

L'électronique de courant

Dans la plupart des circuits classiques la grandeur traitée par les composants est la tension. En travaillant au contraire sur les courants on obtient de nouveaux circuits ayant de bonnes performances, en particulier aux fréquences élevées. Ces circuits sont conçus à partir de la notion de boucle translinéaire.

La boucle translinéaire

Pour une diode idéale nous avons vu que si le courant est supérieur au nA :

$$V = \psi \cdot \ln \frac{I}{A I_0}$$

A étant la surface de la diode, I_0 étant le courant de saturation d'une diode de surface unité

Considérons alors le circuit suivant constitué d'une boucle de 6 diodes. Pour un tour de boucle :

$$V_A - V_B + V_B - V_C + V_C - V_D + V_D - V_E + V_E - V_F + V_F - V_A = 0$$

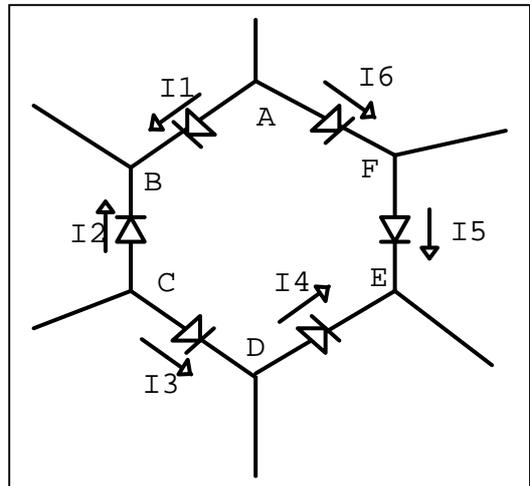
Soit compte tenu du sens des courants dans les diodes :

$$\sum_{i=1-3-4} \psi \cdot \ln \frac{I_i}{A_i I_0} - \sum_{i=2-5-6} \psi \cdot \ln \frac{I_i}{A_i I_0} = 0$$

qui se simplifie en :

$$\frac{I_1 I_3 I_4}{A_1 A_3 A_4} = \frac{I_2 I_5 I_6}{A_2 A_5 A_6}$$

c'est la relation fondamentale de la boucle qui remarquons le, ne fait pas intervenir les courants venant de l'extérieur sur les nœuds A à F.



Boucle translinéaire à transistors

Remplaçons maintenant les diodes par des transistors. Si le β est assez grand on peut confondre courants d'émetteur et de collecteur et écrire :

$$V_{BE} = \psi \cdot \ln \frac{I_C}{A I_0}$$

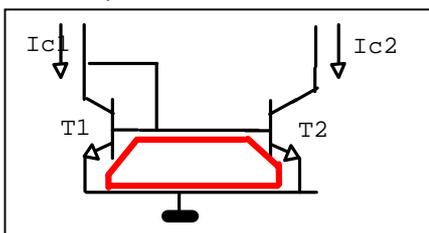
Une relation identique à la précédente va maintenant faire intervenir les courants collecteur, la boucle translinéaire étant constituée par les diodes base émetteur des transistors. Par exemple sur le montage ci contre :

$$V_{BE1} + V_{BE3} = V_{BE2} + V_{BE4}$$

conduit à :

$$\frac{I_{C1} I_{C3}}{A_1 A_3} = \frac{I_{C2} I_{C4}}{A_2 A_4}$$

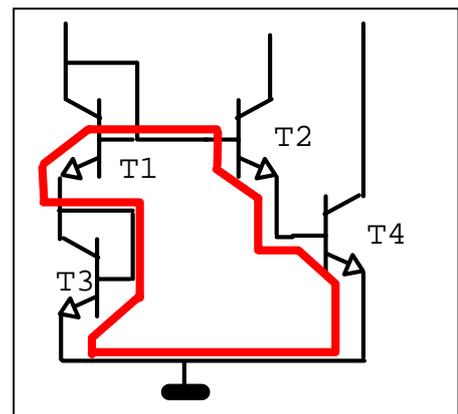
Un cas particulier est le miroir de courant.



Si les deux transistors ont la même surface :

$$I_{C1} = I_{C2}$$

Si un courant est injecté sur T1 il est recopié sur le collecteur de T2. C'est un miroir de courant.



En réalité à cause de l'effet Early cela n'est vrai que si les deux transistors ont même V_{CE} c'est à dire que T_2 à un V_{CB} nul.

Boucle translinéaire mixte

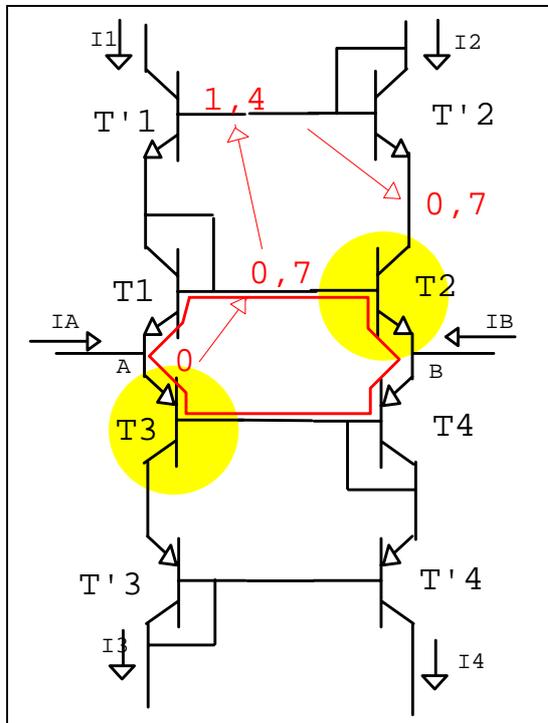
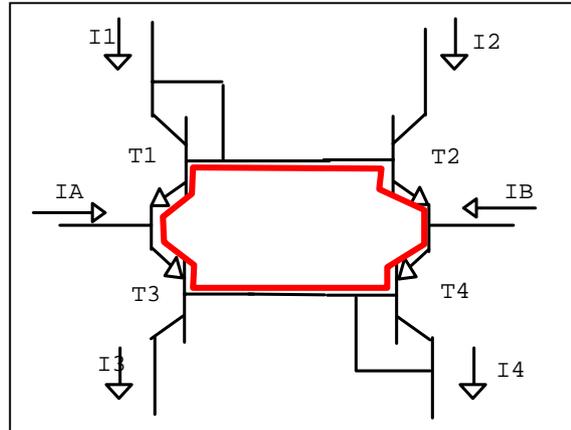
Elle est constituée de transistors PNP et NPN .C'est par exemple le cas de la figure ci contre. Si tous les transistors ont même surface :

$$I_1 I_3 = I_2 I_4$$

Relation qui ne fait pas intervenir directement les courants I_A et I_B

Mais là encore ceci n'est vrai que si tous les transistors ont un V_{CB} nul .

Pour y parvenir il suffit d'ajouter 4 transistors comme le montre la figure ci dessous.



T_2 et T_4 ont comme T_1 et T_3 un V_{cb} nul en effet si la potentiel de A est considéré comme nul , le potentiel base et collecteur est $0,7V$, donc le potentiel base de $T'1$ est $1,4V$.Alors l'émetteur de $T'2$ donc le collecteur de T_2 est $0,7V$ plus bas c'est à dire $0,7V$ comme T_1 .Le raisonnement est le même pour T_4 .

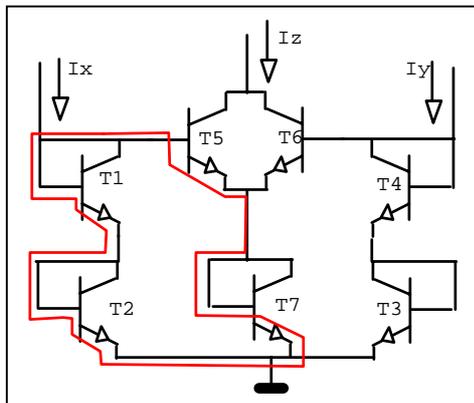
Alors $I_3 = I_1 + I_A$
 $I_4 = I_2 + I_B$

Et $I_1 I_3 = I_2 I_4$
 Soit $I_1(I_1 + I_A) = I_2(I_2 + I_B)$

Si $I_1 = I_2$ alors $I_A = I_B$ c'est encore un miroir de courant

Des boucles translinéaires permettent de réaliser avec très peu de composants des fonctions complexes qui sans elles nécessiteraient de mettre

en œuvre de nombreux opérateurs arithmétiques coûteux .Par exemple le circuit suivant effectue l'opération



$\sqrt{x^2 + y^2}$ permettant par exemple de calculer le module d'un nombre complexe à partir de ses parties réelles et imaginaires.

En effet pour la boucle marquée en rouge on peut écrire :

$$I_{C1} I_{C2} = I_{C5} I_{C7} \text{ soit } I_x^2 = I_{C5} I_{C7}$$

De même à droite :

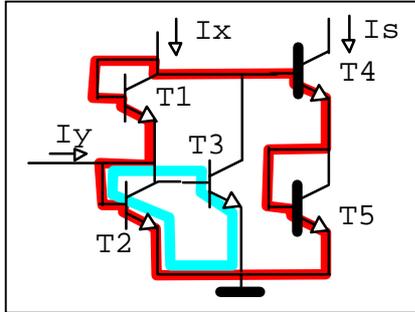
$$I_y^2 = I_{C6} I_{C7}$$

$$\text{Mais } I_z = I_{C5} + I_{C6} = I_{C7}$$

En ajoutant les deux lignes :
 $I_x^2 + I_y^2 = I_z^2$

Relation annoncée.

Le montage ci dessous n'utilisant que 5 transistors effectue une opération semblable.



Les trois transistors T1 T2 et T3 ont même surface et T4 T5 une surface 2 fois plus grande. La boucle marquée en rouge permet d'écrire :

$$I_{C1}I_{C2} = \frac{I_{C4}I_{C5}}{4}$$

La boucle marquée en bleu :

$$I_{C2} = I_{C3}$$

Avec $I_{C4}=I_{C5}=I_S$ $I_{C2}=I_{C1}+I_Y$ $I_{C1}=I_X-I_{C3}$
 il est facile d'en déduire:

$$\frac{I_X + I_Y}{2} \cdot \frac{I_X - I_Y}{2} = \frac{I_S^2}{4} \quad \text{d'ou :} \quad I_S = \sqrt{I_X^2 - I_Y^2}$$

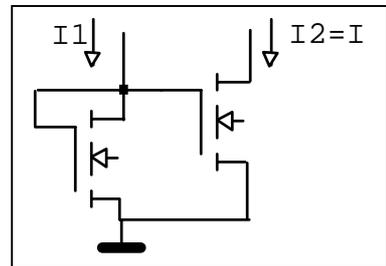
En pratique il faut compléter ce schéma de façon que les transistors travaillent avec $V_{CB}=0$ pour éviter les erreurs dues à l'effet Early.

Bibliographie: Analog IC Design The current-mode approach C Toumazou F Lidget & D G Haigh Edité par Peter Peregrinus Ltd, London

Miroirs de courant avec des MOS

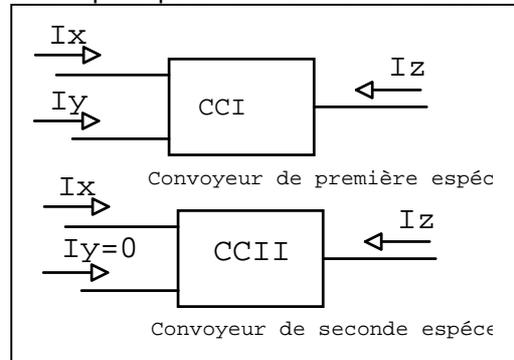
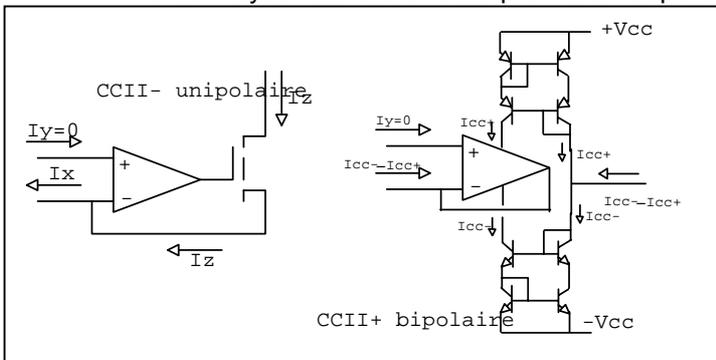
Les MOS dont la résistance interne est très élevée dans la zone de pincement (pas d'effet Early) se prêtent très bien à la réalisation de miroirs de courant. Deux MOS de même géométrie intégrés cote à cote sur un même substrat ont même courant drain s'ils ont même tension grille source. Le montage ci contre est donc un miroir de courant pour une tension de sortie supérieure à la tension de seuil. (à partir de 3 ou 4 volts).

Note : Le premier MOS travaille automatiquement dans la zone de pincement en effet sur une caractéristique $V_{gs}=Cte$ cette zone commence pour $V_{DSmax}=V_{GS}-V_S$, or le potentiel V_{DS} est égal à V_{GS} qui est bien supérieur à V_{DSmax} .

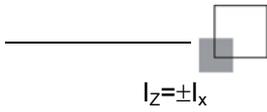


Les convoyeurs de courant

Le convoyeur de courant de première espèce est un quadripôle obéissant aux relations



suivantes :
 $I_y = I_x$
 $V_y = V_x$



$$I_z = \pm I_x$$

Plus intéressant le convoyeur de seconde espèce se différencie du premier par un courant nul sur l'entrée y qui est alors haute impédance comme l'entrée d'un ampli op parfait.

$$\begin{cases} I_y = 0 \\ V_y = V_x \\ I_z = \pm I_x \end{cases}$$

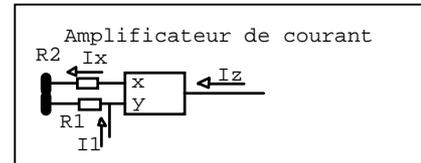
Suivant le signe de I_z on distingue les CCII+ et CCII-

Un amplificateur opérationnel associé à un MOS suffit pour réaliser un CCII- Ceci est illustré par la figure ci dessous, le courant I_z a cependant un seul sens possible. Un CCII+ est plus difficile à réaliser, il nécessite la mise en œuvre de miroirs de courant comme le montre la figure. Remarquons que dans ce cas ce sont les courants d'alimentation de l'ampli op qui sont utilisés. Les deux sources de courant sont construites de façon que les deux transistors de la boucle translinéaire aient un V_{CB} nul.

Applications des convoyeurs de courant.

Ce sont tout naturellement des amplificateurs de courant. Ci contre, le courant d'entrée I_1 est injecté sur une résistance R_1 placée sur l'entrée Y. Soit $V_y = R_1 I_1$. Le courant de l'entrée x est donc $R_1 I_1 / R_2 = I_z$

Un convoyeur de courant permet de synthétiser des circuits beaucoup plus intéressants



le convertisseur d'impédance négative ou NIC

Soit le montage suivant ; la tension V_1 d'entrée est recopiée sur la charge Z . Le courant $I_x = V_1 / Z$ sort du quadripôle, il en est de même de I_z , l'impédance d'entrée du montage sur l'entrée y est donc négative $Z_e = -Z$

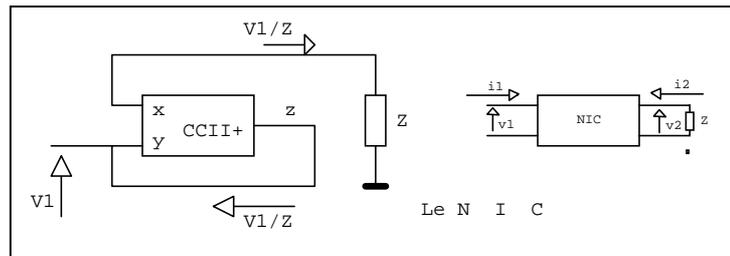
Un NIC est un quadripôle qui renverse ainsi les impédances. Si Z est la charge l'impédance d'entrée est $-KZ$.

Soit :

$$Z_E = \frac{V_1}{I_1} = -KZ = -K \left(-\frac{V_2}{I_2} \right)$$

d'où la relation à satisfaire :

$$\frac{V_1}{I_1} = K \frac{V_2}{I_2}$$



Avec deux cas limites : $V_1 = V_2$ alors $I_2 = K I_1$ la conversion est faite par le courant c'est un **INIC**
Ou $I_1 = I_2$ alors $V_1 = K V_2$ la conversion est faite par la tension c'est un **VNIC**

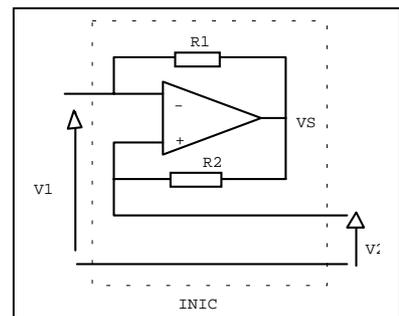
Le INIC est le plus employé car très facile à réaliser avec un seul amplificateur opérationnel idéal. Pour le montage ci contre $V_S = V_1 - R_1 I_1$

$$V_S = V_2 - R_2 I_2 \text{ avec } V_1 = V_2 \text{ soit}$$

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1} I_2$$

C'est un INIC de coefficient $K = \frac{R_1}{R_2}$

Notez qu'il y a là bouclage sur l'entrée + de l'ampli op, mais



l'impédance d'entrée est négative. Un tel circuit ne peut fonctionner en régime linéaire que si les composants extérieurs rendent les impédances aux points d'accès positives. Nous détaillerons une application de ce montage à propos des filtres actifs.

Le Gyrateur

Considérons le montage ci contre construit autour de deux convoyeurs complémentaires .

Pour le premier convoyeur :

$$V_x = V_y = V_1 \text{ donc } I_x = -V_1/R = -I_z$$

La tension sur l'entrée y du second est :

$$V_y = -Z V_1/R \text{ donc } I_x = Z V_1 / R^2 = I_z$$

L'impédance d'entrée du montage est donc :

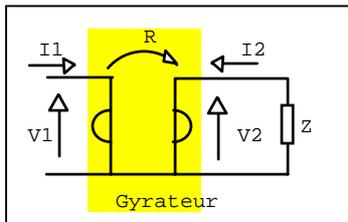
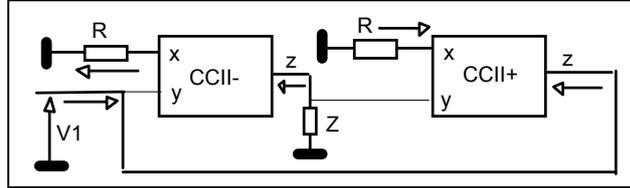
$$Z_e = R^2/Z$$

C'est un inverseur d'impédance.

Un gyrateur est en général défini comme un quadripôle dont les matrices Z et Y ont une diagonale principale nulle :

$$(Z) = \begin{pmatrix} 0 & -R \\ R & 0 \end{pmatrix} \quad (Y) = \begin{pmatrix} 0 & G \\ -G & 0 \end{pmatrix}$$

Les deux termes non nuls peuvent être différents mais les gyrateurs les plus courants ont une valeur unique de la **résistance de gyration R** .



$$V_1 = -R I_2$$

$$V_2 = R I_1 = -Z I_2$$

$$\text{D'où } Z_e = V_1 / I_1 = R^2 / Z$$

Si Z est un condensateur $Z = 1/Cp$ l'impédance d'entrée $R^2 Cp$ est celle d'une self de valeur $L = R^2 C$

Si $C = 10\mu F$ $R = 10k$ $L = 1000$ Henrys .

La synthèse des selfs de forte valeur est une application essentielle

des gyrateurs.

Pour réaliser des gyrateurs on utilise la matrice Y que l'on matérialise avec des sources de courant commandées utilisant des convoyeurs de courants ou des amplis op.

$$\begin{cases} I_1 = G V_2 \\ I_2 = -G V_1 \end{cases}$$

Les composants super

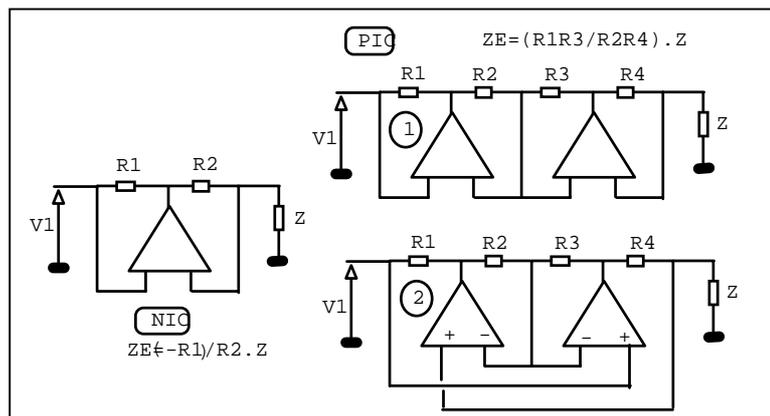
Pour réaliser un convertisseur d'impédance positive, c'est à dire un quadripôle dont l'impédance d'entrée est $Z_e = +K.Z$ ou Z est la charge, il suffit d'associer 2 NIC comme le montre la figure ci contre.

Le calcul s'effectuant en écrivant que pour chaque ampli op $V_+ = V_-$, les 4 entrées se trouvent au même potentiel et leur position est indifférente. (PIC 1).

Cependant les ampli op n'étant pas parfaits la stabilité n'est assurée que si le bouclage interne s'effectue sur les entrées -. D'autre part l'expérience (et la simulation) montrent qu'il vaut mieux croiser les entrées + comme le montre la figure (PIC 2). L'impédance d'entrée est alors :

$$Z_e = + \frac{R_1 R_3}{R_2 R_4} \cdot Z$$

Ce montage effectue la même transformation d'impédance qu'un transformateur, mais cette fois cela marche aussi à la fréquence nulle.

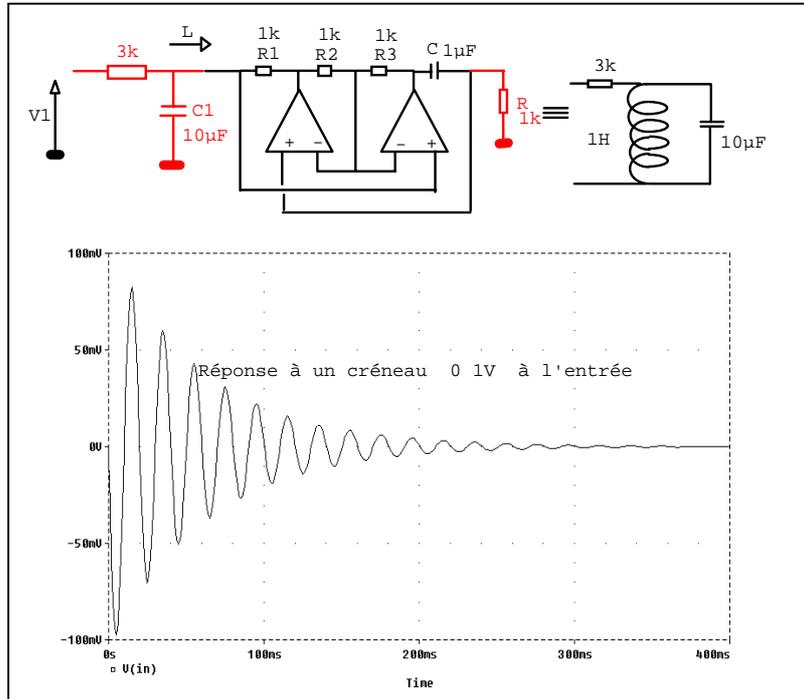


Rien n'oblige à n'utiliser pour les 4 composants que des résistances. En y introduisant des condensateurs on obtient des transformations d'impédance plus complexes. Par exemple en remplaçant R4 par un condensateur C d'impédance $1/Cp$ et une charge R (Figure ci contre) on obtient :

$$Z_E = \frac{R_1 R_3}{R_2} R = \frac{R_1 R_3}{R_2} RCp$$

C'est une self. Le circuit synthétise une self comme le faisait un gyrateur mais n'utilise que 2 amplis op seulement .Il est ainsi possible de réaliser un circuit accordé à très basse fréquence . Si les 4 résistances ont pour valeur 1000Ω et $C=1\mu F$ on obtient une self de 1Henry qui accordée avec $10\mu F$ donne une résonance pour 50 Hz environ .

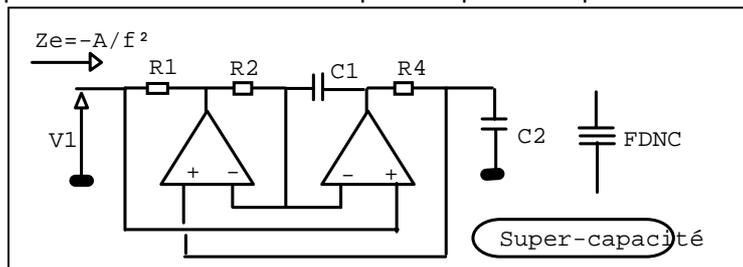
La figure ci dessus illustre la réponse du circuit à un créneau appliqué à l'entrée , la pseudo période et l'amortissement sont tout à fait conformes aux prévisions théoriques.



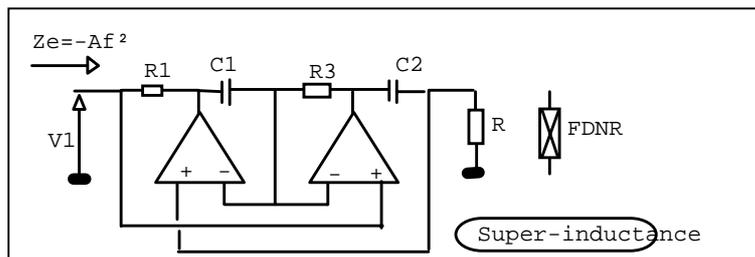
En modifiant la position du condensateur et avec une charge capacitive on obtient un composant au comportement hors du commun, le **super condensateur ou FDNC** (Frequency Dependand Negative Conductance) .En effet dans ce cas , en remplaçant R3 par $1/Cp$:

$$Z_E = \frac{R_1}{R_2 R_4} \frac{1}{C_1 p} \frac{1}{C_2 p} = \frac{R_1}{R_2 R_4 C_1 C_2 p^2} = \frac{A}{p^2} \Rightarrow \text{soit} \Rightarrow Z_E(\omega) = -\frac{A}{\omega^2}$$

C'est une résistance puisqu'elle est réelle mais elle est négative et son module diminue lorsque la fréquence augmente , comme un condensateur, mais en $1/f^2$. Nous montrerons plus loin que ce composant ne peut pas être réalisé avec des composants purement passifs.



Un super composant dont l'impédance augmente en f^2 , le **FDNR** (Frequency Dependand



Negative Resistance) ou **super inductance** est réalisé en remplaçant R2 et R4 par des condensateurs et en utilisant une charge résistive..

$$Z_E = \frac{R_1 R_3}{\frac{1}{C_1 p} \frac{1}{C_2 p}} R = R_1 R_3 R C_1 C_2 p = A p^2 \text{ soit : } Z(\omega) = -A \omega^2$$

Ces super composants se rencontrent parfois dans des schémas de filtres actifs .

Il est possible d'imaginer des composants dont l'impédance varie en f^3 , mais leur stabilité est aléatoire.