

Laboratoire d'électronique : Convertisseurs A/N et N/A

MASUR Jonathan

GOSSELIN Paul

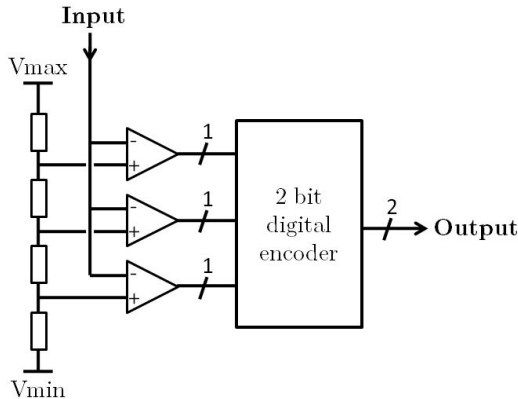
On s'intéresse ici à l'étude de convertisseurs analogique/numérique (aussi appelé "CAN" ou "ADC" — pour "*Analog-to-Digital Converter*") et numérique/analogique (aussi appelé "CNA" ou "DAC" — pour "*Digital-to-Analog Converter*").

1 Le convertisseur analogique/numérique ADC0820

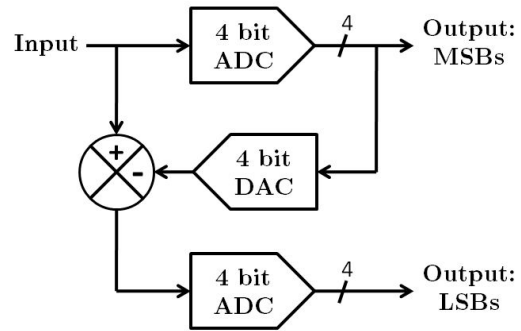
1.1 Prévisions théoriques

1) Les convertisseurs analogique/numérique flash sont fréquemment utilisés, parce qu'ils permettent des fréquences de fonctionnement élevées. Toutefois, il se caractérisent en revanche généralement par des coûts énergétiques et spatiaux élevés.

Le principe d'un CAN flash n bits est le suivant. Supposons que les valeurs analogiques à convertir soient comprises entre deux tensions de référence V_{min} et V_{max} , fournies au convertisseur. 2^n résistances permettent de diviser $[V_{min}, V_{max}]$ en 2^n sous-ensembles $([V_{i-1}, V_i])_{i \in [1..2^n]}$ ($V_0 = V_{min}$, $V_{2^n} = V_{max}$, $\forall i \in [1..2^n]$, $V_i > V_{i-1}$), en fournissant les $2^n - 1$ tensions de transition V_i . $2^n - 1$ comparateurs permettent alors de situer la tension d'entrée V_{in} du condensateur par rapport à ces $2^n - 1$ tensions de transition V_i . Un encodeur n bits — entièrement numérique donc — permet alors de convertir les sorties de ces comparateurs ($2^n - 1$ bits) en l'entier i correspondant sur n bits : $V_{in} \in [V_{i-1}, V_i]$.



(a) CAN flash 2 bits



(b) CAN semi-flash 8 bits

Figure 1: Principes de base des CAN flash et semi-flash

Le principal inconvénient d'une telle structure réside dans le nombre élevé de composants utilisés.

Pour limiter le nombre de comparateurs les convertisseurs semi-flash utilisent plusieurs convertisseurs flash. Typiquement, un convertisseur semi-flash 8 bits utilisera tout d'abord un convertisseur flash 4 bits afin d'encoder les 4 bits de poids fort (ou "MSBs" : "*Most Significant Bits*"). La tension V_{MSB} correspondante au résultat fourni par ce convertisseur est alors soustraite à la tension d'entrée V_{in} , puis $V_{in} - V_{MSB}$ est traitée par un second convertisseur flash 4 bits afin d'obtenir les 4 bits de poids faible (ou "LSBs" : "*Less Significant*").

Bits”).

La réactivité du convertisseur est ainsi diminuée par rapport à un convertisseur flash d’un facteur légèrement supérieur à 2, mais le nombre de composants nécessaire passe de $O(2^n)$ à $O(2^{n/2})$.

Le convertisseur analogique/numérique utilisé dans ce travail est un CAN semi-flash 8 bits : l’ADC0820.

2) Idéalement, l’intervalle $[V_{min}, V_{max}]$ est subdivisé en intervalles identiques. Les tensions de transitions d’une valeur à l’autre en sortie du CAN sont donc données par la formule :

$$\forall i \in [1..2^n - 1], V_i = V_{min} + i \cdot \frac{V_{max} - V_{min}}{2^n}$$

(On rappelle que V_i est la tension de transition des entiers $i - 1$ à i en sortie du CAN.)

Dans le cadre de notre expérience : $V_{min} = 0$ et $V_{max} = V_{ref} = 5V$. Ainsi :

$$\forall i \in [1..2^8 - 1], V_i = i \cdot \frac{V_{ref}}{2^8} = i \cdot 19,531mV$$

Les valeurs de V_i correspondantes ont été rajouté au tableau 1 des résultats expérimentaux.

1.2 Mesures

1) La tension d’alimentation utilisée pour le convertisseur, servant aussi de tension de référence V_{ref} , est fournie par une alimentation stabilisée. Elle est précisément de : $V_{ref} = 4.997V$.

2,3) À l’aide d’un potentiomètre 10 tours, on fait varier la tension d’entrée V_{in} du CAN étudié afin de mesurer les tensions de transition V_i , pour lesquelles le nombre en sortie du convertisseur — représenté en binaire par des LEDs — passe de $i - 1$ à i .

Table 1: Résultats obtenus lors de l’étude du convertisseur ADC0820

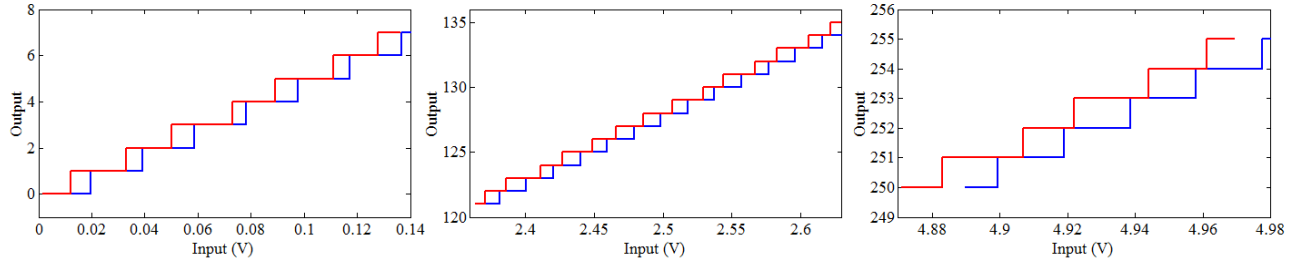
i	0	1	2	3	4	5	6
V_i théorique (V)	0,02	0,039	0,059	0,078	0,098	0,117	0,137
V_i mesuré (V)	0,012	0,033	0,05	0,073	0,089	0,111	0,128
$(V_i - V_{i-1})$ mesuré (V)	—	0,021	0,017	0,023	0,016	0,022	0,017

i	121	122	123	124	125	126	127
V_i théorique (V)	2,381	2,401	2,42	2,44	2,459	2,479	2,499
V_i mesuré (V)	2,371	2,386	2,411	2,427	2,449	2,466	2,486
$(V_i - V_{i-1})$ mesuré (V)	—	0,015	0,025	0,016	0,022	0,017	0,02

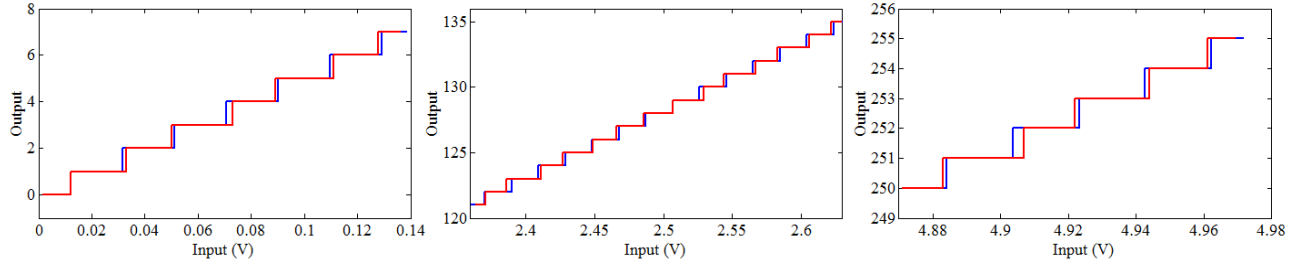
i	128	129	130	131	132	133	134
V_i théorique (V)	2,518	2,538	2,557	2,577	2,596	2,616	2,635
V_i mesuré (V)	2,507	2,529	2,544	2,567	2,583	2,606	2,622
$(V_i - V_{i-1})$ mesuré (V)	0,021	0,022	0,015	0,023	0,016	0,023	0,016

i	250	251	252	253	254
V_i théorique (V)	4,899	4,919	4,938	4,958	4,977
V_i mesuré (V)	4,883	4,907	4,922	4,944	4,961
$(V_i - V_{i-1})$ mesuré (V)	—	0,024	0,015	0,022	0,017

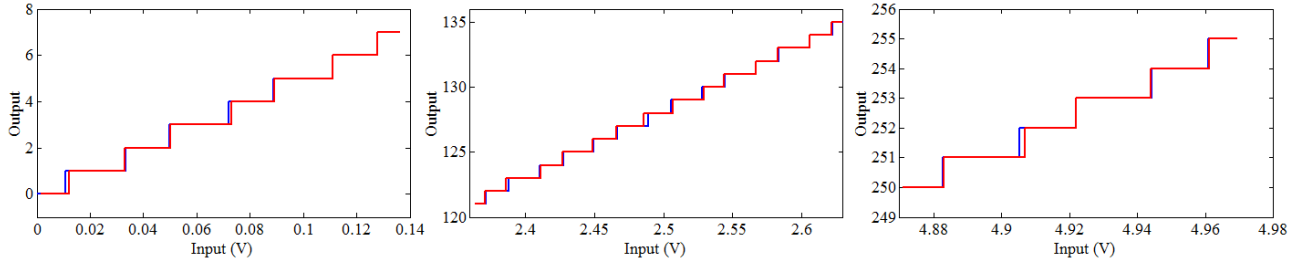
Ces résultats, comparés aux résultats théoriques donnés par $V_i = i \cdot \frac{V_{ref}}{2^8}$ et $V_{ref} = 4,997V$ sont représentés Fig. 2a.



(a) Résultats obtenus (en rouge), comparés à $V_i = i \cdot \frac{V_{ref}}{2^8}$ (en bleu) ($V_{ref} = 4,997V$)



(b) Résultats obtenus (en rouge), comparés à $V_i = V_{min} + i \cdot \frac{V_{max}-V_{min}}{2^n}$ (en bleu) ($V_{min} = -0,0073V$, $V_{max} = 4,9816V$)



(c) Résultats obtenus (en rouge), comparés à $V_i = V_{min} + i \cdot \frac{V_{max}-V_{min}}{2^n} + p_i \delta V$ (en bleu) ($V_{min} = -0,0072V$, $V_{max} = 4,9817V$, $\delta V = 0,0015V$)

Figure 2: Résultat obtenu avec le convertisseur analogique/numérique ADC0820

La première chose que l'on observe est un décalage permanent entre les valeurs de V_i mesurées (que l'on notera V_i^{mes}) et les valeurs de V_i théorique (que l'on notera V_i^{th}). On constate en effet un *offset* moyen de $-0,0111$. On remarque toutefois que $V_i^{mes} - V_i^{th}$ augmente avec i ($\langle V_i^{mes} - V_i^{th} \rangle_{i \in [1..7]} = -0,0072$, $\langle V_i^{mes} - V_i^{th} \rangle_{i \in [122..135]} = -0,0115$, $\langle V_i^{mes} - V_i^{th} \rangle_{i \in [251..255]} = -0,0150$).

Afin d'obtenir une meilleure approximation des résultats pratiques, on peut réutiliser la formule :

$$V_i^{th} = V_{min} + i \cdot \frac{V_{max} - V_{min}}{2^n}$$

On a calculé via Matlab les valeurs optimales pour V_{min} et V_{max} ¹, et obtenu : $V_{min} = -0,0073V$, $V_{max} = 4,9816V$. Les résultats correspondants sont présentés Fig. 2b.

On remarque par ailleurs que pour i pair ($V_i^{mes} - V_{i-1}^{mes}$) est généralement de l'ordre de $0,016V$, tandis que cette valeur est généralement de l'ordre de $0,022V$ pour i impair. Pour représenter cet effet de la parité de i sur V_i , on pourra utiliser la modélisation :

$$V_i^{th} = V_{min} + i \cdot \frac{V_{max} - V_{min}}{2^n} + p_i \delta V \quad \text{avec : } p_i = \begin{cases} +1 & \text{si } i \in 2\mathbb{N} \\ -1 & \text{sinon} \end{cases}$$

Là encore, on obtient avec Matlab les coefficients optimum : $V_{min} = -0,0072V$, $V_{max} = 4,9817V$, $\delta V = 0,0015V$. Les résultats correspondants sont présentés Fig. 2c.

Nous avons tenté de comprendre l'origine de cet effet de la parité de i sur la tension de transition V_i . Compte tenu du principe de fonctionnement du convertisseur semi-flash, cet effet ne peut être imputé au calcul du bit de poids faible. En effet, ce dernier est donné par l'encodeur numérique encodant les quatre bits de poids faible. Il ne peut pas non plus être imputé au convertisseur numérique/analogique interne du convertisseur analogique/numérique étudié : en effet, la sortie de ce convertisseur numérique/analogique n'est modifiée que lorsqu'un des quatre bits de poids fort est modifié.

On en déduit que le problème est lié aux quinze ($2^4 - 1$) comparateurs fournissant les bits en entrée de l'encodeur 4-bits des bits de poids faibles. Leurs offsets seraient quasiment identiques pour les tensions de seuil V_i avec i pair, ainsi que pour les tensions de seuil V_i avec i impair.

L'hypothèse réalisée est la suivante : tous les comparateurs utilisés ont un offset quasiment égal à δV — ce qui se justifie en pratique : cet offset est fortement lié au substrat, dont les caractéristiques peuvent être considérées comme constantes au sein du convertisseur étudié. En revanche, un convertisseur sur deux serait placé "à l'envers" : on code $V < V_i$ pour i pair, et $V > V_i$ pour i impair (ou l'inverse). Cela se justifie par une éventuelle simplification de l'encodeur 4-bits obtenue en codant un bit sur deux en entrée avec une logique négative.

2 Le convertisseur numérique/analogique AD7524

2.1 Prévisions théoriques

1) Le convertisseur numérique/analogique étudié est un CNA 8 bits à réseau R/2R : l'AD7524.

Le principe de base de la plupart des CNA à réseau R/2R repose sur l'équivalence représentée Fig. 3a, où V_{min} et V_{max} sont des tensions fixées. De cette équivalence découle l'équivalence représentée Fig. 3b, où V_{ref} est une tension fixée, B_0, B_1, \dots, B_{n-1} sont les bits en entrée du CNA, et :

$$V_{eq} = \left(\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{2^{n-i}} B_i \right) V_{ref}$$

¹ Valeurs minimisant $\sum (V_i^{mes} - V_i^{th})^2$

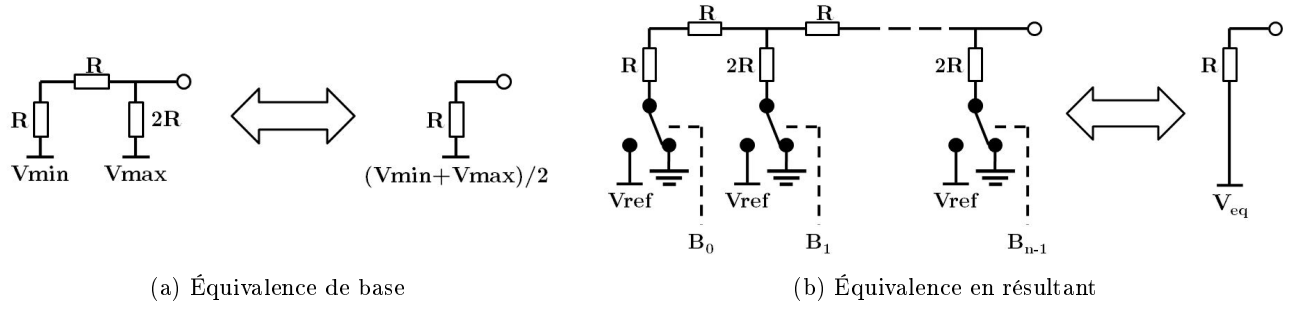


Figure 3: Principe de base des CNA à réseau R/2R

On utilise alors généralement un amplificateur opérationnel branché en suiveur ou en amplificateur de gain -1 , afin d'obtenir en sortie la tension V_{eq} indépendamment du reste du circuit.

Le fonctionnement de l'AD7524 est légèrement différent. Le circuit correspondant, tel qu'il est branché (avec notamment la sortie OUT2 branchée à la masse et l'utilisation d'un amplificateur opérationnel), est représenté Fig. 4²

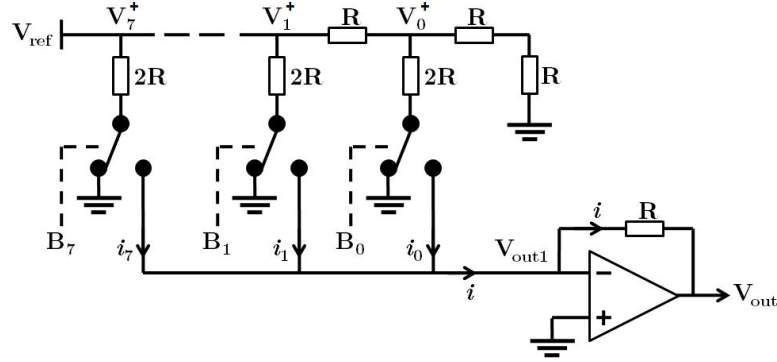


Figure 4: Le convertisseur AD7524 en situation

L'amplificateur opérationnel fixe $V_{out1} = 0$. L'équivalence présentée Fig. 3a permet alors de calculer par récurrence les tensions V_k^+ (cf Fig. 5) :

$$V_7^+ = V_{ref} \text{ et } V_{k-1}^+ = \frac{V_k^+}{2} ; \text{ d'où : } V_k^+ = \frac{V_{ref}}{2^{7-k}}.$$

On obtient alors :

$$i = \sum_{k=0}^7 i_k = \sum_{k=0}^7 B_k \frac{V_k^+}{2R} = \frac{V_{ref}}{R} \sum_{k=0}^7 \frac{1}{2^{8-k}} B_k$$

Puisque $V_{out} = -R i$, dans notre cas, on obtient ainsi pour l'ensemble des bits d'entrée (B_0, \dots, B_7) un tension de sortie donnée par la formule :

$$V_{out}(B_0 \dots B_7) = - \left(\sum_{k=0}^7 \frac{1}{2^{n-k}} B_k \right) V_{ref} \quad (1)$$

²Un condensateur, liant V_{out1} et V_{out} , a été omis : proposé par les datasheets, son but est d'empêcher des oscillations en sortie de l'amplificateur opérationnel. Nous nous plaçons dans le cadre d'un état déjà stabilisé, où le condensateur agit comme un interrupteur ouvert.

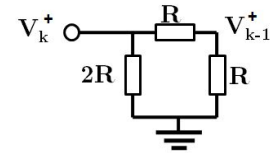


Figure 5: Calcul des V_k^+

2) Selon la formule 1, la contribution du bit i à la tension de sortie V_{out} est donnée par la formule :

$$V_i^{out} = -\frac{1}{2^{8-i}} V_{ref}$$

Les valeurs correspondantes ont été rajoutées au tableau 2 des résultats théoriques.

3) Toujours selon la formule 1, on a théoriquement :

$$V_{out}(00000000_b) = 0$$

et :

$$\begin{aligned} V_{out}(11111111_b) &= -\left(\sum_{i=0}^7 \frac{1}{2^{8-i}} B_i\right) V_{ref} = -(1 - \frac{1}{2^8}) V_{ref} \\ V_{out}(11111111_b) &= -4,9775V \end{aligned}$$

2.2 Mesures

1) Cette fois encore, la tension d'alimentation utilisée pour le convertisseur, servant aussi de tension de référence V_{ref} , est fournie par une alimentation stabilisée ; et est précisément de : $V_{ref} = 4.997V$.

2,3) Expérimentalement, on mesure la contribution V_i^{out} de chaque bit i en mettant en entrée du CNA tous les bits à zéro, excepté le bit i . Ainsi, on considère :

$$V_i^{out} = V_{out}(\delta_{0,i}\delta_{1,i}\delta_{2,i}\delta_{3,i}\delta_{4,i}\delta_{5,i}\delta_{6,i}\delta_{7,i}) \quad \text{avec : } \delta_{j,i} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2. $V_i^{out,th}$ désigne la valeur théorique de la contribution du bit i à la tension de sortie V_{out} , tandis que $V_i^{out,mes}$ en désigne la valeur mesurée expérimentalement.

Table 2: Résultats obtenus lors de l'étude du convertisseur AD7524

i	0	1	2	3	4	5	6	7
$V_i^{out,th}$ (V)	-0,0195	-0,039	-0,0781	-0,1562	-0,3123	-0,6246	-1,2493	-2,4985
$V_i^{out,mes}$ (V)	-0,019	-0,039	-0,078	-0,157	-0,314	-0,628	-1,258	-2,518
$\sum_{j<i} V_j^{out,mes}$ (V)	-0,019	-0,058	-0,136	-0,293	-0,607	-1,235	-2,493	-5,011

2.2.1 Tension de sortie pour les codes d'entrée minimum et maximum

Entrée	00000000 _b	11111111 _b
V_{out} théorique (V)	0	-4,9775
V_{out} mesurée (V)	0,001	-5,04

On remarque que l'on a notamment : $\forall i \in [1..7], \sum_{j<i} V_j^{out,mes} < V_i^{out,mes}$.

Ainsi, le convertisseur numérique/analogique étudié est monotone. En effet, cela montre que si $\forall j > i, B'_j = B_j$, $B_i = 0$, $B'_i = 1$, $\forall j < i, B_j = 1$ et $\forall j < i, B'_j = 0$, alors :

$$V_i^{out,mes}(B_7 B_6 B_5 B_4 B_3 B_2 B_1 B_0) < V_i^{out,mes}(B'_7 B'_6 B'_5 B'_4 B'_3 B'_2 B'_1 B'_0)$$

(Par exemple : $V_i^{out,mes}(B_7 B_6 B_5 B_4 0111) < V_i^{out,mes}(B'_7 B'_6 B'_5 B'_4 1000)$.)

Les écarts entre les valeurs théoriques et mesurées pour $V_{out}(00000000)$ et $V_{out}(11111111)$ s'explique notamment par une légère différence entre les résistances liant les sorties OUT1 et R₋FDBK au sein du convertisseur AD7524, ainsi que par les imperfections de l'amplificateur opérationnel (offset et gain fini). De ces imperfections, il résulte un offset en sortie de l'ensemble du convertisseur, amplificateur opérationnel inclus, ainsi qu'une erreur sur le gain.

L'offset est donné par :

$$V_{offset} = V_{out}^{mes}(00000000) - V_{out}^{th}(00000000) = 0,001V$$

et l'erreur sur le gain est donnée par :

$$\delta_G = \frac{(V_{out}^{mes}(11111111) - V_{out}^{mes}(00000000)) - (V_{out}^{th}(11111111) - V_{out}^{th}(00000000))}{V_{out}^{th}(11111111) - V_{out}^{th}(00000000)} = 1,25\%$$

On peut alors préciser la formule fournissant V_{out} , en prenant :

$$V_{out}^{th}(B_0 \dots B_7) = V_{offset} - (1 + \delta_G) \left(\sum_{k=0}^7 \frac{1}{2^{n-k}} B_k \right) V_{ref} = V_{offset} - \left(\sum_{k=0}^7 \frac{1}{2^{n-k}} B_k \right) \widetilde{V_{ref}}$$

avec : $\widetilde{V_{ref}} = (1 + \delta_G) V_{ref} = -\frac{V_{out}^{mes}(11111111) - V_{out}^{mes}(00000000)}{1 - \frac{1}{2^8}} = 5,061V$

3 Chaîne de conversion A/N - N/A

3.1 Montage étudié

On connecte maintenant les 8 bits de sortie du convertisseur analogique/numérique ADC0820 étudié section 1 aux 8 bits d'entrée du convertisseur numérique/analogique AD7524 étudié section 2.

On notera V_{in} la tension imposée en entrée du montage (tension d'entrée du convertisseur analogique/numérique), et V_{out} la tension obtenue en sortie (tension de sortie du convertisseur numérique/analogique).

Dans le cadre de convertisseurs parfaits, d'une fréquence d'échantillonnage infinie et d'un nombre de bits infini, on aurait donc : $V_{out} = -V_{in}$. Dans notre cas, on obtient évidemment une approximation ; et les différences entre V_{out} et $-V_{in}$ seront discutées plus bas.

Pour cela, un amplificateur sommateur permet d'obtenir en plus de la sortie du montage la tension : $V_{err} = -(V_{out} + V_{in})$.

3.2 Mesures

1) Afin d'observer les effets de la chaîne AN-NA sur le signal (échantillonnage, quantification...), on applique en entrée un signal V_{in} triangulaire d'amplitude 4V et de moyenne 2,5V. On en fera varier la fréquence f_{in} .

Quantification.

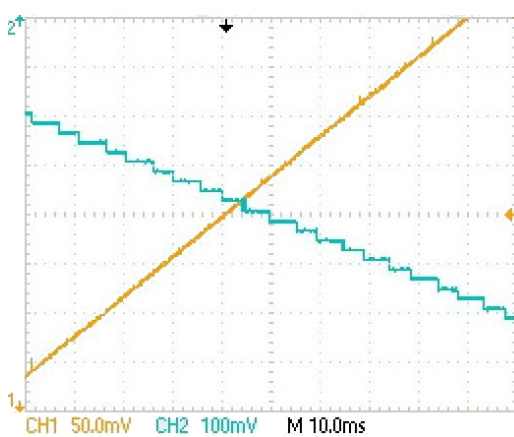
Afin d'observer l'effet de la quantification, sans être perturbé par l'échantillonnage, on utilise en entrée un signal lent : $f_{in} \ll f_{ech}$ (où f_{ech} désigne la fréquence d'échantillonnage des convertisseurs, qui est de l'ordre de 20kHz). Typiquement, on utilisera ici $f_{in} = 0,5Hz$.

Les résultats expérimentaux obtenus sont fournis Fig. 7.

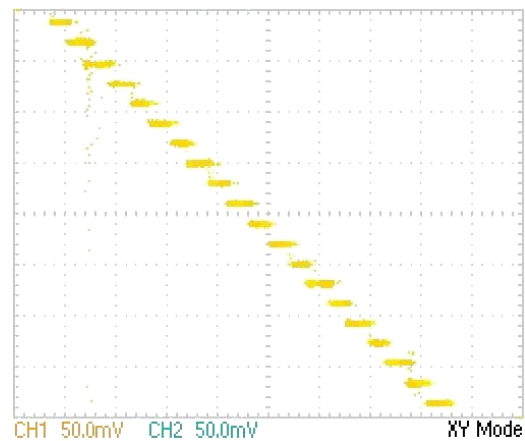
Le phénomène de quantification s'observe bien lorsque l'on trace $V_{out} = f(V_{in})$ (cf. Fig. 6b). On y observe des "marches" de hauteurs et largeurs régulières, de l'ordre de $\frac{V_{ref}}{2^8} \approx 19,5mV$. Ces marches sont continues sur le plan horizontal, mais pas sur le plan vertical : à chaque valeur de V_{out} correspondent plusieurs valeurs de V_{in} . Plus simplement, sans prendre en compte d'éventuels offsets ou erreurs de gain, lors de la conversion $V_{in} \rightarrow V_{out}$, $-V_{in}$ est "rabattu" sur la valeur la plus proche possible de V_{out} .

On introduit ainsi un erreur de quantification comprise entre $-\frac{1}{2} \frac{V_{ref}}{2^8}$ et $+\frac{1}{2} \frac{V_{ref}}{2^8}$.

Échantillonnage.

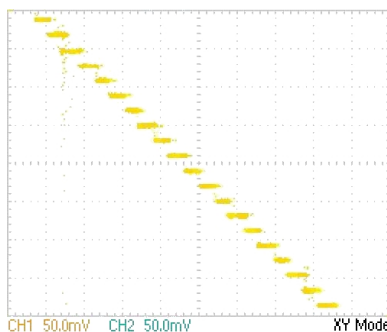


(a) $V_{out} = f(t)$ (CH1), $V_{out} = f(t)$ (CH2)

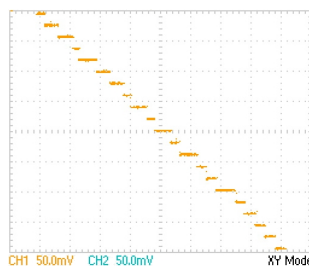


(b) $V_{out} = f(V_{in})$

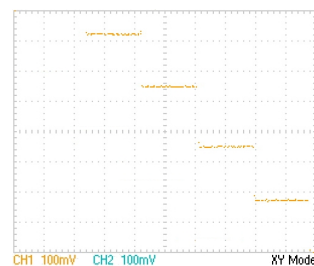
Figure 6: V_{in} et V_{out} pour un signal d'entrée triangulaire d'amplitude 2V (4V crête à crête)



(a) $f_{in} = 0,5$ Hz)



(b) $f_{in} = 50$ Hz)



(c) $f_{in} = 0,5$ Hz)

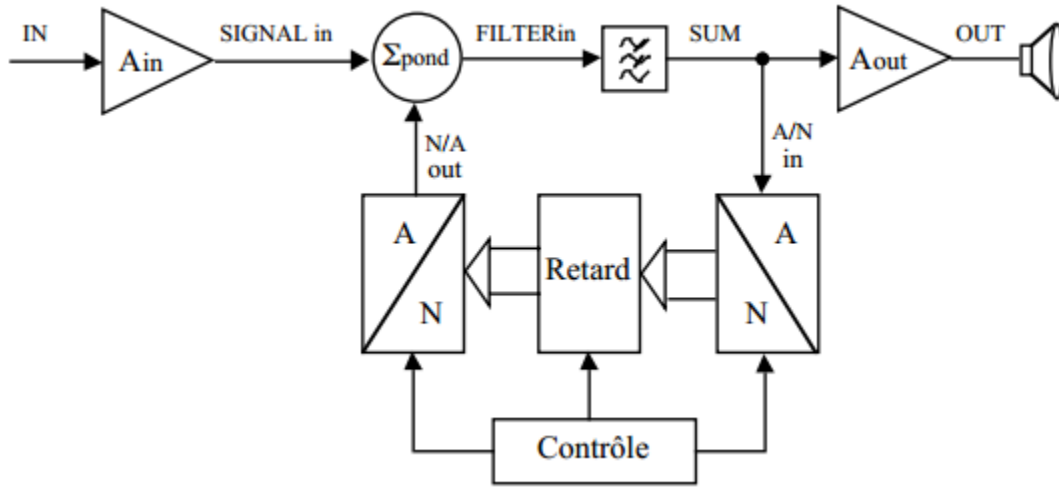
Figure 7: $V_{out} = f(V_{in})$ pour différentes fréquences d'entrées

4 Chambre d'écho

4.1 Analyse théorique

4.1.1 Fonctionnement

Le principe de la chambre d'écho est d'échantillonner un signal audio à l'aide du convertisseur AN, de stocker les échantillons dans un tampon circulaire réalisé à l'aide d'une mémoire SRAM de 8-bits, puis de restituer les données passées qui sont stockées dans la mémoire à l'aide du convertisseur NA.



Il y a alors plusieurs modes de fonctionnement :

- **Retard pur** : Le signal est désactivé mais l'écho est activé. Il s'agit donc d'un simple retard.
- **Echo simple** : Le signal et l'écho sont activés, mais le sommateur est désactivé. Le signal est sommé avec le contenu de la mémoire, mais seul le signal est écrit dans la mémoire. Il n'y a donc qu'un seul écho.
- **Echo infini** : Le signal, l'écho et le sommateur sont activés. Le signal est sommé avec le contenu de la mémoire avant d'être écrit dans la mémoire. Il y a donc un feedback sur l'écho, ce qui simule mieux un écho réel.

4.1.2 Conditions à garantir pour la stabilité

- **En mode écho simple** : Théoriquement, un système d'écho simple est équivalent à un "filtre" à réponse impulsionnelle finie (RIF), dont la réponse est :

$$y[n] = x[n] + k \cdot x[n - l]$$

Avec : x = entrée, y = sortie, k = facteur d'amplification, l = taille du tampon en mémoire

Sa fonction de transfert est donc :

$$H(z) = 1 + k \cdot z^{-l}$$

Il n'y a pas de pôles, le système sera toujours stable.

- **En mode écho infini** : Un echo infini est équivalent à un "filtre" à réponse impulsionnelle infinie (RII), dont la réponse est :

$$y[n] = x[n] + k \cdot y[n - l]$$

La fonction de transfert est donc :

$$H(z) = \frac{1}{1 - k \cdot z^{-l}}$$

Ce système sera stable seulement pour les $k < 1$. En cas d'instabilité, la chambre d'écho ne fonctionnera pas, un régime d'oscillation apparaîtra et un sifflement fort désagréable s'entendra sur la sortie.

A noter que la réponse en fréquence de la chambre d'écho n'est pas constante : Certaines fréquences vont être amplifiées tandis que d'autres vont être atténuées, et ce pour les deux modes écho simple et infini. Cet effet de bord n'est pas évitable. De plus, toute modification des paramètres k et l va affecter la réponse en fréquence.

4.1.3 Calcul du retard maximum

On désire avoir une bande passante de $15kHz$, il faut donc une fréquence d'échantillonnage strictement supérieure à $30kHz$.

Le retard maximum possible est de :

$$retard = \frac{l_{max}}{f_e}$$

Avec l_{max} = taille du tampon maximum = 32768 octets et f_e = fréquence d'échantillonnage = $32000Hz$, cela donne :

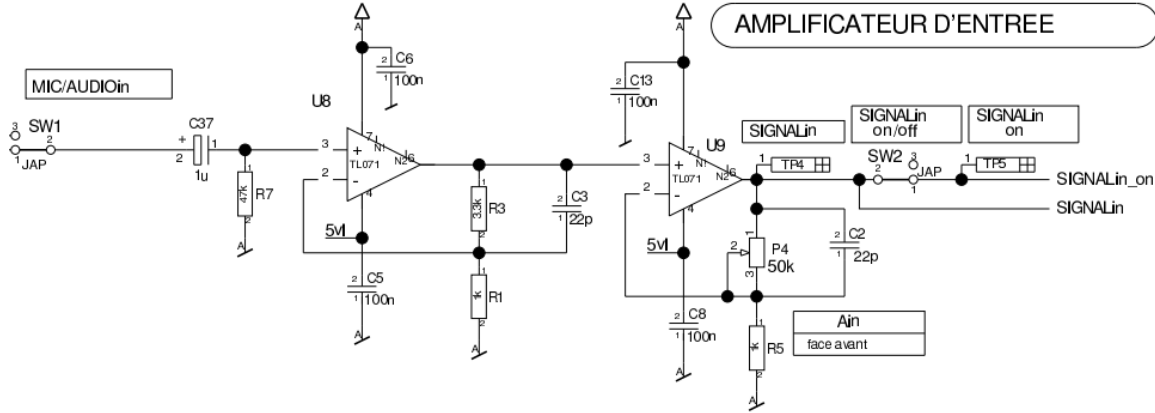
$$retard = \frac{32768}{32000} = 1.024s$$

En acceptant que le son se propage à la vitesse de $340\frac{m}{s}$, et que celui-ci doit faire l'aller-retour entre sa source et un mur contre lequel il serait réfléchi, ceci correspond à une distance de :

$$\frac{340 \cdot 1.024}{2} = 174m.$$

4.1.4 Calcul du gain de l'ampli d'entrée

Le schéma est le suivant :



Dans la bande passante, on néglige les pertes dues aux diviseur $C37$ et $R7$, car la fréquence de coupure vaut : $f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 47 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}} = 3.39Hz \ll 20Hz$

De même, les capacités $C2$ et $C3$ peuvent être négligées et considérées comme des circuits ouverts. En effet, au maximum de la bande passante (à 15 kHz) leur impédance vaut :

$$X_c = \frac{1}{2\pi f \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 22 \cdot 10^{-12}} = 482k\Omega \gg R3, P4$$

Le gain du premier étage est donc de :

$$Au \simeq 1 + \frac{R3}{R1} = 4.3$$

Et le gain du second étage :

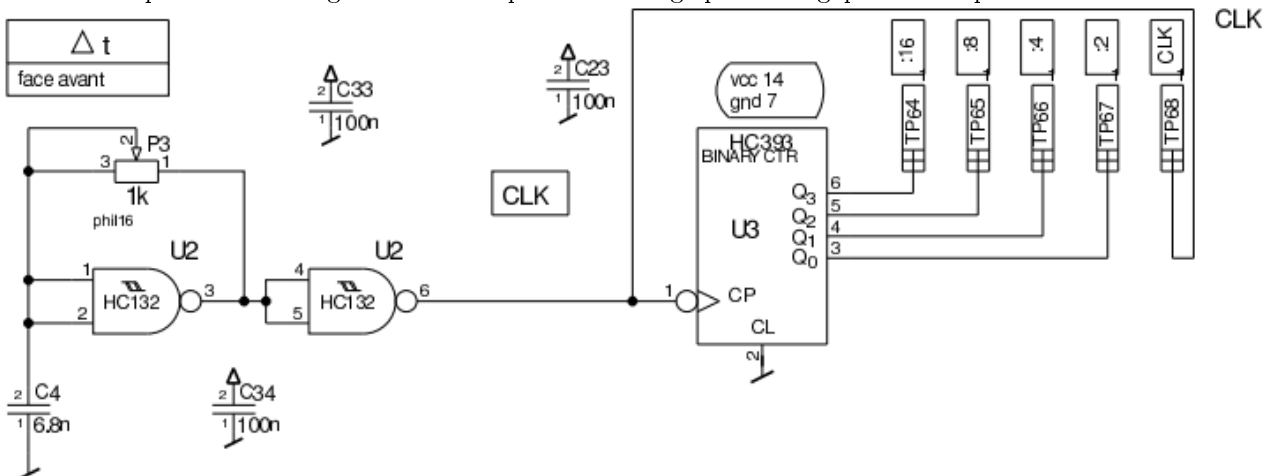
$$Au \simeq 1 + \frac{P4}{R5} = \begin{cases} 1 & \text{si } P4 = 0 \text{ (minimum)} \\ 51 & \text{si } P4 = 50k\Omega \text{ (maximum)} \end{cases}$$

D'où :

$$\begin{aligned} Au_{min} &= 4.3 \cdot 1 = 4.3 = 12.7 \text{ dB} \\ Au_{max} &= 4.3 \cdot 51 = 220 = 46.8 \text{ dB} \end{aligned}$$

4.1.5 Séquenceur

Le rôle du séquenceur est de générer une fréquence d'horloge pour la logique numérique.



L'oscillateur est une simple cellule RC avec un inverseur à hystérèse.

D'après la notice du composant 74HC132, la fréquence d'oscillation quand elle est réglée au minimum (P3 réglé au maximum) est de :

$$f_{min} \simeq \frac{1}{0.8 \cdot R \cdot C} = \frac{1}{0.8 \cdot 10^3 \cdot 6.8 \cdot 10^{-9}} = 184 \text{ kHz}$$

Le maximum est limité par le délai de propagation des transistors internes au circuit (lorsque $P3 = 0$), et est donc plus difficile à déterminer. Une grossière approximation est de prendre le temps de propagation du circuit, en ajoutant le temps de montée et de descente. Les valeurs typiques sont de 20 ns et 7 ns respectivement :

$$f_{max} \simeq \frac{1}{t_{p_{lh}} + t_{p_{hl}} + t_{hl} + t_{lh}} = \frac{1}{2 \cdot (20 + 7) \cdot 10^{-9}} = 18.5 \text{ MHz}$$

P3 permet donc de faire varier librement la fréquence d'oscillation sur deux ordres de grandeur.

Le circuit U3 est un compteur, il permet donc d'avoir une version prédivisée de l'horloge par plusieurs puissances de 2. Dans ce cas, le compteur est sur 4 bits, il permet donc d'avoir un signal prédivisé par 2, 4, 8 et 16.

Nous pouvons choisir lequel de ces prédiviseur est utilisé pour ce circuit ce qui permet de choisir grossièrement une très large bande de fréquences d'échantillonnages, en plus du réglage par P3.

Les deux bascules D de U19 forment un compteur Johnson de longueur 2, qui a 4 états. Le changement d'état se fait au flanc montant de CLK.³

³Voir datasheet du composant 74HC74

4.2 Mesures

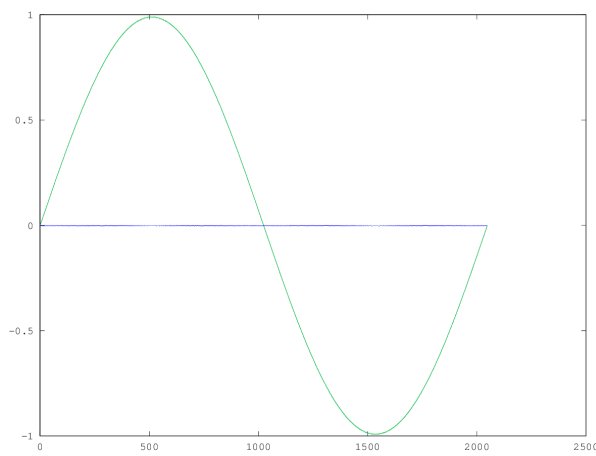
4.2.1 Observation des signaux à l'oscilloscope

4.2.2 Nombre de bits

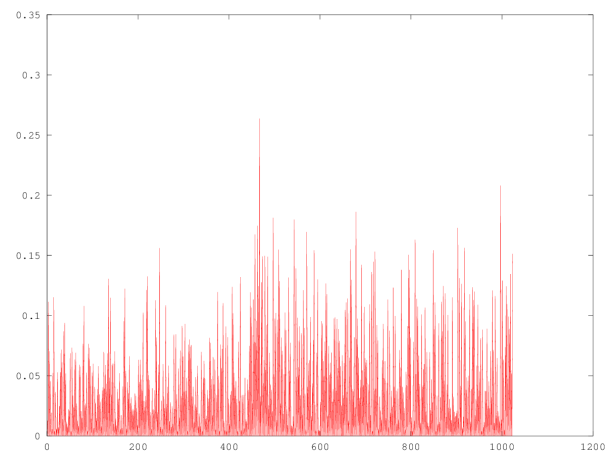
A chaque bit supprimé, le niveau de bruit augmente de 6 dB, car l'amplitude de la différence entre le signal idéal et quantifié (erreur) double lorsqu'on enlève un bit.

Concrètement, lorsqu'il reste très peu de bits, le signal sonne très distordu, car il y a non seulement du bruit mais en plus des harmoniques supplémentaires. En effet l'erreur de quantification peut être approximée comme étant aléatoire lorsqu'il reste suffisamment de bits, ce qui en fait du bruit.

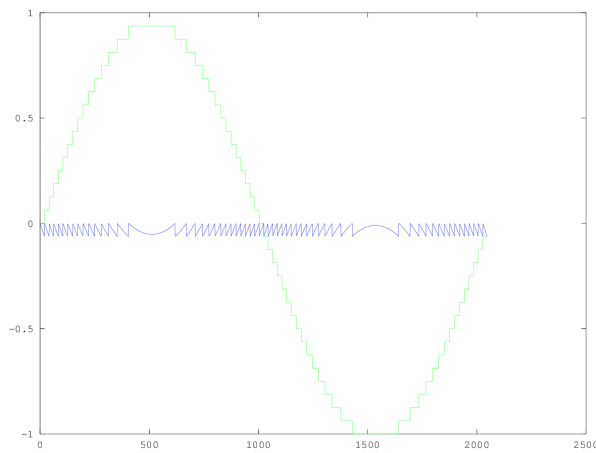
Par contre lorsque qu'il reste très peu de bits, par exemple le cas extrême où on n'a qu'un seul bit, l'erreur de quantification augmente en amplitude et devient moins aléatoire.



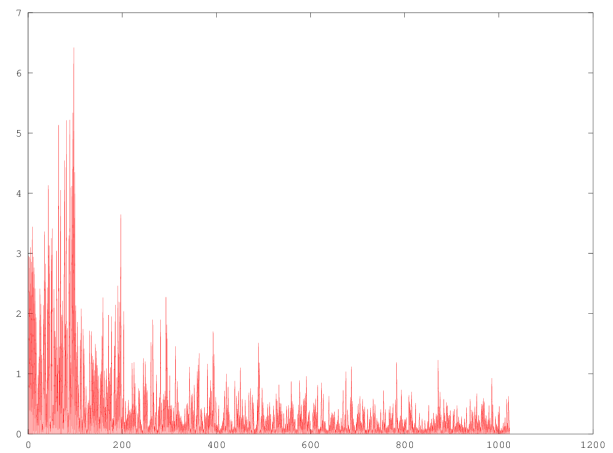
Sinus quantifié sur 8 bits et erreur



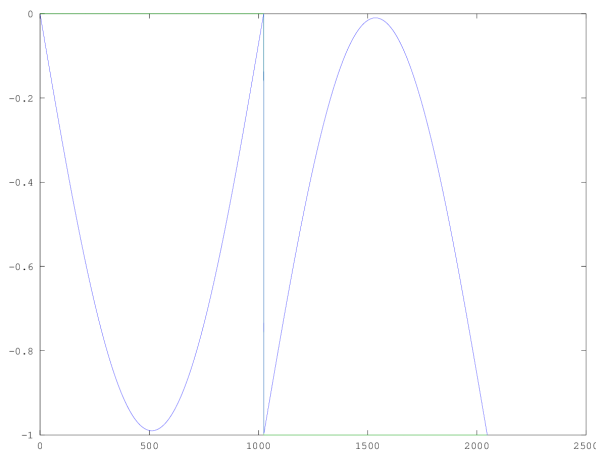
Spectre de l'erreur de quantification



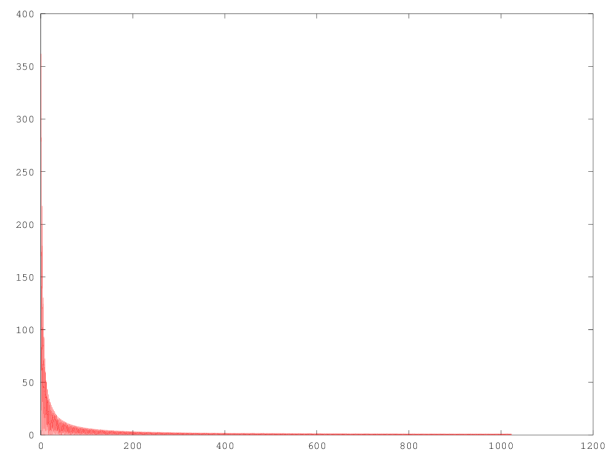
Sinus quantifié sur 4 bits et erreur



Spectre de l'erreur de quantification



Sinus quantifié sur 1 bit et erreur



Spectre de l'erreur de quantification

A noter que l'échelle sur l'axe des ordonnées n'est pas la même sur ces trois graphiques - à fin que ceux-ci soient observables.

Dans le premier cas (8-bits) l'erreur de quantification est répartie sur tout le spectre, et peut être assimilée à du bruit blanc.

Dans le second cas (4-bits), on constate que l'erreur est plus intense en basse fréquence, et peut plus difficilement être assimilée à du bruit blanc.

Dans le dernier cas (1-bit), l'erreur correspond à la différence entre un signal sinus et un signal carré. L'erreur est très intense et très condensée dans les basses fréquences, et en aucun cas assimilable à du bruit blanc.

A noter que le système n'étant pas linéaire, ceci ne peut pas être généralisé de façon théorique à tous les signaux.

Nous avons donc mis en pratique et testé le système avec un micro. Dans le cas de la voix humaine, nous avons constaté qu'il faut au moins 4 bits pour qu'elle soit compréhensible.

4.2.3 Retard et gain de l'écho

Le retard a une influence sur la durée entre deux répétitions de l'écho. Le gain quand à lui a une influence sur l'atténuation entre deux répétitions de l'écho.

Une augmentation du retard ou du gain vont tous deux augmenter le temps que l'écho prend pour être suffisamment atténué pour se fondre dans le bruit, ce qui donne une impression de plus de résonance.

Si l'on désire plus de résonance, une augmentation du gain fait tendre la chambre d'écho vers l'instabilité et augmente les variations de la réponse en fréquence, il est donc en général préférable d'augmenter le retard si la mémoire le permet.

4.3 Avantages et inconvénients des techniques

Si la taille de la mémoire est fixe, l'avantage est que le contrôle des lignes d'adresses de la mémoire s'en trouvera simplifié : Un simple compteur ou décompteur modulo 2^n fera l'affaire (c'est exactement ce qu'on a là avec les circuits U1 et U18).

En revanche, il sera nécessaire d'avoir un circuit qui permet de faire varier la fréquence d'horloge pour l'échantillonnage. L'implémentation comme réalisée dans le séquenceur de ce montage convient parfaitement, mais ne permet pas un réglage précis de la fréquence d'échantillonnage. Si de la précision est requise, un oscillateur à quartz s'imposerait et il serait impossible de faire varier la fréquence de celui-ci. Il faudrait alors utiliser une PLL pour faire librement varier la fréquence ce qui est cher et compliqué à mettre en oeuvre.

Si l'on change la longueur de l'écho durant le fonctionnement du circuit, l'ancien contenu de la mémoire sera déformé par le changement de fréquence d'échantillonnage, ce qui peut être indésirable.

Dans le cas d'une fréquence d'échantillonnage est fixe, cela simplifiera la génération de l'horloge, et celle-ci pourrait être fabriquée de manière très précise à partir d'un quartz.

Mais le contrôle des lignes d'adresses sera alors plus compliqué, il faut un décompteur qui recharge une variable lorsqu'il atteint la valeur zéro, la variable déterminant la longueur entre deux répétitions de l'écho.

Le changement de la longueur de l'écho pendant l'utilisation n'a pas d'effet néfaste, il faut juste attendre que le compteur d'adresses atteigne la valeur '0' pour que le changement soit effectif. Aucun son déformé n'apparaît à la sortie.

En conclusion, le choix de l'une ou de l'autre technique dépendra donc si on préfère mettre la complexité du circuit du côté analogique (génération d'une fréquence d'échantillonnage variable) ou du côté numérique (gestion des lignes d'adresses de la mémoire).