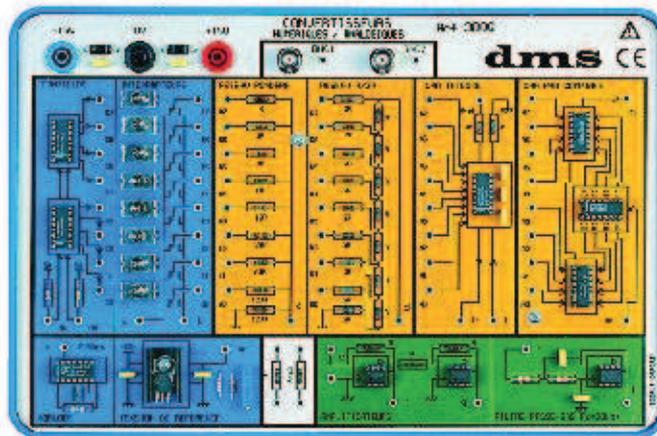


CONVERTISSEURS NUMERIQUE/ANALOGIQUE



EDD038060

Marc DEMONCHY et Robert LE GOFF
Professeurs
L.S.I. Gustave EIFFEL-CACHAN



DIDALAB
5 Rue du Groupe Manoukian
78990 Elancourt
Tel: 01.30.66.08.88 / Fax: 01.30.66.72.20
ge@didalab.fr

1	PRESENTATION.....	5
2	INSTALLATION.....	5
2.1	ALIMENTATION ET MISE SOUS TENSION.....	5
2.2	CABLAGE DES FONCTIONS.....	5
3	APPLICATIONS	6
3.1	ASSERVISSEMENT NUMERIQUE	6
3.2	BANCS TESTS.....	6
4	DESCRIPTION MATERIELLE.....	7
4.1	RESISTANCES.....	7
4.2	BLOC REPRISE.....	7
4.3	HORLOGE	7
4.4	TENSION DE REFERENCE	8
4.5	AMPLIFICATEURS	8
4.6	FILTRE PASSE-BAS.....	9
4.7	COMPTEURS 8 BITS.....	9
4.8	INTERRUPTEURS	10
4.9	RESEAU DE RESISTANCES PONDEREES.....	11
4.10	RESEAU DE RESISTANCES R/2R.....	12
4.11	CNA INTEGRE	13
4.12	CNA PAR COMPTAGE	14
4.13	PLAN DE LA MAQUETTE	15
5	TRAVAUX PRATIQUES	17
5.1	HORLOGE	17
5.2	TENSION DE REFERENCE	17
5.3	AMPLIFICATEURS	18
5.4	FILTRE PASSE-BAS.....	19
5.5	COMPTEURS.....	20
5.6	INTERRUPTEURS	21
5.7	RESEAU DE RESISTANCES PONDEREES.....	22
5.8	RESEAU DE RESISTANCES R/2R.....	23
5.9	CNA INTEGRE	26
5.10	CNA PAR COMPTAGE	27
5.11	CONVERTISSEUR NUMÉRIQUE/ANALOGIQUE PAR RÉSEAU DE RÉSISTANCES PONDÉRÉES.....	28
5.11.1	<i>Préparation</i>	28
5.11.2	<i>Expérimentation.....</i>	30
5.11.2.1	Fonctionnement en régime statique	30
5.11.2.2	Fonctionnement en régime dynamique	33
5.12	CONVERTISSEUR NUMÉRIQUE/ANALOGIQUE PAR RÉSEAU DE RÉSISTANCES R-2R.....	36
5.12.1	<i>Préparation</i>	36
5.12.2	<i>Expérimentation.....</i>	38
5.12.2.1	Fonctionnement en régime statique	38
5.12.2.2	Fonctionnement en régime dynamique	41

5.13	CONVERTISSEUR NUMÉRIQUE/ANALOGIQUE PAR COMPTAGE	44
5.13.1	<i>Fonctionnement en régime statique</i>	44
5.13.2	<i>Fonctionnement en régime dynamique</i>	47
5.14	CONVERTISSEUR NUMÉRIQUE/ANALOGIQUE INTEGRE	50
5.14.1	<i>Préparation</i>	50
5.14.2	<i>Expérimentation</i>	52
5.14.2.1	Fonctionnement en régime statique	52
5.14.2.2	Autre étude en régime statique	54
5.14.2.3	Fonctionnement en régime dynamique	58
6	RAPPELS THEORIQUES	61
6.1	FONCTIONS HYBRIDES	61
6.1.1	<i>REPRÉSENTATION D'UNE GRANDEUR PHYSIQUE</i>	61
6.1.1.1	Représentation analogique	61
6.1.1.2	Représentation numérique	61
6.1.2	<i>SYSTEMES ANALOGIQUES</i>	61
6.1.2.1	Systèmes numériques	62
6.1.2.2	Systèmes hybrides.....	62
6.1.3	<i>CONVERSION NUMERIQUE-ANALOGIQUE (CNA)</i>	63
6.1.3.1	Poids de l'entrée.....	63
6.1.3.2	Résolution	64
6.1.3.3	Code d'entrée DCB.....	65
6.1.4	<i>CONVERSION ANALOGIQUE/NUMERIQUE (CAN)</i>	66
6.1.4.1	Principe de la conversion.....	66
6.1.4.2	Échantillonneur -bloqueur	67
6.1.4.3	Multiplexage	68
6.2	CONVERTISSEURS NUMERIQUE/ANALOGIQUE	69
6.2.1	<i>ECHELLES DE RESISTANCES PONDEREES</i>	69
6.2.2	<i>RÉSEAU R-2R</i>	71
6.2.3	<i>CARACTERISTIQUES D'UN CNA</i>	76
6.2.3.1	Caractéristique de transfert d'un CNA idéal	76
6.2.3.2	Caractéristique de transfert d'un CNA réel	76
6.2.3.3	Précision d'un CNA réel	78
6.2.3.4	Temps de conversion	78
6.3	CONVERTISSEURS ANALOGIQUE / NUMERIQUE.....	79
6.3.1	<i>CONVERTISSEUR SIMPLE RAMPE</i>	79
6.3.2	<i>CONVERTISSEUR DOUBLE RAMPE</i>	82
6.3.3	<i>CONVERSION PAR COMPTAGE</i>	86
6.3.4	<i>CONVERTISSEUR A APPROXIMATIONS SUCCESSIVES</i>	89
6.3.5	<i>COURBE DE CONVERSION D'UN CAN</i>	92
6.4	ACQUISITION ET TRAITEMENT DES SIGNAUX	95
6.4.1	<i>ACQUISITION DES SIGNAUX</i>	95
6.4.1.1	Signal échantillonné	96
6.4.1.2	Reconstitution du signal.....	98
6.4.1.3	Fréquence d'échantillonnage	101
6.4.1.4	Principe de l'échantillonneur-bloqueur	102
6.4.2	<i>STRUCTURE D'UNE CHAÎNE NUMERIQUE</i>	105
6.4.2.1	Système en chaîne ouverte	105
6.4.2.2	Système en chaîne fermée.....	108

1 Présentation

Le convertisseur Numérique/Analogique est un module permettant l'étude d'un C.N.A. avec plusieurs principes fondamentaux : réseau pondéré (R/2R et circuit intégré).

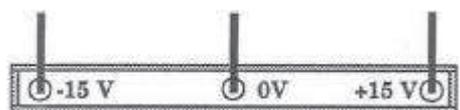
Le module est composé de :

- Compteur/décompteur CMOS 8bits en binaire naturel,
- Horloge 50kHz,
- 8 interrupteurs à contact repos/travail,
- Conversions 8 bits par réseau pondéré et R/2R (résistances de précision),
- CNA intégré industriel,
- CNA par comptage de 8 bits (2 comparateurs 4 bits permettent la conversion d'une valeur numérique par MLI),
- Convertisseur courant-tension et amplificateur inverseur à amplificateur opérationnel,
- Filtre passe bas, filtre du deuxième ordre,
- Tension de référence.

2 Installation

2.1 Alimentation et mise sous tension

Pour alimenter le module, il faut utiliser une alimentation symétrique -15V/+15V minimum 400mA, réf : PMM062170 avec des cordons de 4 mm.



2.2 Câblage des fonctions

Le câblage des différentes fonctions se fait avec des cordons de 2 mm.

3 Applications

A chaque fois qu'il faut transformer le signal de sortie d'un circuit numérique en une tension ou un courant, des convertisseurs numérique-analogique sont utilisés.

3.1 Asservissement numérique

Pour réguler la vitesse de rotation d'un moteur, la température d'un four, pour créer des rampes d'accélération ou de décélération, pour piloter le fonctionnement de thyristors dans certains variateurs de vitesse, ..., les signaux numériques sont élaborés à partir de microprocesseur se trouvant dans des ordinateurs ou des automates programmables. Résistances, thyristors, moteurs, ..., n'étant sensibles qu'à des grandeurs analogiques, des convertisseurs numérique-analogique doivent être utilisés pour convertir les signaux numériques en grandeurs analogiques.

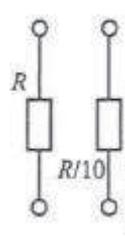
3.2 Bancs tests

Les constructeurs de machines électriques ont des bancs tests d'essais de machines entièrement automatisés. Chaque machine, avant livraison est testée sur ce banc. L'ensemble des essais est programmé sur ordinateur. Les signaux analogiques nécessaires à ces essais proviennent indirectement de l'ordinateur par l'intermédiaire, entre autre, de convertisseurs numérique-analogique. Il en est de mêmes pour les essais automatiques de composants et circuits analogiques comme les diodes, les transistors, les amplificateurs opérationnels,...

4 Description matérielle

4.1 RESISTANCES

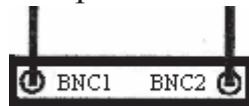
Le bloc "résistances" est schématisé par le montage ci-après :



Le bloc est composé de 2 résistances de R et $R/10$.
 $R=10k\Omega$

4.2 BLOC REPRISE

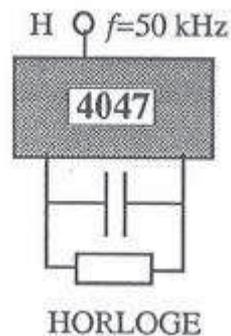
Le bloc "reprise" est schématisé par le montage ci-après :



Le bloc reprise est composé de 2 prises BNC.

4.3 HORLOGE

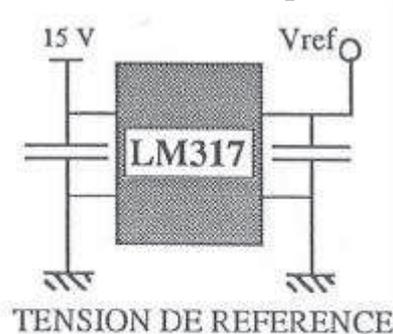
Le circuit de l'horloge est représenté sur le schéma ci-après :



Le circuit est composé d'une résistance de $47k\Omega$ et du circuit CD4047.
 La fréquence du signal d'horloge est de $50kHz$.

4.4 TENSION DE REFERENCE

Le circuit tension de référence est schématisé par le montage ci-après :



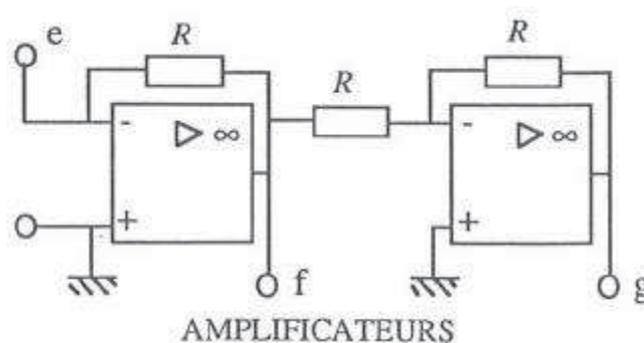
Le circuit est composé de 2 condensateurs de 100nF et du circuit LM317.

Sur la maquette figure, en plus, un potentiomètre de réglage qui permet d'ajuster la tension de référence à un niveau souhaité.

En agissant sur le potentiomètre de réglage, V_{ref} varie de 3,8V à 6,3V.

4.5 AMPLIFICATEURS

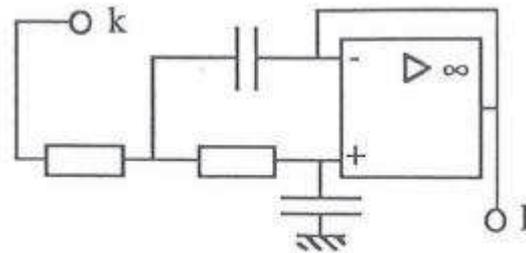
Le bloc "amplificateurs" est schématisé par le montage ci-après :



Le circuit est composé de deux amplificateurs opérationnels TL081 et de trois résistances $R=10k\Omega$.

4.6 FILTRE PASSE-BAS

Le bloc "amplificateurs" est schématisé par le montage ci après :



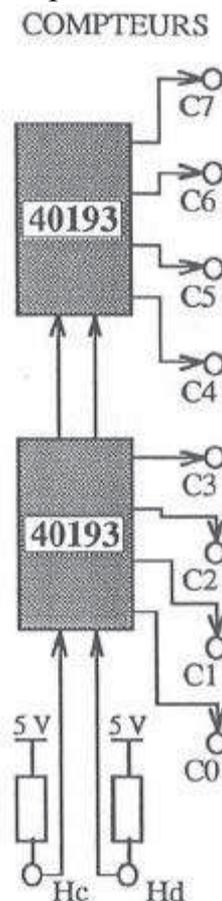
FILTRE PASSE BAS($f_c = 20$ Hz)

Le circuit est composé de deux résistances de 120kO, d'un condensateur de 100nF, d'un autre condensateur de 47nF et d'un amplificateur opérationnel TL081.

La fréquence de coupure de ce filtre passe-bas est de 20Hz.

4.7 COMPTEURS 8 bits

Le bloc "compteurs" est schématisé par le montage ci-après :

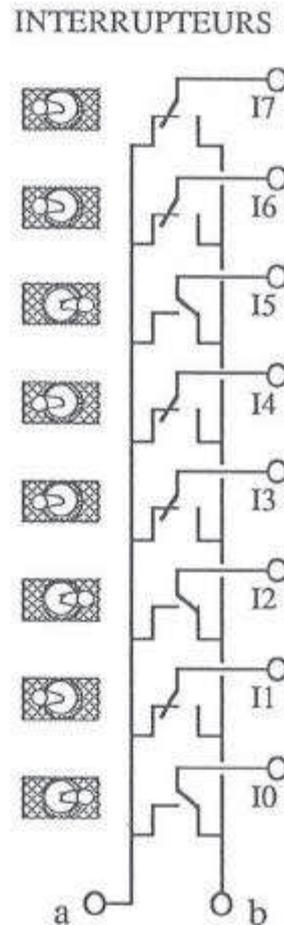


Le circuit est composé de deux compteurs CD40193 de 4 bits et de deux résistances de 10kO.

Hc est une entrée de comptage alors que Hd est une entrée de décomptage.

4.8 INTERRUPTEURS

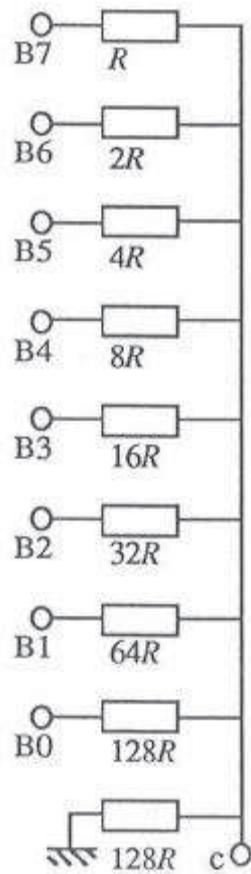
Le bloc "interrupteurs" est représenté sur le schéma ci-après :



Le bloc "interrupteurs" est composé de 8 interrupteurs à contact repos/travail. A un bouton d'un interrupteur positionné à gauche, correspond un état logique "0". S'il est positionné sur la droite, l'état logique correspondant est "1".

4.9 RESEAU DE RESISTANCES PONDEREES

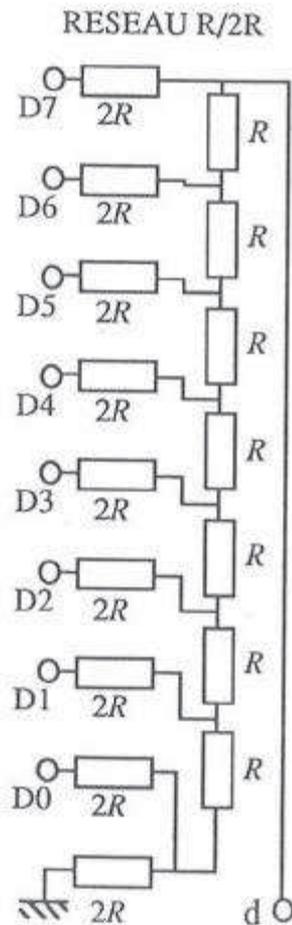
Le circuit correspondant est représenté par le montage ci après :



Le réseau est composé de 9 résistances $R=10k\Omega$ suivant la loi $2^n R$.

4.10 RESEAU DE RESISTANCES R/2R

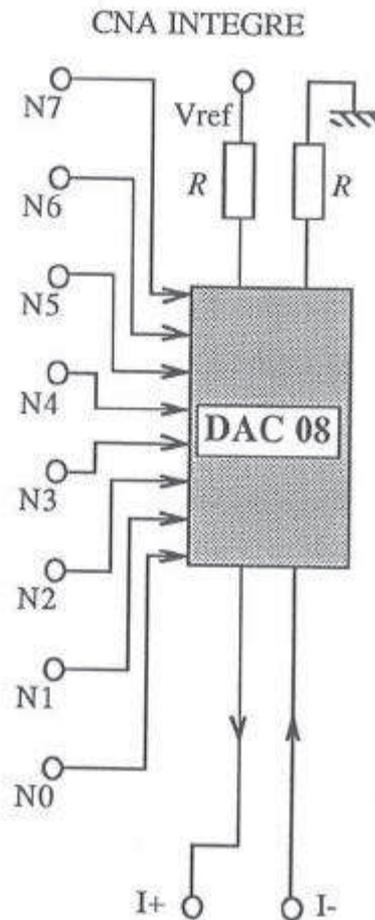
Le circuit correspondant est représenté par le montage ci après :



Le réseau est composé de 9 résistances $2R$ et 7 résistances $R=10k\Omega$.

4.11 CNA INTEGRE

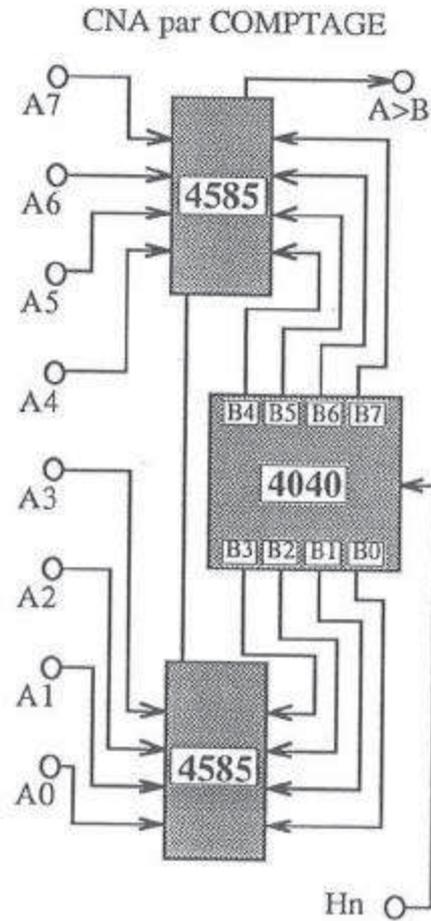
Le circuit correspondant est représenté par le montage ci-après :



Ce circuit est composé de deux résistances $R=10k\Omega$ et d'un CNA intégré industriel (DAC 08).

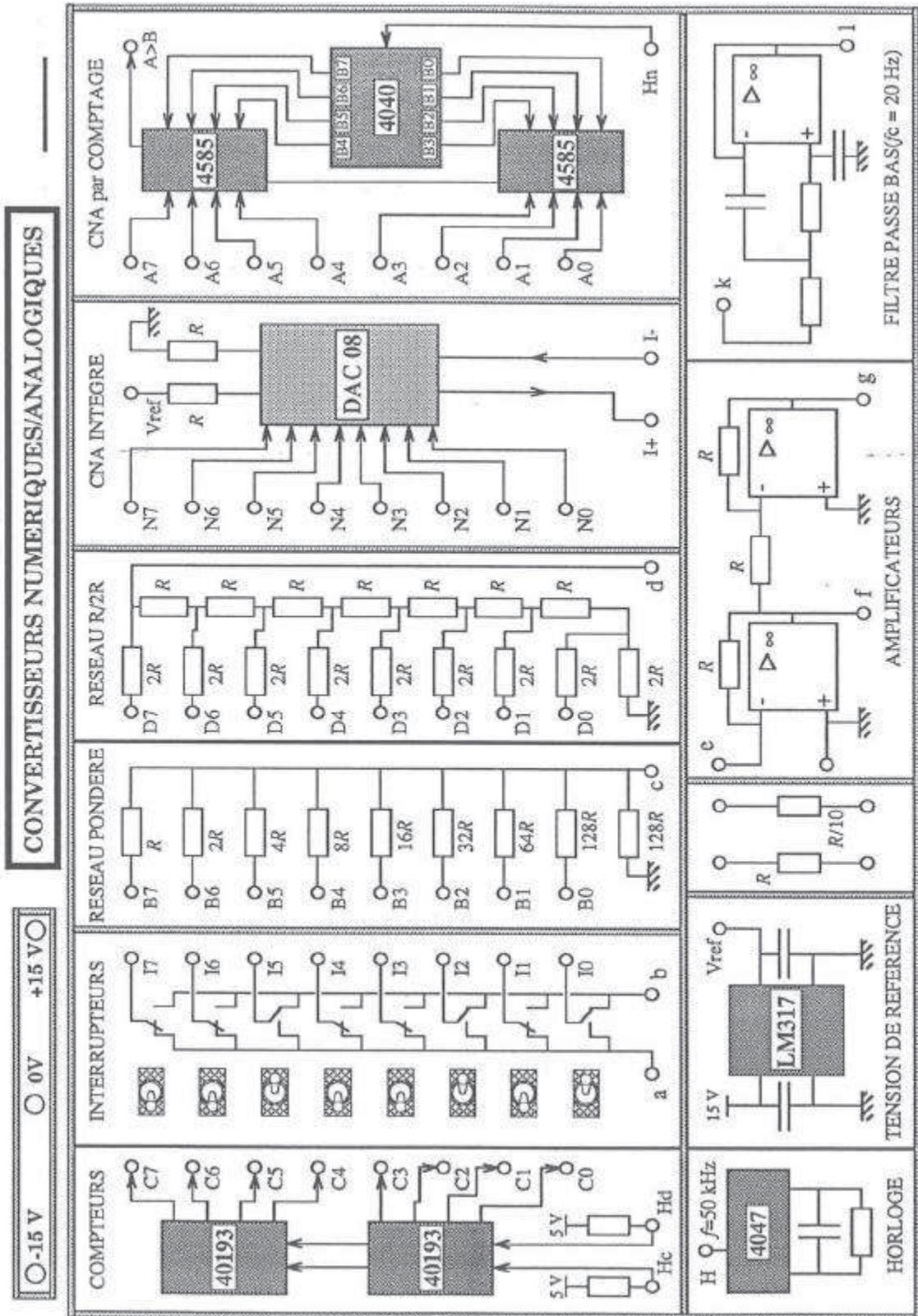
4.12 CNA PAR COMPTAGE

Le circuit correspondant est représenté par le montage ci-après :



Ce circuit est un CNA par comptage 8 bits, il est composé de 2 comparateurs permettant la conversion MLI.

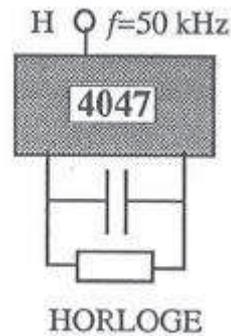
4.13 PLAN DE LA MAQUETTE



5 Travaux pratiques

5.1 HORLOGE

Le circuit de l'horloge est représenté sur le schéma ci-après :

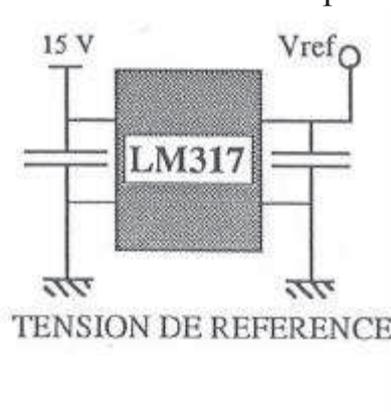


Alimenter la maquette en $\pm 15\text{ V}$.

Vérifier à l'oscilloscope, la forme et la fréquence du signal d'horloge.

5.2 TENSION DE REFERENCE

Le circuit tension de référence est schématisé par le montage ci-après :

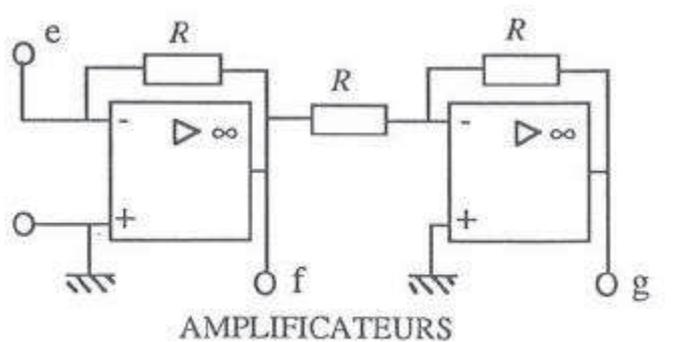


Mesurer la tension disponible à la borne V_{ref} . Agir sur le potentiomètre de réglage. Quelles sont les limites entre lesquelles la tension V_{ref} varie ?

Sachant que les différents convertisseurs seront étudiés sur 8 bits, pourquoi est-il judicieux de régler la tension de référence à $5,12\text{V}$?

5.3 AMPLIFICATEURS

Le bloc "amplificateurs" est schématisé par le montage ci-après :



- Appliquer à l'entrée **e** du montage une tension sinusoïdale d'amplitude 1V et de fréquence 1kHz provenant d'un G.B.F. Visualiser les tensions disponibles aux sorties **f** et **g** du montage.

Quels sont les états des amplificateurs opérationnels ?

- Recommencer la manipulation précédente en intercalant entre le G.B.F. et le montage une résistance de 10kΩ. Donner à cette résistance une valeur de 1kΩ (utilisation du bloc résistances).

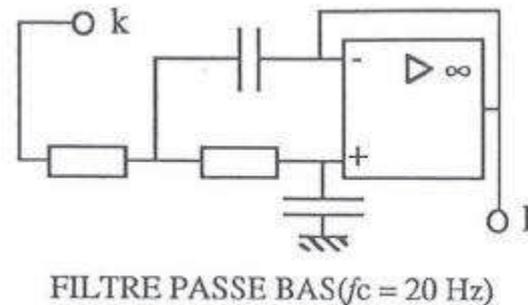
Relever en concordance des temps les oscillogrammes des tensions disponibles en **e**, **f** et **g**.

Modifier la valeur de la résistance. Quelle est son influence sur les tensions de sortie en **f** et **g** ?

Pourquoi peut-on qualifier ce montage d'amplificateur de courant ?

5.4 FILTRE PASSE-BAS

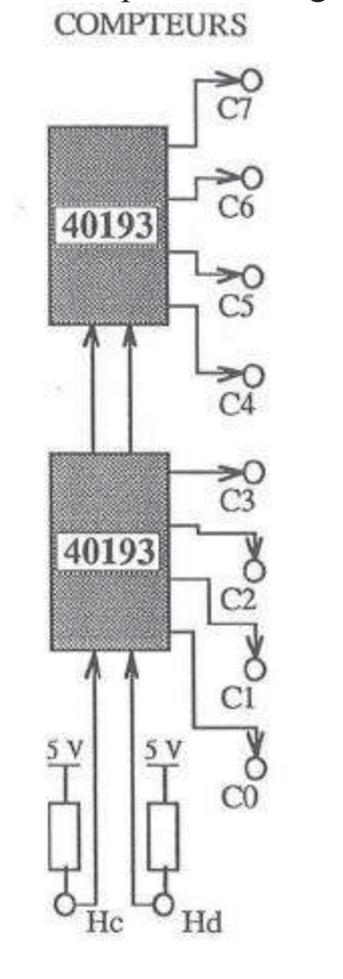
Le bloc "amplificateurs" est schématisé par le montage ci après :



- Appliquer à l'entrée **k** du montage une tension sinusoïdale d'amplitude 2V et, de fréquence 1kHz provenant d'un G.B.F. Visualiser, la tension disponible à la sorties **l**.
Modifier la fréquence de la tension d'entrée (en plus ou en moins). Que devient la tension de sortie pour les basses fréquences ?
- Ajouter à la tension d'entrée une composante continue par l'intermédiaire du décalage d'offset du G.B.F.
Visualiser la tension disponible à la sortie **l** pour différentes fréquences (de 20 Hz à 10kHz par exemple).
- Remplacer la tension sinusoïdale par une tension en créneaux munie d'une composante continue.
Visualiser la tension disponible à la sortie **l** pour différentes fréquences (de 20 Hz à 10kHz par exemple).
- Vérifier que la fréquence de coupure de ce filtre passe-bas est voisine de 20Hz.

5.5 COMPTEURS

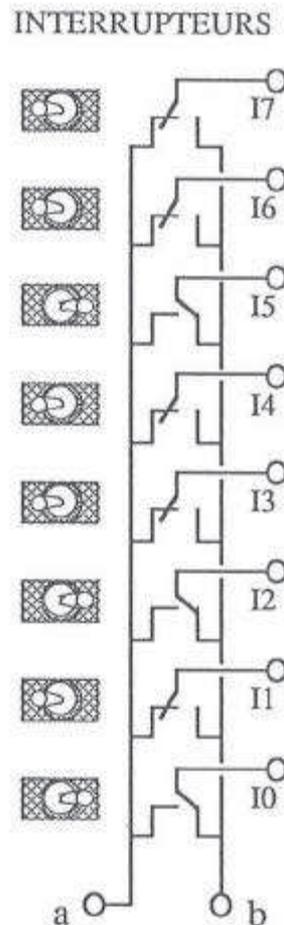
Le bloc "compteurs" est schématisé par le montage ci-après :



- Relier la borne Hc à la borne H du circuit d'horloge. Relever en concordance des temps les tensions disponibles aux bornes C0, C1, C2, C3, C4, C5, C6 et C7.
- Déconnecter la borne Hc de la borne H et relier cette dernière à la borne Hd. Relever en concordance des temps les tensions disponibles aux bornes C0, C1, C2, C3, C4, C5, C6 et C7.

5.6 INTERRUPTEURS

Le "bloc interrupteurs" est représenté sur le schéma ci-après :



La maquette étant alimentée en ± 15 V, relier la borne **a** à la masse du montage et la borne **b** à la borne Vref.

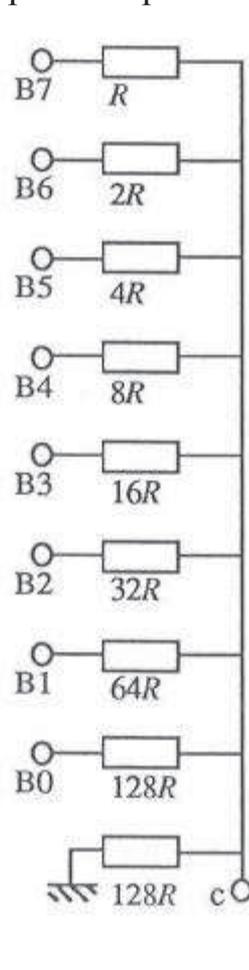
Avec un voltmètre, déterminer les tensions disponibles aux bornes I0, I2, I3, I4, I5, I6 et I7:

- lorsque les interrupteurs sont tous commutés vers la gauche,
- lorsque les interrupteurs sont tous commutés vers la droite,
- lorsque certains interrupteurs sont commutés vers la droite et d'autres commutés vers la gauche.

Quel est le plus petit nombre binaire qu'il est possible d'écrire ?
 Quel est le plus grand nombre binaire qu'il est possible d'écrire ?
 Donner également sa valeur dans le système à base 10.

5.7 RESEAU DE RESISTANCES PONDEREES

Le circuit correspondant est représenté par le montage ci après :



• Commande en tension

La maquette étant alimentée en ± 15 V, relier la borne **a** à la masse du montage et la borne **b** à la borne Vref.

Relier les bornes I0, I1, I2, I3, I4, I5, I6 et I7 respectivement aux bornes B0, B1, B2, B3, B4, B5, B6 et B7.

Avec un voltmètre, déterminer les tensions disponibles à la borne **c** du réseau de résistances pondérées pour quelques combinaisons des interrupteurs.

La tension de référence étant réglée à 5,12 V, quelle est la valeur de la tension de sortie du réseau de résistances pondérées :

- lorsque les interrupteurs sont tous commutés vers la gauche?
- lorsque les interrupteurs sont tous commutés vers la droite?

- lorsque certains interrupteurs sont commutés vers la droite et d'autres commutés vers la gauche ?

• **Commande en courant**

La maquette étant alimentée en ± 15 V, relier la borne **a** à la masse du montage, la borne **b** à la borne V_{ref} et un milliampèremètre entre la borne **a** et la borne **c**.

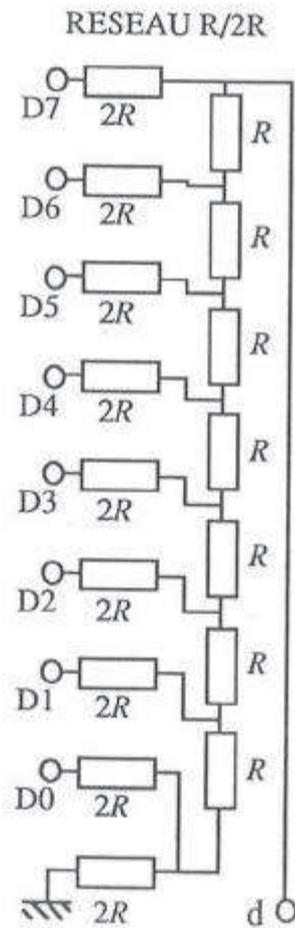
Les bornes I0, I1, I2, I3, I4, I5, I6 et I7 étant toujours reliées aux bornes B0, B1, B2, B3, B4, B5, B6 et B7, relever les intensités des courants traversant l'ampèremètre pour quelques combinaisons des interrupteurs.

La tension de référence étant réglée à 5,12 V, quelle est la valeur de l'intensité du courant traversant l'ampèremètre :

- lorsque les interrupteurs sont tous commutés vers la gauche?
- lorsque les interrupteurs sont tous commutés vers la droite ?
- lorsque certains interrupteurs sont commutés vers la droite et d'autres commutés vers la gauche ?

5.8 RESEAU DE RESISTANCES R/2R

Le circuit correspondant est représenté par le montage ci après :



• Commande en tension

La maquette étant alimentée en $\pm 15\text{ V}$, relier la borne **a** à la masse du montage et la borne **b** à la borne Vref.

Relier les bornes I0, I1, I2, I3, I4, I5, I6 et I7 respectivement aux bornes D0, D1, D2, D3, D4, D5, D6 et D7.

Avec un voltmètre, déterminer les tensions disponibles à la borne **d** du réseau R/2R pour quelques combinaisons des interrupteurs.

La tension de référence étant réglée à $5,12\text{ V}$, quelle est la valeur de la tension de sortie du réseau R/2R :

- lorsque les interrupteurs sont tous commutés vers la gauche ?
- lorsque les interrupteurs sont tous commutés vers la droite ?
- lorsque certains interrupteurs sont commutés vers la droite et d'autres commutés vers la gauche ?

• Commande en courant

La maquette étant alimentée en ± 15 V, relier la borne **a** à la masse du montage, la borne **b** à la borne Vref et un milliampèremètre entre la borne **a** et la borne **d**.

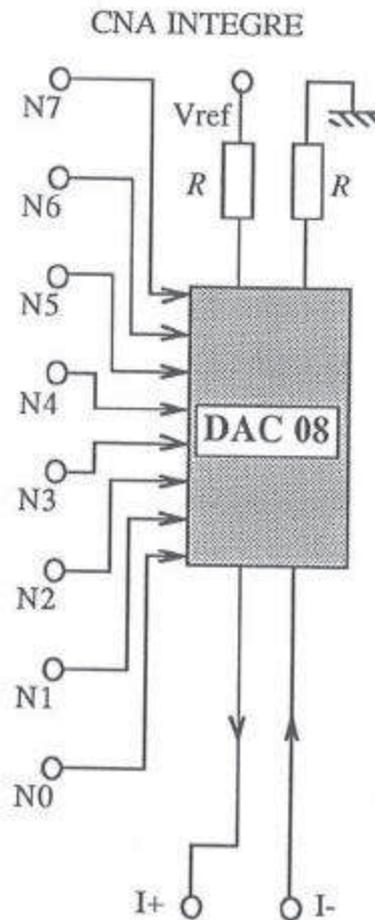
Les bornes I0, I1, I2, I3, I4, I5, I6 et I7 étant toujours reliées aux bornes D0, D1, D2, D3, D4, D5, D6 et D7, relever les intensités des courants traversant l'ampèremètre pour quelques combinaisons des interrupteurs.

La tension de référence étant réglée à 5,12 V, quelle est la valeur de l'intensité du courant traversant l'ampèremètre :

- lorsque les interrupteurs sont tous commutés vers la gauche?
- lorsque les interrupteurs sont tous commutés vers la droite ?
- lorsque certains interrupteurs sont commutés vers la droite et d'autres commutés vers la gauche ?

5.9 CNA INTEGRE

Le circuit correspondant est représenté par le montage ci-après :



La maquette étant alimentée en ± 15 V, relier la borne Vref du bloc "tension de référence" à la borne Vref du CNA intégré (il est possible de choisir une tension de référence autre que celle disponible sur le bloc "tension de référence").

Relier les bornes I0, I1, I2, I3, I4, I5, I6 et I7 respectivement aux bornes N0, N1, N2, N3, N4, N5, N6 et N7.

Relier la borne I- à la masse et placer un ampèremètre entre I+ et I- noter le sens de passage du courant.

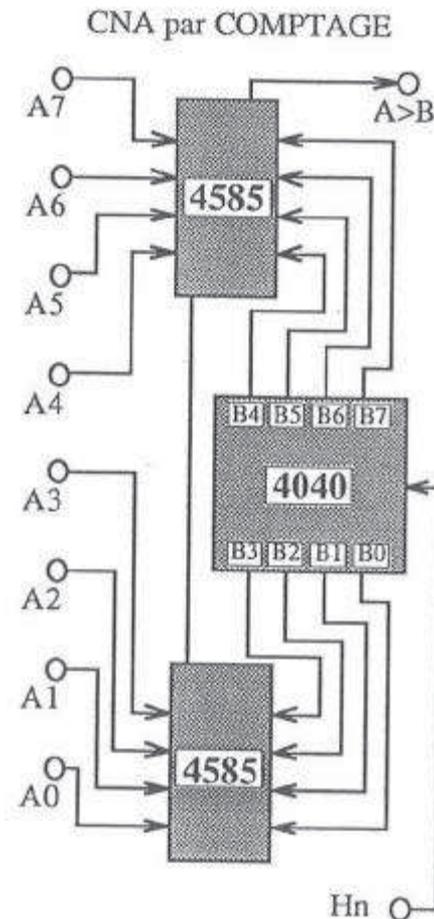
Relever les intensités des courants traversant l'ampèremètre pour quelques combinaisons des interrupteurs.

La tension de référence étant réglée à 5,12 V, quelle est la valeur de l'intensité du courant traversant l'ampèremètre :

- lorsque les interrupteurs sont tous commutés vers la gauche ?
- lorsque les interrupteurs sont tous commutés vers la droite ?
- lorsque certains interrupteurs sont commutés vers la droite et d'autres commutés vers la gauche ?

5.10 CNA PAR COMPTAGE

Le circuit correspondant est représenté par le montage ci-après :



La maquette étant alimentée en ± 15 V, relier la borne H du "bloc horloge" à la borne Hn du CNA par comptage.

Relier les bornes I0, I1, I2, I3, I4, I5, I6 et I7 respectivement aux bornes A0, A1, A2, A3, A4, A5, A6 et A7.

Visualiser à l'oscilloscope, la tension disponible entre la borne A>B et la masse.

Que vaut cette tension lorsque tous les interrupteurs sont basculés sur la gauche ?

Relever plusieurs chronogrammes pour quelques combinaisons binaires différentes.

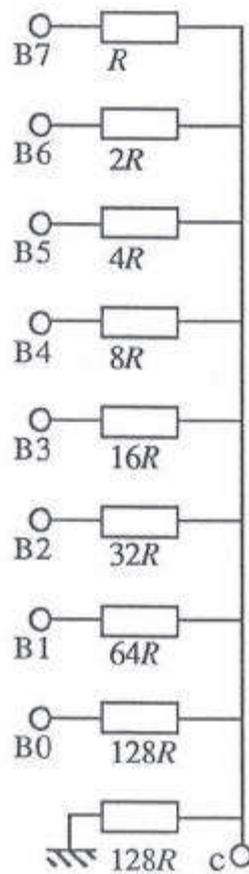
Calculer quelques caractéristiques de cette tension : période, amplitude, rapport cyclique (durée de l'état haut sur la période).

Quelle est la caractéristique de la tension qui est modifiée lorsque l'on change l'état d'un interrupteur ?

5.11 CONVERTISSEUR NUMÉRIQUE/ANALOGIQUE PAR RÉSEAU DE RÉSISTANCES PONDÉRÉES

5.11.1 Préparation

Nous travaillons à partir du schéma ci-après :



•A l'aide du théorème de superposition ou du théorème de Millman, exprimer la tension v_c disponible à la borne **c**, en fonction des tensions V_{B0} , V_{B1} , V_{B2} , V_{B3} , V_{B4} , V_{B5} , V_{B6} et V_{B7} appliquées aux bornes B0, B1, B2, B3, B4, B5, B6 et B7.

Montrer que cette tension peut s'écrire sous la forme :

$$v_c = \frac{1}{256} (v_{B0} + 2v_{B1} + 4v_{B2} + 8v_{B3} + 16v_{B4} + 32v_{B5} + 64v_{B6} + 128v_{B7})$$

Ce circuit permet de réaliser une conversion numérique analogique d'un mot binaire écrit sur 8 bits et présent sur les entrées B0, B1, B2, B3, B4, B5, B6 et B7. Pourquoi ?

- On associe à chaque entrée B_i , $i = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$, une variable k_i telle que :
 $k_i = 1$ si B_i est à l'état haut, c'est-à-dire si $v_i = V_{ref}$;
 $k_i = 0$ si B_i est à l'état bas, c'est-à-dire si $v_i = 0$.
 v_i est le potentiel du point B_i par rapport à la masse.

Exprimer v_d en fonction de k_i et V_{ref} .

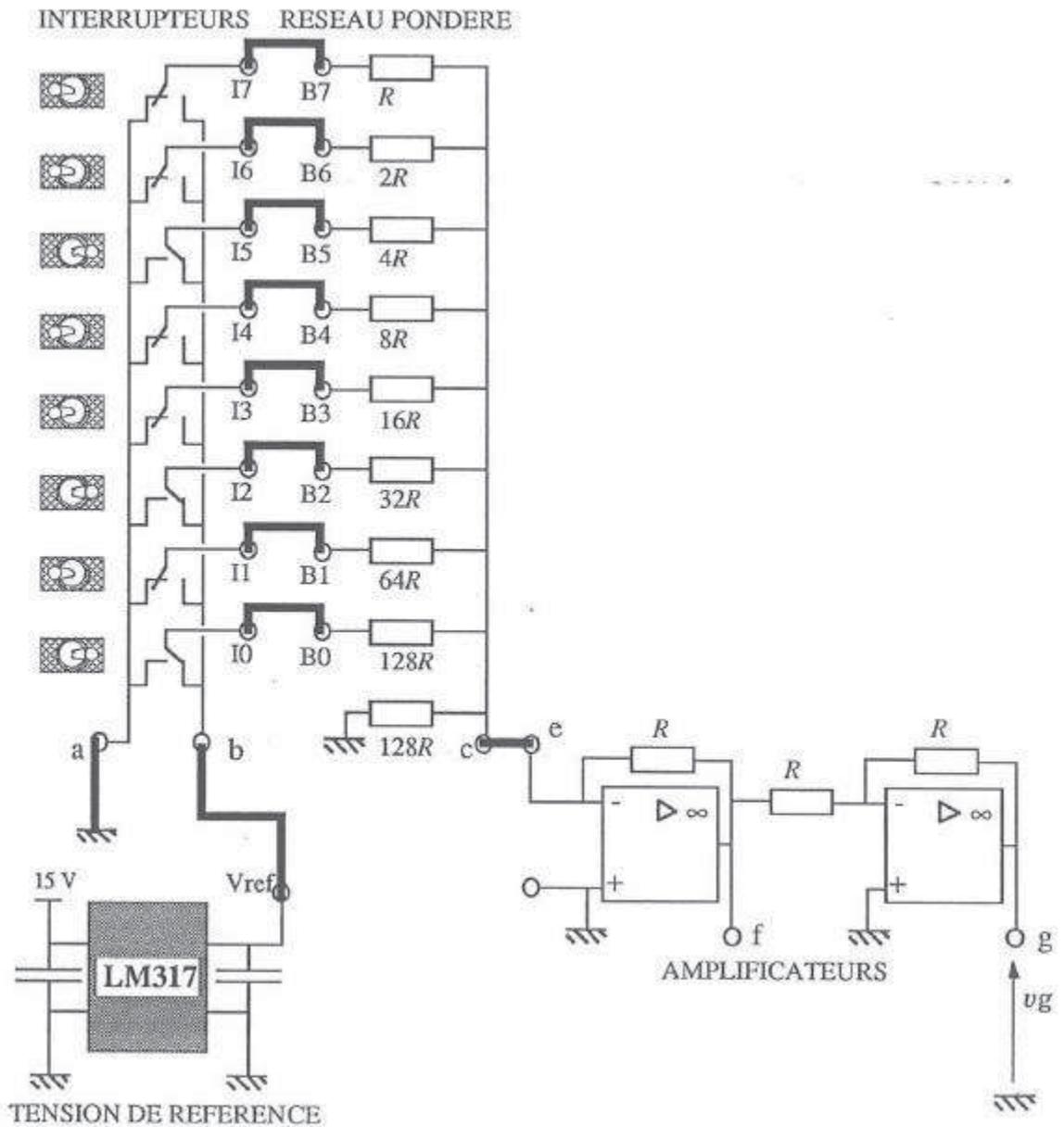
Quelle est la valeur maximale du nombre décimal qui peut être écrit ?

Exprimer la valeur maximale de v_c en fonction de V_{ref} .

5.11.2 Expérimentation

5.11.2.1 Fonctionnement en régime statique

La maquette étant alimentée en $\pm 15\text{ V}$, réaliser le montage suivant :



- Placer un voltmètre entre la borne **c** et la masse du montage.

Quelle est l'indication du voltmètre pour quelques combinaisons différentes des interrupteurs ?

Est-ce conforme au résultat attendu ?

- Pour quelques combinaisons différentes des interrupteurs, relever les tensions :
 - entre la borne **f** et la masse du montage,
 - entre la borne **g** et la masse du montage.

Comparer les résultats obtenus et en déduire le rôle de l'amplificateur opérationnel placé entre les bornes **f** et **g**.

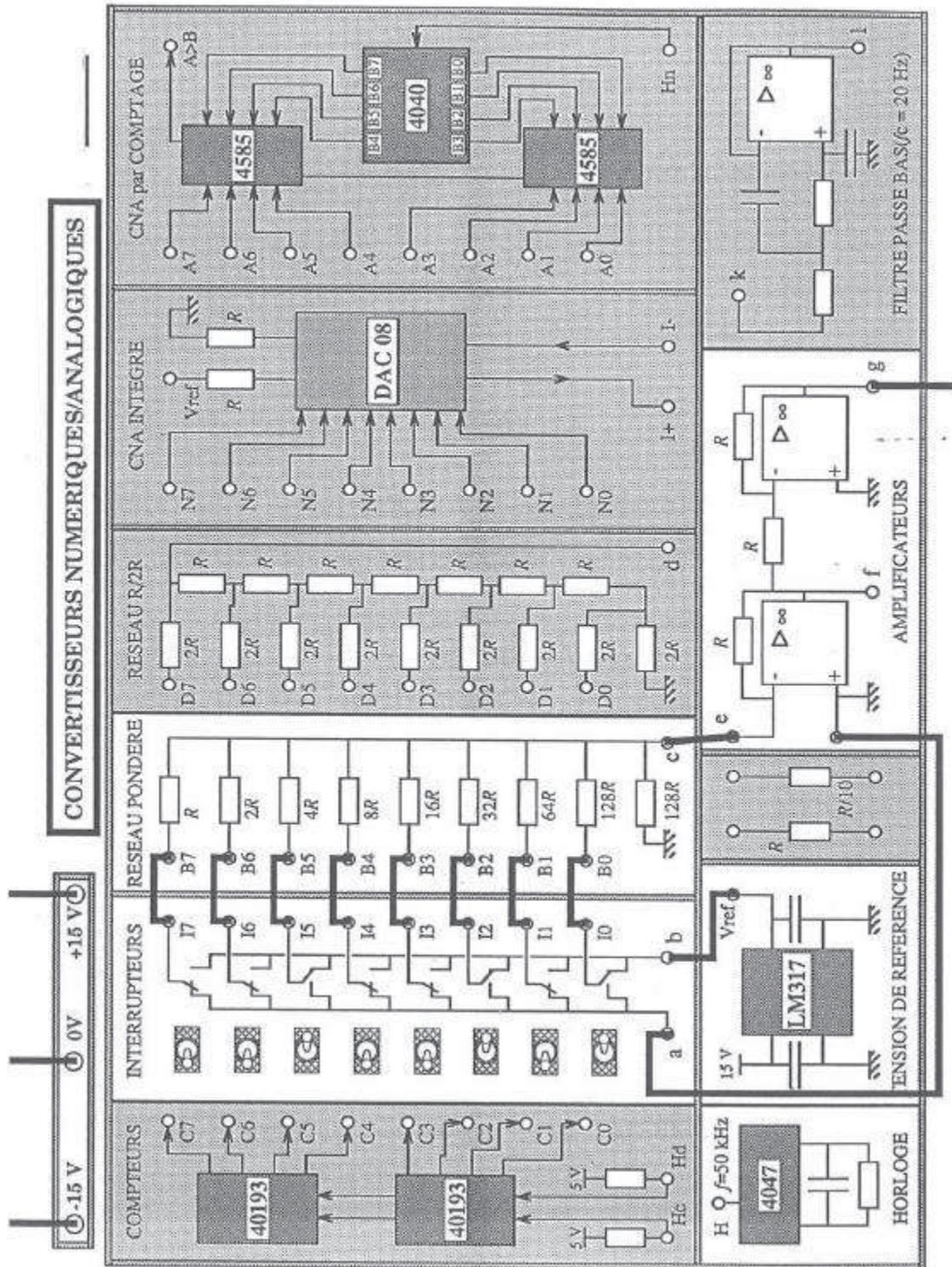
- La tension de référence étant réglée à 5,12 V, tracer la caractéristique de transfert $v_g(N)$ du CNA.

Mesurer la résolution de ce convertisseur.

Mesurer les écarts à la linéarité en utilisant la droite des points extrêmes.

Pour quelques combinaisons des entrées, mesurer la résistance de sortie du CNA.

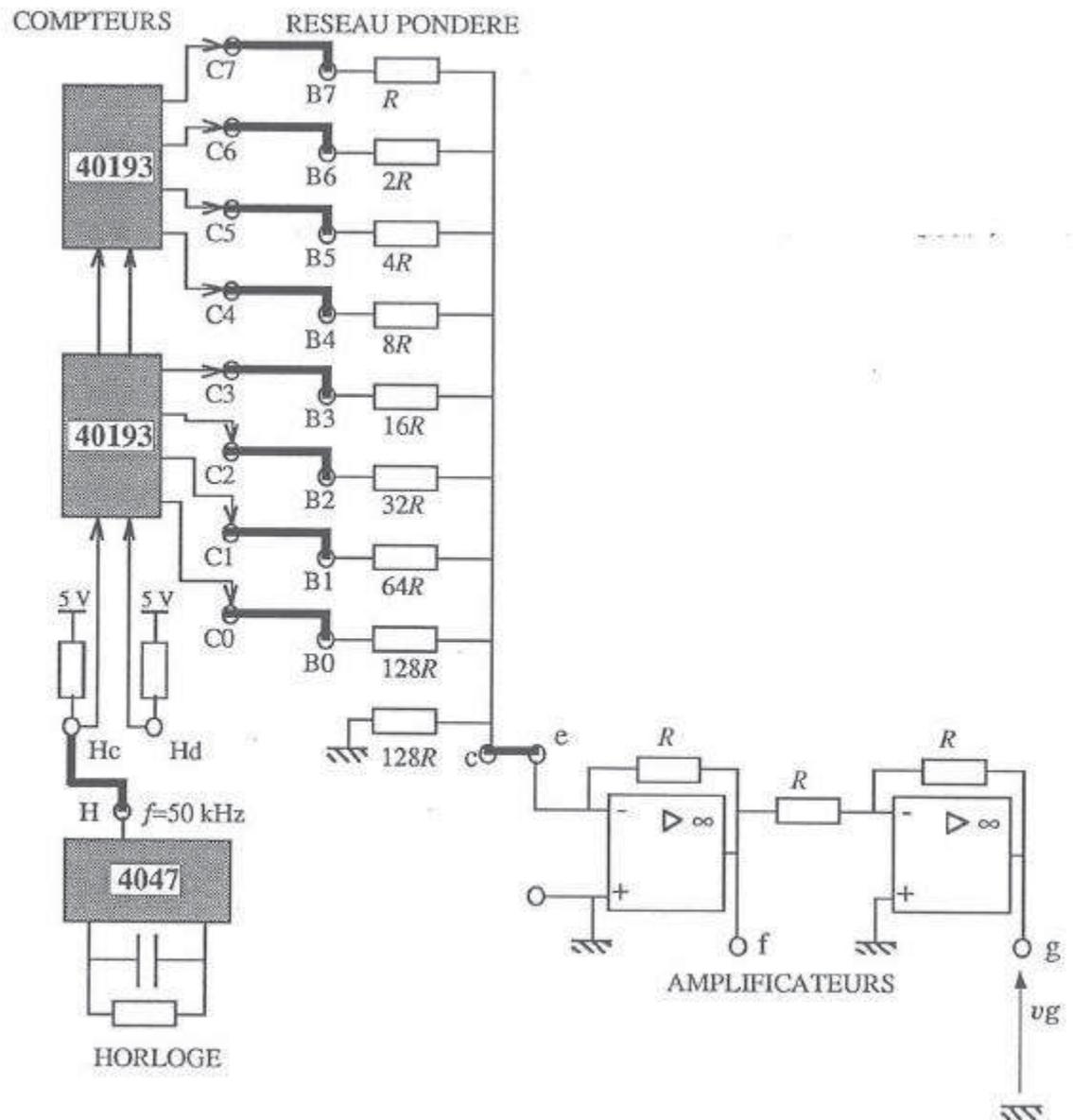
Câblage de la maquette avec un réseau de résistances pondérées (Etude statique)



Câblage de la maquette CONVERTISSEUR NUMERIQUE-ANALOGIQUE pour un fonctionnement avec un réseau de résistances pondérées (étude statique)

5.11.2.2 Fonctionnement en régime dynamique

La maquette étant alimentée en $\pm 15\text{ V}$, réaliser le montage suivant :



Placez l'une des voies d'un oscilloscope entre la borne **g** et la masse du montage et l'autre voie entre la borne **H** et la masse.

- Fonctionnement sur 8 bits.

Relever les oscillogrammes des tensions $v_g(t)$ et $v_H(t)$.

Remplacer la liaison H-Hc par une liaison entre H et Hd.

Relever les oscillogrammes des tensions $v_g(t)$ et $v_H(t)$.

Justifier les expressions de comptage et décomptage donner aux deux fonctionnements précédents. Dans quel cas le montage fonctionne-t-il en comptage ?

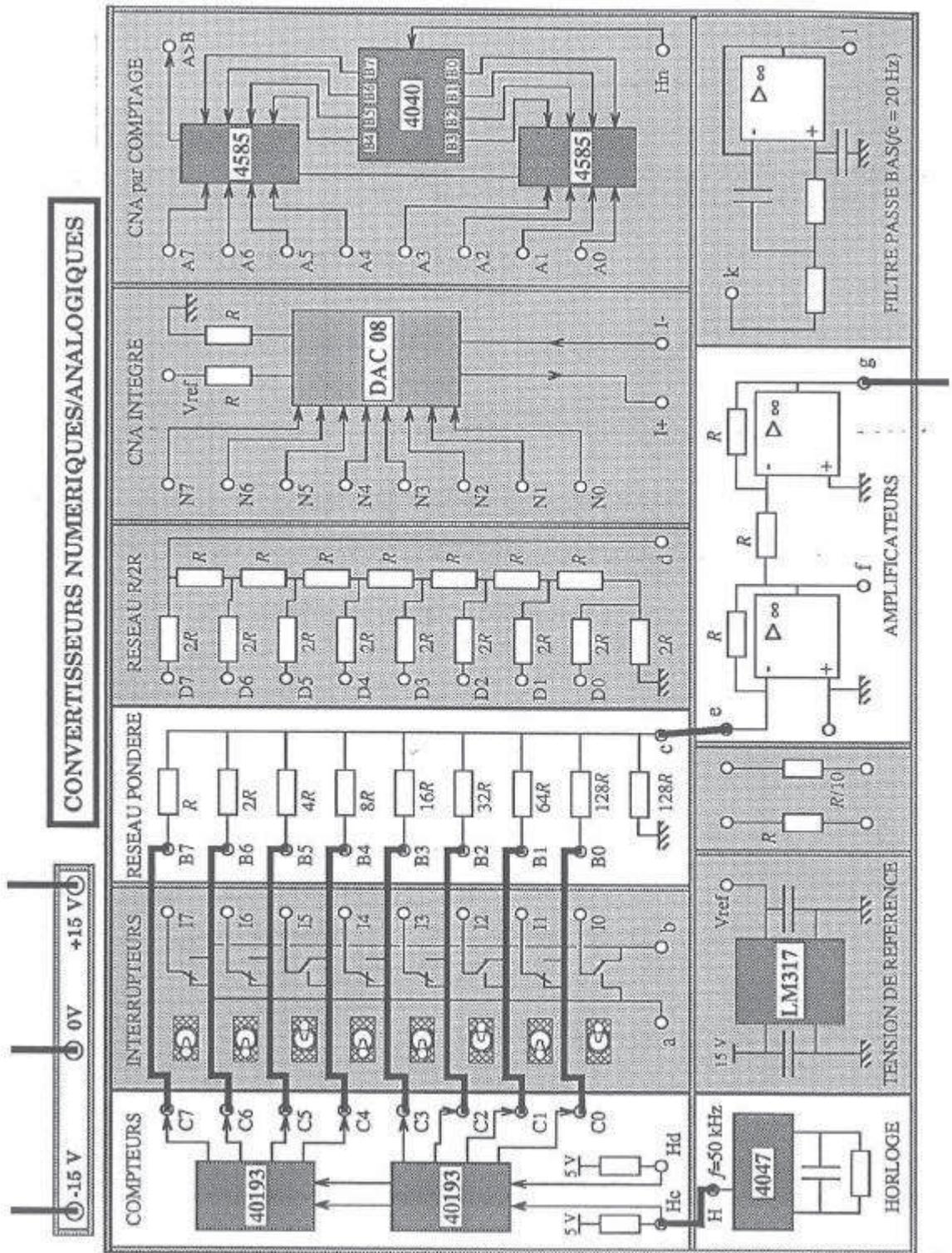
- Fonctionnement sur 4 bits.

On désire effectuer la conversion d'un nombre binaire écrit sur 4 bits en une tension analogique.

Quelle modification doit-on apporter au montage pour obtenir un tel fonctionnement ?

Relever à l'oscilloscope la caractéristique de transfert de ce convertisseur. Quelle est sa résolution ?

Câblage de la maquette avec un réseau de résistances pondérées (Etude dynamique)

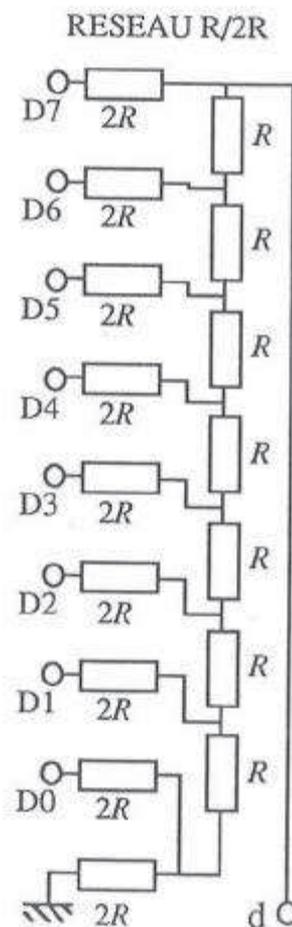


Câblage de la maquette CONVERTISSEUR NUMERIQUE-ANALOGIQUE pour un fonctionnement avec un réseau de résistances pondérées (étude dynamique)

5.12 CONVERTISSEUR NUMÉRIQUE/ANALOGIQUE PAR RÉSEAU DE RÉSISTANCES R-2R

5.12.1 Préparation

- Nous travaillons à partir du schéma ci après :



- A l'aide du théorème de superposition et du modèle de Thévenin d'un générateur, exprimer la tension v_d disponible à la borne **d**, en fonction des tensions v_{D0} , v_{D1} , v_{D2} , v_{D3} , v_{D4} , v_{D5} , v_{D6} et v_{D7} appliquées aux bornes D0, D1, D2, D3, D4, D5, D6 et D7.

Montrer que cette tension peut s'écrire sous la forme :

$$v_c = \frac{1}{256} (v_{D0} + 2v_{D1} + 4v_{D2} + 8v_{D3} + 16v_{D4} + 32v_{D5} + 64v_{D6} + 128v_{D7})$$

Ce circuit permet de réaliser une conversion numérique analogique d'un mot binaire écrit sur 8 bits et présent sur les entrées D0, D1, D2, D3, D4, D5, D6 et D7. Pourquoi ?

- On associe à chaque entrée D_i , $i = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$, une variable k_i telle que :
 $k_i = 1$ si D_i est à l'état haut, c'est-à-dire si $v_i = V_{ref}$;
 $k_i = 0$ si D_i est à l'état bas, c'est-à-dire si $v_i = 0$.
 v_i est le potentiel du point D_i par rapport à la masse.

Exprimer v_d en fonction de k_i et V_{ref} .

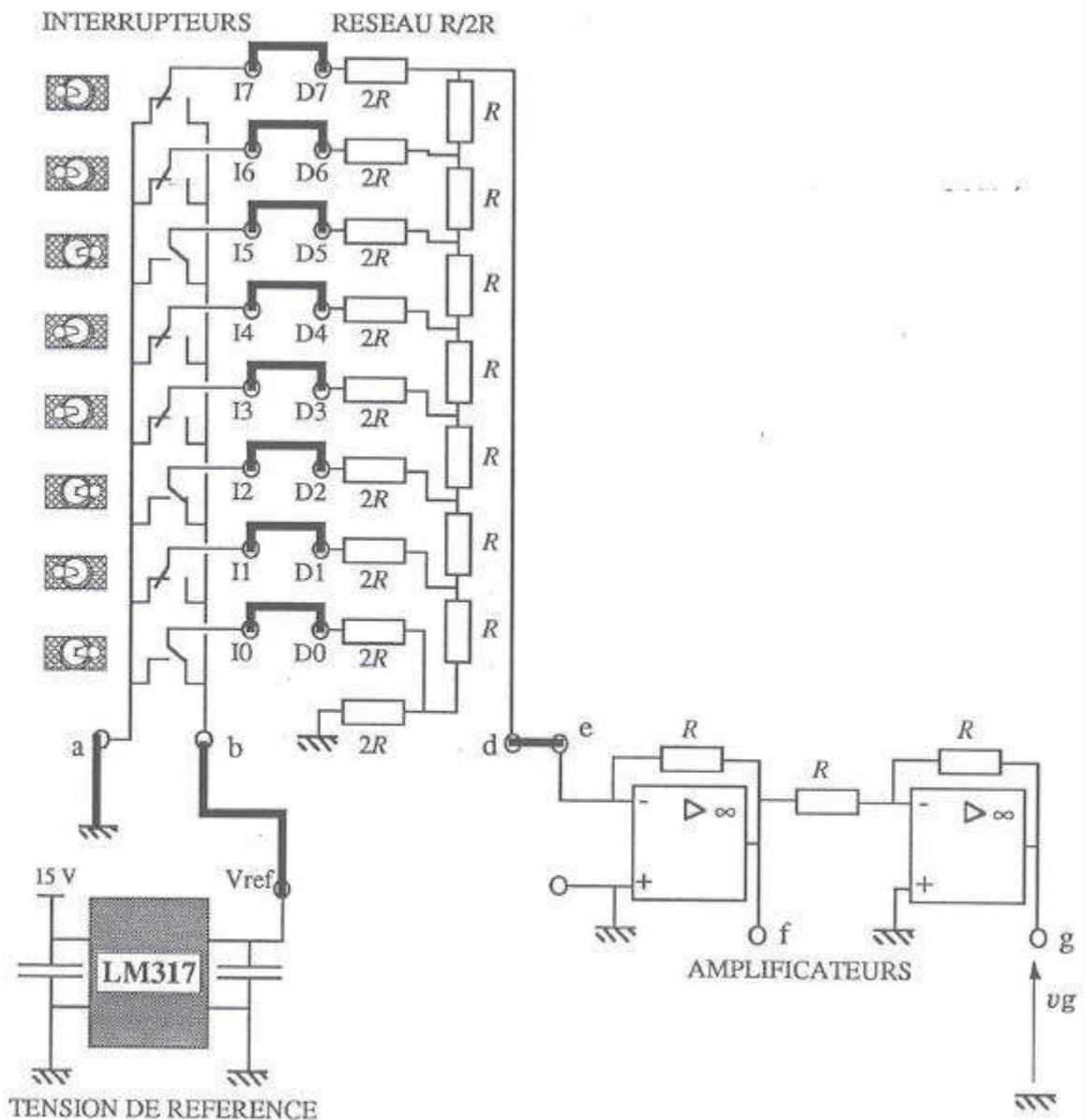
Quelle est la valeur maximale du nombre décimal qui peut être écrit ?

Exprimer la valeur maximale de v_d en fonction de V_{ref} .

5.12.2 Expérimentation

5.12.2.1 Fonctionnement en régime statique

La maquette étant alimentée en $\pm 15\text{ V}$, réaliser le montage suivant :



- Placer un voltmètre entre la borne **d** et la masse du montage.

Quelle est l'indication du voltmètre pour quelques combinaisons différentes des interrupteurs ?

Est-ce conforme au résultat attendu ?

- Pour quelques combinaisons différentes des interrupteurs, relever les tensions :
 - entre la borne **f** et la masse du montage,
 - entre la borne **g** et la masse du montage.

Comparer les résultats obtenus et en déduire le rôle de l'amplificateur opérationnel placé entre les bornes **f** et **g**.

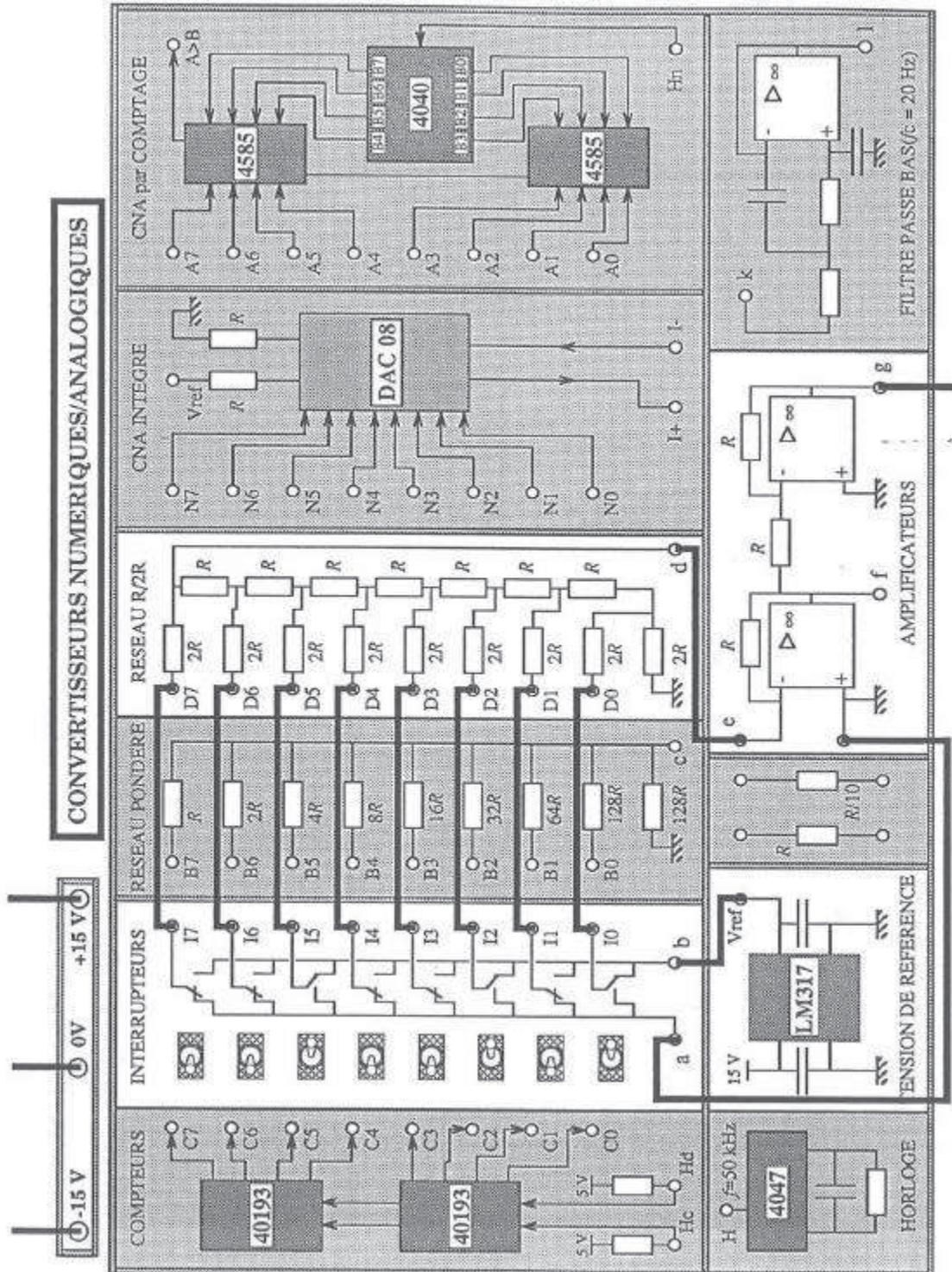
- La tension de référence étant réglée à 5,12 V, tracer la caractéristique de transfert $v_g(N)$ du CNA.

Mesurer la résolution de ce convertisseur.

Mesurer les écarts à la linéarité en utilisant la droite des points extrêmes.

Pour quelques combinaisons des entrées, mesurer la résistance de sortie du CNA.

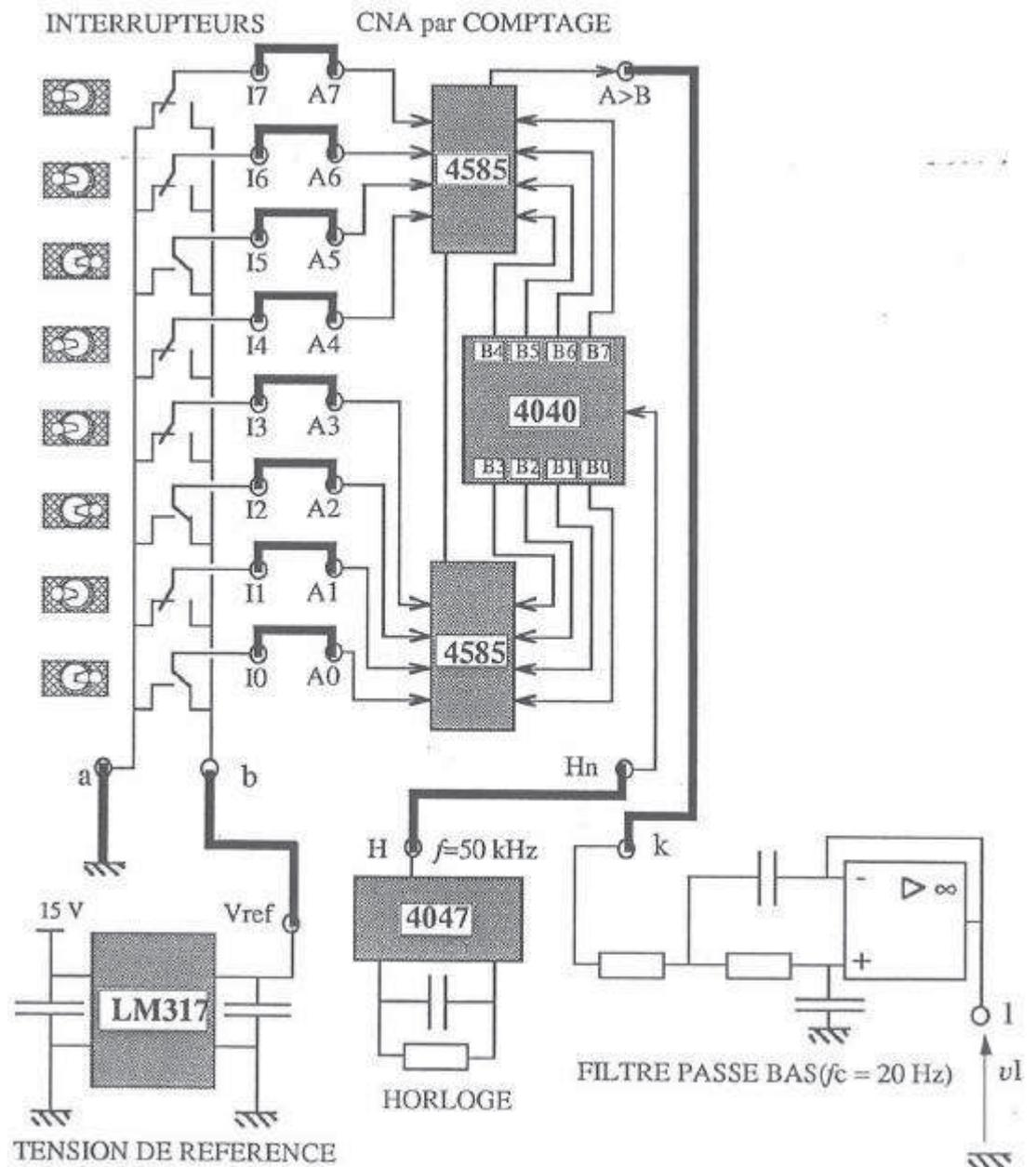
Câblage de la maquette avec un réseau de résistances R/2R (Etude statique)



Câblage de la maquette CONVERTISSEUR NUMERIQUE-ANALOGIQUE pour un fonctionnement avec un réseau de résistances R/2R (étude statique)

5.12.2.2 Fonctionnement en régime dynamique

La maquette étant alimentée en ± 15 V, réaliser le montage suivant :



Placez l'une des voies d'un oscilloscope entre la borne **g** et la masse du montage et l'autre voie entre la borne **H** et la masse.

- Fonctionnement sur 8 bits.

Relever les oscillogrammes des tensions $v_g(t)$ et $v_H(t)$.

Remplacer la liaison H-Hc par une liaison entre H et Hd.

Relever les oscillogrammes des tensions $v_g(t)$ et $v_H(t)$.

Justifier les expressions de comptage et décomptage donner aux deux fonctionnements précédents. Dans quel cas le montage fonctionne-t-il en comptage ?

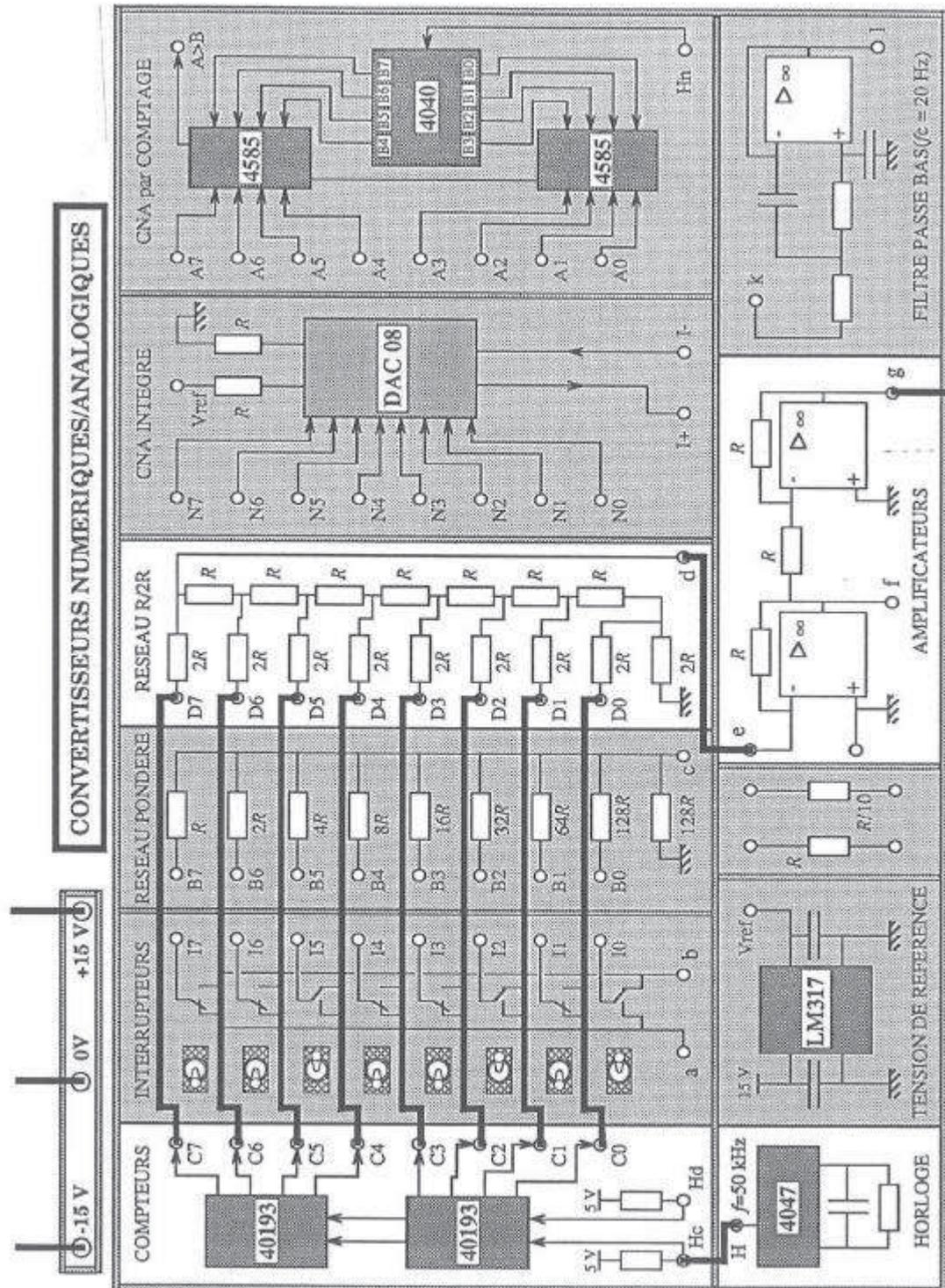
- Fonctionnement sur 4 bits.

On désire effectuer la conversion d'un nombre binaire écrit sur 4 bits en une tension analogique.

Quelle modification doit-on apporter au montage pour obtenir un tel fonctionnement ?

Relever à l'oscilloscope la caractéristique de transfert de ce convertisseur. Quelle est sa résolution ?

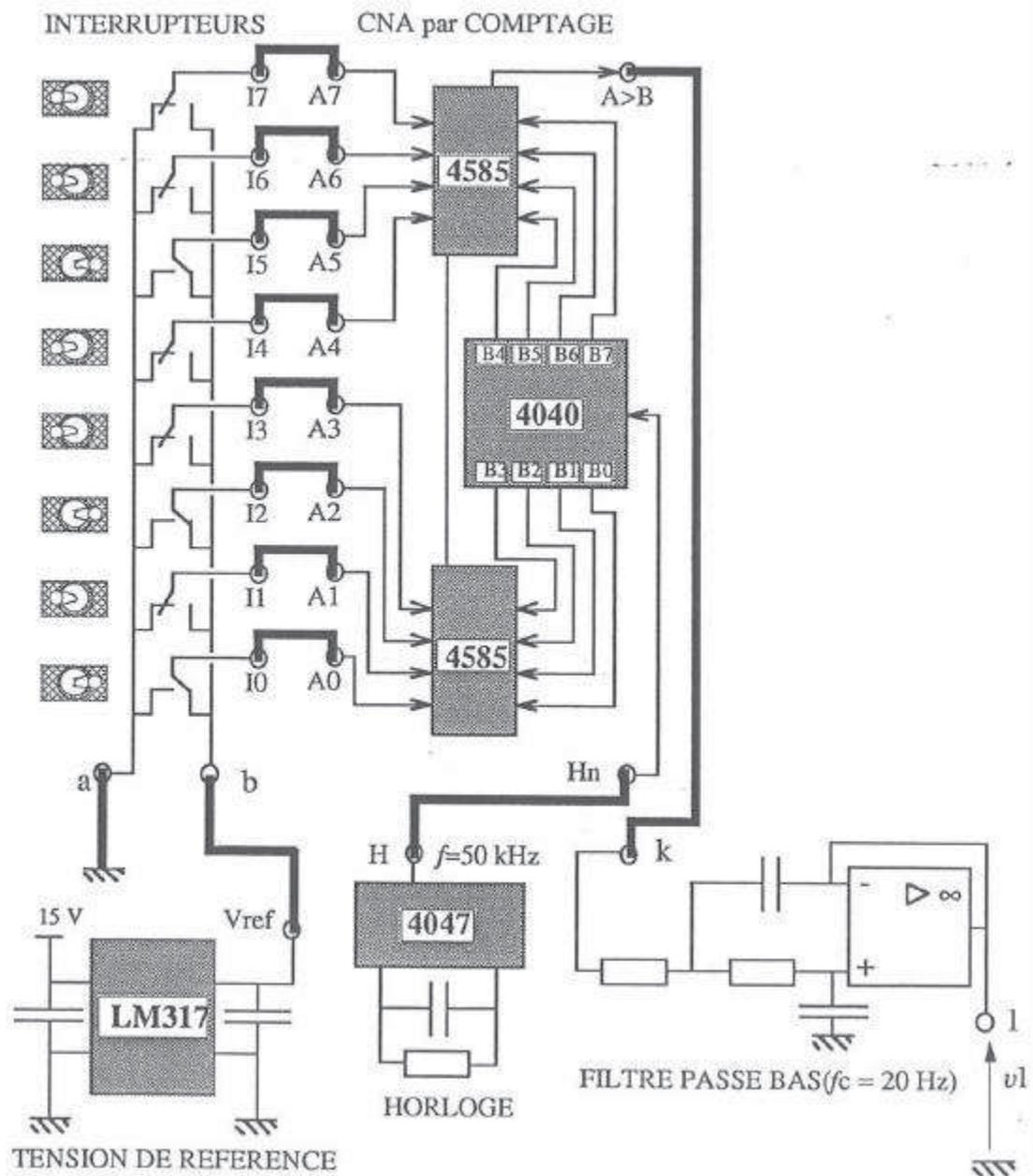
Câblage de la maquette avec un réseau de résistances R/2R (Etude dynamique)



Câblage de la maquette CONVERTISSEUR NUMERIQUE-ANALOGIQUE pour un fonctionnement avec un réseau de résistances R/2R (étude dynamique)

5.13 CONVERTISSEUR NUMÉRIQUE/ANALOGIQUE PAR COMPTAGE

5.13.1 Fonctionnement en régime statique



-
- Placer l'une des voies d'un oscilloscope entre la borne **k** et la masse du montage et l'autre voie entre la borne **I** et la masse.

Pour quelques combinaisons différentes des interrupteurs, relever les tensions :

- entre la borne **k** et la masse du montage,
- entre la borne **I** et la masse du montage.

Peut-on qualifier le montage à amplificateur opérationnel (entre les bornes **k** et **I**) de montage moyennneur ?

- Placer un voltmètre (position "continu") entre la borne **I** et la masse.

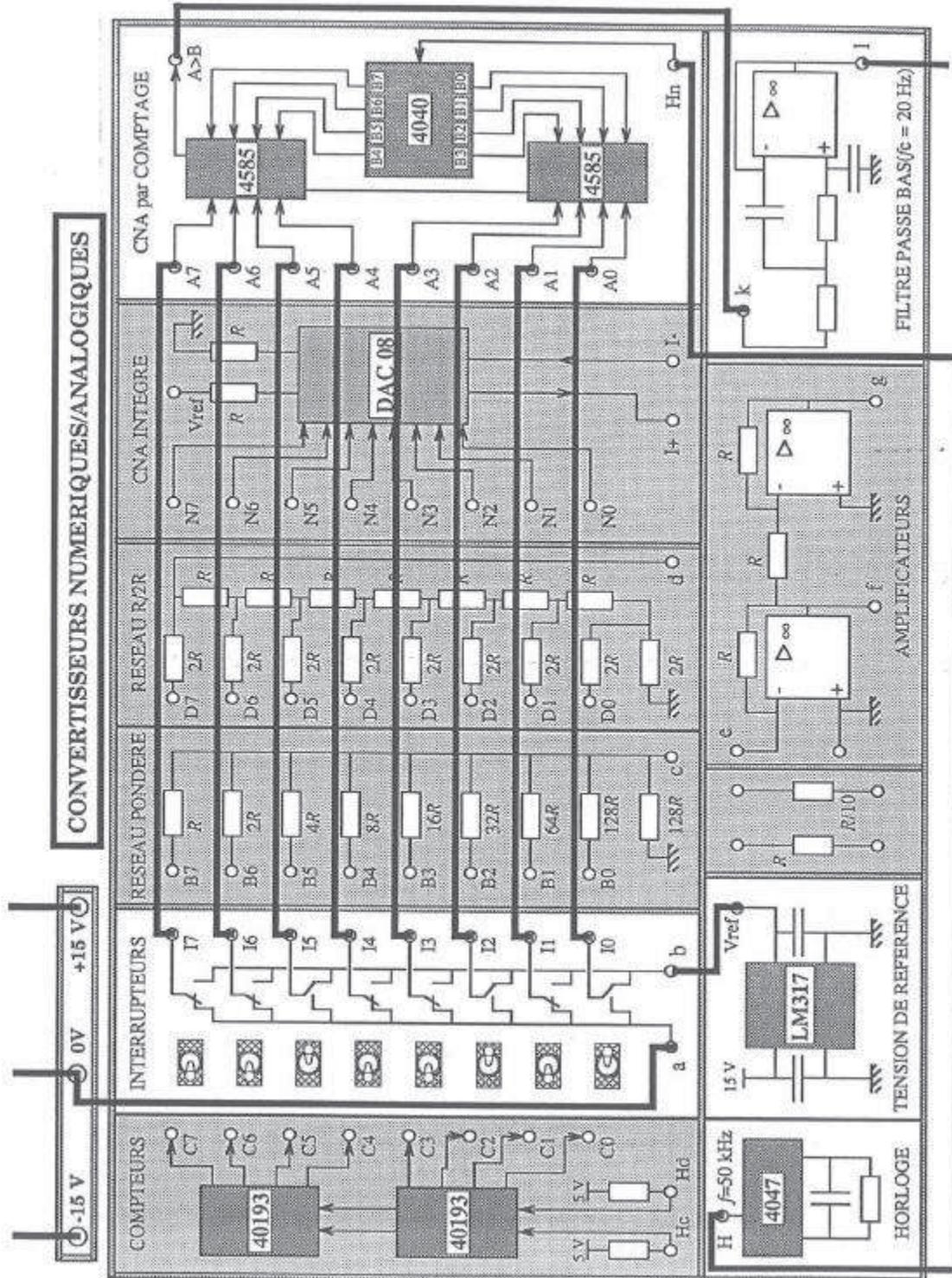
Régler la tension de référence à 5,12 V.

Tracer la caractéristique de transfert $v_1(N)$ du CNA.

Mesurer la résolution de ce convertisseur.

Mesurer les écarts à la linéarité en utilisant la droite des points extrêmes.

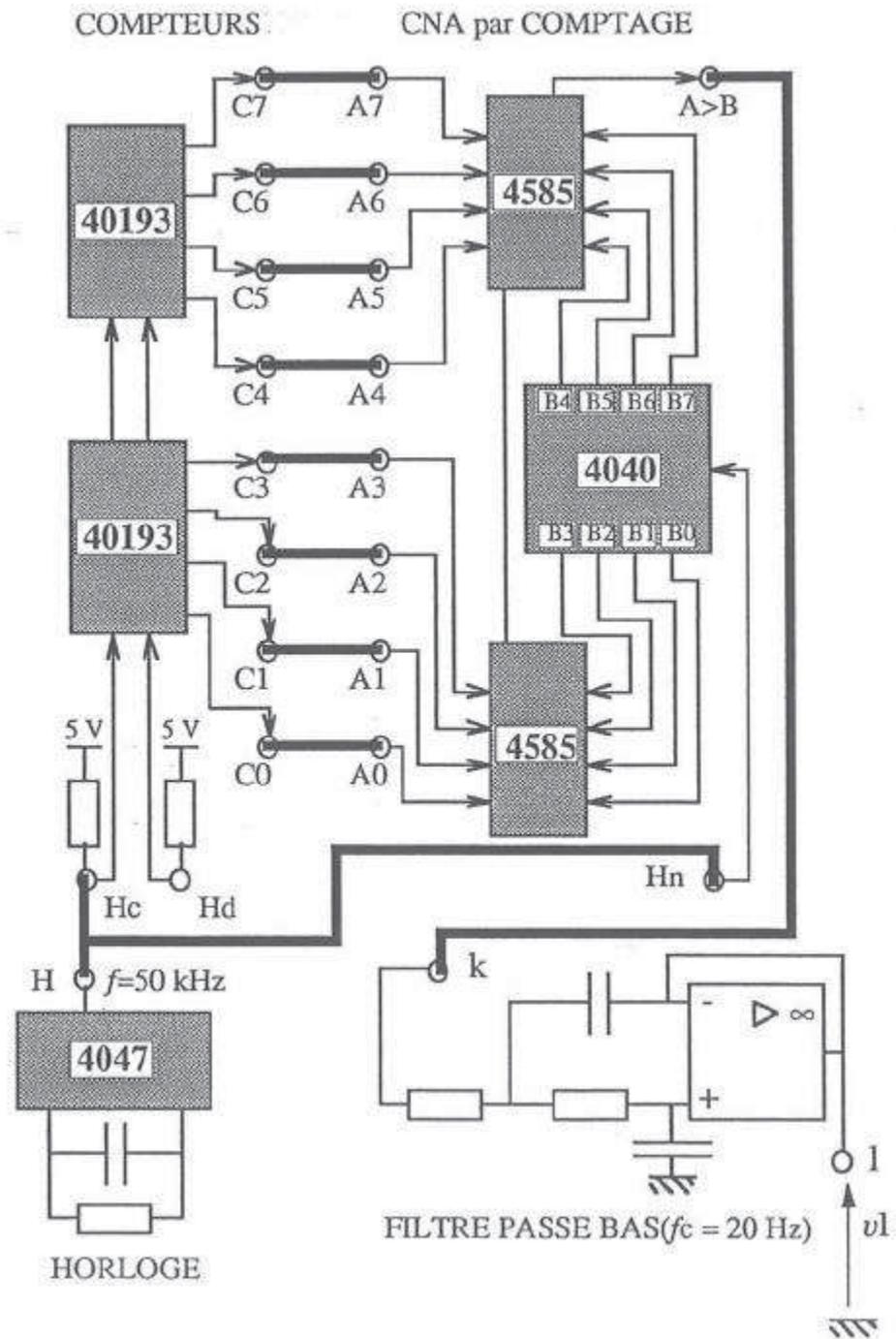
Câblage de la maquette pour une conversion par comptage (Etude statique)



Câblage de la maquette CONVERTISSEUR NUMERIQUE-ANALOGIQUE pour une conversion par comptage (étude statique)

5.13.2 Fonctionnement en régime dynamique

La maquette étant alimentée en ± 15 V, réaliser le montage suivant :



Placer l'une des voies d'un oscilloscope entre la borne **1** et la masse du montage et l'autre voie entre la borne **H** et la masse.

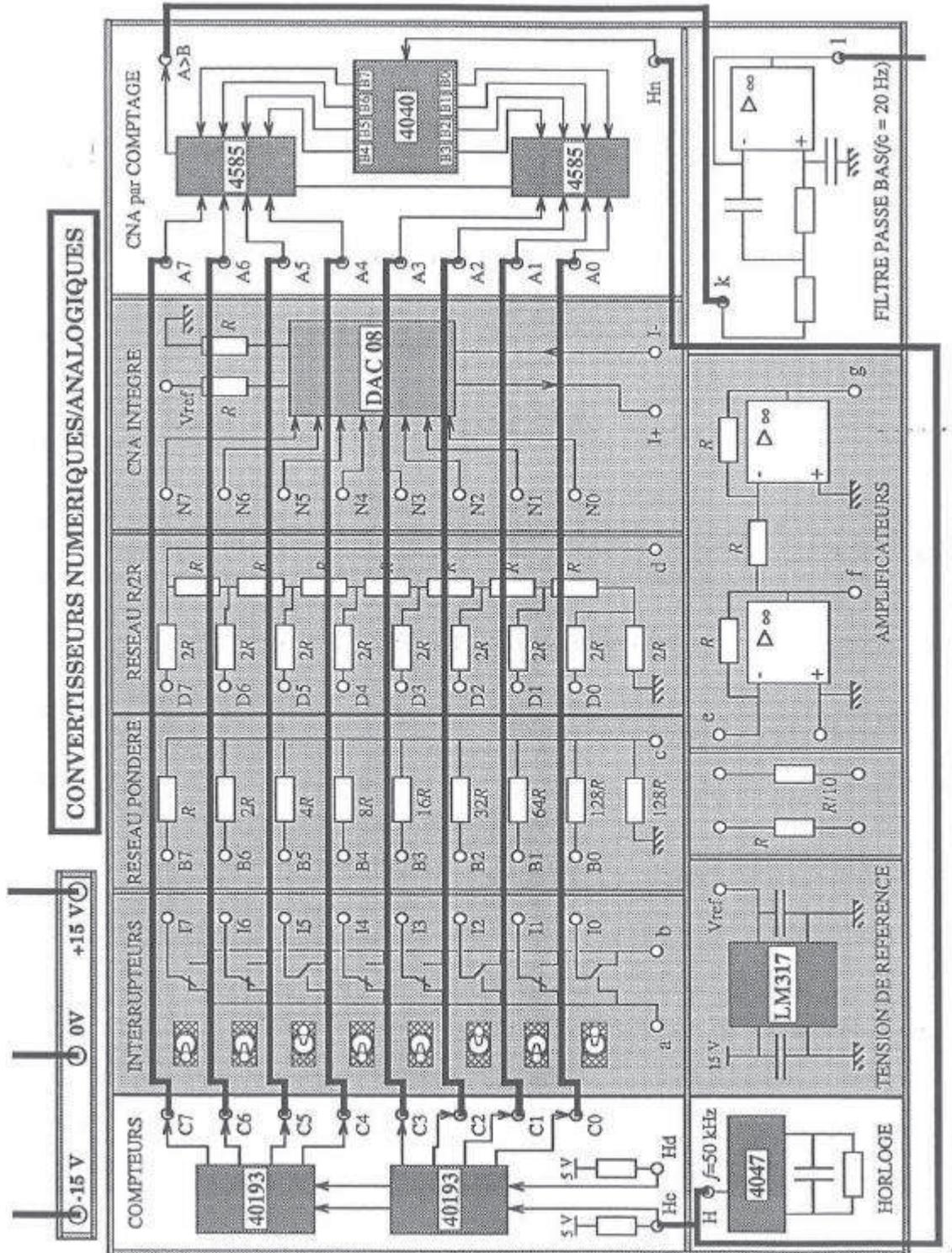
Relever les oscillogrammes des tensions $v_g(t)$ et $v_H(t)$.

Remplacer la liaison H-Hc par une liaison entre H et Hd.

Relever les oscillogrammes des tensions $v_g(t)$ et $v_H(t)$.

Justifier les expressions de comptage et décomptage donner aux deux fonctionnements précédents. Dans quel cas le montage fonctionne-t-il en comptage ?

Câblage de la maquette pour une conversion par comptage (Etude dynamique)

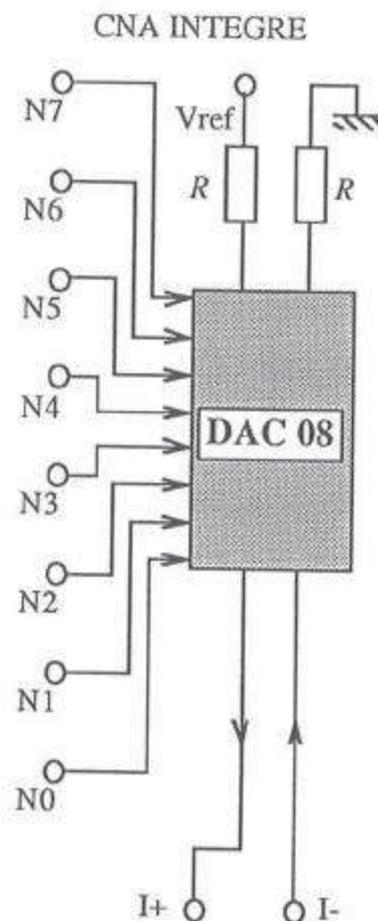


Câblage de la maquette CONVERTISSEUR NUMERIQUE-ANALOGIQUE pour une conversion par comptage (étude dynamique)

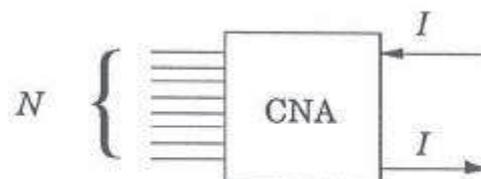
5.14 CONVERTISSEUR NUMÉRIQUE/ANALOGIQUE INTEGRE

5.14.1 Préparation

Nous travaillons à partir du schéma ci-après :



Le DAC 08 permet de faire correspondre une intensité de courant I à un nombre N .



- Les états logiques "1" et "0" correspondent à des niveaux de tension :
 - "1" pour des tensions comprises entre 0 et 5,5 V,
 - "0" pour des tensions comprises entre 0 et 0,8 V.

Quel est le nombre maximal de bits qui peuvent être appliqués à l'entrée du convertisseur ?

Quel est le nombre maximal que l'on peut écrire :

- dans le système décimal,
- dans le système hexadécimal ?

- L'intensité I du courant de sortie ne peut pas dépasser la valeur maximale $I_{\max} = 2\text{mA}$.

Soit I_e l'intensité élémentaire du courant de sortie.

En supposant que l'on ait :

$$I_{\max} = I_e \cdot N_{\max}$$

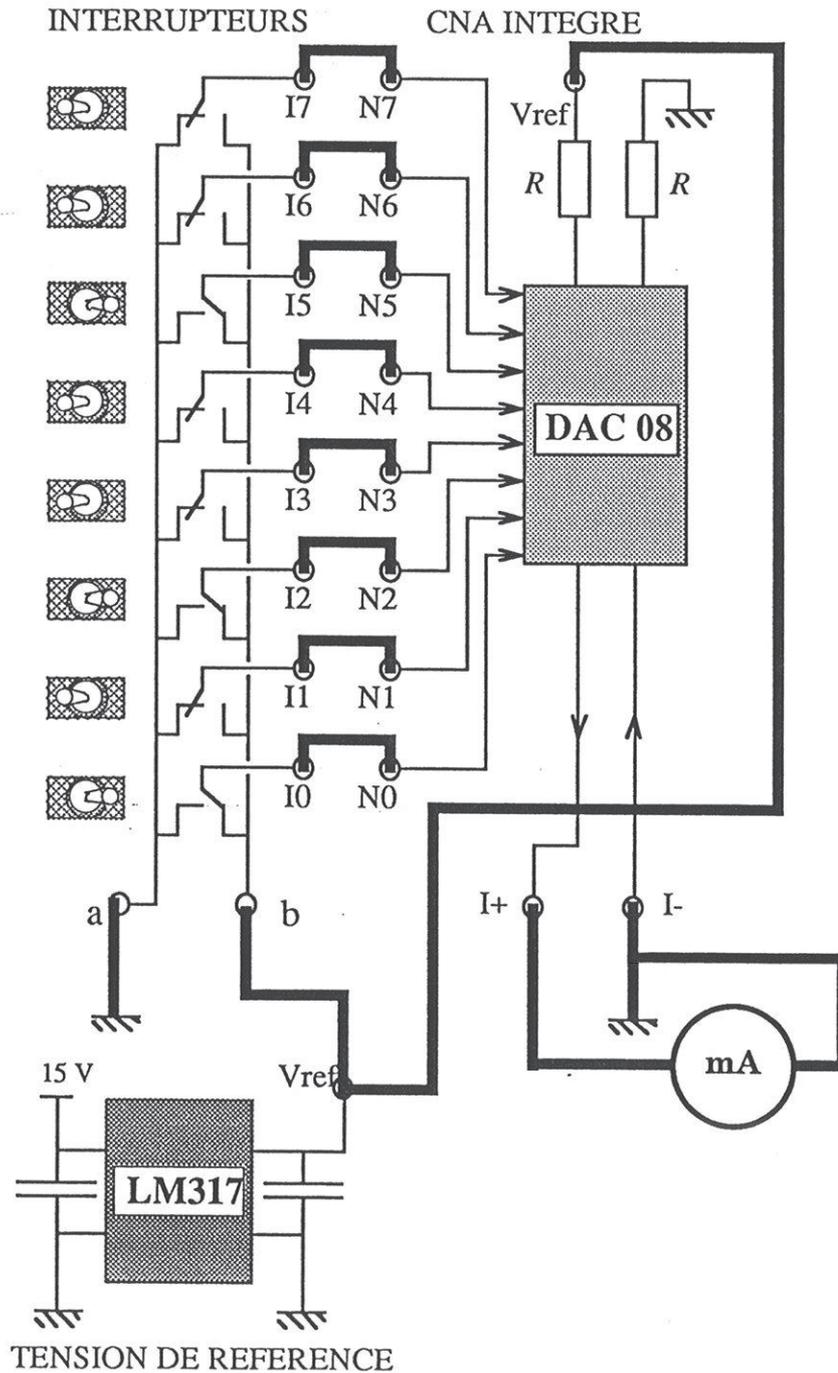
Quelle serait la résolution de ce convertisseur ?

- Donner une méthode permettant de mesurer l'intensité I du courant de sortie en fonction du nombre N d'entrée.

5.14.2 Expérimentation

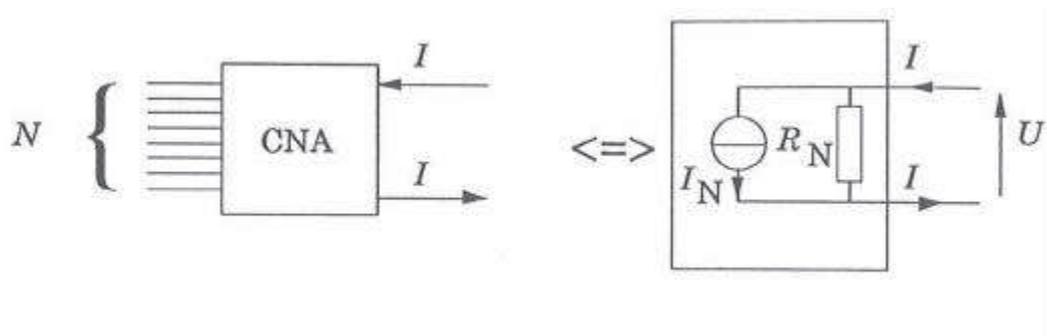
5.14.2.1 Fonctionnement en régime statique

La maquette étant alimentée en $\pm 15\text{ V}$, réaliser le montage suivant :



- En agissant sur les interrupteurs de la maquette, écrire l'équivalent en binaire naturel du nombre décimal $N= 0$.
Quelle est la valeur de l'intensité du courant qu'indique le milliampèremètre ?
- En agissant sur les interrupteurs de la maquette, écrire l'équivalent en binaire naturel du nombre décimal $N= 80$.
Quelle est la valeur de l'intensité du courant qu'indique le milliampèremètre ?
- En agissant sur les interrupteurs de la maquette, écrire l'équivalent en binaire naturel du nombre hexadécimal $N= FF$.
Quelle est la valeur de l'intensité du courant qu'indique le milliampèremètre ?
- Montrer que l'intensité I du courant de sortie vérifie la relation :

$$I=I_c(K-N)$$
Déterminer les valeurs de la constante K et de la résolution I_c du convertisseur.
- La sortie du CNA, pour chaque combinaison binaire d'entrée, peut être modélisée par un générateur de Norton :



Proposer une méthode permettant de déterminer les éléments du modèle équivalent de Norton.

Réaliser un montage permettant de relever la caractéristique de sortie $U(I)$.

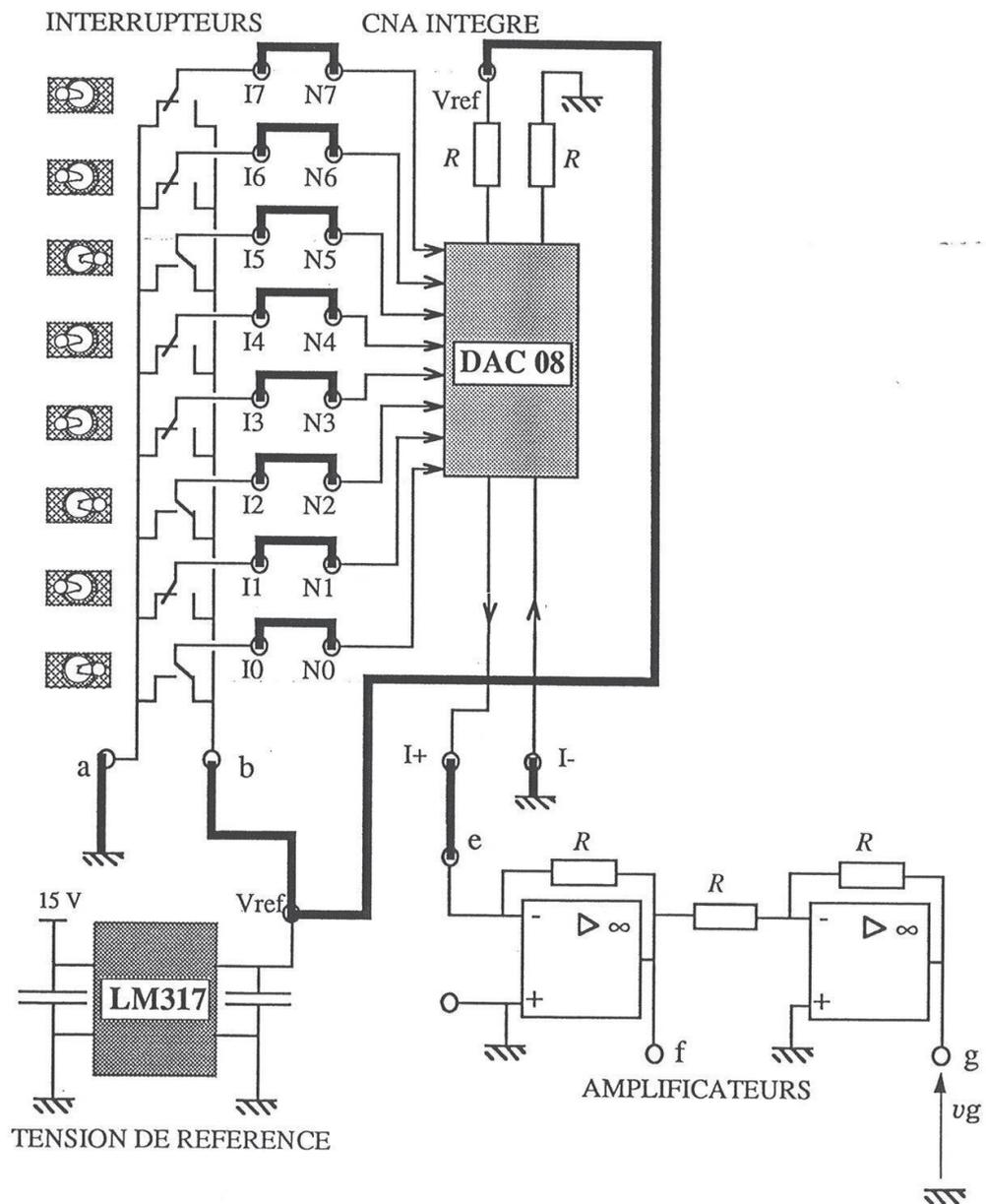
- Relever, sur la même feuille, la caractéristique de sortie $U(I)$ pour :
- $N= 80$ (dans le système décimal),
 - $N= FF$ (dans le système hexadécimal).

Déterminer les éléments du modèle équivalent de Norton pour chacune des valeurs de N précédentes.

5.14.2.2 Autre étude en régime statique

Il est possible de réaliser l'étude d'une conversion Nombre/Tension. Pour cela, il suffit d'associer au DAC 08, un convertisseur courant tension.

La maquette étant alimentée en ± 15 V, réaliser le montage suivant :



- Pour quelques combinaisons différentes des interrupteurs, relever les tensions :
 - entre la borne **f** et la masse du montage,
 - entre la borne **g** et la masse du montage.

Comparer les résultats obtenus et en déduire le rôle de l'amplificateur opérationnel placé entre les bornes **f** et **g**.

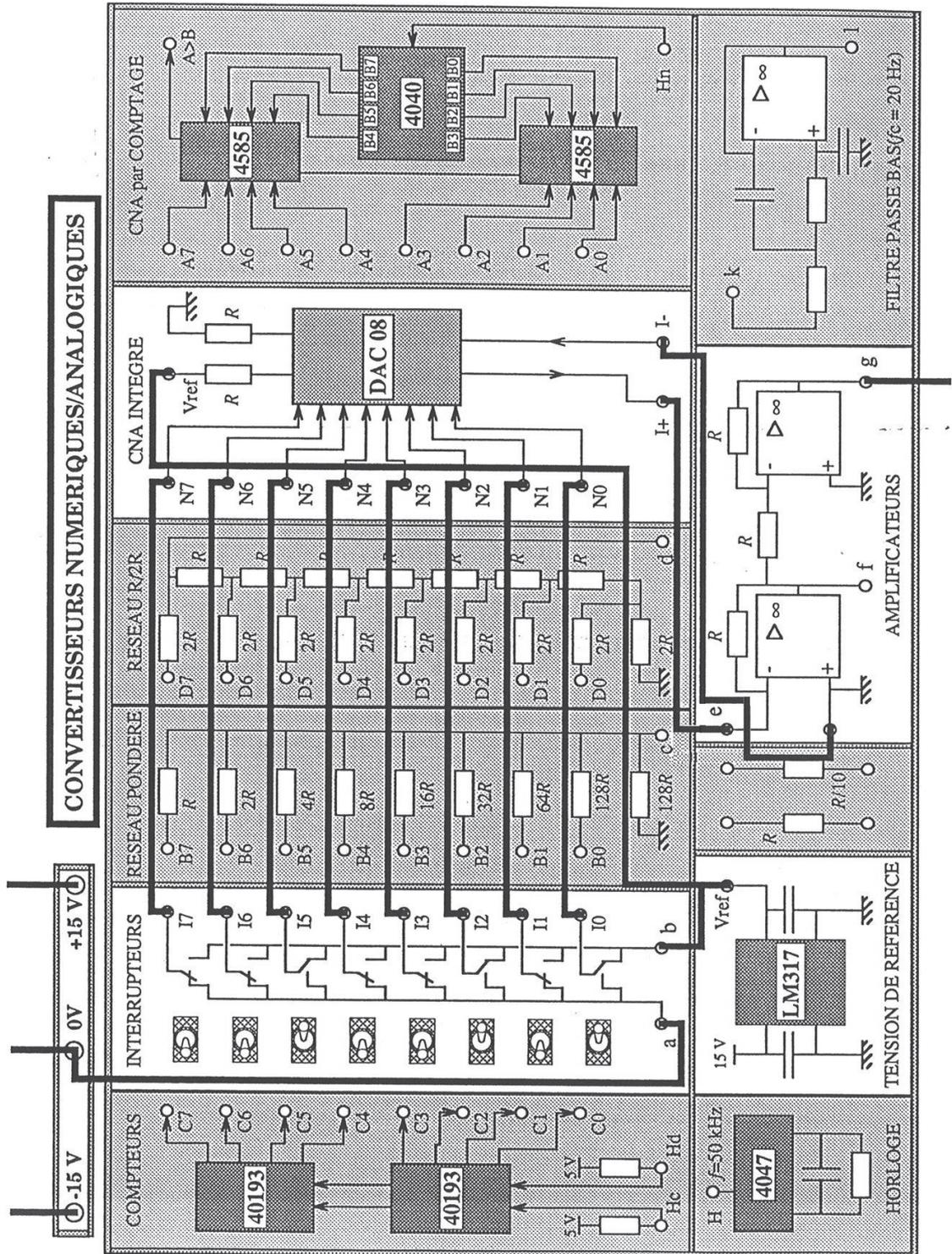
- La tension de référence étant réglée à 5,12 V, tracer la caractéristique de transfert $v_g(N)$ du CNA.

Mesurer la résolution de ce convertisseur.

Mesurer les écarts à la linéarité en utilisant la droite des points extrêmes.

Pour quelques combinaisons des entrées; mesurer la résistance de sortie du CNA.

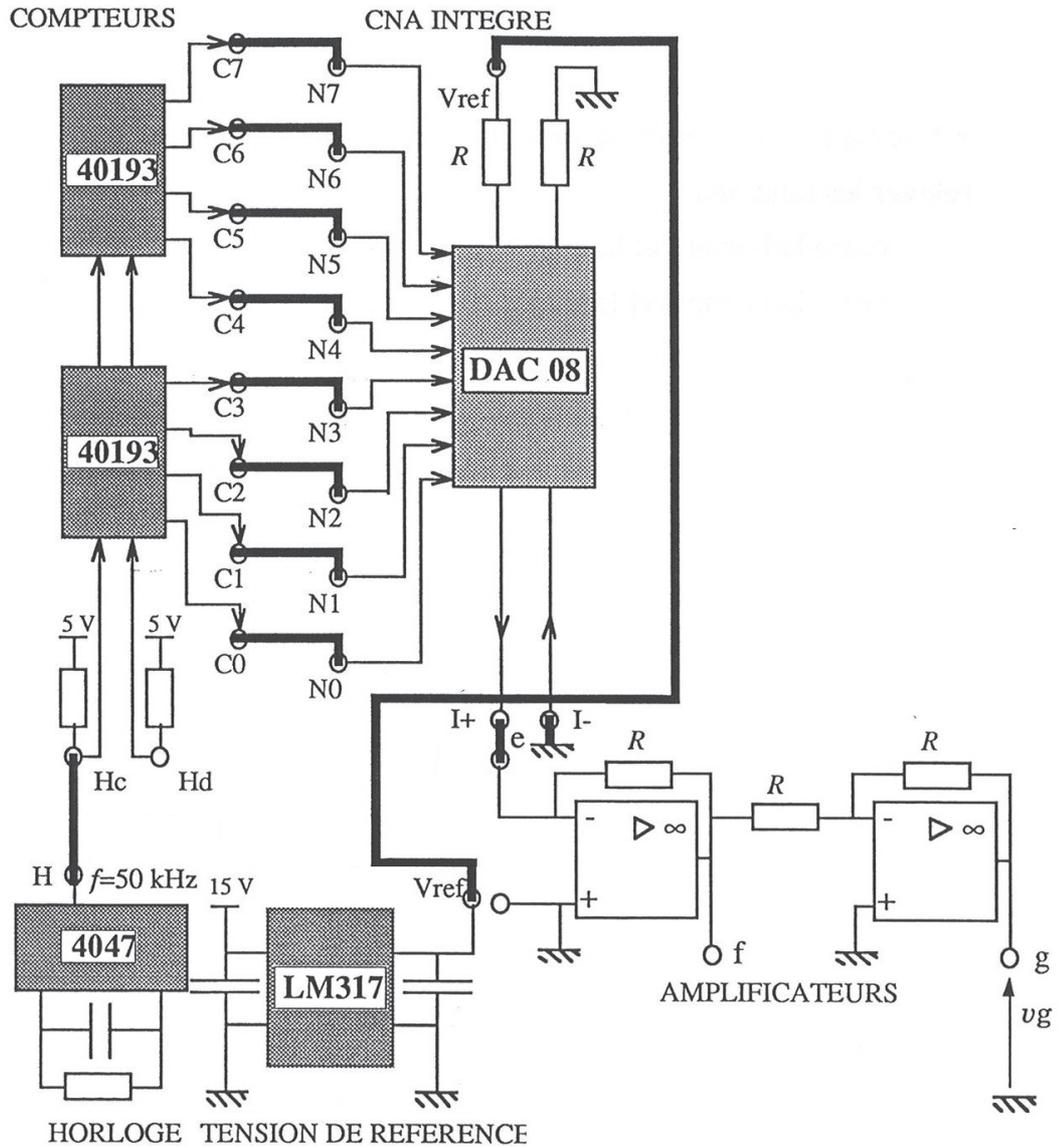
Câblage de la maquette pour une conversion avec C.N.A. intégré (Etude statique)



Câblage de la maquette CONVERTISSEUR NUMERIQUE-ANALOGIQUE pour une conversion avec CNA INTEGRE (étude statique)

5.14.2.3 Fonctionnement en régime dynamique

La maquette étant alimentée en $\pm 15\text{ V}$, réaliser le montage suivant :



Placer l'une des voies d'un oscilloscope entre la borne **g** et la masse du montage et l'autre voie entre la borne **H** et la masse.

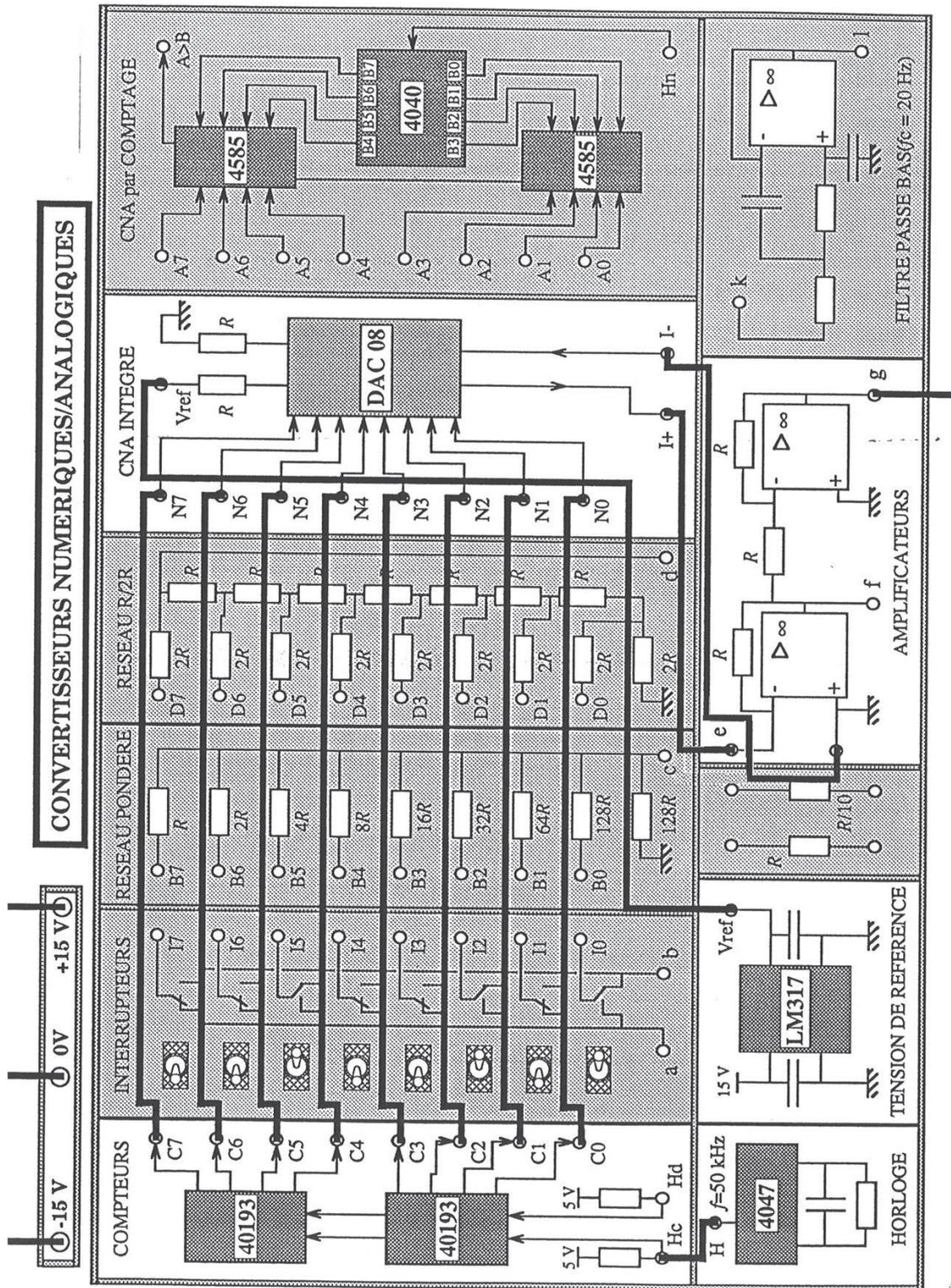
Relever les oscillogrammes des tensions $v_g(t)$ et $v_H(t)$.

Remplacer la liaison H-Hc par une liaison entre H et Hd.

Relever les oscillogrammes des tensions $v_g(t)$ et $v_H(t)$.

Justifier les expressions de comptage et décomptage donner aux deux fonctionnements précédents. Dans quel cas le montage fonctionne-t-il en comptage ?

Câblage de la maquette pour une conversion avec C.N.A. intégré (Etude dynamique)



Câblage de la maquette CONVERTISSEUR NUMERIQUE-ANALOGIQUE pour une conversion avec CNA INTEGRE (étude dynamique)

6 Rappels théoriques

6.1 FONCTIONS HYBRIDES

6.1.1 REPRÉSENTATION D'UNE GRANDEUR PHYSIQUE

La valeur numérique d'une grandeur physique peut être représentée soit de manière analogique, soit de manière numérique.

6.1.1.1 Représentation analogique

Prenons l'exemple d'une montre traditionnelle à aiguilles ; la progression des aiguilles au cours du temps se fait de façon continue : à une grandeur, le temps, correspond une autre grandeur, l'angle de rotation, qui lui est proportionnelle. Cela caractérise la représentation analogique d'une grandeur.

6.1.1.2 Représentation numérique

Prenons l'exemple d'une montre à quartz à aiguilles; la progression de ces aiguilles au cours du temps se fait de façon discontinue : à une grandeur, le temps, correspond une autre grandeur, l'angle de rotation, qui ne lui est plus proportionnelle; chaque tour d'aiguille se fait par sauts: 60 sauts par tour pour l'aiguille indiquant les secondes. Cela caractérise la représentation numérique d'une grandeur.

6.1.2 SYSTEMES ANALOGIQUES

La plupart des grandeurs qui doivent être mesurées (intensité, tension, température, pression, vitesse,...) sont des grandeurs analogiques. Les systèmes analogiques couramment utilisés sont les oscilloscopes analogiques; les ampèremètres et voltmètres analogiques (progressivement

remplacés par des appareils numériques), les récepteurs radiophoniques, les magnétophones, ...

6.1.2.1 Systèmes numériques

Dans ces systèmes les grandeurs physiques évoluent de manière discontinue. C'est le cas des ordinateurs, des calculatrices, des multimètres numériques, des machines outils à commande numérique.

Les principaux avantages qui font que les systèmes numériques sont de plus en plus employés, sont :

- d'être souvent programmables,
- d'être souvent plus précis et plus rapides que les systèmes analogiques,
- de pouvoir conserver en mémoire des données,
- d'être moins sensibles aux perturbations que les systèmes analogiques (pour certaines applications cela peut être un défaut).

6.1.2.2 Systèmes hybrides

En réalité, beaucoup de systèmes numériques ne le sont pas purement.

Prenons l'exemple du voltmètre numérique. Il capte une tension, c'est-à-dire d'une grandeur analogique, et il affiche un nombre, c'est-à-dire d'une grandeur numérique, qui donne la mesure de cette tension. C'est un système que l'on peut qualifier d'hybride car des grandeurs analogiques et numériques interviennent simultanément.

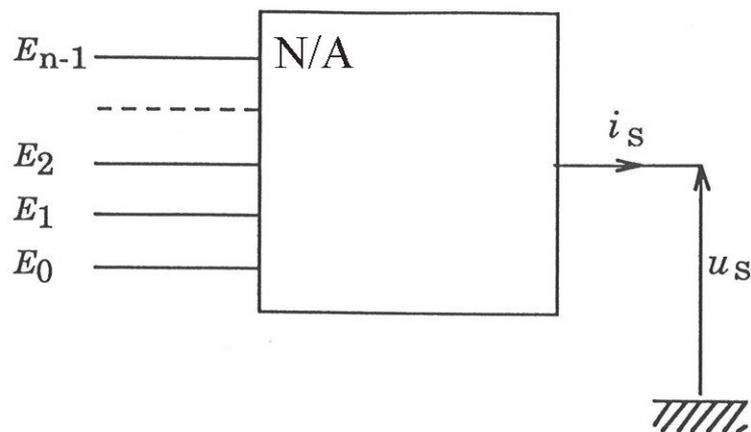
Dans des systèmes plus complexes, comme la régulation par exemple, on capte une grandeur analogique (la vitesse par exemple), elle est ensuite convertie en grandeur numérique par l'intermédiaire d'un convertisseur analogique numérique.

Cette information numérique est traitée par un ordinateur ou un automate qui renvoie, si nécessaire, une autre information numérique convertie, par un convertisseur numérique analogique, en grandeur analogique agissant sur un régulateur permettant la régulation désirée. C'est l'exemple type d'un *système hybride*.

6.1.3 CONVERSION NUMERIQUE-ANALOGIQUE (CNA)

La conversion numérique analogique réalise la transformation d'un signal numérique, généralement représenté en binaire naturel ou en décimal codé binaire (DCB), en une tension ou un courant.

La figure ci-après est la représentation symbolique du convertisseur qui réalise cette opération.



6.1.3.1 Poids de l'entrée

A chaque combinaison du nombre binaire d'entrée correspond une valeur différente de la tension (ou de l'intensité du courant) de sortie. A chaque chiffre binaire est affecté un poids différent suivant le rang du chiffre. La tension (ou l'intensité du courant) de sortie est une somme pondérée des différents poids.

Exemple :

Avec un convertisseur 3 bits, on a 2^3 nombres binaires différents. A chaque chiffre d'entrée correspond une valeur différente de la grandeur de sortie. Prenons l'exemple numérique suivant :

E_2	E_1	E_0	$u_s(\text{mV})$
0	0	0	0
0	0	1	10
0	1	0	20
0	1	1	30
1	0	0	40
1	0	1	50
1	1	0	60
1	1	1	70

En prenant les lignes :

0	0	1	10 mV
0	1	0	20 mV
1	0	0	40 mV

On remarque que la tension de sortie est fonction de la position (ou du rang) de chaque chiffre :

E_0 est le bit de poids le plus faible: il a un poids 10 mV.

E_1 a un poids de 20 mV.

E_2 est le bit de poids le plus fort: il a un poids 40 mV.

En partant du poids le plus faible, les poids doublent à chaque bit : la tension de sortie est une somme pondérée des entrées numériques.

6.1.3.2 Résolution

La résolution d'un convertisseur N/A est égale à la plus petite variation de la tension de sortie qui peut être provoquée par une modification du signal numérique d'entrée.

Elle est égale au poids du bit de poids le plus faible.

Exemple : Un convertisseur N/A de 8 bits donne pour 00000000, un courant d'intensité nulle et pour 00000001 une intensité de 0,2 mA : la résolution de ce convertisseur est de 0,2 mA.

Une autre façon d'exprimer la résolution est le pourcentage de la pleine échelle.

Reprenons l'exemple précédent : un convertisseur N/A de 8 bits avec une résolution de 0,2mA a une intensité de sortie pleine échelle (correspondant au nombre 11111111) de $0,2(2^8-1) = 51\text{mA}$; lorsque le nombre binaire d'entrée évolue de 00000000 à 11111111 par pas de 1, l'intensité du courant de sortie progresse de 0 à 51mA par pas de 0,2mA (il y a $[2^8-1]$ pas c'est-à-dire 255 pas).

En pourcentage de la pleine échelle, la résolution du convertisseur est :

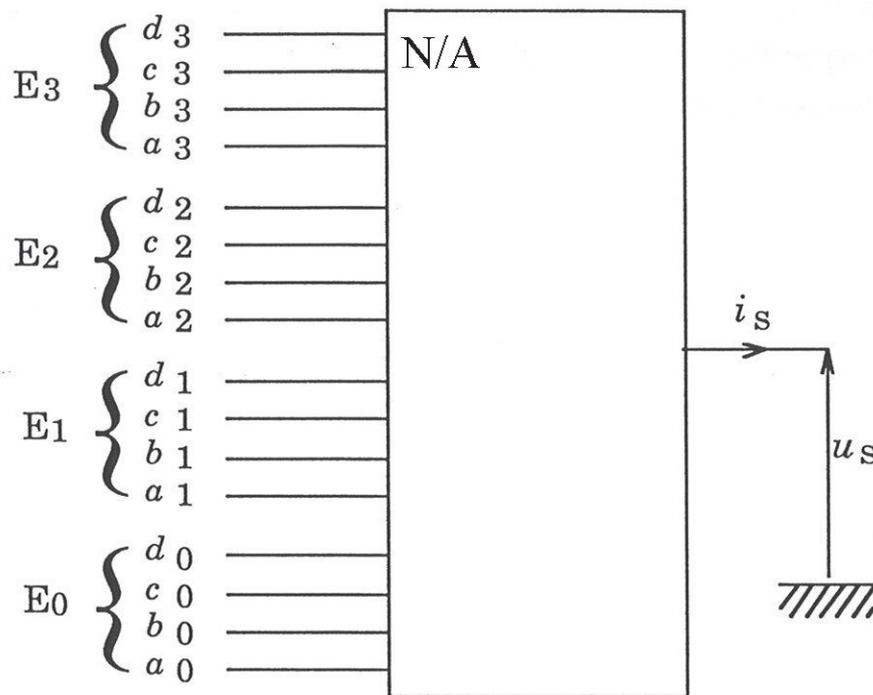
$$\frac{0,2}{51} \times 100\% = 0,4\%$$

(C'est aussi l'inverse du nombre de pas)

6.1.3.3 Code d'entrée DCB

Certains convertisseurs N/A travaillent en code DCB.

Un convertisseur de ce type pour quatre chiffres décimaux est un convertisseur 16 bits car il faut 4 bits par chiffre :



La tension ou l'intensité du courant de sortie peut alors prendre 10^4 valeurs différentes (il y a 9999 pas).

Chaque chiffre E₀, E₁, E₂ ou E₃, de quatre bits (a_i;b_i;c_i;d_i) est représenté en binaire naturel.

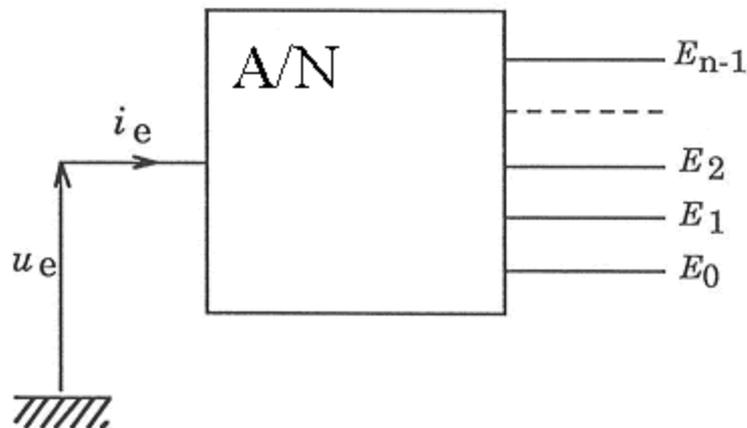
Dans chacun de ces chiffres, a_i est le bit de poids le plus faible et d_i celui de poids le plus fort. E₀ est le chiffre de poids le plus faible et E₃ celui de poids le plus fort. Deux chiffres consécutifs sont dans un rapport de 10.

La résolution d'un tel convertisseur est égale au poids du bit de poids le plus faible du chiffre de plus faible poids. Dans le cas de notre exemple, la résolution est égale au poids du bit a₀ du chiffre E₀.

En pourcentage de la pleine échelle, la résolution est représentée par l'inverse du nombre de pas, soit pour notre exemple 1/9999 c'est-à-dire $10^{-2}\%$.

6.1.4 CONVERSION ANALOGIQUE/NUMERIQUE (CAN)

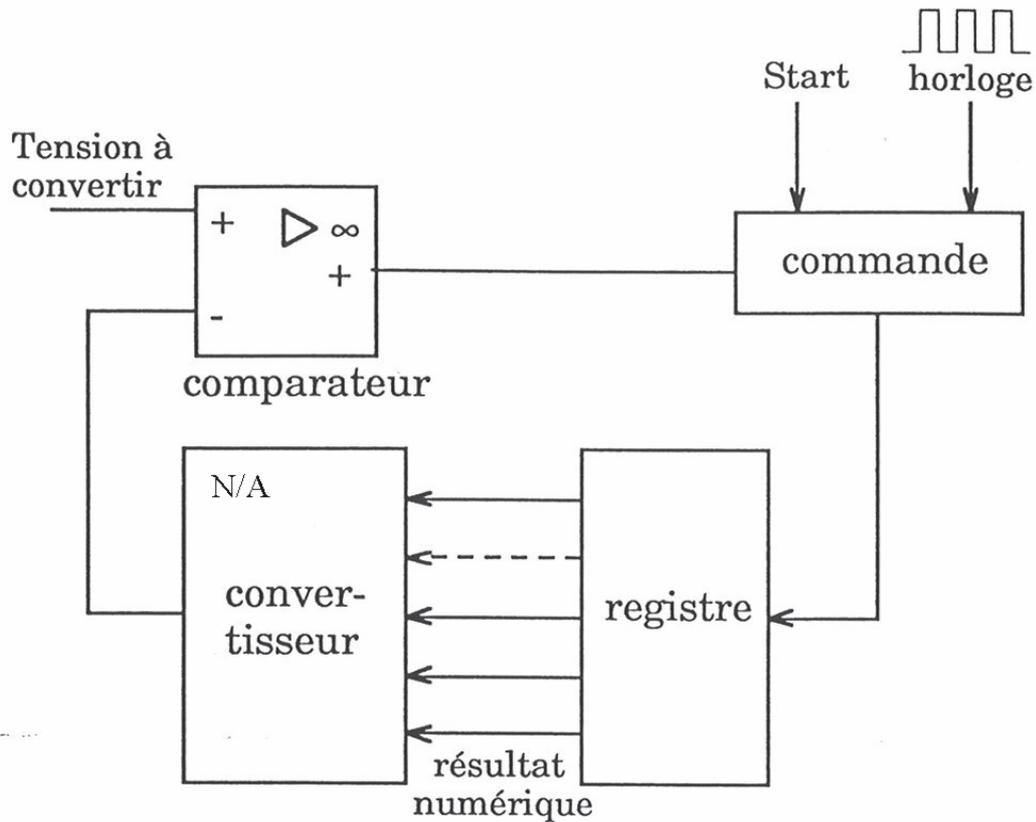
La conversion analogique numérique réalise la transformation d'une tension ou d'un courant en un signal numérique ; généralement représenté en binaire naturel ou en décimal codé binaire (DCB). La figure ci-après est la représentation symbolique du convertisseur qui réalise cette opération.



La conversion analogique numérique est plus complexe et plus longue que la conversion numérique analogique.

6.1.4.1 Principe de la conversion

Plusieurs types de convertisseurs analogique-numérique fonctionnent sur le principe représenté sur la figure suivante :

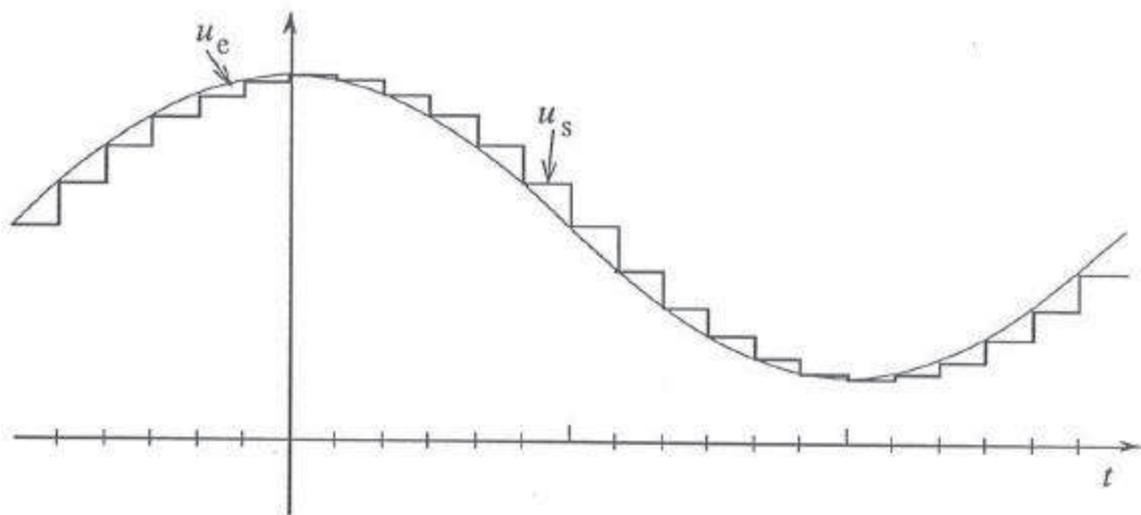
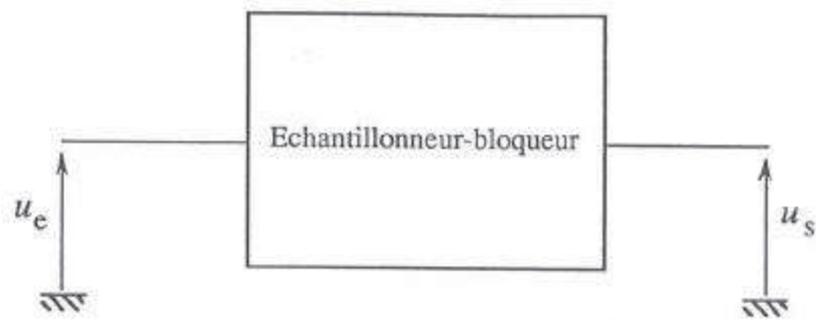


Ces convertisseurs possèdent un convertisseur numérique analogique: une logique de commande permet de lancer le processus de conversion (START) ; elle modifie, à la cadence imposée par l'horloge, le contenu binaire du registre jusqu'à l'égalité entre la tension de sortie du CNA et la tension à convertir ; la tension de sortie du comparateur change d'état ce qui provoque l'arrêt de la conversion : à la sortie du registre on dispose alors du résultat de cette conversion.

6.1.4.2 Échantillonneur-bloqueur

Si la tension à convertir évolue pendant la conversion, le fonctionnement du convertisseur peut être perturbé. Pour éviter ce mauvais fonctionnement, la tension à convertir n'est pas directement appliquée à l'entrée du CAN mais passe par un échantillonneur-bloqueur qui mémorise la tension à convertir pendant toute la durée de la conversion : c'est une tension constante qui est appliquée à l'entrée du convertisseur.

Nous avons représenté ci-après un exemple de tension obtenue à la sortie d'un échantillonneur bloqueur lorsque la tension d'entrée a une composante alternative sinusoïdale.



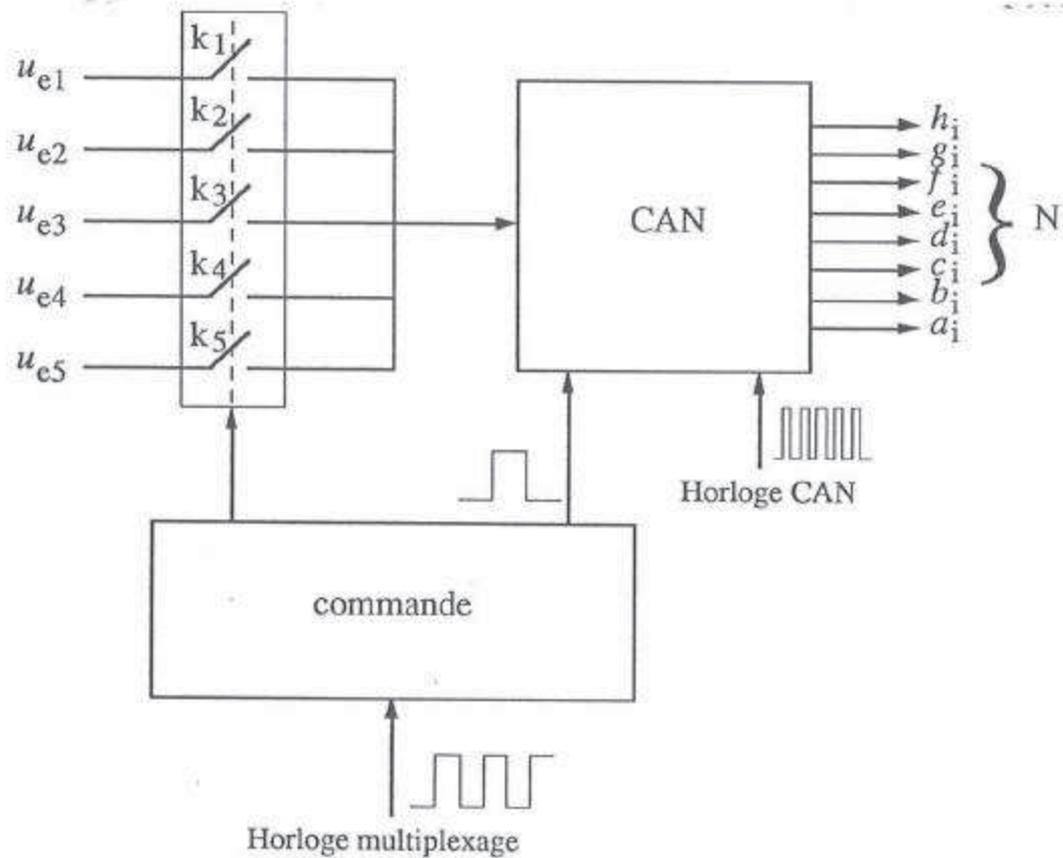
6.1.4.3 Multiplexage

Plusieurs sources peuvent fournir des tensions analogiques à un convertisseur A/N. Ne pouvant pas les convertir simultanément, on le fait fonctionner en temps partagé par multiplexage des voies auxquelles les tensions sont appliquées. Une logique de commande sélectionne la voie d'entrée et donne l'ordre du début de la conversion.

A la fin de la conversion, le convertisseur est relié à une autre voie et peut alors effectuer la conversion de la tension disponible sur cette voie. Et ainsi de suite jusqu'à ce que toutes les voies aient été "balayées".

Le cycle de fonctionnement est réglé par le signal d'horloge appliqué au circuit de commande.

Le schéma ci-après est un exemple de conversion de plusieurs tensions analogiques par un convertisseur analogique numérique.



L'une des horloges est utilisée pour la commande des interrupteurs k_1, \dots, k_2 c'est-à-dire pour sélectionner les différentes voies. L'autre horloge génère les impulsions qu'utilise le CNA.

6.2 CONVERTISSEURS NUMERIQUE/ANALOGIQUE

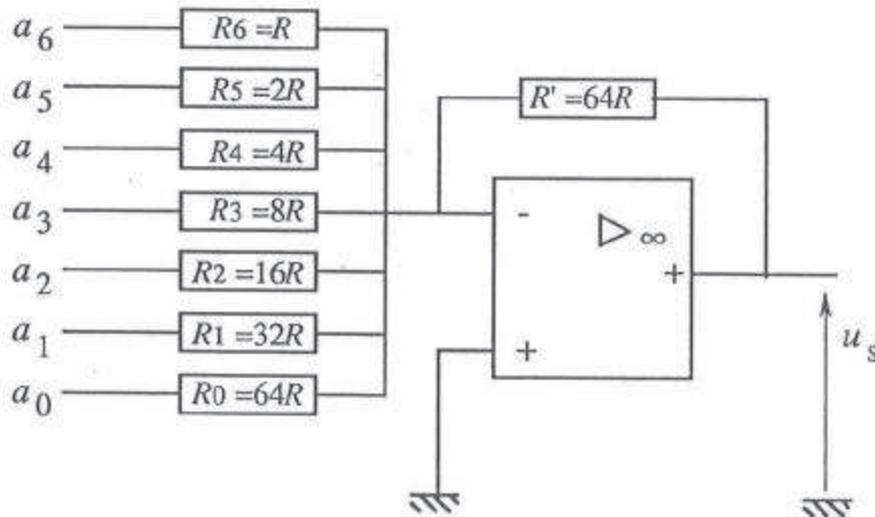
Un convertisseur numérique analogique génère une tension électrique (ou un courant électrique) proportionnelle au nombre fourni au convertisseur. Ce nombre est en général écrit sous la forme d'un binaire naturel ou d'un décimal codé binaire (DCB).

6.2.1 ECHELLES DE RESISTANCES PONDEREES

Prenons l'exemple d'un nombre binaire N codé sur n bits. Ces bits sont représentés par des tensions continues.

Il faut effectuer la somme de ces n tensions, chacune d'entre elles est affectée d'un coefficient correspondant au poids dans le nombre binaire.

Raisonnons à partir du montage suivant :



Dans l'exemple choisi, le nombre est codé sur 7 bits : $a_6, a_5, a_4, a_3, a_2, a_1, a_0$.

Les résistances $R_0, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5$ et R_6 forment une progression géométrique de premier terme R et de raison 2.

L'amplificateur opérationnel est utilisé en sommateur inverseur.

Supposons qu'à $a_6, a_5, a_4, a_3, a_2, a_1$ et a_0 correspondent respectivement les tensions $v_6, v_5, v_4, v_3, v_2, v_1$ et v_0

L'amplificateur opérationnel fonctionnant en régime linéaire, on a :
 $v^+ \approx v^-$

Appliquons le théorème de Millman à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel. Sachant que $v^+ = 0$, nous obtenons :

$$\frac{u_s}{64R} + \frac{v_0}{64R} + \frac{v_1}{32R} + \frac{v_2}{16R} + \frac{v_3}{8R} + \frac{v_4}{4R} + \frac{v_5}{2R} + \frac{v_6}{R} = 0$$

Soit encore :

$$u_s = - (v_0 + 2 v_1 + 4 v_2 + 8 v_3 + 16 v_4 + 32 v_5 + 64 v_6)$$

Chaque tension v_i est de la forme $a_i v_i$, a_i pouvant prendre les valeurs 0 ou 1 et v_i étant une tension continue E (positive ou négative).

La tension de sortie s'écrit alors :

$$u_s = - E(a_0 + 2 a_1 + 4 a_2 + 8 a_3 + 16 a_4 + 32 a_5 + 64 a_6)$$

ou encore :

$$u_s = - E(2^0 a_0 + 2^1 a_1 + 2^2 a_2 + 2^3 a_3 + 2^4 a_4 + 2^5 a_5 + 2^6 a_6)$$

Pour chaque entrée, le gain est le poids du bit dans le nombre à convertir : a_6 est le bit de poids le plus fort (M.S.B.), $2^6 = 64$ étant le poids de ce bit et a_0 est le bit de poids le plus faible (L.S.B.), $2^0 = 1$ étant le poids de ce bit.

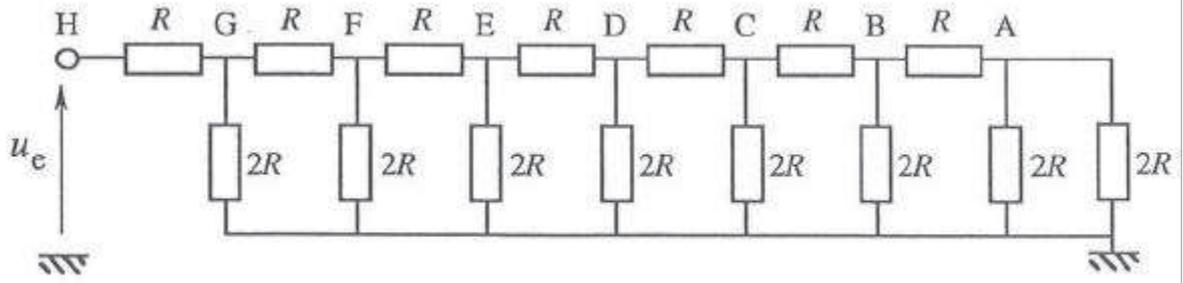
Les tensions associées aux bits correspondant ont une valeur particulière : $a_i E = 0,1$ V par exemple pour le niveau "1" (a_i est alors égal à 1) et 0 V pour le niveau "0" (a_i est alors égal à 0) . La source doit avoir une résistance interne très faible devant les résistances $R_0, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5$ et R_6 .

Pour un tel convertisseur, la tension de sortie évolue de 0 V lorsque $N=0000000$ à -12,7 V lorsque $N=1111111$. Suivant la valeur de N , il y a 2^n , soit ici 128 valeurs différentes possibles de la tension de sortie u_s .

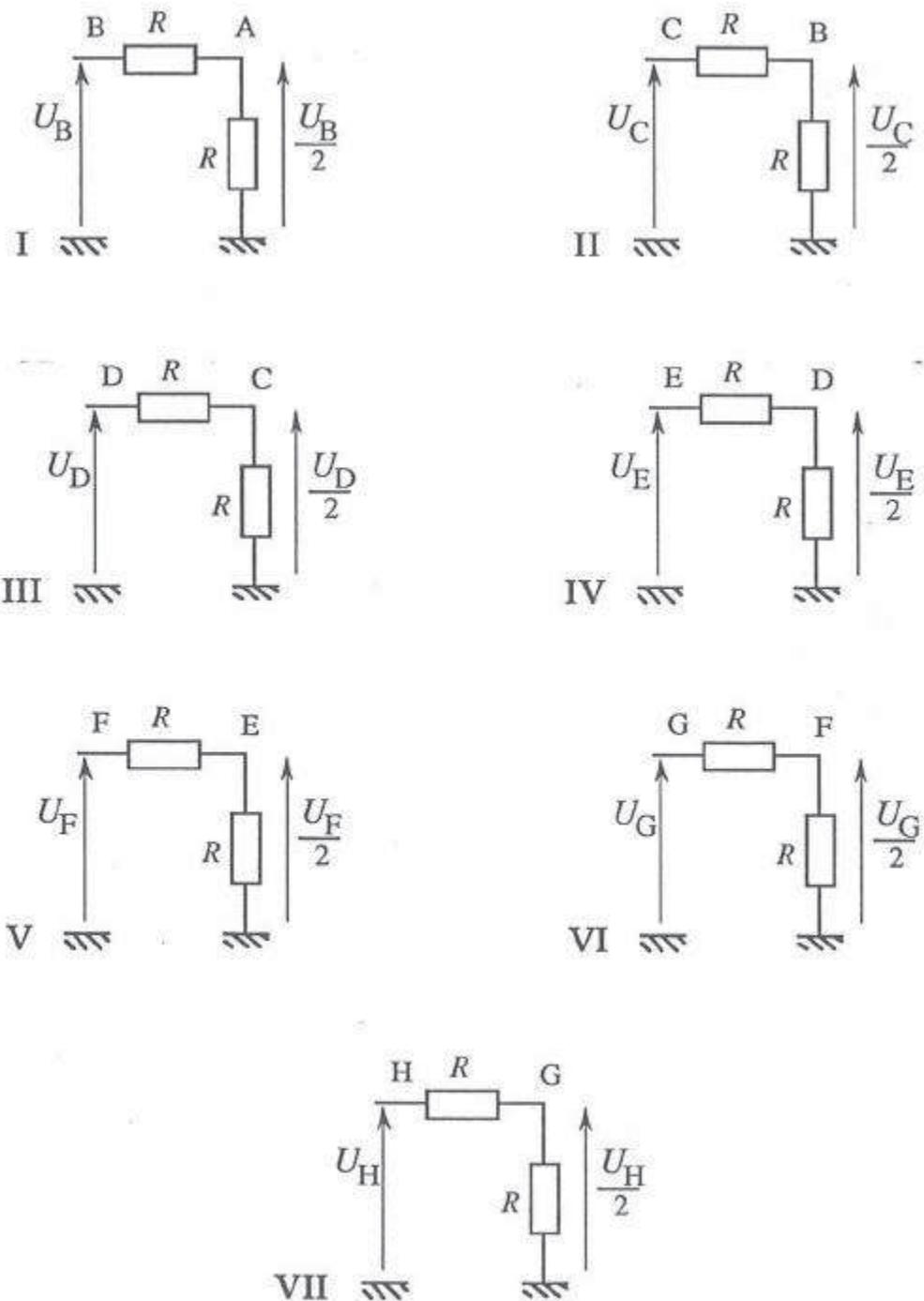
Dans notre exemple, nous avons choisi des états haut et bas de tension, nous aurions pu choisir des états haut et bas de courant, l'alimentation d'entrée aurait alors été un générateur de courant. Sur le module CNA (réf. 3806), nous proposons les deux possibilités d'étude.

6.2.2 RÉSEAU R-2R

Etudions le montage suivant :



Evaluons les tensions disponibles en A, B, C, D, E, F et G. En partant de la droite et en remontant progressivement le long du schéma vers la gauche, nous obtenons les schémas réduits suivants :



Remarque :

Pour l'obtention de ces schémas il faut utiliser le fait que:

- deux résistances de même valeur $2R$ associées en parallèle sont équivalentes à une résistance de valeur R ;
- deux résistances de même valeur R associées en série sont équivalentes à une résistance de valeur $2R$.

De ces schémas, nous en déduisons que :

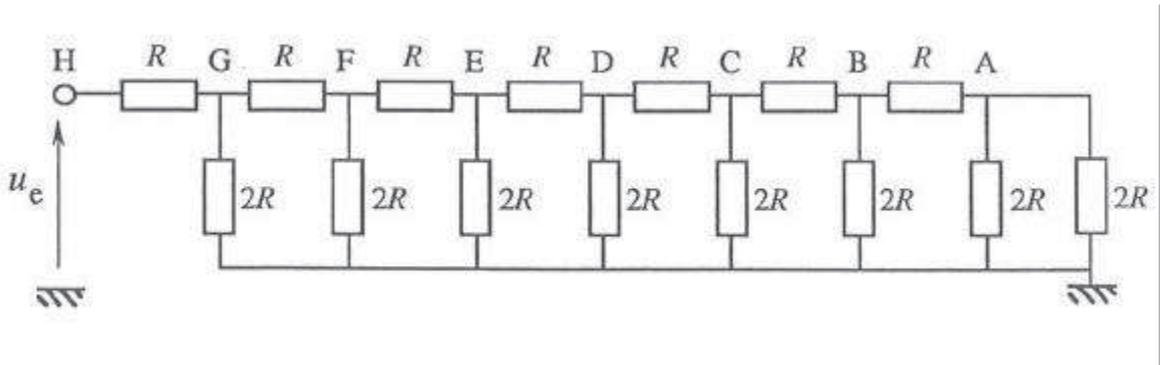
$$U_A = U_B/2, U_B = U_C/2, U_C = U_D /2, U_D = U_E/2, U_E = U_F/2, U_F = U_G/2 \text{ et } U_G = U_H/2$$

Comme $U_H = U_e$, nous obtenons :

$$U_A = U_e/128, U_B = U_e/64, U_C = U_e/32, U_D = U_e/16, U_E, U_e/8, U_F = U_e/4, U_G = U_e/2 \text{ et } U_H = U_e.$$

On dispose alors d'une gamme de tensions pondérées au moyen de deux valeurs seulement de résistances (R et 2R).

En réalisant le montage de la figure ci-après, rien n'est changé quant aux potentiels de $U_A, U_B, U_C, U_D, U_E, U_F, U_G$ et U_H :



En effet, l'amplificateur opérationnel est muni d'une contre-réaction : l'entrée non-inverseuse étant à la masse, le potentiel de l'entrée inverseuse est égal à zéro.

Le montage est un sommateur inverseur. La tension de sortie u_s est égale à :

$$u_s = -(U_A + U_B + U_C + U_D + U_E + U_F + U_G + U_H)$$

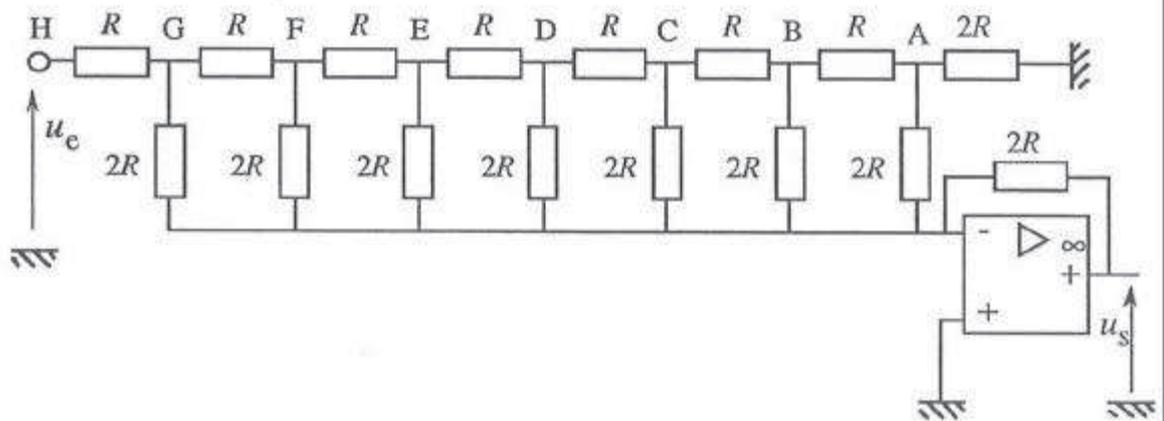
Soit encore en remplaçant $U_A, U_B, U_C, U_D, U_E, U_F, U_G$ et U_H par leurs valeurs en fonction de u_e :

$$u_s = -u_e \left(\frac{1}{128} + \frac{1}{64} + \frac{1}{32} + \frac{1}{16} + \frac{1}{8} + \frac{1}{4} + \frac{1}{2} + 1 \right)$$

Remarque :

Le choix d'une résistance 2R sur le circuit de réaction de l'amplificateur opérationnel permet l'obtention d'une tension de sortie indépendante de la valeur de R.

En intégrant une logique de commande permettant la déconnexion des résistances $2R$ (voir figure ci-après), on fait disparaître le terme correspondant dans la somme.



Pour l'exemple ci-dessus, la tension de sortie a pour expression :

$$u_s = -u_e \left(\frac{1}{128} + 0 + \frac{1}{32} + 0 + \frac{1}{8} + 0 + \frac{1}{2} + 0 \right)$$

Soit encore :

$$u_s = -u_e \left(\frac{85}{128} \right)$$

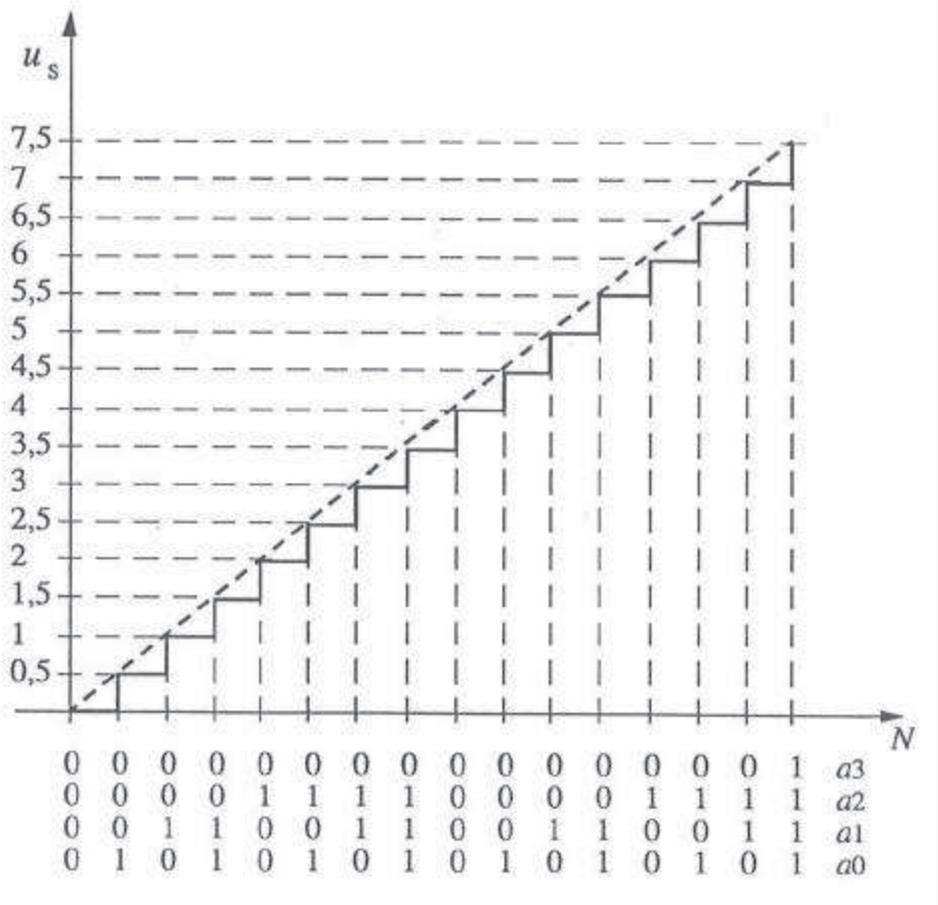
6.2.3 CARACTERISTIQUES D'UN CNA

6.2.3.1 Caractéristique de transfert d'un CNA idéal

C'est la courbe $u_s(N)$. La grandeur de commande étant une grandeur discontinue, la caractéristique de transfert est une courbe en escalier. L'enveloppe de cette caractéristique est une droite dans le cas d'un convertisseur idéal.

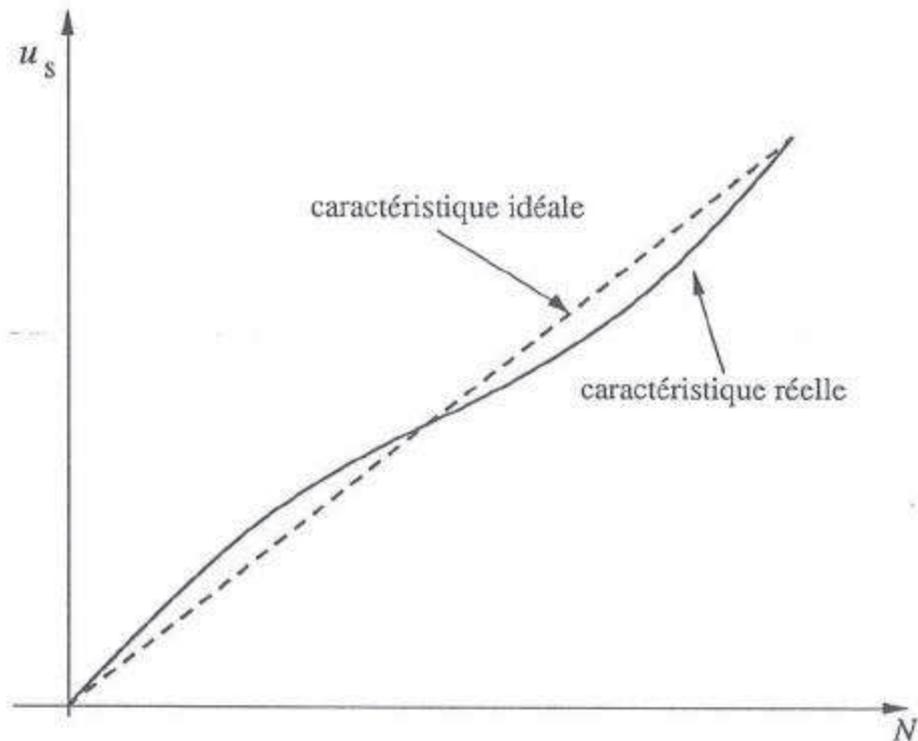
Exemple :

Caractéristique de transfert d'un CNA de 4 bits.



6.2.3.2 Caractéristique de transfert d'un CNA réel

L'enveloppe de la caractéristique de transfert d'un CNA réel n'est plus une droite mais une courbe, la différence étant essentiellement due à la dispersion des composants utilisés.



6.2.3.3 Précision d'un CNA réel

La précision d'un CNA, est l'écart maximal entre les enveloppes de la caractéristique réelle et de la caractéristique idéale divisé par la valeur maximale de la tension de sortie appelée tension pleine échelle.

6.2.3.4 Temps de conversion

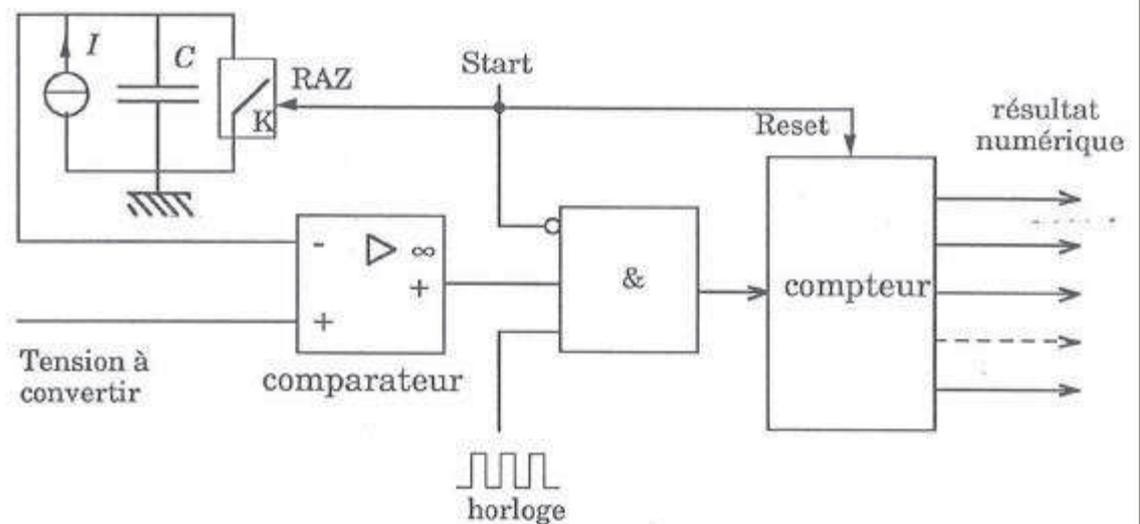
Le temps de conversion est la durée nécessaire pour que la tension de sortie soit acquise avec une précision déterminée lors du passage de la commande numérique de zéro au nombre maximal que l'on peut appliquer à l'entrée du CNA.

6.3 CONVERTISSEURS ANALOGIQUE / NUMERIQUE

On dispose d'une tension analogique et on désire la convertir en un nombre.

6.3.1 CONVERTISSEUR SIMPLE RAMPE

Considérons le montage de la figure ci-après :



L'entrée START, soumise à une impulsion de tension, met à zéro le compteur, ferme l'interrupteur analogique K et bloque l'opérateur ET, ce qui empêche le passage des impulsions d'horloge et ceci tant qu'elle reste au niveau haut.

Le dispositif est alors dans l'état suivant : le compteur est à zéro, la tension aux bornes du condensateur est nulle et la sortie du comparateur est à l'état haut.

Lorsque l'entrée START passe à l'état bas, l'opérateur ET est validé : le signal d'horloge peut alors passer et arriver jusqu'au compteur. En même temps que la validation de l'opérateur ET, l'interrupteur analogique K s'ouvre et la conversion peut commencer.

Le condensateur se charge à courant constant.

A l'instant $t = 0$, la tension aux bornes du condensateur est nulle ; le condensateur se charge et la tension à ses bornes croît linéairement en fonction du temps :

$$u_c = It/C$$

Cette croissance s'accompagne de la progression du contenu du compteur qui augmente tant que la tension aux bornes du condensateur reste inférieure à la tension u_e à convertir.

Lorsqu'à l'instant $t = t_1$ ce dernier niveau ($u_c = u_e$) est atteint, la sortie du comparateur passe à l'état bas, ce qui donne l'ordre de fin de conversion car il y a blocage des impulsions d'horloge arrivant au compteur et conservation du nombre d'impulsions qui l'ont effectivement atteint.

On a donc

$$u_e = It_1/C$$

Soit :

$$t_1 = C u_e / I$$

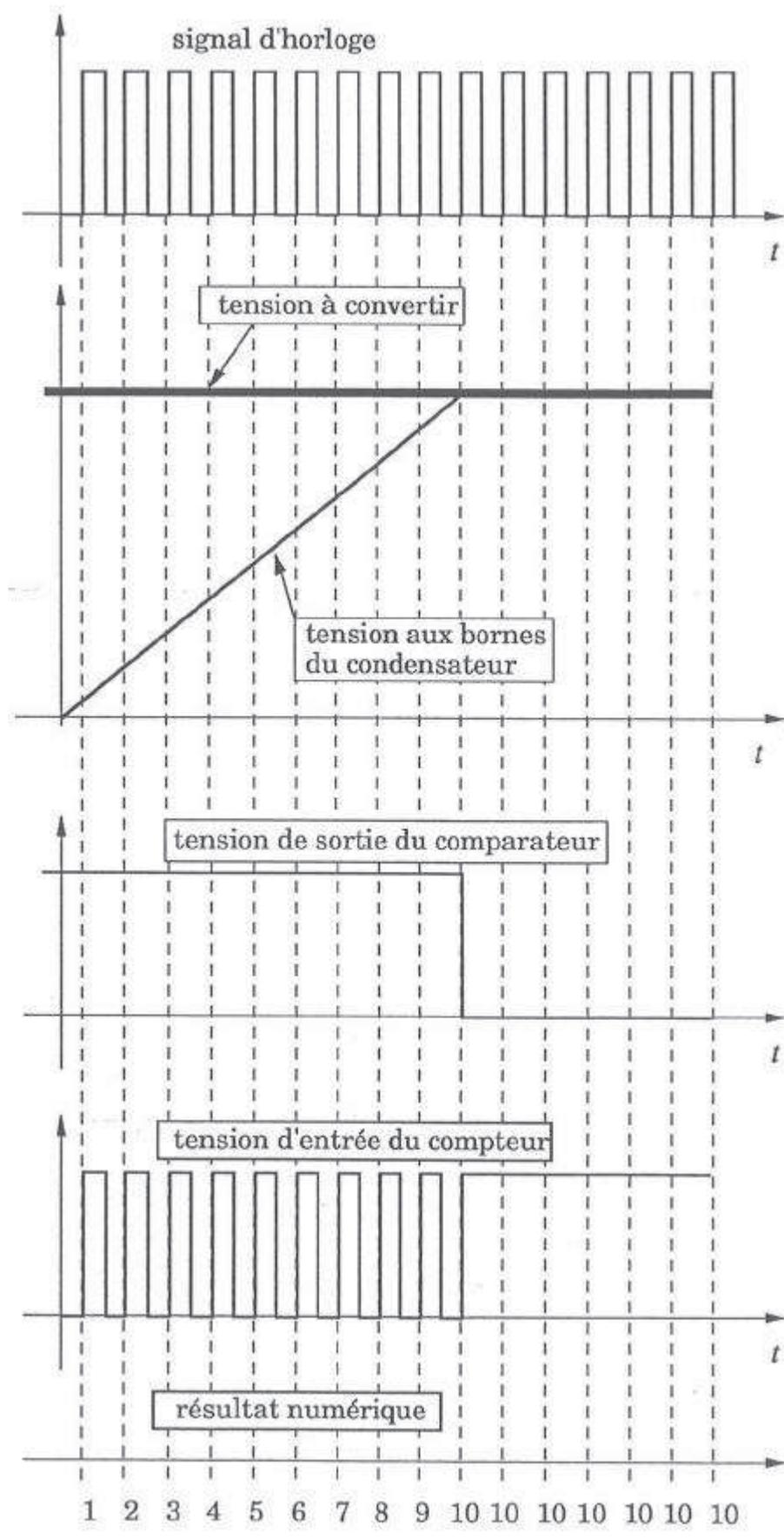
I et C étant des constantes, la mesure de u_e se ramène à celle de t_1 . Pendant la durée de la charge, le compteur compte les impulsions, de période T, générées par l'horloge.

Le nombre N obtenu est égal à :

$$N = t_1 / T = C u_e / TI$$

Ce nombre est **le résultat numérique de la tension analogique à convertir.**

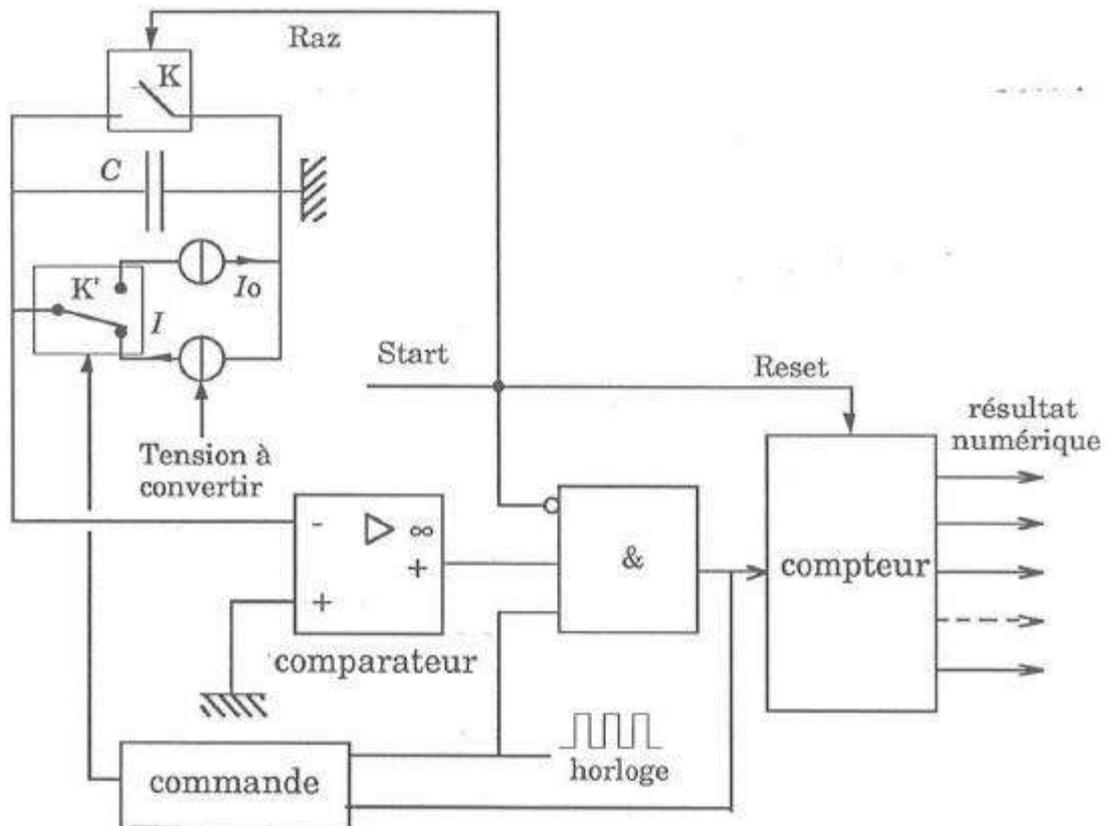
Les chronogrammes représentés sur la figure suivante illustrent le fonctionnement de ce convertisseur.



Ce type de convertisseur est facile à mettre en oeuvre mais sa précision dépend de celle de la capacité du condensateur, de la stabilité de la fréquence de l'horloge. Pour éviter ces inconvénients, on utilise un convertisseur double rampe.

6.3.2 CONVERTISSEUR DOUBLE RAMPE

Le principe de ce convertisseur est représenté sur la figure ci-après :



L'entrée START, soumise à une impulsion de tension, met à zéro le compteur, ferme l'interrupteur analogique K et bloque l'opérateur ET, ce qui empêche le passage des impulsions d'horloge et ceci tant qu'elle reste au niveau haut.

Le dispositif est alors dans l'état suivant : le compteur est à zéro, la tension aux bornes du condensateur est nulle et la sortie du comparateur est à l'état haut.

Lorsque l'entrée START passe à l'état bas, l'opérateur ET est validé : le signal d'horloge peut alors passer et arriver jusqu'au compteur. En même temps que la validation de l'opérateur ET, l'interrupteur analogique K s'ouvre et la conversion peut commencer.

- Pendant une durée τ_1 fixée, le condensateur est chargé à courant I , constant, l'intensité I étant proportionnelle à la tension u_e à convertir ($I = k u_e$). Au bout de cette durée, la tension aux bornes du condensateur est u_{ce} .

- Le condensateur est ensuite déchargé à l'aide d'un générateur de courant d'intensité I_0 indépendante de la tension à convertir, jusqu'à atteindre, au bout d'une durée τ_2 , la tension $u_c = 0$. Le compteur compte le nombre d'impulsions transmises pendant cette décharge. Lorsque $u_c = 0$, la tension de sortie du comparateur change d'état, ce qui arrête le comptage.

- La quantité d'électricité emmagasinée pendant la charge est égale à celle fournie pendant la décharge. Soit :

$$I \tau_1 = I_0 \tau_2 = C u_{ce}$$

Les nombres d'impulsions d'horloge de période T pendant les durées τ_1 et τ_2 sont respectivement N_1 et N_2 .

De plus $I = k u_e$, d'où :

$$\begin{aligned} N_1 T k u_e &= N_2 T I \\ N_2 &= k N_1 u_e / I \end{aligned}$$

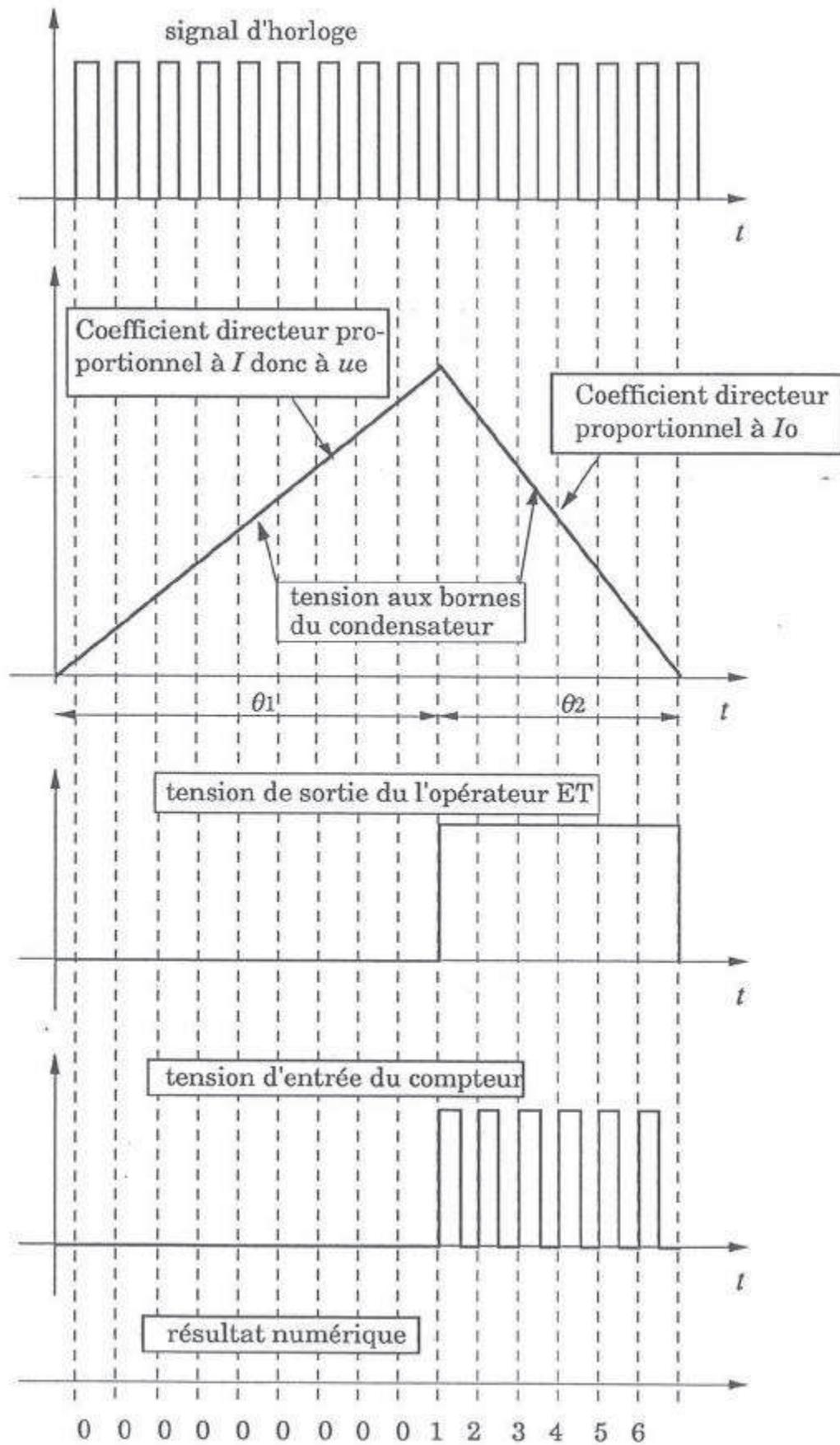
Soit :

N_1 , I , et k étant des constantes, le nombre d'impulsions N_2 est proportionnel à la tension à convertir.

Ce nombre est **le résultat numérique de la tension analogique à convertir**.

Le résultat de la conversion ne dépend plus de la fréquence du signal d'horloge et de la valeur du condensateur.

Les chronogrammes représentés sur la figure suivante illustrent le fonctionnement de ce convertisseur.



Ce type de convertisseur est très utilisé dans les systèmes d'affichage (multimètre...).

Ces convertisseurs sont relativement lents.

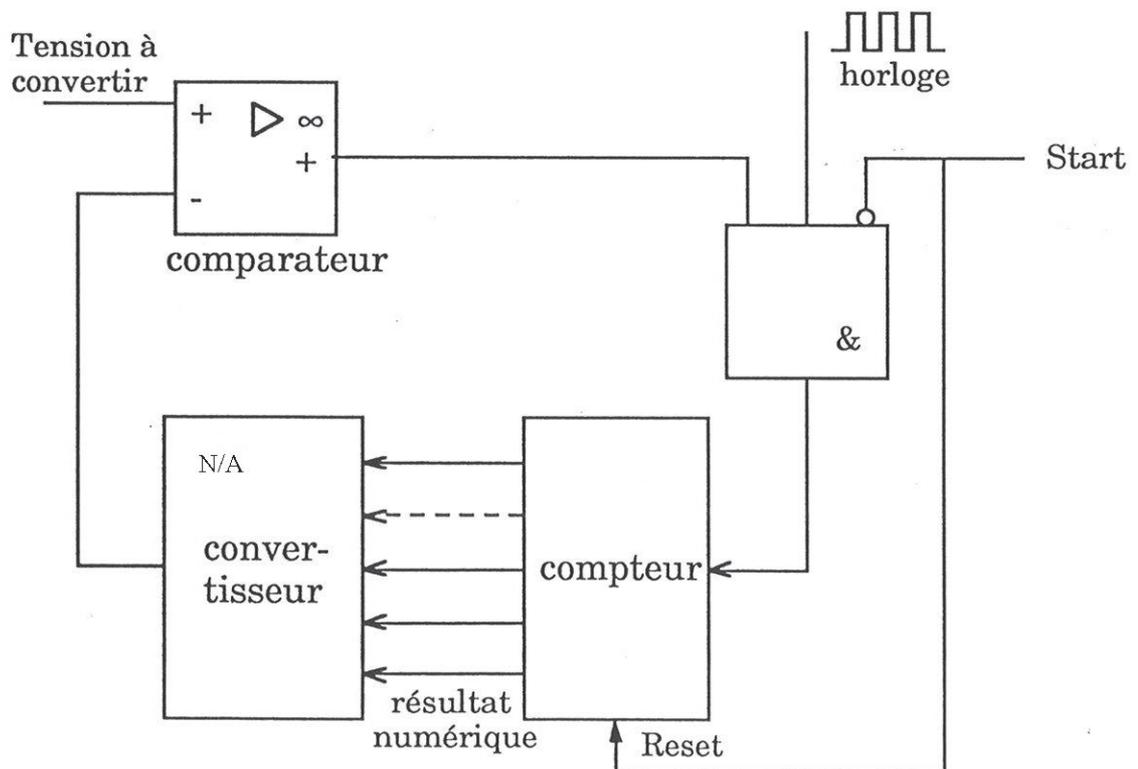
Remarque :

Sur la maquette d'étude, nous proposons une variante de ce montage.

6.3.3 CONVERSION PAR COMPTAGE

Ce type de convertisseur est appelé aussi convertisseur à rampe numérique.

La tension analogique à convertir est comparée à la tension de sortie d'un convertisseur numérique analogique. Cette tension est l'image analogique du contenu d'un compteur binaire.



L'entrée START, soumise à une impulsion de tension, met à zéro le compteur et bloque l'opérateur ET, ce qui empêche le passage des impulsions d'horloge et ceci tant qu'elle reste au niveau haut.

Le dispositif est alors dans l'état suivant : le compteur est à zéro, la tension de sortie du convertisseur est nulle et la sortie du comparateur est à l'état haut.

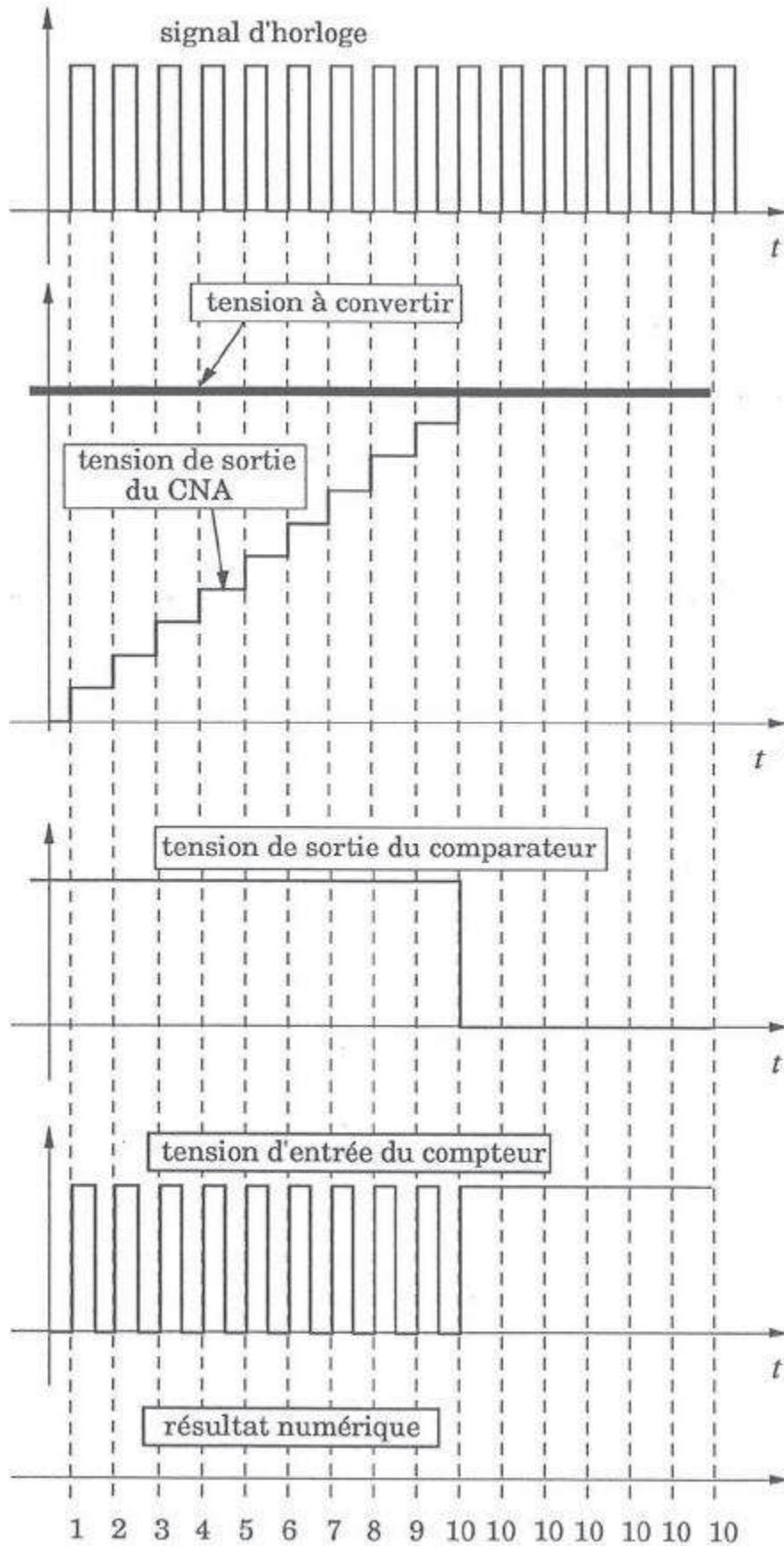
Lorsque l'entrée START passe à l'état bas, l'opérateur ET est validé : le signal d'horloge peut alors passer et arriver jusqu'au compteur.

La progression du contenu du compteur augmente la tension de sortie du CNA échelon après échelon jusqu'à l'obtention d'une tension égale ou légèrement supérieure à la tension à convertir.

Lorsque ce dernier niveau est atteint, la sortie du comparateur passe au niveau bas, ce qui donne l'ordre de fin de conversion car il y a blocage des impulsions d'horloge arrivant au compteur et conservation du nombre d'impulsions qui l'ont effectivement atteint.

Ce nombre est le **résultat numérique de la tension analogique à convertir.**

Les chronogrammes représentés sur la figure suivante illustrent le fonctionnement de ce type de convertisseur.



- Comme pour les convertisseurs à rampe, la durée de la conversion est longue.

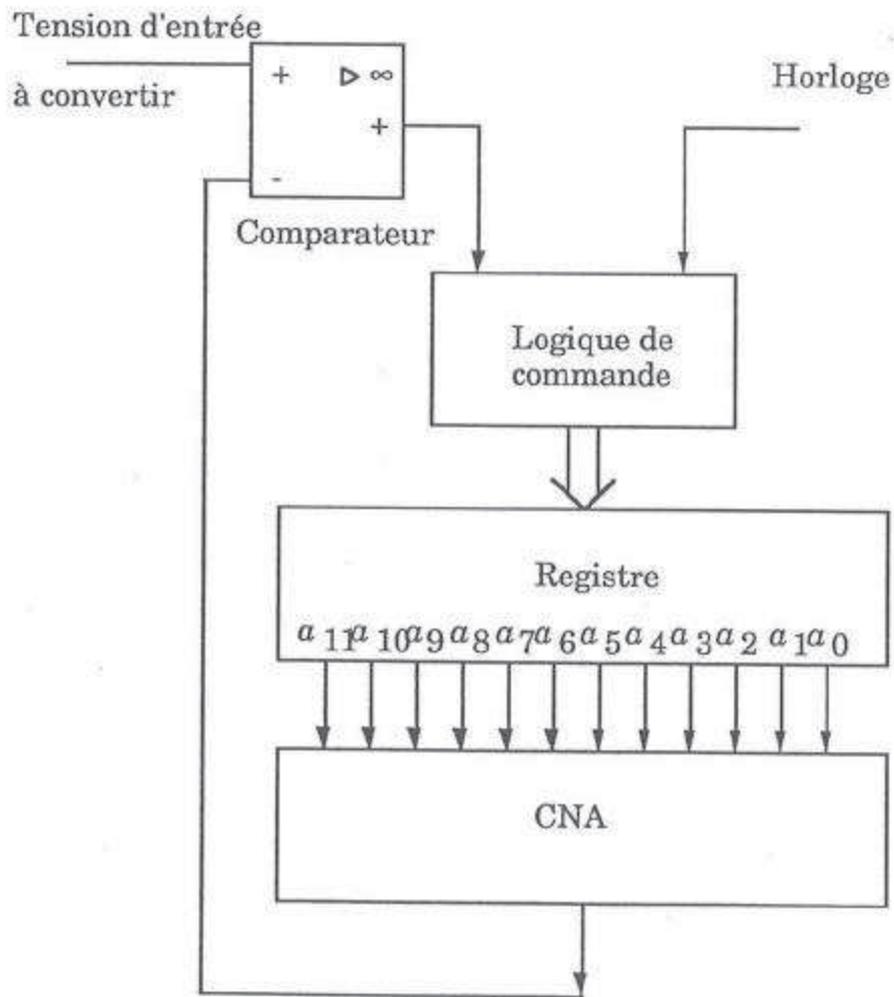
La précision du convertisseur à comparaison directe dépend de celle du CNA utilisé pour produire la tension de comparaison.

- La structure d'un CAN à rampe numérique et celle du CAN à simple rampe, sont comparables. La différence réside dans le mode d'élaboration de la tension de rampe.

Le CAN à rampe numérique a une structure en chaîne fermée.

6.3.4 CONVERTISSEUR A APPROXIMATIONS SUCCESSIVES

La figure ci-après illustre la structure d'un convertisseur à approximations successives.



Les éléments de base d'un convertisseur à approximations successives sont :

- un comparateur,
- un convertisseur CNA,
- un registre,
- une logique de commande.

Nous avons pris l'exemple d'un convertisseur 12 bits. La conversion se fait par comparaison en commençant par le bit de poids le plus fort.

Au départ a_{11} est à "1", tous les autres étant à "0".

Deux cas se posent :

- soit la tension de sortie du CNA est inférieure à la tension à convertir : a_{11} reste à "1" et le bit précédent, a_{10} , est mis à "1" ;
- soit la tension de sortie du CNA est supérieure à la tension à convertir : alors a_{11} est mis à "0" et le bit précédent, a_{10} , est mis à "1" .

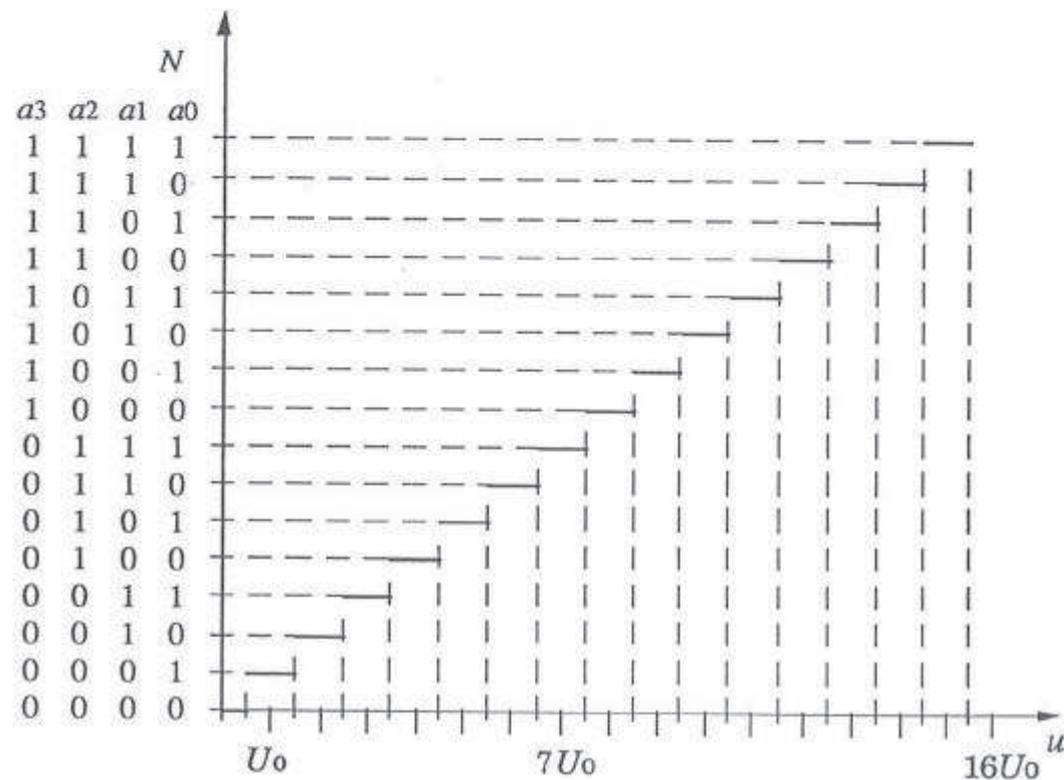
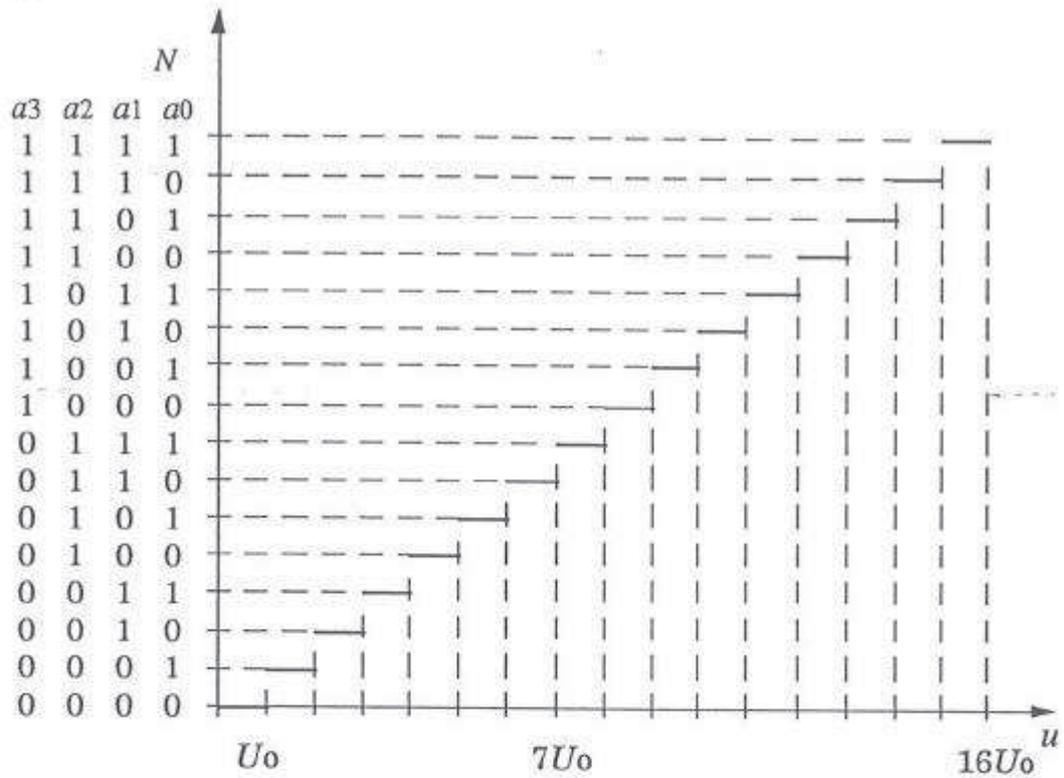
On continue ainsi la comparaison avec les bits suivants jusqu'à l'obtention à la sortie du CNA d'une tension égale à la tension à convertir.

Une telle conversion se fait très rapidement.

En effet, il est beaucoup plus rapide d'effectuer une série de comparaisons que de modifier un nombre bit par bit en commençant par le bit de poids le plus faible.

La figure ci-après illustre ce type de conversion :

On dit qu'il y a quantification de la tension u car pour toutes les valeurs de cette tension u comprises dans une plage d'étendue U_0 , le nombre N conserve la même valeur. U_0 est la résolution du convertisseur. Dans la pratique, deux courbes de conversion sont possibles.



32

Dans ce dernier cas, on dit que la courbe est centrée par rapport à U_0 .
 On constate que chaque mesure est entachée d'une erreur systématique qui est appelée erreur de quantification. Dans le second cas, elle est au

maximum de $\pm U_o/2$ (en numérique cela correspond à $\pm 1/2$ du bit de poids le plus faible)

Comme dans le cas d'un CNA, l'enveloppe de la caractéristique de transfert d'un CAN idéal est une droite alors que celle d'un CAN réel est une courbe.

La précision d'un CAN est l'écart maximal entre les enveloppes, de la caractéristique réelle et de la caractéristique idéale divisé par la valeur maximale de la tension d'entrée.

La durée de conversion est le temps nécessaire pour que la grandeur numérique de sortie soit acquise lors du passage de la commande analogique de zéro à la valeur correspondant au maximum de l'échelle.

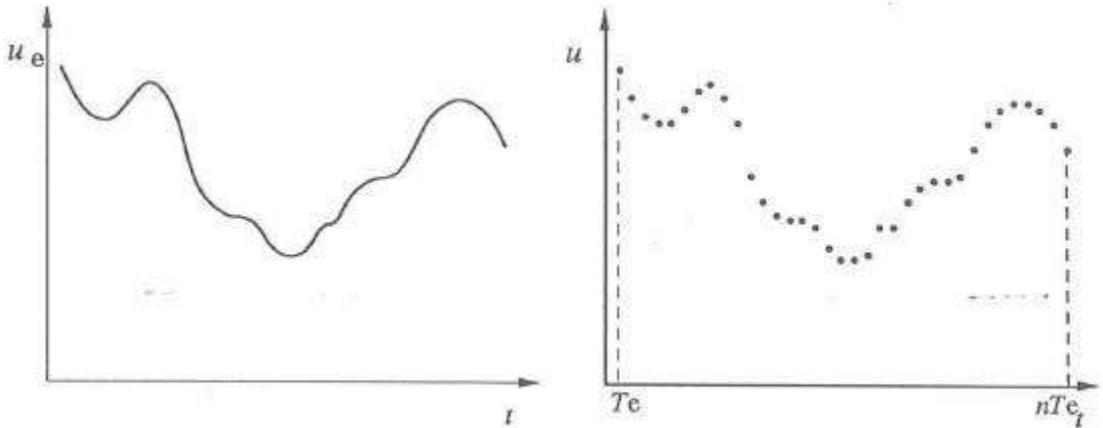
6.4 ACQUISITION ET TRAITEMENT DES SIGNAUX

6.4.1 ACQUISITION DES SIGNAUX

La conversion analogique numérique n'est pas un processus instantané : la tension analogique d'entrée doit être maintenue constante entre les instants où s'effectue la conversion. Pour cela, il est nécessaire d'ajouter un dispositif qui "bloque le signal" durant toute la durée de la conversion et qui soit cependant capable de suivre l'évolution du signal : ce dispositif supplémentaire est appelé échantillonneur-bloqueur.

6.4.1.1 Signal échantillonné

Les figures ci-après représentent une tension et cette même tension échantillonnée :



Le signal échantillonné est constitué, comme son nom l'indique, d'échantillons du signal initial prélevés à des instants régulièrement espacés.

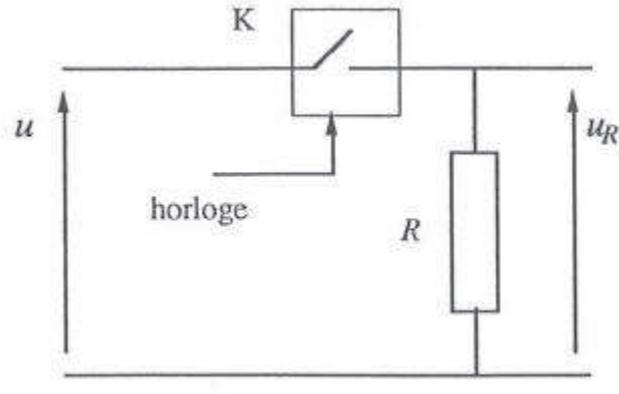
Appelons T_e la période d'échantillonnage : le signal n'est défini qu'aux instants :

$$T_e, 2T_e, 3T_e, \dots, nT_e.$$

Pour tout autre instant; le signal n'est pas défini.
Un tel signal est dit **discret**.

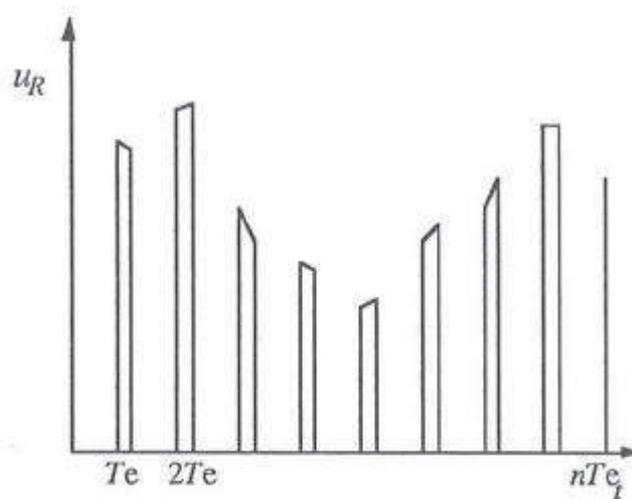
Ce type de signal ne peut pas être obtenu expérimentalement mais il est possible de s'en rapprocher.

Pour cela on peut par exemple utiliser le dispositif de la figure suivante :



K est un interrupteur analogique dont la fermeture et l'ouverture, sont commandées par un signal impulsionnel de période T_e et dont la durée t de l'état haut (qui correspond à la fermeture de K) doit être très faible. Pour un état haut du signal d'horloge, nous pouvons écrire que $u_R = u$ et pour un état bas de ce même signal $u_R = 0$.

Le signal pseudo-échantillonné a alors la forme suivante



La tension u_R a pour expression

$$u_R = h.u$$

h vaut 1 pendant la durée t et 0 pendant le reste de la période T_e .

Avec une durée t petite, on retrouve pratiquement le signal échantillonné précédent.

6.4.1.2 Reconstitution du signal

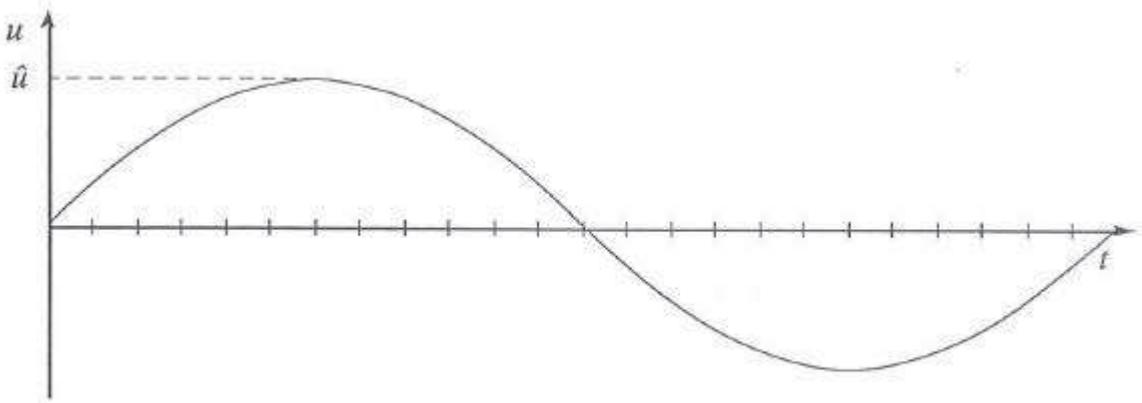
Le signal échantillonné doit contenir toutes les informations contenues dans le signal initial.

Plus il y aura d'échantillons, plus il sera facile de reconstituer le signal initial. La fréquence d'échantillonnage doit être la plus grande possible. Comme elle ne peut pas être infinie, il ne sera pas possible d'échantillonner des signaux dont les variations sont très rapides. Il y a donc une limite inférieure de la fréquence d'échantillonnage.

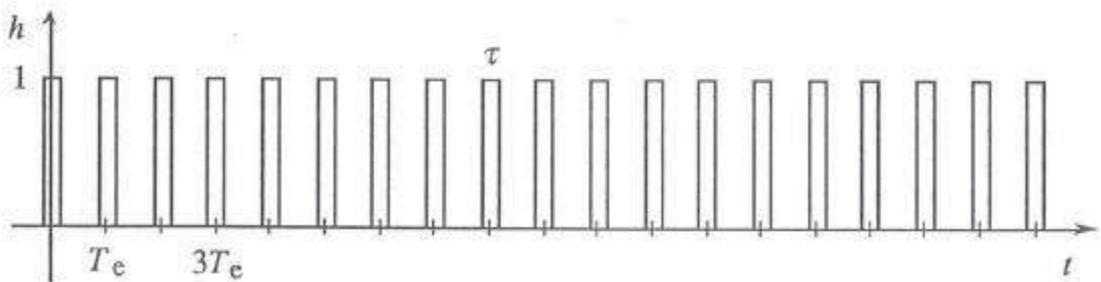
Exemple :

Nous désirons échantillonner une tension sinusoïdale d'expression

$$u = \hat{u} \sin(\omega t)$$



Pour cela nous utilisons un signal périodique et rectangulaire 0/1 :



La fonction étant paire, sa représentation en série de Fourier s'écrit :

$$h = \bar{h} + \sum_{n=1}^{\infty} h_n \cos(n\Omega t)$$

\bar{h} est la valeur moyenne de h . Elle est égale à :

$$\bar{h} = \frac{\tau}{T_e}$$

Ω est la pulsation du signal d'horloge :

$$\Omega = \frac{2\pi}{T_e}$$

Les amplitudes des harmoniques se calculent à partir de la relation :

$$h_n = \frac{4}{T_e} \int_0^{\tau/2} \cos(n\Omega t) dt$$

Ce qui donne :

$$h_n = \frac{2}{n\pi} \sin\left(n\pi \frac{\tau}{T_e}\right)$$

La grandeur h s'écrit alors :

$$h = \frac{\tau}{T_e} + \sum_1^{\infty} \frac{2}{n\pi} \sin\left(n\pi \frac{\tau}{T_e}\right) \cos(n\Omega t)$$

Le signal échantillonné e étant égal au produit $h.u$, pour notre exemple nous obtenons :

$$e = hu = \bar{h}\hat{u} \sin(\omega t) + \sum_1^{\infty} h_n \hat{u} \cos(n\Omega t) \sin(\omega t)$$

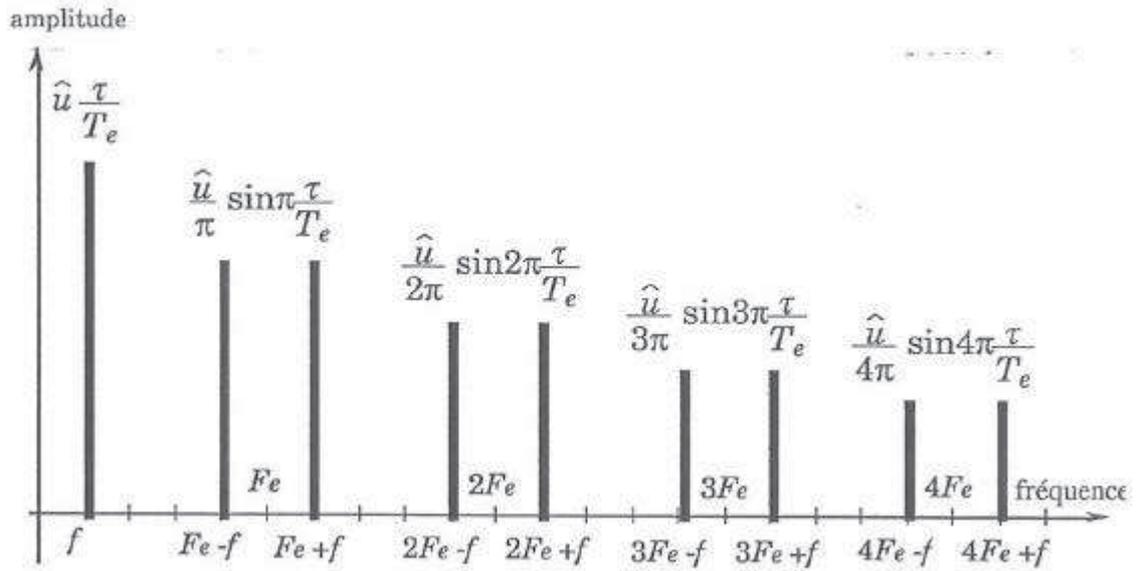
Par application de la relation :

$$\sin a \cos b = \frac{1}{2} [\sin(a+b) + \sin(a-b)]$$

Nous obtenons :

$$e = \bar{h}\hat{u} \sin(\omega t) + \frac{1}{2} \sum_1^{\infty} h_n \hat{u} [\sin(n\Omega + \omega)t + \sin(n\Omega - \omega)t]$$

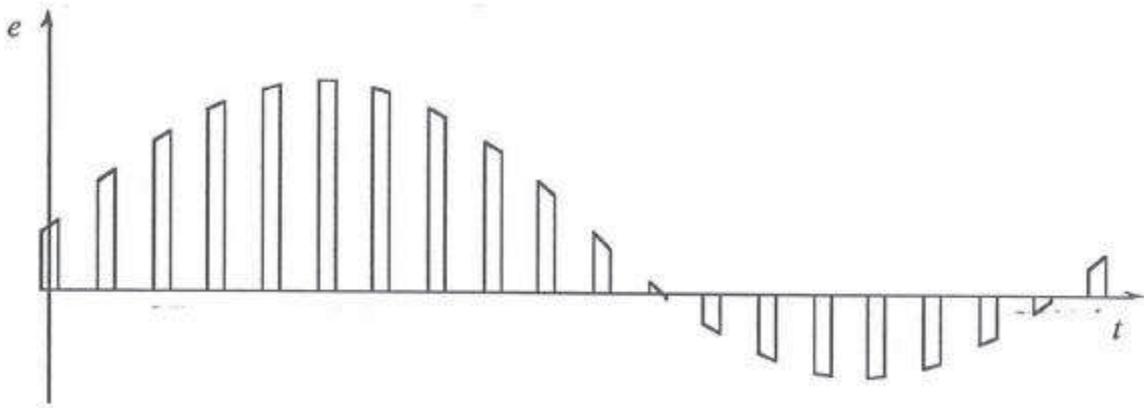
Ce qui donne le spectre de fréquences suivant :



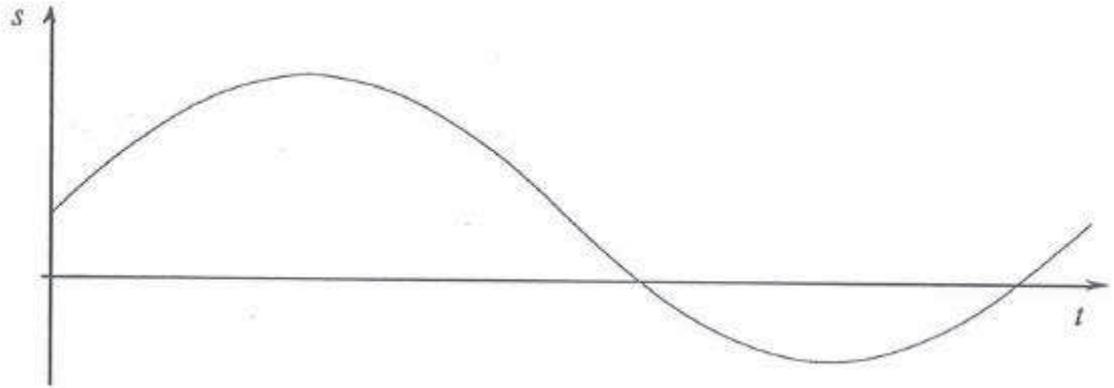
Nous observons une composante de fréquence f et d'amplitude $\hat{u} \frac{\tau}{T_e}$ deux composantes de fréquences F_e+f et F_e-f et d'amplitude $\frac{\hat{u}}{\pi} \sin \pi \frac{\tau}{T_e}$, deux composantes de fréquences $2F_e+f$ et $2F_e-f$ et d'amplitude $\frac{\hat{u}}{2\pi} \sin 2\pi \frac{\tau}{T_e}$, deux composantes de fréquences $3F_e+f$ et $3F_e-f$ et d'amplitude $\frac{\hat{u}}{3\pi} \sin 3\pi \frac{\tau}{T_e}$, ...

Pour reconstituer le signal, il faut éliminer toutes les fréquences autres que f . Pour cela on utilise un filtre passe bas.

Le signal échantillonné $e = hu$ a la forme suivante :

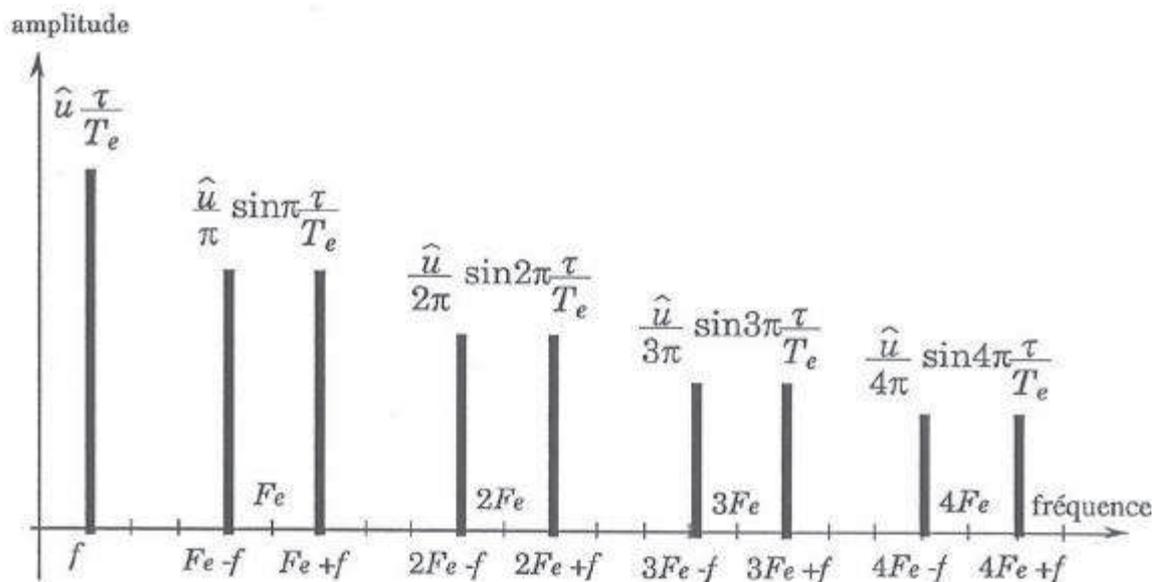


A la sortie du filtre passe-bas, nous retrouvons l'enveloppe de ce signal qui est, à une composante continue près, le signal initial :



6.4.1.3 Fréquence d'échantillonnage

Reprenons la figure illustrant l'analyse spectrale :



Pour que ce que nous avons décrit précédemment soit réalisable, il faut que la raie de fréquence f soit effectivement la première raie.

Ce qui nécessite la relation suivante :

$$f < Fe - f$$

c'est-à-dire :

$$Fe > 2f$$

Il faut donc que le signal échantillonné comporte au moins deux échantillons par période du signal u .

Ce résultat est connu sous le nom de théorème de Shannon.

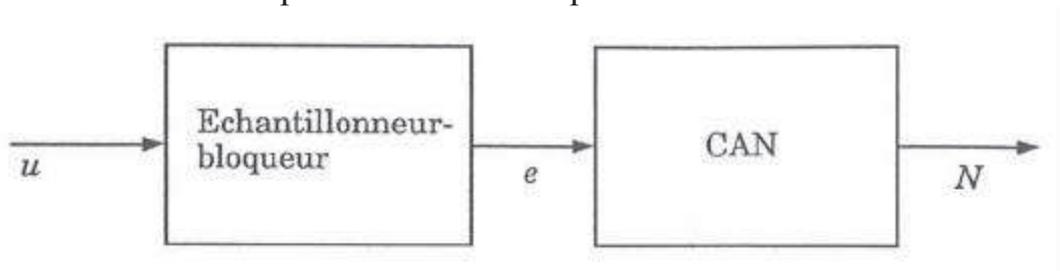
Remarque :

La condition sur la fréquence ne suffit pas. Il faut également que le signal échantillonné soit formé par des portions de courbe les plus fines possibles : il faut donc que t tende vers zéro, les portions de courbes sont, alors assimilables à des points.

6.4.1.4 Principe de l'échantillonneur-bloqueur

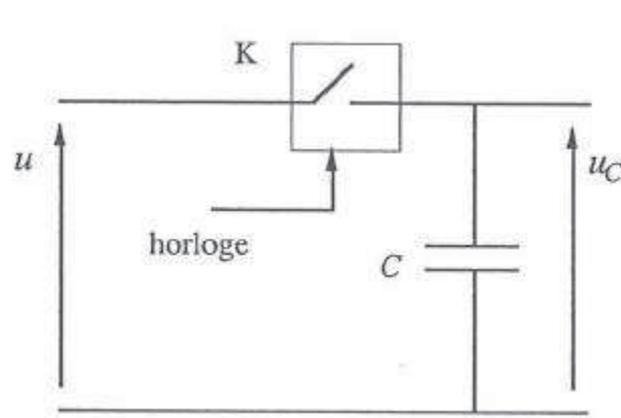
L'échantillonnage d'un signal à convertir est réalisé par un échantillonneur-bloqueur.

Un convertisseur analogique numérique placé à la sortie de l'échantillonneur-bloqueur convertit chaque échantillon.



Il faut donc prélever un échantillon. Cet échantillon doit être maintenu constant pendant toute la durée de la conversion.

On utilise un dispositif comparable à celui décrit au paragraphe 5.4.1.1 la résistance étant remplacée par un condensateur :

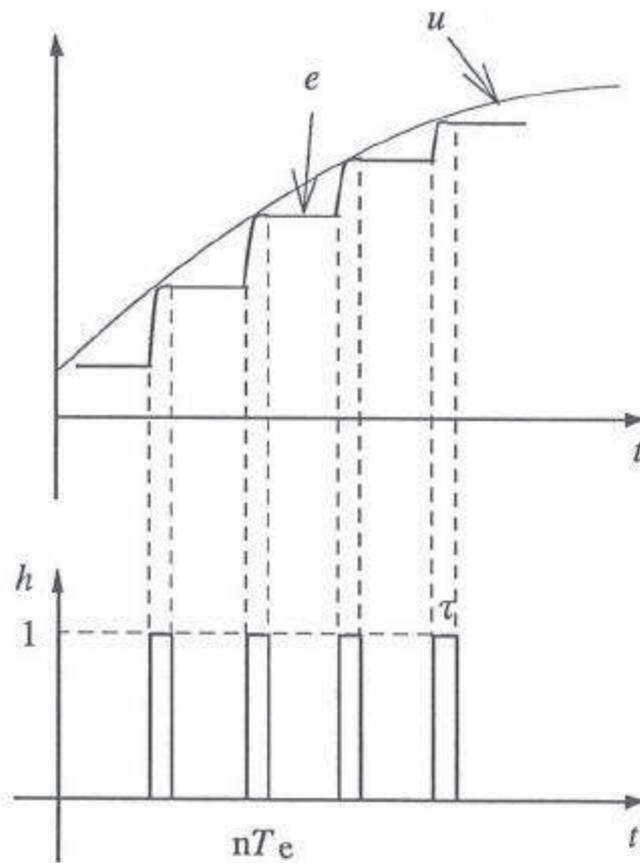


L'interrupteur électronique K est commandé au rythme du signal d'horloge dont la période T_e est la période d'échantillonnage.

Pendant la durée t le condensateur se charge sous la tension u ce qui nécessite une constante de temps de l'ensemble "interrupteur-condensateur" très petite.

Lorsque l'interrupteur s'ouvre, le condensateur reste chargé (ce qui nécessite un fonctionnement du quadripôle à vide, d'où la mise d'un montage suiveur en sortie non représenté sur la figure précédente) : il y a blocage de la mesure pendant laquelle le CAN effectue la conversion. Lorsque la conversion est achevée, l'interrupteur K se referme pour effectuer une nouvelle prise d'échantillon pendant une nouvelle durée t . La tension de sortie de l'échantillonneur-bloqueur est formée d'une suite de marches d'escalier.

Cette courbe est l'image de la tension d'entrée : ce n'est pas un signal échantillonné idéal mais il est directement utilisable par le convertisseur.



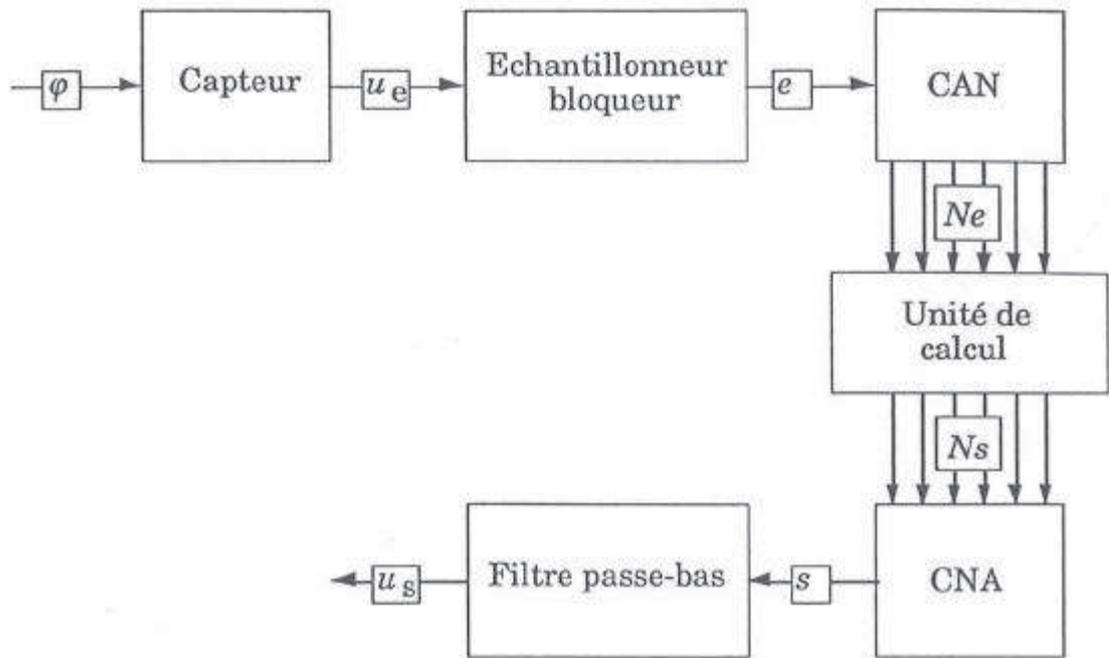
Le fonctionnement se décompose donc en trois phases :

- phase d'échantillonnage,
- phase de maintien,
- phase de conversion.

6.4.2 STRUCTURE D'UNE CHAÎNE NUMERIQUE

6.4.2.1 Système en chaîne ouverte

Nous pouvons résumer tout ce que nous venons de présenter par le synoptique suivant :



L'ensemble constitue une chaîne d'acquisition et de restitution du signal.

Le capteur fournit une tension électrique (ou un courant) image de la grandeur physique captée.

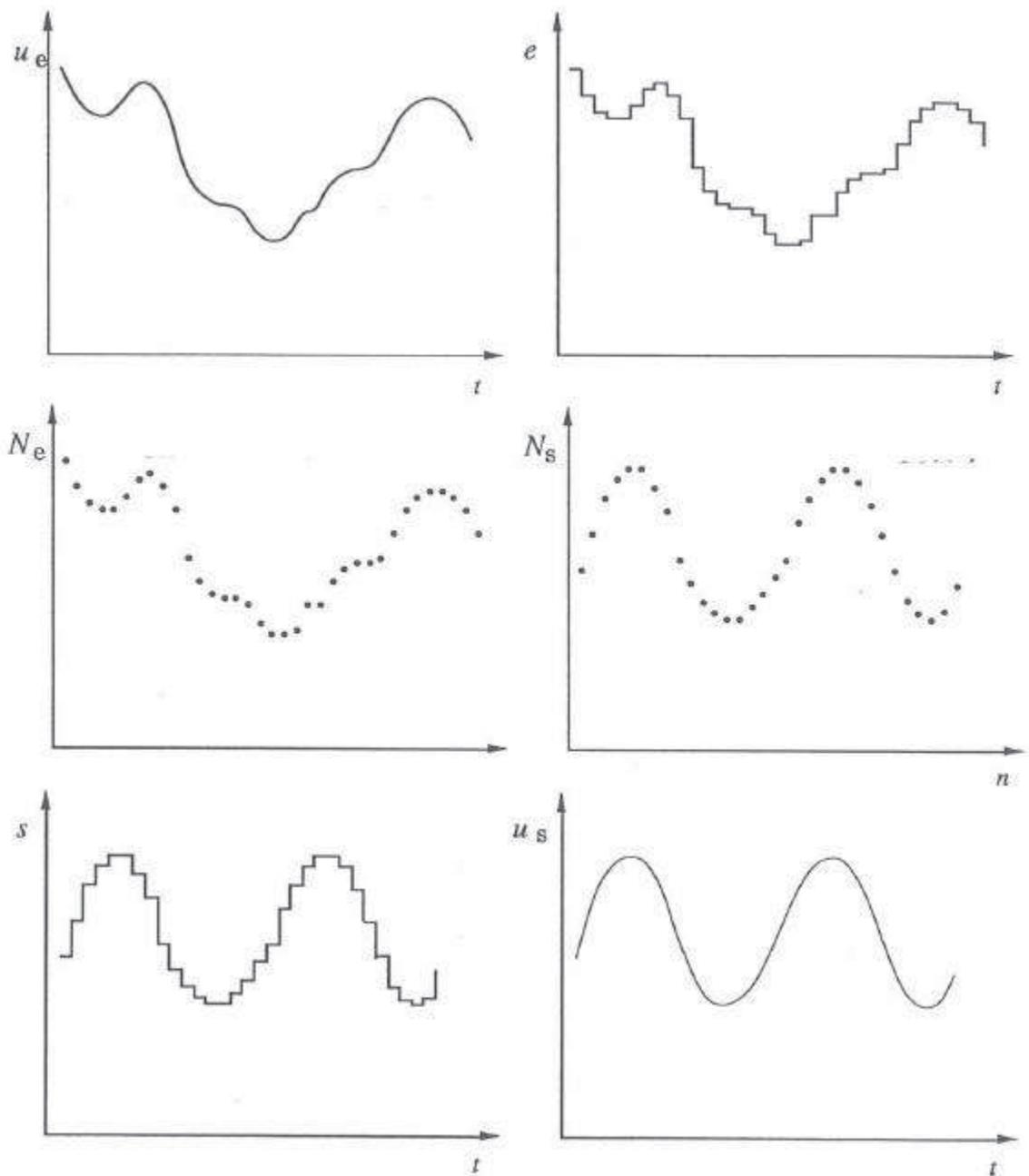
L'échantillonneur bloqueur permet l'obtention d'une tension utile au convertisseur analogique numérique.

Le CAN fournit à l'unité de calcul (ordinateur ou automate par exemple) un nombre binaire.

L'unité de calcul fournit au convertisseur numérique analogique un nombre binaire après son traitement.

Le CNA convertit le nombre fourni par l'unité de calcul en tension électrique (ou courant). Cette tension n'étant généralement pas directement utilisable, un filtre passe-bas élimine les composantes de fréquences indésirables pour ne conserver qu'un signal "propre" (muni cependant d'une composante continue).

Voici un exemple de quelques signaux obtenus :



6.4.2.2 Système en chaîne fermée

Le système décrit précédemment concerne un fonctionnement en chaîne directe.

Beaucoup de systèmes fonctionnent en chaîne fermée. La chaîne directe doit être accompagnée d'une chaîne de retour comme cela est représenté ci-après :

