

LA CONTRE REACTION SUR AOP

◆ LES ERREURS DE ZERO

- » tension de décalage
- » courant de polarisation
- » bruit de fond

LA CONTRE REACTION SUR AOP

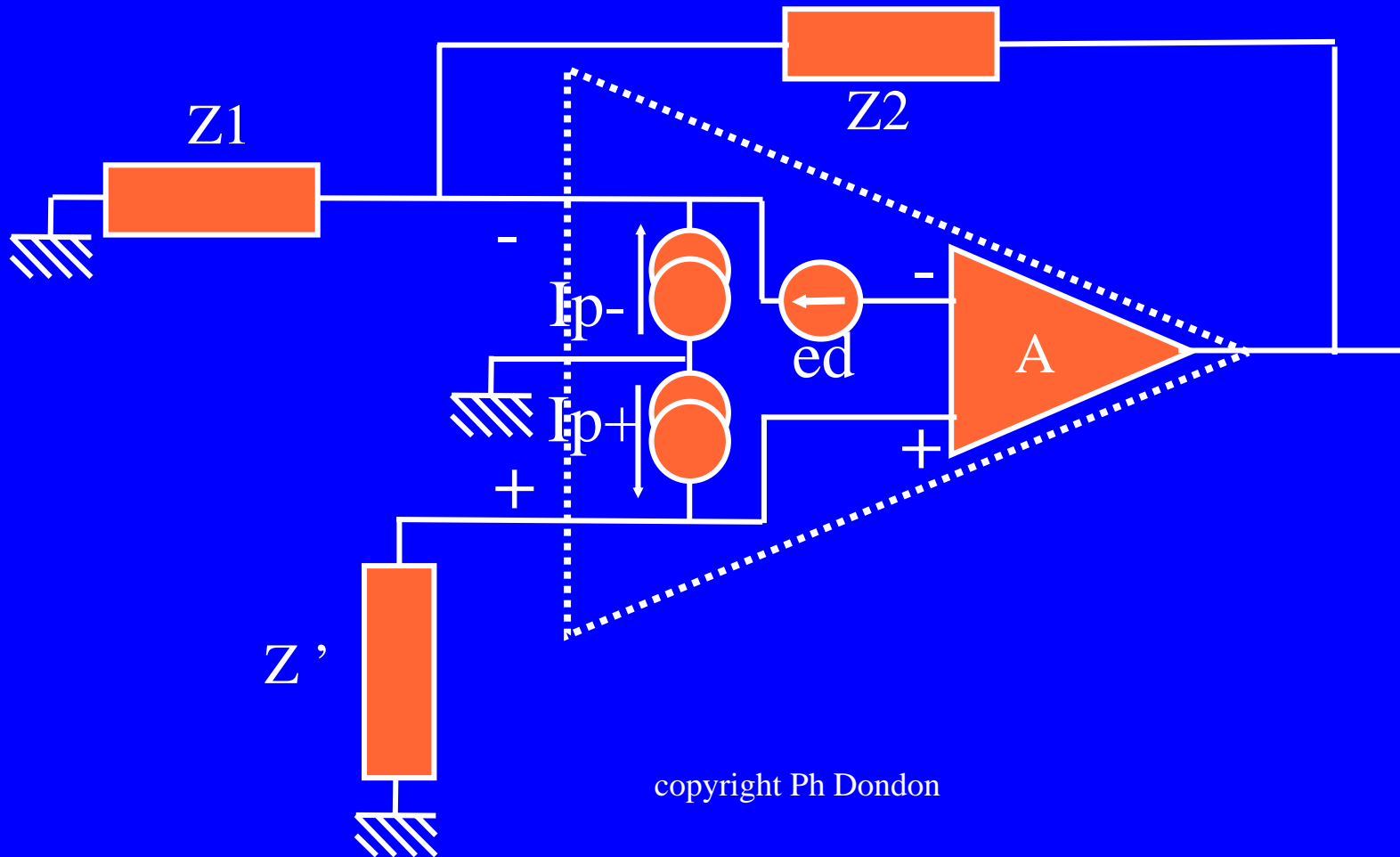
les erreurs de zéros

◆ Pourquoi est-ce important ?

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Modèle de l'AOP avec ses erreurs d'entrée



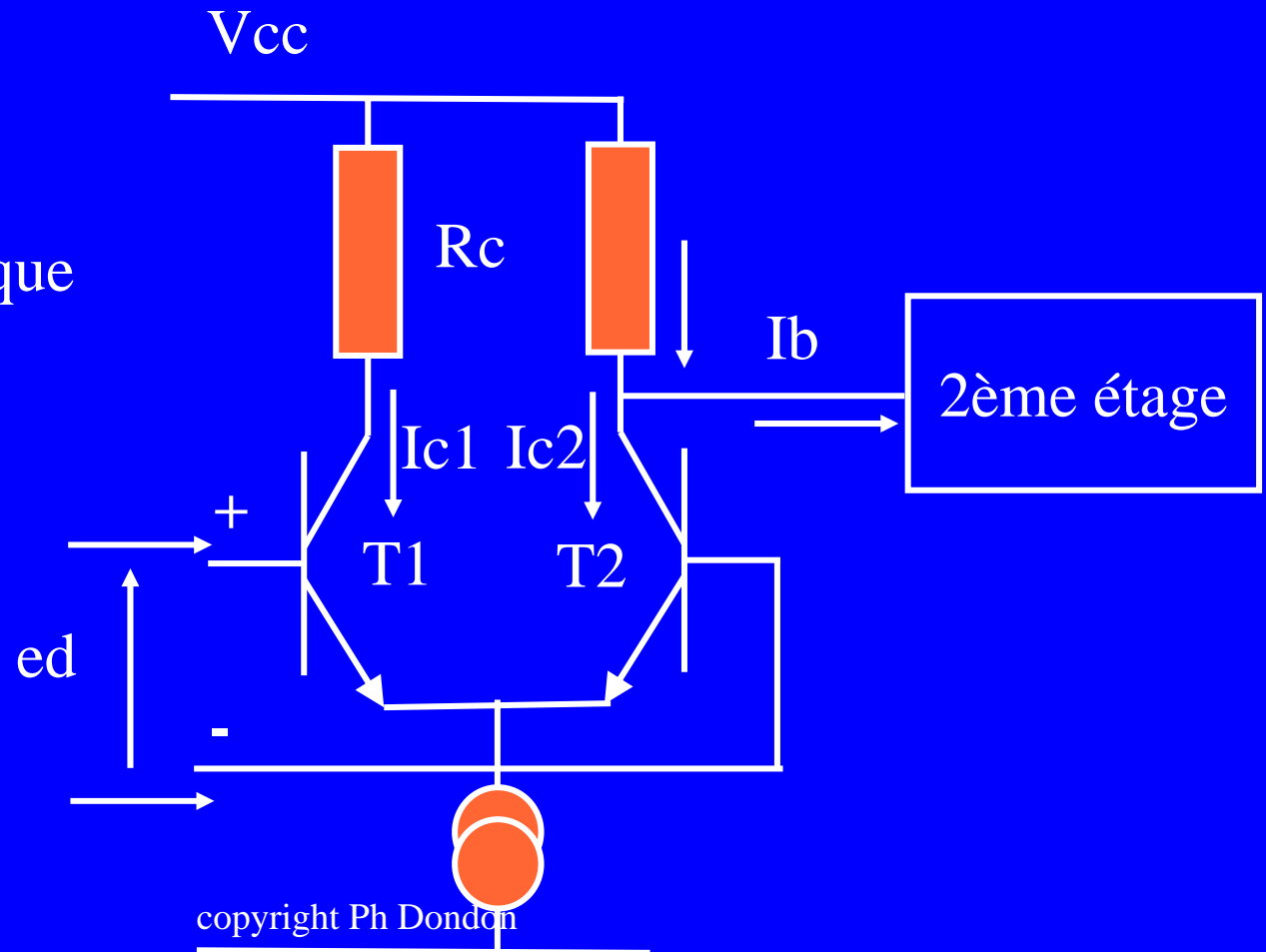
LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Etage d'entrée

Ed : décalage électrique et technologique

$$I_{p+} = I_{B_{T1}}$$
$$I_{p-} = I_{B_{T2}}$$



LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Etage d'entrée

ed : décalage électrique et technologique quelque soit la nature des transistors

$$\left. \begin{array}{l} I_{p+} = I_{B_{T1}} \\ I_{p-} = I_{B_{T2}} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Polarisation des bases} \\ \text{(Seulement en bipolaire)} \end{array}$$

Valeurs continues ou très lentement variables

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

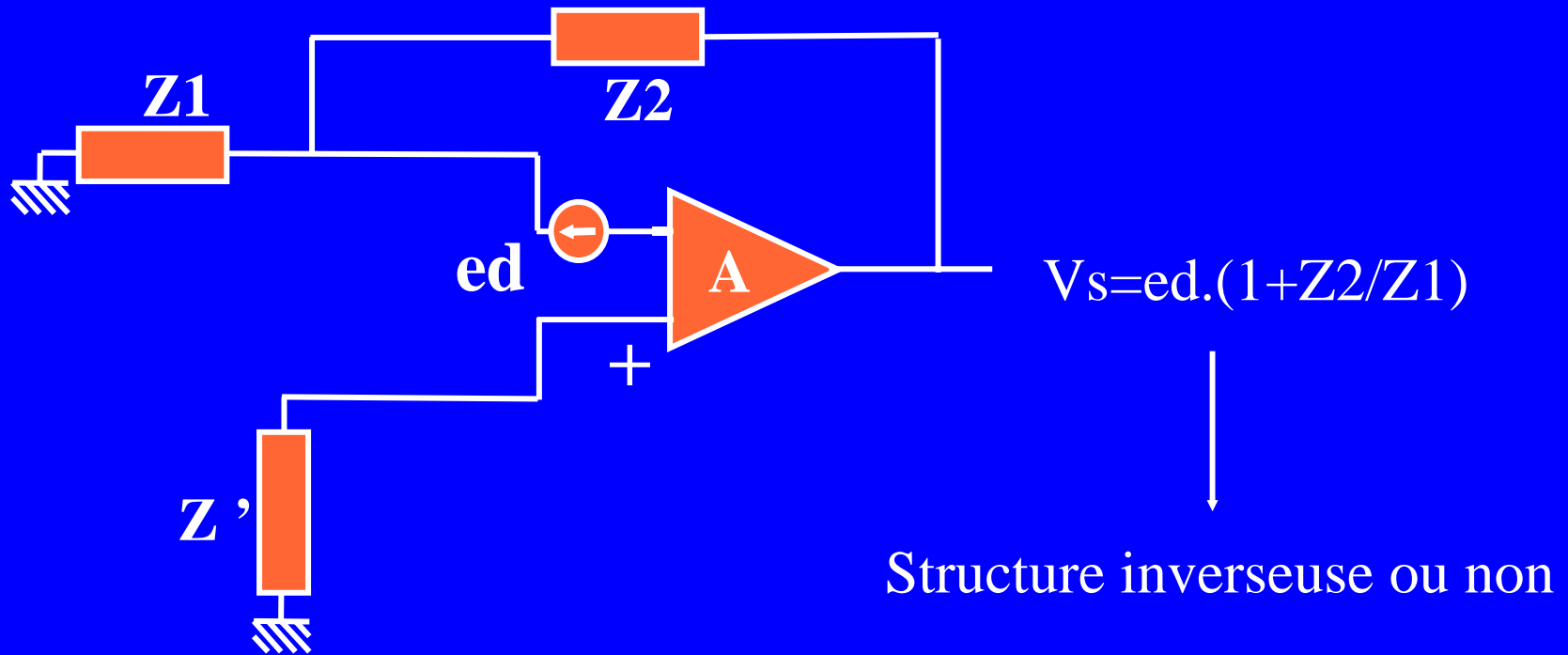
- Impact des erreurs sur la tension de sortie

$$V_s \begin{cases} V'_s = (e_d + Z'i_p +) \cdot \frac{A}{1 + \frac{Z1}{Z1 + Z2} \cdot A} \\ V''_s = -(Z1 \cdot i_p -) \cdot \frac{Z2}{Z1 + Z2} \cdot \frac{A}{1 + \frac{Z1}{Z1 + Z2} \cdot A} \end{cases}$$

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Erreur engendrée en sortie par la tension de décalage



LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Erreur engendrée en sortie par la tension de décalage

- cas de l'intégrateur : $Z1 = R$; $Z2 = 1/Cp$
($A \Rightarrow \infty$)

$$Vs(p) = ed(p). (1 + 1/\tau.p)$$

$$\tau = R.C$$

$ed = \text{valeur constante} \Rightarrow ed(p) = ed.(1/p)$

$$Vs(t) = ed.(1 + t/\tau)$$

⇒ Rampe de tension

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Erreur engendrée en sortie par la tension de décalage
- **cas général de l'intégrateur** : $Z1 = R$; $Z2 = 1/Cp$
(avec $A = A_o$ non infini)

$$V_s = (e_d) \cdot \frac{A_o}{1 + \frac{Z1}{Z1 + Z2} \cdot A_o} \quad \tau = R.C$$

$$V_s(t) = A_o \cdot e_d \cdot [1 - (1 - 1/A_o) e^{-t/\tau(1+A_o)}]$$

Grande cste de temps \Rightarrow allure de rampe

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Erreur engendrée en sortie par la tension de décalage
 - cas général de l'intégrateur :

La tension de décalage a pour effet d'amener la sortie à saturation

Ce montage seul n'est pas utilisable...

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Erreur engendrée en sortie par la tension de décalage

- **compensation possible :**

On peut limiter la tension continue en sortie en plaçant une résistance en parallèle sur le condensateur (à choisir correctement)
ou prévoir un asservissement de manière à maintenir la tension continue de sortie nulle...

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Erreur engendrée en sortie par la tension de décalage

- **cas du dérivateur** : $Z1 = 1/Cp$; $Z2 = C$
(avec $A = A_o$ non infini)

$$V_s = e_d \cdot \frac{A_o}{1 + A_o} \cdot \frac{1 + \tau \cdot p}{p \cdot \left(1 + p \frac{\tau}{1 + A_o}\right)}$$

$e_d =$ valeur constante $\Rightarrow e_d(p) = e_d \cdot (1/p)$

$\tau = R \cdot C$

$$V_s(t) = e_d \cdot [1 + A_o \cdot e^{-t \cdot (1 + A_o) / \tau}]$$

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Erreur engendrée en sortie par la tension de décalage
 - **cas général du dérivateur**

Lors de la mise sous tension,
l'amplificateur tend immédiatement
à saturer puis retourne à l'équilibre

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Précautions générales à prendre en simulation

Toujours

simuler la mise sous tension et hors tension d'un montage

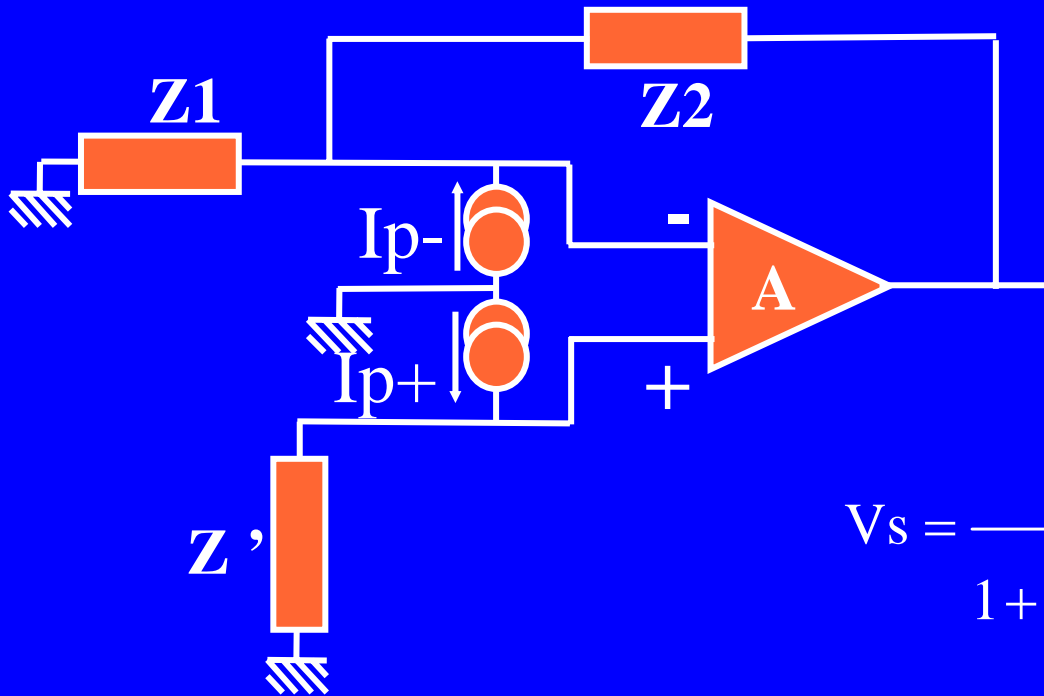
Risque de destruction à la mise sous tension si dérivateur

Risque de destruction à la mise hors tension si intégrateur

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Erreur engendrée par les courants de polarisation (bipolaire uniquement)



$$V_s = \frac{A_o}{1 + \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot A_o} \cdot [Z' I_{p^+} - \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot I_{p^-}]$$

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Erreur engendrée par les courants de polarisation

$$V_s = \frac{A_o}{1 + \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot A_o} \cdot \left[Z' I_p^+ - \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot I_p^- \right]$$

Si on prend : $Z' = Z_1 // Z_2$

$$V_s = \frac{A_o}{1 + \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot A_o} \cdot \left[\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot (I_p^+ - I_p^-) \right]$$

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Erreur engendrée par les courants de polarisation

$$V_s = \frac{A_o}{1 + \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot A_o} \cdot \left[\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot (I_{p^+} - I_{p^-}) \right]$$

Comme $I_{p^+} \approx I_{p^-}$,

La contribution des courants
peut quasiment être annulée

si $Z' = Z_1 // Z_2$

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Erreur engendrée par les courants de polarisation
 - cas général

On pose $I_d = I_p^+ - I_p^-$ (courant de décalage)

$$V_s = \frac{A_o}{1 + \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot A_o} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot I_d \right)$$

Soit : $V_s \approx Z_2 \cdot I_d$ si A_o très grand

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Erreur engendrée par les courants de polarisation
 - cas d 'un ampli inverseur ou non

$$V_s \approx R_2 \cdot I_d$$

Choisir R_2 aussi petite que possible pour minimiser l 'impact du courant de décalage mais compatible avec le gain voulu

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Erreur engendrée les courants de polarisation
- **cas général de l'intégrateur** : $Z1 = R$; $Z2 = 1/Cp$
(avec $A = A_0$ non infini)

$$V_s = (R \cdot I_d) \cdot \frac{A_0}{p \cdot (1 + p\tau(1 + A_0))} \quad \text{Avec } \tau = R \cdot C$$

$I_d = \text{valeur constante} \Rightarrow I_d(p) = I_d \cdot (1/p)$

$$V_s(t) = A_0 \cdot R \cdot I_d \cdot [1 - e^{-t/\tau(1+A_0)}]$$

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Erreur engendrée par les courants de polarisation
- **cas général de l'intégrateur** : $Z1 = R$; $Z2 = 1/Cp$
(avec $A = A_0$ non infini)

Pour t petit devant $A_0 \cdot \tau$:

$$V_s(t) = (I_d/C).t$$

Charge de C à courant constant \Rightarrow Rampe de tension

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Erreur engendrée par les courants de polarisation
 - cas général de l'intégrateur :

La tension e_d et le courant I_d ont le même effet :

Le courant de décalage
amène la sortie à saturation

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

- Erreur engendrée par les courants de polarisation
- **cas général du dérivateur** : $Z1 = 1/Cp$; $Z2 = C$
(avec $A = A_o$ non infini)

$$V_s = R.Id. \frac{A_o}{1 + A_o} \cdot \frac{1}{p \cdot \left(1 + p \frac{\tau}{1 + A_o}\right)}$$

$$\boxed{V_s(t) = R.Id. [1 - e^{-t(1+A_o)/\tau}]} \quad (\text{Si } Z' = R//C)$$

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

L'erreur maximale totale est égale à la somme des erreurs en valeur absolue dues au courant et à la tension de décalage

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

Effet des dérives de E_d et I_d

Attention :
 E_d et I_d dérivent en fonction du temps (vieillessement)
et de la température

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

Compensation de E_d

- Utilisation de transistors appariés
- Potentiomètre externe
- Paires croisées pour réduire l'effet de T°

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

Compensation de I_d

Diminution des courant de collecteurs des transistors d 'entrée

Utilisation de transistors darlington

source de courants internes

utilisation de transistor JFET

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

Impact du bruit de fond dans les amplificateurs

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

Les sources de bruit (rappel)

- Bruit thermique : agitation des électrons dès que $T > 0$ Kelvin (-273°C)

DSP de bruit en $4.K.T.R$ (nV^2/Hz)

- Bruit de grenaille : lié au caractère granulaire et impulsionnel du courant instantané de jonction

DSP en $2.q.I$ (nA^2/Hz)

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

Les sources de bruit

Bruit en $1/f$: bruit base fréquence lié aux phénomènes de surface et d'interface Si-SiO₂

DSP en $1/f$

Bruit RTS : défaut de surface dans les transistors

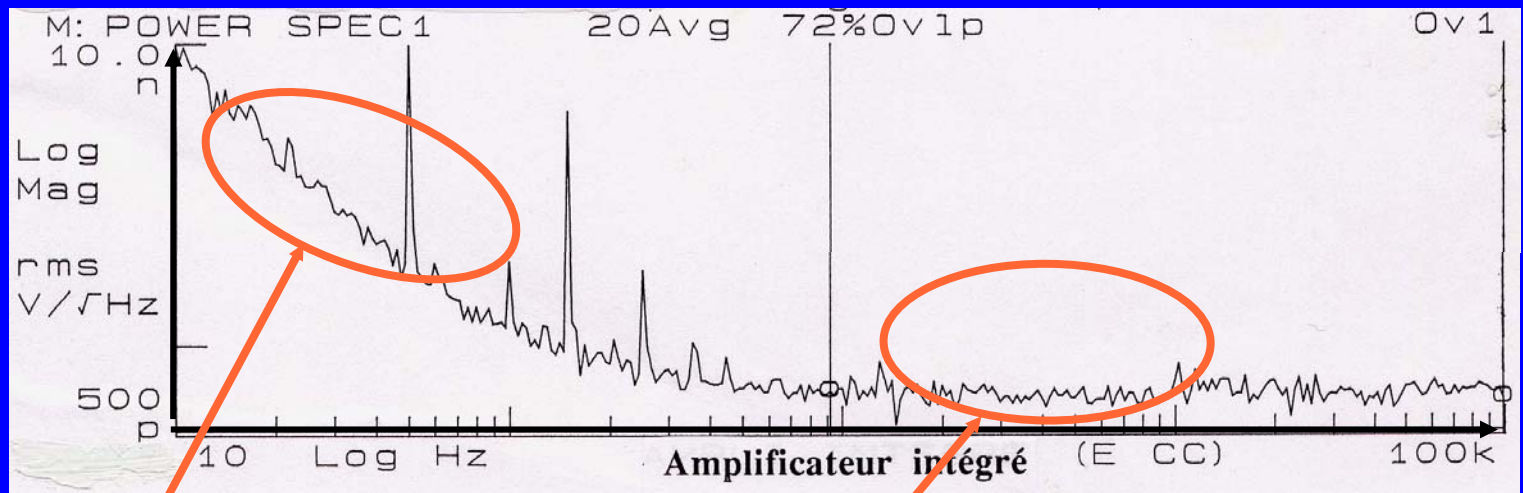
DSP en $1/f$ ou $1/f^2$

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

Les sources de bruit

Exemple d'un ampli faible bruit (analyseur HP 3562)



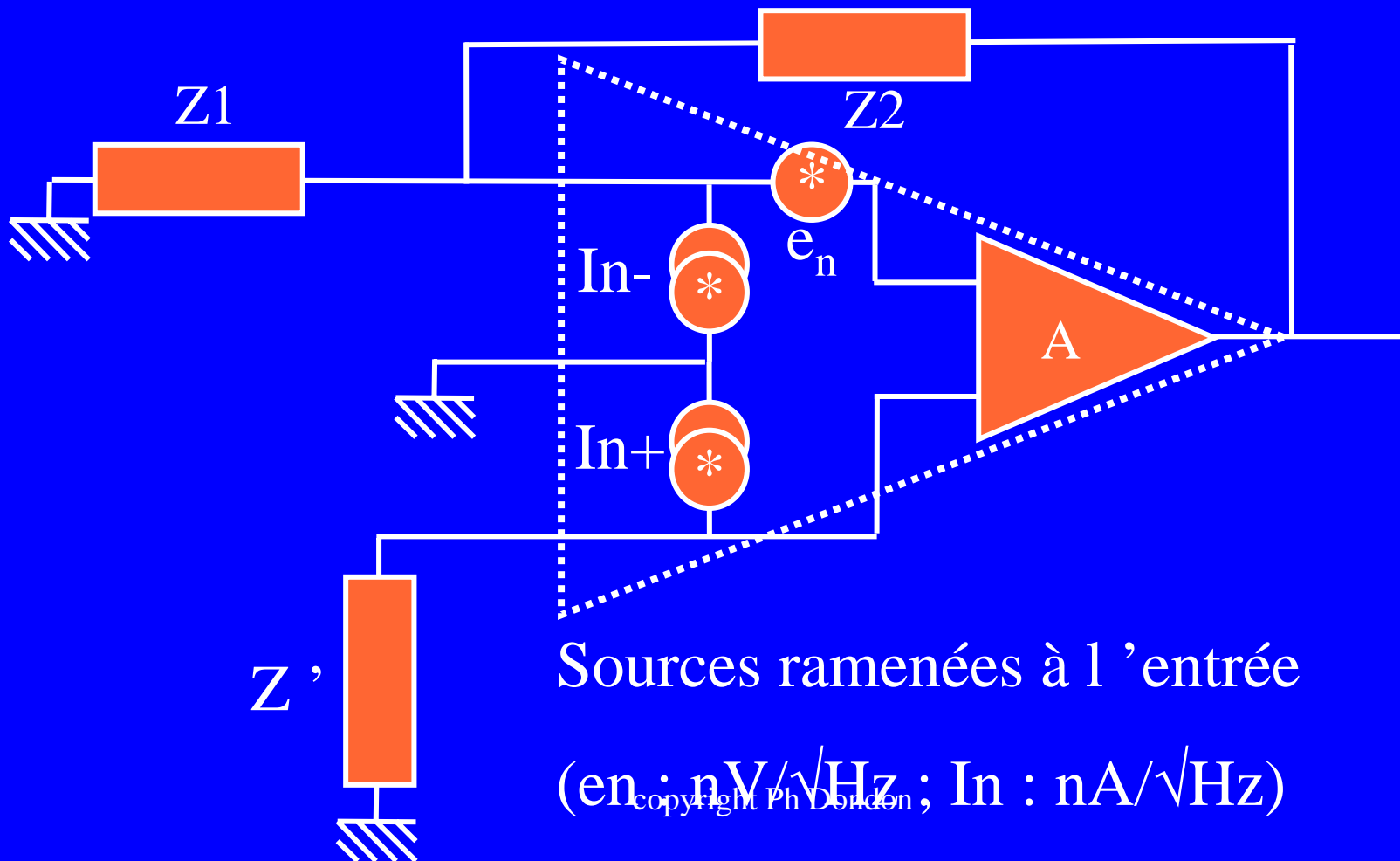
Bruit 1/f

copyright Ph Donc
Bruit thermique

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

Modèle de bruit d'un amplificateur



Sources ramenées à l'entrée

(e_n : nV/\sqrt{Hz} ; I_n : nA/\sqrt{Hz})

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

Bruit en sortie de l'amplificateur

E_{ns}^2 : Valeur quadratique moyenne de bruit en sortie (V^2)

$$E_{ns}^2 = \int_{f1}^{f2} e_{ns}^2 .df$$

Avec e_{ns} : DSP de bruit en sortie

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

DSP bruit en sortie \Leftrightarrow contribution de e_n , I_n^+ , I_n^-


$$e_{ns} \left\{ \begin{array}{l} e_{nsv} = e_n \cdot \frac{A}{1 + \frac{Z1}{Z1+Z2} \cdot A} \\ e_{nsin+} = Z'i_n^+ \cdot \frac{A}{1 + \frac{Z1}{Z1+Z2} \cdot A} \\ e_{nsin-} = (i_n^-) \cdot \frac{Z1 \cdot Z2}{Z1+Z2} \cdot \frac{A}{1 + \frac{Z1}{Z1+Z2} \cdot A} \end{array} \right.$$

copyright Ph Dondon

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

Valeur quadratique moyenne de bruit en sortie

$$E_{ns}^2 = E_{ns(v)}^2 + E_{ns(in+)}^2 + E_{ns(in-)}^2$$


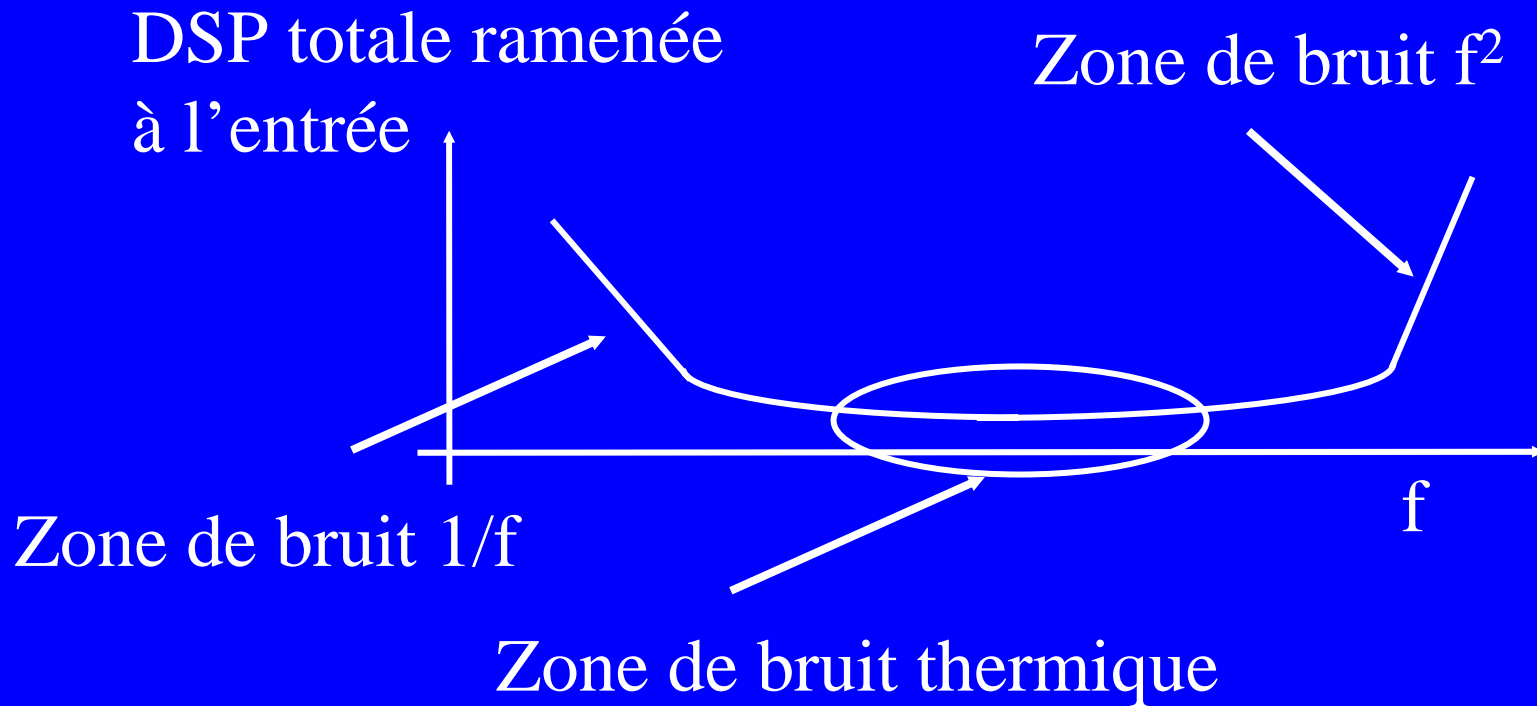
Attention : Somme des valeurs quadratiques (*)

(*) si bruits non corrélés
copyright Ph Dondon

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

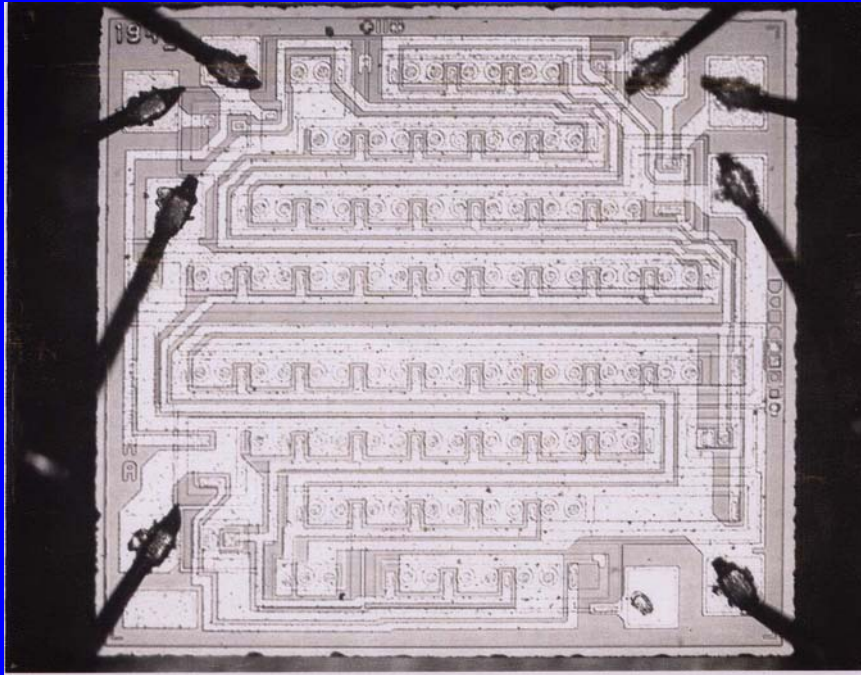
Cas du transistor bipolaire



LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

Cas du transistor bipolaire



350um

copyright Ph Dondon

Exemple de
géométrie LM 394

(une vingtaine de tr en //)



Diminution du r_{bb}'

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

Minimisation de l'erreur due au bruit

- Si résistance de source faible => AOP à entrée bipolaire ou utilisation de « super matched lownoise » transistor en étage différentiel (ex LM394)
- Existence d'un courant de polarisation optimum (si concepteur)
- Si résistance de source forte (> qqes 100 kohms)
AOP entrée JFET

LA CONTRE REACTION SUR AOP

les erreurs de zéro

Minimisation de l'erreur due au bruit

- Un bouquin intéressant :

« Low noise electronic design »

Motchen et fitchen

Ed John Wiley Sons