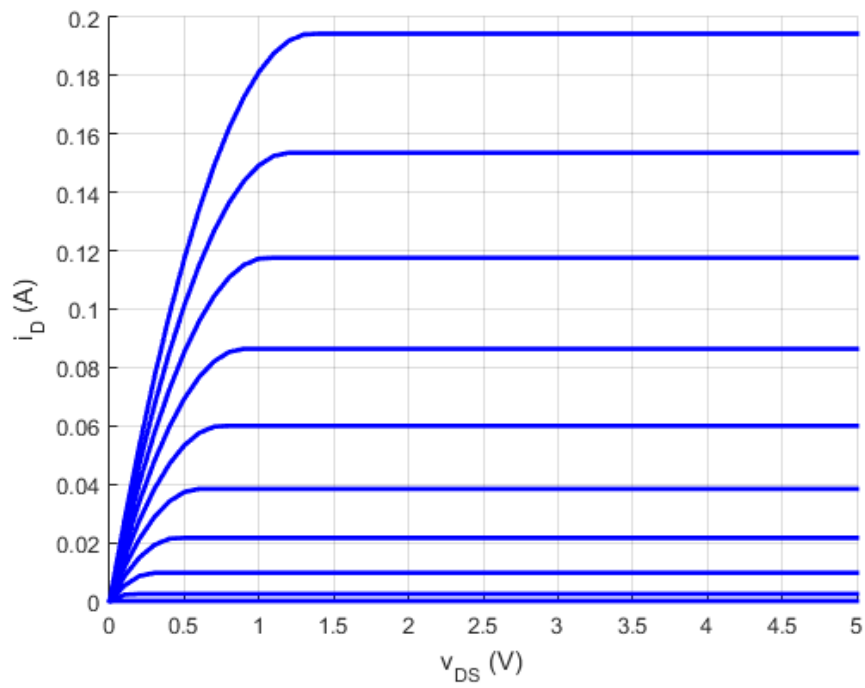
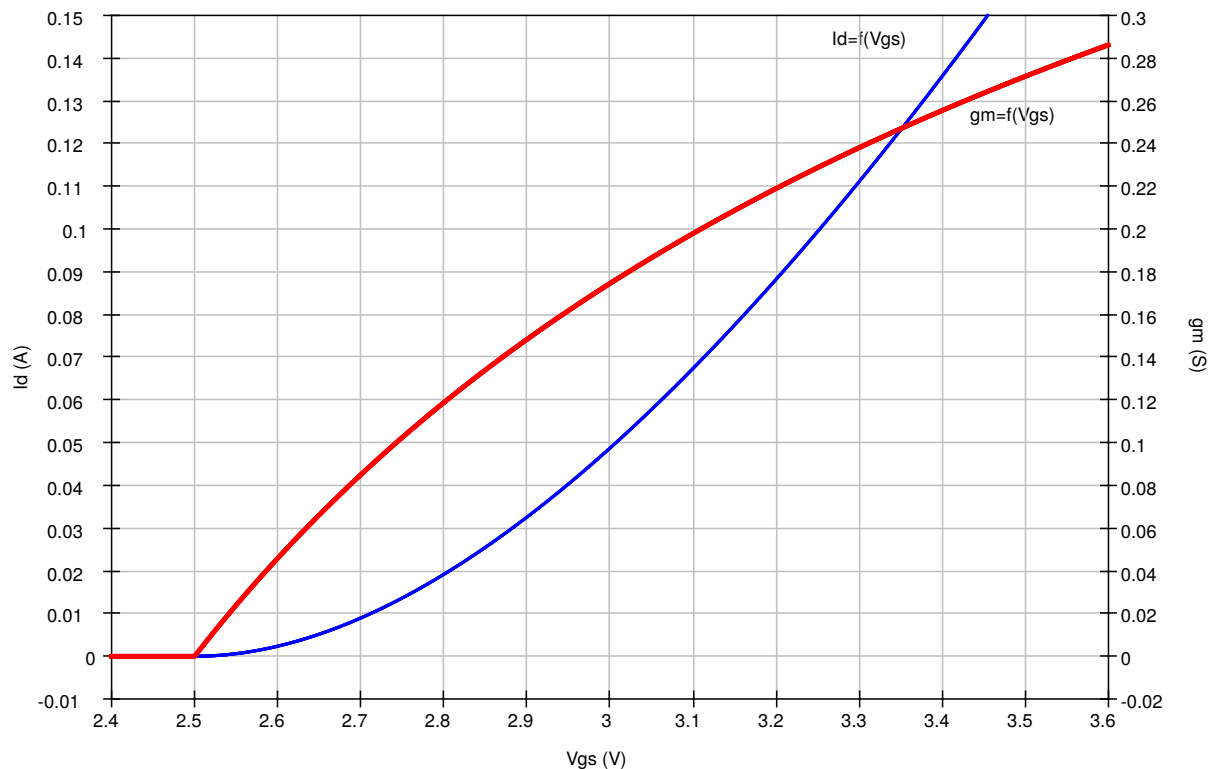


FIGURE 4 – Caractéristiques de sortie

## B Caractéristiques du BS170

$$I_d = f(V_{gs}); g_m = f(V_{gs})$$



$$I_d = f(V_{ds}) @ V_{gs} = \text{ct}$$

