

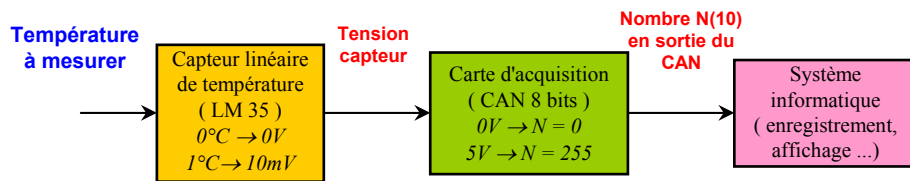
Cours Thème III "Traitement analogique du signal"

2- SYSTÈME ANALOGIQUE LINÉAIRE APPLICATION À LA FONCTION AMPLIFICATION

I- INTRODUCTION (Etude d'un exemple)

1- Mesure de température (capteur + CAN)

Le schéma ci-dessous représente un processus de mesure de température :



Supposons que la température à mesurer varie de 0°C à 20°C; la tension en sortie du capteur sera alors comprise entre 0V et 200mV.

Le tableau ci-contre donne les valeurs de température qui incrémentent la sortie $N_{(10)}$ du CAN.

Température (°C)	Sortie capteur (volt)	Sortie CAN (décimal)
0,0	0,0000	0
2,0	0,0196	1
3,9	0,0392	2
5,9	0,0588	3
7,8	0,0784	4
9,8	0,0980	5
11,8	0,1176	6
13,7	0,1373	7
15,7	0,1569	8
17,6	0,1765	9
19,6	0,1961	10
21,6	0,2157	11

Observations :

- La résolution du système est à peine inférieure à 2 degrés.
- Le CAN n'est utilisé que de 0 à 10 alors que sa plage va de 0 à 255.

⇒ Il faut donc améliorer le système de mesure.

2- Amélioration de la mesure de température (capteur + ampli + CAN)

L'idée est d'insérer, entre le capteur et le CAN, un circuit électronique qui réalise la fonction **multiplication par 20**.

Température (°C)	Sortie capteur (volt)	Sortie ampli (volt)	Sortie CAN (décimal)
0,00	0	0	0
0,10	0,000980392	0,01960784	1
0,20	0,001960784	0,03921569	2
0,29	0,002941176	0,05882353	3
0,39	0,003921569	0,07843137	4
0,49	0,004901961	0,09803922	5
0,59	0,005882353	0,11764706	6
...
19,61	0,196078431	3,92156863	200
19,71	0,197058824	3,94117647	201
19,80	0,198039216	3,96078431	202
19,90	0,199019608	3,98039216	203
20,00	0,2	4	204
20,10	0,200980392	4,01960784	205

Le tableau ci-contre donne les nouvelles valeurs de température qui incrémentent la sortie $N_{(10)}$ du CAN.

Observations :

- La résolution du système est maintenant inférieure à 0,1°C.
- Le CAN est maintenant utilisé sur presque toute sa plage (0 → 204).

⇒ Le système de mesure a été amélioré en précision par l'utilisation d'une plus grande plage du CAN (en fait, les observations ① et ② sont liées).

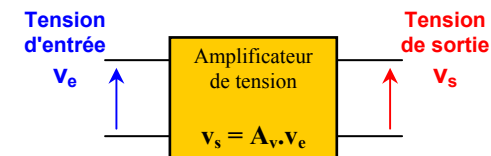
Remarque :

- Le circuit qui réalise la multiplication par 20 est appelé "Amplificateur".
- Les **amplificateurs étudiés** dans ce chapitre seront des **amplificateurs de tension**.

II- L'AMPLIFICATEUR DE TENSION IDÉAL

1- Définition

L'amplificateur de tension est un circuit électrique (tension d'entrée v_e et tension de sortie v_s) qui réalise la fonction "multiplication par une constante A_v " : $v_s = A_v \cdot v_e$.



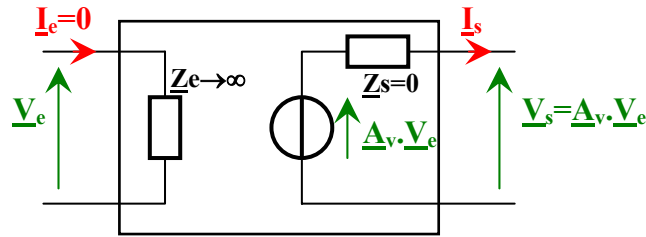
2- Modèle électrique

L'amplificateur de tension idéal possède les propriétés suivantes :

- Impédance d'entrée infinie (pas d'intensité absorbée en entrée).
- Impédance de sortie nulle (source idéale de tension en sortie).

③ Bande passante infinie (l'amplification fonctionne sur une gamme de fréquence infinie).

Le schéma ci-dessous représente le modèle de l'amplificateur parfait :



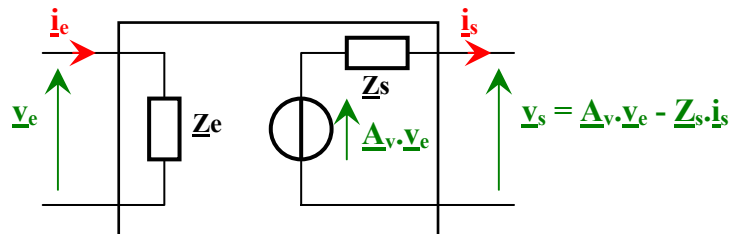
III-L-AMPLIFICATEUR DE TENSION RÉEL

1- Caractéristiques générales de l'amplificateur de tension réel

Pour utiliser un amplificateur réel, il faut tenir compte des caractéristiques suivantes (régime sinusoïdal):

- ① Impédance d'entrée Z_e (si $Z_e \neq \infty$ alors $i_e \neq 0$).
- ② Source de tension en sortie (modèle de Thévenin) : $E_s = A_v \cdot V_e$ avec A_v constant.
 \Rightarrow La relation $E_s = A_v \cdot V_e$ n'est valable que sur une plage limitée de v_e (**domaine linéaire**) et sur un domaine limité de fréquence (**bande passante**).
- ③ Impédance de sortie Z_s (si $Z_s \neq 0$ alors $v_s = A_v \cdot V_e - Z_s \cdot I_s$).

Le schéma ci-dessous représente le modèle électrique de l'amplificateur réel :



2- Amplification en tension

a- Définition

L'amplification A_v en tension d'un amplificateur est défini par relation :

$$\boxed{A_v = \frac{V_s}{V_e}} \text{ avec } V_e \text{ tension d'entrée et } V_s \text{ tension de sortie.}$$

■ Module : $A_v = |A_v| = \frac{V_s}{V_e}$.

A partir du module, on peut définir le **gain** (en décibels) $G_{dB} = 20 \log |A_v|$.

■ Argument : $\text{Arg}(A_v) = \text{"phase de } v_s \text{ par rapport à } v_e \text{"}$

b- Représentation graphique (diagramme de Bode)

① Décades de résistances :

L'étude de l'amplification se fait, en principe, sur une large plage de fréquences.

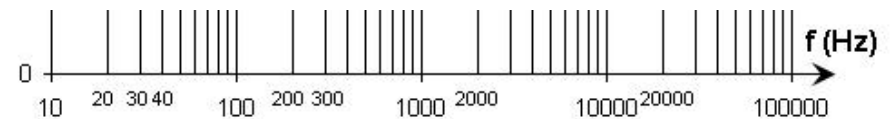
\Rightarrow La fréquence est représentée en abscisse sur les graphes.

Prenons par exemple une étude d'amplification pour $10\text{Hz} < f < 100\text{kHz}$. Avec une échelle linéaire, la fréquence "20Hz" n'est pas visible car trop proche de "10Hz".

Il existe une échelle dite "logarithmique" qui "étire" les basses fréquences et "contracte" les hautes fréquences.

Il s'agit d'un logarithme de base 10, d'où le nom de décades de fréquences.

Dans notre exemple, l'axe des abscisses aura l'allure représentée ci-dessous :



On remarque que "20Hz" et "10Hz" sont à la même distance que "20kHz" et "10kHz".

② Courbe de Gain :

On trace directement G_{dB} en fonction de la fréquence f avec une échelle logarithmique pour f .

③ Courbe de Phase :

On trace $\text{Arg}(A_v)$ sur la même échelle de fréquence que pour la courbe de Gain.

L'ensemble "courbe de Gain" + "courbe de Phase" constitue le diagramme de Bode de l'amplificateur (exemple sur le schéma suivant):

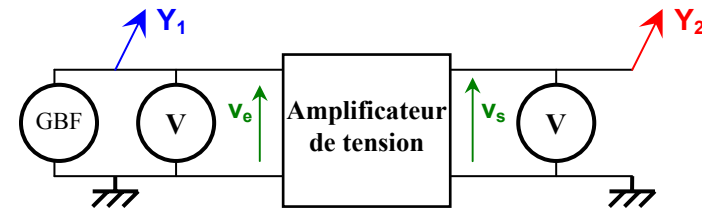
IV- MÉTHODES D'ÉTUDE D'UN AMPLIFICATEUR DE TENSION

1- Elaboration du diagramme de Bode

a- Montage

Le signal sinusoïdal d'entrée $v_e(t)$ sera produit par un G.B.F.
Un oscilloscope visualisera le signal d'entrée $v_e(t)$ et le signal de sortie $v_s(t)$ pour mesurer la différence de phase mais aussi vérifier le domaine linéaire (pas de distorsion : saturation, déformation ...).

Un voltmètre en position "AC" mesurera la valeur efficace des signaux.



Méthode :

- ① Régler $v_e(t)$ à l'amplitude et à la fréquence désirée (forme sinusoïdale alternative).
- ② Visualiser $v_e(t)$ et $v_s(t)$ pour mesurer la différence de phase et vérifier la linéarité.
- ③ Mesurer les valeurs efficaces V_e et V_s et calculer $G_{dB} = 20 \log(V_s/V_e)$.
- ④ Placer le point mesuré sur le diagramme de Bode (G_{dB} et Phase à la fréquence donnée).
- ⑤ Recommencer à partir de l'étape ① pour une autre fréquence jusqu'à pouvoir tracer les courbes $G_{dB}(f)$ et Phase(f).

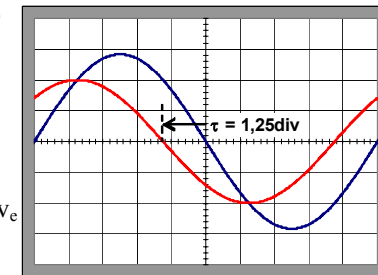
b- Exemple

Reprenons l'exemple du filtre audiofréquence et effectuons une mesure sur ce filtre pour $f = 20\text{Hz}$:

■ On règle V_e à 1V (efficace) et $f = 20\text{Hz}$.

■ On mesure $V_s = 7,07$
 $\Rightarrow G_{dB} = 20 \log \frac{7,07}{1} \approx 17\text{dB}$

■ On mesure une avance sur v_e de 1,25div
 $\Rightarrow \text{Phase} = 1,25 \times (2\pi)/10 = \pi/4$.



Calibre Y1 : 0,5 V/div

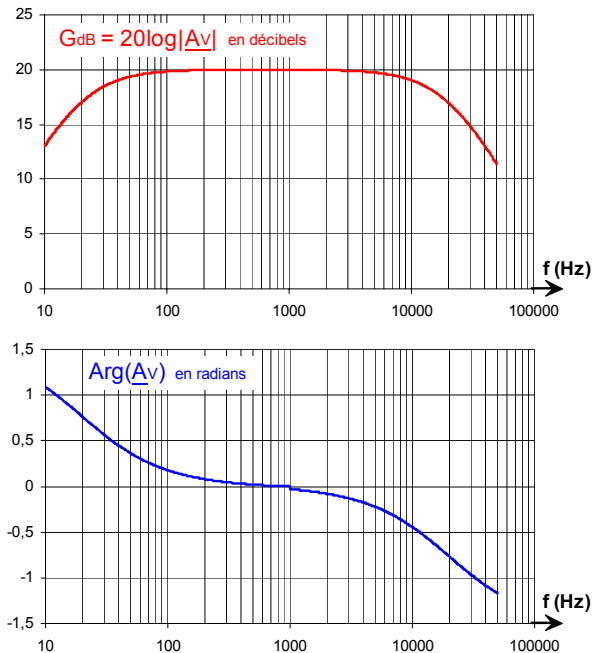
Couplage : AC

Calibre Y2 : 5 V/div

Couplage : AC

Calibre temps : 5ms/div

Pour $f = 20\text{Hz}$, il suffit de placer le point "17dB" sur la courbe de gain et $\pi/4$ sur la courbe de phase.



c- Bande passante

Un amplificateur fonctionne sur une plage limitée de fréquences appelée "bande passante". Pour établir cette bande passante, on définit la (ou les) fréquence(s) de coupure(s) :

Définition : Une fréquence de coupure est définie chaque fois que le module A_V de

l'amplification est égale à $\frac{A_{V_{max}}}{\sqrt{2}}$.

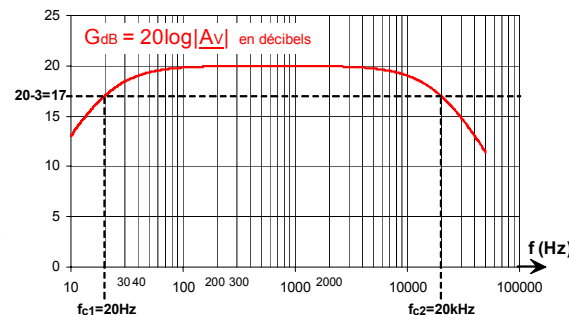
Une fréquence de coupure correspond aussi à $G_{dB} = G_{max} - 3\text{dB}$.

Démonstration : $20 \log \frac{A_{V_{max}}}{\sqrt{2}} = 20 \log(A_{V_{max}}) - 20 \log \sqrt{2} \approx G_{max} - 3,010$

Dans notre exemple, on définit deux fréquences de coupure à $G_{max} - 3\text{dB} = 20 - 3 = 17\text{dB}$:

- Coupure basse : $f_{c1} \approx 20\text{Hz}$.
- Coupure haute : $f_{c2} \approx 20\text{kHz}$.

Il s'agit d'un amplificateur de type "audio fréquence".



2- Exploitation du diagramme de Bode

L'observation du diagramme de Bode permet de connaître les caractéristiques du signal de sortie lorsque le signal sinusoïdal d'entrée est connu.

Méthode :

- ① La mesure du gain G_{dB} donne l'amplitude du signal de sortie : $V_s = V_e 10^{\frac{G_{dB}}{20}}$.
- ② La mesure de la Phase donne la différence de phase entre v_s et v_e .

Exemple :

Toujours dans notre exemple d'amplificateur "audio", observons le diagramme de Bode pour la fréquence $f = 20\text{kHz}$:

On suppose, par exemple que le signal v_e a une amplitude de 1V et une phase nulle.

⇒ expression temporelle : $v_e(t) = 1 \cdot \sin(2\pi \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot t)$.

- ① On mesure $G_{dB} = 17\text{dB}$.

⇒ L'amplitude de v_e est de 1V, l'amplitude de v_s sera donc de $1 \times 10^{\frac{17}{20}} \approx 7,07\text{V}$.

- ② On mesure une différence de phase de $-0,79\text{rad} \approx -\pi/4 \text{ rad}$.

⇒ v_s a donc un retard angulaire de $\pi/4 \text{ rad}$.

L'expression temporelle de v_s est donc : $v_s(t) = 0,707 \sin(2\pi \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot t - \pi/4)$.

V- EXEMPLES DE FAMILLES D'AMPLIFICATEURS DE TENSION

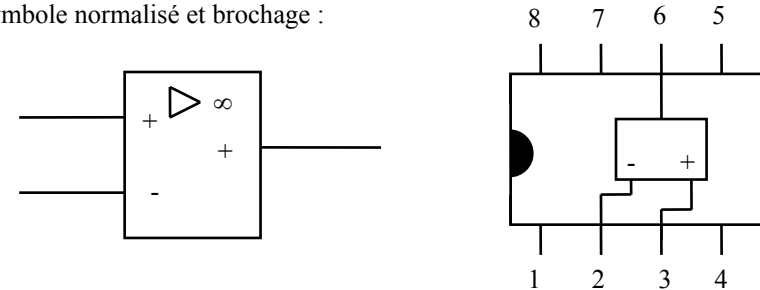
1- Amplificateurs à usage général à base d'ADI

a- Présentation de l'ADI

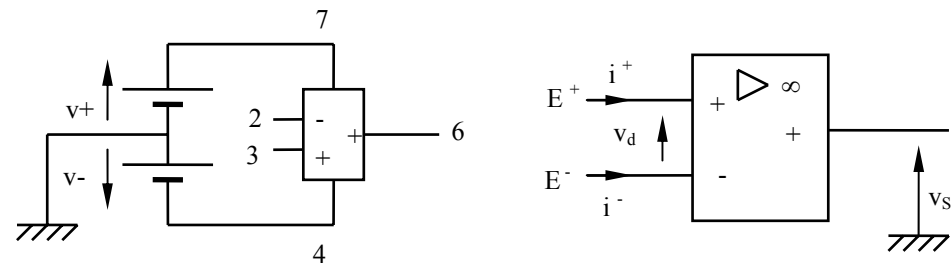
L'amplificateur différentiel intégré (ADI) est un circuit qui amplifie très fortement la tension appliquée à ses deux bornes d'entrée. Il aura donc besoin de composants extérieurs pour fonctionner en amplificateur de tension.

Prenons pour exemple le circuit intégré TL081 dont les caractéristiques sont résumées ci-dessous :

■ Symbole normalisé et brochage :



- Bornes d'entrées : **Entrée inverseuse** E^- (broche 2).
- Entrée non inverseuse** E^+ (broche 3).
- Borne de **sortie** V_s (broche 6).
- Bornes d'**alimentations** V^- (broche 4) et V^+ (broche 7) reliées à une alimentation symétrique.
- Bornes de réglages 1 et 8 (peu utilisées pour un usage courant) et broche 8 non reliée.



■ Caractéristiques de transfert en tension

L'amplificateur opérationnel est caractérisé par une **amplification en tension très élevée** : $v_s = A_d \cdot v_d$ avec A_d constante d'amplification ($A_d > 10^5$).

Les courants d'entrée i^+ et i^- sont **très faibles** (négligeable).

La sortie se comporte comme un **générateur idéal de tension**.

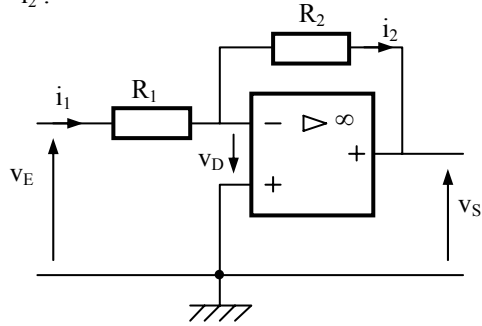
b- Amplificateur inverseur

E^- est reliée à S par la résistance R_2 .

E^+ est relié à la masse.

On considère le fonctionnement linéaire ($v_d = v_s / A_d$).

$i^+ = i^- = 0$ donc $i_1 = i_2$.



Exprimons le coefficient d'amplification en fonction des résistances :

- $v_S = A_D \cdot v_D \Rightarrow v_D = \frac{v_S}{A_D}$ et si $A_D \rightarrow \infty$ alors $v_D \rightarrow 0$.

- $v_E + v_D = R_1 \cdot i_1 \Rightarrow v_E = R_1 \cdot i_2$ car $v_D \approx 0$ et $i_1 = i_2$.

- $v_S + R_2 \cdot i_2 + v_D = 0 \Rightarrow v_S = -R_2 \cdot i_2$ car $v_D \approx 0$.

- $\frac{v_S}{v_E} = \frac{-R_2 \cdot i_2}{R_1 \cdot i_2} = \frac{-R_2}{R_1} \Rightarrow v_S = -\frac{R_2}{R_1} v_E$.

- Le coeff. d'amplification en tension est défini par $v_S = A_V \cdot v_E$ donc $A_V = -\frac{R_2}{R_1}$.

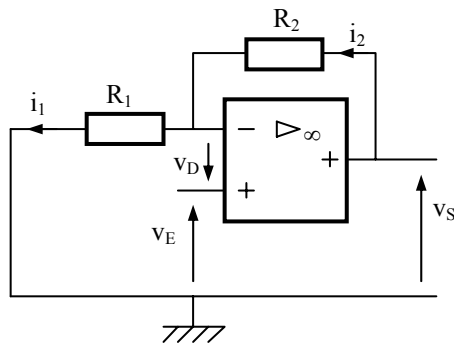
c- Amplificateur non inverseur

On est toujours en fonctionnement

linéaire donc $v_d = 0$ V.

On peut donc considérer que le potentiel de l'entrée non inverseuse est égal à v_E .

On considère encore : $i^+ = i^- = 0$ A.



Exprimons le coefficient d'amplification en fonction des résistances :

- $v_E = R_1 \cdot i_2 + v_D \Rightarrow v_E = R_1 \cdot i_2$ car $v_D = 0$.

- $v_S + v_D = v_E + R_2 \cdot i_2 \Rightarrow v_S = v_E + R_2 \cdot i_2$.

- $v_S = v_E + R_2 \cdot i_2 = v_E + R_2 \cdot \frac{v_E}{R_1} = v_E + \frac{R_2}{R_1} v_E \Rightarrow v_S = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_E$.

- Le coefficient d'amplification en tension est donc : $A_V = 1 + \frac{R_2}{R_1}$.

2- Amplificateurs d'instrumentation

L'amplificateur d'instrumentation est spécialisé dans la mesure précise de la tension en sortie d'un capteur. Cet amplificateur doit avoir les propriétés suivantes :

- Très forte impédance d'entrée pour ne pas prélever de courant au capteur.
- Grande précision dans l'amplification.
- Faible bruit (peu de tension parasite sur le signal de sortie).
- Peu sensible à la température.
- Bande passante compatible avec les vitesses de variations du signal mesuré.

De tels amplificateurs existent en un seul boîtier. Citons par exemple le circuit AD621 d'ANALOG DEVICE qui intègre trois ADI rebouclés avec des résistances de précision de l'ordre de 0,02%. Le coefficient d'amplification peut être soit de 10 soit de 100 en reliant ou non les pattes 1 et 8.

Un extrait de la documentation de ce composant se trouve ci-dessous :

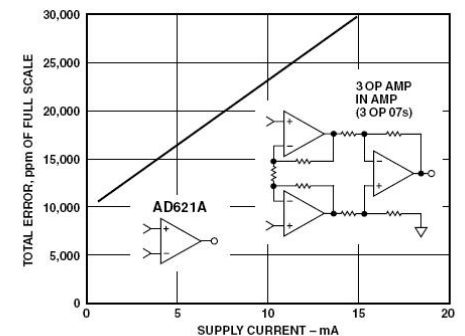
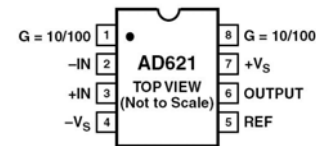


Figure 1. Three Op Amp IA Designs vs. AD621

- Les broches -IN et +IN représentent les entrées différentielles.
- Le signal de sortie amplifié se prélève entre les broches OUTPUT et REF (REF est le plus souvent relié à la masse).
- L'alimentation symétrique se branche aux broches +Vs et -Vs.
- L'amplification est égale à 10 si les broches 1 et 2 restent "en l'air".
L'amplification est égale à 100 si les broches 1 et 2 sont reliées par un fil.

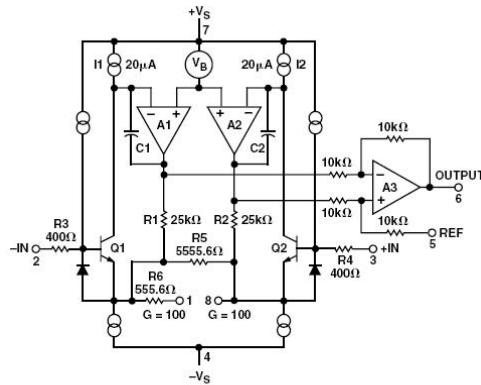


Figure 3. Simplified Schematic of AD621

3- Amplificateurs à gain programmable

Pour réaliser un système d'acquisition de mesures, il faut prévoir la fonction "réglage du calibre" pour adapter l'étendue de la mesure à la plage de tension d'entrée du convertisseur analogique numérique.

Une première solution consiste à réaliser des ponts diviseurs de tension avec résistances sélectionnables par relais (un relais pour chaque calibre).

Pour éviter l'emploi de commutateurs de résistances, on peut utiliser un amplificateur à gain programmable. Il s'agit d'un circuit intégré regroupant un amplificateur et un commutateur de gain dans le même boîtier.

Prenons pour exemple le circuit AD526 (*Analog Device*) qui est un amplificateur programmable (amplifications possibles : 1 ; 2 ; 4 ; 8 ou 16).

La programmation de l'amplification se fait à l'aide de 3 broches (A2, A1 et A0) et aucun composant externe n'est à utiliser pour faire fonctionner l'amplificateur (voir extrait de la documentation technique ci-après):

Attention !

Il ne s'agit pas du gain en dB mais du coeff. d'amplification

Table I. Logic Input Truth Table

Gain Code	Control	Condition	Condition
A2 A1 A0 B	CLK (CS = 0)	Gain	
X X X X	1	Previous State	Latched
0 0 0 1	0	1	Transparent
0 0 1 1	0	2	Transparent
0 1 0 1	0	4	Transparent
0 1 1 1	0	8	Transparent
1 X X 1	0	16	Transparent
X X X 0	0	1	Transparent
X X X 0	1	1	Latched
0 0 0 1	1	1	Latched
0 0 1 1	1	2	Latched
0 1 0 1	1	4	Latched
0 1 1 1	1	8	Latched
1 X X 1	1	16	Latched

NOTE: X = Don't Care.

TRANSPARENT MODE OF OPERATION

In the transparent mode of operation, the AD526 will respond directly to level changes at the gain code inputs (A0, A1, A2) if B is tied high and both \overline{CS} and \overline{CLK} are allowed to float low.

After the gain codes are changed, the AD526's output voltage typically requires 5.5 μ s to settle to within 0.01% of the final value. Figures 26 to 29 show the performance of the AD526 for positive gain code changes.

LATCHED MODE OF OPERATION

The latched mode of operation is shown in Figure 34. When either \overline{CS} or \overline{CLK} go to a Logic "1," the gain code (A0, A1, A2, B) signals are latched into the registers and held until both \overline{CS} and \overline{CLK} return to "0." Unused \overline{CS} or \overline{CLK} inputs should be tied to ground. The \overline{CS} and \overline{CLK} inputs are functionally and electrically equivalent.

