

# 1I : MIROIR DE COURANT SIMPLE A TRANSISTORS PMOS

Le montage de la figure 1 représente un miroir de courant simple qui utilise deux transistors PMOS  $M_1$  et  $M_2$  identiques fonctionnant dans leur zone de plateau où le courant de drain est tel que :

$$I_D = k_p \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad (1)$$

On donne de plus :

$k_p$	$V_T$	$\lambda$	$W_1$	$W_2$	$L$
$0.2 \text{ mA.V}^{-2}$	$-2 \text{ V}$	$5.10^{-2} \text{ V}^{-1}$	$25 \text{ }\mu\text{m}$	$25 \text{ }\mu\text{m}$	$10 \text{ }\mu\text{m}$

- le rapport  $r = W/L$  des PMOS est indiqué sur les figures.
- La tension  $V_{DS}$  des MOS est telle que le terme  $\lambda V_{DS}$  de la relation (1) est négligeable devant 1.

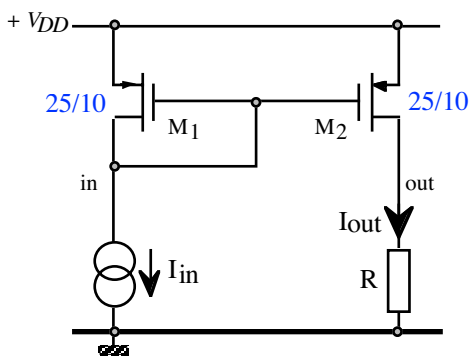


Figure 1 : miroir de courant simple

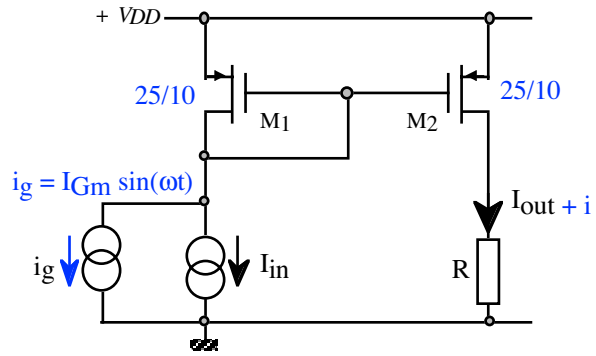


Figure 2

- 1.1) Sur la figure 1, rechercher, en justifiant, la relation liant les courants continus  $I_{in}$  et  $I_{out}$ .
- 1.2) On applique (figure 2) en parallèle avec le générateur de courant continu  $I_{in}$ , un générateur sinusoïdal de courant parfait  $i_g$  de manière à créer des petites variations autour de la valeur de repos.

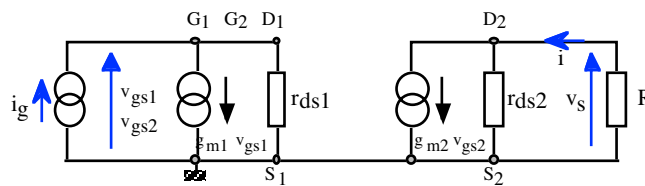


Figure 3

Le générateur  $i_g$  a une amplitude  $I_{Gm}$  faible et une fréquence moyenne pour assurer la linéarité du dispositif dont le schéma équivalent est donné en figure 3.

- a) Déterminer l'expression de la résistance d'entrée  $R_{em}$  du montage vue par le générateur  $i_g$ . Faire l'application numérique pour  $I_{in} = 50 \text{ }\mu\text{A}$  et en déduire l'expression approchée de  $R_{em}$ .
- b) Déterminer l'expression du gain en courant du montage :  $A_i = i / i_g$ . Sachant que la valeur de la résistance  $R$  est de l'ordre du kilo ohms, quelle est l'expression approchée du gain en courant  $A_i$ ? Faire l'A.N.

- c) Déterminer en utilisant la méthode habituelle de l'ohmmètre, l'expression de la résistance de sortie  $R_{sm}$  du montage vue par la résistance  $R$  (donner le schéma). Faire l'A.N.

## II : AMELIORATION DU MONTAGE : MIROIR "EMPILE"

La résistance de sortie du miroir de courant simple est jugée trop faible. Afin d'augmenter sa valeur, on se propose d'analyser le montage miroir de courant "empilé" dont le schéma est donné en figure 4. Les deux transistors PMOS  $M_3$  et  $M_4$  sont identiques à  $M_1$  et  $M_2$  et obéissent à la relation (1) et aux valeurs des paramètres associés.

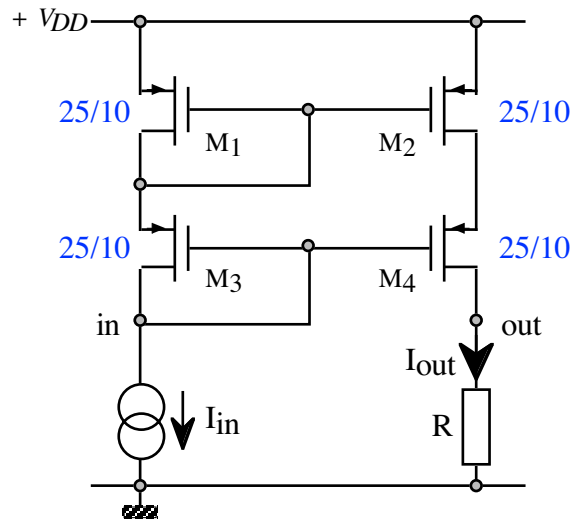


Figure 4 : miroir de courant "empilé"

- 2.1) Rechercher, en justifiant, la relation liant les courants continus  $I_{in}$  et  $I_{out}$ .
- 2.2) On applique en parallèle avec le générateur de courant continu  $I_{in}$ , un générateur sinusoïdal  $i_g$  de façon à créer des petites variations autour de la valeur de repos du courant (comme en figure 3).
- En exploitant les résultats de la première partie, dessiner le schéma équivalent aux petites variations et aux fréquences moyennes du miroir empilé.  
On notera :  $g_{m1} = g_{m2} = g_{m3} = g_{m4} = g_m$  de même :  $r_{ds2} = r_{ds4} = r_{ds}$ .
  - Déterminer l'expression de la résistance d'entrée  $R_{emp}$  du montage vue par le générateur  $i_g$ .  
Faire l'application numérique pour  $I_{in} = 50 \mu A$ .
  - En utilisant la méthode de l'ohmmètre on recherche l'expression de la résistance de sortie  $R_{smp}$  du montage vue par la résistance  $R$ . Montrer que la grille  $G_4$  du MOS  $M_4$  est reliée à la masse lors de la préparation du schéma destiné à déterminer  $R_{smp}$ .
  - Redessiner dans ces conditions, le schéma équivalent du montage permettant de calculer la résistance  $R_{smp}$ .
  - Donner l'expression de  $R_{smp}$  et faire l'application numérique pour  $I_{in} = 50 \mu A$ .

### III : MONTAGE AMPLIFICATEUR DE COURANT

Le montage miroir “empilé” se transforme en amplificateur de courant (figure 5) lorsque les PMOS  $M_6$  et  $M_8$  associés aux PMOS  $M_5$  et  $M_7$  ont une largeur  $W$  telle que :

- $W_5 = W_7 = 25 \mu\text{m}$  et  $W_6 = W_8 = 100 \mu\text{m}$
- La longueur  $L$  du canal est encore de  $10 \mu\text{m}$
- La relation (1) est vérifiée et les paramètres  $k_p$ ,  $V_T$  et  $\lambda$  sont inchangés.

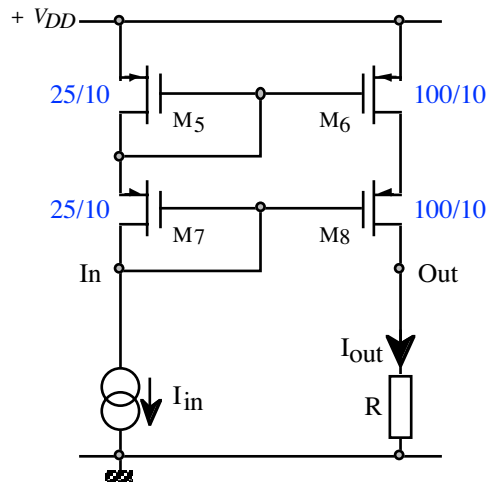


Figure 5 : montage amplificateur de courant PMOS

- 3.1) Rechercher la nouvelle relation liant les courants continus  $I_{in}$  et  $I_{out}$ .
- 3.2) Aux petites variations (comme en figure 3) imposées par le générateur  $i_g$ , adapter les résultats obtenus dans la deuxième partie avec  $I_{in} = 50 \mu\text{A}$  afin de déterminer, en justifiant vos résultats :
  - a) La résistance d'entrée  $R_{e_{ai}}$  du montage amplificateur de courant vue par le générateur  $i_g$ .
  - b) La résistance de sortie  $R_{s_{ai}}$  du montage amplificateur de courant vue par la résistance  $R$ .

## IV : AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL DE TRANSCONDUCTANCE

Les montages de la deuxième et de la troisième partie sont utilisés pour réaliser un amplificateur différentiel de transconductance dont le schéma est donné en figure 6.

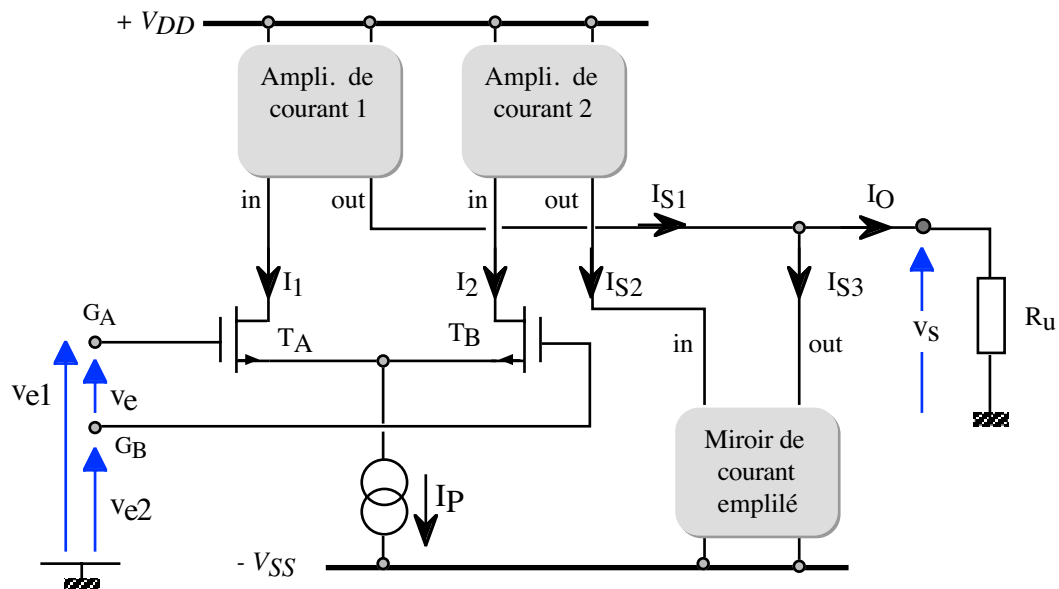


Figure 6 : Amplificateur différentiel de transconductance

Ce montage comporte :

- Une paire différentielle classique ( $T_A$  et  $T_B$  NMOS identiques et à la même température) polarisés par une source de courant idéale,  $I_P = 100 \mu A$ , de résistance interne infinie. Les transistors  $T_A$  et  $T_B$  sont respectivement chargés par les entrées des amplificateurs de courant (1 et 2) étudiés dans la 3 partie.
- Le miroir de courant “empilé” relié à la tension d’alimentation négative, utilise des transistors NMOS. Cependant, on suppose que ce miroir possède des propriétés en tout point identiques à celles qui sont établies dans la deuxième partie.
- La sortie du montage est chargée par une résistance d’utilisation  $R_u$  de quelques dizaines  $k\Omega$ .

Les transistors NMOS  $T_A$  et  $T_B$  fonctionnent dans leur zone de saturation et vérifient la loi :

$$I_D = k_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

Où  $k_n = k_p/3$ ,  $V_T = +2V$ ,  $L = 10 \mu m$ ,  $W$  à déterminer.

La résistance  $r_{ds}$  est supposée posséder une valeur suffisamment importante pour être négligeable.

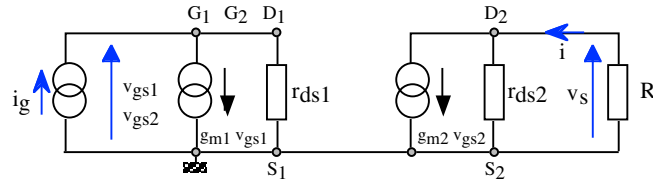
On admettra sans démonstration, que la relation obtenue aux questions 2.1 et 3.1 est aussi valable pour les petites variations.

- 4.1) Au repos ( $V_e = 0V$ ) calculer la valeur du courant de sortie  $I_o$  en justifiant le résultat.
- 4.2) Les bornes  $G_A$  et  $G_B$  étant attaquées par un signal (petites variations  $v_e = v_{e1} - v_{e2}$ ) rechercher l'expression de la variation  $i_o$  du courant de sortie  $I_o$  en fonction de  $v_e$ .  
En déduire la transconductance  $g_m = i_o/v_e$  en fonction de la transconductance  $g_{ma}$  de chacun des transistors  $T_A$  et  $T_B$ .
- 4.3) On désire obtenir un amplificateur de transconductance telle que  $g_m = 2 \text{ mS}$ .  
Calculer la valeur à donner à la largeur  $W_A$  et  $W_B$  des MOS  $T_A$  et  $T_B$ .
- 4.4) Déterminer la valeur de la résistance de sortie  $R_s$  du montage vue par  $R_u$  en justifiant le résultat.

## CORRECTION

Q11 : Les MOS  $M_1$  et  $M_2$  ont la même tension  $V_{GS}$  et des caractéristiques identiques, d'après la relation (1) :  $I_{out} = I_{in}$  sachant que  $(\lambda \cdot V_{DS})$  est négligeable devant 1. A titre indicatif :  $V_{GS} = -1.68$  V.

Q12a : Résistance d'entrée du miroir :



Expression du courant  $i_g$  :  $i_g = g_{m1} \cdot v_{gs1} + \frac{v_{gs1}}{r_{ds1}}$        $\frac{i_g}{v_{gs1}} = \frac{1}{R_{em}} = \frac{1}{\frac{1}{g_{m1}}} + \frac{1}{r_{ds1}}$  soit :  $R_{em} = \frac{1}{g_{m1}} // r_{ds1}$

A.N.  $g_{m1} = \left( \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right)_{V_{DS} \text{ cte}} = 2 \sqrt{k_p \frac{W}{L} (1 + \lambda V_{DS})} = 316 \mu S$        $\frac{1}{g_{m1}} = 3,16 k\Omega$

$r_{ds1} = \frac{1 + \lambda V_{DS}}{\lambda I_D} = 400 k\Omega$

$$R_{em} \approx \frac{1}{g_{m1}} = 3,16 k\Omega$$

Q12b : expression du courant  $i$  :  $i = g_{m2} \cdot v_{gs2} - \frac{R i}{r_{ds2}}$        $i = \frac{g_{m2} \cdot v_{gs2}}{1 + \frac{R}{r_{ds2}}}$

Sachant que :  $i_g \approx g_{m1} \cdot v_{gs1}$

$$A_i = \frac{g_{m2} \cdot v_{gs2}}{1 + \frac{R}{r_{ds2}}} \frac{1}{g_{m1} \cdot v_{gs1}} \approx 1$$

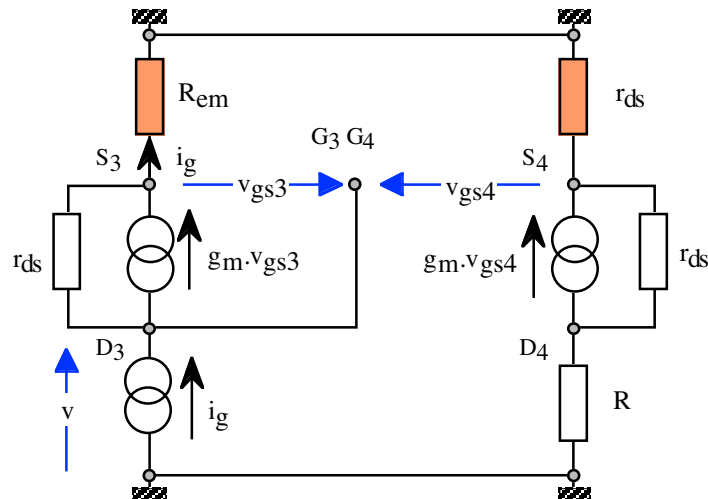
Q12c : La méthode de l'ohmmètre impose de faire  $i_g = 0$  et d'enlever la résistance R pour mettre à sa place un générateur (u,i). La maille d'entrée donne la relation :  $0 = g_{m1} \cdot v_{gs1} + \frac{v_{gs1}}{r_{ds1}}$  entraînant alors :

$v_{gs1} = 0 = v_{gs2}$ .

$$R_{sm} = \frac{u}{i} = r_{ds2} = 400 k\Omega$$

Q21 : D'une part, le miroir  $M_1, M_2$  joue son rôle et d'autre part, les MOS  $M_3$  et  $M_4$  identiques ont la même tension  $V_{GS}$ , aussi, dans la mesure où  $(\lambda \cdot V_{DS}) \ll 1$ ,  $I_{out} = I_{in}$ .

Q22a : Schéma équivalent au montage.



Aux variations,  $M_3$  envoie le courant  $i_g$  sur le MOS  $M_1$  que l'on peut alors simuler par sa résistance d'entrée  $R_{em}$ . De même, aux variations,  $M_4$  envoie le courant sur le MOS  $M_2$ , que l'on peut simuler par sa résistance de sortie  $R_{sm} = r_{ds}$ .

Q22b : résistance d'entrée  $R_{emp}$ .

$$i_g = g_m v_{gs3} + \frac{v_{gs3}}{r_{ds}} = v_{gs3} \left( g_m + \frac{1}{r_{ds}} \right)$$

$$v = v_{gs3} + R_{em} i_g$$

Il vient alors :

$$R_{emp} = \frac{v}{i_g} = \frac{1 + R_{em} \left( g_m + \frac{1}{r_{ds}} \right)}{g_m + \frac{1}{r_{ds}}}$$

A.N.  $g_m = 316 \mu S$   $r_{ds} = 400 k\Omega$   $R_{em} = 3,16 k\Omega$

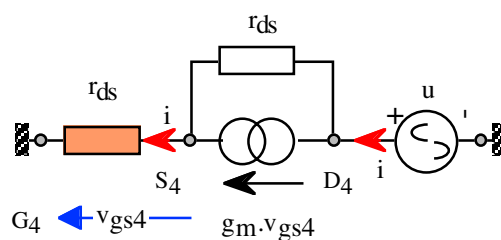
$$R_{emp} = \frac{v}{i_g} \approx \frac{1 + R_{em} g_m}{g_m} = \frac{2}{g_m} = 6,32 k\Omega$$

Q22c : Résistance de sortie du miroir à l'aide de la méthode de l'ohmmètre.

Il faut annuler le générateur  $i_g$ . Dans ces conditions la tension  $v_{gs3}$  est nulle ainsi que la tension  $v$ , la grille  $G_4$  de  $M_4$  est à la masse.

Q22d : On enlève ensuite la résistance  $R$  que l'on remplace par un générateur  $(u, i)$ .

Le schéma est alors le suivant :



Q22e :  $u = r_{ds}(i - g_m v_{gs4}) - v_{gs4}$  avec :  $v_{gs4} = -r_{ds} i$

$$R_{smp} = \frac{u}{i} = r_{ds} + r_{ds}(g_m r_{ds} + 1)$$

A.N.  $R_{smp} = 51,4 \text{ M}\Omega$ . La résistance de sortie est nettement améliorée.

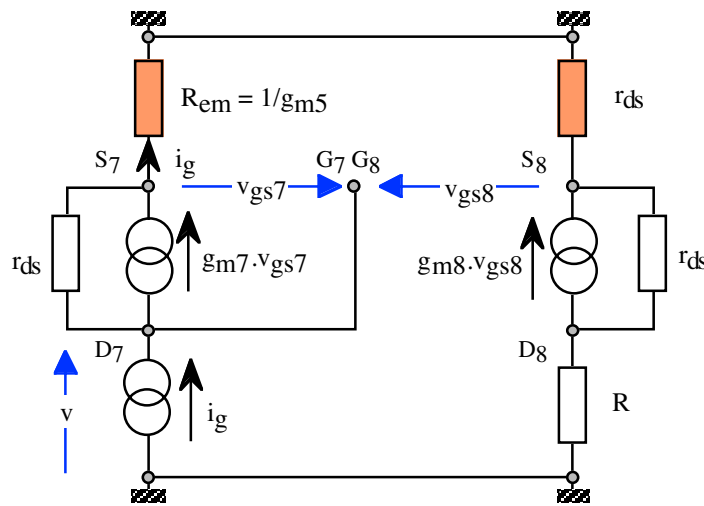
Q31 : Exprimons le courant de drain de  $M_7$  et  $M_8$  :

$$I_{in} = I_{D7} = k_p \frac{W_7}{L} (V_{GS7} - V_T)^2 \quad I_{out} = I_{D8} = k_p \frac{W_8}{L} (V_{GS8} - V_T)^2$$

$M_7$  et  $M_8$  ayant la même tension  $V_{GS}$ , on obtient la relation :  $\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{W_8}{W_7} = 4$

On a de plus :  $I_{D5} = I_{S7} = I_{D7} = I_{in}$  et  $I_{D6} = I_{S8} = I_{D8} = I_{out}$

Q32a: Le schéma aux variations est le suivant :

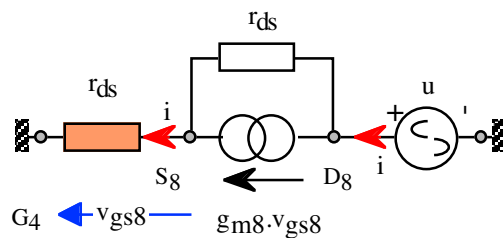


Par analogie, on obtient :

$$R_{cai} = \frac{v}{i_g} \approx \frac{1 + g_{m7} \frac{1}{g_{m5}}}{g_{m7}} = 4,74 \text{ k}\Omega$$

$g_{m5} = 316 \mu\text{S}$     $g_{m7} = 632 \mu\text{S}$

Q32b : Schéma aux variations :



Par analogie, on obtient :  $R_{sai} = \frac{u}{i} = r_{ds} + r_{ds}(g_{m8} r_{ds} + 1) = 102 \text{ M}\Omega$

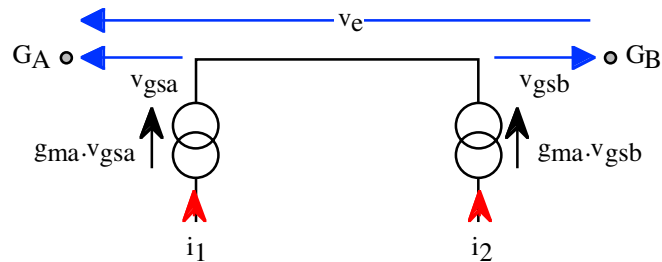


Q41 : La tension  $V_e$  nulle entraîne :  $V_{GSA} = V_{GSB}$ , soit :  $I_1 = I_2 = \frac{I_p}{2} = 50\mu A$ .

$I_{S1} = 4 I_1$        $I_{S2} = 4 I_2$        $I_{S3} = I_{S2} = 4 I_2$ . Sachant que :  $I_O = I_{S3} - I_{S1}$

$$I_O = 4 (I_1 - I_2) = 0 \text{ mA}$$

Q42 : Schéma aux variations de la paire différentielle :



$$i_1 = g_{ma} v_{gsa} \quad i_2 = g_{ma} v_{gsb}$$

Le courant de sortie du montage est tel que :  $i_o = 4(i_1 - i_2)$

$$i_o = 4 g_{ma} (v_{gsa} - v_{gsb}) = 4 g_{ma} v_e$$

$$g_m = 4 g_{ma}$$

Q43 : Pour obtenir une transconductance  $g_m$  de 2 mS soit :  $g_m = 2 \sqrt{k_n \frac{W_A}{L} \frac{I_p}{2}}$ , on doit choisir les

Mos  $T_A$  et  $T_B$  avec une largeur de canal sachant que  $k_n = \frac{k_p}{3}$  :  $W_A = W_B = 75 \mu m$ .

Q44 : La résistance de sortie vue par  $R_u$  est telle que :  $R_s = R_{smp} // R_{sai} = 34,2 \text{ M}\Omega$ . La sortie se comporte donc comme un générateur de courant proportionnel à la différence  $v_e$  des tensions d'entrées.