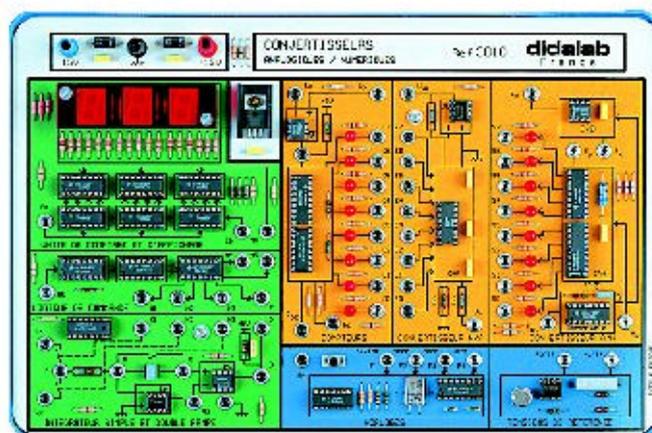


CONVERTISSEURS ANALOGIQUE/NUMERIQUE



EDD038100

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	DESCRIPTION MATERIELLE.....	6
3.1	BLOC REPRISE.....	6
3.2	HORLOGES	6
3.3	TENSIONS DE REFERENCE.....	7
3.4	UNITE DE COMPTAGE ET D’AFFICHAGE	7
3.5	LOGIQUE DE COMMANDE.....	8
3.6	INTEGRATEUR SIMPLE ET DOUBLE RAMPE	8
3.7	COMPTEURS.....	9
3.8	CONVERTISSEUR N/A	10
3.9	CONVERTISSEUR A/N	11
3.10	PLAN DE LA MAQUETTE	13
4	TRAVAUX PRATIQUES	15
4.1	INTEGRATEUR SIMPLE RAMPE, INTEGRATEUR DOUBLE RAMPE.....	15
4.1.1	<i>FONCTIONS AUXILIAIRES.....</i>	<i>15</i>
4.1.1.1	GENERATEURS.....	15
4.1.1.2	UNITE DE COMPTAGE ET D’AFFICHAGE	16
4.1.1.3	LOGIQUE DE COMMANDE	17
4.1.2	<i>INTEGRATEURS SIMPLE ET DOUBLE RAMPE.....</i>	<i>17</i>
4.1.2.1	UTILISATION EN SIMPLE RAMPE.....	18
4.1.2.2	UTILISATION EN DOUBLE RAMPE.....	21
4.2	CONVERSION ANALOGIQUE-NUMERIQUE PAR COMPTAGE	24
4.2.1	<i>ETUDE DU COMPARETEUR SEUL.....</i>	<i>24</i>
4.2.2	<i>ETUDE DE L’ENSEMBLE COMPARETEUR-COMPTEUR- CONVERTISSEUR NUMERIQUE/ANALOGIQUE.....</i>	<i>25</i>
4.3	CONVERTISSEUR ANALOGIQUE/NUMERIQUE INTEGRE	28
4.3.1	<i>EHANTILLONEUR BLOQUEUR.....</i>	<i>28</i>
4.3.1.1	Montage.....	29
4.3.1.2	Expérimentation.....	29
4.3.2	<i>CONVERTISSEUR ANALOGIQUE-NUMERIQUE.....</i>	<i>29</i>
4.3.2.1	Montage.....	29
4.3.2.2	Expérimentation.....	30
4.3.3	<i>ASSOCIATION CAN/CNA.....</i>	<i>33</i>
4.3.3.1	Montage.....	33
4.3.3.2	Expérimentation.....	33
4.4	COMPARAISON DES DIFFERENTS TYPES DE CONVERTISSEURS.....	35
4.4.1	<i>MONTAGE.....</i>	<i>35</i>
4.4.1.1	INTEGRATEUR DOUBLE RAMPE.....	35
4.4.1.2	CONVERTISSEUR PAR COMPTAGE	36
4.4.1.3	CONVERTISSEUR INTEGRE	36
4.4.2	<i>EXPERIMENTATION.....</i>	<i>37</i>

5	RAPPELS THEORIQUES	39
5.1	FONCTIONS HYBRIDES	39
5.1.1	<i>REPRÉSENTATION D'UNE GRANDEUR PHYSIQUE.....</i>	39
5.1.1.1	Représentation analogique	39
5.1.1.2	Représentation numérique	39
5.1.2	SYSTEMES ANALOGIQUES	39
5.1.2.1	Systèmes numériques	40
5.1.2.2	Systèmes hybrides.....	40
5.1.3	CONVERSION NUMERIQUE-ANALOGIQUE (CNA).....	41
5.1.3.1	Poids de l'entrée.....	41
5.1.3.2	Résolution	42
5.1.3.3	Code d'entrée DCB.....	43
5.1.4	CONVERSION ANALOGIQUE/NUMERIQUE (CAN).....	44
5.1.4.1	Principe de la conversion.....	44
5.1.4.2	Échantillonneur-bloqueur	45
5.1.4.3	Multiplexage	46
5.2	CONVERTISSEURS NUMERIQUE/ANALOGIQUE	47
5.2.1	<i>ECHELLES DE RESISTANCES PONDEREES.....</i>	47
5.2.2	<i>RÉSEAU R-2R.....</i>	49
5.2.3	<i>CARACTERISTIQUES D'UN CNA.....</i>	54
5.2.3.1	Caractéristique de transfert d'un CNA idéal	54
5.2.3.2	Caractéristique de transfert d'un CNA réel.....	54
5.2.3.3	Précision d'un CNA réel	56
5.2.3.4	Temps de conversion	56
5.2.4	<i>APPLICATIONS.....</i>	57
5.2.4.1	Asservissement numérique	57
5.2.4.2	Bancs tests.....	57
5.3	CONVERTISSEURS ANALOGIQUE / NUMERIQUE.....	58
5.3.1	<i>CONVERTISSEUR SIMPLE RAMPE.....</i>	58
5.3.2	<i>CONVERTISSEUR DOUBLE RAMPE.....</i>	61
5.3.3	<i>CONVERSION PAR COMPTAGE.....</i>	65
5.3.4	<i>CONVERTISSEUR A APPROXIMATIONS SUCCESSIVES.....</i>	68
5.3.5	<i>COURBE DE CONVERSION D'UN CAN.....</i>	71
5.4	ACQUISITION ET TRAITEMENT DES SIGNAUX	74
5.4.1	<i>ACQUISITION DES SIGNAUX.....</i>	74
5.4.1.1	Signal échantillonné	75
5.4.1.2	Reconstitution du signal.....	77
5.4.1.3	Fréquence d'échantillonnage	80
5.4.1.4	Principe de l'échantillonneur-bloqueur	81
5.4.2	<i>STRUCTURE D'UNE CHAÎNE NUMERIQUE.....</i>	84
5.4.2.1	Système en chaîne ouverte	84
5.4.2.2	Système en chaîne fermée.....	87

1 Présentation

Le convertisseur Analogique/Numérique est un module permettant le fonctionnement d'un échantillonneur-bloqueur, des convertisseurs simple et double rampe, par comptage ou circuit intégré.

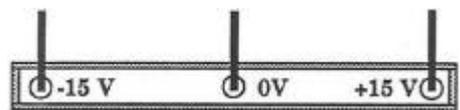
Le module est composé de :

- Intégrateur simple et double rampe
- Intégrateur à amplificateur opérationnel,
- Comparateur 3 interrupteurs analogiques, logique de commande
- Logique de comptage et de décodage CMOS pour la commande des interrupteurs analogiques,
- Comptage et affichage à 3 digits, 8 bits CMOS avec visualisation d'état,
- Comparateur,
- Convertisseur N/A industriel 8 bits,
- Convertisseur A/N industriel 8 bits,
- Echantillonneur bloqueur,
- Horloges 512kHz, 4kHz, 2kHz, 1kHz,
- Tensions 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.



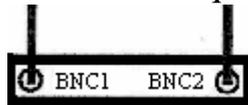
2.2 Câblage des fonctions

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

3 Description matérielle

3.1 BLOC REPRISE

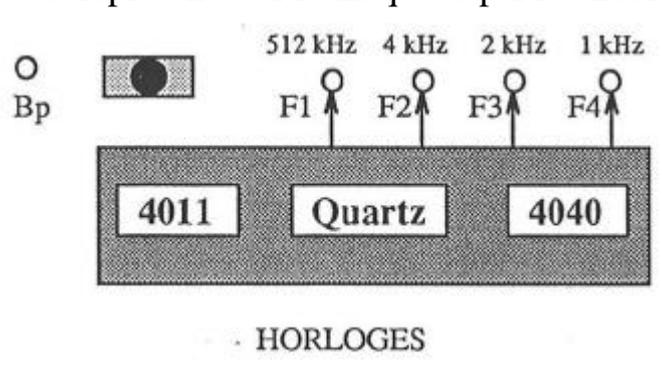
Le bloc "reprise" est représenté sur la maquette par le circuit suivant :



Le bloc reprise est composé de 2 prises BNC.

3.2 HORLOGES

Le bloc "horloges" est représenté sur la maquette par le circuit suivant :



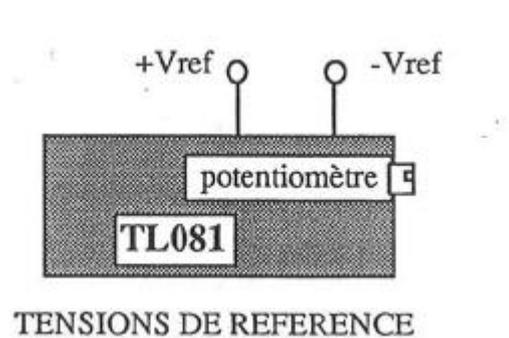
Le circuit est composé d'un quartz, de circuits CD4040 et CD4011 et d'un bouton poussoir.

La maquette offre la possibilité d'utiliser plusieurs fréquences d'horloge. Les signaux sont générés par le quartz. Par division de fréquences, nous obtenons quatre gammes de fréquences : 1kHz, 2kHz, 4kHz et 512kHz.

Le bouton poussoir placé dans le bloc horloge, permet une mise à 5V de la borne Bp lorsqu'il est actionné et une mise à la masse de cette même borne lorsqu'il est relâché.

3.3 TENSIONS DE REFERENCE

Le bloc "tensions de référence" est représenté sur la maquette par le circuit suivant :



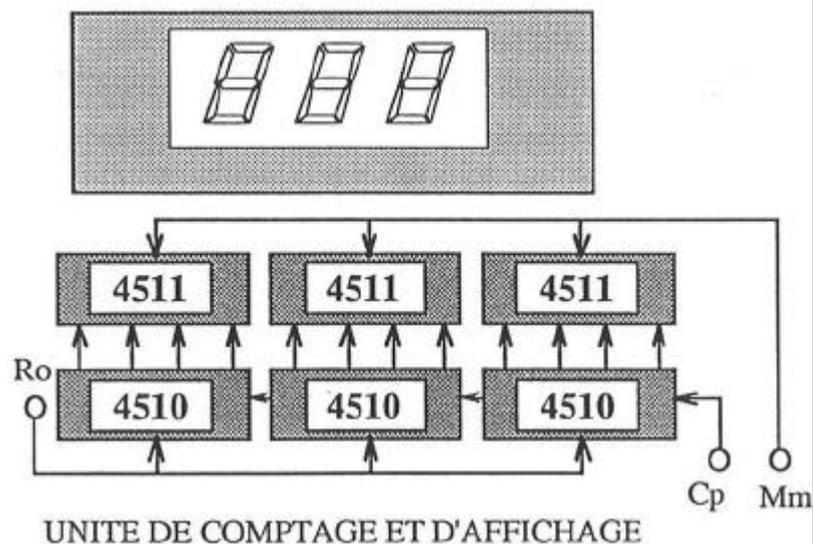
Le circuit est composé du circuit TL081 et d'un potentiomètre.

Le potentiomètre de réglage permet d'ajuster les tensions de référence à un niveau souhaité.

En agissant sur le potentiomètre de réglage, $+V_{ref}$ varie de 4,8V à 5,3V et $-V_{ref}$ varie de -4,8V à -5,3V.

3.4 UNITE DE COMPTAGE ET D'AFFICHAGE

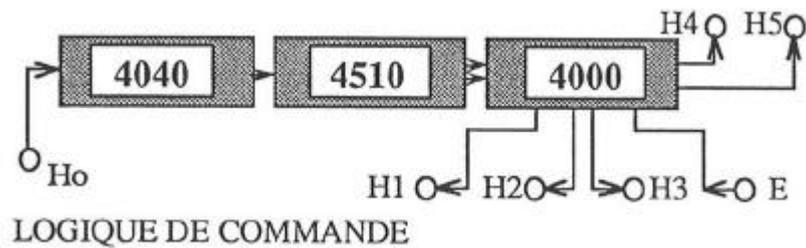
L'unité de comptage et d'affichage est représentée ci-après :



Le circuit est composé de trois afficheurs sept segments, de trois circuits CD4511 et de trois circuits CD4510.

3.5 LOGIQUE DE COMMANDE

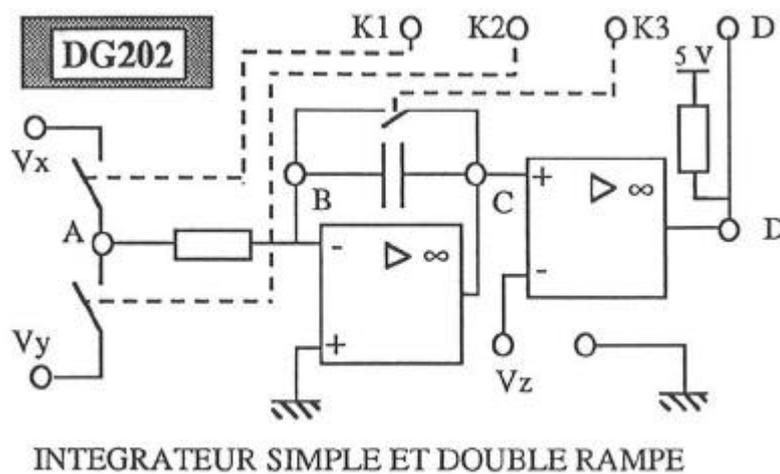
Le circuit de logique de commande est représenté ci-après :



Ce bloc est composé de trois circuits, CD4040, CD4510 et CD4000.

3.6 INTEGRATEUR SIMPLE ET DOUBLE RAMPE

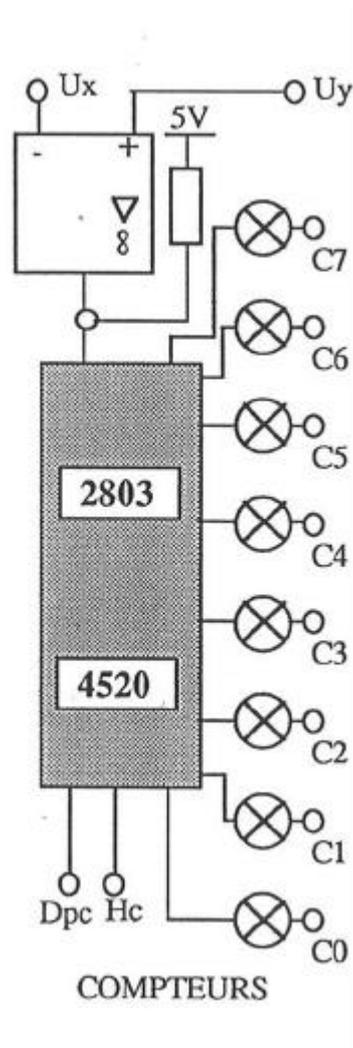
Le bloc "intégrateur simple et double rampe" est représentée ci-après :



Le circuit est composé de deux amplificateurs opérationnels TL081 et LM311 et de deux résistances de 10kO et 750kO.

3.7 COMPTEURS

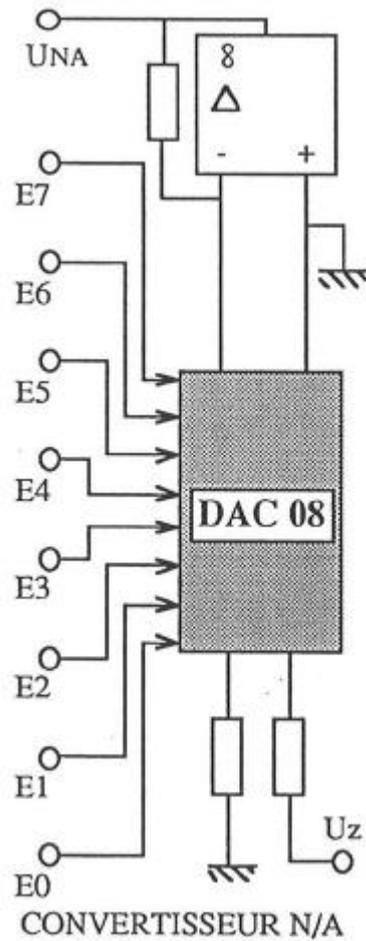
Le bloc "compteurs" est représenté sur le schéma ci-après :



Le bloc "compteurs" est composé d'un amplificateur opérationnel LM311, des circuits CD2803 et CD4520 et d'une résistance de 10kO.

3.8 CONVERTISSEUR N/A

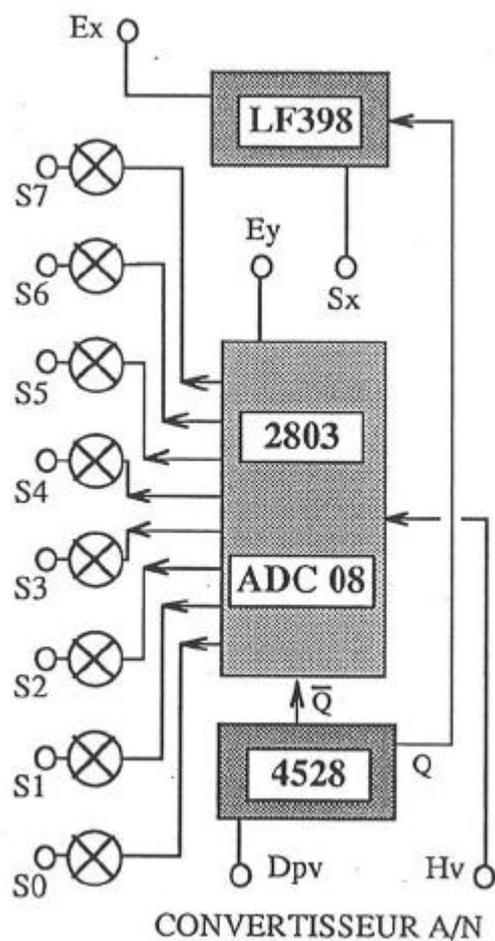
Le circuit correspondant est représenté par le montage ci après :



Le bloc "convertisseur N/A" est composé d'un amplificateur opérationnel TL081, du convertisseur industriel intégré DAC 08 et de trois résistances de 10kO.

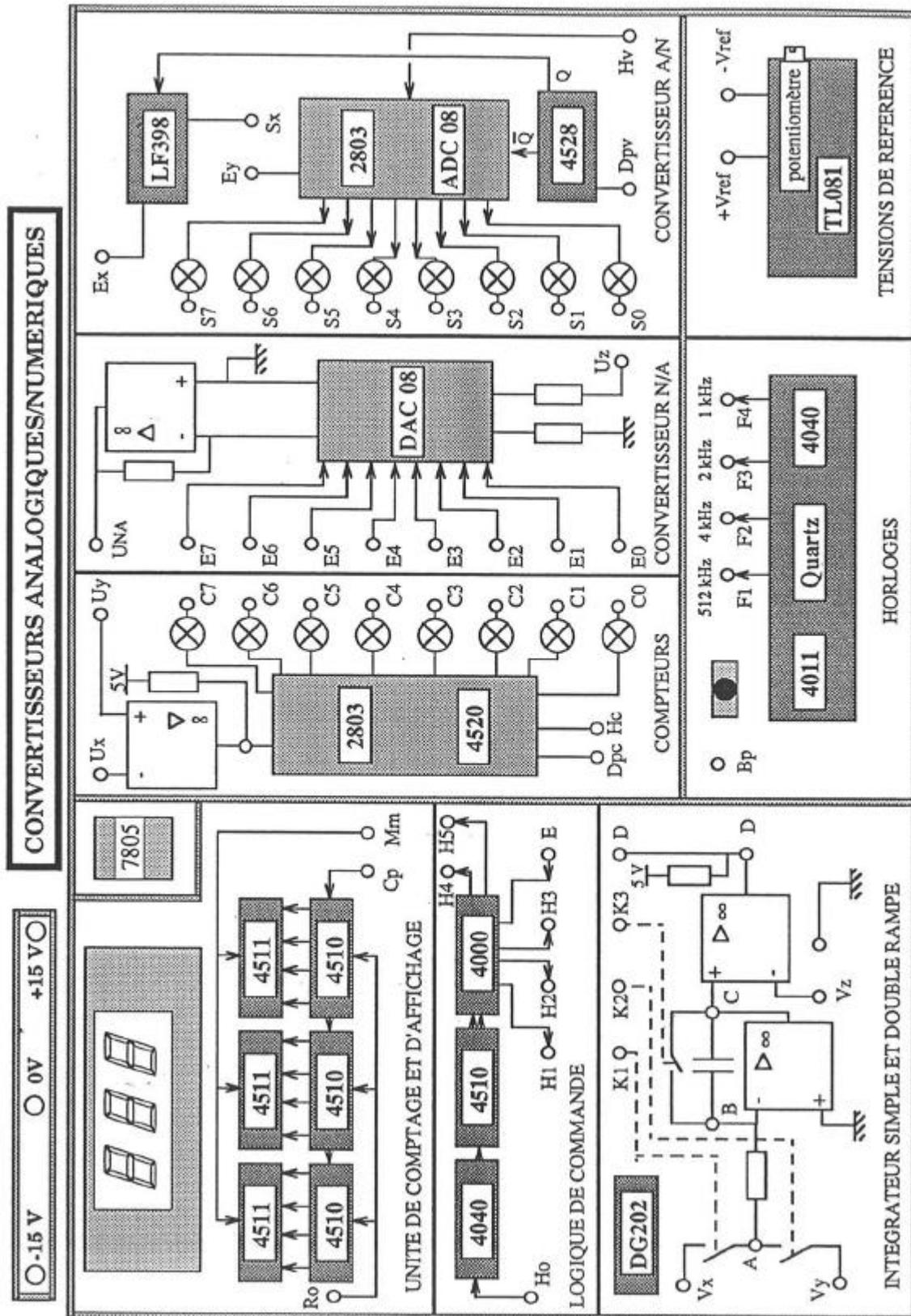
3.9 CONVERTISSEUR A/N

Le circuit correspondant est représenté par le montage ci après :



Le bloc "convertisseur A/N" est composé du convertisseur industriel intégré ADC 08 et des circuits CD4528 et LF398.

3.10 PLAN DE LA MAQUETTE



Plan de la maquette "Convertisseurs Analogiques-Numériques"

4 Travaux pratiques

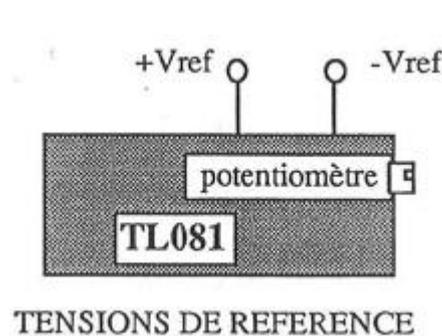
4.1 INTEGRATEUR SIMPLE RAMPE, INTEGRATEUR DOUBLE RAMPE

4.1.1 FONCTIONS AUXILIAIRES

4.1.1.1 GENERATEURS

4.1.1.1.1 Tensions de référence

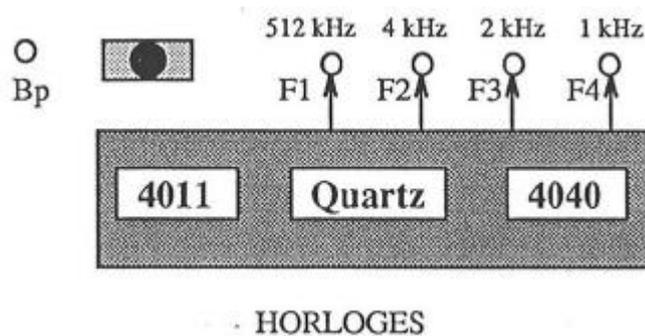
Le bloc "tensions de référence" est représenté sur la maquette par le circuit suivant :



Les deux tensions de référence continues réglables sont appelées $-V_{ref}$ et l'autre $+V_{ref}$. Mesurer avec un voltmètre numérique, les valeurs de $-V_{ref}$ et $+V_{ref}$. Avec un tournevis, agir sur le potentiomètre et ajuster ces tensions à $-5,12\text{ V}$ et $+5,12\text{ V}$.

4.1.1.1.2 Horloges

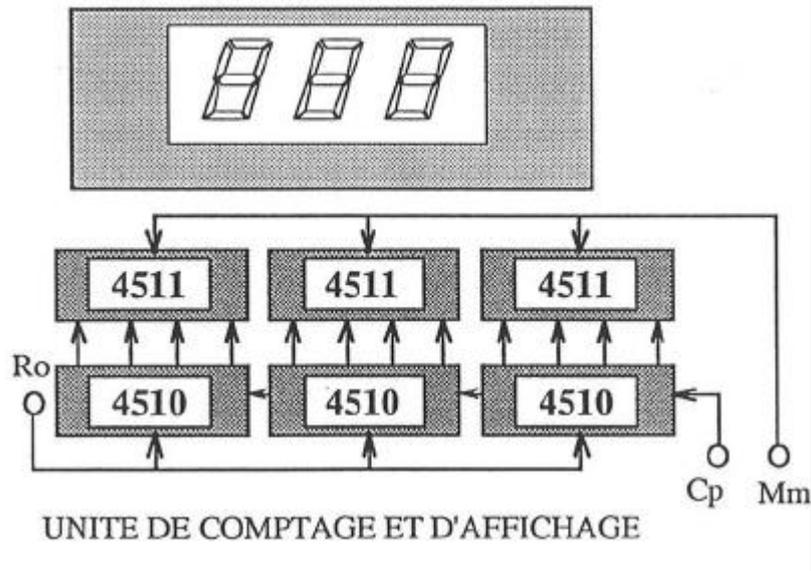
Le bloc "tensions de référence" est représenté sur la maquette par le circuit suivant :



Relever en concordance des temps, les chronogrammes des tensions disponibles aux bornes F1, F2, F3 et F4. Mesurer les fréquences des tensions disponibles en ces bornes ainsi que leurs amplitudes.

4.1.1.2 UNITE DE COMPTAGE ET D’AFFICHAGE

L'unité de comptage et d'affichage est représentée ci-après :



- Alimenter la maquette en $\pm 15V$.
- Un signal d'horloge provenant de la sortie TTL d'un générateur B.F. est appliqué à l'entrée Cp de l'unité de comptage et d'affichage.
- La fréquence étant réglée à 1Hz, observer sur les trois afficheurs que le système compte bien.

Quel est le nombre le plus grand que peut afficher ce compteur ?

Que fait le compteur lorsque ce nombre est atteint ?

- Augmenter la fréquence du signal d'horloge ; que constate-t-on ?
- Relier maintenant la borne Ro à la borne Bp située sur le bloc horloge.

L'action du bouton poussoir situé à droite de la borne Bp permet d'appliquer à cette borne une tension de 5V.

Appuyer sur le bouton poussoir. Que se passe-t-il ? Relâcher le bouton poussoir. Qu'observez-vous ? En déduire l'action d'un niveau haut de tension appliqué à la borne Ro.

- Remplacer la connexion entre Ro et Bp par une connexion entre Mm et Bp, Cp étant toujours relié à la sortie TTL du G.B.F.

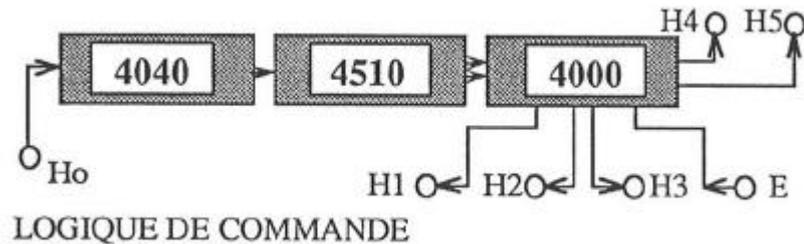
Régler la fréquence du signal TTL à 5Hz environ.

Actionner le bouton poussoir en appuyant cinq secondes environ. Que se passe-t-il ? Noter l'indication des afficheurs. Relâcher le bouton poussoir ? Quelle est l'indication des afficheurs juste après le relâchement du bouton ? Que fait ensuite le compteur ?

Recommencer la manipulation précédente, en appuyant sur le bouton poussoir un peu plus longtemps. Décrire le comportement du système.
En déduire l'action d'un niveau haut de tension appliqué à la borne Mm.

4.1.1.3 LOGIQUE DE COMMANDE

Le circuit de logique de commande est représenté ci-après :



Supprimer toutes les connexions précédemment réalisées sauf celles reliant la maquette à l'alimentation ± 15 V.

Relier la borne Ho à la borne F1 du circuit d'horloges.

Visualiser les tensions disponibles aux bornes H1, H2, H3, H4 et H5.

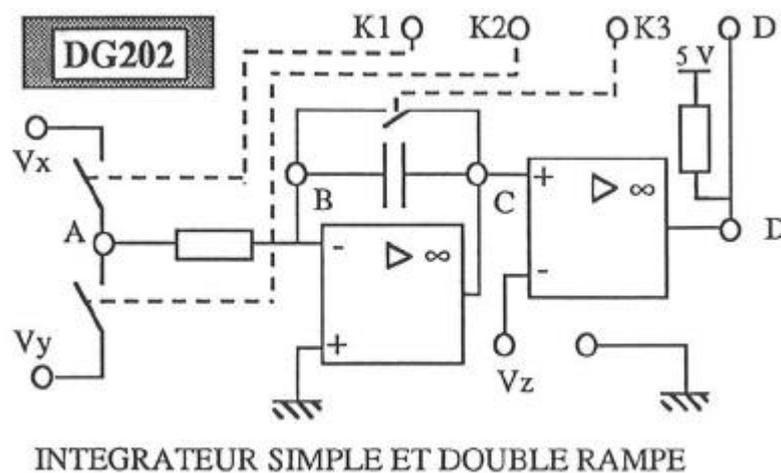
Relever en concordance des temps ces différentes tensions.

Mesurer les durées des états hauts et bas de chacune des tensions.

Analyser le fonctionnement de cette logique de commande.

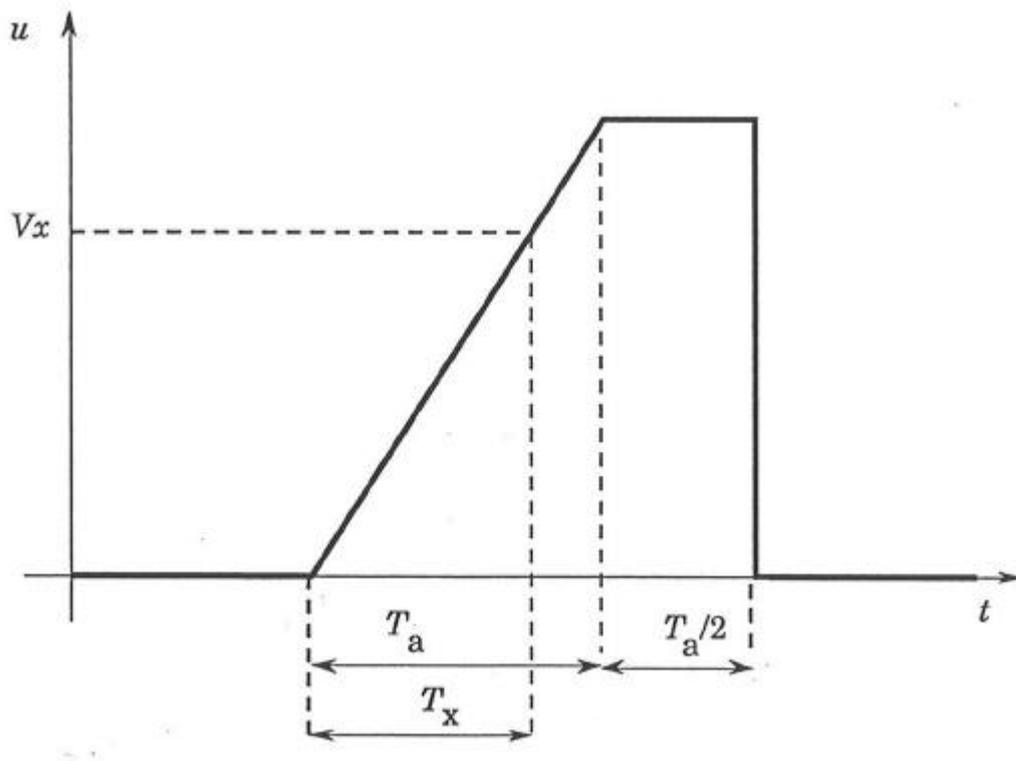
4.1.2 INTEGRATEURS SIMPLE ET DOUBLE RAMPE

L'intégrateur simple rampe et l'intégrateur double rampe sont réalisés à partir du montage dont le schéma est représenté ci-après :



4.1.2.1 UTILISATION EN SIMPLE RAMPE

On désire obtenir un signal ayant la forme suivante :



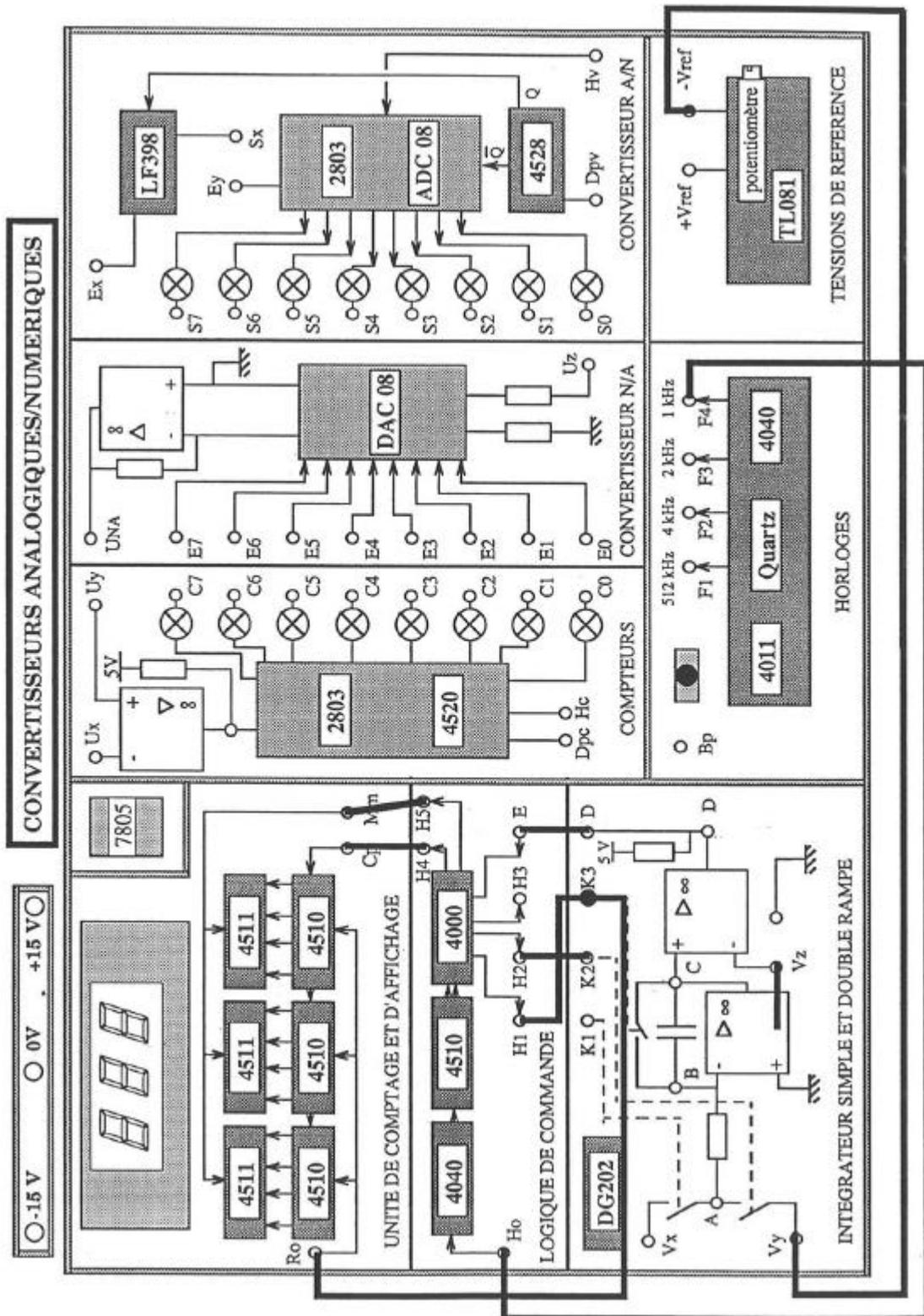
- Réaliser les connexions suivantes :
 - relier Ho à F4,
 - relier H2 à K2,
 - relier K3 à H1,
 - relier K3 à Ro.
- La borne Vz est la borne à laquelle il faut appliquer la tension inconnue dont on veut connaître la valeur moyenne. Cette tension peut être une tension continue ou une tension périodique non symétrique provenant d'un G.B.F.
- La borne Vy est la borne à laquelle il faut appliquer une tension de référence. Pour un fonctionnement correct, cette tension doit être négative. On peut, par exemple, utiliser la tension de référence $-V_{ref}$ fournie sur la maquette. Pour obtenir des sauts de tension de pas simples, il est préférable de régler $-V_{ref}$ à $-5,12$ V en utilisant le potentiomètre de réglage placé à côté de la borne $-V_{ref}$.
- Visualiser avec un oscilloscope (numérique de préférence), les tensions disponibles aux bornes C et D du bloc "intégrateur simple et double rampe".

- Relier ensuite D à E et visualiser la tension disponible en H4.
- Relever en concordance des temps, les oscillogrammes des tensions disponibles en C, en H4 et en H5.
- Relier les bornes
 - H4 à Cp,
 - H5 à Mm,
 - H1 à Ro.
- Appliquer à l'entrée Vz du montage une tension de valeur moyenne inférieure à 5V (2V, 1kHz par exemple).
- Comparer l'indication des afficheurs de la maquette (ne pas oublier que l'affichage est en $10^{-2}V$) à l'indication d'un voltmètre. Que constate-t-on ?
- Modifier la fréquence du signal d'horloge en reliant successivement la borne Ho à la borne F3, puis à la borne F2 et enfin à la borne F1.
La fréquence du signal d'horloge a-t-elle une influence sur la valeur affichée sur la maquette ?
- Utiliser le signal de sortie TTL d'un G.B.F. comme signal d'horloge. Ajuster la fréquence de ce signal pour que les afficheurs de la maquette et pour que le voltmètre indiquent la même valeur. Ne pas modifier la valeur de la fréquence du signal d'horloge. Modifier la valeur moyenne de la tension à convertir Vz. Pour différentes valeurs de Vz, comparer les indications du voltmètre et des afficheurs. Conclure.
- Modifier la constante de temps de l'intégrateur en plaçant en parallèle :
 - sur la résistance de cet intégrateur une résistance de 1MO,
 - ou un condensateur de capacité 100nF.

Quelle est l'influence de la constante de temps de l'intégrateur sur la valeur affichée sur la maquette ? Que faut-il faire pour qu'il y ait concordance entre l'indication du voltmètre et celle des afficheurs de la maquette ?

- Donner au signal à convertir, une fréquence de 1Hz. Qu'observez vous au niveau de l'affichage ? Augmenter progressivement la valeur de la fréquence. Expliquer l'évolution de l'affichage.

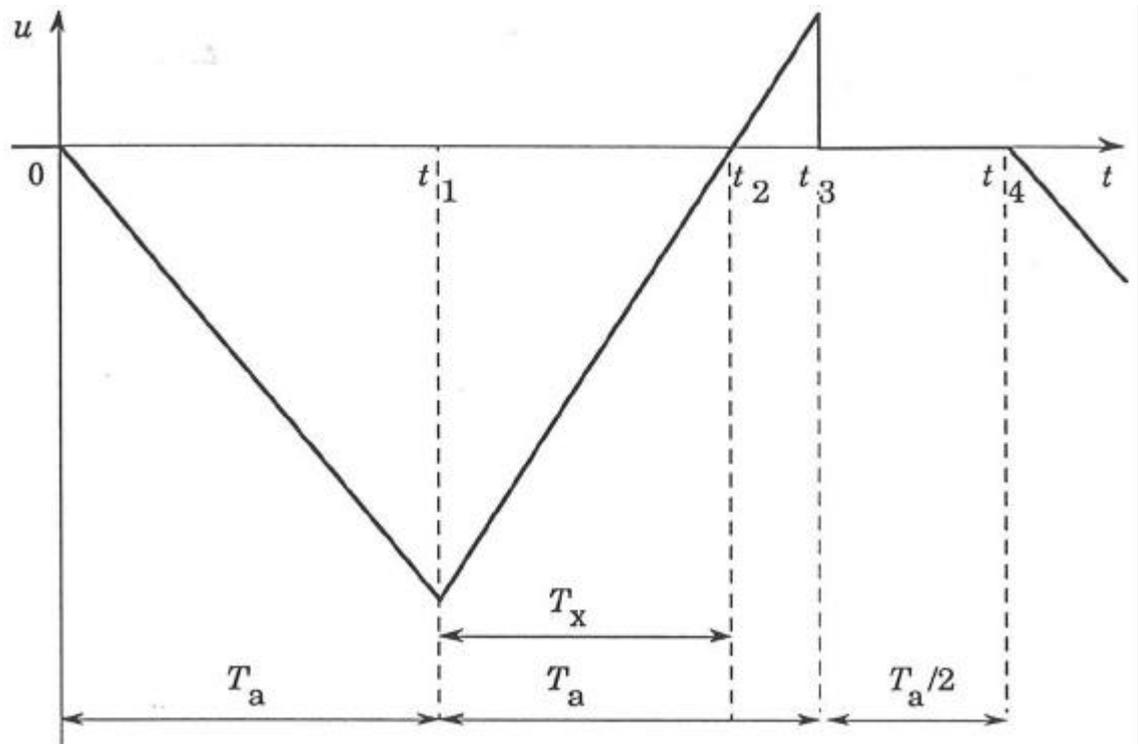
Câblage de la maquette pour un fonctionnement en intégrateur simple rampe



INTEGRATEUR SIMPLE RAMPE

4.1.2.2 UTILISATION EN DOUBLE RAMPE

On désire obtenir un signal ayant la forme suivante :



• Réaliser les connexions suivantes :

- relier Ho à F2,
- relier H1 à K1, H2 à K2 et H3 à K3.

• La borne V_x est la borne à laquelle il faut appliquer la tension inconnue dont on veut connaître la valeur moyenne.

Cette tension peut être une tension continue ou une tension périodique non symétrique provenant d'un G.B.F.

Remarque :

Il faut régler l'amplitude de la composante alternative délivrée par le G.B.F. à une valeur pas trop importante afin de ne pas saturer les composants de la maquette.

• La borne V_y est la borne à laquelle il faut appliquer une tension de référence. Dans le cas de notre utilisation, cette tension doit être négative. On peut, par exemple, utiliser la tension de référence $-V_{ref}$ fournie sur la maquette. Pour obtenir des sauts de tension de pas simples, il est préférable de régler $-V_{ref}$ à $-5,12V$ en utilisant le potentiomètre de réglage placé à côté de la borne $-V_{ref}$.

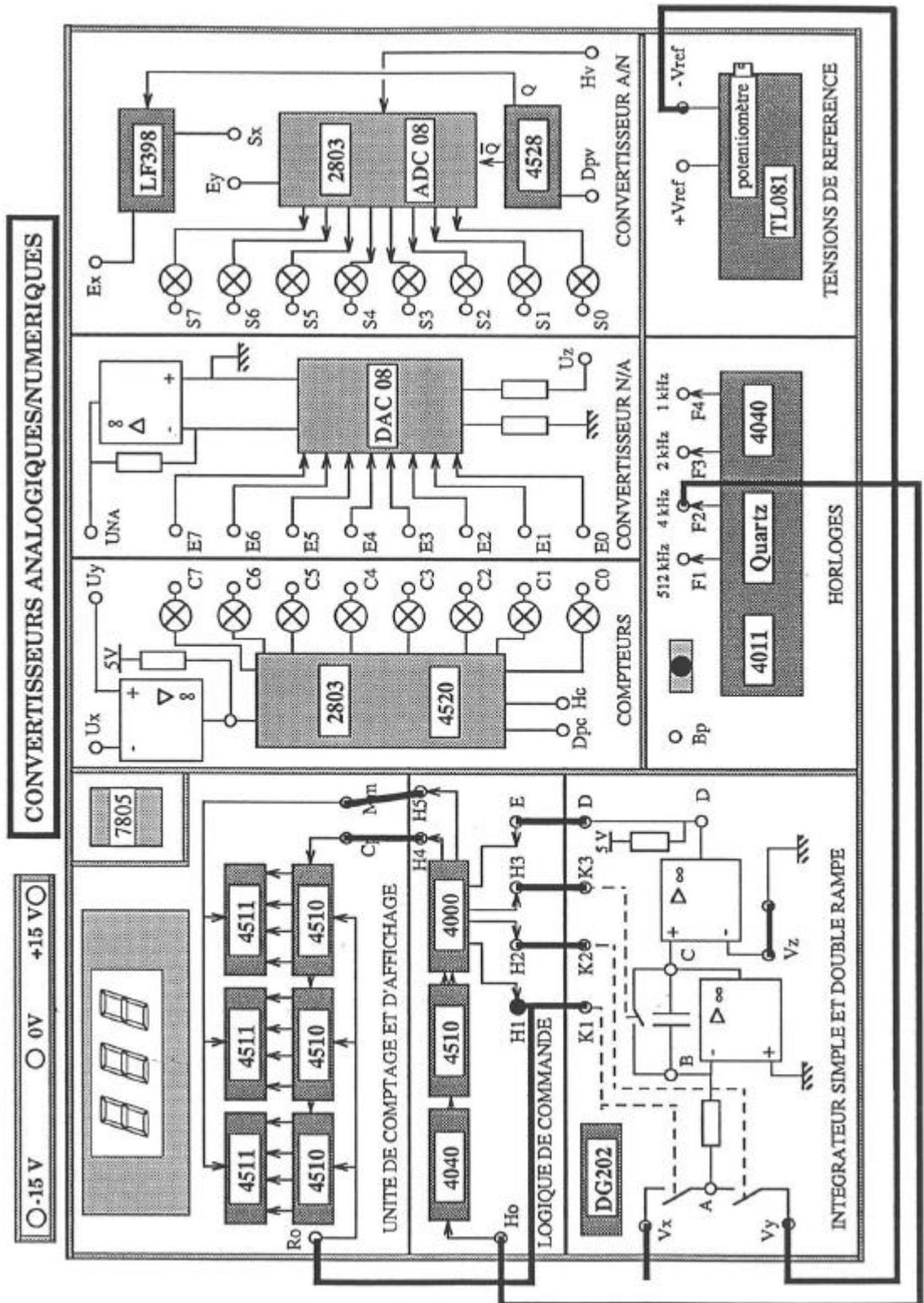
Travaillant sur 8 bits, cela fait des sauts de 20mV (en effet, il y a $2^8 = 256$ combinaisons, donc 256 sauts de tension soit des pas de $\frac{5,12}{256} = 0,02V$).

- La borne Vz est reliée à la masse.
- Visualiser avec un oscilloscope (numérique de préférence), les tensions disponibles aux bornes C et D du bloc "intégrateur simple et double rampe".
- Relier ensuite D à E et visualiser la tension disponible en H4.
- Relever en concordance des temps, les oscillogrammes des tensions disponibles en C, en H4 et en H5.
- Relier les bornes :
 - H4 à Cp,
 - H5 à Mm,
 - H1 à Ro.
- Appliquer à l'entrée Vx du montage une tension de valeur moyenne inférieure à 5 V.
- Vérifier la validité de la mesure en comparant l'indication des afficheurs de la maquette (ne pas oublier que l'affichage est en $10^{-2}V$) à l'indication d'un voltmètre.
- Modifier la fréquence du signal d'horloge en reliant la borne Ho à la borne F1, puis à la borne F3 et enfin à la borne F4.
Quelle est l'influence de la fréquence du signal d'horloge sur la valeur affichée sur la maquette ?
- Modifier la constante de temps de l'intégrateur en plaçant en parallèle :
 - sur la résistance de cet intégrateur une résistance de 1MO,
 - ou un condensateur de capacité 100nF.

Quelle est l'influence de la constante de temps de l'intégrateur sur la valeur affichée sur la maquette ?

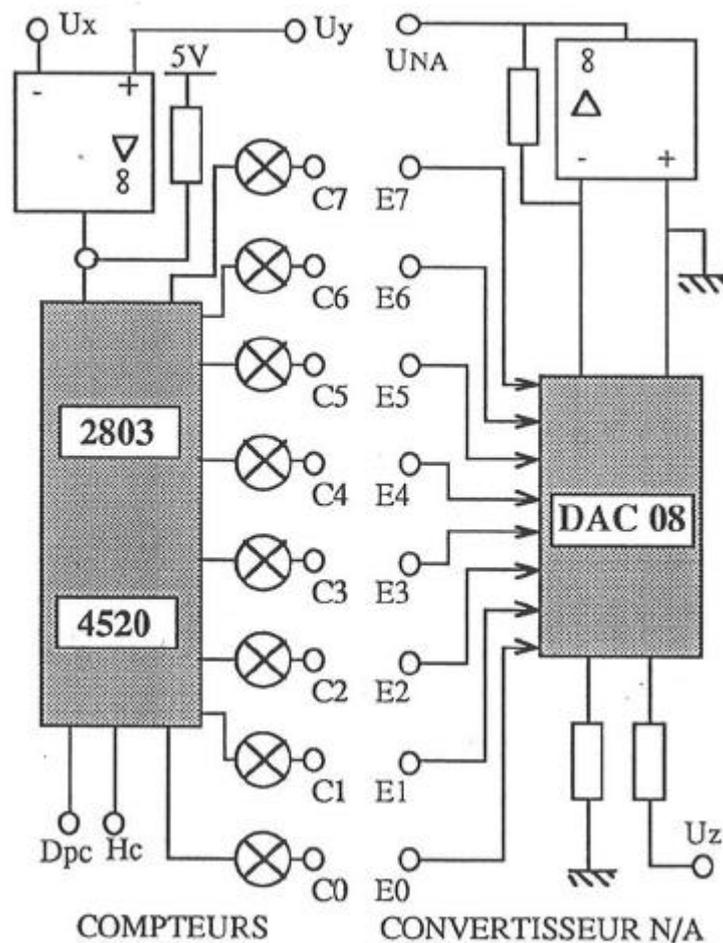
Modifier la fréquence du signal d'horloge jusqu'à concordance des indications du voltmètre et des afficheurs de la maquette.

Câblage de la maquette pour un fonctionnement en intégrateur double rampe



4.2 CONVERSION ANALOGIQUE-NUMERIQUE PAR COMPTAGE

L'objectif de cette manipulation est d'illustrer la conversion d'une tension analogique u en un nombre binaire N . La partie utile de la maquette est représentée sur le schéma ci-après :



4.2.1 ETUDE DU COMPAREUR SEUL

Appliquer en U_x une tension continue $U=2V$.

Appliquer en U_y une tension en dents de scie de valeur moyenne de $2V$ et d'amplitude crête à crête $1,5V$.

Relever en concordance des temps les chronogrammes des tensions disponibles à l'entrée U_y et à la sortie du comparateur.

Vérifier que les courbes sont conformes aux résultats attendus.

Modifier la valeur de la tension continue (prendre par exemple $-1V$, $1V$, $4V$ et $6V$).

Quelles sont les limites de la tension U pour un fonctionnement correct du comparateur ?

4.2.2 ETUDE DE L'ENSEMBLE COMPAREUR-COMPTEUR-CONVERTISSEUR NUMERIQUE/ANALOGIQUE

En plus du bloc "compteur-convertisseur N/A", nous utilisons les blocs "horloges" et "tensions de références".

Première partie :

- Relier les bornes :
 - U_z à $+V_{ref}$,
 - U_{NA} à U_y ,
 - C0 à E0, C1 à E1, C2 à E2, C3 à E3, C4 à E4, C5 à E5, C6 à E6 et C7 à E7.
- L'entrée d'horloge H_c des compteurs est reliée à Bp.
- Relier Dpc à +5V : quels sont les états des DEL ?
- Supprimer la liaison Dpc à +5V. Les états des diodes changent-ils ?
- Appuyer une fois sur le bouton poussoir : quelle est la combinaison binaire affichée ?
- Appuyer une deuxième fois sur le bouton poussoir : quelle est la nouvelle combinaison binaire ?
- Combien de fois faut-il appuyer sur le bouton poussoir pour que la combinaison 11111111 soit affichée ?

Deuxième partie

- Appliquer en U_x une tension continue $U = 2V$.
- Relier les bornes :
 - U_z à $+V_{ref}$,
 - U_{NA} à U_y ,
 - C0 à E0, C1 à E1, C2 à E2, C3 à E3, C4 à E4, C5 à E5, C6 à E6 et C7 à E7.
- L'entrée d'horloge H_c des compteurs étant reliée à F1 (c'est-à-dire à 512 kHz), visualiser les tensions disponibles à la sortie du comparateur et à la borne U_{NA} .

-
- Relier l'entrée de mise à zéro Dpc à Bp. Après avoir appuyé sur le bouton poussoir puis l'avoir relâché, relever :
 - l'état des DEL,
 - et la valeur de U_y .

En déduire le nombre binaire N correspondant à la tension U .

En réglant V_{ref} à +5,12V, la résolution est de 20mV par saut de 1 bit. Déterminer à quelle valeur de la tension U , ce nombre binaire correspond-il ? Est-ce conforme avec la valeur lue à l'oscilloscope ?

- Augmenter la valeur de la tension U . Les états des diodes sont-ils modifiés ? Relever la combinaison binaire ; appuyer sur le bouton poussoir : quels sont les états des diodes ? Relâcher le bouton poussoir : relever la combinaison binaire.

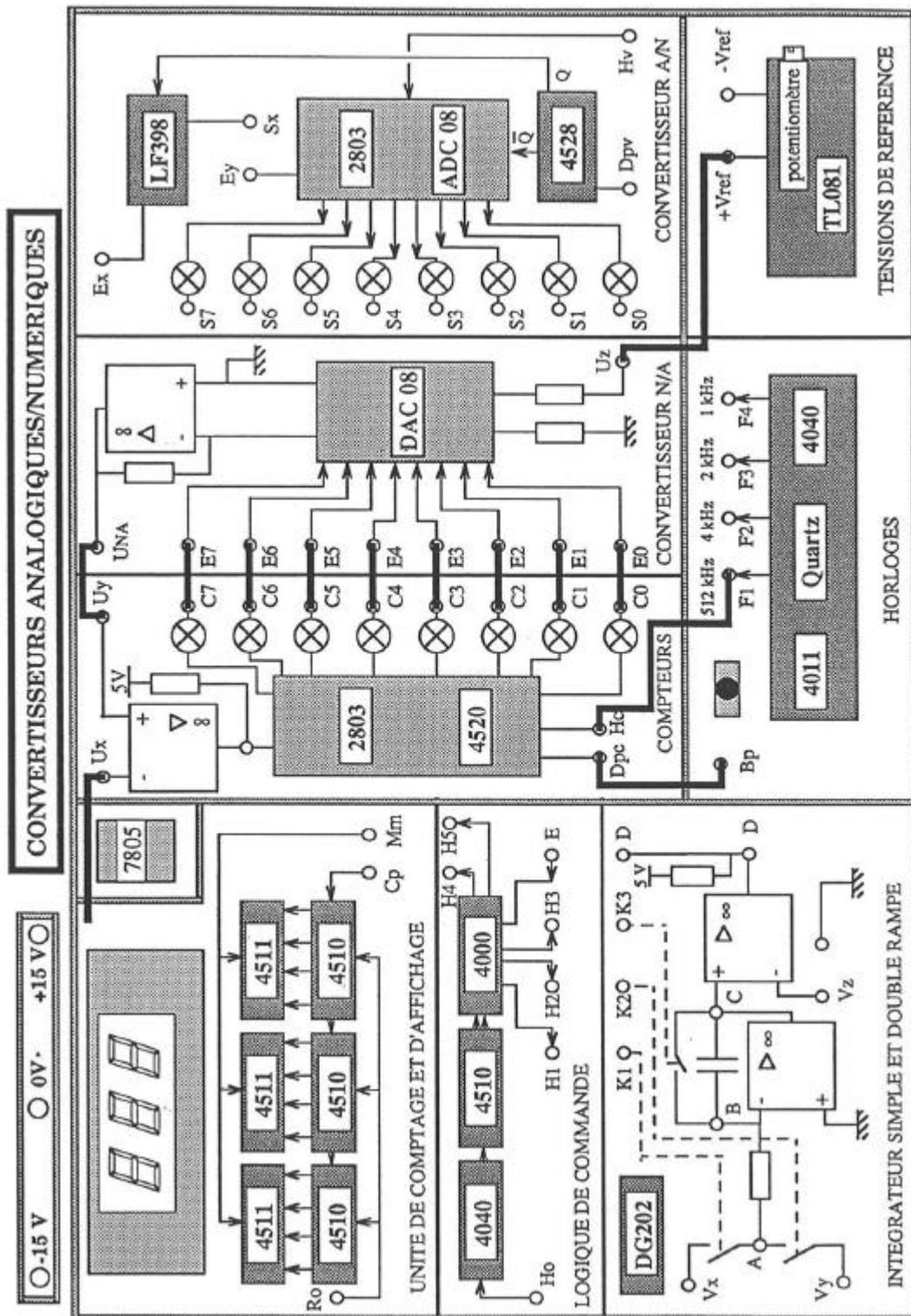
Vérifier qu'au bit de poids le plus faible près, les deux combinaisons sont identiques.

Appuyer et relâcher plusieurs fois le bouton poussoir et vérifier que la combinaison affichée n'est pas modifiée.

- Diminuer la valeur de la tension U . Les états des diodes sont-ils modifiés ? Relever la combinaison binaire ; appuyer sur le bouton poussoir : quels sont les états des diodes ? Relâcher le bouton poussoir : relever la nouvelle combinaison binaire.

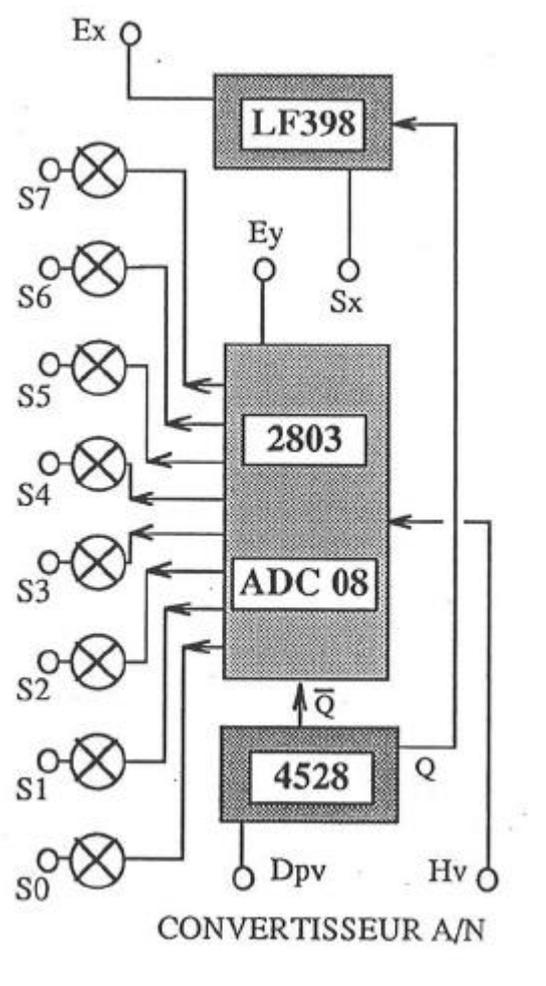
Appuyer et relâcher plusieurs fois le bouton poussoir et vérifier que la combinaison affichée n'est plus modifiée (si la tension U n'est bien entendu pas modifiée).

Câblage de la maquette pour une conversion par comptage



4.3 CONVERTISSEUR ANALOGIQUE/NUMERIQUE INTEGRE

La partie utile de la maquette est représentée sur le schéma ci-après :



4.3.1 EHANTILLONEUR BLOQUEUR

Comme la conversion analogique-numérique n'est pas un processus instantané, il est nécessaire, dans le cas de la conversion d'une tension analogique variable dans le temps, de la maintenir constante pendant la phase de conversion. Cela nécessite de prélever périodiquement des échantillons de tension : c'est le rôle de l'échantillonneur-bloqueur placé sur la maquette.

4.3.1.1 Montage

- Appliquer en E_x une tension sinusoïdale u de fréquence $f = 100\text{Hz}$ et d'amplitude $\hat{u} = 4\text{V}$.
- Relier les bornes D_{pv} et $F2$.
- Visualiser, à l'oscilloscope, la tension d'entrée de l'échantillonneur-bloqueur et la tension de sortie disponible sur la borne S_x .

4.3.1.2 Expérimentation

- Relever les chronogrammes des deux tensions précédentes.
- Modifier la fréquence du signal d'entrée du monostable en reliant la borne D_{pv} successivement à la borne $F4$, puis à la borne $F3$, puis à la borne $F2$ et enfin à la borne $F1$.
- Quelle est l'influence de la fréquence d'échantillonnage sur la forme du signal de sortie ? L'échantillonneur bloqueur fonctionne-t-il correctement quelle que soit la fréquence d'échantillonnage ?
- Relier la borne D_{pv} à la borne $F4$. Modifier la fréquence du signal d'entrée (1kHz, 5kHz et 10kHz par exemple). L'échantillonneur bloqueur fonctionne-t-il correctement quelle que soit la fréquence de la tension d'entrée ?

4.3.2 CONVERTISSEUR ANALOGIQUE-NUMERIQUE

Le but de la manipulation est de convertir la tension de sortie de l'échantillonneur-bloqueur en un nombre binaire défini sur huit bits.

4.3.2.1 Montage

- La fréquence d'échantillonnage est réglée à 4kHz (les bornes D_{pv} et $F2$ sont reliées).
- La sortie S_x de l'échantillonneur-bloqueur est reliée à l'entrée E_y du convertisseur.

-
- L'entrée Hv d'horloge du convertisseur est reliée à la borne F1 (512 kHz).

4.3.2.2 Expérimentation

a) Conversion d'une tension continue

- Appliquer en Ex une tension continue $U = 2V$.
- Relever l'état des diodes électroluminescentes.
- Ecrire la conversion binaire de la tension d'entrée. Sachant que la résolution est de 20 mV (si la tension de référence V_{ref} a été préalablement réglée à 5,12V), vérifier si le nombre binaire correspond bien à la conversion d'une tension de 2V.
- Effectuer quelques autres conversions pour différentes valeurs de U. On choisira des valeurs de U comprises entre -1V et +6V. Quelles sont les limites de U correspondant à un fonctionnement correct du convertisseur ?

b) Conversion d'une tension variable dans le temps

Cas d'une tension alternative

- Appliquer en Ex une tension sinusoïdale u de fréquence $f = 100\text{Hz}$ et d'amplitude $\hat{u} = 4V$.
 - Visualiser la tension u d'entrée et la tension de sortie de l'échantillonneur-bloqueur lorsque :
 - la borne S_x n'est pas reliée à la borne E_y ;
 - la borne S_x est reliée à la borne E_y .
- Que peut-on conclure quant à l'utilisation du montage pour la conversion numérique des tensions sinusoïdales ?

Cas d'une tension périodique

- Ajouter une composante continue de 2 V à la tension sinusoïdale u précédente ($f = 100\text{Hz}$, $\hat{u} = 4V$).
 - Visualiser la tension u d'entrée et la tension de sortie de l'échantillonneur-bloqueur lorsque :
 - la borne S_x n'est pas reliée à la borne E_y ;
 - la borne S_x est reliée à la borne E_y .
- Que peut-on conclure quant à l'utilisation du montage pour la conversion numérique des tensions sinusoïdales ?

-
- Quel est l'état des diodes électroluminescentes ? Expliquer cet état (avec une fréquence de 1Hz on voit très bien ce qui se passe).

4.3.3 ASSOCIATION CAN/CNA

4.3.3.1 Montage

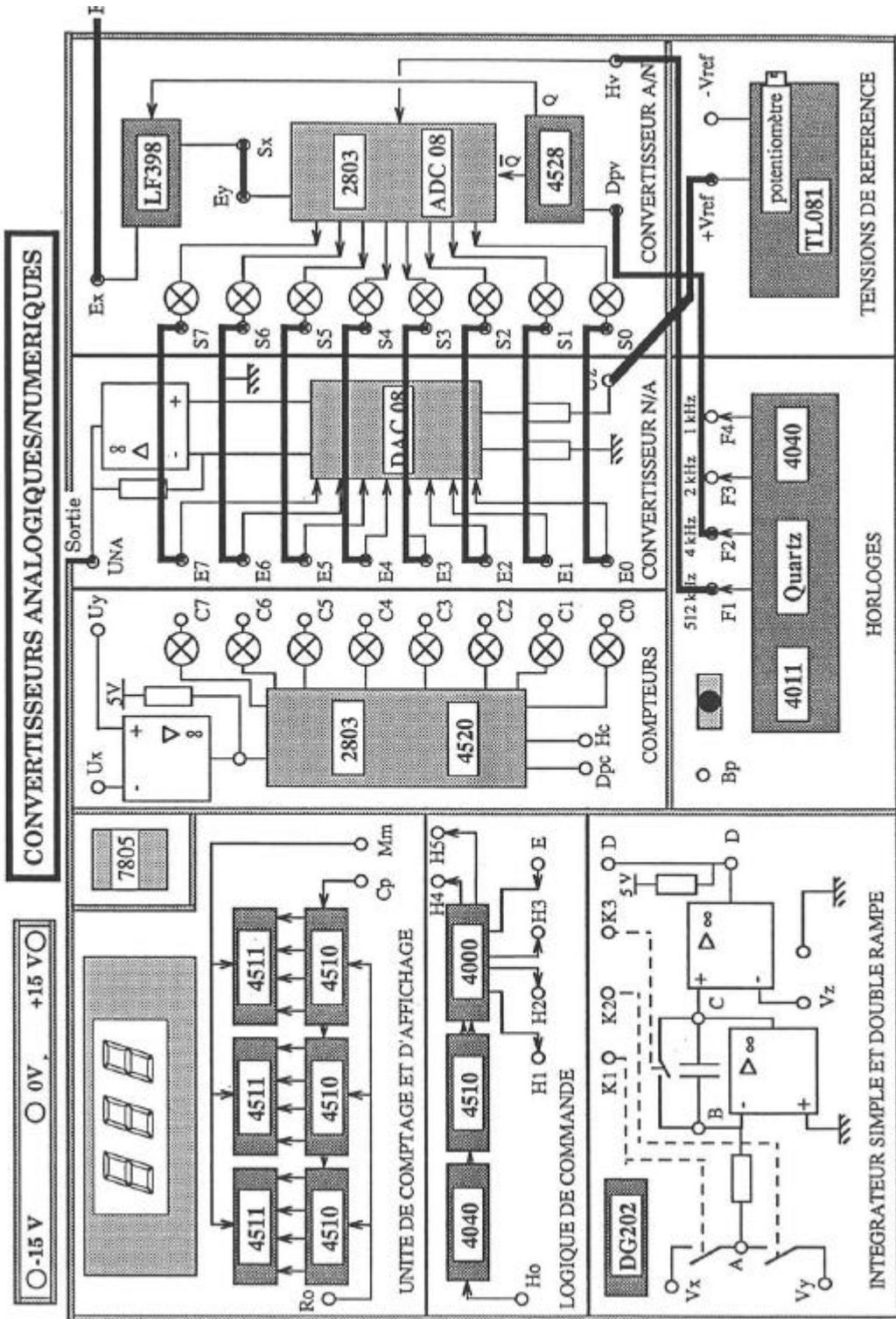
- La fréquence d'échantillonnage est réglée à 4 kHz (les bornes Dpv et F2 sont reliées).
- La sortie Sx de l'échantillonneur-bloqueur est reliée à l'entrée Ey du convertisseur.
- L'entrée Hv d'horloge du convertisseur est reliée à la borne F1 (512kHz).
- Relier la borne
 - E0 à la borne S0, E1 à la borne S1, E2 à la borne S2, E3 à la borne S3, E4 à la borne S4, E5 à la borne S5, E6 à la borne S6 et E7 à la borne S7 ;
 - Uz à +Vref

4.3.3.2 Expérimentation

- Visualiser à l'oscilloscope les tensions disponibles aux bornes Ex, Sx et U_{NA} .
- Relever en concordance des temps les chronogrammes de ces tensions.
- On désire retrouver la tension appliquée à l'entrée du CAN ; pour cela il faut filtrer la tension de sortie du CNA.

Quel type de filtre proposez-vous ? Effectuer la vérification expérimentale.

Câblage de la maquette pour l'étude de l'association CAN/CNA



ASSOCIATION CAN/CNA

4.4 COMPARAISON DES DIFFERENTS TYPES DE CONVERTISSEURS

4.4.1 MONTAGE

4.4.1.1 INTEGRATEUR DOUBLE RAMPE

- Réaliser les connexions suivantes :
 - relier Ho à F2,
 - relier H1 à K1, H2 à K2 et H3 à K3.
- La borne Vx est la borne à laquelle il faut appliquer la tension inconnue dont on veut connaître la valeur moyenne.
- La borne Vy est la borne à laquelle il faut appliquer une tension de référence. Dans le cas de notre utilisation, cette tension doit être négative. On peut, par exemple, utiliser la tension de référence -Vref fournie sur la maquette. Pour obtenir des sauts de tension de pas simples, il est préférable de régler -Vref à -5,12 V en utilisant le potentiomètre de réglage placé à côté de la borne -Vref. Travaillant sur 8 bits, cela fait des sauts de 20mV (en effet, il y a 2^8-256 combinaisons, donc 256 sauts de tension soit des pas de $\frac{5,12}{256} = 0,02V$).
- La borne Vz est reliée à la masse.
- Relier D à E.
- Relier les bornes :
 - H4 à Cp,
 - H5 à Mm,
 - H1 à Ro.
- Appliquer à l'entrée Vx du montage une tension continue de 2V.

4.4.1.2 CONVERTISSEUR PAR COMPTAGE

- Relier les bornes :
 - U_{NA} à U_y ,
 - C0 à E0, C1 à E1, C2 à E2, C3 à E3, C4 à E4, C5 à E5, C6 à E6 et C7 à E7,
 - U_z à $+V_{ref}$: pour obtenir des sauts de tension de pas simples, il est préférable de régler $+V_{ref}$ à $+5,12$ V en utilisant le potentiomètre de réglage placé à côté de la borne $+V_{ref}$. Travaillant sur 8 bits, cela fait des sauts de 20 mV (en effet, il y a $2^8=256$ combinaisons, donc 256 sauts de tension soit des pas de $\frac{5,12}{256}=0,02$ V).
- L'entrée d'horloge H_c des compteurs étant reliée à F1 (c'est-à-dire à 512 kHz).
- Appliquer en U_x une tension continue $U = 2V$.
- Relier l'entrée de mise à zéro D_{pc} à B_p .

4.4.1.3 CONVERTISSEUR INTEGRE

- La fréquence d'échantillonnage est réglée à 4 kHz (les bornes D_{pv} et F2 sont reliées).
- La sortie S_x de l'échantillonneur-bloqueur est reliée à l'entrée E_y du convertisseur.
- L'entrée H_v d'horloge du convertisseur est reliée à la borne F1 (512 kHz).
- Appliquer en E_x une tension continue $U = 2V$.

4.4.2 EXPERIMENTATION

- La tension à convertir est une tension continue de 2V mesurée avec un voltmètre numérique de bonne précision ; la résolution est de 20mV (si les tensions de référence $\pm V_{ref}$ ont été préalablement réglées à 5,12V).
Ecrire la conversion binaire de la tension d'entrée.
- Relever l'état des diodes électroluminescentes placées à la sortie du CAN intégré.
- Après avoir appuyé sur le bouton poussoir puis l'avoir relâché, relever l'état des diodes électroluminescentes placées à la sortie des compteurs.
- Relever la valeur affichée par l'unité de comptage et d'affichage (ne pas oublier que l'affichage est en $10^{-2}V$).
- Vérifier la validité des mesures en comparant :
 - les combinaisons binaires obtenues à celle attendue,
 - l'indication des afficheurs de la maquette à l'indication du voltmètre numérique.
- Pour plusieurs autres valeurs de la tension à convertir, effectuer de nouveaux relevés (ne pas oublier d'appuyer sur le bouton poussoir Bp avant chaque mesure).
- Tracer les caractéristiques d'entrée/sortie de chaque type de conversion. Comparer les caractéristiques obtenues (et plus particulièrement la linéarité).

5 Rappels théoriques

5.1 FONCTIONS HYBRIDES

5.1.1 REPRÉSENTATION D'UNE GRANDEUR PHYSIQUE

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

5.1.1.1 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.

5.1.1.2 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.

5.1.2 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, ...

5.1.2.1 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).

5.1.2.2 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.

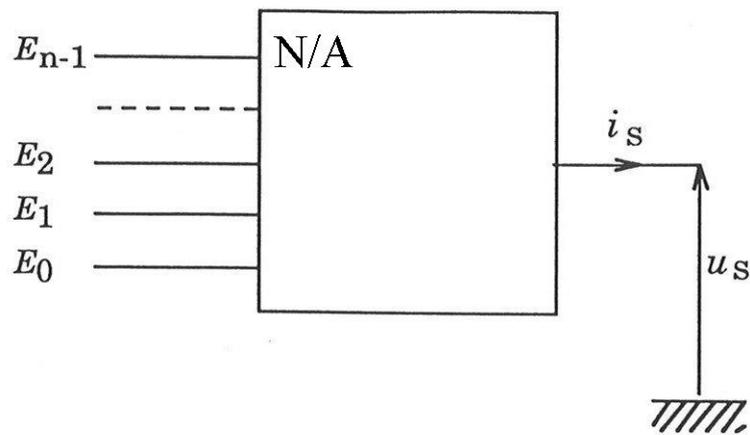
Dans des systèmes plus complexes, comme la régulation par exemple, on capte une grandeur analogique (la vitesse par exemple), elle est ensuite convertie en grandeur numérique par l'intermédiaire d'un convertisseur analogique numérique.

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*.

5.1.3 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.



5.1.3.1 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 (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.

5.1.3.2 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 0,2mA : 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 :

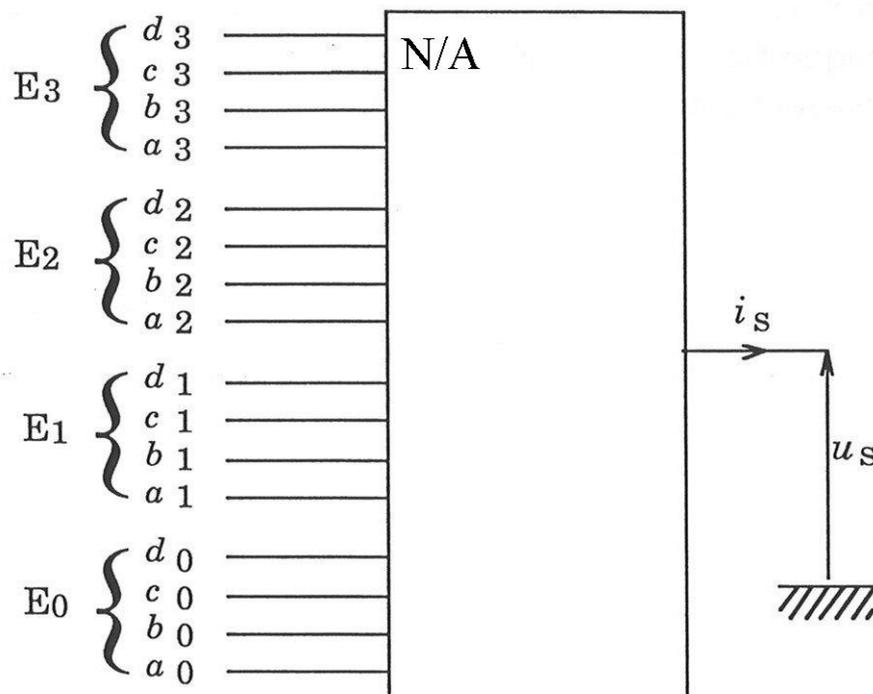
$$\frac{0,2}{51} \times 100\% = 0,4\%$$

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

5.1.3.3 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 E_0 , E_1 , E_2 ou E_3 , de quatre bits (a_i, b_i, c_i, d_i) est représenté en binaire naturel.

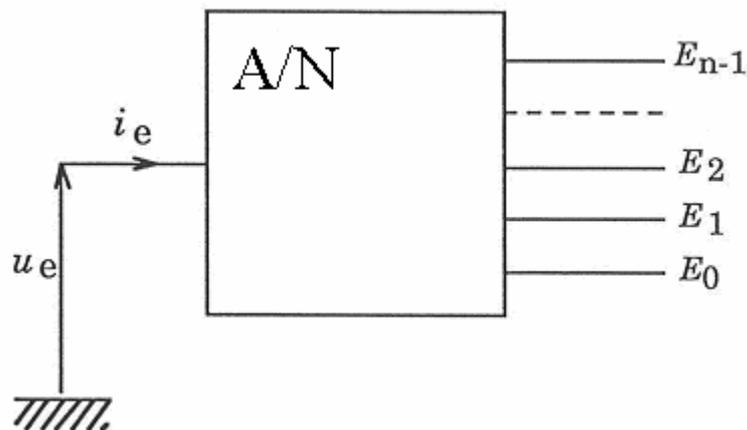
Dans chacun de ces chiffres, a_i est le bit de poids le plus faible et d_i celui de poids le plus fort. E_0 est le chiffre de poids le plus faible et E_3 celui de poids le plus fort. Deux chiffres consécutifs sont dans un rapport de 10.

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 a_0 du chiffre E_0 .

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 $10^{-2}\%$.

5.1.4 CONVERSION ANALOGIQUE/NUMERIQUE (CAN)

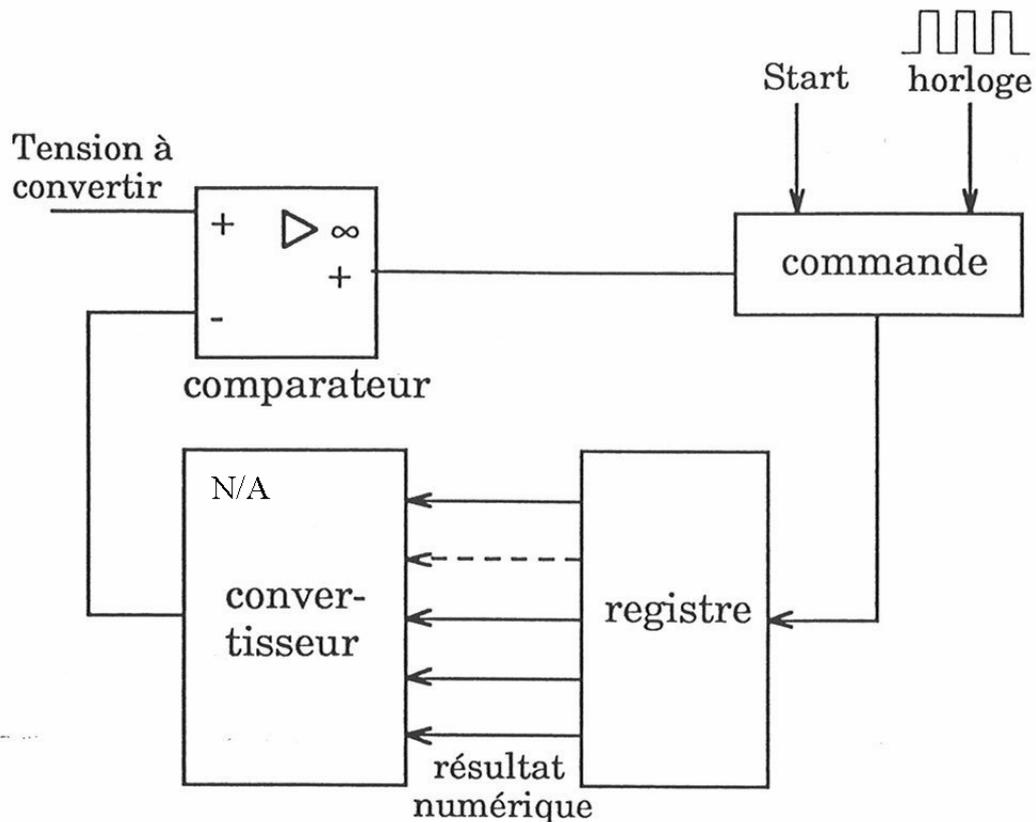
La conversion analogique numérique réalise la transformation d'une tension ou d'un courant en un signal numérique ; généralement représenté en binaire naturel ou en décimal codé binaire (DCB). La figure ci-après est la représentation symbolique du convertisseur qui réalise cette opération.



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

5.1.4.1 Principe de la conversion

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

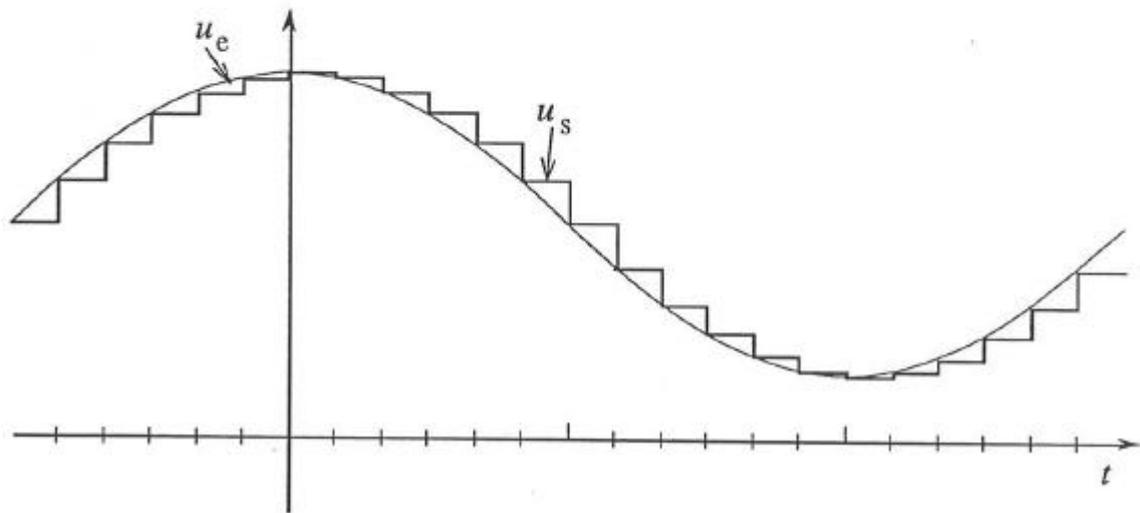
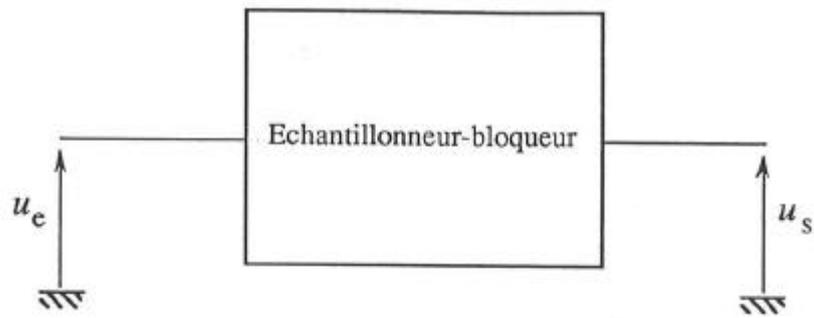


Ces convertisseurs possèdent un convertisseur numérique analogique: une logique de commande permet de lancer le processus de conversion (START) ; elle modifie, à la cadence imposée par l'horloge, le contenu binaire du registre jusqu'à l'égalité entre la tension de sortie du CNA et la tension à convertir ; 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.

5.1.4.2 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.



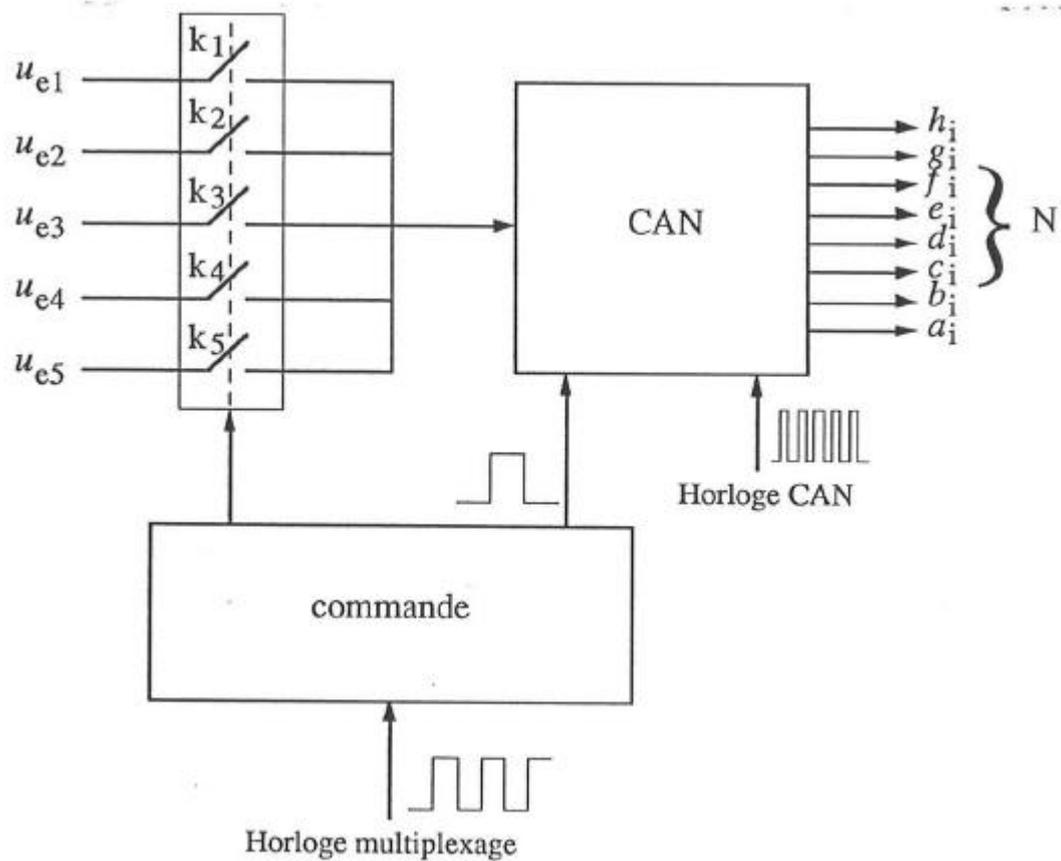
5.1.4.3 Multiplexage

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.

5.2 CONVERTISSEURS NUMERIQUE/ANALOGIQUE

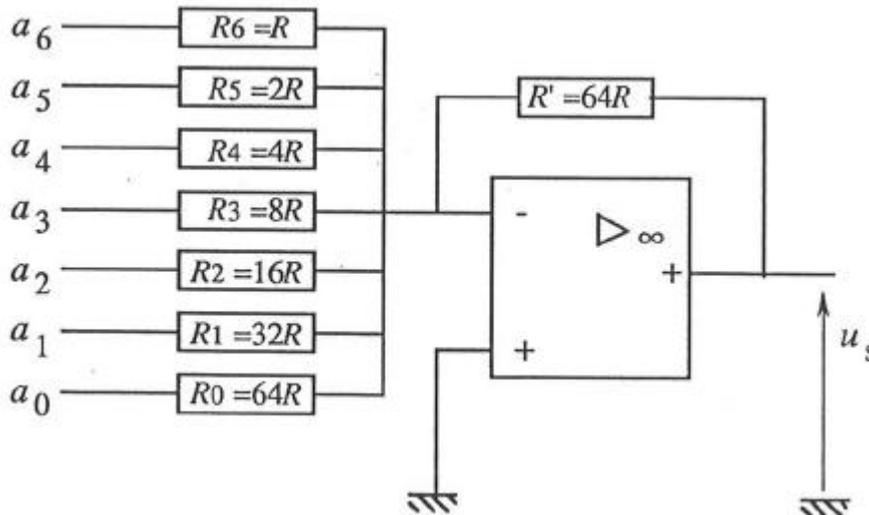
Un convertisseur numérique analogique génère une tension électrique (ou un courant électrique) proportionnelle au nombre fourni au convertisseur. Ce nombre est en général écrit sous la forme d'un binaire naturel ou d'un décimal codé binaire (DCB).

5.2.1 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.

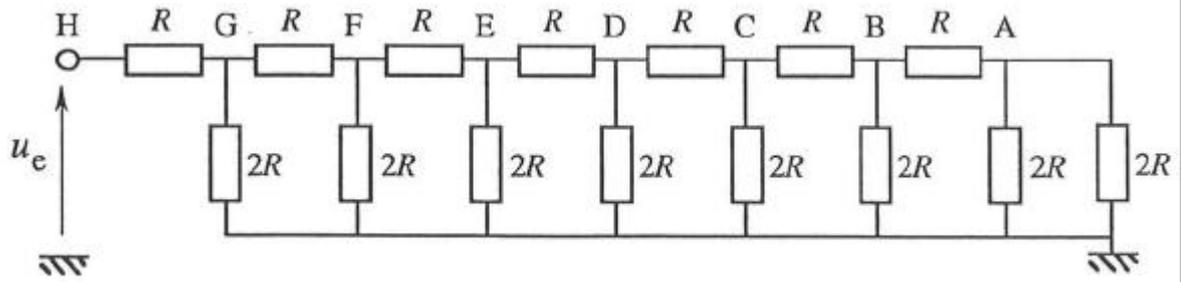
Les tensions associées aux bits correspondant ont une valeur particulière : $a_i E = 0,1$ V par exemple pour le niveau "1" (a_i est alors égal à 1) et 0 V pour le niveau "0" (a_i est alors égal à 0). La source doit avoir une résistance interne très faible devant les résistances $R_0, R_1, R_2, R_3, R_4,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

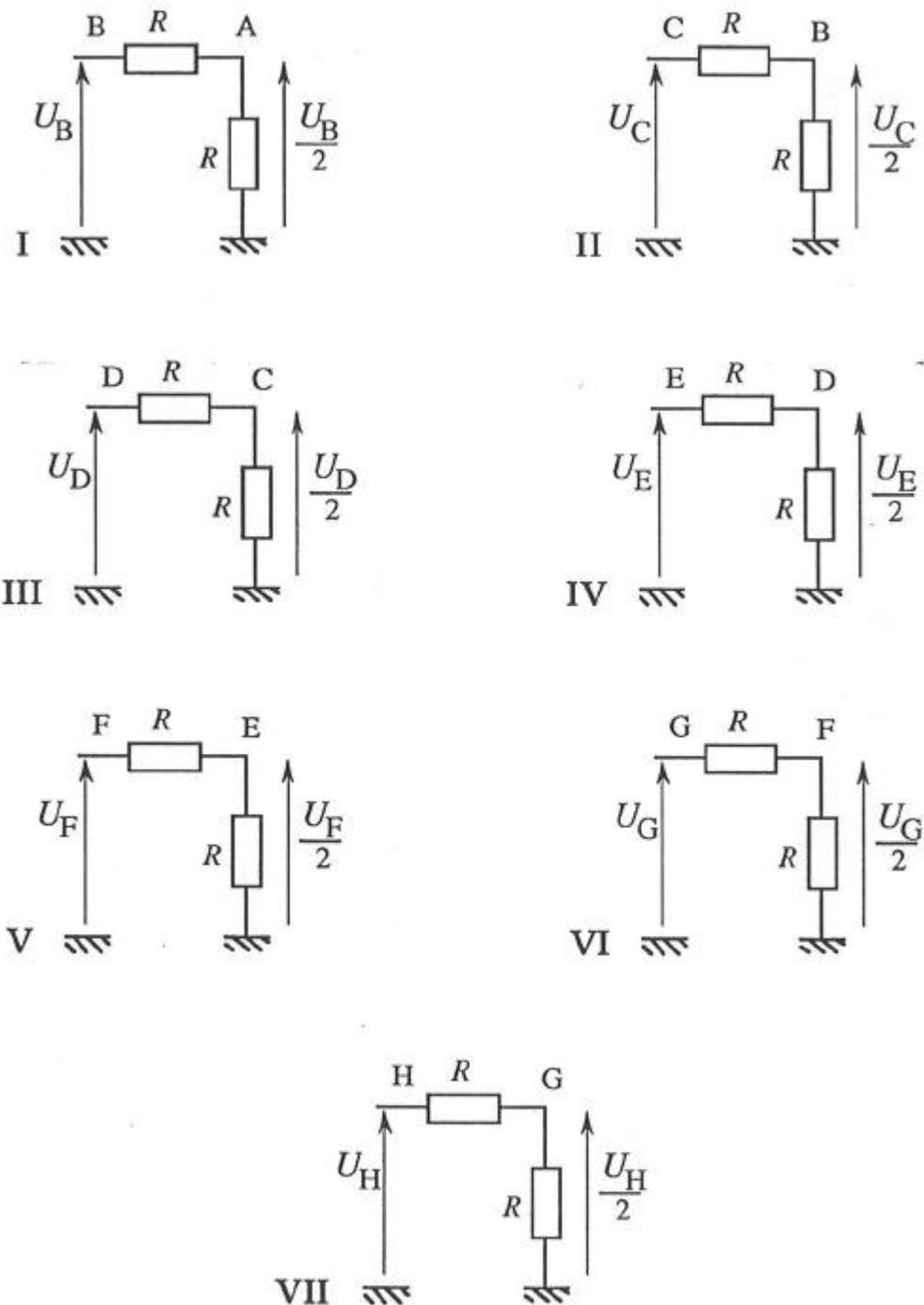
Dans notre exemple, nous avons choisi des états haut et bas de tension, nous aurions pu choisir des états haut et bas de courant, l'alimentation d'entrée aurait alors été un générateur de courant. Sur le module CNA (réf. 3806), nous proposons les deux possibilités d'étude.

5.2.2 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 :

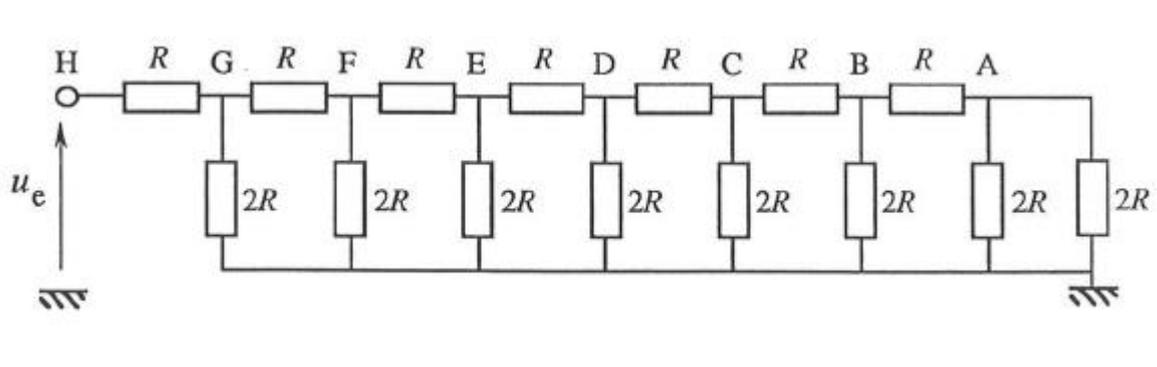
$$U_A = U_B/2, U_B = U_C/2, U_C = U_D/2, U_D = U_E/2, U_E = U_F/2, U_F = U_G/2 \text{ et } U_G = U_H/2$$

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 :

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

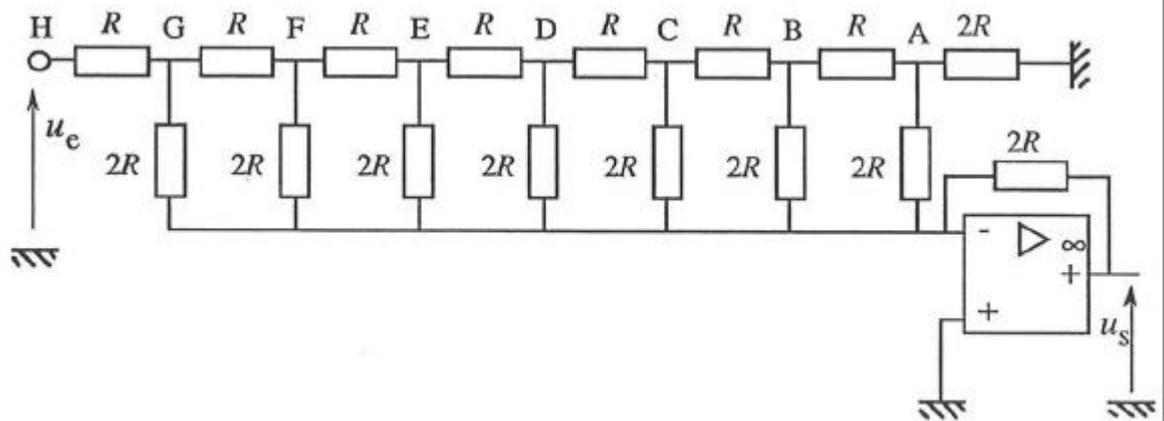
Soit encore en remplaçant $U_A, U_B, U_C, U_D, U_E, U_F, U_G$ et U_H par leurs valeurs en fonction de u_e :

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

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 :

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

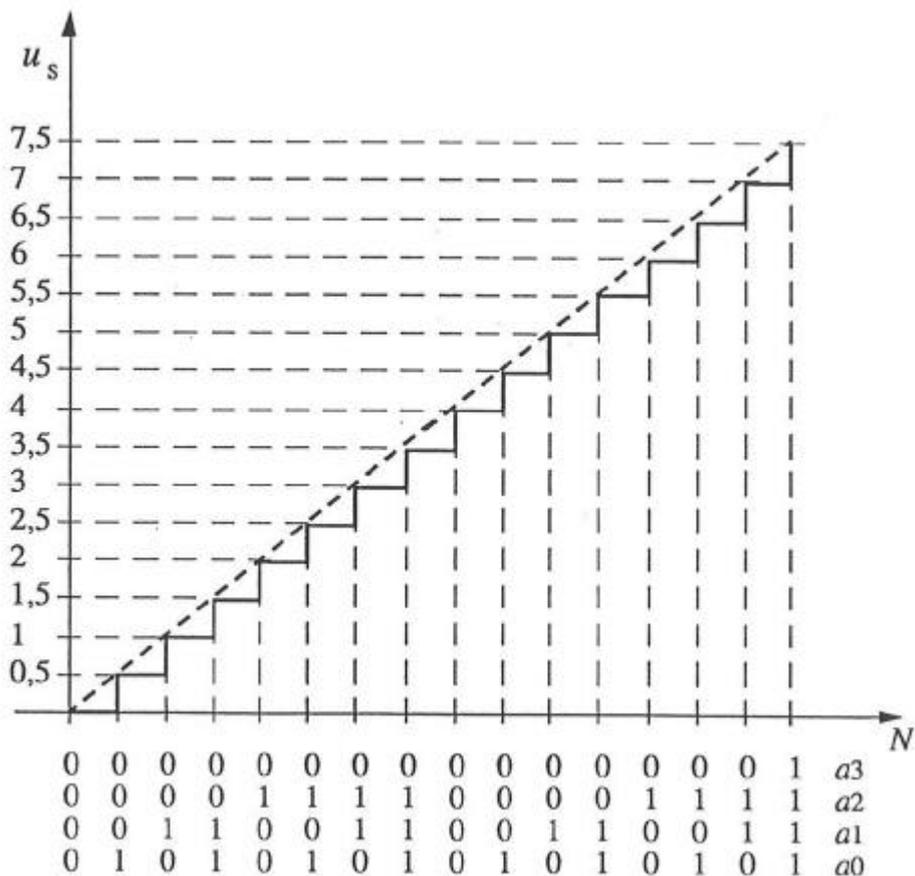
5.2.3 CARACTERISTIQUES D'UN CNA

5.2.3.1 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.

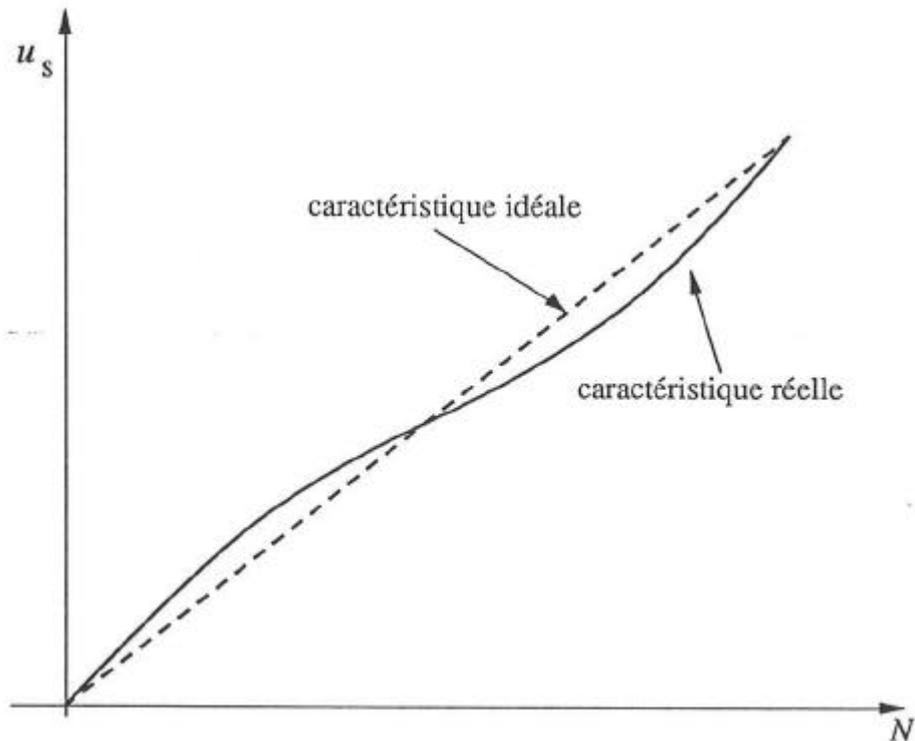
Exemple :

Caractéristique de transfert d'un CNA de 4 bits.



5.2.3.2 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.



5.2.3.3 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.

5.2.3.4 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.

5.2.4 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.

5.2.4.1 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.

5.2.4.2 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.

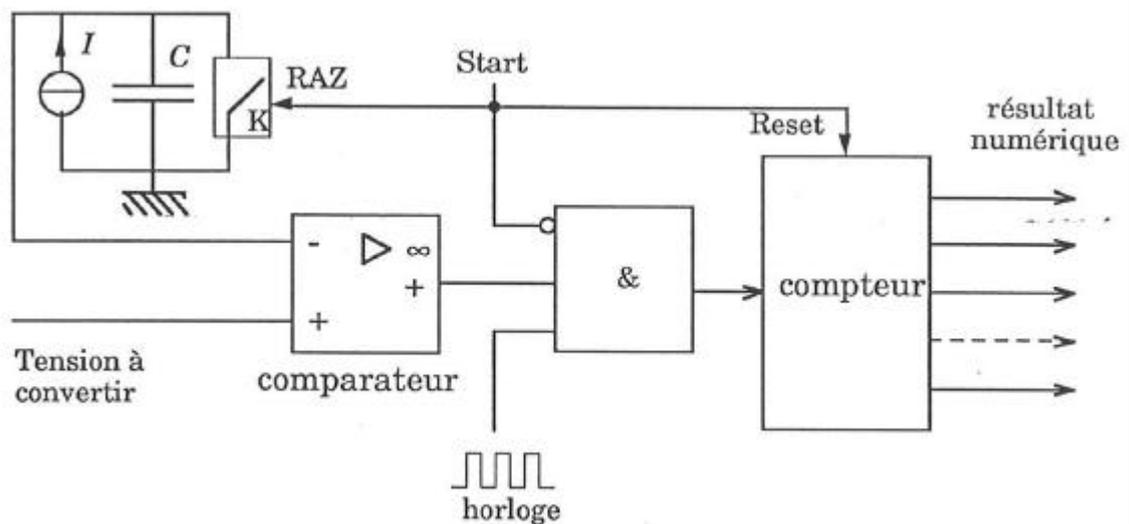
Il en est de mêmes pour les essais automatiques de composants et circuits analogiques comme les diodes, les transistors, les amplificateurs opérationnels,...

5.3 CONVERTISSEURS ANALOGIQUE / NUMERIQUE

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

5.3.1 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 :

$$t_1 = C u_e / I$$

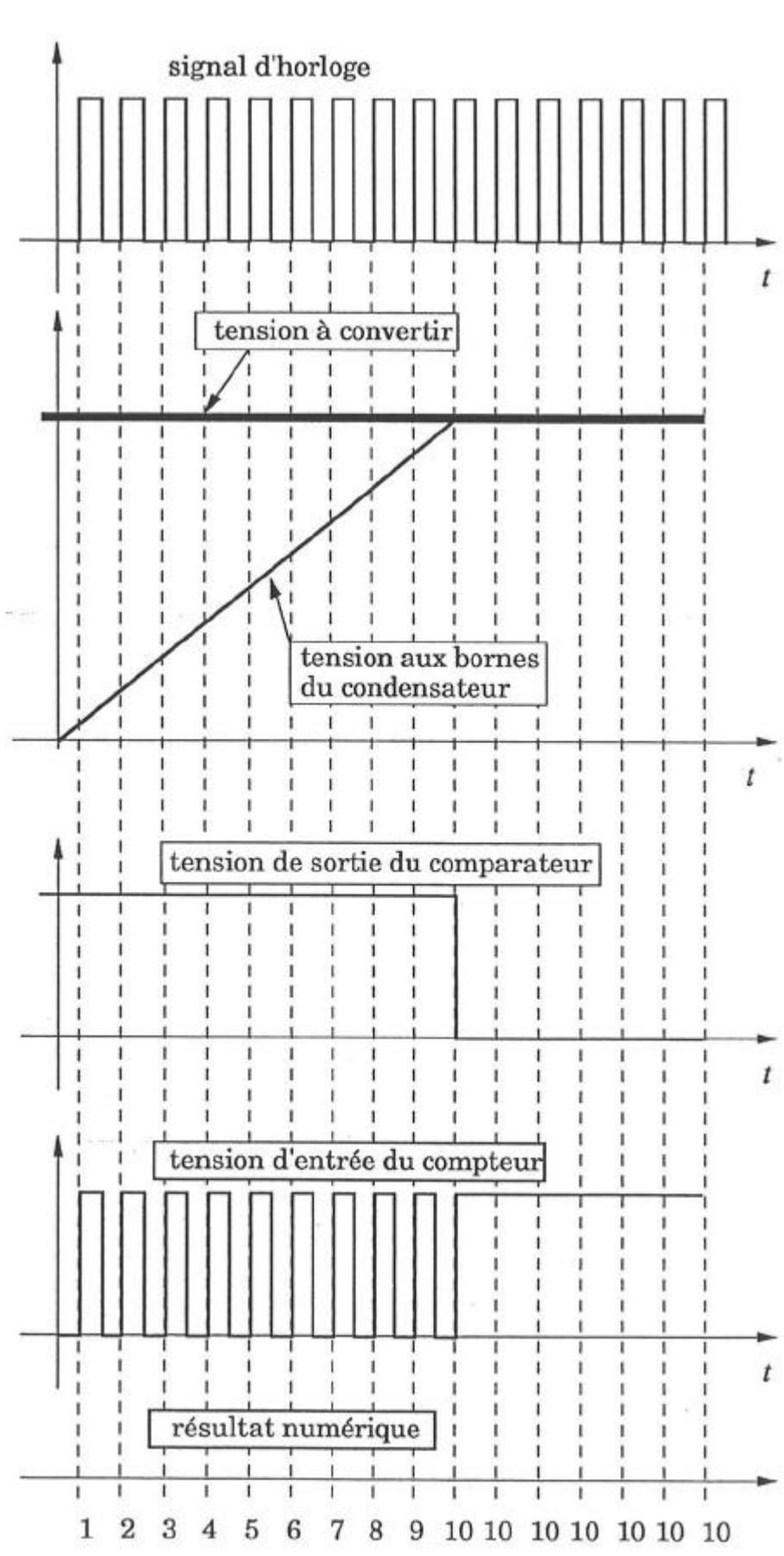
I et C étant des constantes, la mesure de u_e se ramène à celle de t_1 . Pendant la durée de la charge, le compteur compte les impulsions, de période T , générées par l'horloge.

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.**

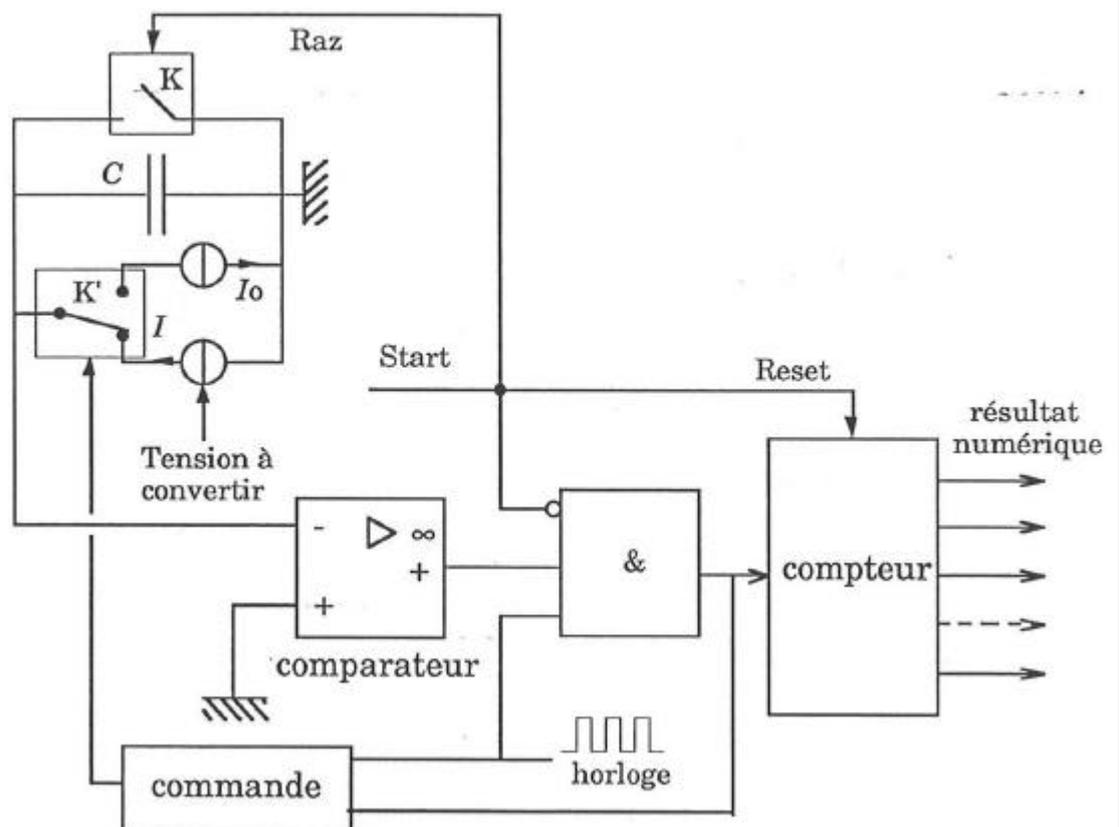
Les chronogrammes représentés sur la figure suivante illustrent le fonctionnement de ce convertisseur.



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.

5.3.2 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_c à convertir ($I = k u_c$). 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 $I = k u_c$, d'où :

$$N_1 T k u_c = N_2 T I$$

$$N_2 = k N_1 u_c / I$$

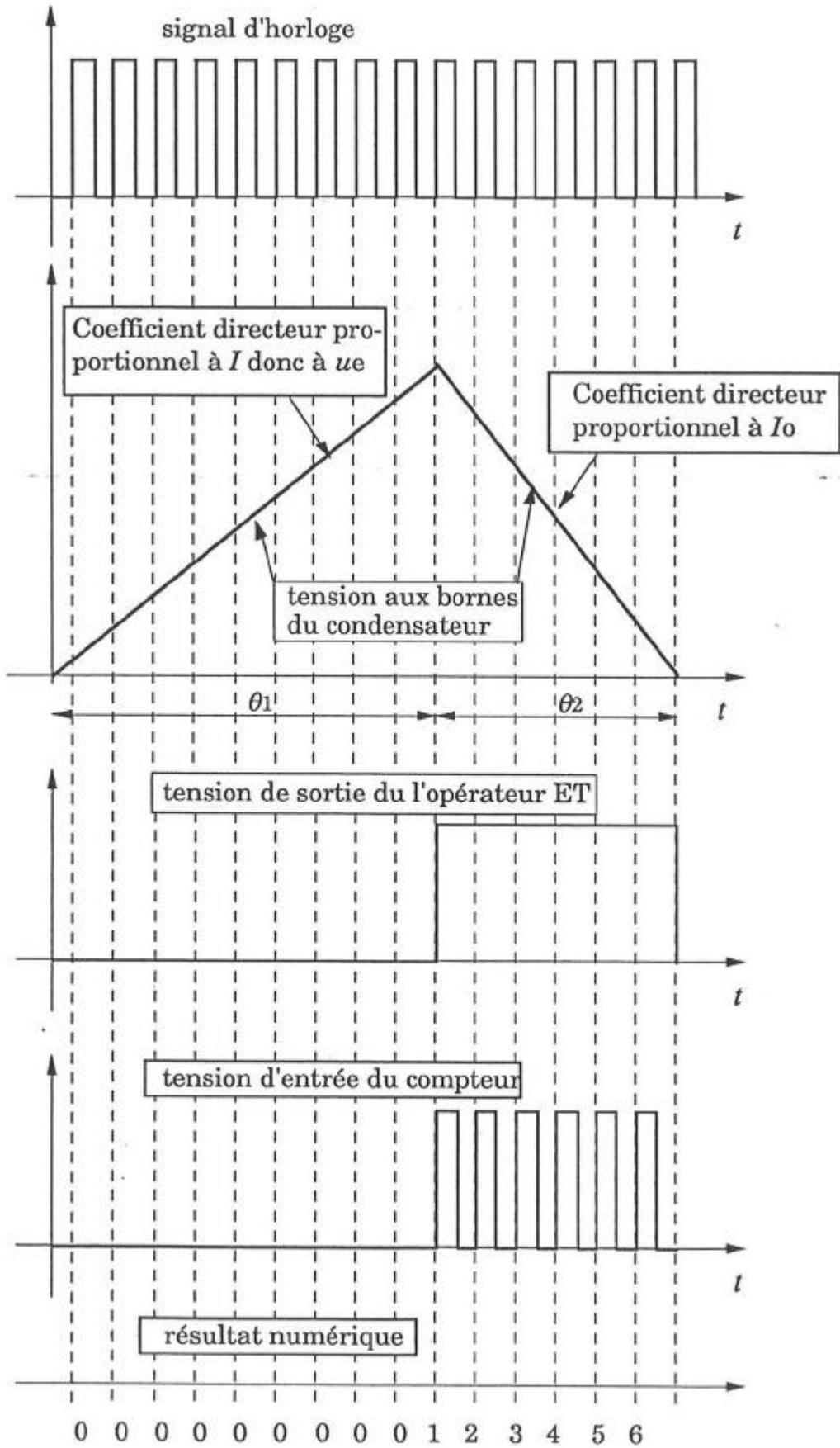
Soit :

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.

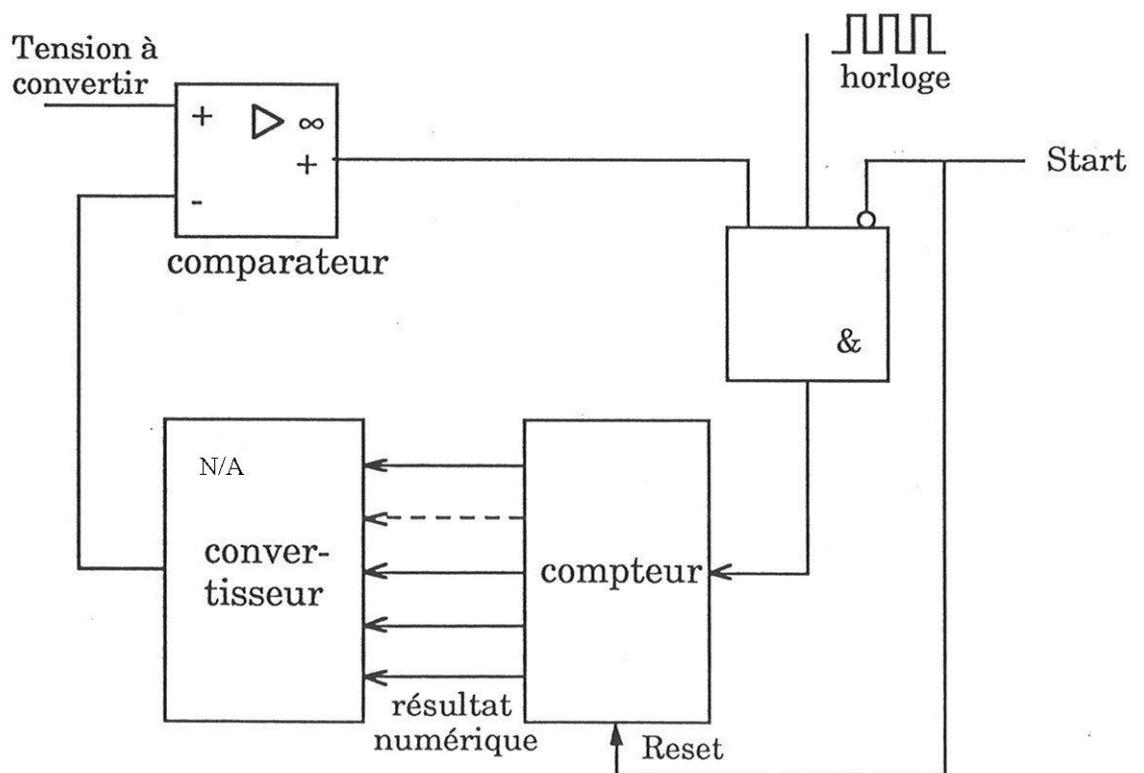
Remarque :

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

5.3.3 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.

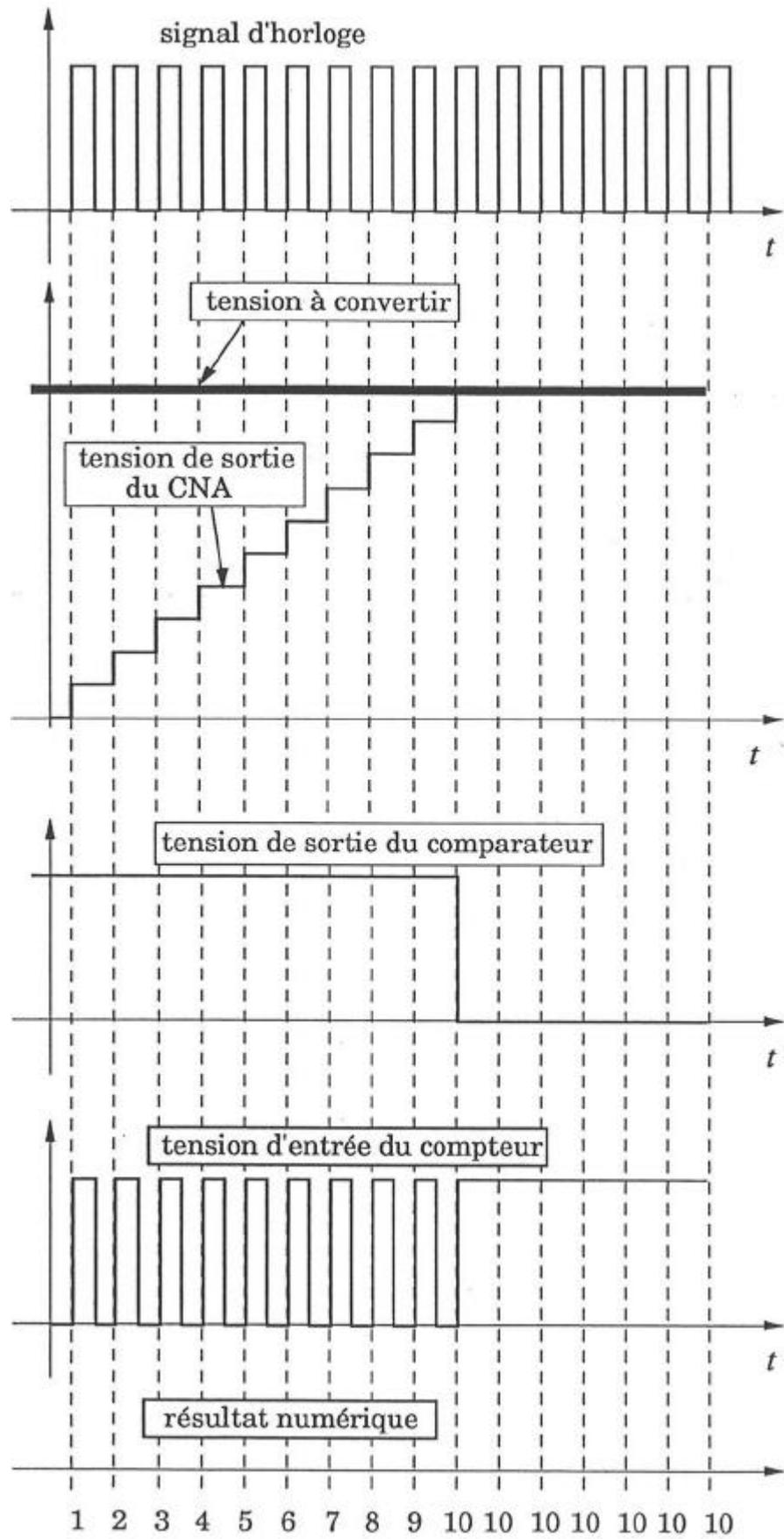
Lorsque l'entrée START passe à l'état bas, l'opérateur ET est validé : le signal d'horloge peut alors passer et arriver jusqu'au compteur.

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.

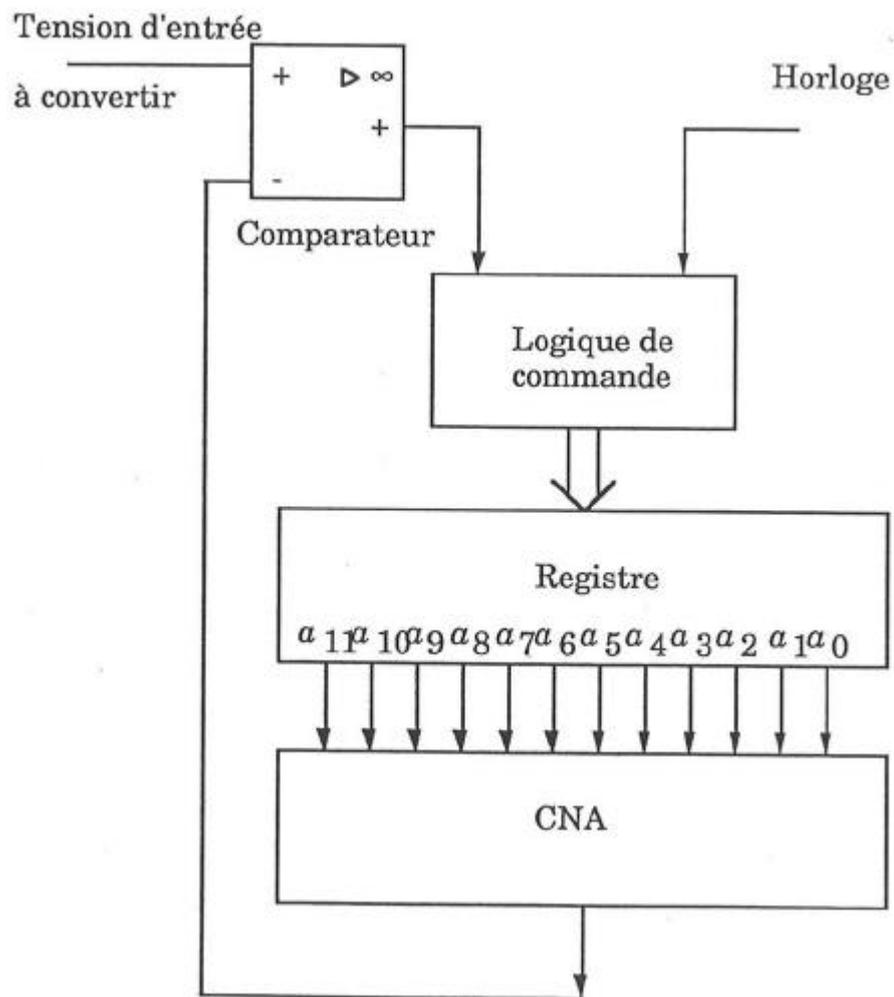
La précision du convertisseur à comparaison directe dépend de celle du CNA utilisé pour produire la tension de comparaison.

- 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.

5.3.4 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" .

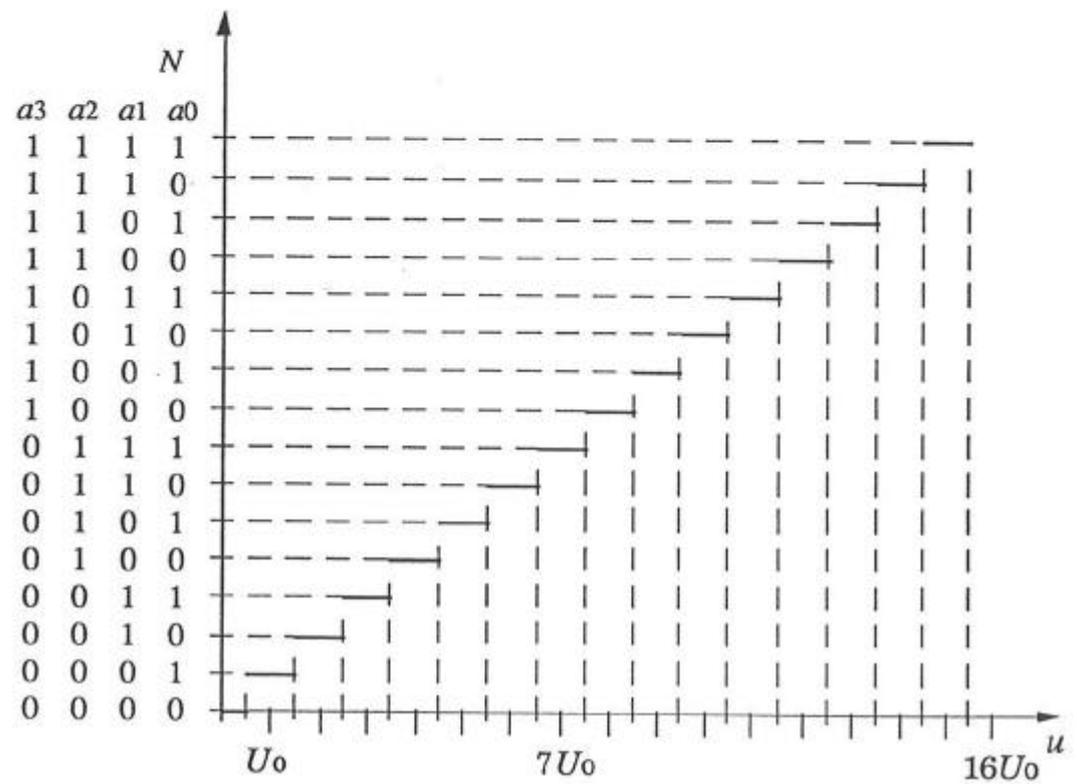
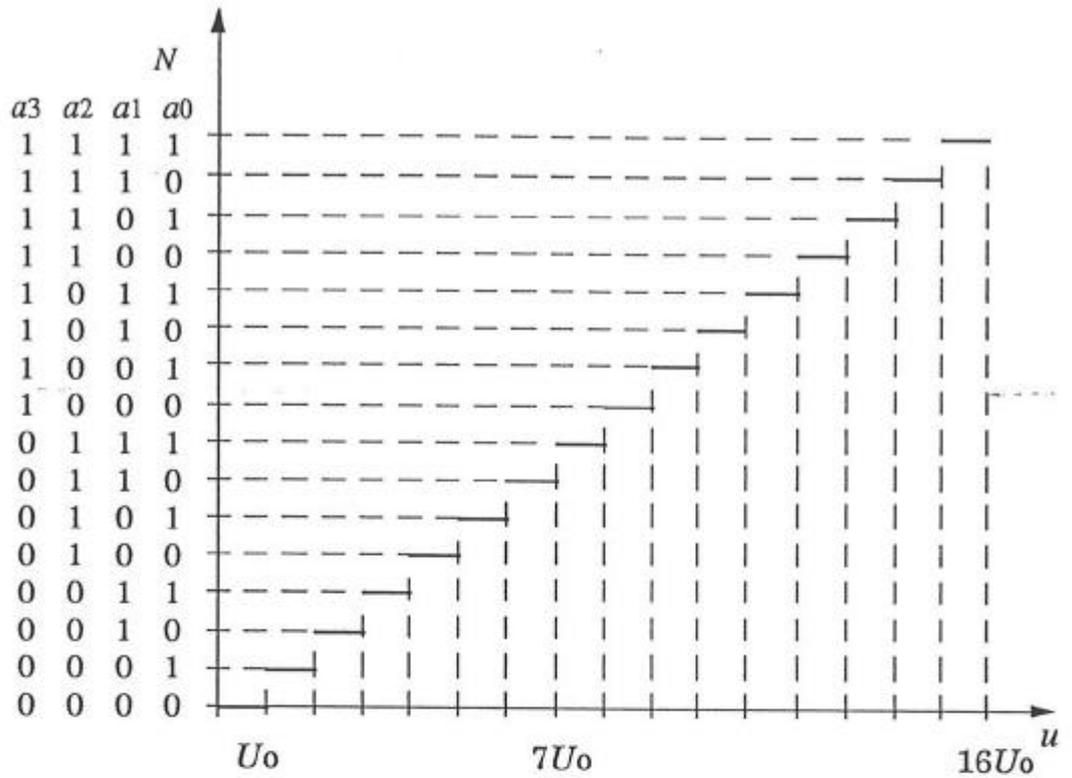
On continue ainsi la comparaison avec les bits suivants jusqu'à l'obtention à la sortie du CNA d'une tension égale à la tension à convertir.

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.

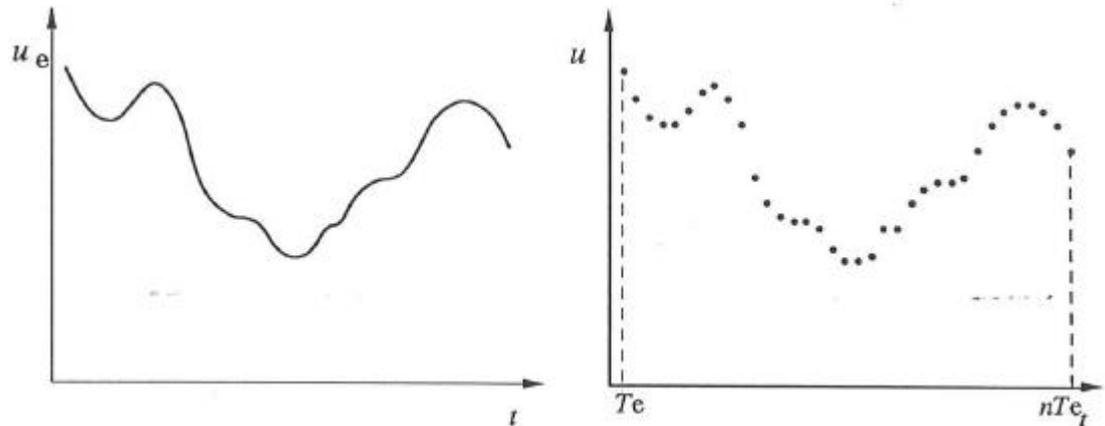
5.4 ACQUISITION ET TRAITEMENT DES SIGNAUX

5.4.1 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.

5.4.1.1 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.

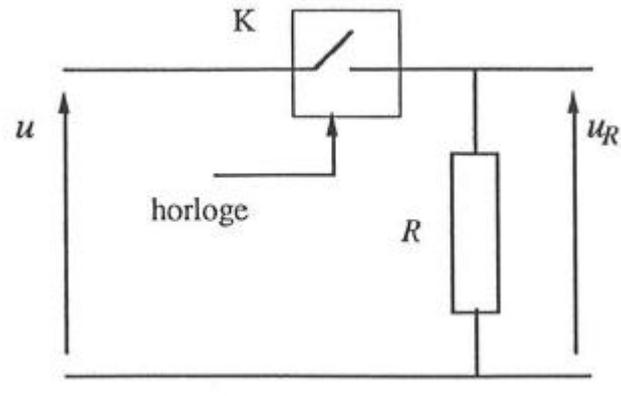
Appelons T_e la période d'échantillonnage : le signal n'est défini qu'aux instants :

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

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

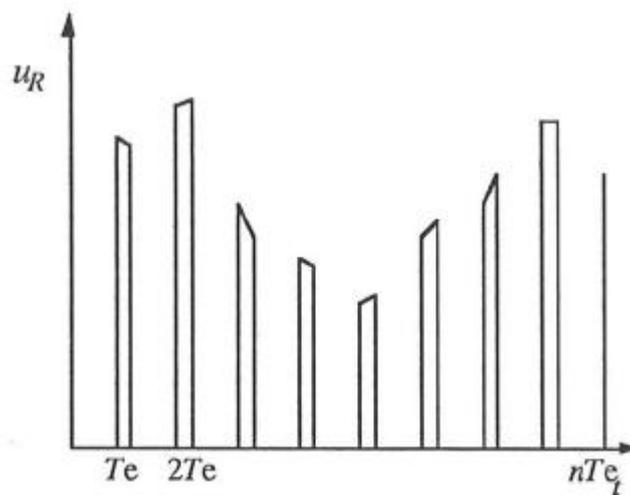
Ce type de signal ne peut pas être obtenu expérimentalement mais il est possible de s'en rapprocher.

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.

5.4.1.2 Reconstitution du signal

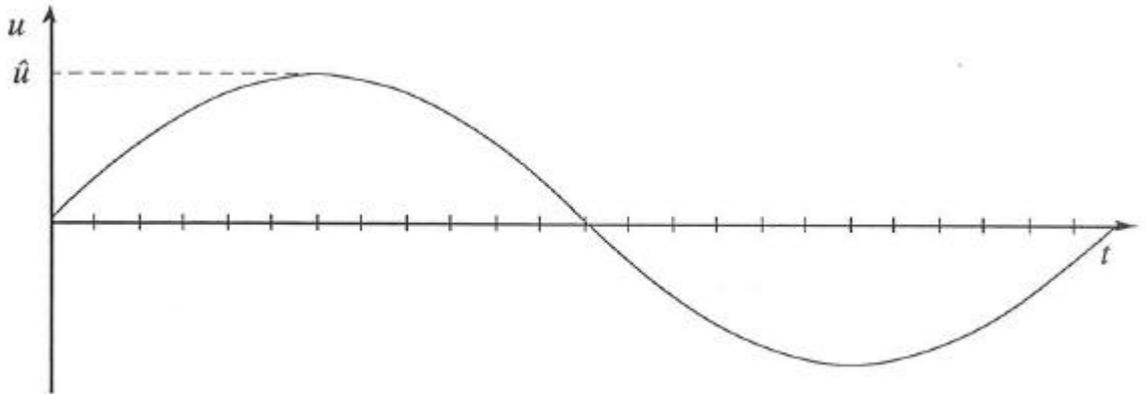
Le signal échantillonné doit contenir toutes les informations contenues dans le signal initial.

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.

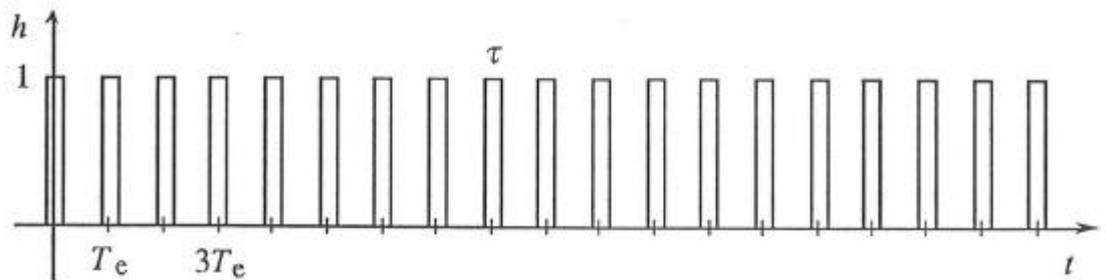
Exemple :

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 :

$$\Omega = \frac{2\mathbf{p}}{T_e}$$

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

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

Ce qui donne :

$$h_n = \frac{2}{n\mathbf{p}} \sin\left(n\mathbf{p} \frac{t}{T_e}\right)$$

La grandeur h s'écrit alors :

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

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

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

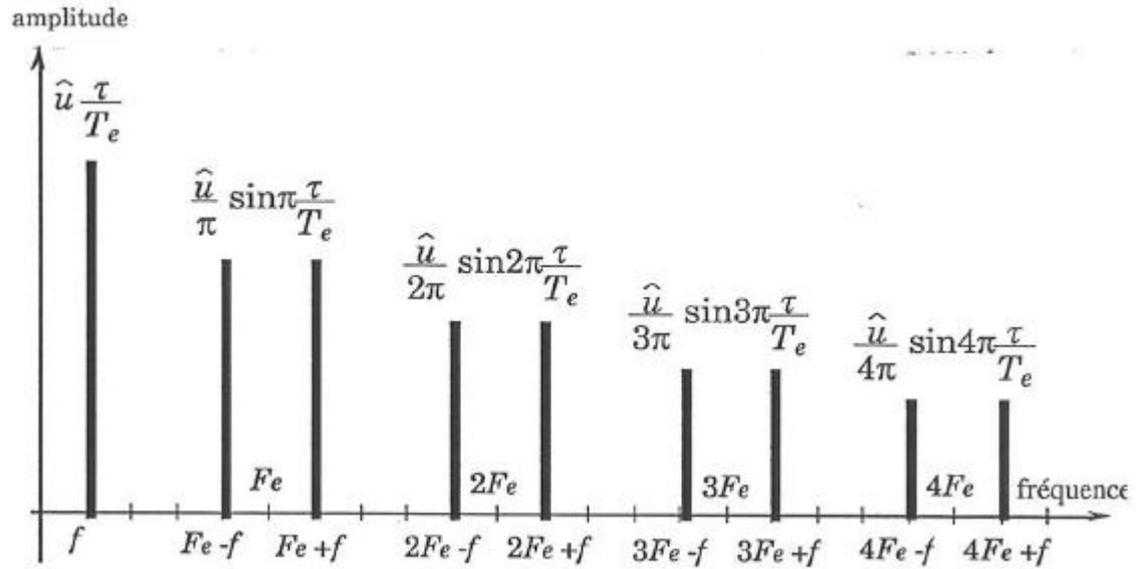
Par application de la relation :

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

Nous obtenons :

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

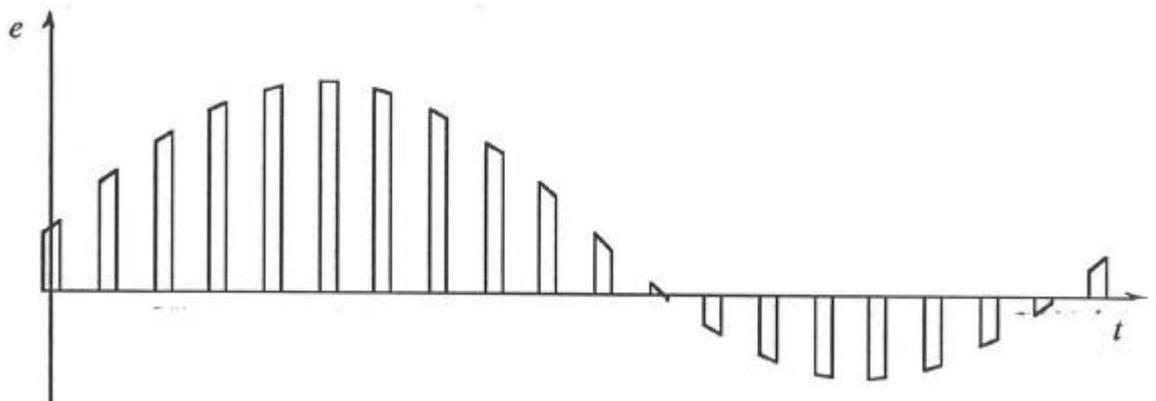
Ce qui donne le spectre de fréquences suivant :



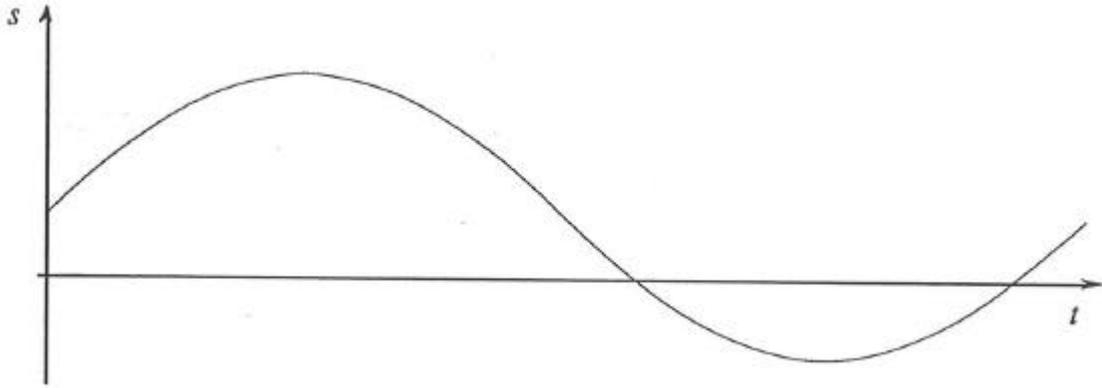
Nous observons une composante de fréquence f et d'amplitude $\hat{u} \frac{t}{T_e}$ deux composantes de fréquences $Fe+f$ et $Fe-f$ et d'amplitude $\frac{\hat{u}}{p} \sin p \frac{t}{T_e}$, deux composantes de fréquences $2Fe+f$ et $2Fe-f$ et d'amplitude $\frac{\hat{u}}{2p} \sin 2p \frac{t}{T_e}$, deux composantes de fréquences $3Fe+f$ et $3Fe-f$ et d'amplitude $\frac{\hat{u}}{3p} \sin 3p \frac{t}{T_e}, \dots$

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 :

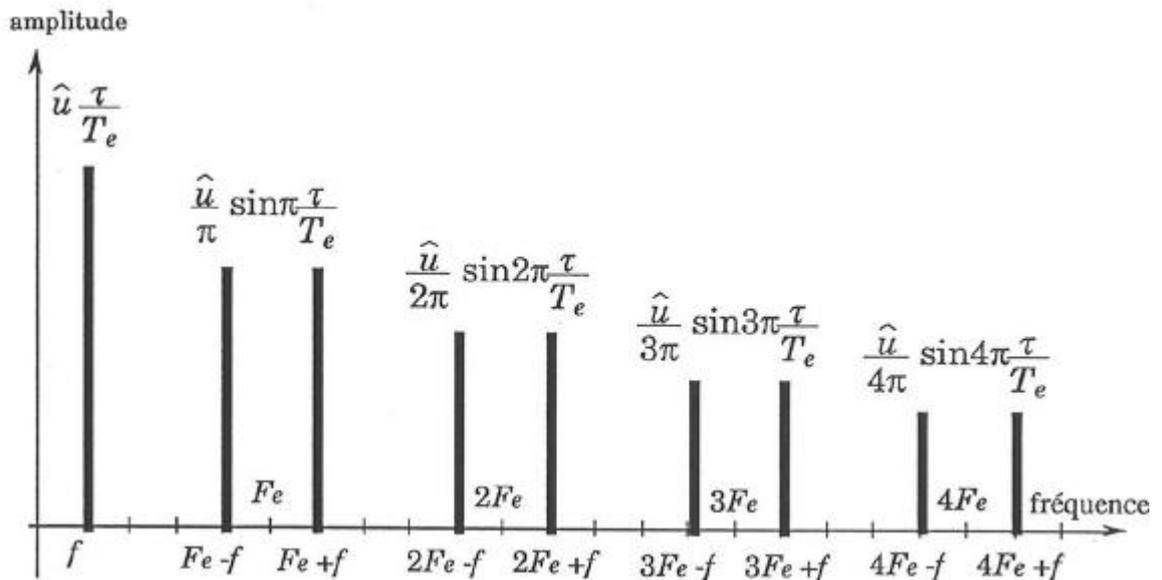


A la sortie du filtre passe-bas, nous retrouvons l'enveloppe de ce signal qui est, à une composante continue près, le signal initial :



5.4.1.3 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 :

$$f < F_e - f$$

c'est-à-dire :

$$F_e > 2f$$

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.

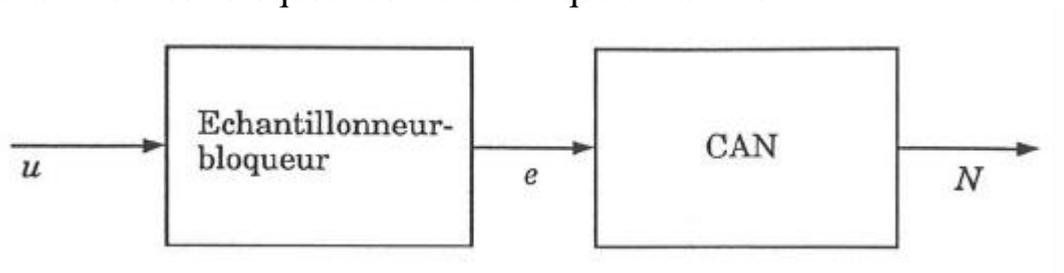
Remarque :

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.

5.4.1.4 Principe de l'échantillonneur-bloqueur

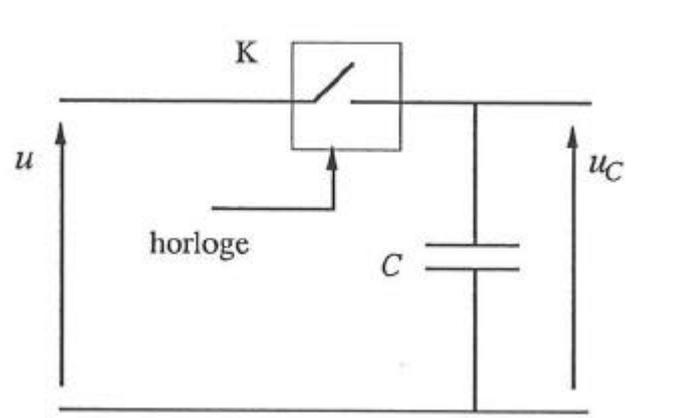
L'échantillonnage d'un signal à convertir est réalisé par un échantillonneur-bloqueur.

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 :

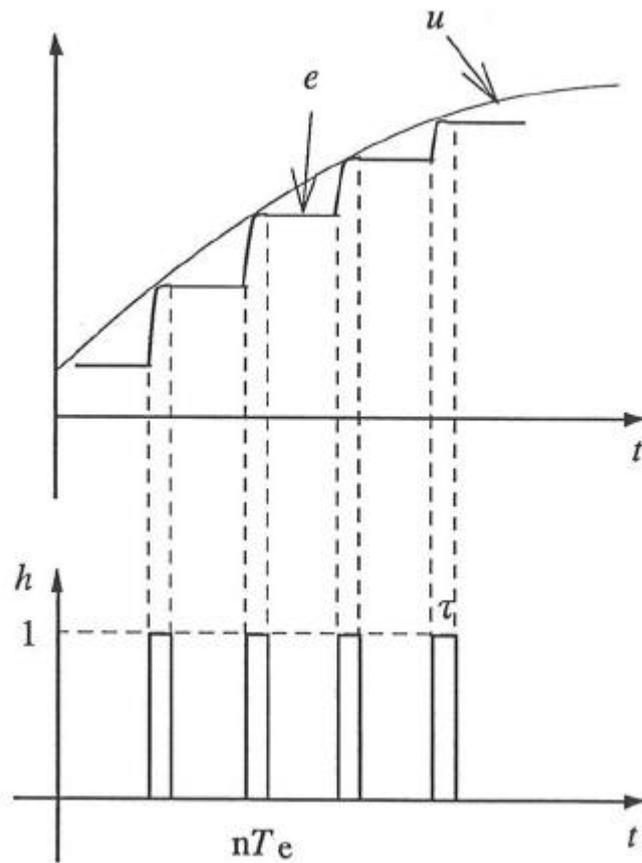


L'interrupteur électronique K est commandé au rythme du signal d'horloge dont la période T_e est la période d'échantillonnage.

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.



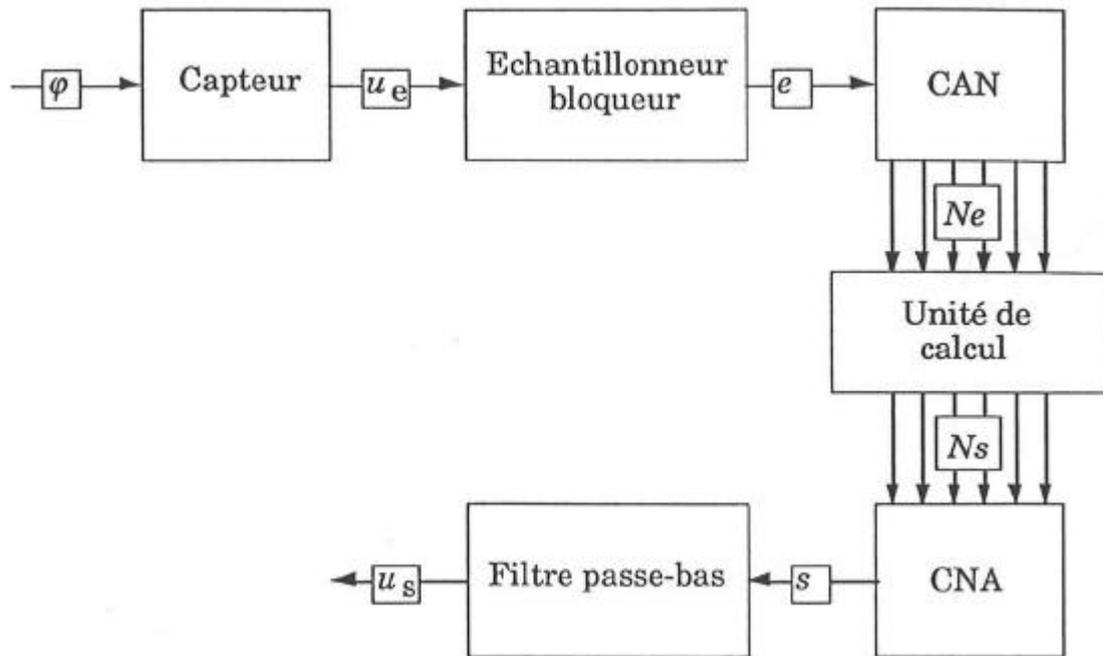
Le fonctionnement se décompose donc en trois phases :

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

5.4.2 STRUCTURE D'UNE CHAÎNE NUMERIQUE

5.4.2.1 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.

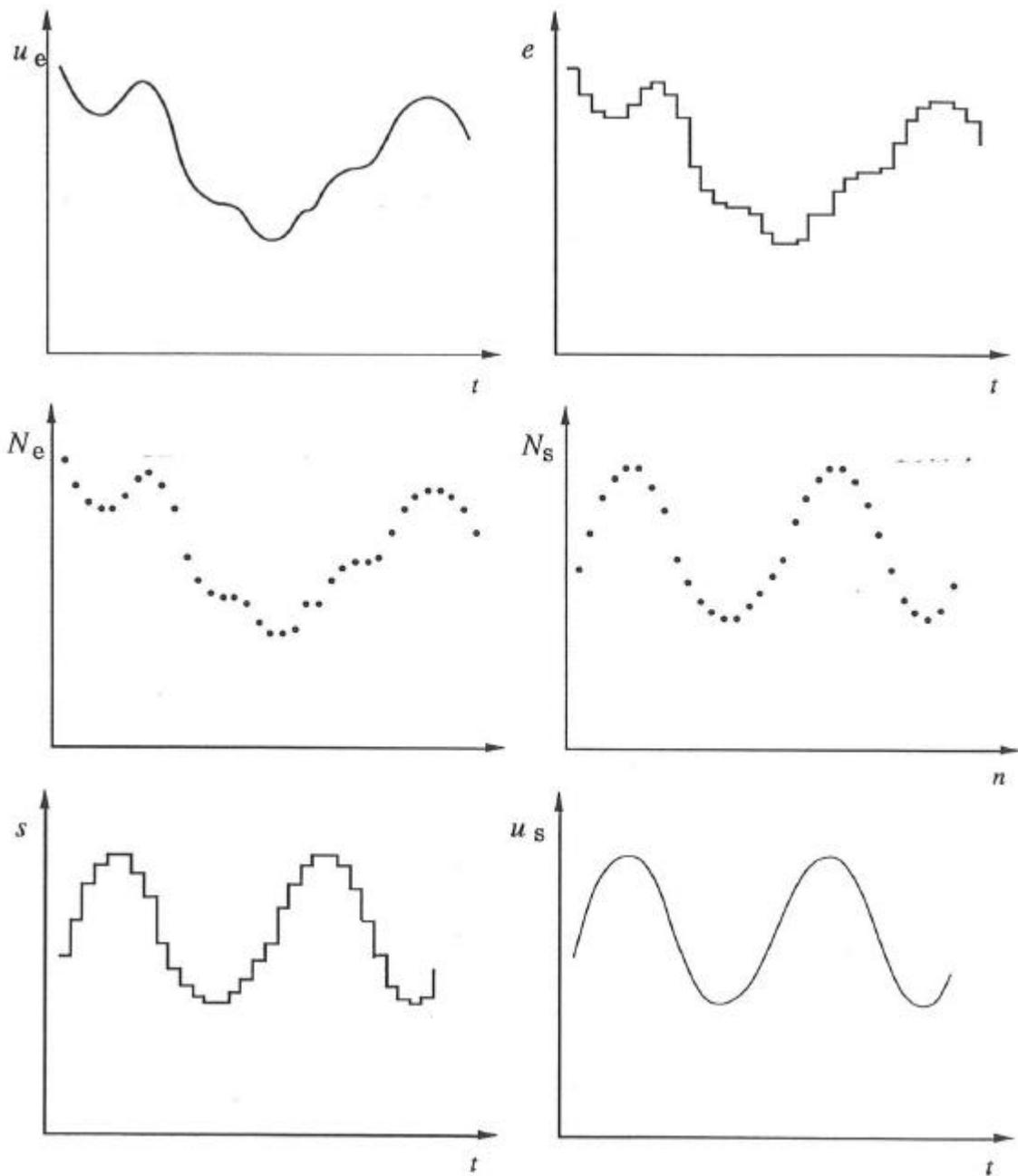
L'échantillonneur bloqueur permet l'obtention d'une tension utile au convertisseur analogique numérique.

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 :



5.4.2.2 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 :

