



PSL 



SORBONNE
UNIVERSITÉ

université
PARIS-SACLAY

Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge

TRANSISTOR - MULTIMÈTRE

2024-2025



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.

Table des matières

1	Première partie : le transistor	3
2	Transistor : notations, modélisation	3
3	Étude préliminaire d'un suiveur de tension de puissance	4
3.1	[1P] Étude en continu	4
3.2	[1P] Étude en alternatif	5
3.3	[1P] Étude avec un transistor pnp	5
4	Amplificateur push-pull	5
4.1	[1P] Fonctionnement et distorsion de croisement	5
4.2	[1P] Bilan de puissance et rendement	6
4.3	[2P] Estimation de la résistance de sortie de l'amplificateur push-pull	6
4.4	[2P] Application pratique	7
5	[AP] Le transistor en commutation	7
6	Seconde partie : Multimètre	7
7	Introduction	7
8	Mesure d'une tension continue	8
8.1	[1P] Principe du voltmètre numérique simple rampe	8
8.2	Synthèse d'une rampe de tension à partir d'un compteur	9
8.3	[1P] Voltmètre numérique et erreur de mesure	11
8.4	[AP] Mesures de fréquence et période à partir d'une horloge	11
9	Améliorations du voltmètre numérique et passage au multimètre	12

Bibliographie :

Transistor :

- **Niard** : *Électronique* (terminale F2)
- **Malvino** : *Principes d'électronique*
- **Journeaux** : *TP de physique*
- **Duffait** : *Expériences d'électronique*

Multimètre :

- **Duffait**, *Expériences d'électronique*, Chap.11 (on y trouvera énormément d'explications et d'expériences pour les montages reliés à l'instrumentation numérique).
- **BUP** no 754, J. Esquieu : *Traitement numérique du signal* (p. 707).
- **L. Quaranta**, *Dictionnaire de Physique expérimentale, Tomes III et IV*, Editions Pierron.
- **J. Niard**, Manuel de Terminale F₂, Editions Nathan.
- **Dattée**, *Électronique : Concepts de base*, Chap. I - 1.
- **F. Cottet**, *Traitement des signaux et acquisition des données*, Dunod (1997)

Ce TP aborde deux sujets distincts, les transistors et les multimètres. **Pour un premier passage, il est important de consacrer au moins 1h30 à la partie multimètre.**

1 Première partie : le transistor

2 Transistor : notations, modélisation

Ces composants dont l'invention a été récompensée par un prix Nobel en 1956 se retrouvent dans de nombreuses situations : amplification de puissance (le Push-Pull), stabilisation de tension (TP conversion de puissance électrique en série III) ou encore interrupteur (à la base des portes logiques). Ils sont utiles notamment pour faire de l'amplification de puissance et dans les systèmes de conversion d'énergie électrique.

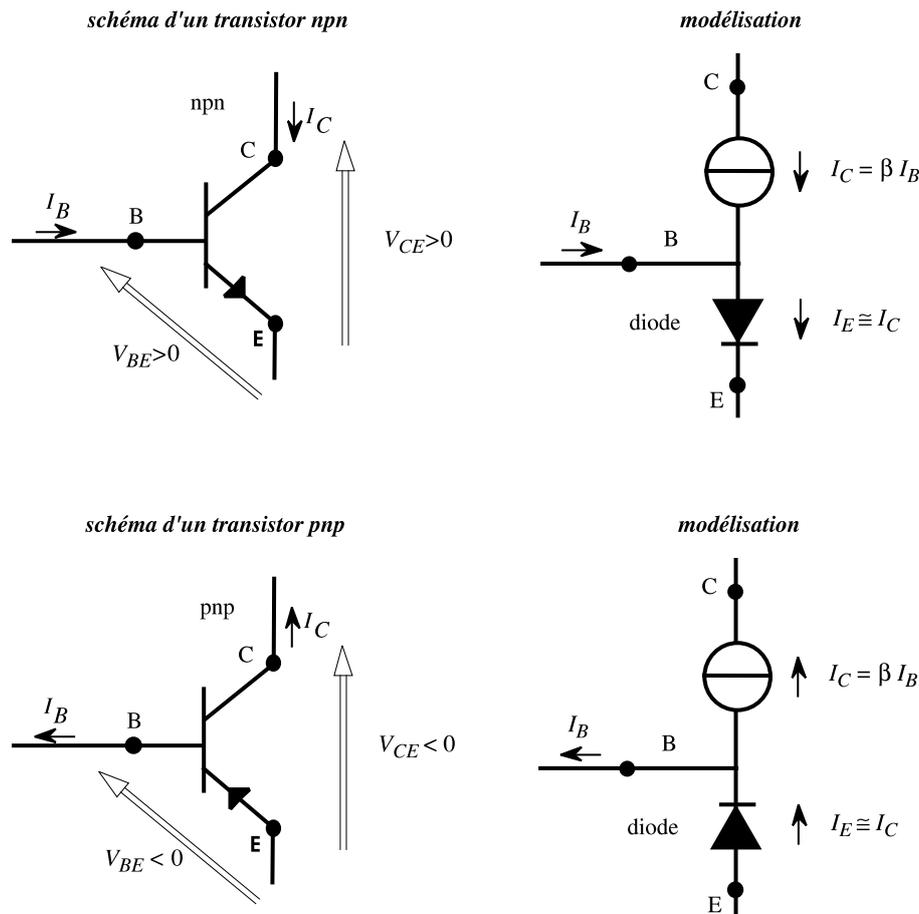


FIGURE 1 – Transistor npn et pnp. B = base, C = collecteur, E = Émetteur. Le gain en courant β est de l'ordre de 100. La flèche noire sur l'émetteur indique le sens *réel* du courant dans l'émetteur. Pour passer du npn au pnp, changer le signe de toutes les tensions et inverser le sens des courants.

Dans la suite on travaillera uniquement avec des transistors de puissance avec leur radiateur :

- npn : BD 439 (ou TIP 29)
- pnp : BD 440 (ou TIP 30)

Vérifier à chaque fois qu'ils sont en bon état en utilisant un testeur de transistor : celui-ci mesure β .

NOTE : Si dans les expériences qui suivent, le signal de sortie contient une composante de haute fréquence (plusieurs MHz) dont l'amplitude peut valoir de 10 mV à plusieurs volts (le signal basse fréquence attendu semble «empâté»), c'est que l'amplificateur présente une instabilité. On indique dans la suite des précautions à

prendre pour éviter ce phénomène.¹

3 Étude préliminaire d'un suiveur de tension de puissance

Ne pas passer trop de temps sur les premières expériences car **c'est l'amplificateur push-pull qui est important en montage.**

3.1 [1P] Étude en continu

Réaliser le montage ci-après à l'aide du matériel suivant :

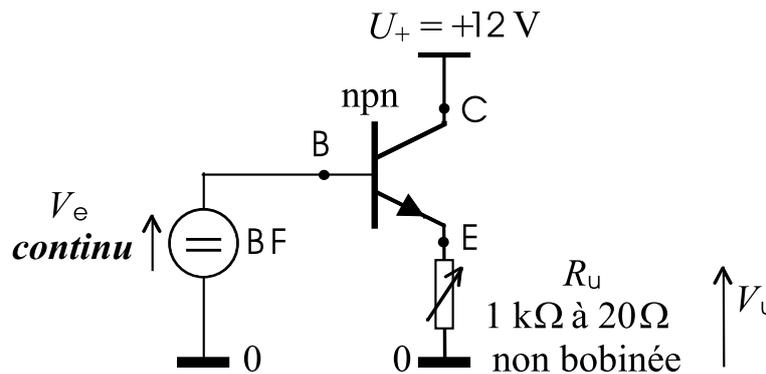


FIGURE 2 –

- npn : BD 439 (ou TIP 29) sur radiateur ;
- U_+ représente la partie positive d'une alimentation continue symétrique (ou alimentation continue Sefram) ;
- V_e représente un générateur basse fréquence (GBF) réglé de façon à donner un signal continu (il servira en régime sinusoïdal par la suite)² ;
- Si la résistance utile R_u est obtenue par des boîtes de résistances, faire attention au courant maximum qu'elles peuvent supporter (utiliser plutôt deux boîtes $\times 1\Omega$). **Ne pas utiliser de résistance de puissance bobinée** qui, étant inductive à haute fréquence, favorise l'instabilité ;
- Choisir la **valeur minimum de R_u** en fonction du courant maximum de l'alimentation U_+ (20Ω correspond à une alimentation de 12V qui peut donner 0,6A) ;
- Il s'agit d'un montage de puissance, il est normal que le transistor chauffe, mais pas trop ! Faire des expériences de courte durée pour les puissances les plus fortes ;
- Visualiser d'abord les tensions à l'oscilloscope. **Puis mesurer les tensions avec un voltmètre numérique.**

Expérience :

1. En choisissant une valeur moyenne de $V_e (\simeq U_+/2)$, vérifier que quelle que soit R_u , la tension utile vérifie $V_u \simeq V_e - 0,6\text{V}$ ³. Comprendre que ceci est cohérent avec le modèle présenté plus haut.
2. En choisissant une valeur moyenne de R_u , faire varier V_e et observer les variations de V_u . Déterminer la plus faible valeur de V_e qui conserve la propriété précédente. Rechercher de même sa plus forte valeur⁴.

1. Contrairement à ce que suggère l'intuition, c'est dans les montages suiveurs que le risque d'instabilité est le plus grand. En voici la cause : dans un amplificateur, il y a en général une réaction négative de la sortie sur l'entrée ce qui réduit le gain et accroît la stabilité. Dans le cas d'un suiveur le taux de réaction vaut 100%. Cependant à haute fréquence la réaction tend à devenir positive par rotation de phase, ce qui a un effet déstabilisant d'autant plus fort que le taux de réaction est élevé. En pratique, on peut parfois faire disparaître les instabilités en modifiant R_u ou la fréquence du GBF.

2. Ne pas remplacer le GBF (résistance interne 50Ω) par une alimentation continue (résistance interne très faible). L'expérience montre que la résistance interne du GBF réduit nettement le risque d'instabilité signalé plus haut. On peut être tenté d'accroître cette résistance, mais la résistance de sortie du suiveur en pâtit.

3. L'écart peut en pratique atteindre $0,7 - 0,8\text{V}$.

4. Pour voir ce phénomène, il faut que le GBF puisse fournir une amplitude suffisante.

3. Pour montrer l'intérêt de ce montage, placer des ampèremètres, en mode continu, en série avec V_e et R_u . On illustre ainsi le fait que V_e ne fournit pratiquement pas de puissance mais contrôle la puissance fournie à R_u par l'alimentation U_+ .⁵

On trouvera une mise en œuvre de ce montage dans l'expérience sur le «redressement» (plaquette redressement-filtrage, photocopié Conversion de Puissance électrique).

Retenir que, dans le montage suiveur, *la charge utile est placée sur l'émetteur et le collecteur est relié directement à l'alimentation* (montage "collecteur commun").

3.2 [1P] Étude en alternatif

Remplacer le signal continu sur la base du transistor par un signal purement sinusoïdal. Observer le signal d'entrée et le signal de sortie en même temps à l'oscilloscope. Expliquer le phénomène.

Pour observer la saturation de l'amplificateur, remplacer l'alimentation 12V par une alimentation symétrique +5V/0/-5V (car les GBFs ne délivrent pas plus de 10V au maximum). Régler l'amplitude du signal à la limite de l'écrêtage de la partie positive de la tension de sortie.

3.3 [1P] Étude avec un transistor pnp

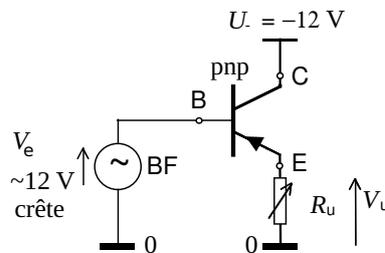


FIGURE 3 – Transistor pnp en régime sinusoïdal.

En gardant le même signal sinusoïdal, remplacer le transistor npn par un transistor pnp, et l'alimentation U_+ par une alimentation $U_- = -12V$ (ou de $-5V$ pour observer l'écrêtage). Observer.

En conclusion le suiveur à transistor npn permet de transmettre la puissance pendant l'alternance positive et le suiveur à transistor pnp pendant l'alternance négative. On utilise cette propriété dans l'expérience qui suit.

4 Amplificateur push-pull

4.1 [1P] Fonctionnement et distorsion de croisement

Réaliser le montage ci-dessous, où les **émetteurs des deux transistors sont connectés entre eux**.

Comprendre son fonctionnement. On pourra notamment illustrer le rôle de chaque transistor en déconnectant sa base.

Comme précédemment, **régler V_e à la limite de l'écrêtage (avec une alimentation symétrique $-5V/0/+5V$)**.

Remarquer la «distorsion de croisement»⁶.

5. Le rapport i_C/i_B n'est pas constant dans cette expérience. Voir Duffait p. 68 pour une modélisation plus élaborée.

6. On sait réduire cette distorsion de croisement, mais cette étude n'est pas traitée ici. À ce sujet, on trouve dans certains ouvrages de TP un montage push-pull qui l'atténue : les deux transistors de puissance sont pilotés par un ampli-op *qui inclut ces transistors dans sa boucle de réaction*. Cependant, si la boucle de réaction est un simple court-circuit (montage suiveur), l'application du **critère de stabilité de NYQUIST** indique que ce système a une grande probabilité d'être instable (car la *compensation en fréquence* de l'ampli-op n'inclut pas les transistors) : des oscillations à une fréquence de l'ordre du MHz peuvent prendre naissance. Elles perturbent le fonctionnement tout en étant

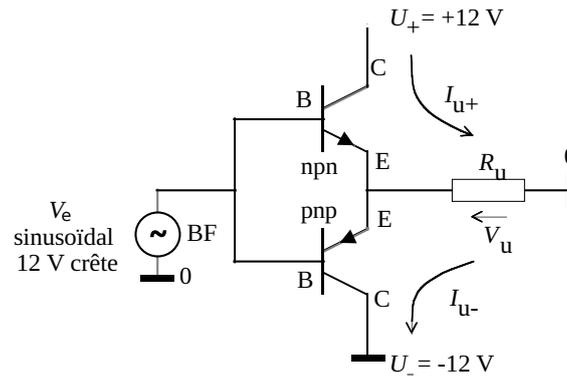


FIGURE 4 –

D'où vient le nom de «push-pull» ?

4.2 [1P] Bilan de puissance et rendement

On commence par déterminer la puissance reçue par la charge utile. La charge étant une résistance, il n'est pas nécessaire d'utiliser un wattmètre (pas de $\cos \phi$ notable dans une résistance). Placer un **voltmètre alternatif RMS** aux bornes de R_u et appliquer la formule

$$P_u = \frac{V_{u,\text{efficace}}^2}{R_u}. \quad (1)$$

On détermine ensuite la puissance fournie par les alimentations continues. Pour cela, placer successivement un **ampèremètre en mode continu** en série avec chaque alimentation. Pourquoi utiliser un ampèremètre continu et non pas alternatif ? On mesure alors $P_{\text{alim}} = \langle U_+ I_+ + U_- I_- \rangle = U_+ \langle I_+ \rangle + U_- \langle I_- \rangle$.

Déduire de ces deux mesures le **rendement** η de l'amplificateur. Un calcul théorique conduit à $\eta \simeq \frac{\pi}{4} \frac{V_{s,\text{crête}}}{U_+}$, qui vaut environ 79% si $V_{s,\text{crête}} \approx U_+$ i.e. le signal de sortie est à la limite de l'écrêtage.

Finalement, on peut déterminer la puissance fournie par le générateur sinusoïdal. La charge vue par ce générateur n'étant a priori pas modélisable par une simple résistance, il faut donc utiliser un wattmètre très sensible pour mesurer la puissance délivrée par le GBF. En déduire le **gain** en puissance de l'amplificateur

4.3 [2P] Estimation de la résistance de sortie de l'amplificateur push-pull

Afin d'évaluer l'impédance de sortie du montage push-pull, il convient de tracer la caractéristique $V_u = f(I_u)$ où V_u est la tension de sortie du montage et I_u le courant de sortie. En effet, dans le cas idéal ($Z_s \approx 0$), on a $V_u = V_e$ (sans tenir compte des décalages de 0.6V au niveau des jonctions), et ce indépendamment de la charge de sortie. Dans le cas réel, on a $V_u = V_e - Z_s \cdot I_u$, où Z_s est l'impédance de sortie. Ainsi, en faisant varier la charge R_u , on fait varier le courant de sortie I_u ainsi que V_u . On reconstruit la courbe $V_u = f(I_u)$, dont la pente donne accès à l'impédance Z_s . En pratique, les composants étant non linéaires, on n'obtient pas une droite, mais les valeurs autour d'un point de la caractéristique permettent de définir une impédance de sortie locale (Cf. cours d'électronique).

Manipulation : On modifie le courant débité I_u en variant R_u . Mesurer V_u pour quelques valeurs de R_u (de 1k Ω à 20 Ω). Faire un tableau avec R_u , V_u et $I_u = \frac{V_u}{R_u}$. Représenter la courbe $V_u = f(I_u)$. Cette courbe n'est pas une droite mais déduire de ses variations une estimation de la résistance de sortie en signaux alternatifs de grande amplitude (dans le modèle du générateur de Thévenin).

souvent peu visibles à l'oscilloscope. Elles provoquent des non linéarités et de l'hystérésis, disparaissant puis réapparaissant... au meilleur moment. On pourra cependant utiliser ce montage à condition de constituer la boucle de réaction sur l'amplificateur opérationnel par un pont diviseur avec deux résistances R_2 et R_1 à ajuster ($R_2/R_1 = 10$ convient souvent). L'amplificateur de puissance obtenu n'est plus un suiveur, il multiplie le signal d'entrée par $1 + R_2/R_1$. Dans la théorie des systèmes bouclés, l'introduction de R_2 et R_1 s'appelle «correction proportionnelle».

Dans la suite, choisir une valeur fixe de R_u qui corresponde à une puissance importante en régime permanent, sans cependant poser de problème d'échauffement ni de courant excessif : $R_u = 20\Omega$ devrait convenir⁷.

4.4 [2P] Application pratique

Remplacer la résistance R_u par un haut parleur et comparer au son obtenu sans l'amplificateur de puissance.

5 [AP] Le transistor en commutation

Dans cette utilisation **non linéaire** (et en opposition avec le montage étudié précédemment), le transistor doit toujours avoir son *émetteur relié à la masse, la charge utile étant placée sur le collecteur*.

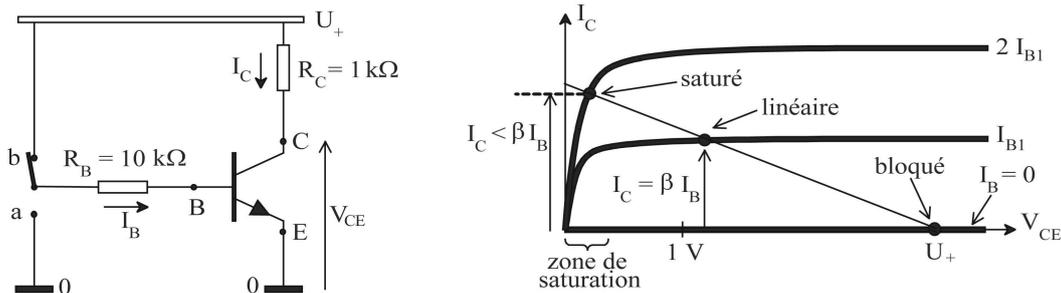


FIGURE 5 –

Réaliser le montage ci-dessous. Illustrer les points suivants :

- Interrupteur en position a, le transistor est **bloqué** :

On a $V_{BE} = 0$ donc $I_B = 0$, d'où $I_C = 0$, et ainsi $V_{CE} = U_+$. Le transistor se comporte comme si CE était un interrupteur ouvert ;

- Interrupteur en position b, le transistor est **saturé** :

On a $V_{CE} \simeq 0,1\text{ V}$: Le transistor se comporte comme si CE était un interrupteur fermé.

La condition de saturation est $I_C \ll \beta I_B$, d'où $R_B \ll \beta R_C$.

Avec $\beta \simeq 100$ et $R_C = 1\text{ k}\Omega$, la valeur proposée pour R_B convient (il ne faut pas choisir la résistance R_B trop petite car elle protège la base du transistor).

Applications : ordinateurs⁸, alimentations à découpage...

6 Seconde partie : Multimètre

7 Introduction

Les multimètres (instruments de mesure de différentes grandeurs électriques : I, V, R, \dots) sont de deux types : analogiques ou numériques.

7. 12V pour 20Ω , soit $0,6\text{ A}$: c'est le courant maximum des alimentations utilisées ici.

8. Dans un ordinateur il n'y a pas d'interrupteur, la commande du transistor est faite par les transistors de l'étage qui précède.

- **ANALOGIQUE** : La grandeur à mesurer (éventuellement redressée et/ou amplifiée) est généralement convertie en intensité, et on lit finalement la déviation d'un galvanomètre à cadre mobile. Nous ne reviendrons pas ici sur les multimètres analogiques qui sont maintenant largement supplantés par les appareils numériques.
- **NUMÉRIQUE** : La grandeur électrique à mesurer est transformée en signal numérique (*digital* en anglais), c'est-à-dire en un ensemble de grandeurs logiques (symbolisées par 0 ou 1) qui commandent un affichage numérique. L'élément de base est donc un convertisseur analogique-numérique (CAN) (en anglais *ADC* : *analog-digital converter*). Dans la pratique, on se ramène généralement à une mesure de tension, avant de réaliser une conversion analogique-numérique. Plusieurs méthodes existent pour réaliser une CAN.

Lorsqu'on travaille en électronique numérique, il faut généralement se ramener à la fréquence d'horloge du dispositif, qui permet des mesures de temps et de fréquence. Dans ce TP, on commence par détailler le principe d'un convertisseur tension-durée à simple rampe, pour la mesure d'une tension continue. On voit ensuite comment une telle rampe peut être générée en électronique numérique, ce qui revient à utiliser un convertisseur numérique-analogique (CNA) après le compteur, avant de combiner ce système avec le convertisseur tension-durée. On étudie finalement comment utiliser ce CAN, servant à mesurer des tensions continues, pour passer à d'autres fonctions du multimètres (ampèremètre, voltmètre AC, voire mesure d'une tension variable).

8 Mesure d'une tension continue

8.1 [1P] Principe du voltmètre numérique simple rampe

On propose ici une expérience illustrant le principe du convertisseur tension-durée à simple rampe en utilisant une rampe générée par un GBF. Le principe est le suivant : on compare la tension à mesurer (V_m) à une tension (V_r) uniformément croissante au cours du temps (rampe), et on mesure le temps que met V_r à atteindre V_m (voir figure). Cette expérience est limitée car le passage au numérique s'effectue avec un chronomètre électronique dont le fonctionnement n'est pas étudié ici.

L'AO en boucle ouverte constitue un comparateur simple. La tension à mesurer V_m est appliquée à l'entrée +. On applique à l'entrée – la tension de référence V_r en dents de scie (rampe de pente k). En sortie, la tension bascule entre V_{sat}^- et V_{sat}^+ lorsque $V_m = V_r$ (cf. figure). On a $V_m = kt_e$ et la mesure se ramène au comptage du temps t_e .

Manipulation :

- La dent de scie V_r doit être lente ($T \cong 10$ s), bien linéaire et croître à partir de zéro (par exemple, rampe sweep out d'un GBF).
- Contrôler que pour $V_r = V_m = 0$ on est à la limite du basculement (sinon ajuster l'offset de l'AO).
- Pour mesurer t_e , on utilisera ici un chronomètre électronique. Dans le cas du chronomètre AOIP, on affichera : période = 20 s, mode = non total, entrée E_1 ou E_2 .

Après avoir choisi V_m , appuyer sur RAZ lorsque l'AO est en saturation négative (sinon le déclenchement du chrono s'inverse), puis lire le temps affiché au bout d'une période. En ajustant la pente de V_r , on peut obtenir 1 seconde par volt.

Astuce : On peut accélérer le réglage en divisant par 1000 la durée de la rampe et en l'observant à l'oscilloscope.

Note sur le chronomètre AOIP : Sur la position E_1 et E_2 , le comptage commence lorsque E_1 est modifiée et s'arrête lorsque E_2 est modifiée. Sur la position E_1 ou E_2 avec E_2 non connectée, c'est E_1 qui effectue les deux commandes.

Chaque entrée n'est sensible qu'aux modifications d'état : si l'on appuie sur RAZ au moment où l'interrupteur est fermé, c'est l'ouverture de celui-ci qui va amorcer le comptage.

Remarque 1 : Le principal défaut du montage simple rampe est sa grande sensibilité au bruit autour du seuil de basculement, porté par le signal V_m . Pour pallier ce problème, il est possible de réaliser un convertisseur double rampe qui intègre le signal à mesurer (voir Duffait, p.272) ; cependant sa réalisation est plus délicate.

Remarque 2 : Nous disposons également d'un chronomètre Jeulin (ENSP 4162).

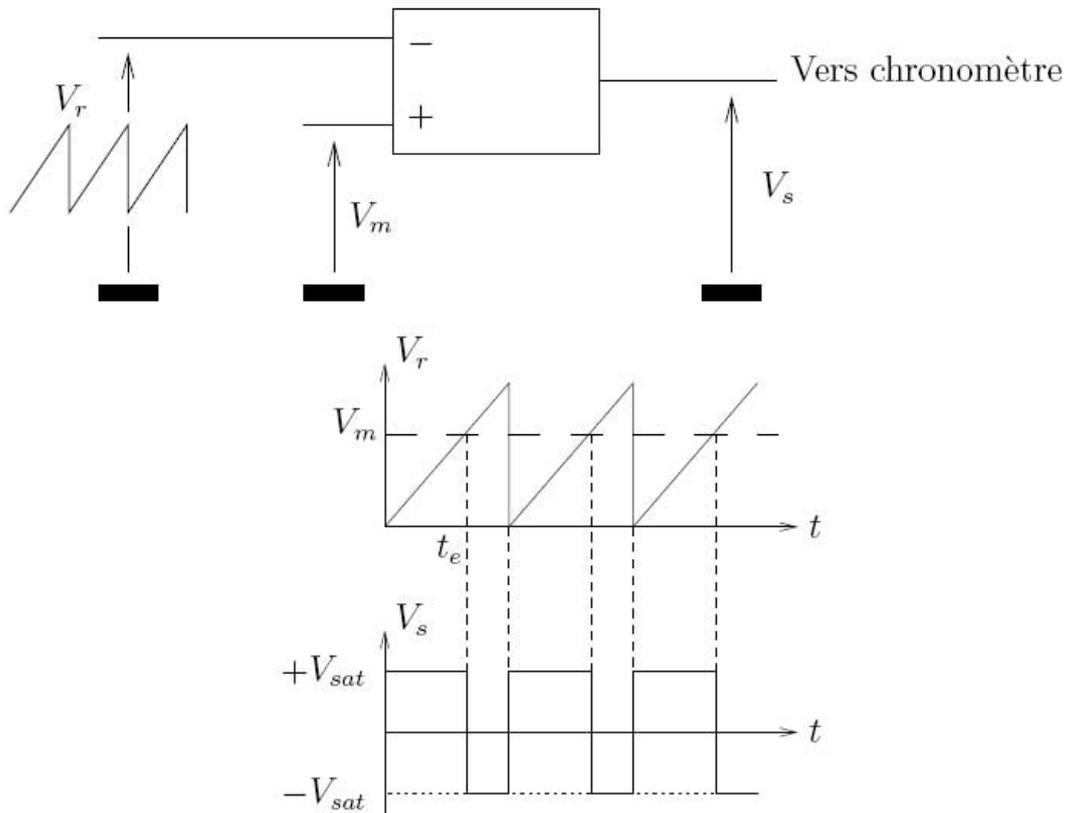


FIGURE 6 –

8.2 Synthèse d'une rampe de tension à partir d'un compteur

On montre comment synthétiser une rampe de tension analogique à partir d'un compteur branché sur une fréquence d'horloge. Cette rampe pourra être ensuite utilisée pour construire un voltmètre simple rampe.

[1P] Etude d'un compteur Les compteurs sont des "composants logiques" qui permettent de compter des impulsions ou des créneaux. Le signal d'entrée d'un compteur est une tension pouvant prendre deux valeurs nominales (souvent 0V et 5V) qui codent des états "bas" et "haut" (on parle d'"électronique numérique" ou "booléenne"). Le compteur comptabilise les passages d'un état bas à un état haut du signal d'entrée. Le signal de sortie est un entier sous sa représentation binaire. Un compteur à 4 bits -- par exemple -- peut compter de 0 à $2^4 - 1 = 15$, et son signal de sortie est codé sur 4 sorties pouvant être dans les états "bas" ou "haut".

On dispose d'un compteur 4-bits monté sur plaquette (ENSP 346, N.19). On va illustrer son fonctionnement à partir d'un générateur de créneaux modélisant une horloge de référence (on peut utiliser la sortie "synchro" ou "TTL" d'un GBF, qui délivre des créneaux entre 0 et 5 V). Se référer à la notice pour les branchements et prendre soin d'alimenter le compteur par une tension inférieure à 10 V.

Avec un créneau de fréquence basse, de l'ordre de quelques Hz, visualiser à l'aide des LED associées à chaque sortie du compteur le comptage binaire.

Puis avec un créneau de plus haute fréquence, de l'ordre de la dizaine de Hz, en visualisant à l'oscilloscope chacune des sorties du compteur (ou en branchant un fréquencemètre), montrer que la fréquence mesurée est une fraction de la fréquence appliquée en entrée. Le compteur fonctionne donc comme diviseur de fréquence (applications : horlogerie,...).

Montrer que le rapport entre la fréquence mesurée et la fréquence appliquée est une puissance de 2, dépendant du digit considéré sur le compteur. Justifier qu'on peut réaliser un compteur 8-bits à partir de deux compteurs 4-bits.

Remarques :

- En électronique numérique, on distingue les composants de "logique combinatoire" et ceux de "logique séquentielle". Pour les premiers, l'état de sortie dépend *exclusivement* de l'état des entrées. Pour les seconds, la sortie dépend aussi des états *antérieurs* du système. Le compteur, tout comme les mémoires, relève de cette seconde catégorie.
- Le fonctionnement interne des composants logiques est fondé sur le fait qu'un transistor peut basculer entre deux états saturé et bloqué, caractérisés chacun par des tensions suffisamment différentes pour définir deux états logiques.

[1P] Convertisseur numérique-analogique (CNA) Utiliser la plaquette de résistances prévue pour cet usage et réaliser le montage ci-après.

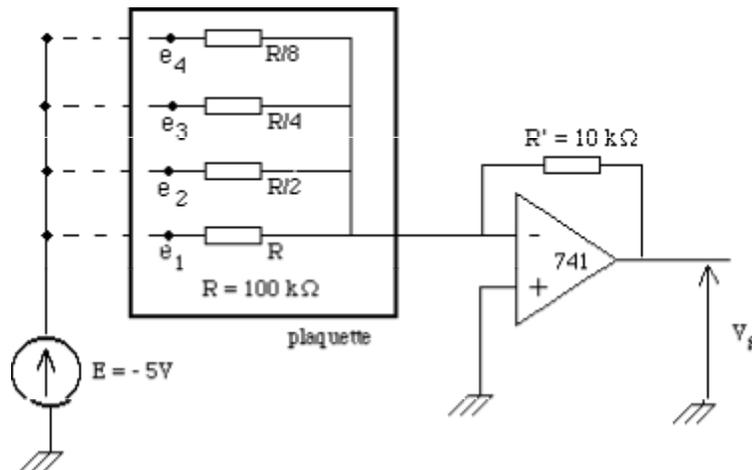


FIGURE 7 –

Cette plaquette permet d'obtenir des tensions proportionnelles à un nombre encodé en binaire. Par exemple, pour obtenir la valeur analogique V_s correspondant au nombre décimal 5 (0101 en binaire), on peut relier la tension E aux entrées e_1 et e_3 , et on obtient

$$V_s = -ER' \left(1 \cdot \frac{1}{R} + 0 \cdot \frac{2}{R} + 1 \cdot \frac{4}{R} + 0 \cdot \frac{8}{R} \right) = K(1 \cdot 2^0 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^3).$$

Comprendre et mettre en application cette plaquette pour obtenir différentes tensions.

Remarque : En pratique, ce réseau de résistances (R/n) n'est pas utilisé, essentiellement pour des raisons de précision. Pour obtenir un convertisseur à 8 bits, il faudrait utiliser des résistances allant de R à $R/2^7$, or la précision des composants est généralement de l'ordre de 5 à 10 %... On utilise donc en général un réseau ($R - 2R$) très astucieux qui, lui, n'utilise que 2 résistances R et $2R$ (Duffait, p.283). Un tel convertisseur est disponible sur la plaquette ENSP 4067.

[1P] Synthèse d'une rampe Sur le convertisseur numérique-analogique (CNA) étudié précédemment, au lieu d'incrémenter les bits du réseau en agissant manuellement sur des interrupteurs, connecter les bornes du réseau aux sorties du compteur précédent. En alimentant l'entrée du compteur avec un générateur de créneaux, montrer qu'on obtient en sortie du CNA un signal en escalier proche d'une dent de scie.

Quel est le nombre de marches, leur hauteur et leur durée ? On fera le lien avec le nombre de digits binaires du convertisseur (ou nombre de bits).

Remarque : En pratique, le signal obtenu est un signal décroissant donc de pente négative. On l'utilisera tel quel par la suite. On peut cependant le changer de signe si nécessaire en utilisant par exemple un montage amplificateur inverseur utilisant un AO.

8.3 [1P] Voltmètre numérique et erreur de mesure

Le CNA étudié précédemment peut être directement utilisé pour réaliser un CAN. Pour cela, il suffit d'envoyer le signal V_s ainsi que la tension à mesurer sur un comparateur, en faisant croître progressivement le nombre binaire jusqu'à ce que le comparateur change d'état, lorsqu'on a égalité entre les deux tensions.

En pratique, on effectue de façon automatique cette incrémentation de V_s en générant une rampe via un compteur, ce qui ramène au montage du convertisseur simple rampe, mais avec une rampe générée à partir d'électronique numérique. On peut alors mesurer la tension soit par lecture de la valeur du compteur au basculement, soit en effectuant une conversion temps-tension comme détaillé au début de cette partie.

Réaliser une rampe à l'aide du montage précédent. La brancher sur l'une des entrées d'un comparateur, et relier l'autre entrée à une tension continue que l'on cherche à mesurer (négative si on utilise directement la rampe de pente négative). Observer simultanément la rampe et la sortie du comparateur. Repérer le basculement, et en déduire un encadrement de la tension inconnue. On a ainsi réalisé un convertisseur analogique-numérique.

Un tel voltmètre comporte deux types d'incertitudes, que l'on retrouve dans les spécifications données usuellement pour les multimètres. : - une incertitude liée à une erreur sur la pente de la rampe, qui sera donnée en pourcentage - une incertitude liée à une lecture de bit incorrecte, par exemple à cause du bruit, ou bien à un défaut du comparateur, par exemple à cause d'un AO mal compensé, qui sera donnée en valeur absolue.

Pour le montage effectué, estimer ces incertitudes, en reliant l'incertitude absolue à la fois à une erreur de un bit, ainsi qu'à une valeur d'offset de l'AO estimée à 10mV.

Remarque 1 : Il est intéressant de bloquer le compteur au moment du basculement. Pour cela, on peut brancher l'entrée du compteur à la sortie d'une porte ET (AND), dont une entrée est le générateur de créneaux et l'autre la sortie du comparateur. Voir le Duffait (p.284) pour plus de détails.

Remarque 2 : On dispose d'une plaquette modulaire (ENSP 4029) réalisant séparément chacune des étapes précédentes. Le module d'horloge qui délivre les créneaux possède une entrée blocage sur laquelle on branche la sortie du comparateur. De plus, cette plaquette permet de faire varier la fréquence des créneaux et le nombre de bits du compteur (2, 4 et 8). Un module de mémoire permettant de synthétiser différents signaux est également disponible. Consulter la notice de la plaquette (N.559) pour les différentes manipulations.

8.4 [AP] Mesures de fréquence et période à partir d'une horloge

On étudie le fréquencemètre numérique sur plaquette (N448). Celui-ci illustre comment il est possible d'avoir une mesure numérique de fréquence ou de temps à partir d'une horloge, c'est à dire un signal de référence de fréquence donnée. Ce dispositif doit être utilisé en conjonction des autres dispositifs étudiés plus haut pour former un CAN complet à partir d'un système fonctionnant en électronique numérique.

La plaquette nécessite une alimentation 8 V, pouvant débiter 0,5 A. Au moment du branchement de celle-ci, on constate un affichage quelconque ; le mettre à zéro. Pour étudier le comptage binaire, mettre la commande de porte en position de passage continu et la commande de signal sur la position "monocoup". En appuyant sur le poussoir "monocoup", faire défiler les chiffres. Remarquer que la sortie du premier compteur apparaît sous forme binaire :

$$\begin{array}{rcl}
 1 & = & 0 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 \quad \text{soit} \quad 0001 \\
 2 & = & \dots \quad \text{soit} \quad 0010 \\
 3 & = & \dots \quad \text{soit} \quad 0011 \\
 \vdots & \vdots & \vdots \quad \text{soit} \quad \vdots \vdots \vdots \\
 9 & = & \dots \quad \text{soit} \quad 1001
 \end{array} \tag{2}$$

Puis retour à 0 0 0 0 avec envoi simultané d'une commande sur le compteur des dizaines.

Pour **mesurer une fréquence**, injecter un signal alternatif de fréquence 50 Hz environ et appuyer sur le déclenchement du monostable (qui génère un carré unique de durée 1 s) : le nombre d'impulsions du signal est compté pendant 1 seconde, on lit donc directement la fréquence en hertz.

Quelle est la fréquence minimale que l'on peut ainsi mesurer ? Avec quelle résolution ? Qu'en serait-il si l'on s'autorisait des mesures répétées ?

Pour **mesurer une période**, il faut inverser les rôles : injecter le signal carré à étudier (de grande période) sur la commande externe de porte et un signal carré de période T_0 connue sur l'entrée "fréquence à mesurer". Si $T_0 = 1$ s, le comptage va donner le nombre de secondes incluses dans *une demi-période* du signal à étudier. Il faut effectuer manuellement la remise à zéro. Ce mode d'utilisation illustre aussi le principe de fonctionnement du chronomètre utilisé précédemment.

9 Améliorations du voltmètre numérique et passage au multimètre

Un convertisseur analogique-numérique ne peut mesurer que des tensions continues, d'amplitude maximale fixée par construction. On propose ici d'élargir l'éventail des mesures que cet appareil peut effectuer.

Dans les manipulations qui suivent, on utilisera le convertisseur analogique-numérique commercial avec affichage *TEKELEC* (ENSP3752). Il possède une sensibilité unique de 2V et une résistance d'entrée de 1 M Ω .

[2P] Augmentation du calibre La réduction de la sensibilité d'un voltmètre s'opère par division potentiométrique.

Ajouter une résistance en série avec le voltmètre. La choisir de façon à diviser par 10 la sensibilité initiale. Le calibre est ainsi multiplié par 10 et l'on peut alors mesurer des tensions jusqu'à 20V.

[2P] Mesure d'une intensité Pour obtenir un ampèremètre, on transforme l'intensité I à mesurer en une tension V , au moyen du montage ci-dessous.

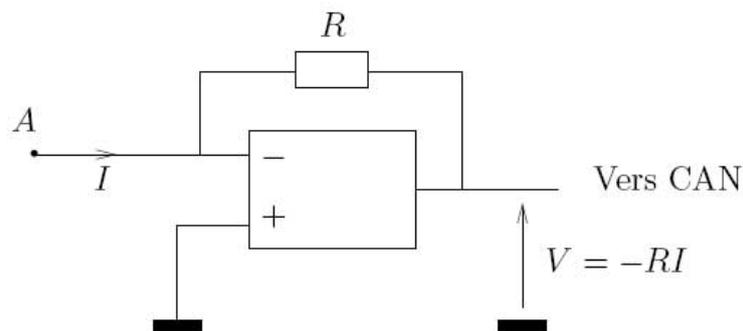


FIGURE 8 –

Cet ampèremètre est quasi idéal. En effet, si l'AO supposé idéal est en fonctionnement linéaire, l'impédance d'entrée du montage est nulle car quel que soit I , la tension d'entrée du montage V_A est nulle.

Manipulation

Produire I avec une alimentation continue (\cong qq's volts) en série avec une résistance $R_G \cong 1\text{M}\Omega$. Choisir R de manière à obtenir une tension de sortie mesurable.

Inconvénient : Le courant I pouvant ainsi être mesuré est limité à environ 10 mA à cause de la saturation en courant de l'AO.

En pratique, dans les multimètres usuels, on fait passer l'intensité I dans une résistance R_S . Par exemple, on peut utiliser le circuit représenté sur la figure suivante.

La résistance d'entrée de l'ampèremètre est R_S (ampèremètre non idéal), mais grâce au facteur d'amplification $(1 + R_2/R_1)$ cette résistance R_S peut être très petite.

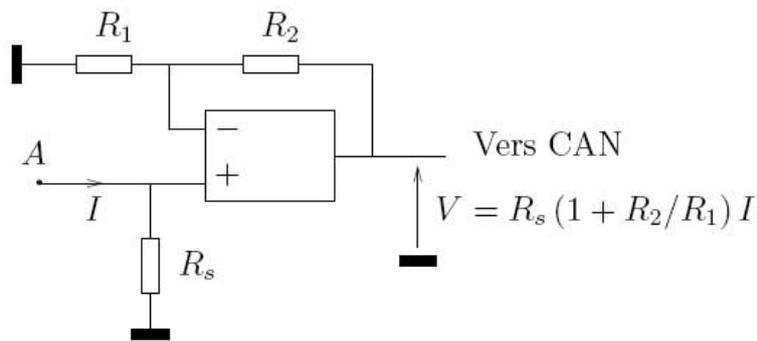


FIGURE 9 –

[1P] Mesure d'une tension alternative Les voltmètres alternatifs numériques **échantillonnent** la tension à mesurer (acquisition d'un grand nombre de valeurs instantanées), **numérisent** (discrétisation des valeurs instantanées, codage binaire et mémorisation), et effectuent les calculs nécessaires pour extraire la valeur efficace, qui est envoyée sur un afficheur.

On propose ici une méthode plus simple, analogique, fondée sur l'utilisation d'un multiplieur. Cet appareil réalise la multiplication analogique de deux signaux d'entrée $e_1(t)$ et $e_2(t)$: il fournit en sortie un signal $Ke_1 \times e_2$. Une notice détaillée en donne la description et le principe.

Envoyer sur les deux entrées du multiplieur la tension alternative v_{alt} à mesurer. Placer un filtre passe-bas sur la sortie et lire avec le voltmètre numérique continu la tension $v_s = \langle Kv_{alt}^2 \rangle$, où K est le coefficient introduit par le multiplieur⁹.

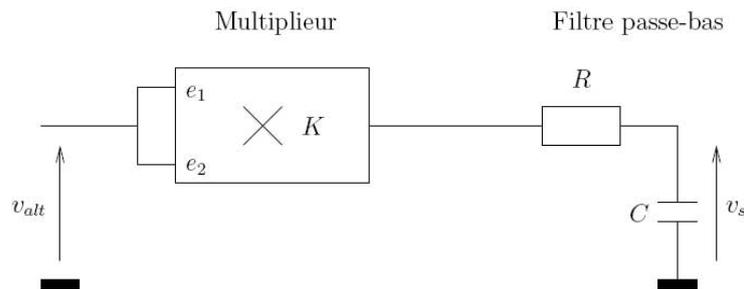


FIGURE 10 –

Comment faut-il choisir R et C ? (Tenir compte de la résistance interne du voltmètre placé en sortie et de la fréquence minimale de la tension à filtrer.)

En déduire la tension efficace vraie $v_{eff} = \sqrt{v_s/K}$.

Comparer rapidement les mesures avec celles d'un multimètre du commerce, dans le cas de signaux de diverses formes (sinus, carré) et fréquences.

Mesurer leur facteur de crête (rapport de leur valeur crête sur leur valeur efficace) et le comparer avec les valeurs théoriques.

Remarque 1 : Une tension variable périodique peut s'écrire : $v(t) = v_{DC} + v_{AC}(t)$ avec $\langle v_{AC}(t) \rangle = 0$.

Mesurée avec un voltmètre en mode continu (DC), on lit $\langle v(t) \rangle = v_{DC}$.

Mesurée avec un voltmètre en mode RMS (root mean square), on lit :

- en position AC : $\langle [v_{AC}(t)]^2 \rangle^{0.5} = v_{ACeff}$

9. On pourrait ajouter à la suite du filtre passe-bas un montage analogique qui extraierait la racine carrée : il existe des schémas pour cela (avec AO et multiplieur), mais il se pose alors des problèmes de stabilité difficilement solubles ici (Duffait, p.277).

- en position AC+DC : $\langle [v_{AC}(t) + v_{DC}]^2 \rangle^{0,5} = v_{eff}$

Remarque 2 : On trouvait jadis des voltmètres analogiques à redresseur, qui étaient calibrés pour donner la tension efficace en sinusoïdal mais qui étaient faux en dehors de ce cas.

[2P] Mesure d'une tension variable quelconque Il est possible d'utiliser un CAN adapté à la mesure de tensions continues pour analyser une tension variable quelconque. Il faut pour cela réaliser en amont un échantillonneur-bloqueur. Ce système consiste à charger très rapidement, et à intervalle régulier, un condensateur à la valeur d'un signal d'étude, tout en gardant constante la valeur à ses bornes sinon. On obtient ainsi un échantillonnage de la tension à étudier, qui peut être mesurée par exemple à l'aide du CAN étudié précédemment pendant les périodes où la tension aux bornes du condensateur est constante.

Pour plus de détails et une réalisation pratique, se référer au Duffait (page 280).