



www.fee.bzh

White paper For Engineer Eyes

WP-008Af – Dec. 2021

Author: J. Pontois

Bruit dans les montages à Amplificateurs Opérationnels (en RF)

SOMMAIRE

1. OBJET	3
2. AMPLIFICATEURS IDEAUX	4
2.1. AMPLIFICATEUR IDEAL	4
2.2. AMPLIFICATEUR QUASI IDEAL	6
2.3. AMPLIFICATEUR IDEAL AVEC TRANSFORMATEURS	7
2.4. AMPLIFICATEUR QUASI IDEAL AVEC TRANSFORMATEURS	8
2.5. N AMPLIFICATEURS IDEAUX EN PARALLELE	8
2.6. N AMPLIFICATEURS QUASI IDEAUX EN PARALLELE	10
3. AOP EN AMPLIFICATEUR INVERSEUR	11
3.1. AMPLIFICATEUR INVERSEUR SIMPLE	11
3.2. N AMPLIFICATEURS INVERSEURS EN PARALLELE	14
3.3. N AMPLIFICATEURS INVERSEURS EN PARALLELE AVEC TRANSFORMATEURS	17
4. AOP EN AMPLIFICATEUR NON INVERSEUR	19
4.1. AMPLIFICATEUR NON INVERSEUR SIMPLE	19
4.2. N AMPLIFICATEURS NON INVERSEURS EN PARALLELE	23
4.3. N AMPLIFICATEURS NON INVERSEURS EN PARALLELE AVEC TRANSFORMATEURS	27
5. AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL	28

1. OBJET

Ce document caractérise le bruit de plusieurs structures d'amplificateurs RF à base d'amplificateurs opérationnels. On s'intéresse essentiellement au cas des amplificateurs à impédances d'entrée-sortie réelles (tension et amplitude en phase), approximation considérée valide pour des montages jusqu'à quelques dizaines de MHz. En particulier, le calcul n'impose pas l'utilisation d'une impédance particulière pour les entrées-sorties.

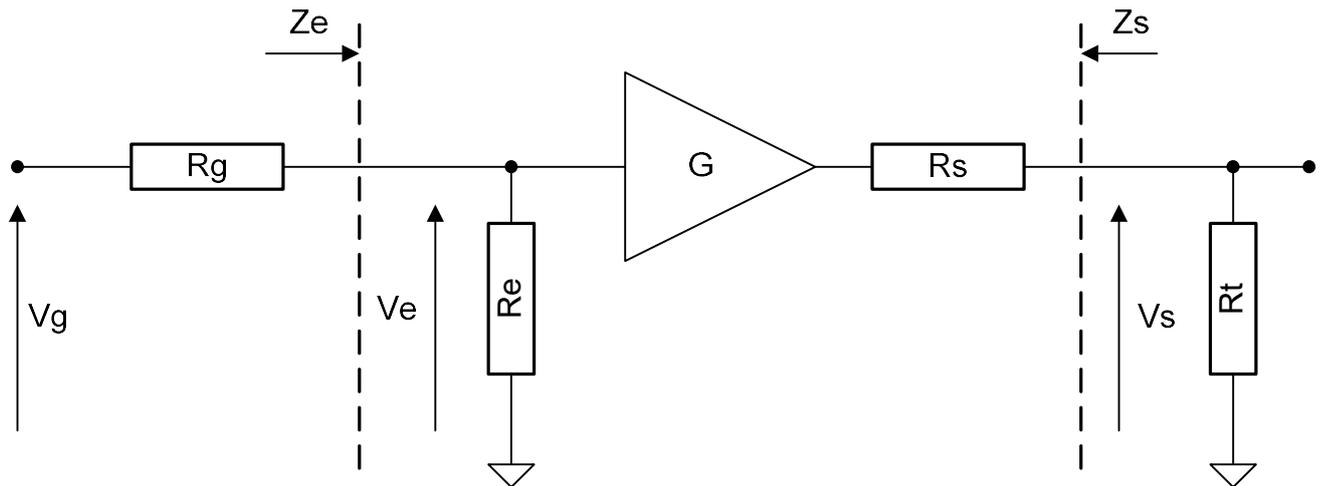
Note : document interne 010-NT-012B d'Avril 2015, passage en « White Paper » en décembre 2021.

Ce document de FEE est fourni pour information, sans aucune garantie. Sa copie partielle n'est pas autorisée.

2. AMPLIFICATEURS IDEAUX

2.1. AMPLIFICATEUR IDEAL

On considère un amplificateur idéal (impédance d'entrée infinie, impédance de sortie nulle, gain en tension G , sans bruit ajouté) :



$$\left\{ \begin{array}{l} H_{ref} = \frac{R_t}{R_t + R_g} \\ Z_e = R_e \\ Z_s = R_s \\ V_e = V_g \frac{R_e}{R_e + R_g} \\ H = \frac{V_s}{V_g} = G \frac{R_e}{R_e + R_g} \frac{R_t}{R_t + R_s} \\ H_{eff} = \frac{H}{H_{ref}} = G \frac{R_e}{R_e + R_g} \frac{R_t + R_g}{R_t + R_s} \end{array} \right.$$

On suppose toutes les charges à la température T . Une résistance R génère un bruit thermique (blanc et gaussien) de densité spectrale de puissance $e_{th}(R)^2 = 4kTR$ en tension (ou $i_{th}^2 = 4kT$ en courant).

La densité spectrale de puissance de bruit en entrée de l'amplificateur (sur V_e) des résistances R_g et R_e est :

$$e_{in}^2 = 4kT(R_g // R_e) = 4kT \frac{R_g R_e}{R_g + R_e}$$

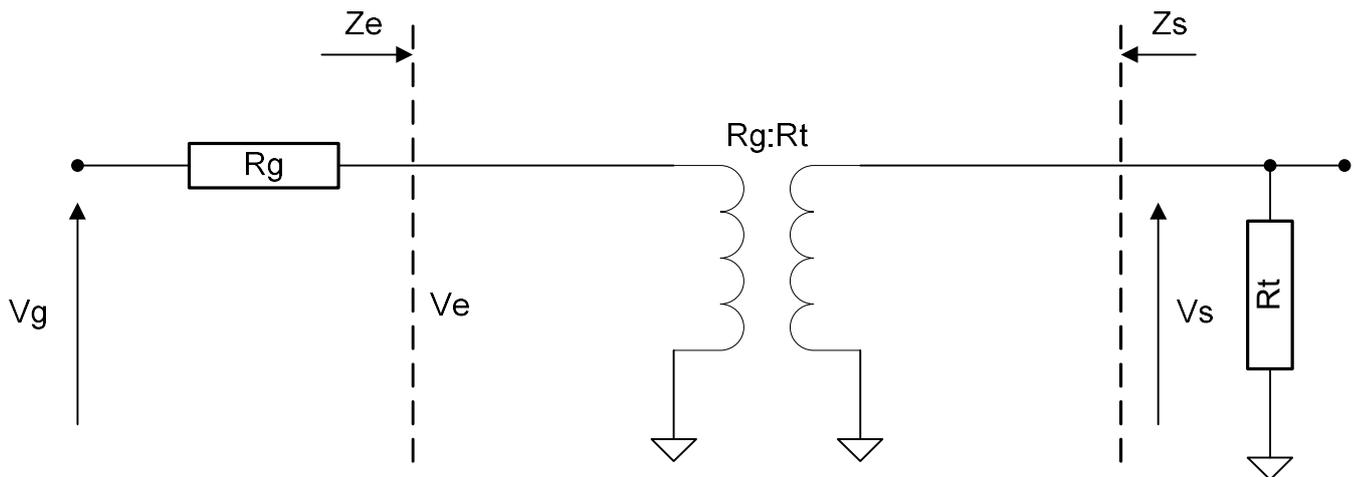
La densité spectrale de puissance de bruit en sortie (sur V_s) est le bruit en entrée amplifié, augmenté du bruit des résistances R_s et R_t :

$$e_{out}^2 = G^2 e_{in}^2 \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right)^2 + 4kT(R_s // R_t) = 4kTG^2 \frac{R_g R_e}{R_g + R_e} \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right)^2 + 4kT \frac{R_s R_t}{R_s + R_t}$$

Le rapport S/N dans une bande B en sortie de l'amplificateur est :

$$\frac{S}{N}_{out} = \frac{V_s^2}{B \cdot e_{out}^2} = \frac{G^2 V_g^2 \left(\frac{R_e}{R_e + R_g} \right)^2 \left(\frac{R_t}{R_t + R_s} \right)^2}{4kTB \left(G^2 \frac{R_e R_g}{R_e + R_g} \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right)^2 + \frac{R_s R_t}{R_s + R_t} \right)}$$

En l'absence d'amplificateur, on utilise le montage adaptateur d'impédance avec un transformateur idéal:



Le rapport S/N en sortie est ici :

$$\frac{S}{N}_{ref} = \frac{\left(\frac{V_g}{2} \right)^2}{4kTB \frac{R_g}{2}} = \frac{V_g^2}{8kTBR_g}$$

La dégradation du rapport S/N apportée par le montage amplificateur (son facteur de bruit) est :

$$F_1 = \frac{\frac{S}{N}_{ref}}{\frac{S}{N}_{out}} = \frac{\frac{V_g^2}{8kTBR_g}}{\frac{G^2 V_g^2 \left(\frac{R_e}{R_e + R_g} \right)^2 \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right)^2}{4kTB \left(G^2 \frac{R_e R_g}{R_e + R_g} \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right)^2 + \frac{R_s R_t}{R_s + R_t} \right)}} = \frac{G^2 \frac{R_e R_g}{R_e + R_g} \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right)^2 + \frac{R_s R_t}{R_s + R_t}}{2G^2 \left(\frac{R_e}{R_e + R_g} \right)^2 \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right)^2 R_g}$$

Ou encore $F_1 = \frac{G^2 \frac{R_e}{R_e + R_g} \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right) + \frac{R_s}{R_g}}{2G^2 \left(\frac{R_e}{R_e + R_g} \right)^2 \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right)}$

$$\text{Soit } F_1 = \frac{R_e + R_g}{2R_e} \left(1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{R_g} \frac{R_t + R_s}{2R_t} \frac{R_e + R_g}{2R_e} \right)$$

Note : F_1 peut être inférieur à 1, dans le cas où $R_g < R_e$.

$$\text{Dans le cas } R_e = R_g, R_s = R_t : F_1 = 1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_t}{R_g}$$

Dans ce cas (impédances d'entrée et de sortie adaptées), F_1 est toujours supérieur à 1.

$$\text{Et dans le cas } R_e = R_g = R_t = R_s = R_0 : F_1 = 1 + \frac{4}{G^2}$$

2.2. AMPLIFICATEUR QUASI IDEAL

L'amplificateur quasi idéal est ici défini comme un amplificateur idéal possédant un facteur de bruit propre F_a .

Le facteur de bruit du montage avec amplificateur quasi idéal peut se déduire du calcul du facteur de bruit du montage amplificateur idéal, en pré-multipliant la puissance de bruit d'entrée e_{in}^2 par le facteur de bruit propre F_a .

Le rapport S/N dans une bande B en sortie du montage devient alors :

$$\frac{S}{N} out = \frac{G^2 V_g^2 \left(\frac{R_e}{R_e + R_g} \right)^2 \left(\frac{R_t}{R_t + R_s} \right)^2}{4kTB \left(G^2 \frac{R_e R_g}{R_e + R_g} F_a \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right)^2 + \frac{R_s R_t}{R_s + R_t} \right)}$$

La dégradation du rapport S/N apportée par le montage amplificateur (son facteur de bruit) est :

$$F_{1q} = \frac{\frac{S}{N} ref}{\frac{S}{N} out} = \frac{\left(G^2 \frac{R_e R_g}{R_e + R_g} F_a \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right)^2 + \frac{R_s R_t}{R_s + R_t} \right)}{2G^2 \left(\frac{R_e}{R_e + R_g} \right)^2 \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right)^2 R_g}$$

$$\text{Soit } F_{1q} = \frac{R_e + R_g}{2R_e} \left(1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{R_g} \frac{R_e + R_g}{2R_e} \frac{R_t + R_s}{2R_t} + (F_a - 1) \right)$$

$$\text{A partir du facteur de bruit de l'amplificateur idéal : } F_1 = \frac{R_e + R_g}{2R_e} \left(1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{R_g} \cdot \frac{R_t + R_s}{2R_t} \frac{R_e + R_g}{2R_e} \right)$$

On peut écrire $F_{1q} = F_1 + \frac{R_e + R_g}{2R_e}(F_a - 1)$

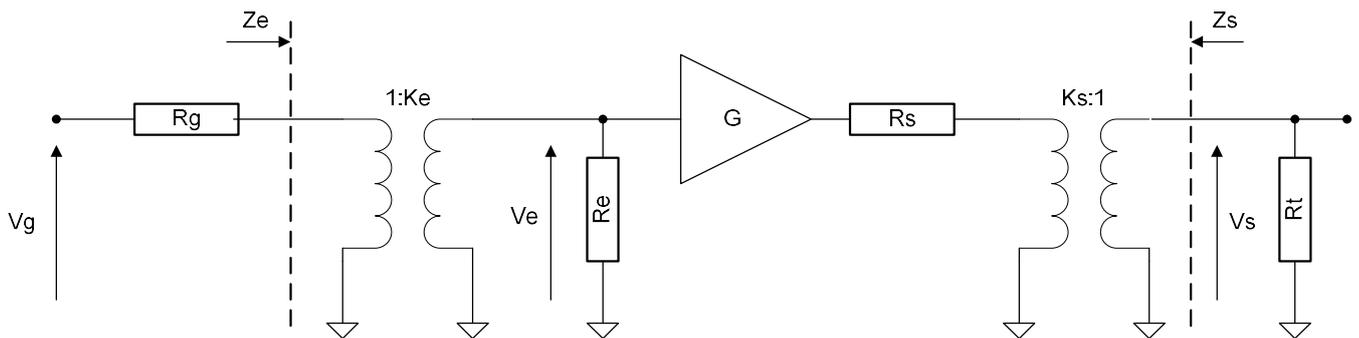
Ou inversement on déduit : $F_a = 1 + \frac{2R_e}{R_e + R_g}(F_q - F_1)$

Dans le cas $R_e = R_g$, $R_s = R_t$: $F_{1q} = F_1 + F_a - 1 = F_a + \frac{4}{G^2} \frac{R_t}{R_g}$

Et dans le cas $R_e = R_g = R_t = R_s = R_0$: $F_{1q} = F_1 + F_a - 1 = F_a + \frac{4}{G^2}$

2.3. AMPLIFICATEUR IDEAL AVEC TRANSFORMATEURS

On considère un amplificateur idéal (impédance d'entrée infinie, impédance de sortie nulle, gain en tension G , sans bruit ajouté), précédé et suivi de transformateurs d'impédance idéaux, de rapports d'impédance T_e et T_s :



$$\left\{ \begin{array}{l} H_{ref} = \frac{R_t}{R_t + R_g} \\ Z_e = R_e / K_e \\ Z_s = R_s / K_s \\ V_e = V_g \frac{R_e}{R_e + K_e R_g} \\ H = \frac{V_s}{V_g} = G \frac{R_e}{R_e + K_e R_g} \frac{R_t}{R_t + R_s / K_s} \sqrt{\frac{K_e}{K_s}} \\ H_{eff} = \frac{H}{H_{ref}} = G \frac{R_e}{R_e + K_e R_g} \frac{R_t + R_g}{R_t + R_s / K_s} \sqrt{\frac{K_e}{K_s}} \end{array} \right.$$

Le facteur de bruit du montage est celui d'un amplificateur utilisé avec une impédance de générateur $K_e R_g$, une impédance de charge de $K_s R_t$, soit :

$$F_{T1} = \frac{R_e + K_e R_g}{2R_e} \left(1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{K_e R_g} \frac{K_s R_t + R_s}{2K_s R_t} \frac{R_e + K_e R_g}{2R_e} \right)$$

Par ailleurs, les deux transformateurs multiplient le gain en tension global par $\sqrt{\frac{K_e}{K_s}}$: pour un gain en tension global donné, le gain G de l'amplificateur doit être compensé.

Dans le cas $R_e = K_e R_g$, $R_s = K_s R_t$: $F_{T1} = 1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_t}{R_g} \frac{K_s}{K_e}$

Et dans le cas $R_e = K_e R_g = K_s R_t = R_s = R_0$: $F_{T1} = 1 + \frac{4}{G^2}$

2.4. AMPLIFICATEUR QUASI IDEAL AVEC TRANSFORMATEURS

L'amplificateur quasi idéal est ici défini comme un amplificateur idéal possédant un facteur de bruit propre F_a .

Le facteur de bruit du montage amplificateur quasi idéal s'obtient à partir du facteur de bruit de l'amplificateur idéal dans la même configuration :

$$F_{T1q} = F_{T1} + \frac{R_e + K_e R_g}{2R_e} (F_a - 1)$$

Avec $F_{T1} = \frac{R_e + K_e R_g}{2R_e} \left(1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{K_e R_g} \frac{K_s R_t + R_s}{2K_s R_t} \frac{R_e + K_e R_g}{2R_e} \right)$

Soit $F_{T1q} = \frac{R_e + K_e R_g}{2R_e} \left(F_a + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{K_e R_g} \frac{K_s R_t + R_s}{2K_s R_t} \frac{R_e + K_e R_g}{2R_e} \right)$

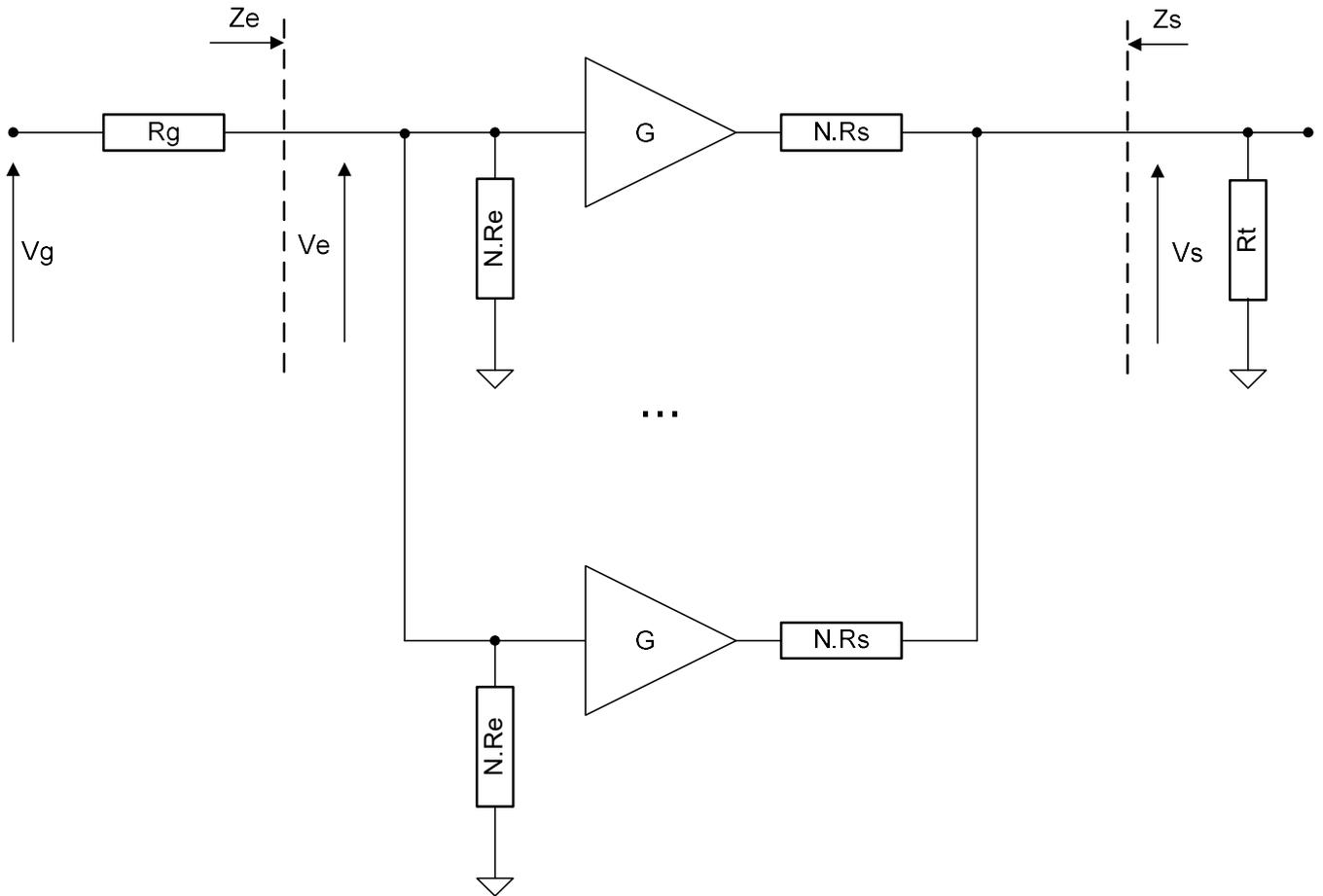
Inversement, on a : $F_a = 1 + \frac{2R_e}{R_e + K_e R_g} (F_{T1q} - F_{T1})$

Dans le cas $R_e = K_e R_g$, $R_s = K_s R_t$: $F_{T1q} = F_a + \frac{4}{G^2} \frac{R_t}{R_g} \frac{K_s}{K_e}$

Et dans le cas $R_e = K_e R_g = K_s R_t = R_s = R_0$: $F_{T1q} = F_a + \frac{4}{G^2}$

2.5. N AMPLIFICATEURS IDEAUX EN PARALLELE

On considère le montage suivant avec N amplificateurs idéaux en parallèle :



$$\left\{ \begin{array}{l} H_{ref} = \frac{R_t}{R_t + R_g} \\ Z_e = R_e \\ Z_s = R_s \\ V_e = V_g \frac{R_e}{R_e + R_g} \\ H = \frac{V_s}{V_g} = G \frac{R_e}{R_e + R_g} \frac{NR_t}{R_t + R_s} \\ H_{eff} = \frac{H}{H_{ref}} = G \frac{R_e}{R_e + R_g} \frac{R_s + R_g}{R_s + R_t} \end{array} \right.$$

On suppose tous les amplificateurs identiques. L'ensemble est alors équivalent à un amplificateur idéal unique de résistances d'entrée et de sortie R_e et R_s , identique au paragraphe 2.1. Le facteur de bruit est

$$\text{donc : } F_N = F_1 = \frac{R_e + R_g}{2R_e} \left(1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{R_g} \frac{R_t + R_s}{2R_t} \frac{R_e + R_g}{2R_e} \right)$$

2.6. N AMPLIFICATEURS QUASI IDEAUX EN PARALLELE

L'amplificateur quasi idéal est ici défini comme un amplificateur idéal possédant un facteur de bruit propre F_a .

Le facteur de bruit du montage amplificateur quasi idéal s'obtient à partir du facteur de bruit du montage avec amplificateurs idéaux dans la même configuration :

$$F_{Nq} = F_N + \frac{R_e + R_g}{2R_e} (F_a - 1)$$

$$\text{avec } F_N = F_1 = \frac{R_e + R_g}{2R_e} \left(1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{R_g} \frac{R_l + R_s}{2R_l} \frac{R_e + R_g}{2R_e} \right)$$

$$\text{Inversement, on a : } F_a = 1 + \frac{2R_e}{R_e + R_g} (F_{Nq} - F_N)$$

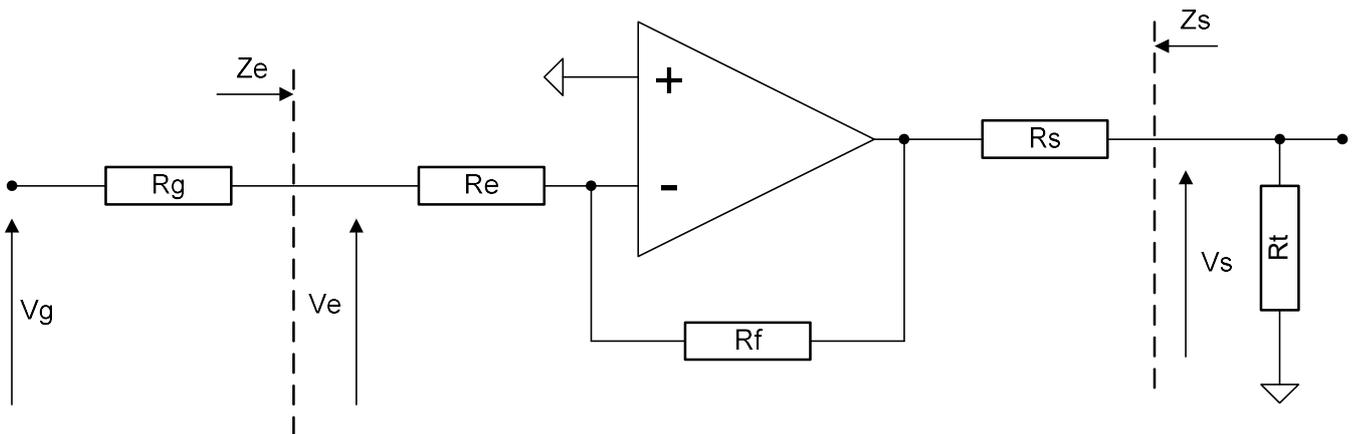
$$\text{Dans le cas } R_e = R_g, R_s = R_l : F_{Nq} = F_N + F_a - 1 = F_a + \frac{4}{G^2} \frac{R_l}{R_g} = F_{1q}$$

$$\text{Et dans le cas } R_e = R_g = R_l = R_s = R_0 : F_{Nq} = F_N + F_a - 1 = F_a + \frac{4}{G^2} = F_{1q}$$

3. AOP EN AMPLIFICATEUR INVERSEUR

3.1. AMPLIFICATEUR INVERSEUR SIMPLE

On considère le montage suivant avec un amplificateur opérationnel utilisé en inverseur:



$$\left\{ \begin{array}{l} H_{ref} = \frac{R_t}{R_t + R_g} \\ Z_e = R_e \\ Z_s = R_s \\ G = \frac{R_f}{R_e} \\ V_e = V_g \frac{R_e}{R_e + R_g} \\ H = \frac{V_s}{V_g} = -G \frac{R_e}{R_e + R_g} \frac{R_t}{R_t + R_s} \\ H_{eff} = \frac{H}{H_{ref}} = -G \frac{R_e}{R_e + R_g} \frac{R_t + R_g}{R_t + R_s} \end{array} \right.$$

Caractérisation de l'amplificateur opérationnel :

- e_n : densité spectrale de bruit en tension sur l'entrée
- i_{n-} : densité spectrale de bruit en courant sur l'entrée négative
- i_{n+} : densité spectrale de bruit en courant sur l'entrée positive

Le calcul est le même que pour l'amplificateur idéal, des termes supplémentaires sont à prendre en compte :

Ramenés sur la sortie de l'amplificateur opérationnel :

$$e_{out}^2 (op) = 4kT \frac{R_g R_e}{R_g + R_e} G^2 + R_f^2 i_{n-}^2 + (1+G)^2 e_n^2 + 4kTR_f \text{ avec } R_f = GR_e$$

D'où la densité spectrale de puissance de bruit en sortie (sur V_s), qui est augmenté du bruit des résistances R_s et R_t :

$$e_{out}^2 = e_{out}^2 (op) \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right)^2 + 4kT \frac{R_s R_t}{R_s + R_t}$$

$$\text{soit } e_{out}^2 = \left(4kT \frac{R_g R_e}{R_g + R_e} G^2 + G^2 R_e^2 i_{n-}^2 + (1+G)^2 e_n^2 + 4kTGR_e \right) \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right)^2 + 4kTR_s \frac{R_t}{R_s + R_t}$$

On en déduit le rapport signal à bruit en sortie :

$$\frac{S}{N}^{out} = \frac{V_s^2}{B \cdot e_{out}^2} = \frac{G^2 V_g^2 \left(\frac{R_e}{R_e + R_g} \right)^2 \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right)}{\left(4kTB \frac{R_g R_e}{R_g + R_e} G^2 + G^2 R_e^2 i_{n-}^2 B + (1+G)^2 e_n^2 B + 4kTBGR_e \right) \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right) + 4kTBR_s}$$

La dégradation du rapport S/N apportée par le montage amplificateur (son facteur de bruit) est :

$$F_{li} = \frac{\frac{S}{N}^{ref}}{\frac{S}{N}^{out}} = \frac{\frac{V_g^2}{4kTBR_g}}{2G^2 V_g^2 \left(\frac{R_e}{R_e + R_g} \right)^2 \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right) \left(4kTB \frac{R_g R_e}{R_g + R_e} G^2 + G^2 R_e^2 i_{n-}^2 B + (1+G)^2 e_n^2 B + 4kTBGR_e \right) \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right) + 4kTBR_s}$$

$$F_{li} = \frac{1}{2} \left(\frac{R_e + R_g}{R_e} \right)^2 \left[\frac{R_e}{R_g + R_e} + \frac{R_e^2 i_{n-}^2 + \left(1 + \frac{1}{G} \right)^2 e_n^2}{4kTR_g} + \frac{1}{G} \frac{R_e}{R_g} + \frac{1}{G^2} \frac{R_s}{R_g} \left(\frac{R_s + R_t}{R_t} \right) \right]$$

$$F_{li} = \frac{R_e + R_g}{2R_e} \left(1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{R_g} \frac{R_s + R_t}{2R_t} \frac{R_e + R_g}{2R_e} + 2 \frac{R_e + R_g}{2R_g} \left(\frac{1}{G} + \frac{R_e^2 i_{n-}^2 + \left(1 + \frac{1}{G} \right)^2 e_n^2}{4kTR_e} \right) \right)$$

$$\text{A partir du facteur de bruit de l'amplificateur idéal : } F_1 = \frac{R_e + R_g}{2R_e} \left(1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{R_g} \cdot \frac{R_t + R_s}{2R_t} \frac{R_e + R_g}{2R_e} \right)$$

on peut écrire :
$$F_{li} = F_1 + 2 \frac{R_e + R_g}{2R_e} \frac{R_e + R_g}{2R_g} \left(\frac{1}{G} + \frac{R_e i_{n-}^2 + \left(1 + \frac{1}{G}\right)^2 \frac{e_n^2}{R_e}}{4kT} \right)$$

Par rapport au montage amplificateur idéal, on déduit le facteur de bruit propre à l'amplificateur opérationnel :

$$F_a = 1 + \frac{2R_e}{R_e + R_g} (F_{li} - F_1) = 1 + 2 \frac{R_e + R_g}{2R_g} \left(\frac{1}{G} + \frac{R_e i_{n-}^2 + \left(1 + \frac{1}{G}\right)^2 \frac{e_n^2}{R_e}}{4kT} \right)$$

Dans le cas $R_e = R_g$, $R_s = R_t$:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{li} = 1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{R_g} + \frac{2}{G} + \frac{R_g i_{n-}^2 + \left(1 + \frac{1}{G}\right)^2 \frac{e_n^2}{R_g}}{2kT} \\ F_a = 1 + \frac{2}{G} + \frac{R_g i_{n-}^2 + \left(1 + \frac{1}{G}\right)^2 \frac{e_n^2}{R_g}}{2kT} \end{array} \right.$$

Et dans le cas $R_e = R_g = R_s = R_t = R_0$:

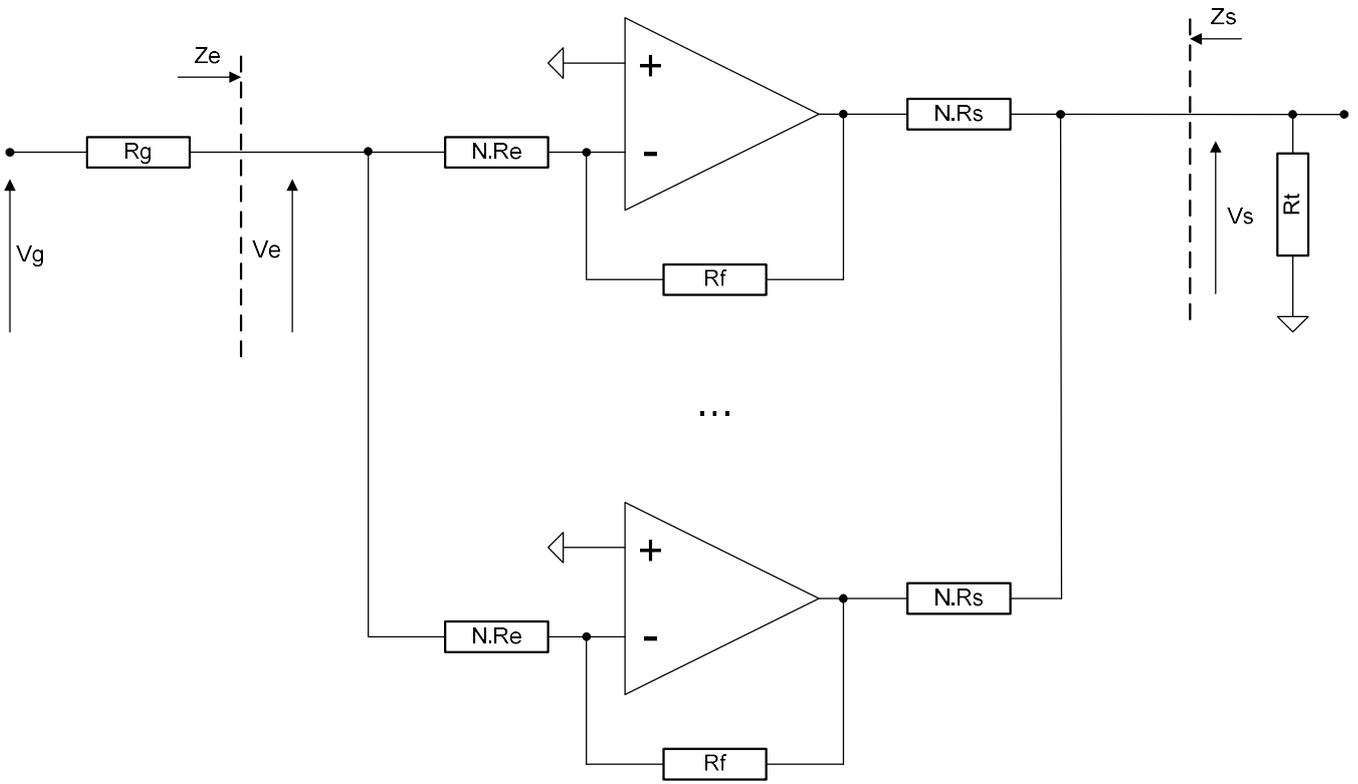
$$\left\{ \begin{array}{l} F_{li} = 1 + \frac{4}{G^2} + \frac{2}{G} + \frac{R_0 i_{n-}^2 + \left(1 + \frac{1}{G}\right)^2 \frac{e_n^2}{R_0}}{2kT} \\ F_a = 1 + \frac{2}{G} + \frac{R_0 i_{n-}^2 + \left(1 + \frac{1}{G}\right)^2 \frac{e_n^2}{R_0}}{2kT} \end{array} \right.$$

A gain fixé, F_{li} est minimal pour $R_0 i_{n-}^2 + \left(1 + \frac{1}{G}\right)^2 \frac{e_n^2}{R_0}$ minimal, soit $R_0 = \left(1 + \frac{1}{G}\right) \frac{e_n}{i_{n-}}$

On a alors $F_{li} = 1 + \frac{4}{G^2} + \frac{2}{G} + \frac{e_n i_{n-}}{kT} \left(1 + \frac{1}{G}\right)$

3.2. N AMPLIFICATEURS INVERSEURS EN PARALLELE

On considère la mise en parallèle de N amplificateurs inverseurs identiques.



Le bruit local généré par un amplificateur opérationnel à sa sortie est:

$$e_{out}^2(op) = R_f^2 i_n^2 + (1+G)^2 e_n^2 + 4kTR_f \text{ avec } R_f = GNR_e$$

D'où la densité spectrale de puissance de bruit en sortie (sur V_s), qui est augmenté du bruit des résistances d'entrée-sortie:

$$e_{out}^2 = Ne_{out}^2(op) \left(\frac{\frac{R_t \cdot NR_s / (N-1)}{R_t + NR_s / (N-1)}}{NR_s + \frac{R_t \cdot NR_s / (N-1)}{R_t + NR_s / (N-1)}} \right)^2 + 4kT \frac{R_g R_e}{R_g + R_e} G^2 \left(\frac{R_t}{R_t + R_s} \right)^2 + 4kT \frac{R_t R_s}{R_t + R_s}$$

$$e_{out}^2 = \left(\frac{R_t}{R_t + R_s} \right)^2 \left(\frac{e_{out}^2(op)}{N} + 4kT \frac{R_g R_e}{R_g + R_e} G^2 \right) + 4kTNR_s \frac{R_t}{R_t + R_s}$$

$$\text{soit } e_{out}^2 = \left(\frac{G^2 N^2 R_e^2 i_n^2 + (1+G)^2 e_n^2 + 4kTGNR_e}{N} + 4kTR_g \frac{R_g R_e}{R_g + R_e} G^2 \right) \left(\frac{R_t}{R_t + R_s} \right)^2 + 4kTR_s \frac{R_t}{R_t + R_s}$$

On en déduit le rapport signal à bruit en sortie :

$$\frac{S}{N} \text{out} = \frac{V_s^2}{B \cdot e_{out}^2}$$

$$\frac{S}{N} out = \frac{G^2 V_g^2 \left(\frac{R_e}{R_e + R_g} \right)^2 \left(\frac{R_t}{R_t + R_s} \right)^2}{\left(\frac{G^2 N^2 R_e^2 B i_{n-}^2 + (1+G)^2 e_n^2 B + 4kTBGN R_e + 4kTBR_g \frac{R_e}{R_g + R_e} G^2}{N} \right) \left(\frac{R_t}{R_t + R_s} \right)^2 + 4kTBR_s \frac{R_t}{R_t + R_s}}$$

La dégradation du rapport S/N apportée par le montage amplificateur (son facteur de bruit) est :

$$F_{Ni} = \frac{\frac{S}{N} ref}{\frac{S}{N} out}$$

$$F_{Ni} = \frac{\frac{V_g^2}{4kTBR_g}}{\frac{2G^2 V_g^2 \left(\frac{R_e}{R_e + R_g} \right)^2 \left(\frac{R_t}{R_t + R_s} \right)^2}{\left(\frac{G^2 N^2 R_e^2 i_{n-}^2 B + (1+G)^2 e_n^2 B + 4kTBGN R_e + 4kTBR_g \frac{R_e}{R_g + R_e} G^2}{N} \right) \left(\frac{R_t}{R_t + R_s} \right)^2 + 4kTBR_s \frac{R_t}{R_t + R_s}}}$$

$$F_{Ni} = \frac{1}{2} \left(\frac{R_e + R_g}{R_e} \right)^2 \left(\frac{N^2 R_e^2 i_{n-}^2 + \left(1 + \frac{1}{G}\right)^2 e_n^2}{4kTNR_g} + \frac{1}{G} \frac{R_e}{R_g} + \frac{R_e}{R_g + R_e} + \frac{1}{G^2} \frac{R_s}{R_g} \frac{R_t + R_s}{R_t} \right)$$

$$F_{Ni} = \frac{R_e + R_g}{2R_e} \left(1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{R_g} \frac{R_t + R_s}{2R_t} \frac{R_g + R_e}{2R_e} + 2 \frac{R_g + R_e}{2R_g} \left[\frac{1}{G} + \frac{NR_e^2 i_{n-}^2 + \left(1 + \frac{1}{G}\right)^2 \frac{e_n^2}{N}}{4kTR_e} \right] \right)$$

Par rapport au montage amplificateur idéal, on peut calculer le facteur de bruit propre à l'amplificateur opérationnel :

$$F_a = 1 + \frac{2R_e}{R_e + R_g} (F_{Ni} - F_N) \quad \text{avec} \quad F_N = \frac{R_e + R_g}{2R_e} \left(1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{R_g} \frac{R_t + R_s}{2R_t} \frac{R_g + R_e}{2R_e} \right)$$

$$\text{Soit : } F_a = 1 + 2 \frac{R_g + R_e}{2R_g} \left(\frac{1}{G} + \frac{NR_e^2 i_{n-}^2 + \left(1 + \frac{1}{G}\right)^2 \frac{e_n^2}{N}}{4kTR_e} \right)$$

A R_e fixé, le facteur de bruit est minimal pour $N_{opt} = \left(1 + \frac{1}{G}\right) \frac{e_n}{R_e i_{n-}}$.

$$\text{On a alors : } F_a (opt) = 1 + 2 \frac{R_g + R_e}{2R_g} \left(\frac{1}{G} + \frac{2N_{opt} R_e^2 i_{n-}^2}{4kTR_e} \right) = 1 + \frac{2}{G} \frac{R_g + R_e}{2R_g} \left(1 + (G+1) \frac{e_n i_{n-}}{2kT} \right)$$

Dans le cas $R_e = R_g$, $R_s = R_t$:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{Ni} = 1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_t}{R_g} + \frac{2}{G} + \frac{NR_g^2 i_{n-2}^2 + \left(1 + \frac{1}{G}\right)^2 \frac{e_n^2}{N}}{2kTR_g} \\ F_a = 1 + \frac{2}{G} + \frac{NR_g^2 i_{n-2}^2 + \left(1 + \frac{1}{G}\right)^2 \frac{e_n^2}{N}}{2kTR_g} \end{array} \right.$$

Et dans le cas $R_e = R_g = R_s = R_t = R_0$:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{Ni} = 1 + \frac{4}{G^2} + \frac{2}{G} + \frac{NR_0^2 i_{n-2}^2 + \left(1 + \frac{1}{G}\right)^2 \frac{e_n^2}{N}}{2kTR_0} \\ F_a = 1 + \frac{2}{G} + \frac{NR_0^2 i_{n-2}^2 + \left(1 + \frac{1}{G}\right)^2 \frac{e_n^2}{N}}{2kTR_0} \end{array} \right.$$

3.3. N AMPLIFICATEURS INVERSEURS EN PARALLELE AVEC TRANSFORMATEURS

On considère la mise en parallèle de N amplificateurs inverseurs identiques, précédés et suivis de transformateurs d'impédance idéaux, de rapports d'impédance K_e et K_s . Le facteur de bruit du montage est celui d'un amplificateur du paragraphe précédent utilisé avec une impédance de générateur $K_e R_g$ et une impédance de charge de $K_s R_t$ (cf 2.3), soit :

$$F_{Ni} = \frac{R_e + K_e R_g}{2R_e} \left(1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{K_e R_g} \frac{K_s R_t + R_s}{2K_s R_t} \frac{K_e R_g + R_e}{2R_e} + 2 \frac{K_e R_g + R_e}{2K_e R_g} \left[\frac{1}{G} + \frac{NR_e^2 i_{n-}^2 + \left(1 + \frac{1}{G}\right)^2 \frac{e_n^2}{N}}{4kTR_e} \right] \right)$$

Par ailleurs, les deux transformateurs multiplient le gain en tension global par $\sqrt{\frac{K_e}{K_s}}$: pour un gain en tension global donné, le gain G de l'amplificateur doit être compensé.

Dans le cas $R_e = K_e R_g$, $R_s = K_s R_t$:

$$F_{Ni} = 1 + \frac{4}{G^2} \frac{K_s R_t}{K_e R_g} + \frac{2}{G} + \frac{NK_e^2 R_g^2 i_{n-}^2 + \left(1 + \frac{1}{G}\right)^2 \frac{e_n^2}{N}}{2kTK_e R_g}$$

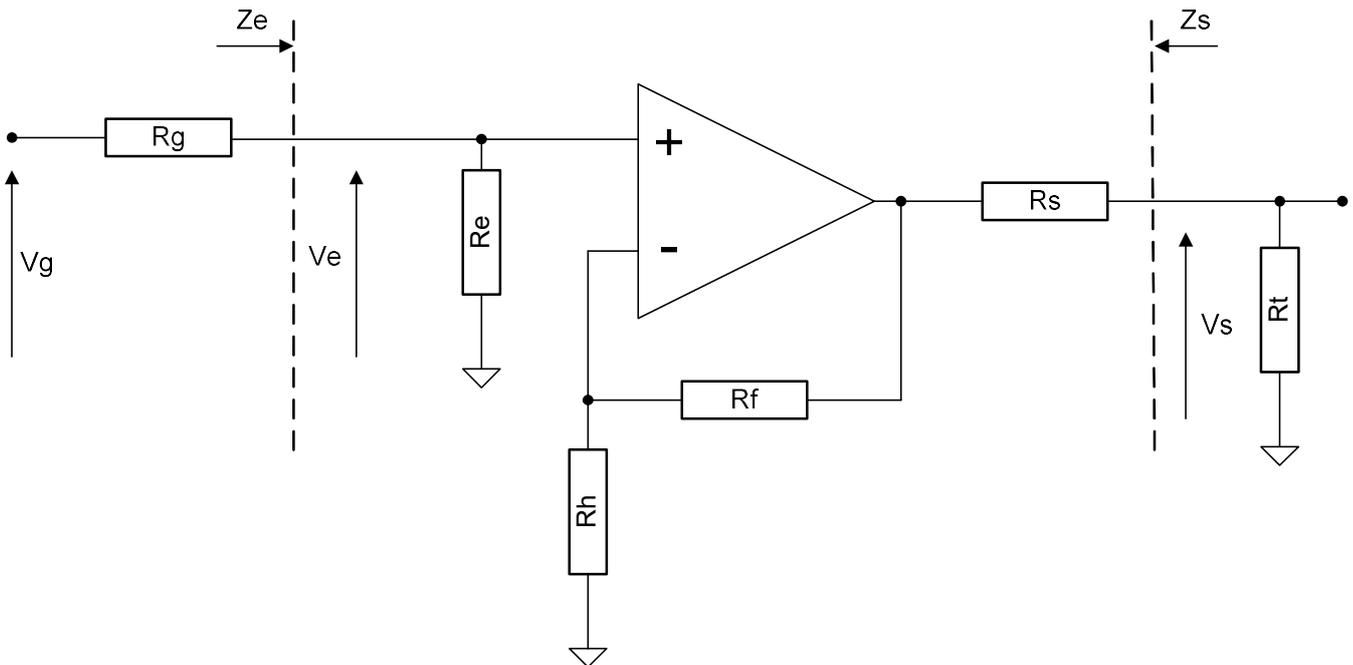
Et dans le cas $R_e = K_e R_g = R_s = K_s R_t = R_0$:

$$F_{Ni} = 1 + \frac{4}{G^2} + \frac{2}{G} + \frac{NR_0^2 i_{n-}^2 + \left(1 + \frac{1}{G}\right)^2 \frac{e_n^2}{N}}{2kTR_0}$$

4. AOP EN AMPLIFICATEUR NON INVERSEUR

4.1. AMPLIFICATEUR NON INVERSEUR SIMPLE

On considère le montage suivant avec un amplificateur opérationnel utilisé en non inverseur :



$$\left\{ \begin{array}{l} H_{ref} = \frac{R_t}{R_t + R_g} \\ Z_e = R_e \\ Z_s = R_s \\ G = 1 + \frac{R_f}{R_{f'}} \\ V_e = V_g \frac{R_e}{R_e + R_g} \\ H = \frac{V_s}{V_g} = -G \frac{R_e}{R_e + R_g} \frac{R_t}{R_t + R_s} \\ H_{eff} = \frac{H}{H_{ref}} = -G \frac{R_e}{R_e + R_g} \frac{R_t + R_g}{R_t + R_s} \end{array} \right.$$

Caractérisation de l'amplificateur opérationnel :

e_n : densité spectrale de bruit en tension sur l'entrée
 i_{n-} : densité spectrale de bruit en courant sur l'entrée négative
 i_{n+} : densité spectrale de bruit en courant sur l'entrée positive

Le calcul est le même que pour l'amplificateur idéal, des termes supplémentaires sont à prendre en compte :

Ramenés sur la sortie de l'amplificateur opérationnel :

$$e_{out}^2 (op) = 4kT \frac{R_g R_e}{R_g + R_e} G^2 + R_f^2 \left(i_{n-}^2 + \frac{4kT}{R_f} + \frac{4kT}{R_h} \right) + G^2 e_n^2 + \left(\frac{R_g R_e}{R_g + R_e} \right)^2 G^2 i_{n+}^2$$

$$\text{avec } R_f = (G-1)R_h$$

D'où la densité spectrale de puissance de bruit en sortie (sur V_s), qui est augmenté du bruit des résistances R_s et R_t :

$$e_{out}^2 = e_{out}^2 (op) \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right)^2 + 4kT \frac{R_s R_t}{R_s + R_t}$$

$$\text{soit } e_{out}^2 = \left(\begin{array}{l} 4kT \frac{R_g R_e}{R_g + R_e} G^2 + (G-1)^2 R_h^2 i_{n-}^2 \\ + 4kT R_h G (G-1) + G^2 e_n^2 + \left(\frac{R_g R_e}{R_g + R_e} \right)^2 G^2 i_{n+}^2 \end{array} \right) \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right)^2 + 4kT R_s \frac{R_t}{R_s + R_t}$$

On en déduit le rapport signal à bruit en sortie :

$$\frac{S}{N} out = \frac{V_s^2}{B \cdot e_{out}^2} = \frac{G^2 V_g^2 \left(\frac{R_e}{R_e + R_g} \right)^2 \left(\frac{R_t}{R_t + R_s} \right)}{\left(\begin{array}{l} 4kT \frac{R_g R_e}{R_g + R_e} G^2 + (G-1)^2 R_h^2 i_{n-}^2 + G^2 e_n^2 \\ + 4kT G (G-1) R_h + \left(\frac{R_g R_e}{R_g + R_e} \right)^2 G^2 i_{n+}^2 \end{array} \right) \frac{BR_t}{R_s + R_t} + 4kT BR_s}$$

La dégradation du rapport S/N apportée par le montage amplificateur (son facteur de bruit) est :

$$F_{ini} = \frac{\frac{S}{N} ref}{\frac{S}{N} out} = \frac{\frac{V_g^2}{4kT BR_g}}{2G^2 V_g^2 \left(\frac{R_e}{R_e + R_g} \right)^2 \left(\frac{R_t}{R_s + R_t} \right) \left(\begin{array}{l} 4kT \frac{R_g R_e}{R_g + R_e} G^2 + (G-1)^2 R_h^2 i_{n-}^2 + G^2 e_n^2 \\ + 4kT G (G-1) R_h + \left(\frac{R_g R_e}{R_g + R_e} \right)^2 G^2 i_{n+}^2 \end{array} \right) \frac{BR_t}{R_s + R_t} + 4kT BR_s}$$

$$F_{1ni} = \frac{1}{R_t} \left(\frac{R_e + R_g}{R_e} \right)^2 \frac{R_s + R_t}{R_t} \left[\left(\frac{R_e}{R_g + R_e} + \frac{\left(1 - \frac{1}{G}\right)^2 R_h^2 i_{n-}^2 + e_n^2 + \left(\frac{R_g R_e}{R_g + R_e}\right)^2 i_{n+}^2}{4kTR_g} \right) \frac{R_t}{R_s + R_t} + \frac{R_s}{G^2 R_g} \right]$$

$$F_{1ni} = \frac{R_e + R_g}{2R_e} \left[1 + 2 \left(1 - \frac{1}{G}\right) \frac{R_h}{R_g} \frac{R_e + R_g}{2R_e} + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{R_g} \frac{R_e + R_g}{2R_e} \frac{R_s + R_t}{2R_t} \right]$$

$$+ \frac{R_e + R_g}{2R_e} \frac{2 \left(1 - \frac{1}{G}\right)^2 R_h^2 i_{n-}^2 + 2e_n^2 + \left(\frac{2R_e}{R_g + R_e}\right)^2 \frac{R_g^2 i_{n+}^2}{2}}{4kTR_g}$$

$$\text{Soit : } F_{1ni} = \frac{R_e + R_g}{2R_e} \left[1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{R_g} \frac{R_e + R_g}{2R_e} \frac{R_s + R_t}{2R_t} + \frac{2R_g}{R_g + R_e} \frac{R_e i_{n+}^2}{8kT} \right]$$

$$+ \frac{R_e + R_g}{2R_g} \left[2 \left(1 - \frac{1}{G}\right) \frac{R_h}{R_e} + \frac{\left(1 - \frac{1}{G}\right)^2 \frac{R_h}{R_e} R_h i_{n-}^2 + \frac{e_n^2}{R_e}}{2kT} \right]$$

A partir du facteur de bruit de l'amplificateur idéal : $F_1 = \frac{R_e + R_g}{2R_e} \left(1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{R_g} \cdot \frac{R_t + R_s}{2R_t} \frac{R_e + R_g}{2R_e} \right)$

on peut écrire :

$$F_{1ni} = F_1 + \frac{R_e + R_g}{2R_e} \left(\frac{R_h}{R_e} \frac{R_e + R_g}{2R_g} \left[2 \left(1 - \frac{1}{G}\right) + \frac{\left(1 - \frac{1}{G}\right)^2 R_h i_{n-}^2 + \frac{e_n^2}{R_h}}{2kT} \right] + \frac{2R_g}{R_g + R_e} \frac{R_e i_{n+}^2}{8kT} \right)$$

Par rapport au montage amplificateur idéal, on déduit le facteur de bruit propre à l'amplificateur opérationnel :

$$F_a = 1 + \frac{2R_e}{R_e + R_g} (F_{1i} - F_1) = 1 + \left(\frac{R_e + R_g}{2R_g} \frac{R_h}{R_e} \left[2 \left(1 - \frac{1}{G}\right) + \frac{\left(1 - \frac{1}{G}\right)^2 R_h i_{n-}^2 + \frac{e_n^2}{R_h}}{2kT} \right] + \frac{2R_g}{R_g + R_e} \frac{R_e i_{n+}^2}{8kT} \right)$$

Dans le cas $R_e = R_g$, $R_s = R_t$:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{1ni} = 1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{R_g} + \frac{R_h}{R_g} \left[2 \left(1 - \frac{1}{G} \right) + \frac{\left(1 - \frac{1}{G} \right)^2 R_h i_{n-}^2 + \frac{e_n^2}{R_h}}{2kT} \right] + \frac{R_g i_{n+}^2}{8kT} \\ F_a = 1 + \frac{R_h}{R_g} \left[2 \left(1 - \frac{1}{G} \right) + \frac{\left(1 - \frac{1}{G} \right)^2 R_h i_{n-}^2 + \frac{e_n^2}{R_h}}{2kT} \right] + \frac{R_g i_{n+}^2}{8kT} \end{array} \right.$$

Et dans le cas $R_e = R_g = R_s = R_t = R_0$:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{1ni} = 1 + \frac{4}{G^2} + \frac{R_h}{R_0} \left[2 \left(1 - \frac{1}{G} \right) + \frac{\left(1 - \frac{1}{G} \right)^2 R_h i_{n-}^2 + \frac{e_n^2}{R_h}}{2kT} \right] + \frac{R_0 i_{n+}^2}{8kT} \\ F_a = 1 + \frac{R_h}{R_0} \left[2 \left(1 - \frac{1}{G} \right) + \frac{\left(1 - \frac{1}{G} \right)^2 R_h i_{n-}^2 + \frac{e_n^2}{R_h}}{2kT} \right] + \frac{R_0 i_{n+}^2}{8kT} \end{array} \right.$$

A G et R_h fixés, F_{1ni} est minimal pour $R_0(\min) = \frac{2}{i_{n+}} \sqrt{4kTR_h \left(1 - \frac{1}{G} \right) + \left(1 - \frac{1}{G} \right)^2 R_h^2 i_{n-}^2 + e_n^2}$

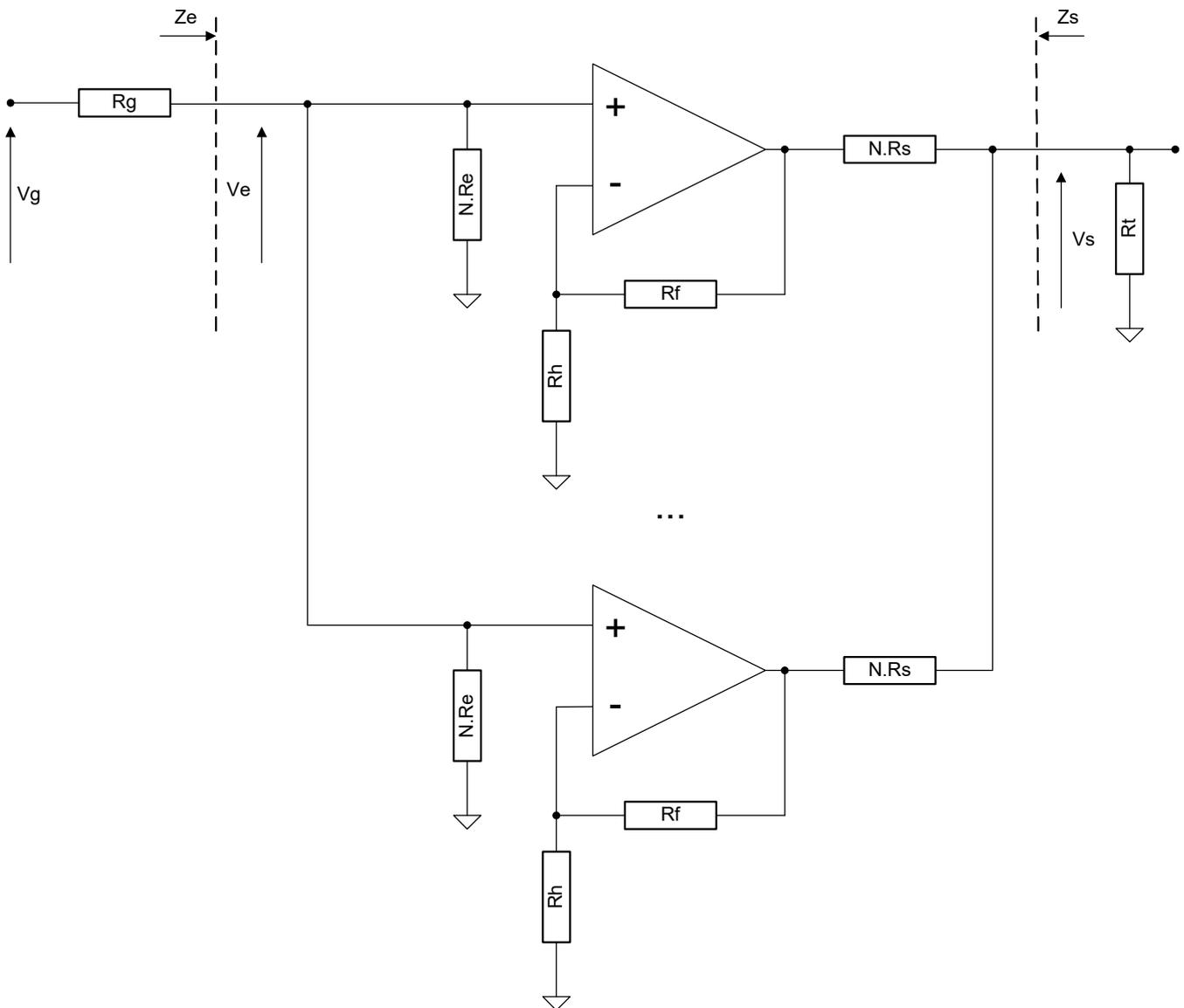
On a alors $F_{1ni}(\min) = 1 + \frac{4}{G^2} + \frac{R_0 i_{n+}^2}{4kT} = 1 + \frac{4}{G^2} + \frac{i_{n+}}{2kT} \sqrt{4kTR_h \left(1 - \frac{1}{G} \right) + \left(1 - \frac{1}{G} \right)^2 R_h^2 i_{n-}^2 + e_n^2}$

Et on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lim_{G \rightarrow \infty} R_0(\min) = \frac{2}{i_{n+}} \sqrt{4kTR_h + R_h^2 i_{n-}^2 + e_n^2} \\ \lim_{G \rightarrow \infty} F_{1ni}(\min) = 1 + \frac{i_{n+}}{2kT} \sqrt{4kTR_h + R_h^2 i_{n-}^2 + e_n^2} \end{array} \right.$$

4.2. N AMPLIFICATEURS NON INVERSEURS EN PARALLELE

On considère la mise en parallèle de N amplificateurs non inverseurs identiques.



Le bruit local généré par un amplificateur opérationnel à sa sortie est:

$$e_{out}^2(op) = e_{e+i-}^2(op) + e_{i+}^2(op) = R_f^2 \left(i_{n-}^2 + \frac{4kT}{R_f} + \frac{4kT}{R_h} \right) + G^2 e_n^2 + e_{i+}^2(op)$$

$$\text{avec } R_f = (G-1)R_h \text{ et } e_{i+}^2(op) = \left(\frac{R_g R_e}{R_g + R_e} \right)^2 G^2 i_{n+}^2$$

$$\text{soit } e_{out}^2(op) = (G-1)^2 R_h^2 i_{n-}^2 + 4kTR_h G(G-1) + G^2 e_n^2 + e_{i+}^2(op)$$

Le bruit $e_{i+}^2(op)$ généré par le courant de bruit de l'entrée non-inverseuse est vu par tous les amplificateurs et est intégré dans le bruit des résistances d'entrée. La densité spectrale de puissance de bruit en sortie (sur V_s) est alors, en tenant compte du bruit des résistances d'entrée-sortie:

$$e_{out}^2 = Ne_{e+i-}^2(op) \left(\frac{\frac{R_t \cdot NR_s / (N-1)}{R_t + NR_s / (N-1)}}{NR_s + \frac{R_t \cdot NR_s / (N-1)}{R_t + NR_s / (N-1)}} \right)^2$$

$$+ \left(4kT \frac{R_g R_e}{R_g + R_e} G^2 + Ne_{i+}^2(op) \right) \left(\frac{R_t}{R_t + R_s} \right)^2 + 4kT \frac{R_t R_s}{R_t + R_s}$$

$$e_{out}^2 = \left(\frac{R_t}{R_t + R_s} \right)^2 \left(\frac{e_{e+i-}^2(op)}{N} + Ne_{i+}^2(op) + 4kT \frac{R_g R_e}{R_g + R_e} G^2 \right) + 4kTR_s \frac{R_t}{R_t + R_s}$$

$$\text{soit } e_{out}^2 = \left(\frac{R_t}{R_t + R_s} \right)^2 \left(\frac{(G-1)^2 R_h^2 i_{n-}^2 + 4kTR_h G(G-1) + G^2 e_n^2}{N} \right. \\ \left. + N \left(\frac{R_g R_e}{R_g + R_e} \right)^2 G^2 i_{n+}^2 + 4kT \frac{R_g R_e}{R_g + R_e} G^2 \right) + 4kTR_s \frac{R_t}{R_t + R_s}$$

On en déduit le rapport signal à bruit en sortie :

$$\frac{S}{N} \text{out} = \frac{V_s^2}{B \cdot e_{out}^2} = \frac{G^2 V_g^2 \left(\frac{R_e}{R_e + R_g} \right)^2 \left(\frac{R_t}{R_t + R_s} \right)^2}{\left(\frac{R_t}{R_t + R_s} \right)^2 \left(\frac{(G-1)^2 R_h^2 i_{n-}^2 B + 4kTBR_h G(G-1) + G^2 e_n^2 B}{N} \right.} \\ \left. + N \left(\frac{R_g R_e}{R_g + R_e} \right)^2 G^2 i_{n+}^2 B + 4kTB \frac{R_g R_e}{R_g + R_e} G^2 \right) + 4kTBR_s \frac{R_t}{R_t + R_s}}$$

La dégradation du rapport S/N apportée par le montage amplificateur (son facteur de bruit) est :

$$F_{Nmi} = \frac{\frac{S}{N} \text{ref}}{\frac{S}{N} \text{out}} = \frac{\frac{V_g^2}{4kTBR_g}}{2G^2 V_g^2 \left(\frac{R_e}{R_e + R_g} \right)^2 \left(\frac{R_t}{R_t + R_s} \right)^2} \\ \frac{\left(\frac{R_t}{R_t + R_s} \right)^2 \left(\frac{(G-1)^2 R_h^2 i_{n-}^2 B + 4kTBR_h G(G-1) + G^2 e_n^2 B}{N} \right.}{\left. + N \left(\frac{R_g R_e}{R_g + R_e} \right)^2 G^2 i_{n+}^2 B + 4kTB \frac{R_g R_e}{R_g + R_e} G^2 \right) + 4kTBR_s \frac{R_t}{R_t + R_s}}$$

$$F_{Nni} = \frac{R_e + R_g}{2R_e} \left(1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{R_g} \frac{R_g + R_e}{2R_e} \frac{R_t + R_s}{2R_t} \right. \\ \left. + \frac{R_g + R_e}{2R_e} \frac{\left(1 - \frac{1}{G}\right)^2 R_h^2 i_{n-}^2 + e_n^2 + N^2 R_g^2 \left(\frac{R_e}{R_g + R_e}\right)^2 i_{n+}^2}{2kTR_g N} + \frac{R_g + R_e}{2R_e} \frac{2R_h \left(1 - \frac{1}{G}\right)}{R_g N} \right) \\ F_{Nni} = \frac{R_e + R_g}{2R_e} \left(1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{R_g} \frac{R_g + R_e}{2R_e} \frac{R_t + R_s}{2R_t} \right. \\ \left. + N \frac{2R_g}{R_g + R_e} \frac{R_e i_{n+}^2}{8kT} \right. \\ \left. + \frac{1}{N} \frac{R_g + R_e}{2R_g} \left[2 \frac{R_h}{R_e} \left(1 - \frac{1}{G}\right) + \frac{\left(1 - \frac{1}{G}\right)^2 R_h^2 i_{n-}^2 + e_n^2}{2kTR_e} \right] \right)$$

Par rapport au montage amplificateur idéal, on peut calculer le facteur de bruit propre à un amplificateur opérationnel :

$$F_a = 1 + \frac{2R_e}{R_e + R_g} (F_{Ni} - F_N)$$

$$\text{avec } F_N = \frac{R_e + R_g}{2R_e} \left(1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{R_g} \frac{R_t + R_s}{2R_t} \frac{R_e + R_g}{2R_e} \right)$$

$$\text{soit } F_a = 1 + N \frac{2R_g}{R_g + R_e} \frac{R_e i_{n+}^2}{8kT} + \frac{1}{N} \frac{R_g + R_e}{2R_g} \left[2 \frac{R_h}{R_e} \left(1 - \frac{1}{G}\right) + \frac{\left(1 - \frac{1}{G}\right)^2 R_h^2 i_{n-}^2 + e_n^2}{2kTR_e} \right]$$

Aux valeurs de résistances fixées, le facteur de bruit est minimal pour :

$$N_{opt} = \frac{R_g + R_e}{2R_g} 2 \left(1 - \frac{1}{G}\right) \sqrt{\frac{4kTR_e \frac{R_h}{R_g \left(1 - \frac{1}{G}\right)} + R_h^2 i_{n-}^2 + e_n^2}{R_e i_{n+}}}$$

On a alors :

$$F_a (opt) = 1 + 2N_{opt} \frac{2R_g}{R_g + R_e} \frac{R_e i_{n+}^2}{8kT} = 1 + \frac{i_{n+}}{2kT} \left(1 - \frac{1}{G}\right) \sqrt{4kTR_e \frac{R_h}{R_g \left(1 - \frac{1}{G}\right)} + R_h^2 i_{n-}^2 + e_n^2}$$

Dans le cas $R_e = R_g$, $R_s = R_t$:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{Nni} = 1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_t}{R_g} + N \frac{R_g i_{n+}^2}{8kT} + \frac{1}{N} \left(2 \frac{R_h}{R_g} \left(1 - \frac{1}{G} \right) + \frac{\left(1 - \frac{1}{G} \right)^2 R_h^2 i_{n-}^2 + e_n^2}{2kTR_g} \right) \\ F_a = 1 + N \frac{R_g i_{n+}^2}{8kT} + \frac{1}{N} \left(2 \frac{R_h}{R_g} \left(1 - \frac{1}{G} \right) + \frac{\left(1 - \frac{1}{G} \right)^2 R_h^2 i_{n-}^2 + e_n^2}{2kTR_g} \right) \end{array} \right.$$

On note que le facteur de bruit tend vers l'infini pour N grand : le bruit en courant sur l'entrée non-inverseuse s'accumule.

Et dans le cas $R_e = R_g = R_s = R_t = R_0$:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{Nni} = 1 + \frac{4}{G^2} + N \frac{R_0 i_{n+}^2}{8kT} + \frac{1}{N} \left(2 \frac{R_h}{R_0} \left(1 - \frac{1}{G} \right) + \frac{\left(1 - \frac{1}{G} \right)^2 R_h^2 i_{n-}^2 + e_n^2}{2kTR_0} \right) \\ F_a = 1 + N \frac{R_0 i_{n+}^2}{8kT} + \frac{1}{N} \left(2 \frac{R_h}{R_0} \left(1 - \frac{1}{G} \right) + \frac{\left(1 - \frac{1}{G} \right)^2 R_h^2 i_{n-}^2 + e_n^2}{2kTR_0} \right) \end{array} \right.$$

4.3. N AMPLIFICATEURS NON INVERSEURS EN PARALLELE AVEC TRANSFORMATEURS

On considère la mise en parallèle de N amplificateurs non-inverseurs identiques, précédés et suivis de transformateurs d'impédance idéaux, de rapports d'impédance K_e et K_s . Le facteur de bruit du montage est celui d'un amplificateur du paragraphe précédent utilisé avec une impédance de générateur $K_e R_g$ et une impédance de charge de $K_s R_t$ (cf 2.3), soit :

$$F_{Nni} = \frac{R_e + K_e R_g}{2R_e} \left(1 + \frac{4}{G^2} \frac{R_s}{K_e R_g} \frac{K_e R_g + R_e}{2R_e} \frac{K_s R_t + R_s}{2K_s R_t} + N \frac{2K_e R_g}{K_e R_g + R_e} \frac{R_e i_{n+}^2}{8kT} + \frac{1}{N} \frac{K_e R_g + R_e}{2K_e R_g} \left[2 \frac{R_h}{R_e} \left(1 - \frac{1}{G} \right) + \frac{\left(1 - \frac{1}{G} \right)^2 R_h^2 i_{n-}^2 + e_n^2}{2kTR_e} \right] \right)$$

Par ailleurs, les deux transformateurs multiplient le gain en tension global par $\sqrt{\frac{K_e}{K_s}}$: pour un gain en tension global donné, le gain G de l'amplificateur doit être compensé.

Dans le cas $R_e = K_e R_g$, $R_s = K_s R_t$:

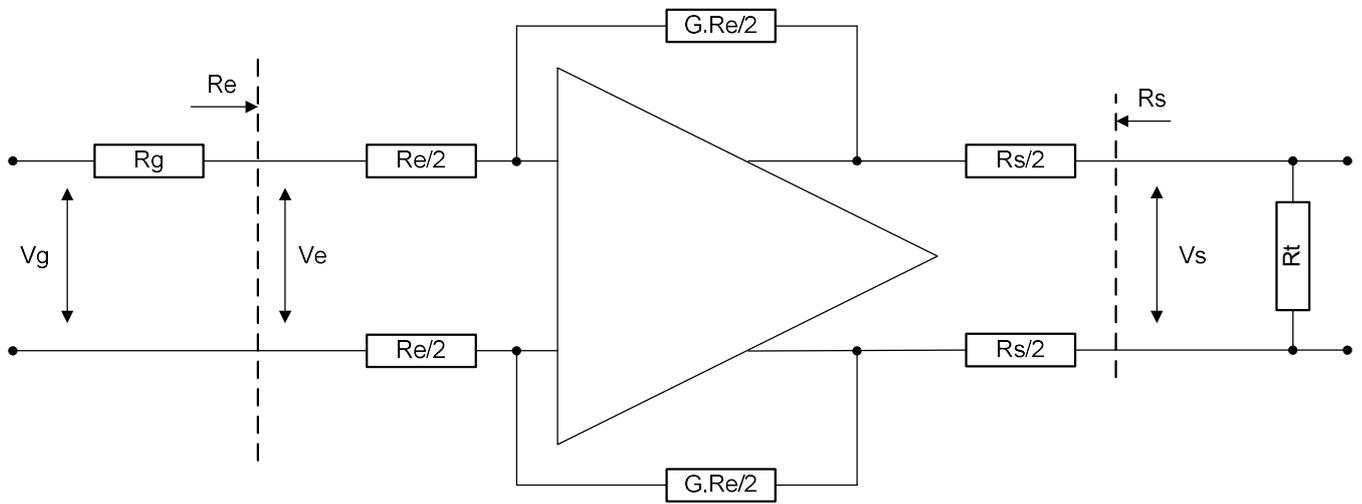
$$F_{Nni} = 1 + \frac{4}{G^2} \frac{K_s R_t}{K_e R_g} + N \frac{K_e R_g i_{n+}^2}{8kT} + \frac{1}{N} \left[2 \frac{R_h}{K_e R_g} \left(1 - \frac{1}{G} \right) + \frac{\left(1 - \frac{1}{G} \right)^2 R_h^2 i_{n-}^2 + e_n^2}{2kTK_e R_g} \right]$$

Et dans le cas $R_e = K_e R_g = R_s = K_s R_t = R_0$:

$$F_{Nni} = 1 + \frac{4}{G^2} + N \frac{R_0 i_{n+}^2}{8kT} + \frac{1}{N} \left[2 \frac{R_h}{R_0} \left(1 - \frac{1}{G} \right) + \frac{\left(1 - \frac{1}{G} \right)^2 R_h^2 i_{n-}^2 + e_n^2}{2kTR_0} \right]$$

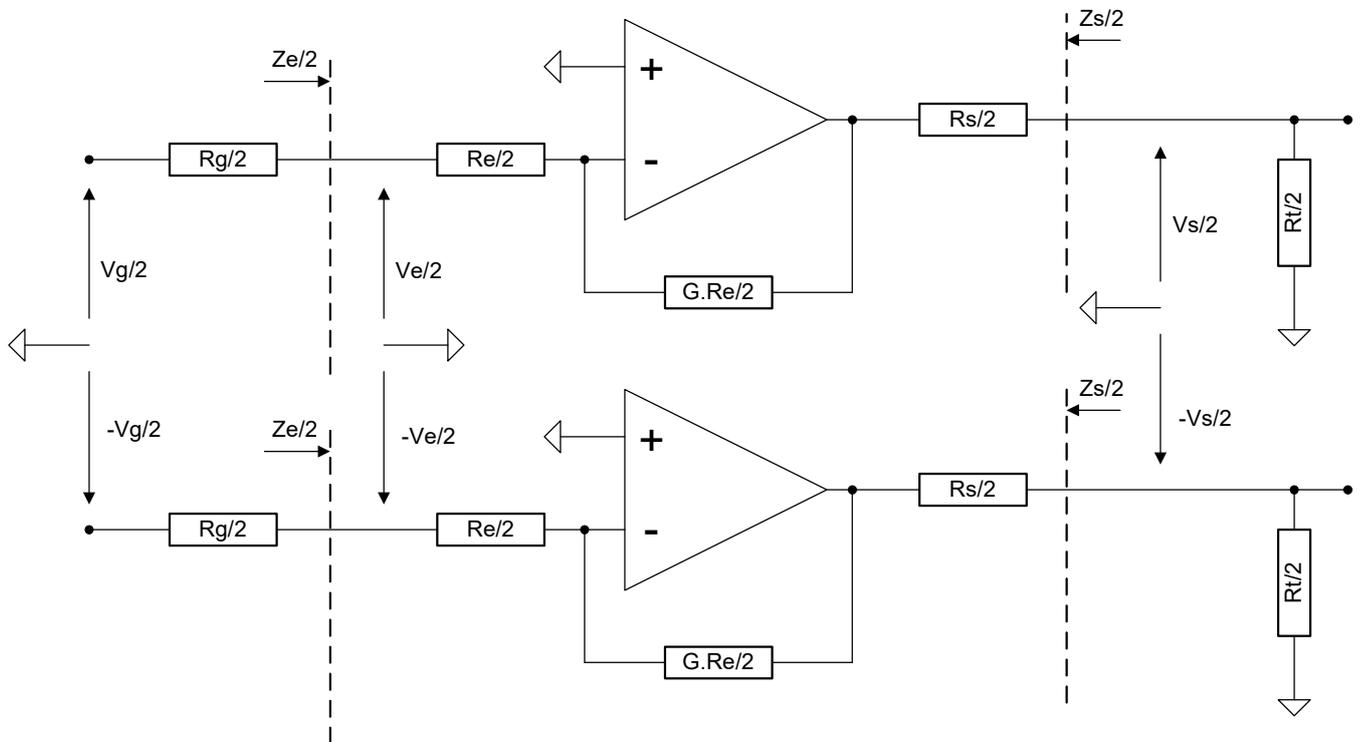
5. AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL

On considère un montage avec un circuit amplificateur différentiel à résistances de contre-réaction :



Le bruit du circuit amplificateur est caractérisé par son bruit en courant sur ses deux entrées et son bruit d'entrée en tension (différentiel).

Il peut être modélisé comme un montage avec deux amplificateurs opérationnels montés en inverseurs :



On suppose la puissance de bruit en tension sur l'entrée des amplificateurs opérationnels égale à la moitié de la puissance de bruit en entrée de l'amplificateur différentiel, et le bruit en courant de l'entrée inverseuse égal au bruit en courant de l'amplificateur différentiel.

Le facteur de bruit du circuit différentiel est alors égal à celui des deux amplificateurs inverseurs. Les différents montages avec amplificateurs inverseurs en parallèle se transposent donc directement au cas de plusieurs amplificateurs différentiels en parallèle.