

MP 24 : Mesures électriques (mesure de fréquences exclue)

Antoine Bérut et David Lopes Cardozo

Bibliographie :

- Expériences d'électronique, Duffait.
- Mesures électriques, P. Jacobs et V. Jadin.¹
- Manuels d'utilisation des pinces ampèremétriques et des multimètres numériques.

Commentaires du jury :

[2010] Malgré la variété des mesures électriques possibles, caractérisation de composants, d'appareil de mesures, petits signaux, courants forts..., le jury n'a assisté qu'à des montages ternes et décevants.

[2009] Depuis la modification d'intitulé de ce montage, d'autres types de mesures que celles des courants et tensions sont abordées, ce qui est positif. En outre ce montage ne saurait se réduire à l'étude du convertisseur analogique-digital.

[2008] La notion de courte et de longue dérivation peut être utile dans des cas extrêmes (très grandes ou très petites résistances). Elle a perdu de sa pertinence avec les appareils de mesures numériques actuels, et ne doit pas être étudiée pour elle-même.

[2007] Le jury attend du candidat qu'il connaisse et illustre le principe de la mesure et les caractéristiques des multimètres ou oscilloscopes utilisés (sensibilité, bande passante...).

[2000] L'étude du spectre de fréquences fait partie du sujet proposé. Il est préférable d'étudier les signaux réels fournis par des capteurs conditionnés (thermocouple, photodiode...) plutôt que de limiter le montage aux mille et une manières d'analyser la réponse d'un voltmètre (RMS, TRMS...) aux signaux artificiels (sinusoïdaux, carrés, avec ou sans tension de décalage...) fournis par un générateur.

[1996] Le montage sur les multimètres est rarement convaincant. Trop souvent les manipulations se limitent au galvanomètre (résistance interne, résistance critique...) dont l'intérêt est plutôt historique.

Plan :

I) Voltmètre numérique

- 1) Principe du convertisseur analogique-numérique : CAN simple rampe.
- 2) Mesure de valeur efficace : multiplieur + filtre passe-bas.
- 3) Limitations : bande passante et impédance d'entrée.
- 4) Mesures de forts courants : pinces ampèremétriques.

II) Mesures de composants électroniques

- 1) Mesure de résistance : ohmmètre et mesure quatre points.
- 2) Mesure de capacité : période d'un oscillateur à relaxation.
- 3) Mesure d'inductance : résonance d'un circuit RLC série.

¹ date de 1968, contient assez peu de choses sur les appareils numériques, mais détaille de très nombreuses méthodes de mesures pour les composants R, L, C, et permet d'avoir à l'esprit les méthodes de mesures analogiques (galvanomètre, etc.), qui ne sont pas forcément attendues dans le montage mais peuvent resurgir aux questions.

De nombreux capteurs permettent de transformer une grandeur physique en grandeur électrique (thermistance, thermocouple, montage à potentiomètre rotatif, photodiode, etc.). Cela s'explique par le fait que l'on sait (depuis le début du XIX^{ème} siècle avec l'invention du galvanomètre) mesurer ces grandeurs électriques avec une précision convenable. Ce sont quelques aspects de ces mesures que nous allons étudier aujourd'hui, en nous concentrant principalement sur les appareils de mesure numérique qui sont les plus couramment utilisés de nos jours.

I) Voltmètre numérique

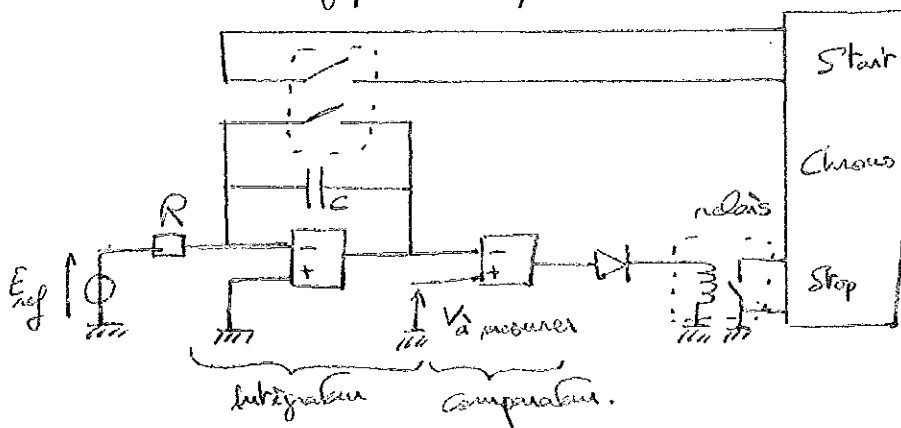
Nous allons nous intéresser au principe de fonctionnement du voltmètre numérique et à ses limitations.

1) Principe du convertisseur analogique-numérique : CAN simple rampe.

Le voltmètre numérique possède un convertisseur analogique-numérique (CAN) lui permettant de transformer une tension analogique en grandeur numérique, dont nous étudierons le principe sur un CAN simple rampe.

Le CAN simple rampe permet de transformer une tension continue inconnue en un temps, donné par un compteur ou un chronomètre numérique. Il est composé d'un montage intégrateur à AO avec en entrée une tension de référence, et d'un montage comparateur à AO qui bascule de $+V_{sat}$ à $-V_{sat}$ dès la tension que l'on cherche à mesurer devient plus petite que celle en sortie de l'intégrateur. L'utilisation d'un interrupteur en parallèle du condensateur de l'intégrateur permet de contrôler le démarrage du CAN (tant que le condensateur est court-circuité la sortie de l'intégrateur est à la masse). L'utilisation d'une diode et d'un relais en sortie du comparateur permet l'arrêt automatique du compteur dès que la tension de sortie bascule de $+V_{sat}$ à $-V_{sat}$.

*Mesure de tensions continues :
Convertisseur analogique-numérique (CAN)*



$$\text{On a : } V_{\text{à mesurer}} = \frac{-V_{\text{ref}}}{RC} \Delta t$$

Nous avons ici pris un CAN simple rampe déjà monté. La tension de référence V_{ref} est de -1V , la résistance R de $1\text{M}\Omega$ et la capacité du condensateur C de $1\mu\text{F}$ (de telle sorte que la pente de la rampe en sortie de l'intégrateur soit de 1V/s et que la valeur en seconde lue sur le chronomètre soit directement la valeur en V de la tension à mesurer).

Avec une entrée $V_e =$ V (mesurée avec un Fluke187²)

on lit $\Delta t =$ s

La précision de la mesure dépend des incertitudes sur les valeurs des composants de l'intégrateur (donc sur la valeur de la pente de la rampe d'intégration), du temps de basculement du relais (qui peut rajouter une erreur systématique) et éventuellement de la précision donnée par le chronomètre (cf. notice).

2) Mesure de valeur efficace : multiplicateur + filtre passe-bas.

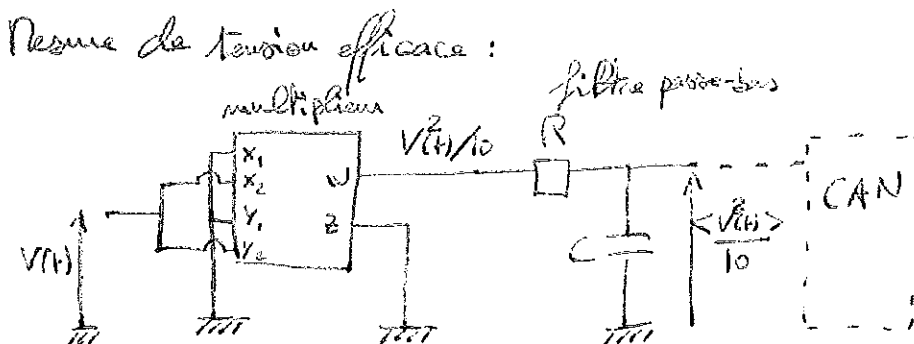
Nous venons de voir que le CAN simple rampe permet de mesurer des tensions continues. Pour des tensions alternatives, on cherche en général à mesurer la valeur efficace :

$$V_{eff} = \sqrt{\langle V^2 \rangle}$$

où $\langle A \rangle$ est la moyenne temporelle de la grandeur A.

La tension efficace correspond à la tension continue qui produirait le même effet Joule aux bornes d'une résistance que la tension alternative à laquelle elle correspond.

On utilise un multiplicateur pour obtenir le carré de la tension à mesurer, suivi d'un filtre RC pour filtrer le continu (la valeur moyenne) dont la sortie est branchée sur l'entrée du CAN simple rampe précédent.



2

Le multiplicateur sort le produit des entrées divisé par un facteur 10 (on le vérifie avec des tensions continues en entrée).

Le filtre passe-bas est composé d'une résistance $R =$ k Ω et $C =$ nF, d'où une fréquence de coupure $f_c =$ Hz.

Avec une entrée V_e de fréquence $f =$ Hz

d'amplitude RMS = V (mesurée avec un Fluke187³)

on lit $\Delta t =$ s

Ce dispositif a un temps de réponse assez lent, mais ce n'est pas très gênant pour un voltmètre numérique. En revanche il y a d'autres limitations.

² Précision 0,025% + 10 digits en continu sur le calibre 5 V ; 0,03% + 3 digits sur le calibre 50V.

³ Précision 0,4% + 40 digits en alternatif entre 45Hz et 1kHz, sur les calibres 5V ou 50V.

3) Limitations : bande passante et impédance d'entrée.

On s'intéresse cette fois à un voltmètre commercial Fluke187.

La première limitation (qui n'en est pas vraiment une si on en a conscience) est l'impédance d'entrée du voltmètre Z_e , de l'ordre de $10\text{ M}\Omega$ d'après les données constructeur.

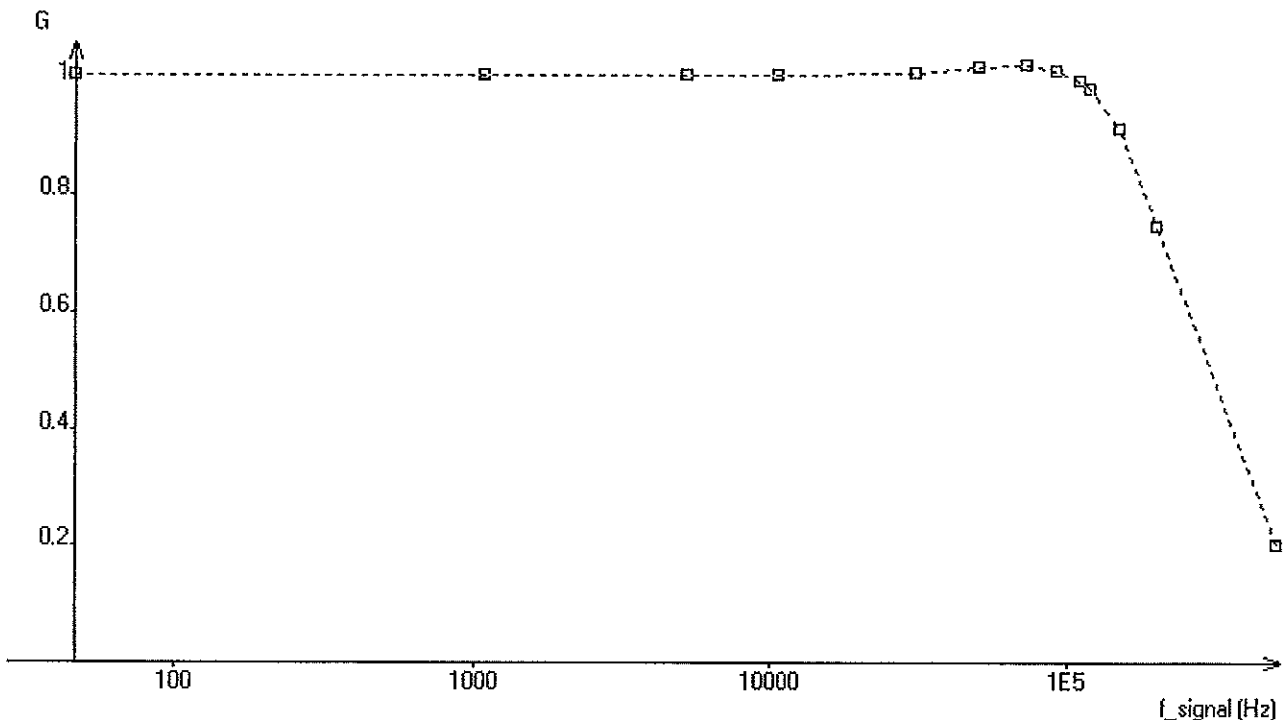
Si l'on veut mesurer une tension aux bornes d'une résistance du même ordre de grandeur que l'impédance d'entrée du voltmètre, cette dernière ne sera pas sans effet.



On délivre une tension V sur un circuit de deux résistances R_1 et R_2 de $10\text{ M}\Omega$ chacune. On s'attend donc à mesurer la moitié de la tension sur chaque résistance. Mais lorsqu'on branche le voltmètre en parallèle de R_1 (respectivement R_2), la résistance équivalente vue par le voltmètre est alors $R_{eq} = \frac{R_1 Z_e}{R_1 + Z_e} \approx \frac{R_1}{2}$ et on ne mesure plus alors que le tiers de tension délivrée par le générateur.

Une autre limitation est la bande passante du voltmètre (lorsqu'on l'utilise pour mesurer des tensions alternatives). Les données constructeurs nous garantissent une précision $> 90\%$ jusqu'à 100 kHz . On trace donc la valeur lue sur le voltmètre pour un signal dont on fait varier la fréquence sans changer l'intensité (on peut vérifier à l'oscilloscope que l'intensité ne varie pas, puisque ce dernier est capable de mesurer correctement des signaux jusqu'à 100 MHz).

On obtient le tracé suivant (où G est la valeur RMS lue sur le voltmètre, normalisée par la valeur donnée par l'oscilloscope) :

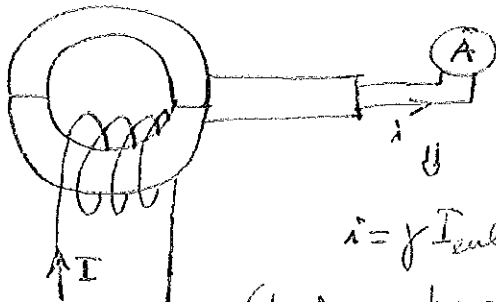


On mesure une fréquence de coupure à -3dB : $f_c =$ Hz

4) Mesures de forts courants : pinces ampèremétriques.

On peut utiliser le voltmètre comme ampèremètre par le biais de la loi d'Ohm (en mesurant la tension aux bornes d'une résistance de valeur connue), mais on a alors deux autres limitations, qui sont le courant maximal qui peut circuler dans l'ampèremètre numérique (10 A) et le fait que l'on doit forcément ouvrir le circuit pour y insérer l'ampèremètre. Ce pourquoi on peut lui préférer l'utilisation de pinces ampèremétriques qui permettent d'avoir accès au courant circulant dans un fil.

Pincés ampèremétriques



$$i = \gamma I_{\text{enlace}} = \gamma \cdot 4 \cdot I$$

(typiquement $\gamma = 10^{-3}$)

On utilise une pince ampèremétrique qui fonctionne comme un transformateur avec une constante de couplage 1/1000, précise à 3% et dont la gamme de précision s'étend de 2 à 600 A (données constructeur). Le courant qui circule dans la pince est donc 1000 fois plus faible que celui qui circule dans le fil et que l'on cherche à mesurer. Ce courant peut être facilement mesuré à l'aide d'un multimètre numérique. Pour augmenter la précision, on peut faire passer plusieurs fois le même fil dans la pince (la valeur lue sera alors la valeur du courant multipliée par le nombre de tours que fait le fil autour de la pince).

On a réalisé en préparation quelques mesures pour obtenir la constante de couplage :

Valeur du courant (indiquée par le générateur) en A	Valeur du courant dans les pinces (le fil est enroulé 5 fois autour de la pince) en mA
2,488	12,34
3,122	15,50
3,673	18,24
4,038	20,01
4,576	22,79

En faisant une régression linéaire, on trouve une constante de couplage de $959 \pm 61 \cdot 10^{-6}$, ce qui correspond bien au facteur 1/1000 annoncé.

On peut noter que cette pince, fonctionnant comme un transformateur, ne pourra être utilisée que pour des courants alternatifs. D'autres pinces utilisent l'effet Hall pour mesurer des courants continus (et il existe désormais des pinces numériques qui affichent directement le résultat).

II) Mesures de composants électroniques

Maintenant que nous avons regardé quelques caractéristiques des appareils numériques de mesures de tension et de courant, nous pouvons les utiliser pour mesurer des valeurs de composants électroniques, tels que des résistances, des capacités ou des inductances.

1) Mesure de résistance : ohmmètre et mesure quatre points.

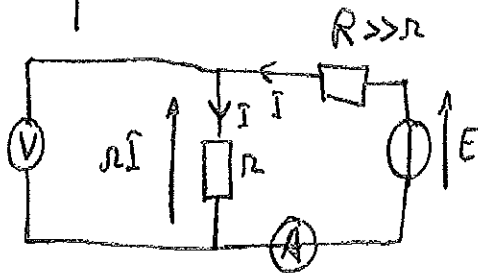
La mesure de résistance peut se faire simplement en envoyant un courant connu et en mesurant la tension aux bornes de la résistance. C'est le principe de fonctionnement d'un ohmmètre numérique. Pour le Fluke187 le courant envoyé varie de 1 mA (pour le calibre 500 Ω) à 0,1 μ A (pour le calibre 30 M Ω).

On peut le vérifier en branchant un ampèremètre (qui sera aussi un Fluke187) et une résistance en série sur les bornes de l'ohmmètre.

Pour une résistance d'environ 100 Ω , on mesure un courant de mA.

Cependant, lorsqu'on cherche à mesurer précisément de très faibles résistances (par exemple une thermistance), on risque d'être gêné par la résistance des fils qui relient la résistance à mesurer à l'ohmmètre. Une solution consiste à faire un montage de mesure « quatre points ».

Mesure quatre contacts



E et R imposent I
 V mesure rI

5

Comme le voltmètre a une très grande impédance par rapport à l'impédance totale de la boucle du circuit qui comporte la résistance à mesurer et le générateur de courant, le courant ne circulera pratiquement pas dans les fils qui relient le voltmètre à la résistance à mesurer, et la tension mesurée sera donc bien celle aux bornes de la résistance (et non pas celle aux bornes de la résistance + des fils).

Ici on utilise comme petite résistance un fil.

On envoie un courant $I = \pm$ mA (mesuré au Fluke187)

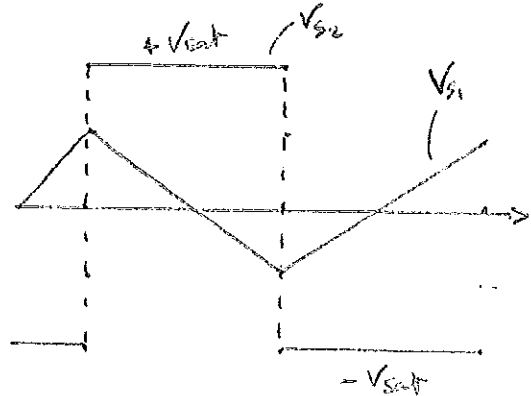
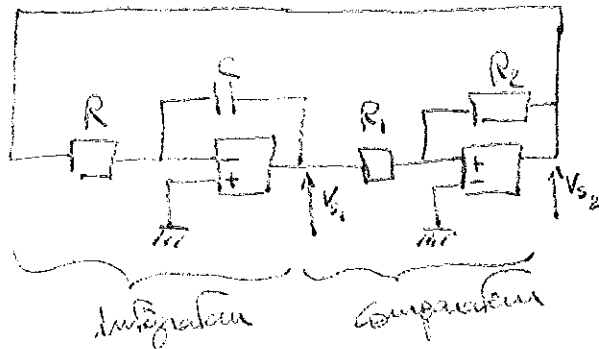
On mesure une tension $V = \pm$ V (mesurée au Fluke187)

On en déduit une résistance $R = \pm$ Ω

2) Mesure de capacité : période d'un oscillateur à relaxation.

Pour obtenir une valeur de capacité d'un condensateur, on mesure la période d'un oscillateur à relaxation.

Mesure de capacité :
oscillateur à relaxation



6

La fréquence est donnée par : $f = \frac{1}{4RC} \frac{R_2}{R_1}$ (la condition d'oscillation est $R_1 < R_2$).

On a pris les valeurs suivantes (mesurées au LCRmètre) :

$R = 99,7 \text{ k}\Omega \pm 0,5\% + 3 \text{ digits}$

$R_1 = 0,994 \text{ k}\Omega \pm 0,5\% + 3 \text{ digits}$

$R_2 = 3,88 \text{ k}\Omega \pm 0,5\% + 3 \text{ digits}$

$C = 97,3 \text{ nF} \pm 0,7\% + 5 \text{ digits}$

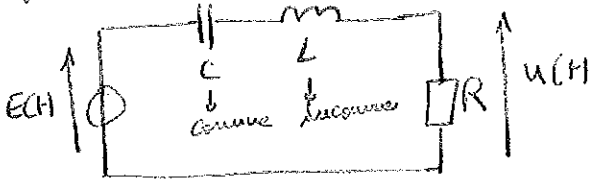
On mesure une fréquence (à l'oscilloscope) $f = \quad \pm \quad \text{Hz}$

On en déduit une capacité $C = \quad \pm \quad \text{nF}$

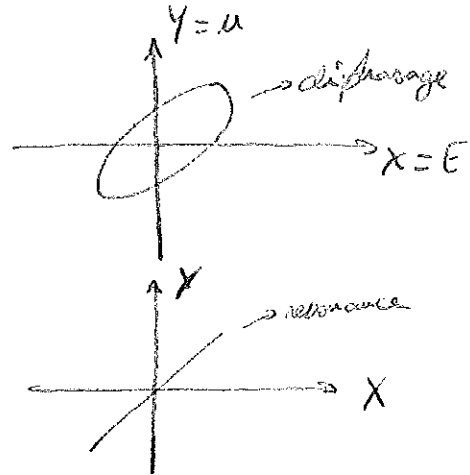
3) Mesure d'inductance : résonance d'un circuit RLC série.

Enfin pour mesurer la valeur d'inductance d'une bobine on mesure la fréquence de résonance d'un circuit RLC série.

Mesure d'inductance :
fréquence de résonance du RLC



résonance : $\omega_0^2 LC = 1$



7

La pulsation de résonance est donnée par : $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$

La fréquence de résonance est repérée par un déphasage nul entre l'entrée et la sortie, visualisé en mode XY par un oscilloscope.

On a pris les valeurs suivantes (mesurées au LCRmètre) :

$L = 9,95 \text{ mH} \pm 2\% + 5 \text{ digits}$

$C = 1,036 \text{ } \mu\text{F} \pm 0,7\% + 3 \text{ digits}$

$R = 10,01 \text{ k}\Omega \pm 0,5\% + 3 \text{ digits}$

La fréquence de résonance attendue est donc de $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 1,57 \text{ kHz} \pm 3\%$

La fréquence mesurée (à l'oscilloscope) est $f = \quad \pm \quad \text{Hz}$

On en déduit une inductance $L = \quad \pm \quad \text{mH}$