

# LES CONVERTISSEURS ANALOGIQUE-NUMÉRIQUE

## Choisir entre vitesse et résolution

### La famille "haute vitesse"

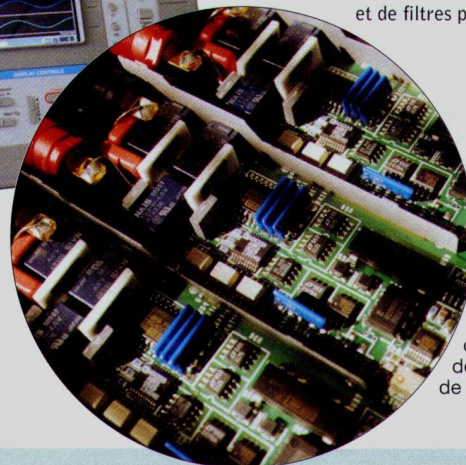
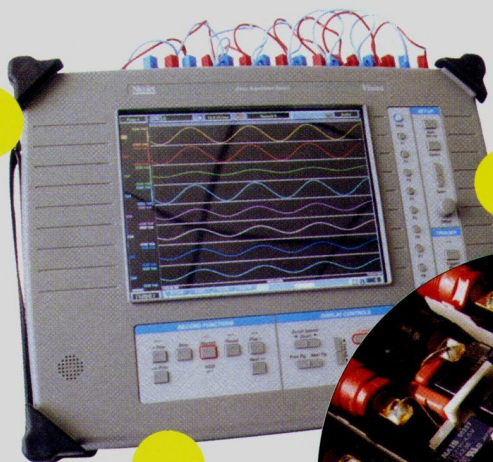
Vitesse/résolution : 200 millions d'échantillons par seconde/12 bits  
Architecture : "pipeline"  
Application type : télécommunications  
Tendance : positionnement de plus en plus proche de l'antenne

### La famille "haute résolution"

Vitesse/résolution : 1 000 échantillons par seconde/24 bits  
Architecture : sigma-delta  
Application type : instrumentation  
Tendance : intégration d'amplis et de filtres programmables

### La famille "usage général"

Vitesse/résolution : 0,25 million d'échantillons par seconde/14 bits  
Architecture : approximations successives  
Application type : asservissement  
Tendance : diminution du coût et de la taille du boîtier



Chaque entrée de cet enregistreur numérique de Nicolet est équipée d'un CAN 16 bits pour des mesures de grande dynamique.

## ● L'humble CAN, tiraillé entre des exigences contradictoires de rapidité et de précision, multiplie les architectures.

GUIDE RÉALISÉ PAR JEAN-CHARLES GUÉZEL

**S**i l'électronique est aujourd'hui numérique, pour l'essentiel, les signaux qu'elle est appelée à traiter (sons, images, phénomènes physico-chimiques...) sont de nature continûment variable, autrement dit analogique.

Pour faire le lien entre ces deux univers, il faut mettre en œuvre des composants capables de transformer les informations initiales en grandeurs digérables par les DSP (digital signal processor), les microcontrôleurs et autres micro-

processeurs. Ces composants, ce sont les CAN ou convertisseurs analogique-numérique.

### Une offre très diversifiée

Côté analogique, on rencontre une entrée simple ou différentielle, caractérisée par sa plage de conversion ( $\pm 5V$  par exemple). À la sortie, on trouve un certain nombre de bits. Plus il y en a et plus la dynamique est importante : pour 8 bits, par exemple, on compte 255 niveaux possibles ( $2^8-1$ ). L'offre de produits est immense, à la mesure du rôle joué par ce composant.

Chez Analog Devices, la première société à avoir lancé un CAN totalement intégré sur silicium (en 1978), le catalogue regorge d'au moins deux cents références, chacune sous quatre ou cinq versions différentes. Et tous les ans, ce catalogue s'enrichit d'une bonne vingtaine de produits...

Grosso modo, la plupart des CAN – dont nous n'avons malheureusement pu présenter qu'un très modeste (mais représentatif) échantillon dans notre tableau récapitulatif – peuvent être classifiés en trois familles principales : les convertisseurs rapides, les

### AUTRES CRITÈRES

Prendre en compte aussi...

- **La linéarité différentielle** c'est le supplément d'erreur qui existe entre le bit théorique d'écart entre deux seuils consécutifs et la différence maximale constatée.
- **Le rapport signal/bruit** ainsi que ses variantes : SFDR (spurious free dynamic range) et Sinad (signal to noise and distortion ratio).
- **La consommation.**

convertisseurs à haute résolution et... les autres, ni vraiment rapides ni vraiment précis. Mais attention : ceux là, justement, sont bons à presque tout. ●

### AU SOMMAIRE DE CE GUIDE D'ACHAT

● Procédés de conversion  
Cinq architectures ..... P.92

● Applications  
Il vous faut forcément un CAN ..... P.94

● Le tableau des fournisseurs ..... P.96



# Cinq architectures, autant de compromis

● Les CAN les plus rapides sont aussi les moins précis. Inversement, la précision se traduit par une moindre vitesse, les convertisseurs pipeline constituant le meilleur compromis actuel.

L'histoire des convertisseurs analogique-numérique remonte officiellement à 1954. Cette année-là, le fabricant américain Epsco sortait le premier CAN, mis au point par un certain Bernard Gordon. À tubes naturellement. Rien à voir avec les CAN d'aujourd'hui ? À vrai dire, oui et non.

## 1. Convertisseur SAR

Pour l'encombrement, c'est sûr, on peut dire que des progrès ont été accomplis depuis l'invention du circuit intégré. En revanche, l'architecture de conversion retenue à l'époque, de type SAR (registre à approximations successives, en français), est toujours d'actualité.

Le principal atout du SAR, c'est une excellente résolution, jusqu'à au moins 16 bits, en dépit d'une grande simplicité architecturale et d'un coût modeste. Pour convertir une donnée sur  $n$  bits, il n'utilise en effet qu'un seul comparateur, alors que son confrère "flash", par exemple, en comprend  $2^n - 1$ . Très simple au plan matériel, le SAR est basé sur un principe de

fonctionnement (la dichotomie) qui l'est un peu moins, et qui fait d'ailleurs appel à un petit algorithme. Au départ, la tension à mesurer est comparée à une valeur de référence (issue du registre), valeur correspondant à peu près au milieu de l'échelle de mesure analogique. Si le comparateur constate que la tension analogique est au-dessus, le bit de poids fort (MSB), le seul ayant été initialisé à 1, reste à ce niveau. Dans cette hypothèse, le comparateur se réfère, lors de l'étape dichotomique suivante, à une nouvelle valeur située environ aux trois quarts de l'échelle. En binaire, cela correspond au passage à 1 du second bit le plus fort, et au maintien à 1 du premier.

Si, au contraire, l'entrée se situe au-dessous de la première valeur de référence, le bit de poids fort passe à 0, tandis que le deuxième bascule de toute façon à 1. La comparaison suivante se fait alors par rapport au premier quart de l'échelle. La dichotomie se poursuit ainsi de bit en bit,  $n$  fois, jusqu'au dernier (LSB).

On le conçoit aisément, la vitesse

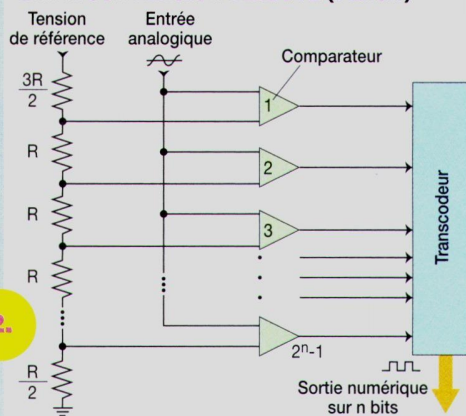
de conversion n'est pas le point fort de l'architecture SAR. Sur 12 bits, elle ne culmine à guère plus d'un million d'échantillons par seconde.

## 2. Convertisseur flash

Dits aussi "à conversion directe", ces convertisseurs codent une tension sur  $n$  bits en la comparant, en permanence, à autant de références de tension qu'il y a de seuils possibles, en l'occurrence  $2^n - 1$ . Ces seuils sont obtenus à partir d'une référence de tension unique et d'un réseau diviseur de précision dont toutes les résistances ont la même valeur ( $R$ ), à l'exception de

la première ( $R/2$ ) et de la dernière ( $3R/2$ ). Dans un cas, il s'agit de rendre l'erreur de conversion symétrique ( $\pm 0,5$  LSB, au lieu de  $+1$  LSB). Dans l'autre, il s'agit tout simplement d'équilibrer le réseau. En bout de chaîne, le travail de traduction binaire de la sortie des comparateurs logiques est confié à un banal transcodeur. Contrairement au SAR, le CAN "flash" n'introduit aucun délai particulier dans le processus de conversion, si ce n'est le temps de basculement des comparateurs, ajouté à celui consacré au transcodage. Très peu de chose en réalité, ce qui explique son extrême

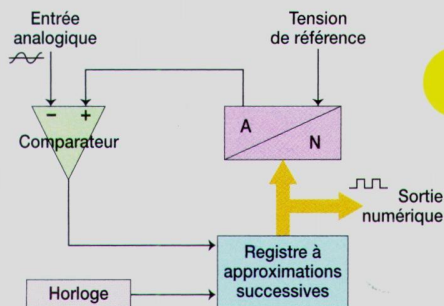
### CAN À CONVERSION DIRECTE (FLASH)



● Pour coder une tension sur  $n$  bits, le convertisseur flash la compare en permanence à  $2^n - 1$  niveaux différents, obtenus à partir d'une référence de tension unique et d'un réseau diviseur de précision.

SOURCE : Maxim

### CAN À APPROXIMATIONS SUCCESSIVES



● Ce convertisseur utilise un seul comparateur, mais utilisé autant de fois à la suite qu'il y a de bits à déterminer. À chaque étape du cycle, la tension d'entrée est comparée à une valeur de référence différente générée par le registre.

SOURCE : Maxim

### LA PALME AU PIPELINE

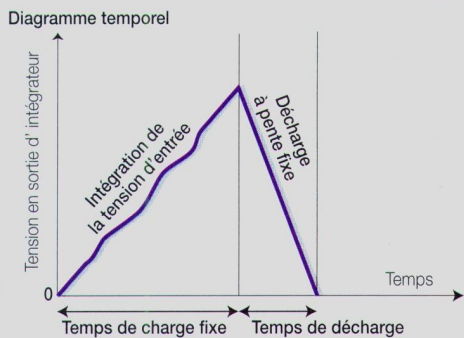
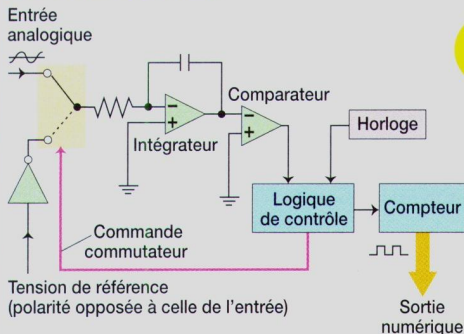
Architecture	Vitesse (sur 5)	Résolution (sur 5)	Total (sur 10)
Pipeline	4	3	7
Flash	5	1	6
Intégration	1	5	6
Sigma-delta	2	4	6
SAR	3	2	5

● S'il ne brille vraiment ni par la vitesse ni par la résolution, le CAN pipeline offre tout de même le meilleur compromis possible entre ces deux paramètres.

SOURCE : Industrie et Technologies



### CAN À INTÉGRATION



Aussi appelé convertisseur à double rampe, ce dispositif intègre la tension d'entrée pendant une durée fixée à l'avance, puis applique une tension de référence pendant le temps nécessaire à la remise à zéro de l'intégrateur. Ce dernier paramètre est mesuré par un compteur.

SOURCE : Maxim

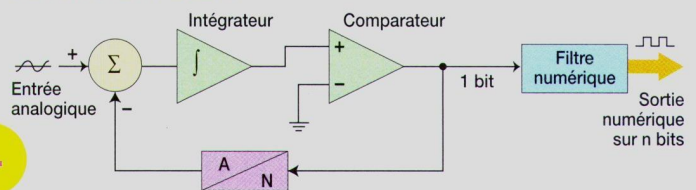
rapidité. En contrepartie, la complexité du système croît de façon exponentielle avec le nombre de bits. À 10, il faut déjà 1023 comparateurs ( $2^{10}-1$ ). Pour la taille, le coût et la consommation du composant, c'est une limite quasi infranchissable aujourd'hui.

### 3. Convertisseur à intégration

Lorsqu'il faut faire mieux, voire beaucoup mieux, les CAN "à intégration" ont assurément leur mot à dire. Dans leur forme la plus simple ("monorampe"), ils opèrent une sorte de pesée en intégrant (au sens mathématique) la valeur à mesurer jusqu'à ce que le résultat de cette intégration atteigne une certaine valeur de référence. À ce stade, un comparateur bascule et il suffit de mesurer le temps écoulé depuis le début de l'intégration pour en déduire la tension d'entrée. Cette mesure est effectuée très simplement, par comptage d'impulsions. C'est donc le nombre maximum d'impulsions qui détermine la

dynamique du convertisseur: pour n bits, il faut pouvoir compter jusqu'à  $2^n-1$ . Cela constitue un sérieux handicap pour la vitesse, mais pas pour la résolution. La précision de la mesure dépend néanmoins de celle de la constante

### LE CAN SIGMA-DELTA



Au lieu de coder directement le signal d'entrée, ce convertisseur, qui est aussi un modulateur, code l'écart entre deux échantillons successifs. La sortie du comparateur représente, sur un bit, l'augmentation ou la diminution de la tension d'entrée.

SOURCE : Maxim

de temps du réseau d'intégration. Pour s'en affranchir, l'astuce consiste à opérer une double pesée de façon à ce que les imprécisions se compensent.

On parle alors de CAN à double rampe.

Plus précise que l'intégration simple, cette méthode est aussi, malheureusement, plus lente. C'est pourquoi les fabricants ont cherché encore autre chose.

### 4. Convertisseur sigma delta

Apparu sur le marché il y a une quinzaine d'années, le CAN "sigma-delta" fait partie de ces "petits nouveaux". Au lieu de numériser directement le signal d'entrée, il se contente de fournir, sur un seul bit, l'écart entre deux échantillons successifs. Dif-

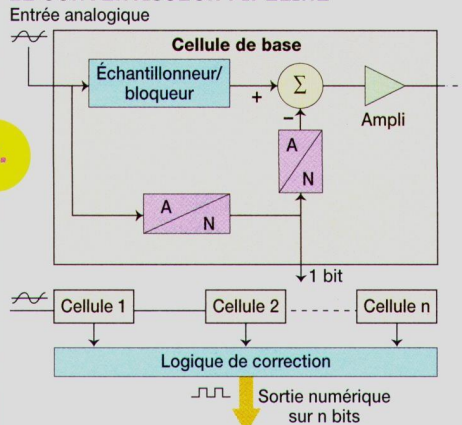
ficile d'imaginer plus simple et moins coûteux. Mais, en accélérant la cadence d'échantillonnage, il est possible d'obtenir des résolutions importantes (16 bits et plus) tout en travaillant à plusieurs kHz, chose impossible avec les rampes.

### 5. Convertisseur pipeline

Autre "petit nouveau", le CAN "pipeline", connu également sous l'appellation de convertisseur "multipasse", est sans doute celui qui offre aujourd'hui le meilleur compromis possible entre la rapidité, la résolution et le coût. L'idée, c'est de segmenter le processus de conversion au moyen de plusieurs blocs identiques (de type "flash" par exemple) mis en cascade. Chaque bloc traite le même nombre p de bits (avec  $p \geq 1$ ), le premier bloc convertissant les bits les plus forts. Une fois cette opération réalisée, la valeur numérique correspondante passe dans un convertisseur numérique-analogique, puis est retranchée de la valeur initiale. On obtient ainsi un reste mathématique (sous forme analogique), lequel est alors amplifié  $2^p$  fois (pour conserver la même échelle de mesure d'un bloc à l'autre), puis converti à son tour sur p bits. Et ainsi de suite jusqu'aux p bits les plus faibles.

Pas aussi rapide que le "flash", le "pipeline" l'est tout de même plus que le SAR, et offre une résolution presque aussi bonne que celle du "sigma-delta". Bien conçu, il peut traiter jusqu'à 200 millions d'échantillons par seconde sur 12 bits.

### LE CONVERTISSEUR PIPELINE



Cette architecture met en œuvre plusieurs blocs identiques mis en cascade. Chaque bloc, de type Flash en général, délivre un ou plusieurs bits. Le premier module convertit le ou les bits les plus forts, le dernier se chargeant du ou des bits les plus faibles.

SOURCE : Industrie et Technologies



# Il vous faut forcément **un CAN!**

- **Accommodable à toutes les sauces, pourvu qu'elles soient numériques, le CAN est aujourd'hui sur toutes les bonnes cartes électroniques.**

**A**u cœur des lecteurs CD et des téléphones, mais aussi dans l'équipement médical, à l'intérieur des régulateurs industriels ou sur le multimètre de l'électricien... : partout où il y a un peu d'électronique, il y a un convertisseur analogique-numérique (CAN).

Dans la mesure, l'acquisition de données et l'asservissement, lorsque la précision prime sur la vitesse, le convertisseur sigma-delta est une valeur sûre, de même que le CAN à approximations successives (SAR).

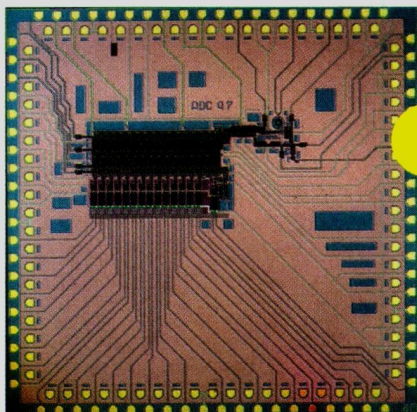
Pour les multimètres, le CAN à intégration, bien que moins populaire qu'autrefois, conserve un intérêt à travers des versions spéciales, dotées de "drivers" d'écrans à LED ou à cristaux liquides.

## Quand la vitesse prime

L'imagerie, quant à elle, requiert avant tout de la puissance d'analyse brute: beaucoup pour l'IRM, auquel cas le "pipeline" est tout indiqué, un peu moins pour l'échographie, qui se contentera d'un SAR. Lorsque les exigences en matière de vitesse sont extrêmes, comme dans le militaire, un "flash" pourra être choisi.

Dans les télécoms, le choix reste ouvert, avec toutefois une préférence de plus en plus marquée pour le "pipeline", du moins quand les contraintes de consommation le permettent. La "bête", en effet, est parfois gourmande. Pour l'audio enfin, le procédé "sigma-delta" est massivement plébiscité (technologie "one bit"). Cela tient non seulement à son coût fort modeste, mais aussi au "noise shaping", c'est-à-dire à sa capacité à repousser le bruit de fond très loin en fréquence, à des hauteurs où il devient très facile à filtrer. ●

## QUATRE CONVERTISSEURS D'EXCEPTION



## 1. LE CAN SUPRACONDUCTEUR

Grâce à l'extrême rapidité de ses liaisons Josephson, ce CAN conçu par Hypres travaillera sur 15 bits à la fréquence de 20 GHz. Il aura pour mission de convertir directement des signaux radio en leur contenu numérique "bande de base" (radio logicielle).



## 2. LE CAN À MÉMOIRE EMBARQUÉE

En offrant la possibilité de stocker des paramètres de calibrage ou de configuration, les 4 Ko de mémoire de l'ADS1218 de Texas Instruments (24 bits en S-D) lui ouvrent de nombreuses portes dans le contrôle industriel, l'instrumentation portable et la mesure en général.



### 3. LE CAN ÉCONOME

Avec une consommation de seulement 39 mW à 60 millions d'échantillons par seconde, l'ADC08L060, se classe parmi les tous meilleurs sur 8 bits. C'est un bon choix pour les équipements portables (caméscopes, téléphones...).

#### 4. LE CAN DE COURSE

Si les vitesses élevées sont en général synonymes de faible résolution, ce n'est pas le cas de l'AD9430 d'Analog Devices, dont l'architecture "pipeline" le propulse à 210 millions d'échantillons/s sur 12 bits.

Conçu en vue de l'arrivée de la prochaine génération d'équipements télécoms, il convient aussi à l'imagerie médicale.





# LES CONVERTISSEURS ANALOGIQUE-NUMERIQUE

FABRICANT	RÉFÉRENCE	RÉSOLUTION (bits)	ARCHITECTURE	VITESSE (échantillons./s)	LINÉARITÉ DIFF.(±LSB)	SIGNAL / BRUIT (dB)
ANALOG DEVICES	AD781x/2x	8 à 10	SAR	0,1 à 2 Még.	0,5 à 1	-
	AD920x/1x/2x/3x	10	Pipeline	20 à 105 Még.	-	-
	AD747x/9x	10 à 12	SAR	0,1 à 3 Még.	0,5 à 1,5	83 (SFDR)
	AD786x	11 à 14	SAR	0,25 Még.	1	-
	AD94xx	12	Pipeline	80 à 210 Még.	-	-
	AD6640/44/45	12 à 14	Pipeline	40 à 80 Még.	-	-
	AD785x	12 à 14	SAR	0,2 Még.	1	87 (SFDR)
	AD788x/9x	12 à 14	SAR	0,1 à 0,5 Még.	-	-
	AD924x	12 à 14	Pipeline	1,5 à 105 Még.	-	-
	AD766x/7x	16	-	0,1 à 3 Még.	1 à 3	100 (SFDR)
	AD77xx	16 à 24	Sigma-delta	20 à 1,2	10 ppm	-
INTERSIL	HI2303	8	Flash	50 Még.	-	-
	HI5662/67-6	8	Flash	60 Még.	-	48 à 10 MHz (SINAD)
	HI5762/67-2	10	Flash	60/20 Még.	-	56 à 10 MHz (SINAD)
LINEAR TECHNOLOGY	LTC1851	12	SAR	1,5 Még.	1	-
	LTC1861	12	SAR	0,25 Még.	1	-
	LTC1744	14	Pipeline	50 Még.	1,5	92 à 5 MHz (SFDR)
	LTC1865	16	SAR	0,25 Még.	2	-
	LTC2431	20	Sigma-delta	100	1	-
	LTC2401	24	Sigma-delta	7,5	1	-
	LTC2410	24	Sigma-delta	7,5	1	-
MAXIM INTEGRATED PRODUCTS	LTC2418	24	Sigma-delta	7,5	1	-
	ICL7106/7107	3 1/2 digits	Intégration	-	-	15 microvolts crête-
	MAX105	6	Flash	800 Még.	1	45 à 200 MHz (SFDR)
	MAX108	8	Flash	1500 Még.	0,25	45 à 1500 MHz (SFD
	MAX1238	12	SAR	0,1 Még.	1	78 (SFDR)
	MAX1298	12	SAR	1000	1	-
	MAX1420	12	Pipeline	60 Még.	0,5	72 à 15 MHz (SFDR)
	MAX1132	16	SAR	0,2 Még.	1,5	96 (SFDR)
	MAX1460	16	SAR	15	2	-
NATIONAL SEMICONDUCTOR	MAX1400	18	Sigma-delta	60	4	-
	ADC0816	8	SAR	10000	0,5	-
	ADC8L060	8	Semi-flash	60 Még.	0,25	59 (SFDR)
	ADC1175	8	Semi-flash	50,2 Még.	0,35	58 (SFDR)
	ADC8200	8	Semi-flash	200 Még.	0,4	60 (SFDR)
	ADC10D040	10	Semi-flash	40 Még.	0,35	72 (SFDR)
	ADC12L066	12	Pipeline	66 Még.	0,4	80 (SFDR)
	ADC14061	14	pipeline	2,5 Még.	0,3	90 (SFDR)
STMICROELECTRONICS	ADC16061	16	Pipeline	2,5 Még.	1	91 (SFDR)
	TSA0801	8	Pipeline	40 Még.	0,5	68 à 10 MHz (SFDR)
	TSA1001	10	Pipeline	25 Még.	0,3	80 à 5 MHz (SFDR)
	TSA1002	10	Pipeline	50 Még.	0,2	79 à 5 MHz (SFDR)
	TSA1201	12	Pipeline	50 Még.	0,6	77 à 15 MHz (SFDR)
	TSA1203	12	Pipeline	40 Még.	0,5	68 à 10 MHz (SFDR)
TEXAS INSTRUMENTS	TSA1204	12	Pipeline	20 Még.	0,4	81 à 10 MHz (SFDR)
	ADS5120	10	-	40 Még.	-	57 (S/B)
	ADS5422	14	-	62 Még.	0,5	85 (SFDR)
	ADS1100	16	Sigma-delta	8	-	-
	ADS8322	16	SAR	0,5 Még.	-	86 dB (SINAD)
	ADS8364	16	-	0,25 Még.	1,5	-
WOLFSON	ADS1218	24	Sigma-delta	1000	15 ppm	-
	WM8200	10	-	40 Még.	0,3	-
	WM8738	24	-	96000	-	101 à 48 kHz (S/B)