

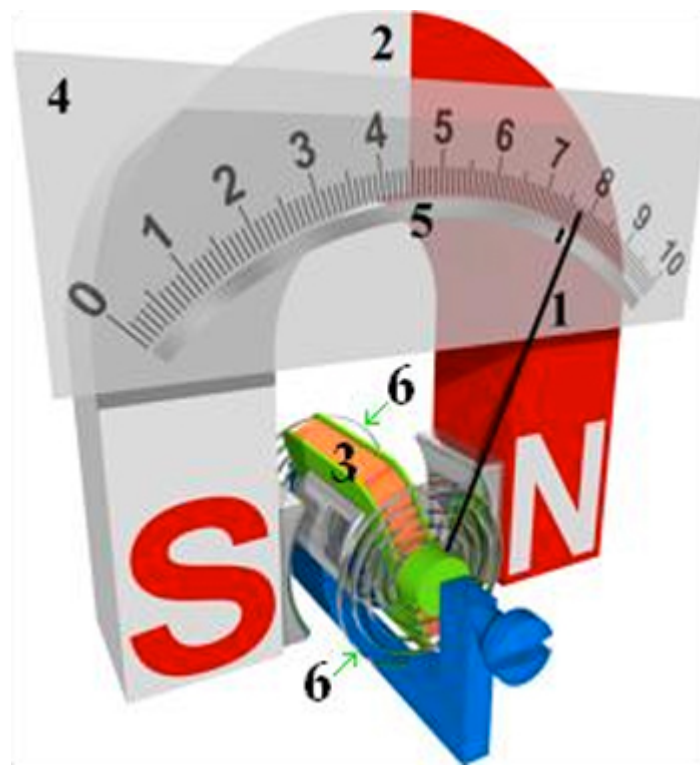
Instrumentation

Joseph Moerschell, Marc Nicollrat

9 Mesure de grandeurs électriques

- Mesures de tension
- Mesures de courant
- Quelques caractéristiques particulières à considérer:
 - Mesure de grandeurs continues
 - Mesure de grandeurs alternatives, sinusoïdales ou simplement périodiques
 - Mesure à haute tension, de grands courants
 - Mesure de faibles signaux

9.1 Mesure de tension : multimètre analogique



- Fonctionne comme un moteur avec un ressort :
 - $T_m = I \cdot K_i$ Couple moteur
 - $T_r = \alpha \cdot K_r$ Couple du ressort
 - Avec $T_m = T_r$ on obtient une relation entre courant et angle : $I = \alpha \cdot \frac{K_r}{K_i}$

- La résistance du bobinage ou des résistances externes déterminent le courant $U = R \cdot I$.
- On peut varier la résistance R pour changer de plage de mesure.



Tip

Un ampèremètre fonctionne de la même façon en utilisant une résistance de très faible valeur mais très précise (un *shunt*).



Exercice

- Comment mesurer une tension alternative avec un multimètre analogique de ce genre ?
- Calculer la valeur d'une résistance externe pour décupler la plage de mesure ($R_{mult} = 10k\Omega$, $V_{max} = 10V$)

9.2 Mesure de tension : effet de charge

Impédance typique : Multimètre Fluke 289

- Mesure de tension : $10\text{M}\Omega$
- Mesure de courant 10 A: 0.04Ω
- Mesure de courant 400mA : 1.8Ω

Exercices

- Le courant utilisé implique une influence sur le circuit
 - Calculer le courant consommé pour une tension donnée (240V)
 - Calculer la chute de tension d'un ampèremètre pour un courant donné (10A,400mA)



Specifications

Function	Range and Resolution	Basic Accuracy
DC volts	50.000 mV, 500.00 mV, 5.0000 V, 50.000 V,	0.025 %
AC volts	500.00 V, 1000.0 V	0.4 % (true-rms)
DC current	500.00 μ A, 5000.0 μ A, 50.000 mA, 400.00 mA,	0.05 %
AC current	5.0000 A, 10.000 A	0.6 % (true-rms)
Temperature (excluding probe)	-200.0 °C to 1350.0 °C (-328.0 °F to 2462.0 °F)	1.0 %
Resistance	500.00 Ω , 5.0000 k Ω , 50.000 k Ω , 500.00 k Ω , 5.0000 M Ω , 50.00 M Ω , 500.0 M Ω	0.05 %
Capacitance	1.000 nF, 10.00 nF, 100.0 nF, 1.000 μ F, 10.00 μ F, 100.0 μ F, 1000 μ F, 10.00 mF, 100 mF	1.0 %
Frequency	99.999 Hz, 999.99 Hz, 9.9999 kHz, 99.999 kHz, 999.99 kHz	0.005 %
Connectivity	Optional infrared connector via Fluke ir3000 FC	

9.3 Multimètre numérique

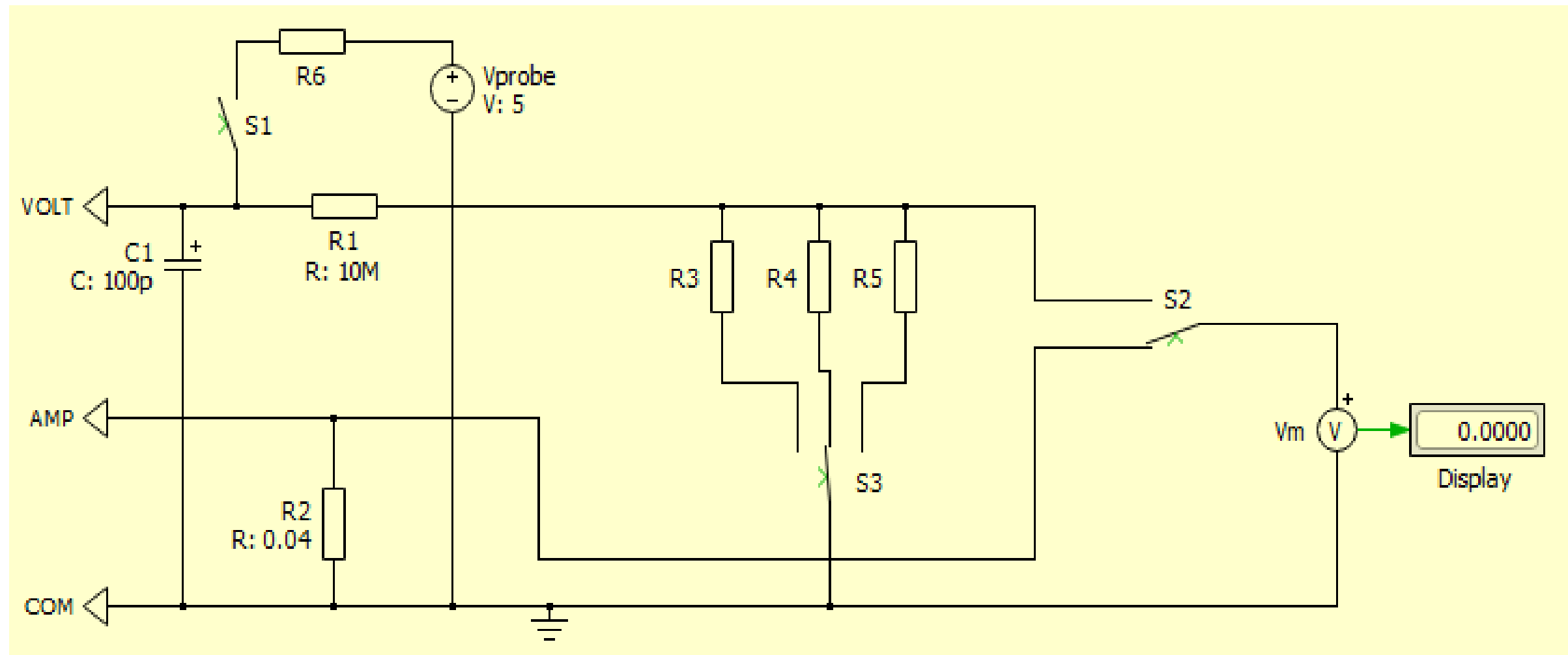


Schéma d'un multimètre numérique

Atténuateur	$R1 + R3/R4/R5$	S3 sélectionne la plage
Selecteurs	S2	type de mesure
	S1	Mesure d'impédance
Shunt	R2	pour mesure de courant, différent shunt selon la plage
Mesure d'impédance	Vprobe, R6	injection d'une tension de mesure
Mesure basse tension	Vm1	Convertisseur A/D de précision, un microcontrôleur assure l'affichage en tenant compte du mode.

9.4 Mesures avec oscilloscope

- La masse est connectée à la terre
- Catégories de sonde d'oscilloscope
 - 10x, standard, 10Mohms / 20pF
 - 100x, mesure de haute tension
 - sonde active, très basse impédance, 6GHz, 1 pF
 - sonde active différentielle, mesure de signaux très rapide (horloges, bus de donnée)
- Sonde de tension différentielles, mesure de haute tension
- Sonde de courant (effet Hall)

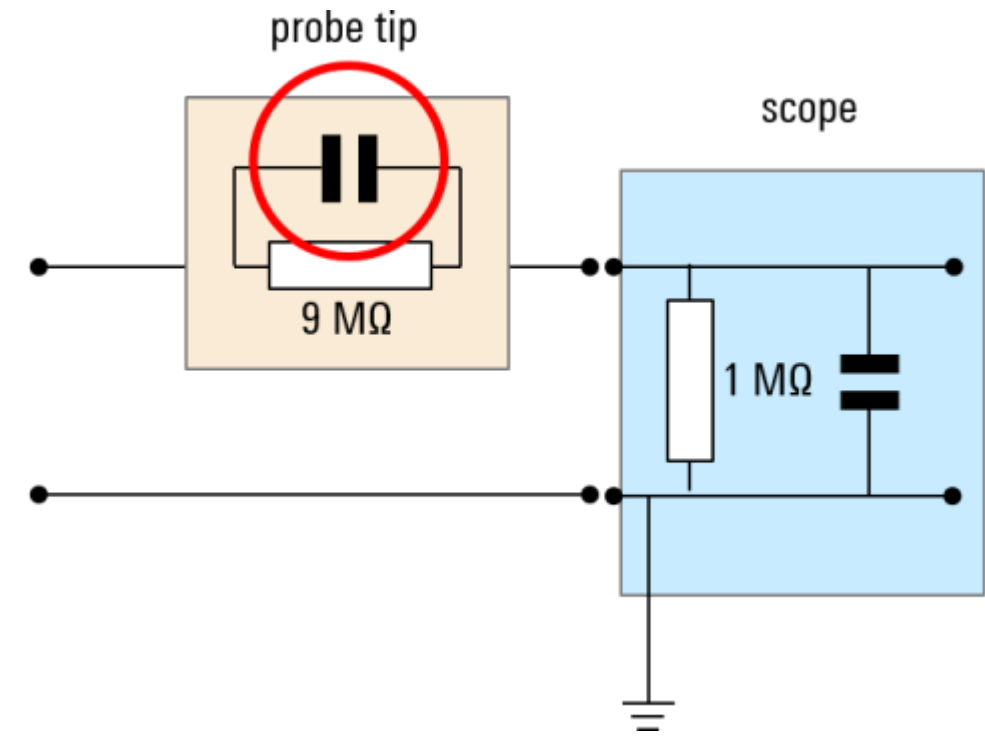


Schéma de principe d'une sonde 10x. Il faut ajuster le condensateur pour que la sonde réagisse bien

9.5 Mesure de grandeurs alternatives : variantes

Il y a 2 variantes de mesure de tension alternative :

1. Redresser et mesurer la moyenne linéaire, puis adapter l'amplitude avec une correction

Exercice

- Calculer la correction nécessaire pour que le voltmètre affiche la valeur RMS d'un signal sinusoïdal
- Quelle erreur a-t-on si le signal mesuré est rectangulaire ?

2. Numériser le signal à haute fréquence et calculer la valeur **True RMS**

Exercice

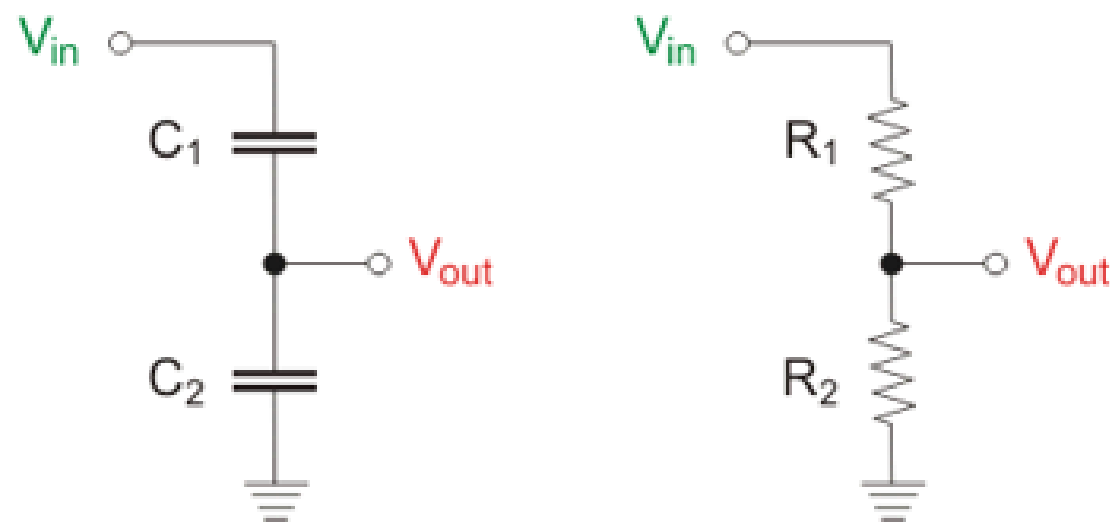
- Dessiner le schéma-bloc du traitement du signal.
- Quelles sont les caractéristiques principales à considérer ?

9.6 Sondes de tension

Propriétés de la sonde de tension :

- Augmenter l'impédance d'entrée de l'instrument
- Réduire les perturbations électromagnétiques de la mesure
- Aggrandir la plage de mesure
- Effectuer une séparation galvanique (mais ce n'est pas toujours le cas)

Réalisation: diviseurs résistifs ou capacitifs, ou les deux



$$V_{out} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_{in}$$

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in}$$

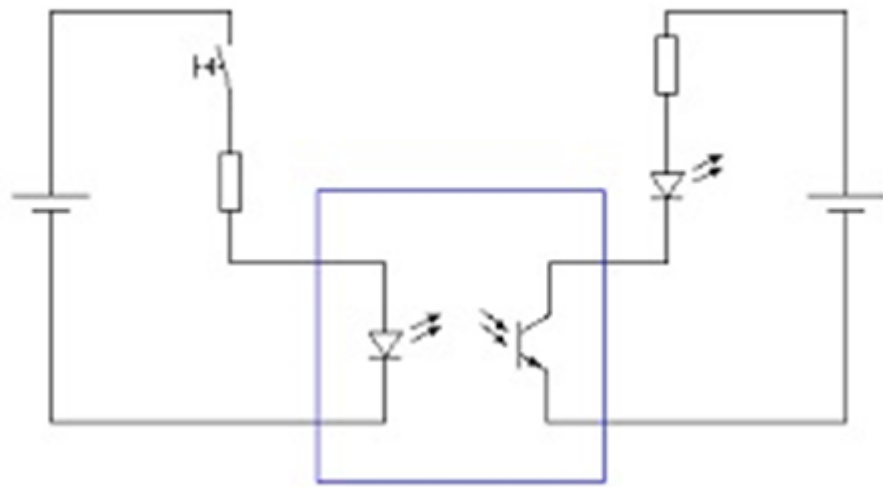
Schéma de la sonde

Exercices

- Calculer R_1 et C_1 d'une sonde d'oscilloscope x10, lorsque $R_2 = 10M\Omega$ et $C_2 = 20pF$
- Esquisser la forme de V_{out} , si V_{in} est un signal rectangulaire et que R_1 est (a) trop petite, (b) trop grande.

9.7 Séparation galvanique

Une séparation galvanique est nécessaire si les potentiels sont dangereux, ou ne sont pas les mêmes que le système de mesure.



Principe isolation optique



Mesure de haute tension (4200 VRMS) avec un produit de LEM. La tension est appliquée à une résistance, le module mesure le courant

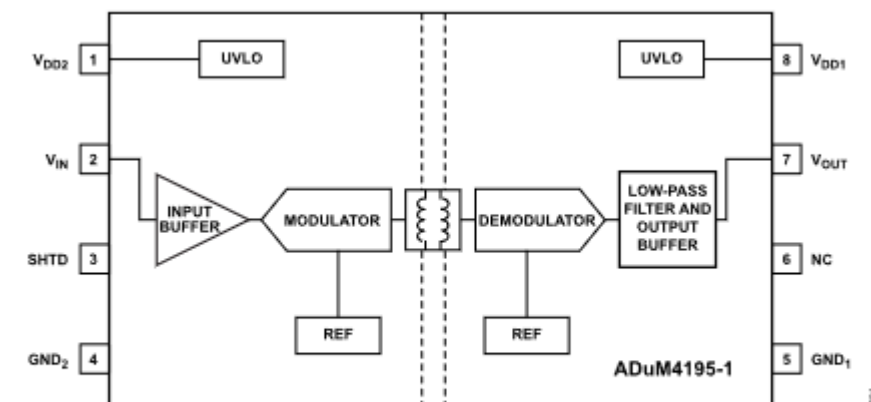


Figure 1.

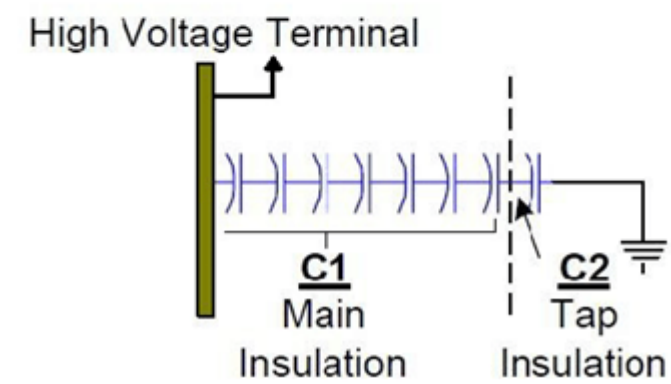
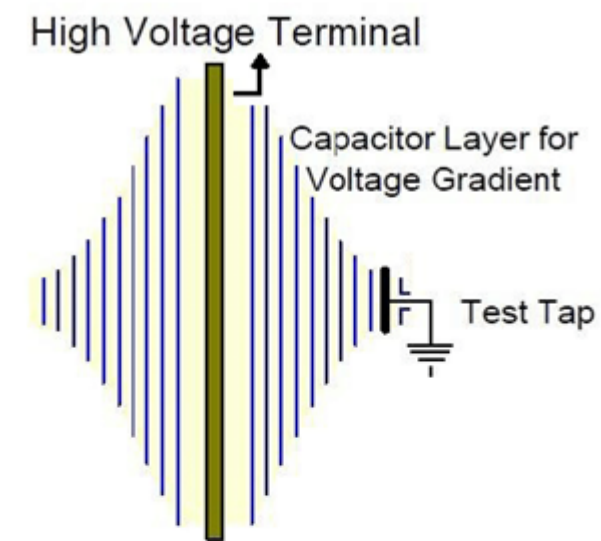
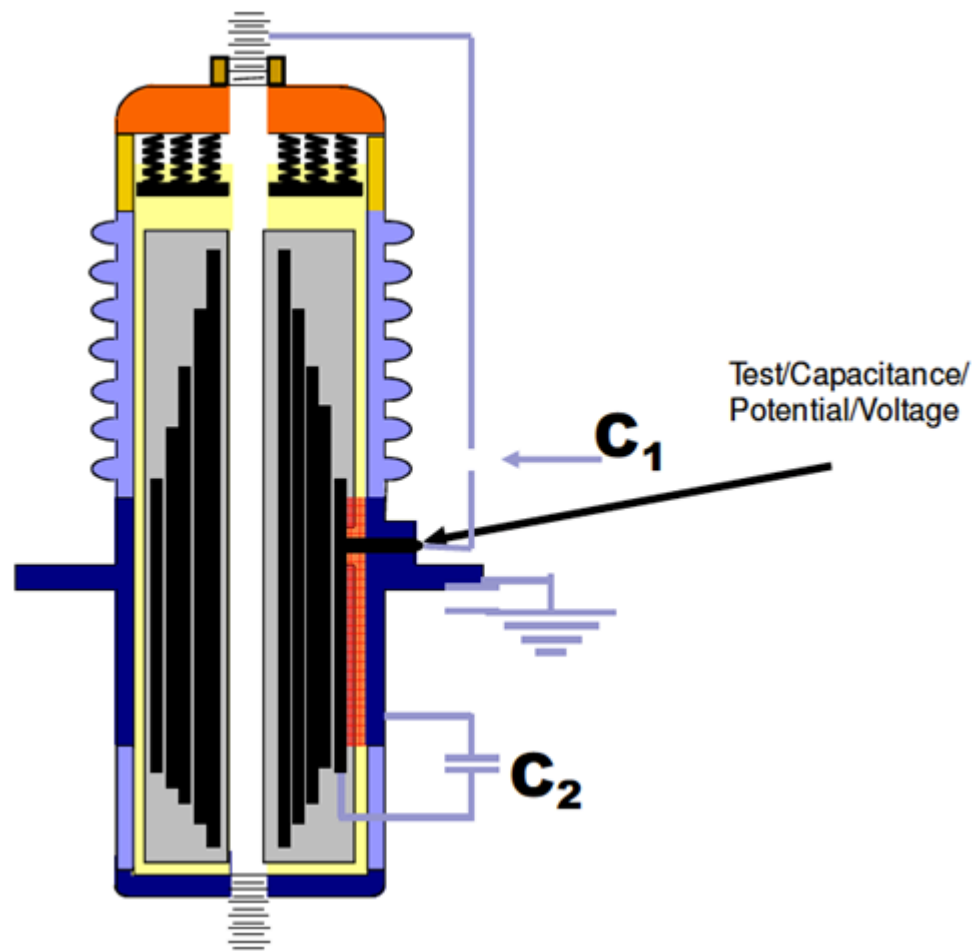
Chip avec séparation galvanique inductive



Un transformateur de tension sert à obtenir une séparation galvanique

9.8 Mesure haute tension

Mesure avec diviseur capacitif dans la borne de traversée.



9.9 Mesure haute tension et courants avec transformateur



Transformateur de tension



Transformateur de courant



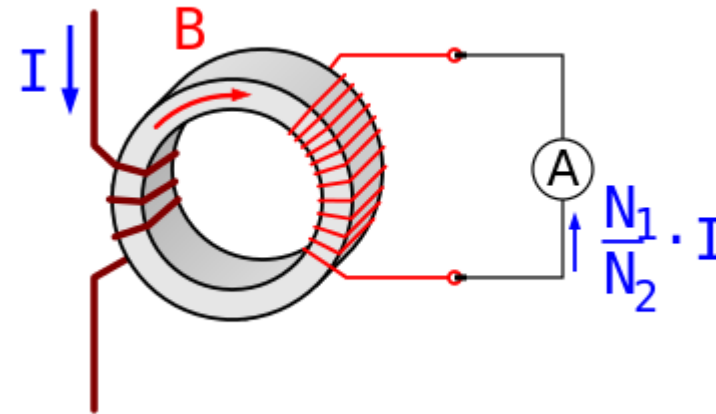
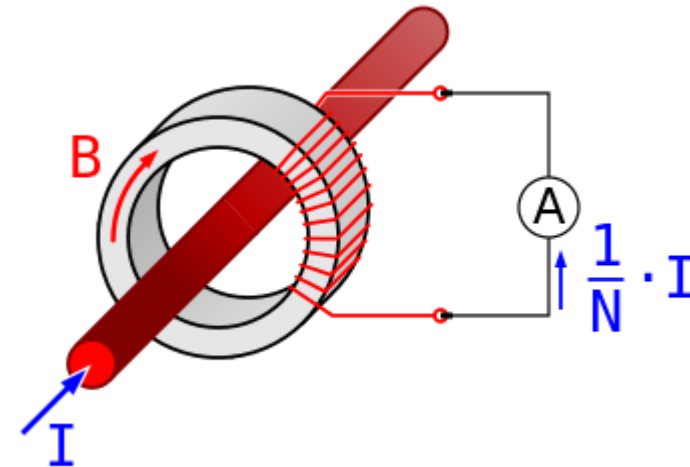
Transformateur combiné

Figure 1: Différents systèmes de mesures de haute tension.

9.10 Transformateur de courant

Le *TI* est un transformateur d'intensité. Il fonctionne comme un transformateur.

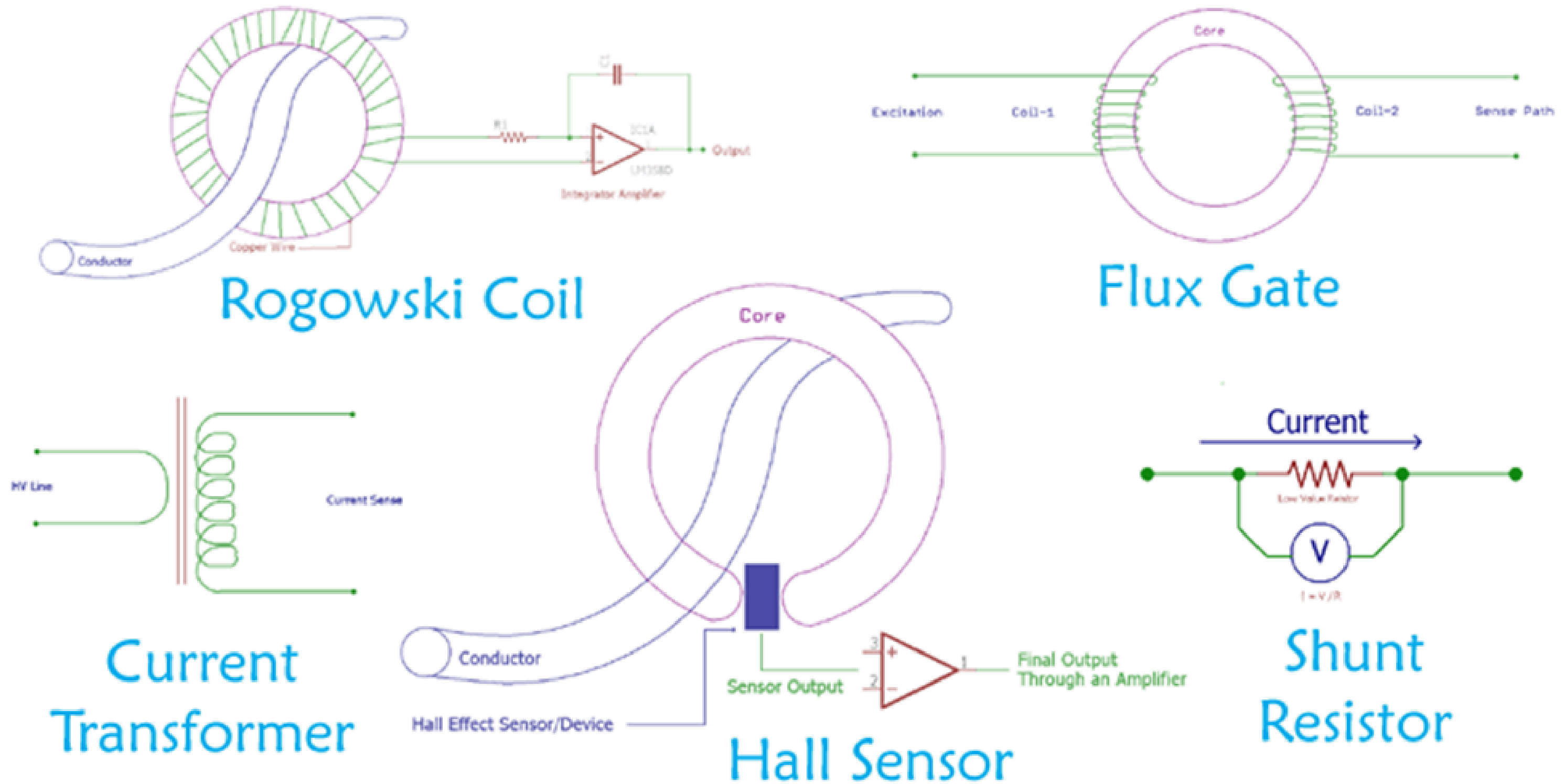
La charge a une faible impédance = Le transformateur travaille en court circuit, on mesure une fraction du courant principal au secondaire.



! Important

- Il ne faut jamais laisser le secondaire d'un TI ouvert.
- On ne peut pas utiliser un TI pour mesurer un courant continu.

9.11 Mesure de courants électriques



Différents types de mesure de courant

9.12 Bobine de Rogowski

Transformateur de courant sans noyau magnétique: flexible, linéaire, mesure de signaux très rapides.

La tension de sortie est proportionnelle à la dérivée du courant (loi de Faraday

$$e = -\frac{d\Phi}{dt})$$

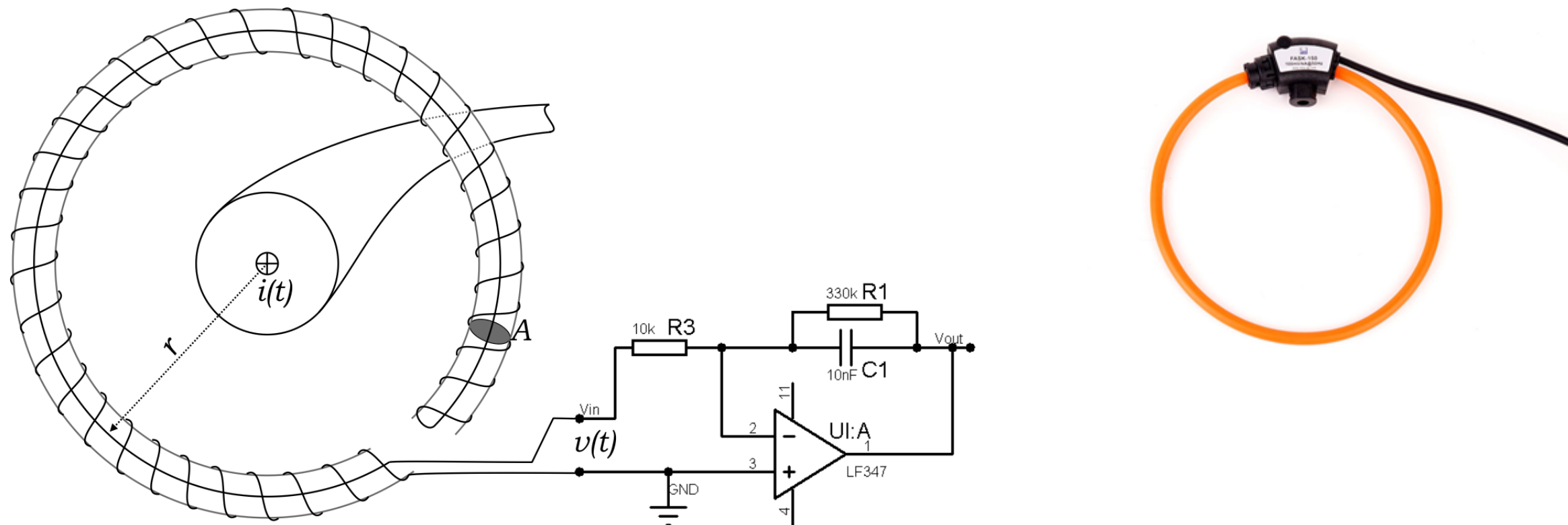


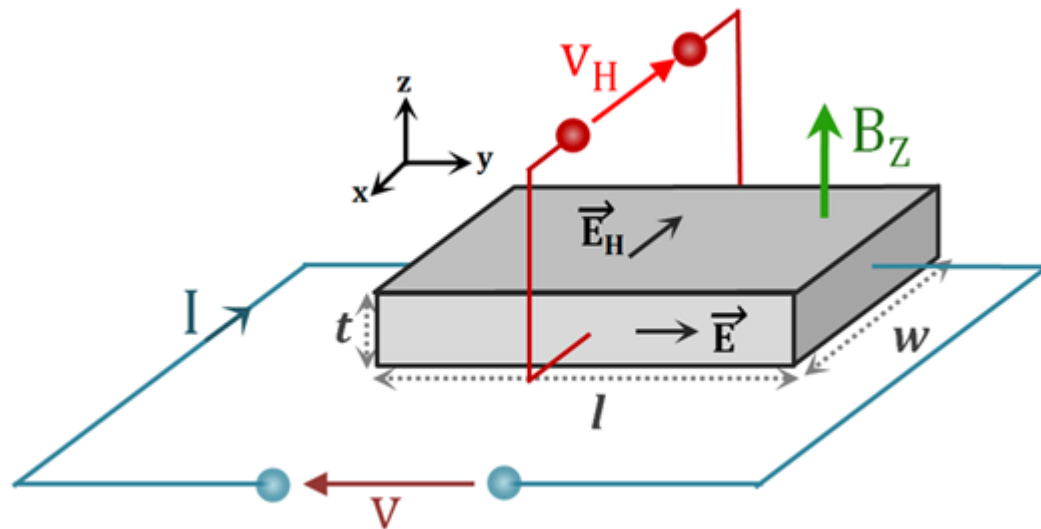
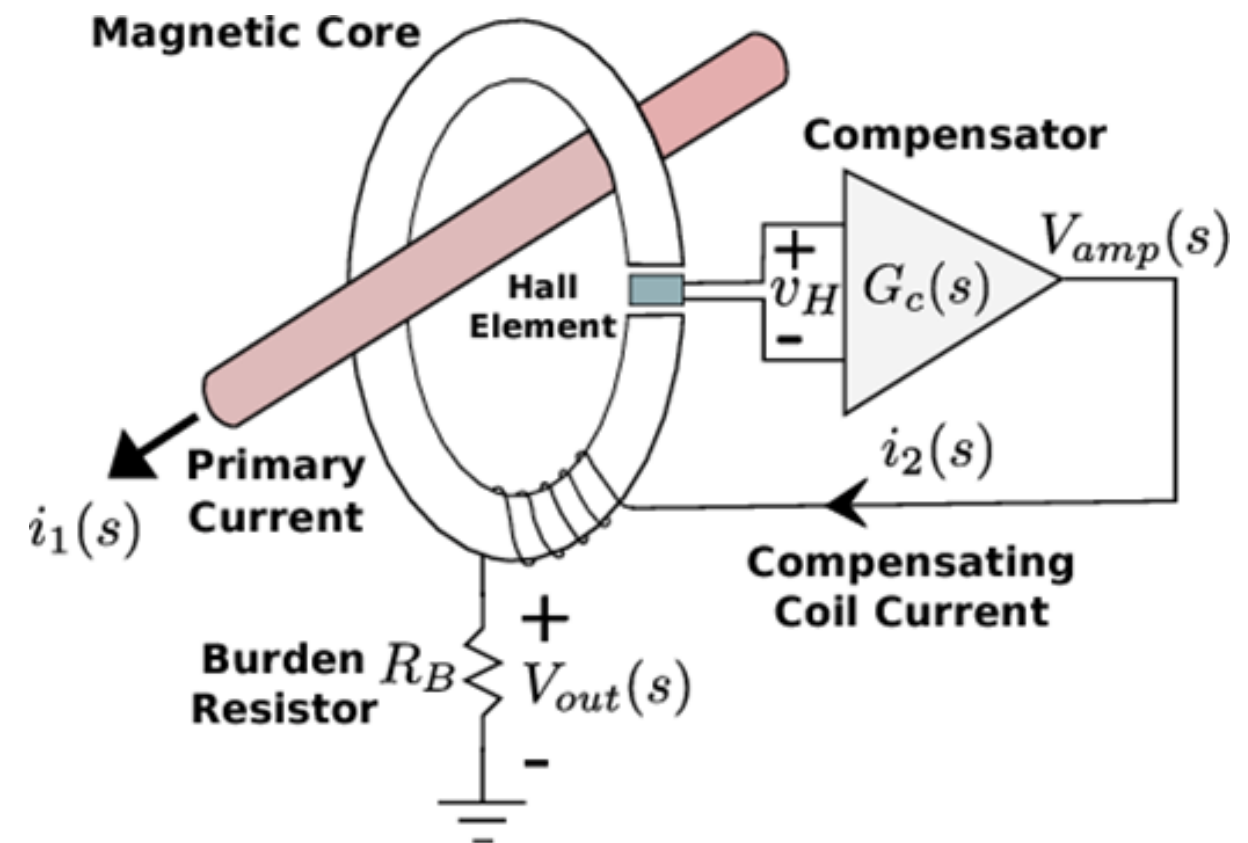
Figure 2: Sonde de Rogowski

9.13 Capteur de courant à sonde de Hall

Le capteur à effet Hall exploite la loi de Lorentz.

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

Le capteur travaille par compensation du champ magnétique, ce qui le rend très linéaire.

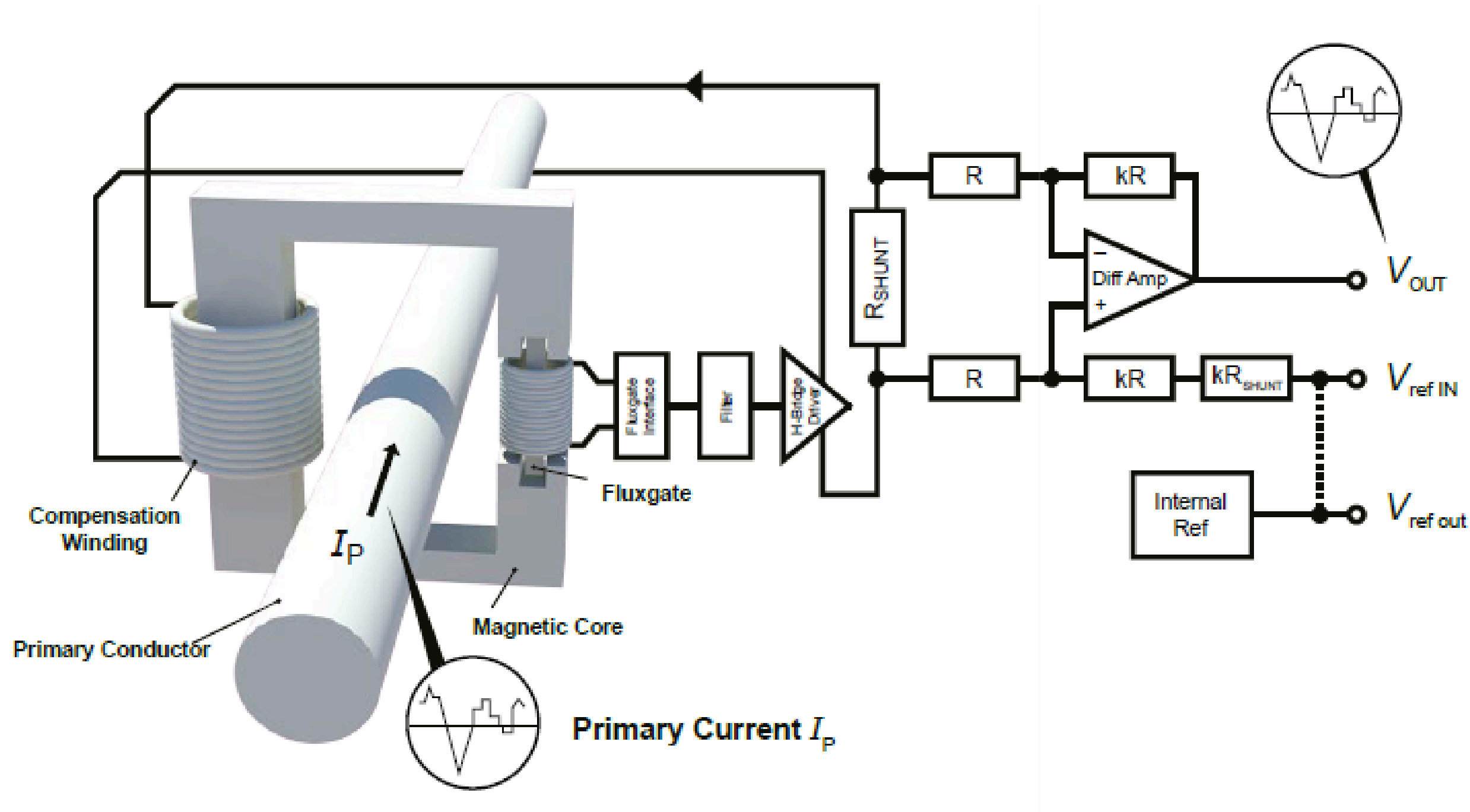


Principe sonde de Hall



Exemple de capteur LEM

9.14 Flux Gate

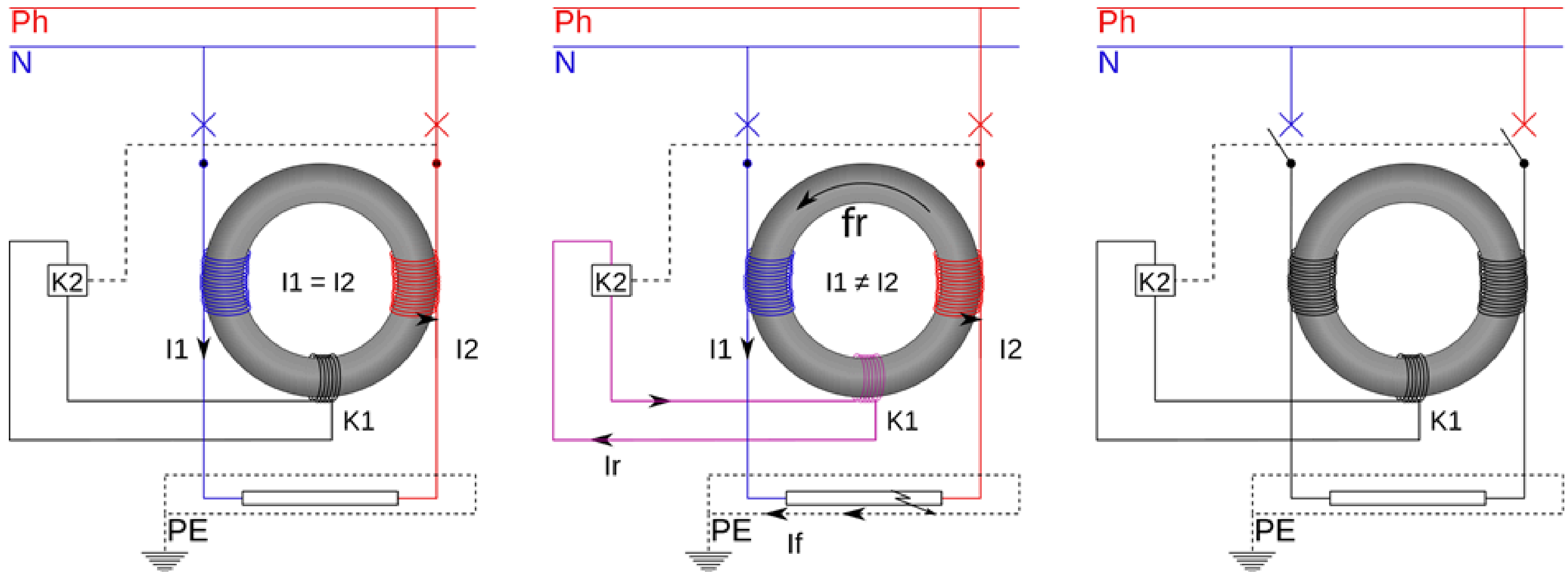


L'excitation primaire met le noyau périodiquement en saturation. Le flux créé par le courant à mesurer vient s'ajouter au signal d'excitation en déséquilibrant le signal mesuré.

Une sonde de courant travaille par compensation, comme le capteur à effet Hall.

9.15 Disjoncteur différentiel

Le disjoncteur à courant de défaut (FI) est utilisé comme dispositif de sécurité dans les installations électriques.



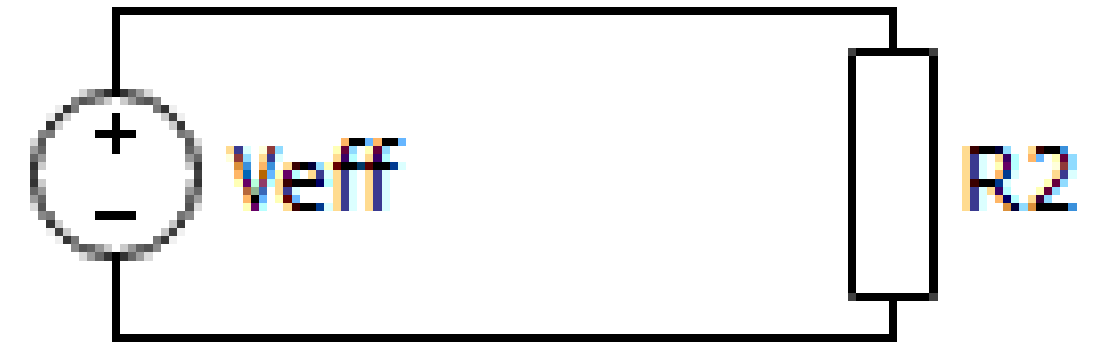
Si les courants I_1 et I_2 sont différents à cause d'un courant de fuite I_f , le relais K_2 provoque la coupure de l'alimentation. Le relais K_2 restera dans cet état jusqu'au prochain réarmement, lequel ne sera possible que si le courant de défaut I_f a disparu.

Source : Wikipedia

9.16 Mesure de grandeurs alternatives : problème

Pour une grandeur alternative, on s'intéresse à une valeur *moyenne* sur une période.

On définit la tension ou le courant *efficace* : tension continue équivalente pour avoir la même puissance qu'avec une tension alternative.



Equivalence entre puissance transférée par la tension alternative et une tension DC équivalente

$$p(t) = u_{AC}(t) \cdot i(t) = \frac{u_{AC}^2(t)}{R} \quad P_{AC} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u_{AC}(t)^2}{R} dt$$

$$P_{AC} = \frac{U_{eff}^2}{R}$$

Exercice

- Quelle est l'expression de U_{eff} comme fonction de $u_{AC}(t)$?
- Si $u_{AC}(t) = U_{peak} \cdot \sin(2\pi ft)$, quel est le rapport entre U_{eff} et U_{peak} ?

9.17 Puissance des systèmes alternatifs

Expression de la puissance instantanée

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

Définition de la puissance RMS

- Lorsqu'on a une tension alternative (réseau 50Hz), la puissance moyenne sur une période du réseau est considérée.
- On calcule les tensions et courants RMS comme suit :

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

9.18 Puissance active et réactive

Simulation d'un circuit RL

Note

Simulation PLECS consultables... Exemple avec le jupyter notebook dev_9.2_transcient_analysis

- Calculer la puissance instantanée
- Intégrer sur une période pour obtenir l'énergie
- Faire varier la valeur de L
- Faire varier la valeur de R

Exercice

- Observer la relation entre le courant et la tension sur un condensateur puis sur une inductance.

Tip

- Une inductance ou un condensateur ne consomment pas d'énergie.
- On distingue la puissance *active* de la puissance *réactive*

9.19 Représentation en nombre complexes

On peut représenter les tensions et courants et les composants passifs par des nombres complexes, ce qui permet de calculer la puissance active et réactive

$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = P + jQ$$

On définit les termes suivants :

- P est la puissance active (partie réelle)
- Q est la puissance réactive (partie imaginaire)
- $|\underline{S}|$ est la puissance apparente

On définit des *phaseurs tournants* selon le modèle :

$$\underline{X} = \hat{X} \cdot e^{j\omega t}, \quad \text{avec} \quad X = U, I, P$$

L'angle φ entre la tension et le courant est le déphasage. La grandeur $\cos \varphi$ est souvent mesurée pour évaluer la qualité d'un consommateur. Le $\cos \phi$ idéal est 1, sans puissance réactive.

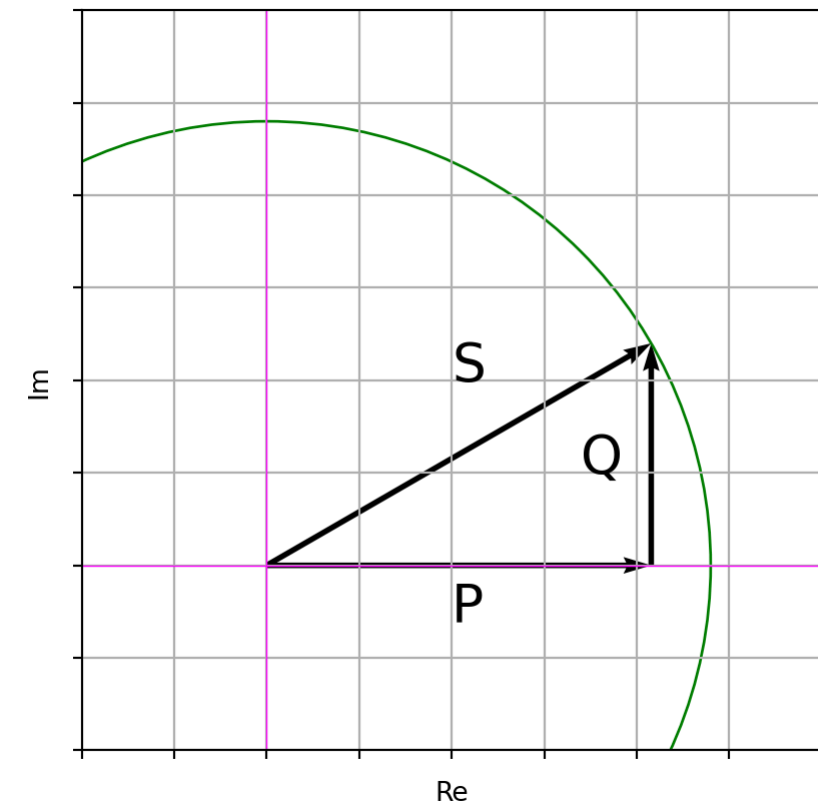


Figure 3: Représentation dans le plan complexe

9.20 Mesure des puissances et du déphasage

La puissance P et la puissance active sont calculées comme suit :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt, \quad S = U \cdot I$$

La puissance réactive Q suit de la relation

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

On peut calculer le déphasage

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right)$$

Ceci n'est correct que si il n'y a pas de *distorsion harmonique*.

9.21 Mesure par traitement numérique

La mesure se fait en général par une *traitement numérique*.

- La mesure se fait sur la base de la *fréquence* des grandeurs mesurées
- Les signaux sont *échantillonnés* à une fréquence multiple de la fréquence fondamentale des signaux

Soit

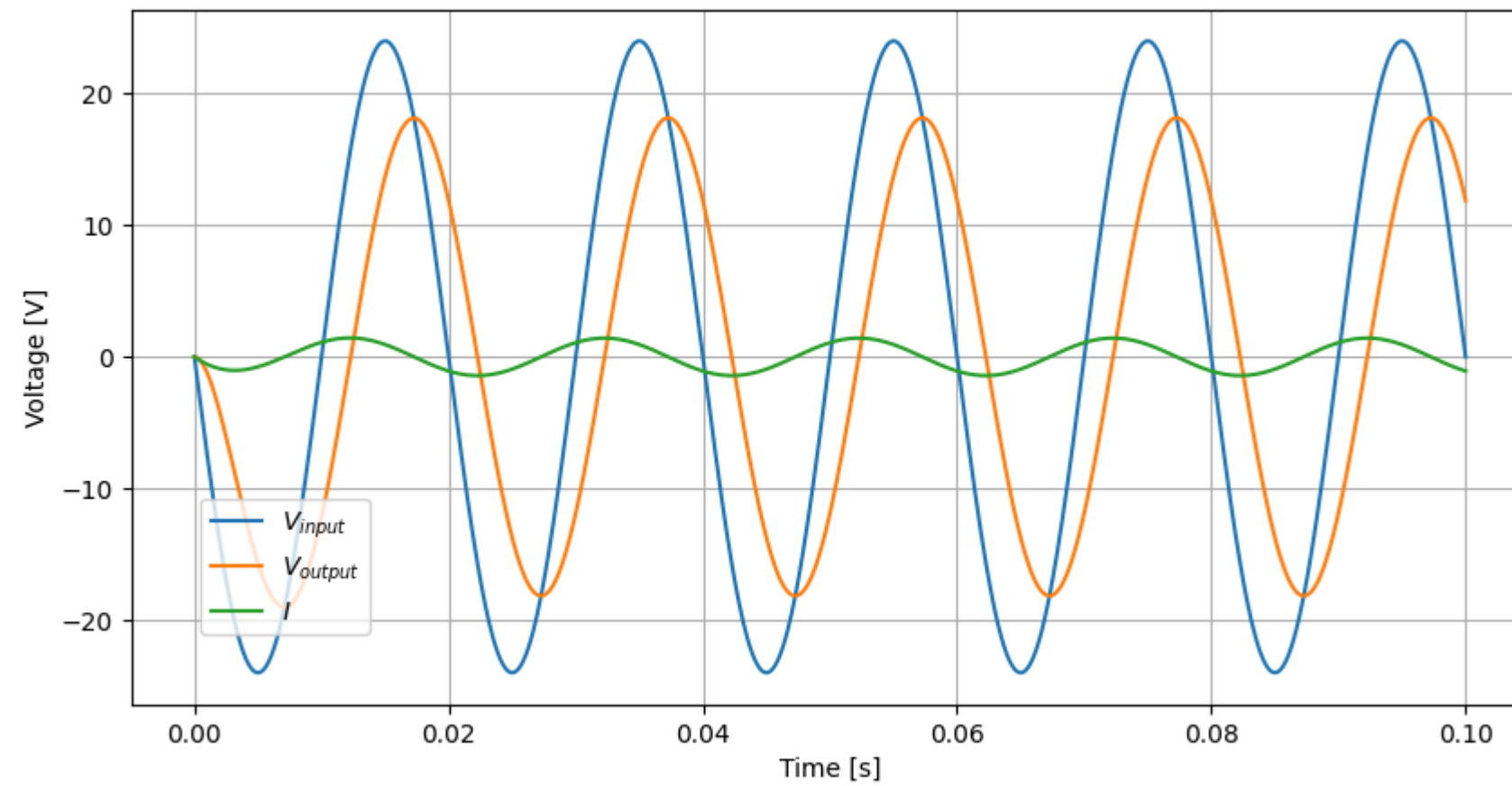
$$u[k], i[k], k = 1..N$$

on peut calculer les grandeurs efficaces

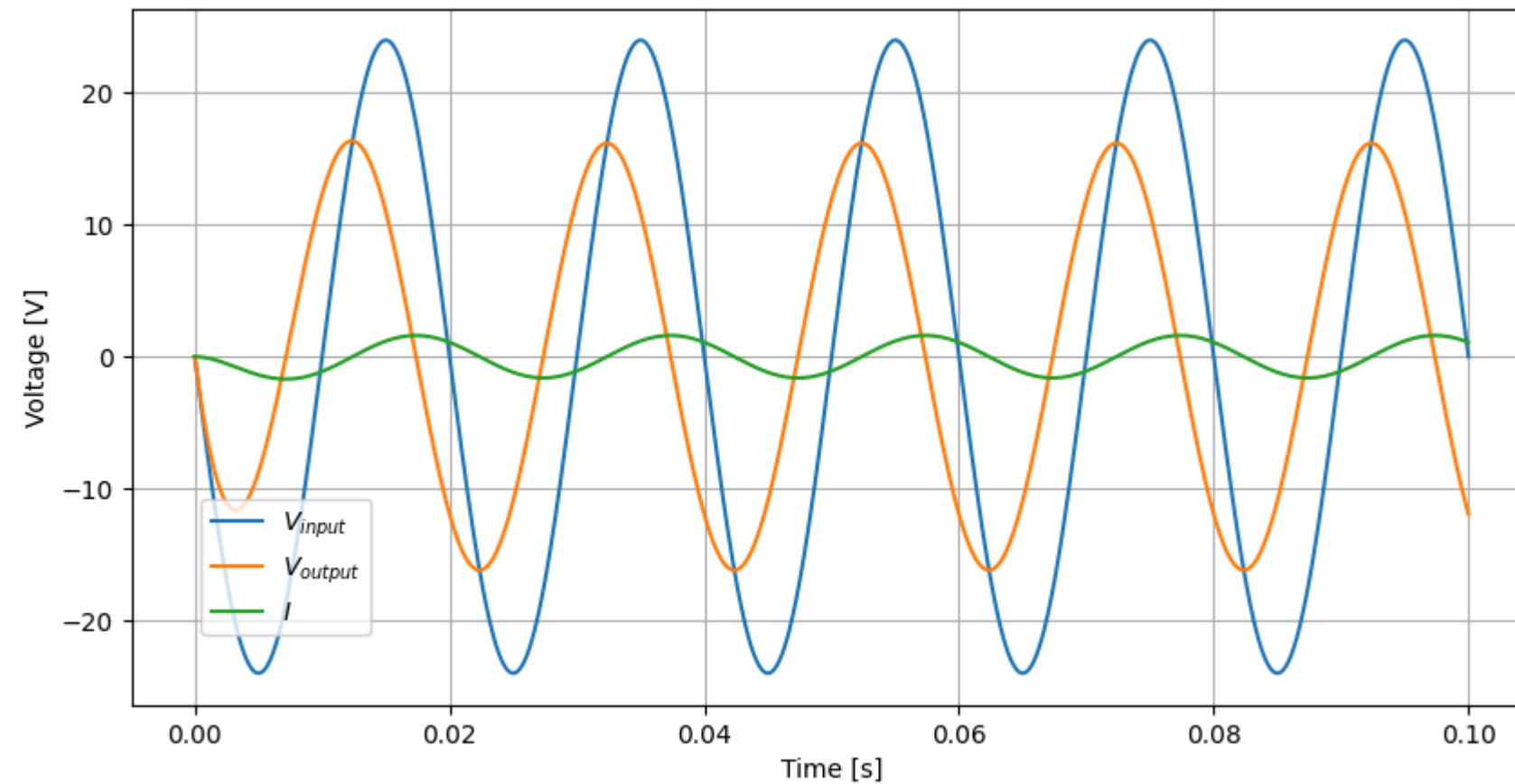
$$U_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}N} \sqrt{\sum_{k=1}^N u^2[k]} \quad I_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}N} \sqrt{\sum_{k=1}^N i^2[k]}$$

$$P_{act} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u[k] \cdot i[k]$$

9.22 Simulation des circuits RL et RC



Circuit RC



Circuit RL

9.23 Energie électrique transférée

L'énergie s'obtient de manière générale par intégration de la puissance durant un laps de temps.

$$E(d) = \int_{t=0}^d P(t)$$

Dans le cas de signaux périodiques, il est utile d'intégrer sur des multiples de la période T , en supposant que P_k est constante durant la période k .

$$k = n \cdot T, n \text{ entier}$$



Tip

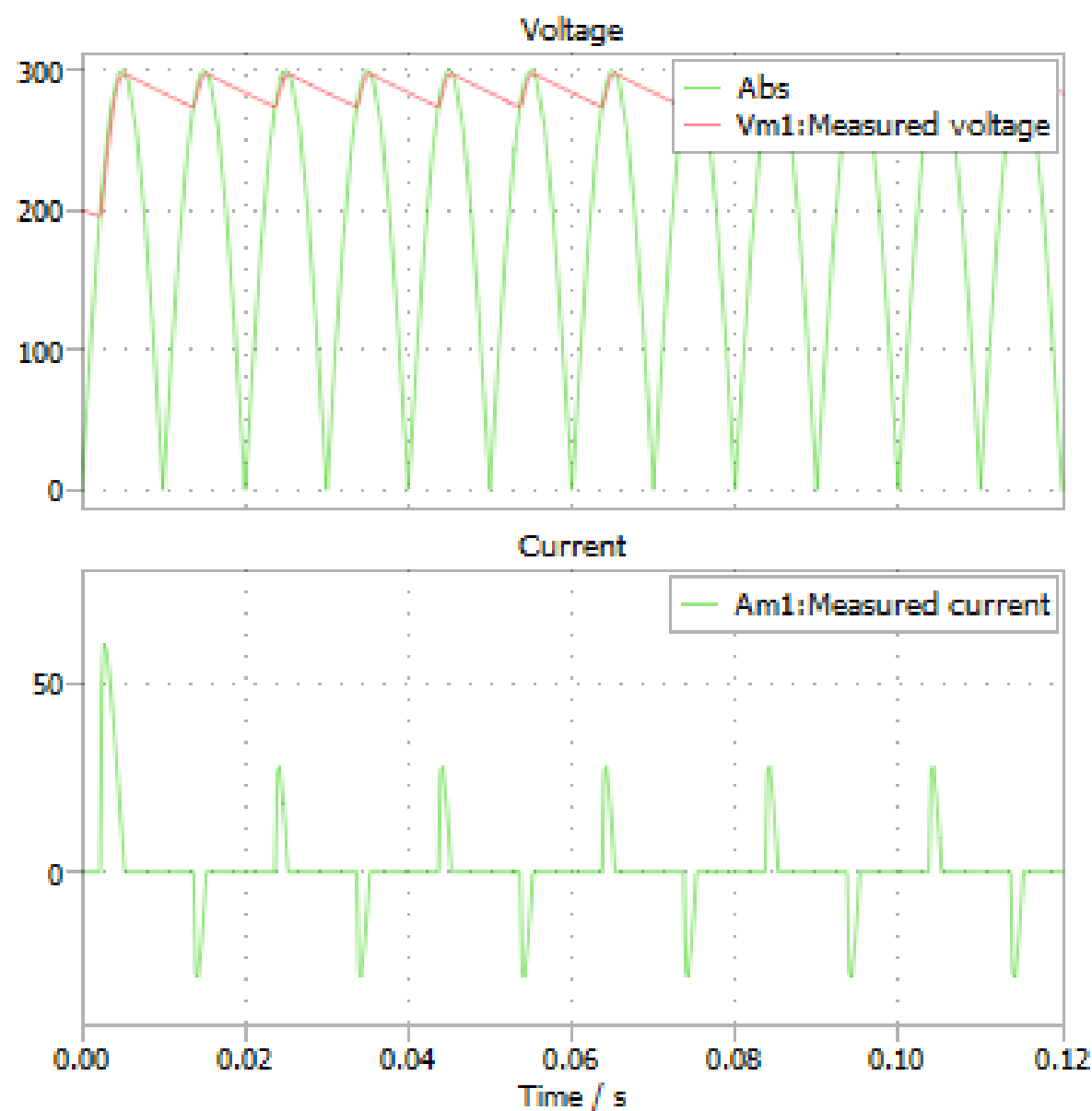
En pratique, il est acceptable d'admettre que durant une période du réseau électrique ($T = 20\text{msec}$), la puissance transférée reste constante.

- L'énergie électrique transférée est normalement mesurée en [kWh].
- A côté de l'énergie transférée (active), il existe une énergie échangée (réactive), qui se mesure en [kVArh], et une énergie apparente qui se mesure en [kVAh].

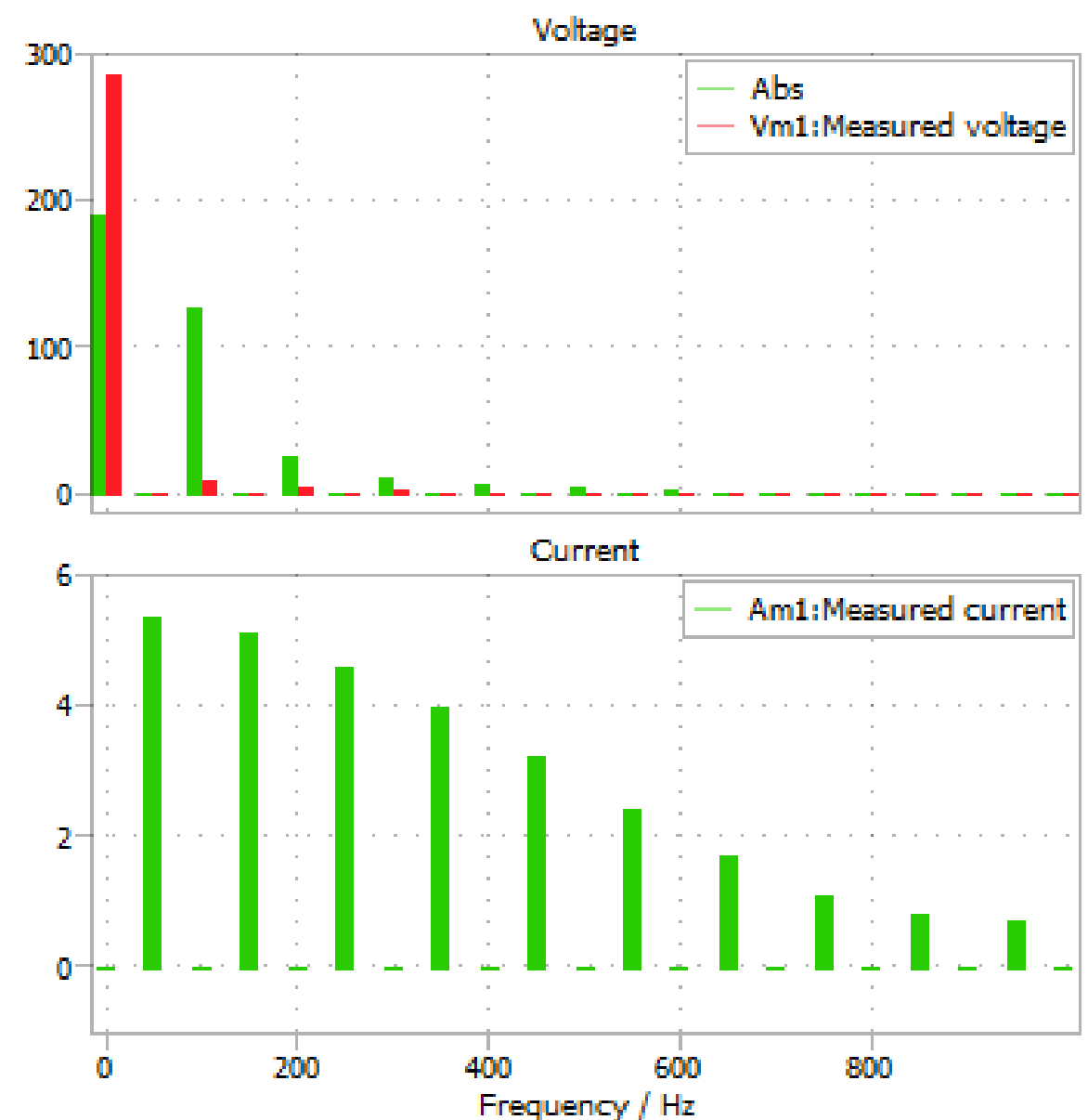
9.24 Charge non linéaire

Une charge non linéaire provoque un courant qui n'est pas proportionnel à la tension, ou qui n'est pas sinusoïdal.

Par exemple, un système électronique a besoin d'une tension continue pour fonctionner. L'utilisation d'un *redresseur à diodes* cause une forme de courant irrégulière qui cause de *harmoniques*.



Rectifier curves



Rectifier spectrum

9.25 Taux de distorsion harmonique



Tip

Une fonction quelconque peut être représentée comme une somme de fonctions sinusoidales.

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{i2\pi \frac{n}{T} x}$$

La décomposition en *série de Fourier* d'un signal périodique donne un *fondamental* et des *harmoniques*.

On a la valeur efficace du fondamental v_1 et les valeurs efficaces des harmoniques $v_i, i > 1$.

On définit le taux de distorsion harmonique (total harmonic distortion THD) comme

$$THD = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H v_h^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^H v_h^2}}$$

où v_h est la valeur efficace de l'harmonique de rang h .