

L'amplificateur Multi-étages (Ex l'ampli opérationnel en CMOS)

Electronique II

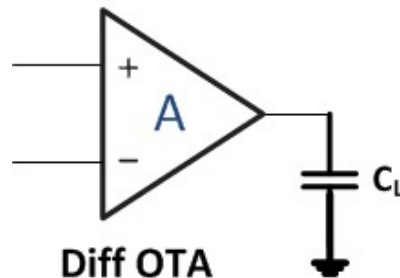
Adil Koukab

Table des matières

- Amplificateur Opérationnel
 - Généralités
 - Amplificateur à transconductance OTA
 - Etage intermédiaire pour booster le gain
- Etage de sortie (Ampli de puissance)
 - **Suiveur**
 - **Amplificateur Push-Pull**
 - Bilan énergétique
 - Exercice

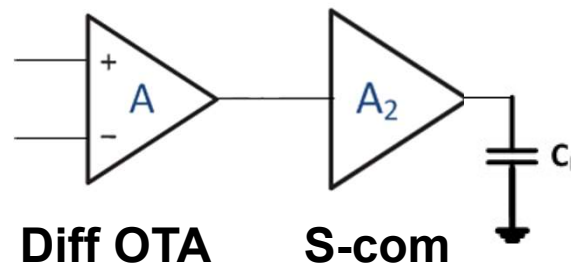
Amplificateurs à un et à plusieurs étages

Un-étage



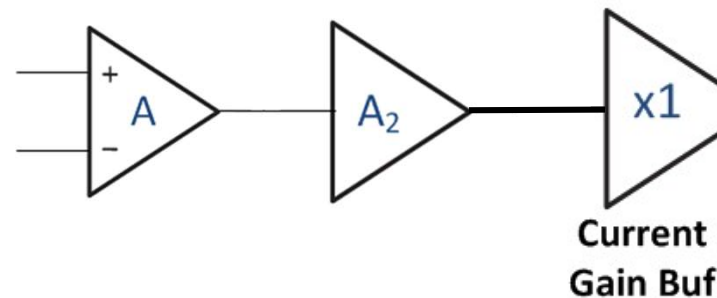
- OTA (S-C): Idéal pour charges capacitives
- incompatible avec une charge résistive faible.

Deux-étages



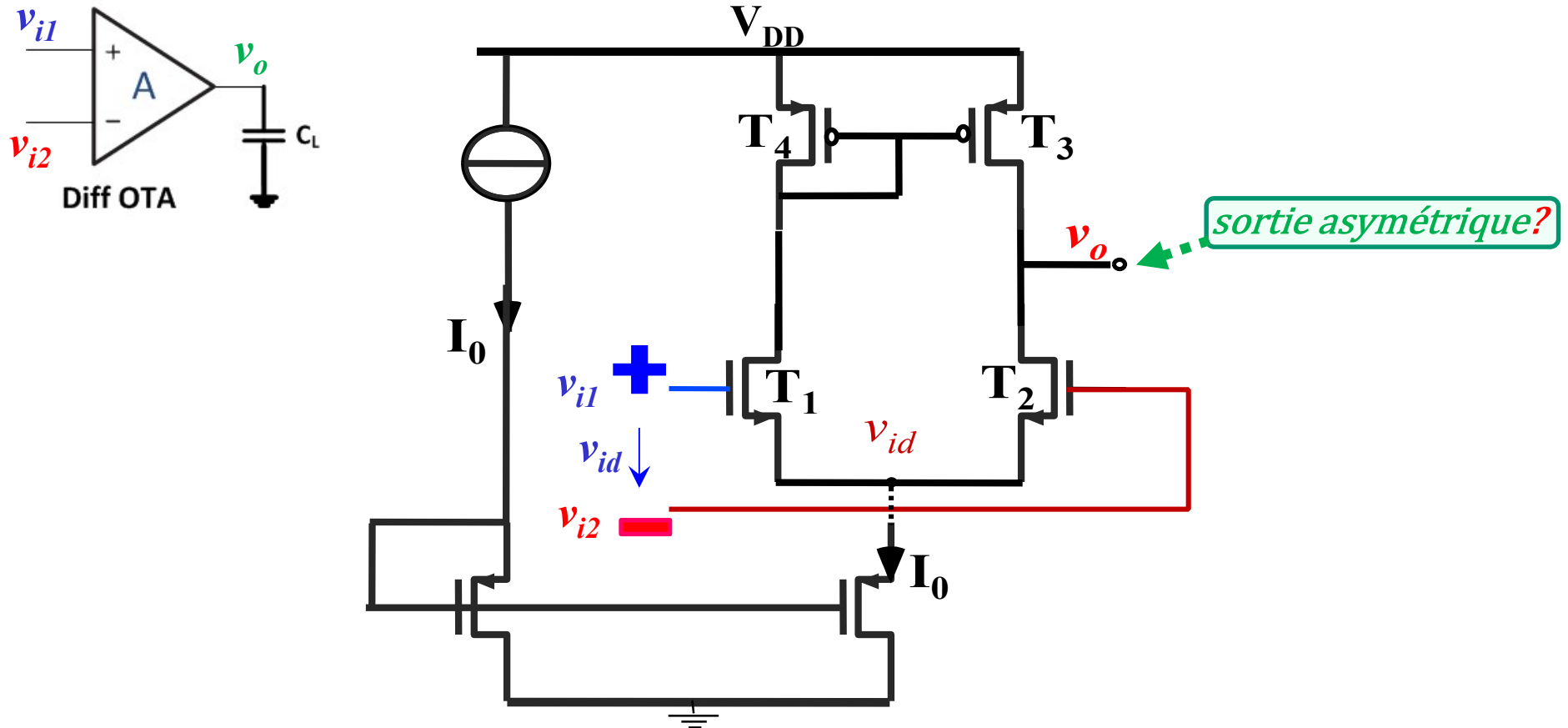
- OTA à 2 étages pour booster le gain (tjrs incompatible avec une charge résistive faible).

Trois-étages AmpliOp

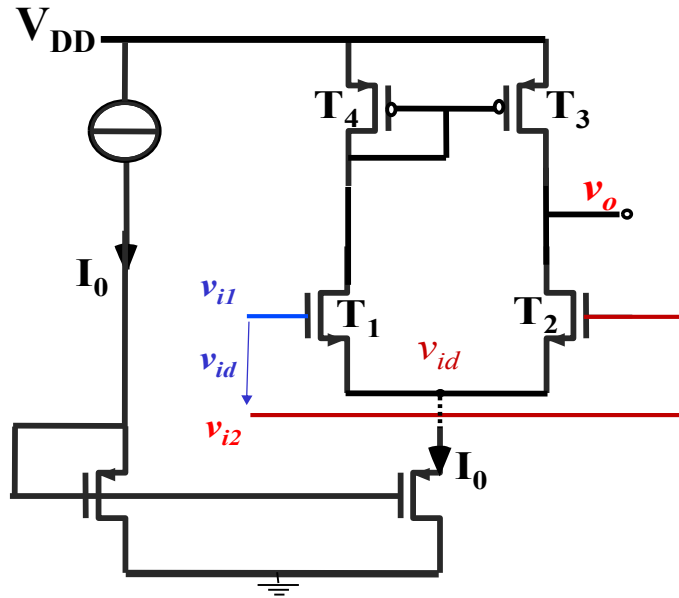


- OTAs + étage de puissance (ex D-C).
- Capable de piloter une charge résistive.

Ampli à transconductance (OTA) et à sortie asymétrique



Ampli à transconductance (OTA) et à sortie asymétrique



Résistance d'entrée (∞)

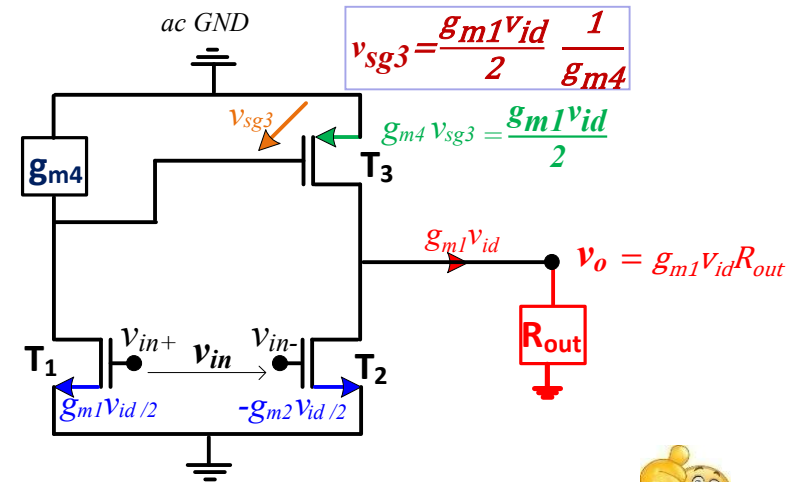
$$R_{in,diff} \rightarrow \infty$$

Résistance de sortie (*très grande*)

$$R_{out} = \left. \frac{v_o}{i_o} \right|_{v_i=0} = \frac{1}{g_{ds2} + g_{ds3}}$$

très élevée

Gain en tension A_{v0} (à vide)

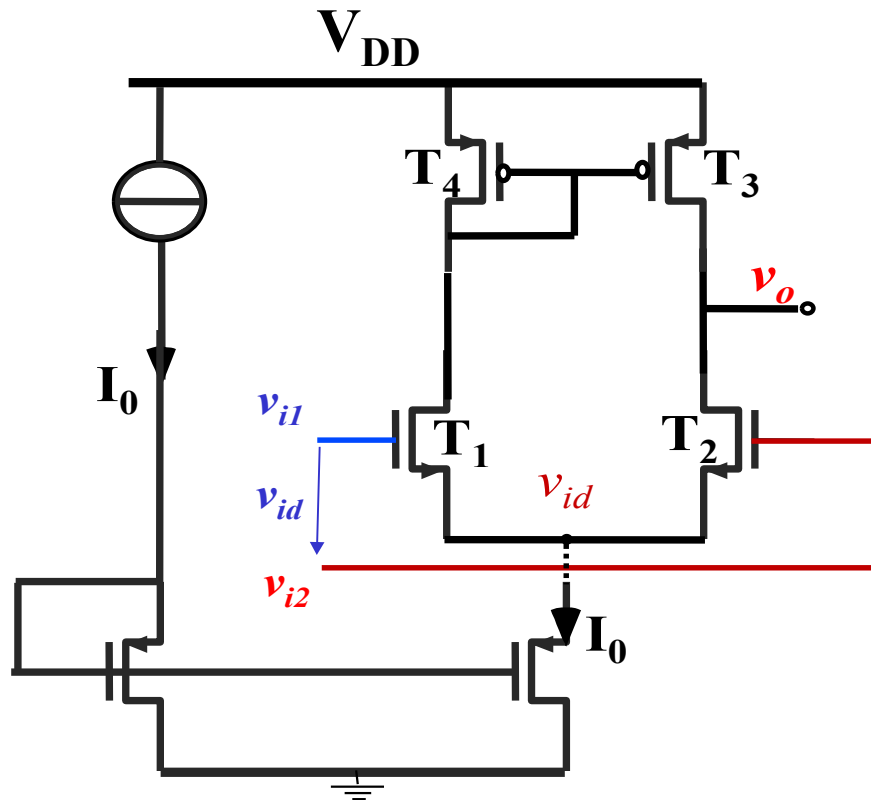


$$A_{v0} = \frac{v_o}{v_{id}} = g_{m1} R_{out} = \frac{g_{m1}}{g_{ds2} + g_{ds3}}$$

très élevé

L'OTA ne peut pas piloter des charges résistives faibles →
Besoin d'un étage de sortie. 🤔

OTA: Dynamique de sortie



Limite supérieure

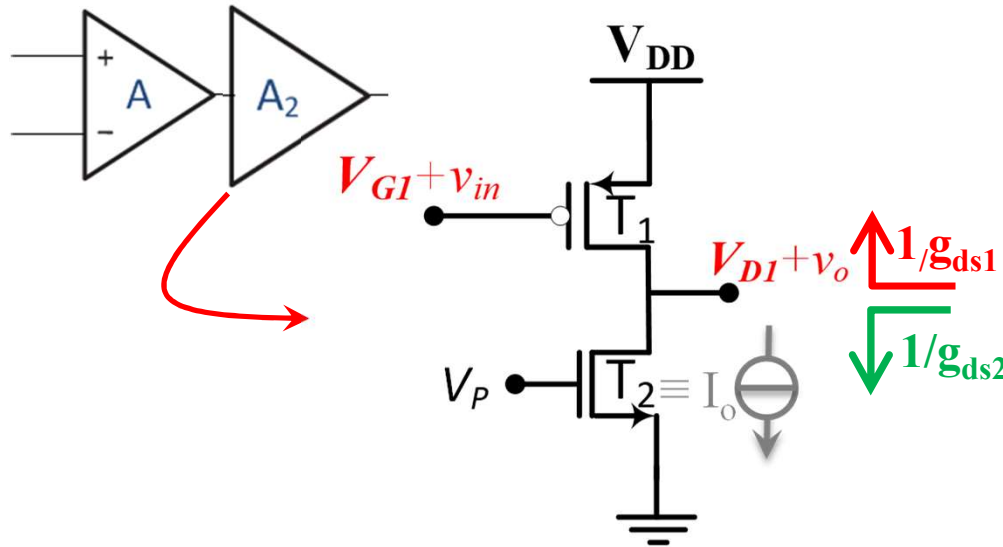
$$\begin{aligned} V_{out,max} &= V_{DD} - V_{DS,sat4} \\ &= V_{DD} - (V_{SG3} - V_{Tp}) \end{aligned}$$

Limite inférieure

(pour un $V_{G1,2} = V_{DD}/2$)

$$\begin{aligned} V_{out,min} &= V_{S2} + V_{DS,sat2} \\ &= V_{S2} + (V_{GS2} - V_{Tn}) \\ &= V_{G2} - V_{Tn} = \frac{V_{DD}}{2} - V_{Tn} \end{aligned}$$

OTA à deux étage (booster le Gain): S-C à charge active



Résistance d'entrée (∞)

$$R_{in} \rightarrow \infty$$



Résistance de sortie (*très grande*)

$$R_{out} = \left. \frac{v_o}{i_0} \right|_{v_i=0} = \frac{1}{g_{ds1}} // \frac{1}{g_{ds2}} = \frac{1}{g_{ds1} + g_{ds2}}$$

Gain en tension à vide (*très élevé*)

$$A_{v0} = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{R_L \rightarrow \infty} = -g_{m1} R_{out} = -\frac{g_{m1}}{g_{ds1} + g_{ds2}}$$

Gain en tension avec la charge (*affaibli par R_L*)

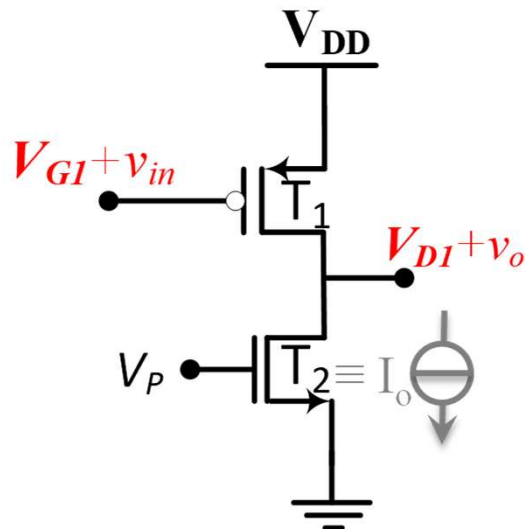
$$A_{v0} = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{R_L \rightarrow \infty} = -g_{m1} R_{out} // R_L = -g_{m1} \left(\frac{1}{g_{ds1} + g_{ds2}} \right) // R_L$$

S-C, ne peut pas piloter des charges résistives faibles. Besoin d'un étage de sortie.



S-C: Dynamique de sortie

Limite supérieure



$$\begin{aligned} V_{out,max} &= V_{DD} - V_{DS,sat1} \\ &= V_{DD} - (V_{sg1} - V_{Tp}) \\ &= V_{G1} + V_{TP} \end{aligned}$$



Limite inférieure

$$\begin{aligned} V_{out,min} &= V_{DS,sat2} \\ &= V_{gs2} - V_{Tn} \\ &= V_p - V_{Tn} \end{aligned}$$



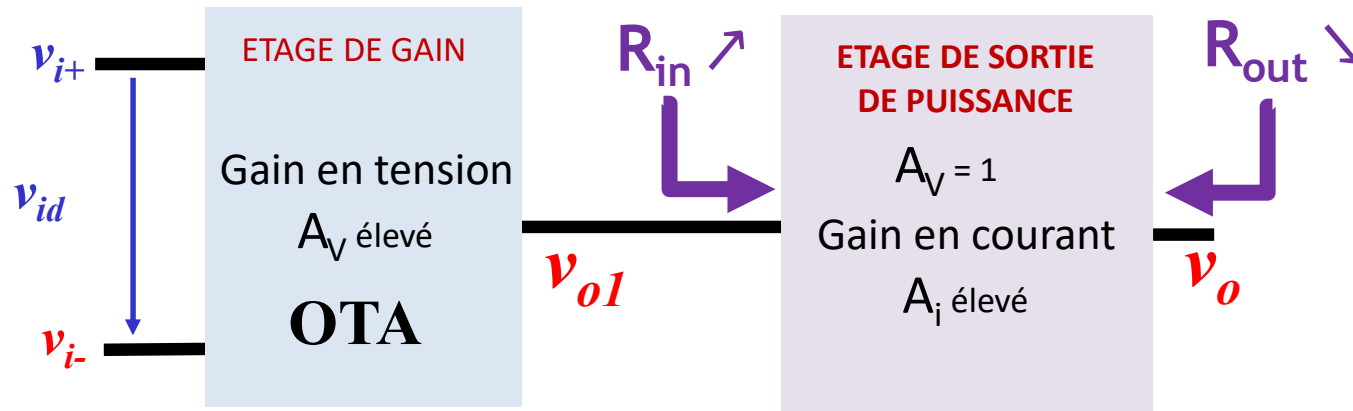
Table des matières

- Amplificateur Opérationnel
 - Généralités
 - Amplificateur à transconductance OTA
 - Etage intermédiaire pour booster le gain
- Etage de sortie (Ampli de puissance)
 - **Suiveur**
 - **Amplificateur Push-Pull**
 - Bilan énergétique
 - Exercice

Table des matières

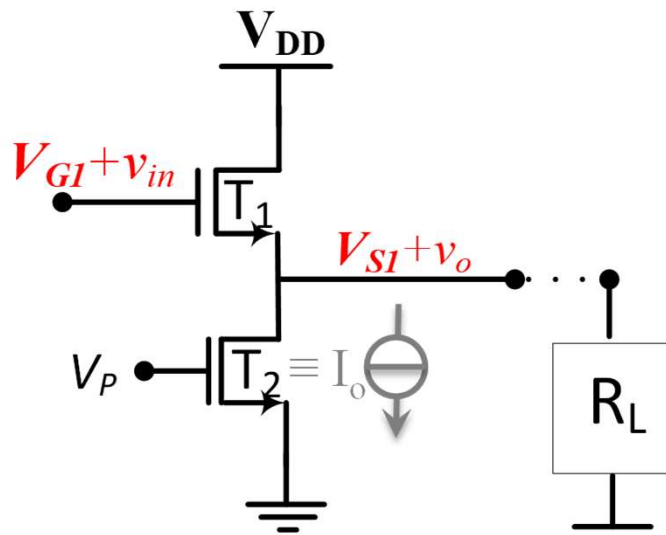
- Amplificateur Opérationnel
 - Généralités
 - Amplificateur à transconductance OTA
 - Etage intermédiaire pour booster le gain
- Etage de sortie (Ampli de puissance)
 - **Suiveur**
 - **Amplificateur Push-Pull**
 - Bilan énergétique
 - Exercice

Etages de sortie des amplificateurs



- Objectifs et Caractéristiques de l'étage de sortie:
- Réaliser une adaptation d'impédance
 - R_{in} élevée \rightarrow préserver le gain de l'OTA.
 - R_{out} faible \rightarrow piloter des charges résistives faibles.
- Etage de puissance
 - Consommation optimale.

Etage de sortie: Drain Commun (suiveur)



Résistance d'entrée (∞)

$$R_{in} = \left. \frac{v_i}{i_i} \right|_{R_L} \rightarrow \infty$$

Résistance de sortie

$$R_{out} = \left. \frac{v_o}{i_o} \right|_{v_i=0} = \frac{1}{g_{m1} + g_{DS1} + g_{DS1}} \approx \frac{1}{g_{m1}}$$

(faible)

Gain en tension avec la charge (suiveur)

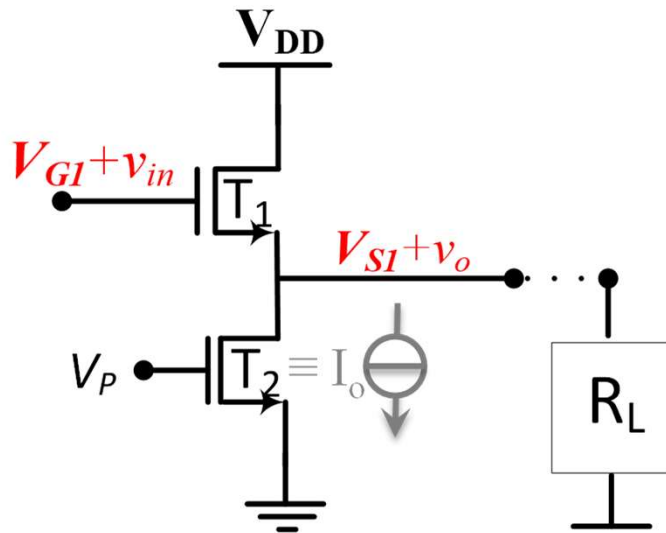
$$A_{v0} = \left. \frac{v_o}{v_i} \right|_{R_L} \approx \frac{g_{m1} R_L}{1 + g_{m1} R_L} \approx 1 \quad \text{si } (R_L \gg \frac{1}{g_{m1}})$$

- Point Faible: Consommation statique élevée à cause de la source de courant ($I_{o,min} = \frac{\widehat{v_o}}{R_L}$).
- Solution: se débarrasser de la source de courant → Montage Push-Pull

D-C: Dynamique de sortie

Limite supérieure

$$\begin{aligned} V_{out,max} &= V_{DD} - V_{DS,sat1} \\ &= V_{DD} - (V_{gs1} - V_{Tp}) \end{aligned}$$

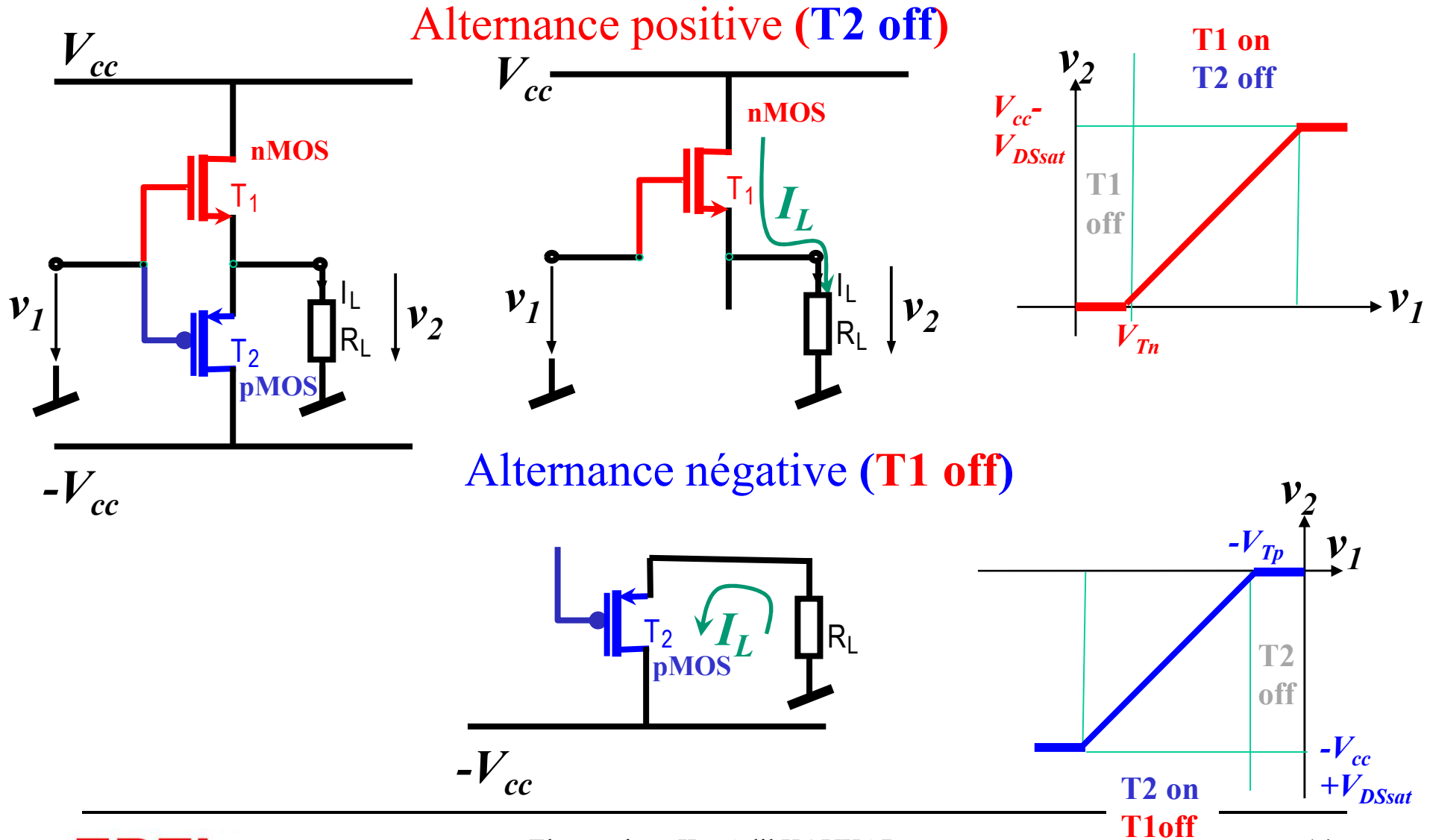


Limite inférieure

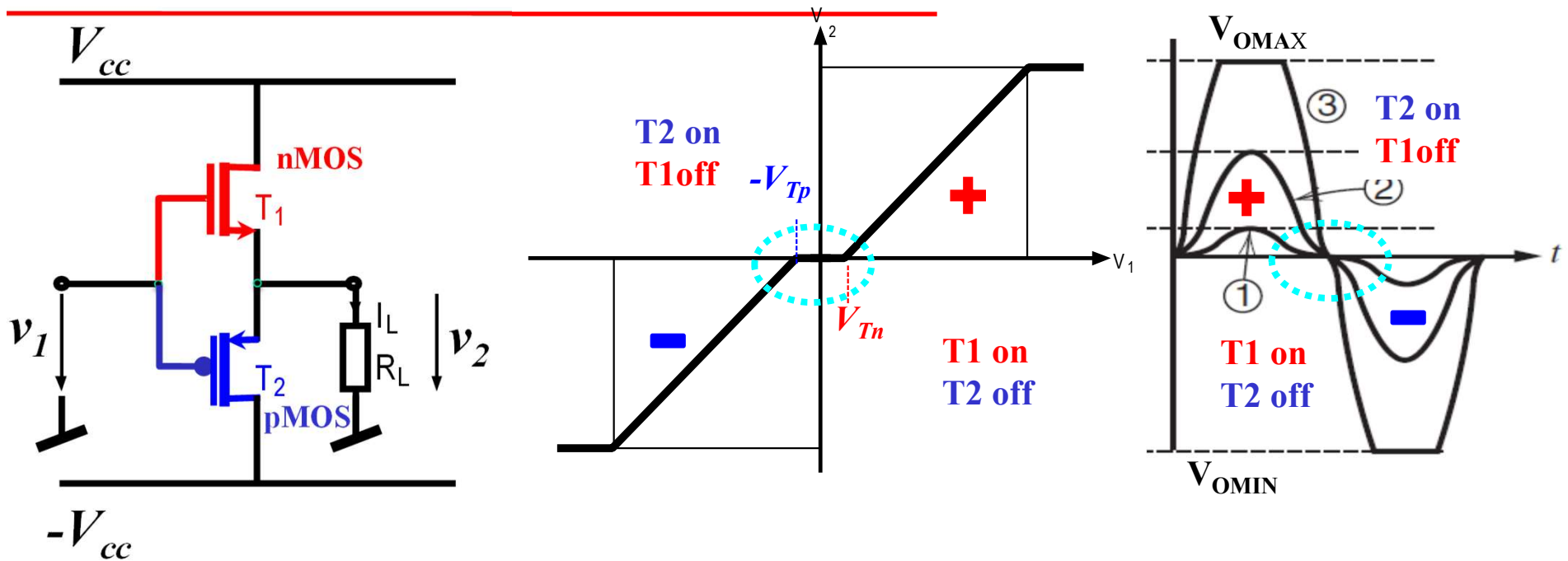
(pour un $V_{g1,2} = V_{DD}/2$)

$$\begin{aligned} V_{out,min} &= V_{DS,sat2} \\ &= V_{gs2} - V_{Tn} = V_p - V_{Tn} \end{aligned}$$

Amplificateur de courant Push-Pull: V_{out} vs V_{in}

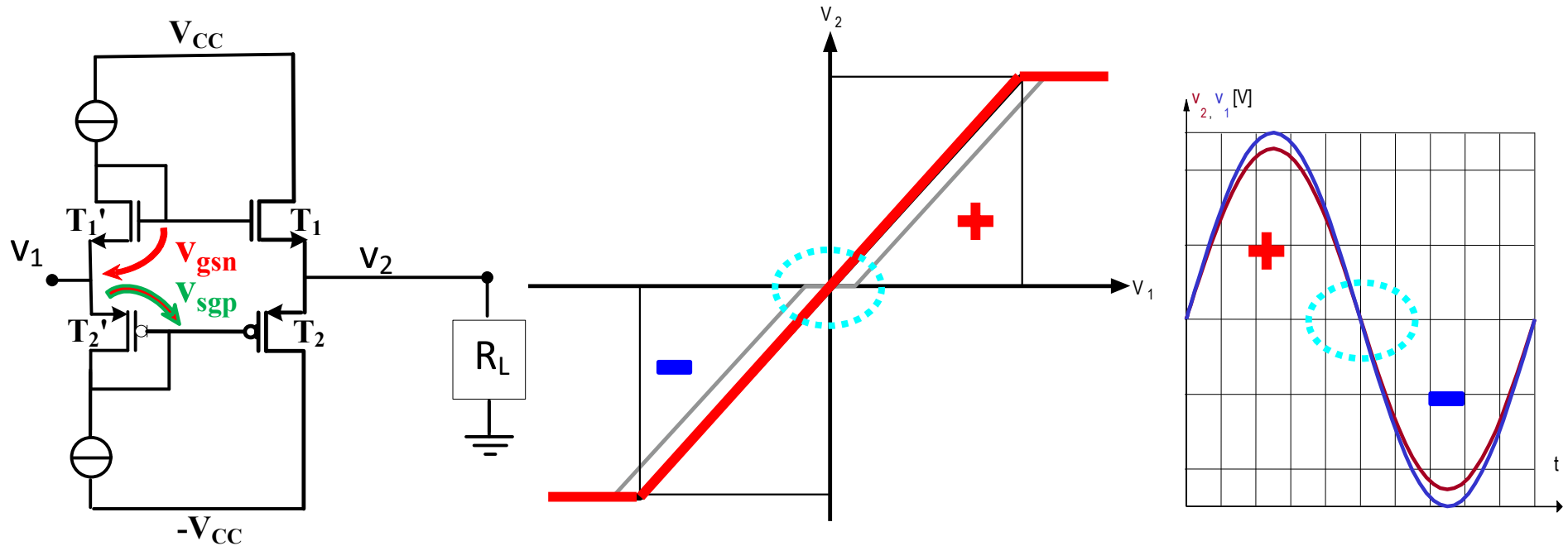


Amplificateur de courant Push-Pull



- Equivalent à deux montages D-C (suiveurs) fonctionnant en alternance (quand un transistor conduit, l'autre est bloqué et vis versa). Pratiquement **pas de consommation statique**. 🍌
- **Caractéristique de transfert non-linéaire** → Distorsion (intolérable pour des signal de faible amplitude). 🤔

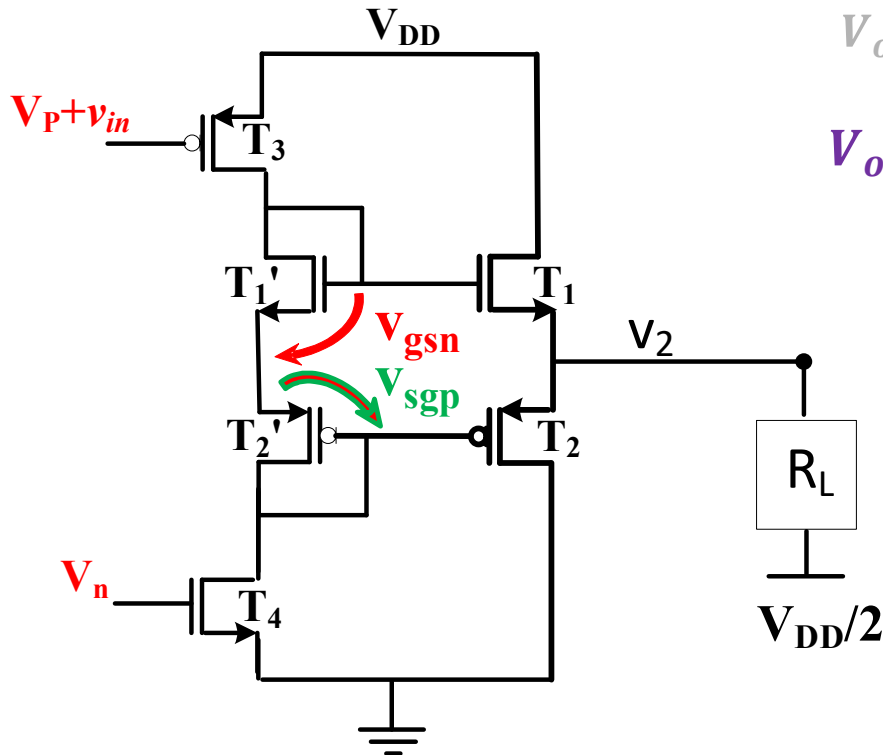
Amplificateur Push-Pull: Linéarisation



- Deux sources de tension V_{gsn} et V_{sgp} réalisées avec T_1' et T_2' évitent le blocage des deux transistors et donc la distorsion au tour de l'origine. 🍌
- T_1 et T_2 sont souvent des transistors de puissance (surtout si R_L est faible).

Push-Pull: Dynamique de sortie

Limite supérieure



$$V_{out,max1} \approx V_{DD} - V_{DS,sat1}$$

$$V_{out,max2} \approx V_{DD} - V_{DS,sat3} - V_{GS1} \\ \approx V_{DD} - (V_{SG3} - V_{Tp}) - V_{GSn}$$

Plus contraignante 🤔

Limite inférieure

$$V_{out,min1} \approx V_{SD,sat2} = V_{SG2} - V_{TP}$$

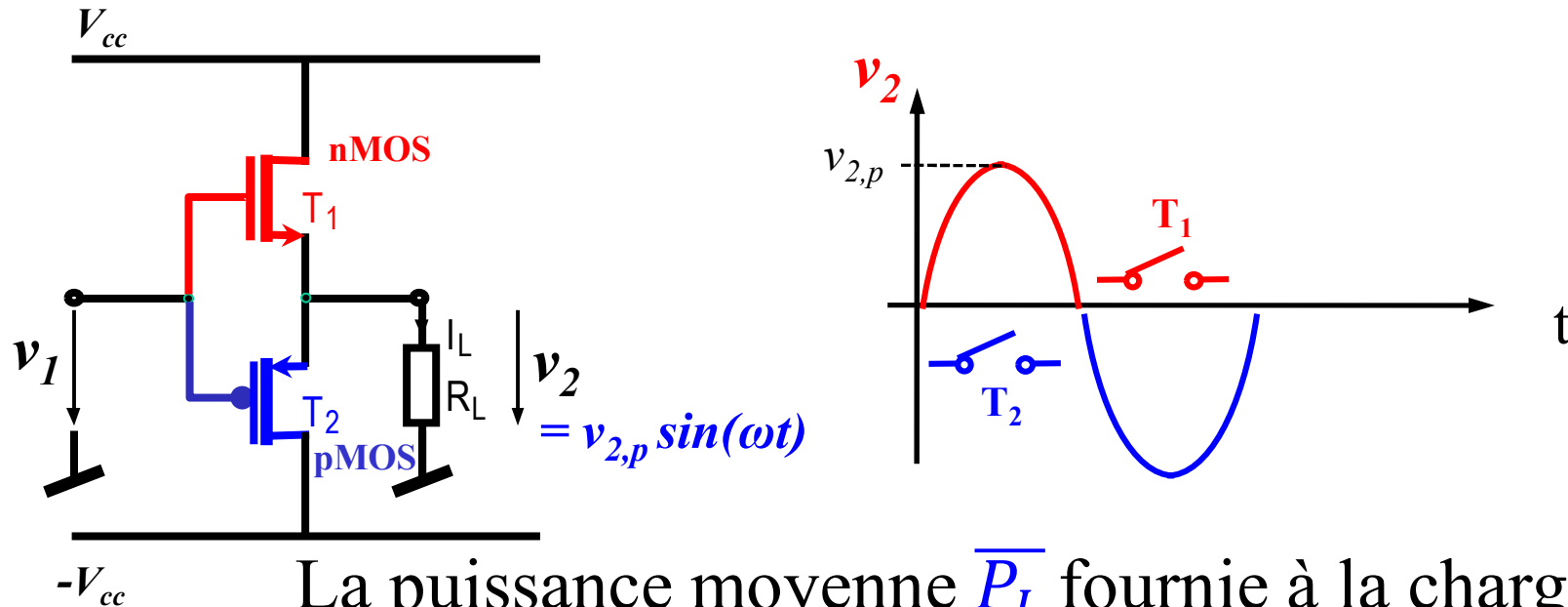
$$V_{out,min} \approx V_{SD,sat4} + V_{GS2} \\ \approx (V_{GS4} - V_{Tn}) + V_{SGp}$$

Plus contraignante 🤔

Table des matières

- Amplificateur Opérationnel
 - Généralités
 - Amplificateur à transconductance OTA
 - Etage intermédiaire pour booster le gain
- Etage de sortie (Ampli de puissance)
 - **Suiveur**
 - **Amplificateur Push-Pull**
 - Bilan énergétique
 - Exercice

Bilan énergétique de l'étage de sortie

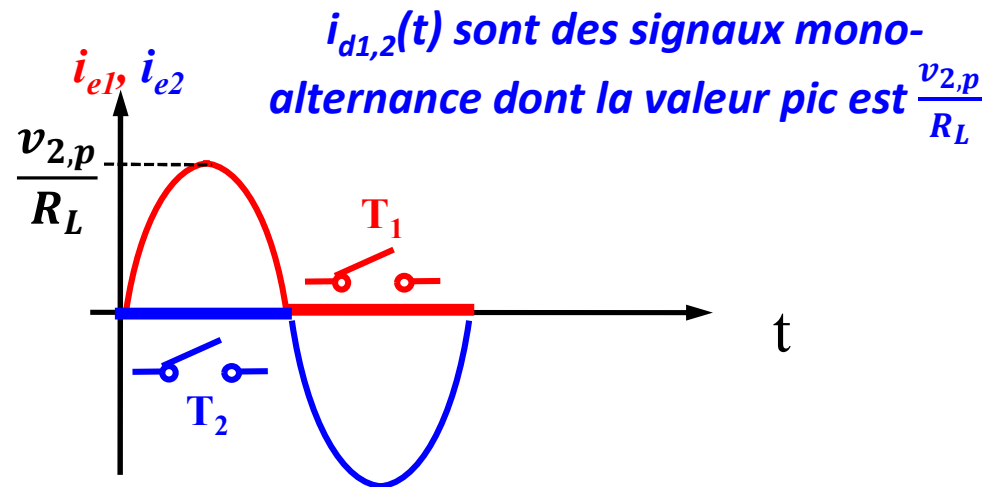
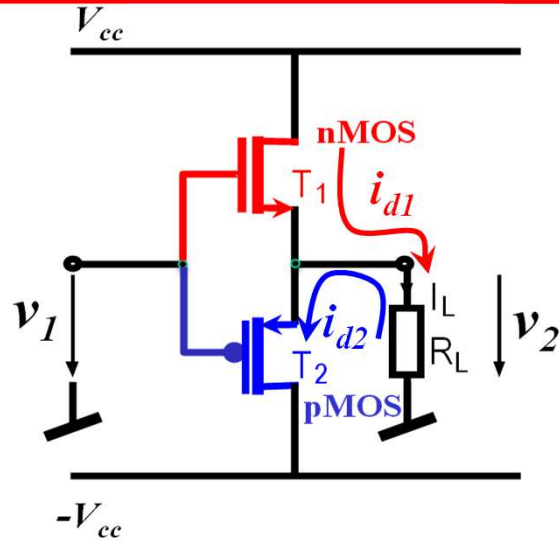


La puissance moyenne \overline{P}_L fournie à la charge:

$$\begin{aligned} \overline{P}_L &= \frac{1}{T} \int_0^T P_L(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \underbrace{v_2(t) i_L(t)}_{P_L(t)} dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{(v_2(t))^2}{R_L} dt \\ &= \frac{v_{2,p}^2}{T R_L} \underbrace{\int_0^T \left(\sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \right)^2 dt}_{T/2} \end{aligned}$$

$$\overline{P}_L = \frac{v_{2,p}^2}{2R_L} = \frac{v_{2,eff}^2}{R_L}$$

Bilan énergétique de l'étage de sortie



Les valeurs moyennes des courants $\overline{i_{d1,2}}$ de T_1 et T_2

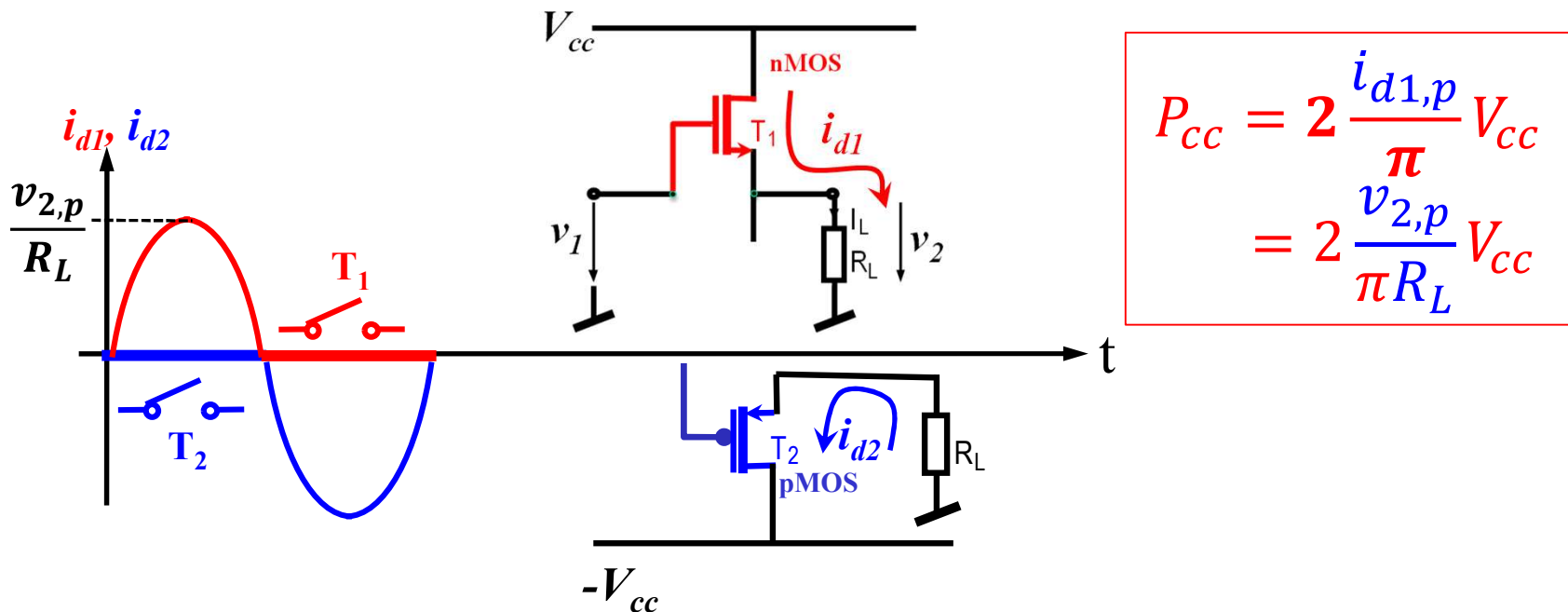
$$\overline{i_{d1}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{d1}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \frac{v_2(t)}{R_L} dt = \frac{v_{2,p}}{TR_L} \underbrace{\int_0^{T/2} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) dt}_{T/\pi}$$

$$\overline{i_{d1}} = \frac{i_{d1,p}}{\pi} = \frac{v_{2,p}}{\pi R_L} = -\overline{i_{d2}}$$

Bilan énergétique de l'étage de sortie

La puissance moyenne $\overline{P_{cc}}$ consommée par le push-pull:
(c.à.d. puissance fournie par les deux alimentations V_{cc} et $-V_{cc}$)

$$\overline{P_{cc}} = P_{cc}^+ + P_{cc}^- = \overline{i_{d1}} V_{cc} + \overline{i_{d2}} (-V_{cc}) = 2\overline{i_{d1}} V_{cc} = 2 \frac{i_{d1,p}}{\pi} V_{cc}$$



Bilan énergétique de l'étage de sortie

L'efficacité énergétique η définie comme le rapport entre la puissance fournie à la charge et la puissance consommée.

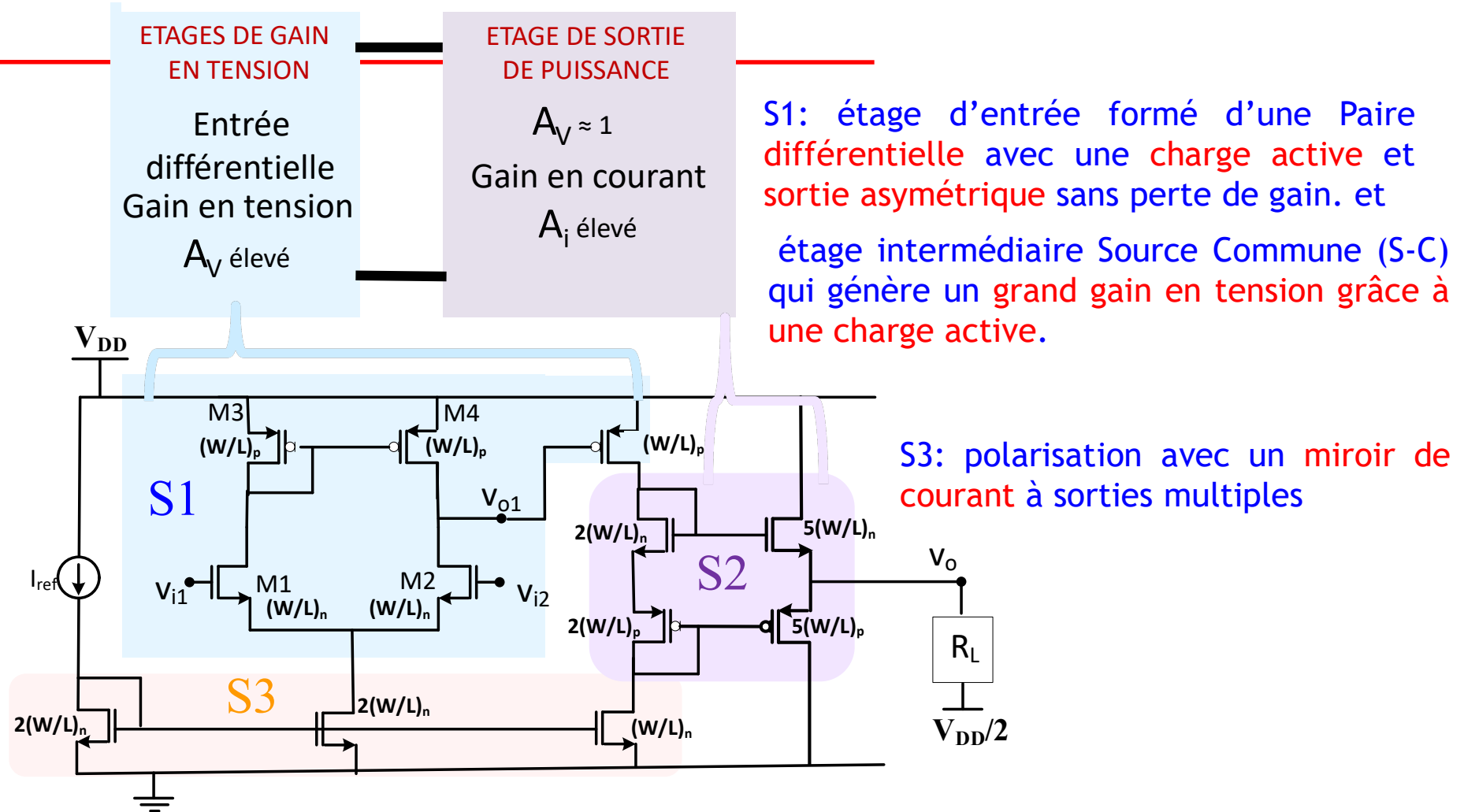
$$\eta = \frac{\overline{P_L}}{\overline{P_{cc}}} = \frac{v_{2,p}^2}{2R_L} \left(2 \frac{v_{2,p} V_{cc}}{\pi R_L} \right)^{-1} \quad \boxed{\eta = \frac{\pi v_{2,p}}{4 V_{cc}}}$$

L'efficacité énergétique maximale η_{\max}

$$\boxed{\eta_{\max} = \frac{\pi V_{2,p\max}}{4 V_{cc}}}$$

Limitée par la dynamique de sortie

Ampli Op: Ex d'implémentation en CMOS



S2: étage de sortie push-pull à grande impédance d'entrée et faible impédance de sortie avec un gain en tension unitaire, mais un gain en courant $\gg 1$ capable de fournir le courant nécessaire à la charge R_L .