

2E200 : Electronique Numérique, Combinatoire et Séquentielle

Bertrand Granado

LIP6 / Sorbonne Université / Faculté des Sciences
Contact : Bertrand.Granado@sorbonne-universite.fr

April 1, 2019



Plan

- 1 Interface avec l'environnement continu : Conversion Analogique vers Numérique et Numérique vers Analogique

Plan

- 1 Interface avec l'environnement continu : Conversion Analogique vers Numérique et Numérique vers Analogique
 - Conversion Analogique - Numérique
 - Conversion Numérique - Analogique

Plan

- 1 Interface avec l'environnement continu : Conversion Analogique vers Numérique et Numérique vers Analogique
 - Conversion Analogique - Numérique
 - Conversion Numérique - Analogique

Communication

- Le monde numérique est un monde discrétisé

Communication

- Le monde numérique est un monde discrétisé
- Le monde réel est un monde continu

Communication

- Le monde numérique est un monde discrétisé
- Le monde réel est un monde continu
- Le monde n'est pas numérique

Communication

- Le monde numérique est un monde discrétisé
- Le monde réel est un monde continu
- Le monde n'est pas numérique
- Comment Interfacer les 2 mondes ?

Communication

- Le monde numérique est un monde discrétisé
- Le monde réel est un monde continu
- Le monde n'est pas numérique
- Comment Interfacer les 2 mondes ?
- A travers des Capteurs

Communication

- Capteur = Fonction de conversion du *Monde* en grandeur électrique

Communication

- Capteur = Fonction de conversion du *Monde* en grandeur électrique
- Capteur renvoie une Valeur Analogique

Communication

- Capteur = Fonction de conversion du *Monde* en grandeur électrique
- Capteur renvoie une Valeur Analogique
- Nécessité d'une fonction de conversion Analogique - Numérique

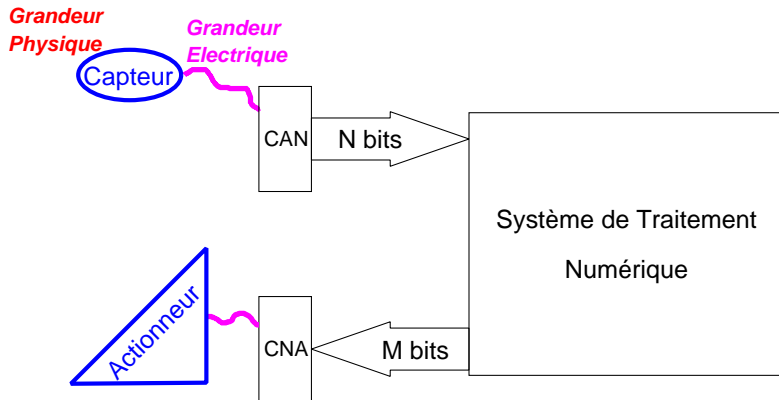
Communication

- Capteur = Fonction de conversion du *Monde* en grandeur électrique
- Capteur renvoie une Valeur Analogique
- Nécessité d'une fonction de conversion Analogique - Numérique
- Conversion Analogique Numérique : CAN

Communication

- Capteur = Fonction de conversion du *Monde* en grandeur électrique
- Capteur renvoie une Valeur Analogique
- Nécessité d'une fonction de conversion Analogique - Numérique
- Conversion Analogique Numérique : CAN
- Conversion Numérique Analogique : CNA

Communication



CAN : Définitions

La conversion analogique numérique consiste à transformer une grandeur électrique représentée par un signal en une grandeur numérique exprimée sur N bits après **échantillonnage** et **quantification** du signal. Cette valeur est une valeur **codée** représentant un nombre proportionnel à la grandeur électrique.

CAN : Définitions

- Echantillonnage : prise périodique de valeur du signal, attention à Shannon
 $F_e > 2 * F_{signal}$

CAN : Définitions

- Echantillonnage : prise périodique de valeur du signal, attention à Shannon
 $F_e > 2 * F_{signal}$
- Quantification : association d'une mesure à la valeur échantillonnée, c'est une fonction de mémorisation.

CAN : Définitions

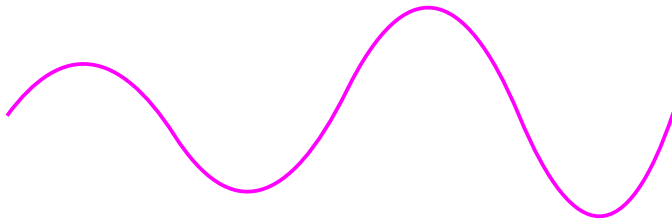
- Echantillonnage : prise périodique de valeur du signal, attention à Shannon
 $F_e > 2 * F_{signal}$
- Quantification : association d'une mesure à la valeur échantillonnée, c'est une fonction de mémorisation.
- Pour le traitement Echantillonnage/Quantification on parle aussi d'échantillonnage-blocage ou d'échantillonnage-mémorisation.

CAN : Définitions

- Echantillonnage : prise périodique de valeur du signal, attention à Shannon
 $F_e > 2 * F_{signal}$
- Quantification : association d'une mesure à la valeur échantillonnée, c'est une fonction de mémorisation.
- Pour le traitement Echantillonnage/Quantification on parle aussi d'échantillonnage-blocage ou d'échantillonnage-mémorisation.
- Codage : représentation de la valeur quantifiée dans un alphabet interprétable par un circuit numérique

CAN : Définitions

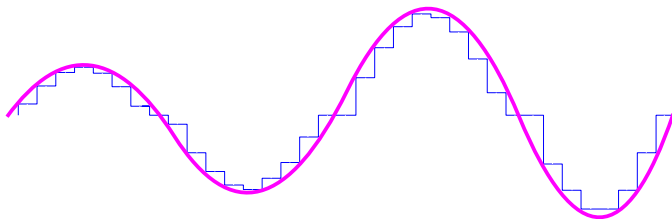
Signal continu



CAN : Définitions

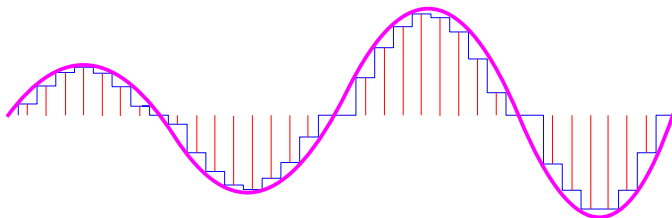
Signal continu

Signal échantillonné



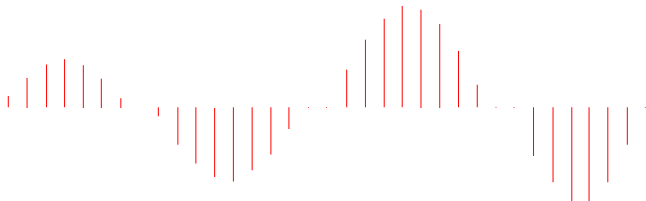
CAN : Définitions

Signal continu
Signal échantillonné
Signal quantifié



CAN : Définitions

Signal quantifié



CAN : Caractéristiques

- Résolution : Amplitude de la plus petite variation. Correspond au LSB (Least Significant Bit)

CAN : Caractéristiques

- Résolution : Amplitude de la plus petite variation. Correspond au LSB (Least Significant Bit)
- Temps de conversion : Temps de stabilisation de la donnée en sortie

CAN : Caractéristiques

- Résolution : Amplitude de la plus petite variation. Correspond au LSB (Least Significant Bit)
- Temps de conversion : Temps de stabilisation de la donnée en sortie
- Erreur de Quantification : Incertitude du à la conversion

CAN : Caractéristiques

- Résolution : Amplitude de la plus petite variation. Correspond au LSB (Least Significant Bit)
- Temps de conversion : Temps de stabilisation de la donnée en sortie
- Erreur de Quantification : Incertitude du à la conversion
- Pleine Echelle : Etendue de la grandeur Analogique d'entrée

CAN : Types

- Il existe différents type de conversion

CAN : Types

- Il existe différents types de conversion
- La conversion à rampe

CAN : Types

- Il existe différents types de conversion
- La conversion à rampe
- La conversion à approximation successive

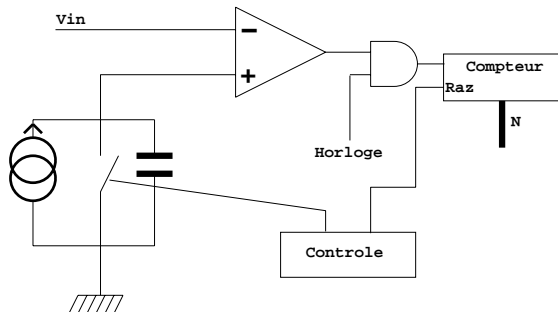
CAN : Types

- Il existe différents types de conversion
- La conversion à rampe
- La conversion à approximation successive
- La conversion Flash

CAN : Types

- Il existe différents types de conversion
- La conversion à rampe
- La conversion à approximation successive
- La conversion Flash
- La conversion Sigma-Delta

La conversion à rampe



La conversion à rampe

- Phase 1 : V_C , tension aux bornes de C mis à 0 ainsi que N

La conversion à rampe

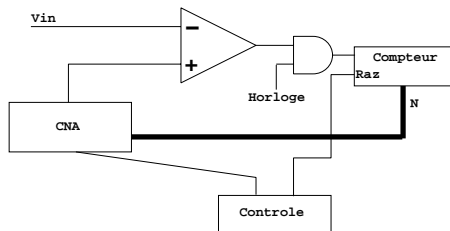
- Phase 1 : V_c , tension aux bornes de C mis à 0 ainsi que N
- Phase 2 : Intégration aux bornes de C , $V_c = \frac{1}{C} \sum I dt = \frac{I}{C} t$ tant que $V_{in} > V_c$ le compteur est incrémenté

La conversion à rampe

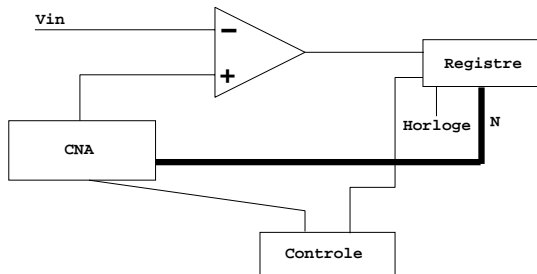
- Phase 1 : V_c , tension aux bornes de C mis à 0 ainsi que N
- Phase 2 : Intégration aux bornes de C , $V_c = \frac{1}{C} \sum I dt = \frac{I}{C} t$ tant que $V_{in} > V_c$ le compteur est incrémenté
- $V_{in} = V_c$ le comparateur passe de 1 à 0 et bloque le compteur sur la valeur N correspondant au nombre binaire recherché

La conversion à rampe numérique

Utilisation d'un CNA pour générer une rampe numérique.



La conversion à approximations successives



La conversion à approximations successives

- Détermination des valeurs de bits de N les unes après les autres en commençant par le bit de poids fort

La conversion à approximations successives

- Détermination des valeurs de bits de N les unes après les autres en commençant par le bit de poids fort
- On fixe le bit de poids fort à 1 et les autres à 0. Conversion NA du registre et comparaison à V_{in}

La conversion à approximations successives

- Détermination des valeurs de bits de N les unes après les autres en commençant par le bit de poids fort
- On fixe le bit de poids fort à 1 et les autres à 0. Conversion NA du registre et comparaison à V_{in}
- Si V_{in} est plus grand alors le bit reste à 1 sinon il passe à 0.

La conversion à approximations successives

- Détermination des valeurs de bits de N les uns après les autres en commençant par le bit de poids fort
- On fixe le bit de poids fort à 1 et les autres à 0. Conversion NA du registre et comparaison à V_{in}
- Si V_{in} est plus grand alors le bit reste à 1 sinon il passe à 0.
- On garde la valeur du bit de poids fort et on passe au bit suivant

La conversion à approximations successives

- Détermination des valeurs de bits de N les uns après les autres en commençant par le bit de poids fort
- On fixe le bit de poids fort à 1 et les autres à 0. Conversion NA du registre et comparaison à V_{in}
- Si V_{in} est plus grand alors le bit reste à 1 sinon il passe à 0.
- On garde la valeur du bit de poids fort et on passe au bit suivant
- On répète le même traitement que précédemment pour ce bit et ainsi de suite jusqu'au bit de poids faible.

La conversion à approximations successives

- Exemple : Convertisseur 8 bits, $V_{ref}=10\text{ V}$

La conversion à approximations successives

- Exemple : Convertisseur 8 bits, $V_{ref}=10\text{ V}$
- Tension à convertir 6,92 V

La conversion à approximations successives

- Exemple : Convertisseur 8 bits, $V_{ref}=10\text{ V}$
- Tension à convertir 6,92 V
- $10000000 = 5\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_7 = 1$

La conversion à approximations successives

- Exemple : Convertisseur 8 bits, $V_{ref}=10\text{ V}$
- Tension à convertir 6,92 V
- $10000000 = 5\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_7 = 1$
- $11000000 = 7,5\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_6 = 0$

La conversion à approximations successives

- Exemple : Convertisseur 8 bits, $V_{ref}=10\text{ V}$
- Tension à convertir 6,92 V
- $10000000 = 5\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_7 = 1$
- $11000000 = 7,5\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_6 = 0$
- $10100000 = 6,25\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_5 = 1$

La conversion à approximations successives

- Exemple : Convertisseur 8 bits, $V_{ref}=10\text{ V}$
- Tension à convertir $6,92\text{ V}$
- $10000000 = 5\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_7 = 1$
- $11000000 = 7,5\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_6 = 0$
- $10100000 = 6,25\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_5 = 1$
- $10110000 = 6,675\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_4 = 1$

La conversion à approximations successives

- Exemple : Convertisseur 8 bits, $V_{ref}=10\text{ V}$
- Tension à convertir $6,92\text{ V}$
- $10000000 = 5\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_7 = 1$
- $11000000 = 7,5\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_6 = 0$
- $10100000 = 6,25\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_5 = 1$
- $10110000 = 6,675\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_4 = 1$
- $10111000 = 7,1875\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_3 = 0$

La conversion à approximations successives

- Exemple : Convertisseur 8 bits, $V_{ref}=10\text{ V}$
- Tension à convertir $6,92\text{ V}$
- $10000000 = 5\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_7 = 1$
- $11000000 = 7,5\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_6 = 0$
- $10100000 = 6,25\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_5 = 1$
- $10110000 = 6,675\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_4 = 1$
- $10111000 = 7,1875\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_3 = 0$
- $10110100 = 7,03125\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_2 = 0$

La conversion à approximations successives

- Exemple : Convertisseur 8 bits, $V_{ref}=10\text{ V}$
- Tension à convertir 6,92 V
- $10000000 = 5\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_7 = 1$
- $11000000 = 7,5\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_6 = 0$
- $10100000 = 6,25\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_5 = 1$
- $10110000 = 6,675\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_4 = 1$
- $10111000 = 7,1875\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_3 = 0$
- $10110100 = 7,03125\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_2 = 0$
- $10110010 = 6,95312\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_1 = 0$

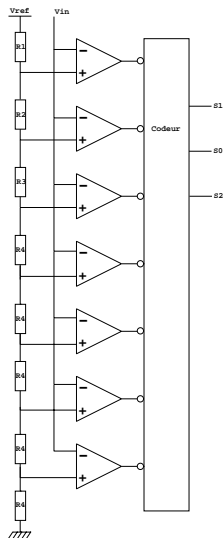
La conversion à approximations successives

- Exemple : Convertisseur 8 bits, $V_{ref}=10\text{ V}$
- Tension à convertir 6,92 V
- $10000000 = 5\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_7 = 1$
- $11000000 = 7,5\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_6 = 0$
- $10100000 = 6,25\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_5 = 1$
- $10110000 = 6,675\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_4 = 1$
- $10111000 = 7,1875\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_3 = 0$
- $10110100 = 7,03125\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_2 = 0$
- $10110010 = 6,95312\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_1 = 0$
- $10110001 = 6,91406\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_0 = 1$

La conversion à approximations successives

- Exemple : Convertisseur 8 bits, $V_{ref}=10\text{ V}$
- Tension à convertir $6,92\text{ V}$
- $10000000 = 5\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_7 = 1$
- $11000000 = 7,5\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_6 = 0$
- $10100000 = 6,25\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_5 = 1$
- $10110000 = 6,675\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_4 = 1$
- $10111000 = 7,1875\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_3 = 0$
- $10110100 = 7,03125\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_2 = 0$
- $10110010 = 6,95312\text{ V} > 6,92 \rightarrow B_1 = 0$
- $10110001 = 6,91406\text{ V} < 6,92 \rightarrow B_0 = 1$
- Valeur Numérique : 10110001

La conversion Flash



La conversion Flash

- Flash = Parallèle

La conversion Flash

- Flash = Parallèle

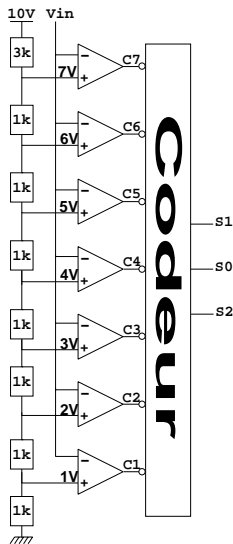
La conversion Flash

- Flash = Parallèle
- Principe : Comparer V_{in} à un ensemble de tensions prédéfinie

La conversion Flash

- Flash = Parallèle
- Principe : Comparer V_{in} à un ensemble de tensions prédéfinie
- Utiliser un codeur pour générer le nombre binaire

La conversion Flash : Exemple

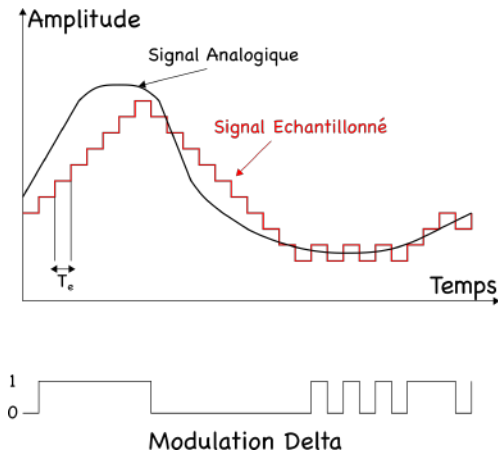


La conversion Flash : Exemple

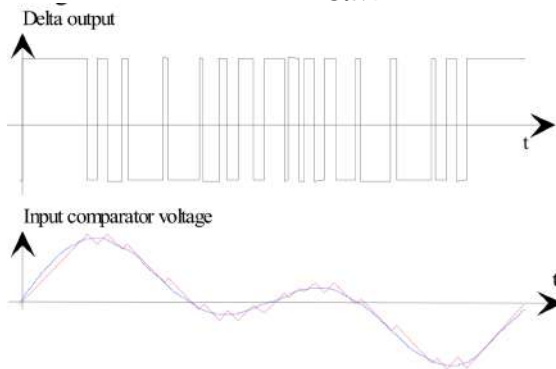
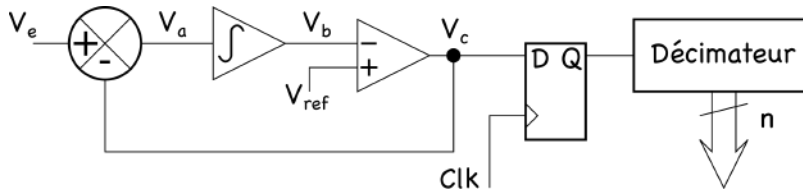
V_{in}	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	S_2	S_1	S_0
< 1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
$> 1, < 2$	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
$> 2, < 3$	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0
$> 3, < 4$	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1
$> 4, < 5$	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
$> 5, < 6$	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1
$> 6, < 7$	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
> 7	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

La conversion Sigma-Delta

- La modulation Delta



La conversion Sigma-Delta



CAN : Comparaison

Type	Vitesse	Consommation	Précision	Taille	Complexité	Bruit
Rampe	—	++	++	+++	+++	++
Appro- -ximation	+++	+++	+	-	+	+
Flash	+++			—		
Sigma-Delta	—	+	+++	+	—	+++

Thèse de Cédric Pastorelli - 15 décembre 2016

Plan

- 1 Interface avec l'environnement continu : Conversion Analogique vers Numérique et Numérique vers Analogique
 - Conversion Analogique - Numérique
 - Conversion Numérique - Analogique

- Il existe différents type de Conversion Numérique Analogique

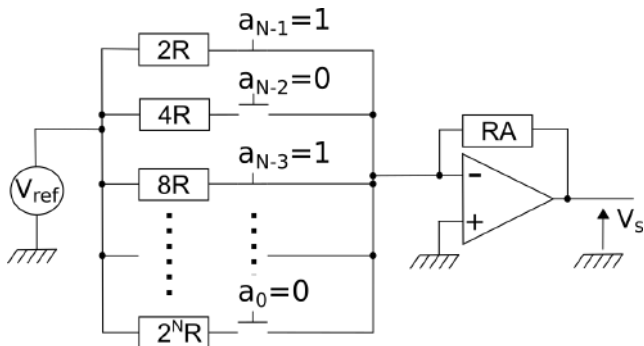
CNA : Types

- Il existe différents type de Conversion Numérique Analogique
- Résistances Poids Proportionnels

CNA : Types

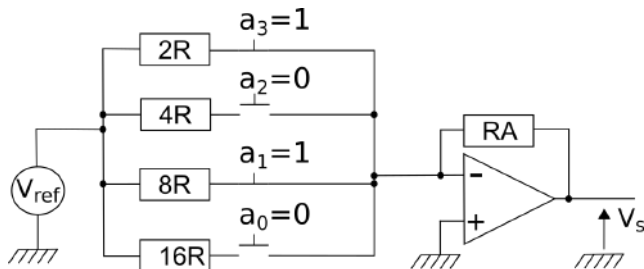
- Il existe différents type de Conversion Numérique Analogique
- Résistances Poids Proportionnels
- Réseau R2R

CNA : Résistances Poids Proportionnels



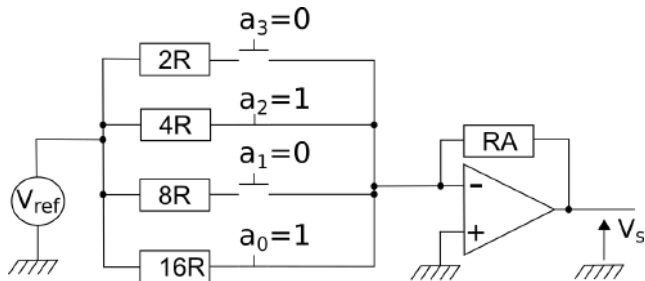
$$V_S = -\left(a_{N-1} * \left(\frac{V_{Ref}}{2R}\right) + a_{N-2} * \left(\frac{V_{Ref}}{4R}\right) + a_{N-3} * \left(\frac{V_{Ref}}{8R}\right) + \dots + a_0 * \left(\frac{V_{Ref}}{2^N R}\right)\right) * RA$$

CNA : Résistances Poids Proportionnels



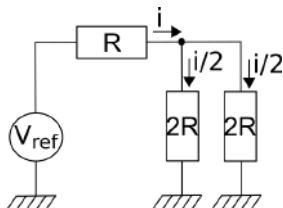
$$V_S = -\left(\left(\frac{V_{Ref}}{2R}\right) + \left(\frac{V_{Ref}}{8R}\right)\right) * RA$$

CNA : Résistances Poids Proportionnels

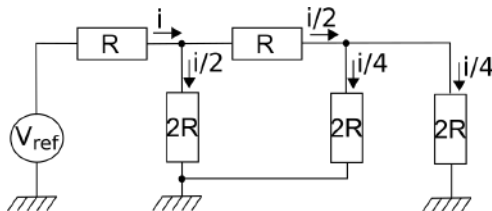


$$V_S = -\left(\left(\frac{V_{Ref}}{4R}\right) + \left(\frac{V_{Ref}}{16R}\right)\right) * RA$$

CNA : Résistances $R/2R$

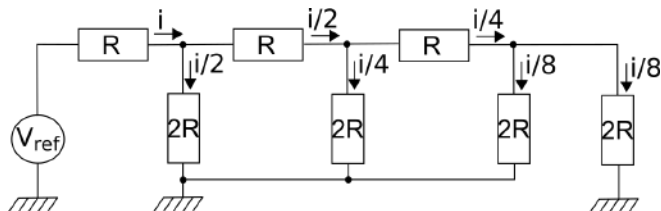


CNA : Résistances R2R

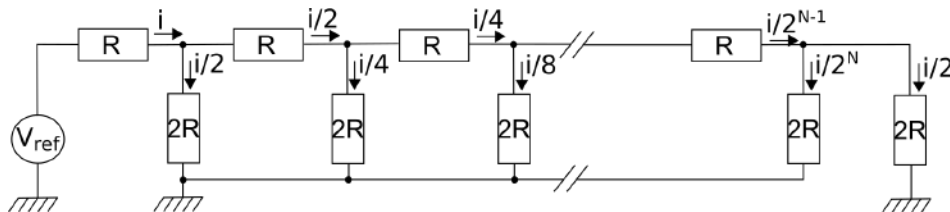


Avec : $R_{eq} = R + \left(\frac{2R \cdot 2R}{2R + 2R} \right) = 2R$

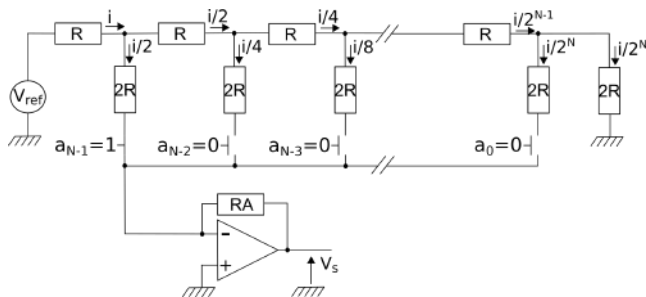
CNA : Résistances R2R



CNA : Résistances R2R



CNA : Résistances R2R



$$V_S = -\left(a_{N-1} * \frac{i}{2} + a_{N-2} * \frac{i}{4} + a_{N-3} * \frac{i}{8} + \dots + a_0 * \frac{i}{2^N}\right) * RA$$

CNA : Comparaison

Type	Vitesse	Erreur	Résolution
Poids Pondérés	Elevée (μs)	Elevée	Faible
R2R	Elevée (μs)	Faible	Elevée