



# Chapitre 9



## 9.1 Introduction

Lorsqu'on désire connaître les grandeurs électriques dans un circuit, outre la possibilité de les calculer, on peut les mesurer grâce aux instruments de mesure. Ces instruments permettent de mesurer le courant électrique, la tension, la résistance, la puissance, l'énergie, la fréquence, etc.

On peut les classer en trois catégories :

- les instruments analogiques, soit à affichage avec aiguille ;
- les instruments numériques, soit à affichage de chiffres sur un écran ;
- les oscilloscopes et les enregistreurs, soit une visualisation de la forme du signal sur un écran ou sur un papier.

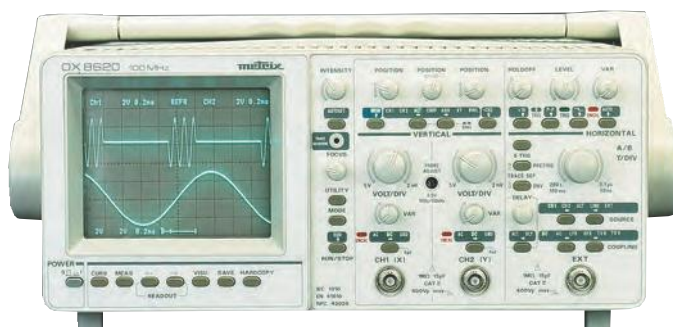
Lorsqu'un instrument permet la mesure de plusieurs grandeurs physiques, il est appelé multimètre. L'instrument de mesure ne doit pas modifier la grandeur qu'il mesure.



Instrument analogique



Instrument numérique



Oscilloscope



Enregistreur

## 9.2 Instruments analogiques

L'instrument analogique est surtout utilisé dans les multimètres et les appareils indicateurs pour tableau de contrôle. La lecture de la position d'une aiguille n'est pas toujours facile et précise. Cependant, ce type d'instrument permet d'estimer rapidement une valeur et surtout de visualiser facilement l'évolution d'un signal

Nous étudions ici la façon dont la grandeur électrique est convertie en une grandeur analogique, c'est-à-dire en un déplacement d'une aiguille devant son cadran.

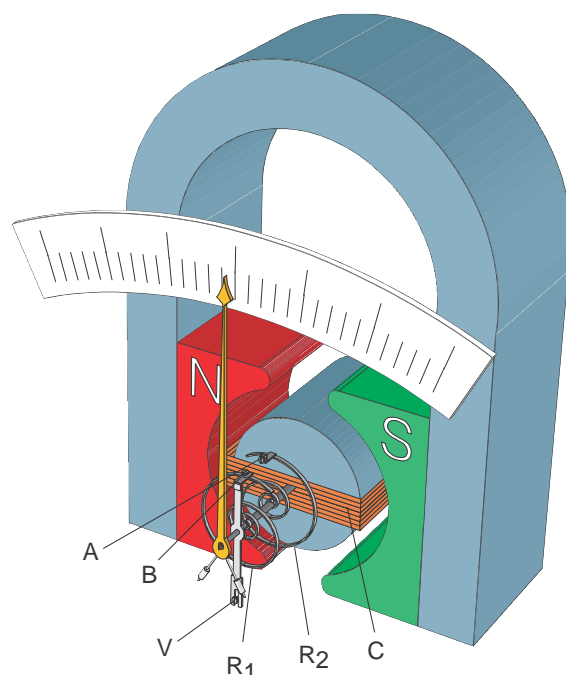
### 9.2.1 Dispositifs de mesure

#### 1) Instrument à cadre mobile

Une bobine parcourue par un courant et placée dans le champ magnétique d'un aimant permanent se met à tourner. L'angle de rotation de la bobine est proportionnel à l'intensité du courant. La graduation du cadran est linéaire. De plus, cet instrument est parmi les plus sensibles.



Symbole



- A, B : bornes d'alimentation du cadre mobile
- $R_1, R_2$  : ressorts d'amenée du courant, isolés de l'axe et servant en même temps de couple antagoniste
- C : cadre mobile
- V : vis de mise à zéro de l'aiguille



### Raccordement en courant continu

L'instrument à cadre mobile est polarisé, c'est-à-dire qu'il faut respecter le sens du courant traversant l'appareil en raccordant correctement les bornes + et – dans le circuit sinon l'aiguille dévierait contre la butée.

### Raccordement en courant alternatif

L'instrument à cadre mobile comme présenté ci-dessus ne peut pas mesurer un courant alternatif car l'équipage mobile n'est pas en mesure d'osciller au rythme rapide de la fréquence du signal.

Afin de le rendre utilisable en courant alternatif, il est complété par un redresseur à diodes montées en pont de Graetz.

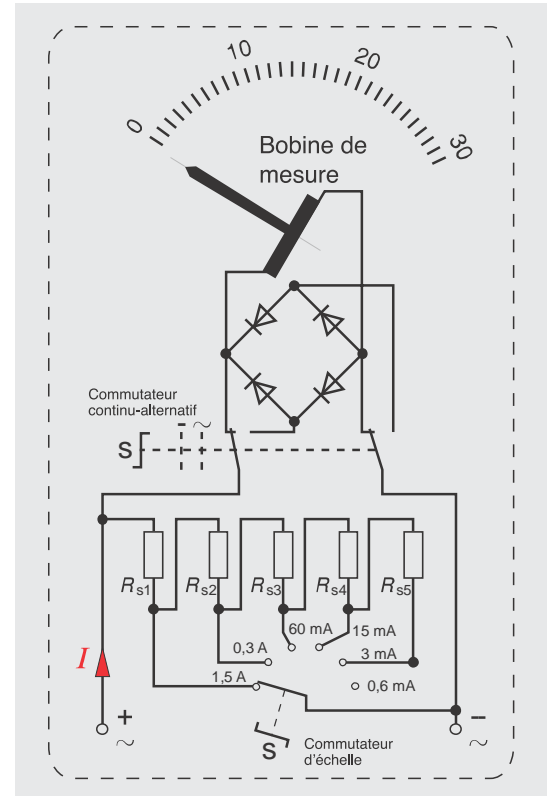
La bobine sera alors parcourue par un courant circulant toujours dans le même sens.

### Utilisation

C'est l'instrument de mesure le plus rencontré dans les appareils analogiques.

### Remarque

Cet instrument mesure la valeur moyenne du signal. En alternatif, il est gradué pour indiquer la valeur efficace. Si le signal n'est pas sinusoïdal, l'indication est faussée! Cela est particulièrement important lorsque l'on mesure des courants ou tensions délivrés par les convertisseurs pour moteurs DC ou AC triphasés, des variateurs de lumière, des onduleurs.



## 2) Instrument électrodynamique

Le courant à mesurer circule dans la bobine fixe placée en série avec la bobine tournante solidaire de l'aiguille. Les deux bobines créent chacune un champ magnétique qui provoque une rotation de la bobine tournante.

La déviation de l'aiguille est proportionnelle au carré de l'intensité du courant (valeur efficace).

La graduation du cadran n'est pas linéaire.

$B_1$  : bobine fixe en deux parties

$B_2$  : bobine tournante

A, B : bornes d'alimentation avec ressorts antagonistes

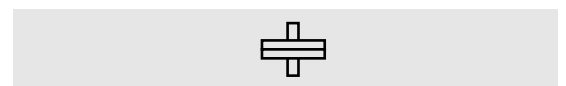
C : amortisseur à air

### Raccordement

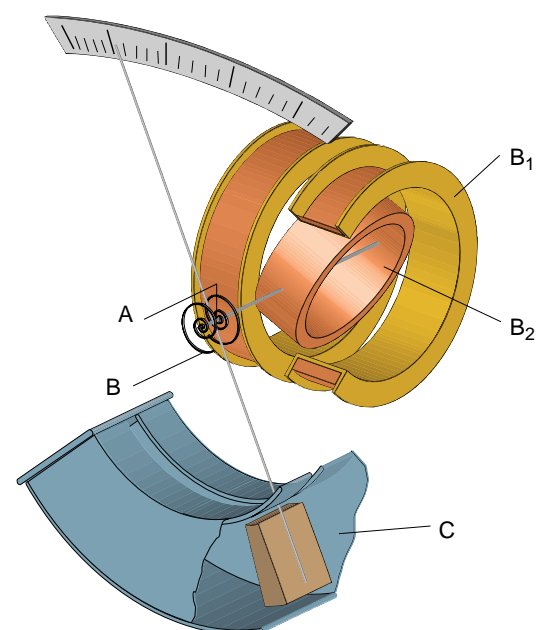
Le branchement de l'appareil est indépendant de la polarité. Il convient donc aux mesures en courant alternatif ou continu.

### Utilisation

On le rencontre généralement dans les wattmètres. La bobine fixe est parcourue par le courant, alors que le signal de tension est appliqué sur la bobine mobile. Dans ce cas, la graduation du cadran est linéaire.



Symbole



### 3) Instrument électromagnétique

Le courant à mesurer circule dans la bobine et aimante les deux plaquettes en fer doux qui se repoussent. La plaquette mobile solidaire de l'aiguille se déplace selon la force de répulsion du champ magnétique. Ce déplacement provoque la déviation de l'aiguille.

L'instrument indique la valeur efficace du signal et la graduation du cadran n'est pas linéaire. De plus, la consommation de l'instrument n'est pas toujours négligeable.

Cet appareil est aussi appelé instrument ferromagnétique.

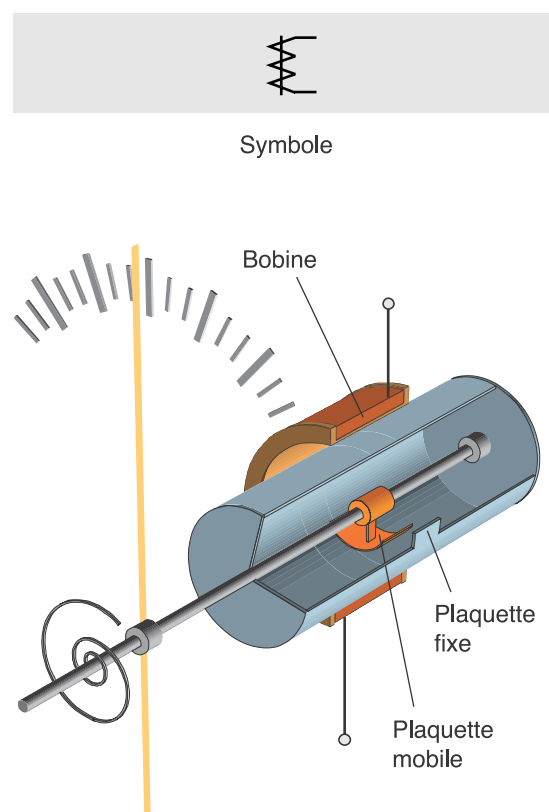
#### Raccordement

Le branchement de l'appareil est indépendant de la polarité du courant.

Il convient donc aux mesures en courant alternatif ou continu.

#### Utilisation

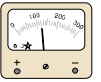
On le rencontre principalement dans les instruments de mesure placés sur les tableaux électriques.



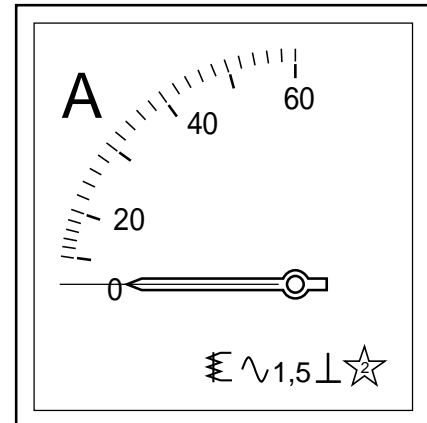
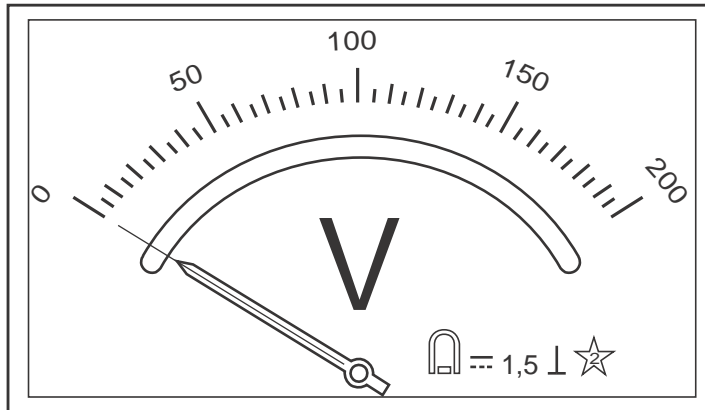
### 9.2.2 Principaux symboles pour la désignation des instruments de mesure analogiques

Il existe une liste de symboles normalisés qui renseignent sur le dispositif de mesure utilisé par l'instrument, sa classe de précision, le genre de courant qu'il mesure, etc.

	Instrument pour courant continu		Position d'emploi oblique angle d'inclinaison 60°		Instrument à cadre mobile
	Instrument pour courant alternatif		Dispositif de mise à zéro de l'aiguille		Instrument à cadre mobile équipé d'un redresseur
	Instrument pour courants continu et alternatif		Tension d'essai en kV Etoile sans chiffre, essai 0,5 kV		Instrument électromagnétique
	Instrument pour courant triphasé		Haute tension		Instrument électrodynamique
	Position d'emploi horizontale		Référence à un document extérieur		Instrument à cadres croisés
	Position d'emploi verticale		Classe de précision		



## Exemples

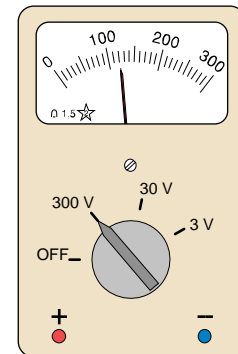


### 9.2.3 Etendue de la mesure

Les valeurs entre lesquelles une grandeur peut être lue s'appelle l'étendue de la mesure de l'instrument ou le calibre.

Pour modifier le calibre de l'appareil, il faut soit déplacer le commutateur de l'étendue de mesure, soit déplacer un des fils de raccordement de l'instrument.

Ce voltmètre a pour calibres 3, 30 et 300 V.



### 9.2.4 Classe de précision

La mesure d'une grandeur ne peut jamais donner comme résultat la valeur exacte de cette grandeur, mais seulement une valeur qui s'en rapproche plus ou moins. Cette différence provient d'une part de l'habileté de l'opérateur et du soin qu'il apporte à l'exécution des mesures et, d'autre part, de la classe de précision de l'instrument. Pour les appareils analogiques, la classe de précision est indiquée par un nombre sur le cadran de l'appareil.

On trouve les classes de précision suivantes :

0,1-0,2	soit $\pm 0,1 - 0,2 \%$	instruments de précision
0,5 - 1	soit $\pm 0,5 - 1 \%$	instruments de contrôle
1,5 - 2,5	soit $\pm 1,5 - 2,5 \%$	instruments industriels
5	soit $\pm 5 \%$	luxmètres

### 1) Erreur absolue

L'erreur absolue est l'erreur (en plus ou en moins) calculée sur la valeur maximale de l'étendue de mesure. Ainsi, pour un appareil de classe de précision  $\pm 1,5\%$  et une étendue de mesure à 150 V :

$$Er_{abs} = \pm \frac{\text{étendue de la mesure} \cdot \text{classe}}{100} = \pm \frac{150 \cdot 1,5}{100} = \pm 2,25 \text{ V}$$

Pour tous les points de mesure sur le calibre de 150 V, l'erreur possible sera toujours de  $\pm 2,25 \text{ V}$ .



## 2) Erreur relative

L'erreur relative représente le rapport de l'erreur absolue sur la valeur de la mesure.

Ainsi pour une mesure à 150 V et calibre 150 V, on trouve la classe de l'appareil :

$$Er_{rel} = \pm \frac{\text{erreur absolue} \cdot 100}{\text{mesure}} = \pm \frac{2,25 \cdot 100}{150} = \pm 1,5\%$$

Pour une mesure à 50 V avec le calibre toujours à 150 V :

$$Er_{rel} = \pm \frac{\text{erreur absolue} \cdot 100}{\text{mesure}} = \pm \frac{2,25 \cdot 100}{50} = \pm 4,5\%$$

On constate que l'erreur relative est plus importante lorsque la déviation est faible.

Il faudra, lorsque l'on désire des mesures précises, les effectuer sur le calibre qui donnera la plus grande déviation. Ainsi l'erreur relative sera la plus petite possible.

### 9.2.5 Inconvénients

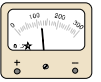
L'instrument analogique présente quelques inconvénients, parmi lesquels :

- difficulté d'interprétation lorsque l'aiguille se trouve entre deux graduations ;
- erreur possible lors du calcul de la constante d'instrument ;
- consommation parfois importante (faible résistance interne, en voltmètre) ;
- sensible aux chocs et difficile à réparer ;
- prix élevé en regard de la précision obtenue.

### 9.2.6 Avantages

- ne nécessite pas d'alimentation (sauf ohmmètre) ;
- permet de mesurer une grandeur qui oscille faiblement ;
- permet d'estimer le courant de démarrage d'un moteur ;
- donne une information sous forme «d'image» ce qui permet de déceler plus rapidement un dysfonctionnement.





## 9.3 Instruments numériques

### 9.3.1 Description

Les appareils de mesure numériques sont des instruments entièrement électroniques, munis d'un affichage numérique. Ils ne comportent plus aucune pièce mécanique en mouvement et sont de ce fait relativement robustes et simples à entretenir.

Un microprocesseur gère la mesure, le clavier, l'affichage et le dialogue éventuel avec l'extérieur.

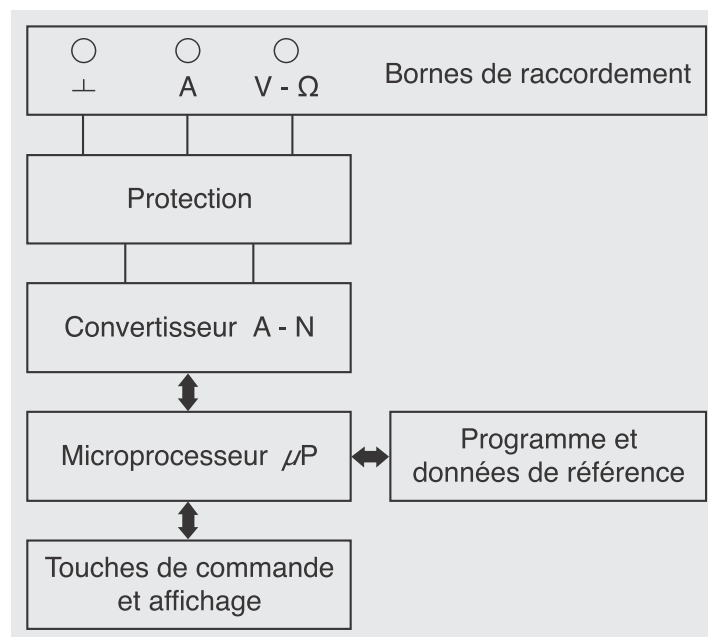
Les instruments bas de gamme sont dits «à valeur moyenne», c'est-à-dire qu'ils n'affichent la valeur efficace des signaux alternatifs que pour autant que ceux-ci soient de forme sinusoïdale.

Cependant, la plupart des appareils actuels possèdent des fonctions de calcul leur permettant de déterminer la valeur efficace de signaux non sinusoïdaux. L'appareil porte alors l'indication RMS (de l'anglais Root Mean Square) ou TRMS (T: True), signifiant qu'il calcule la vraie valeur efficace, selon la définition mathématique de celle-ci. Cette caractéristique est particulièrement importante lorsqu'il s'agit de mesurer des signaux créés à partir des systèmes de commande modernes pour machines électriques, ces signaux étant rarement sinusoïdaux (harmoniques).



Instrument numérique

### Schéma synoptique de l'instrument numérique



### 9.3.2 Affichage

L'affichage est à cristaux liquides et comporte de 3 à 6 chiffres décimaux dont la hauteur va de 5 à 17 mm. La grande surface disponible permet d'afficher de multiples indications concernant la polarité, le genre de signal, l'unité avec préfixe multiplicateur, le dépassement de gamme, l'état de la pile et des fusibles, etc.

L'utilisateur ne fait plus d'erreur de lecture ou de calcul de constante.

L'affichage est rafraîchi jusqu'à plusieurs fois par seconde. Il est parfois muni d'un système de rétro-éclairage permettant de travailler même si la lumière ambiante est faible.

De plus, l'affichage est souvent muni d'un indicateur analogique sous la forme d'un bargraphe. Remplaçant l'aiguille des appareils analogiques, ce système permet de déterminer optiquement l'évolution du signal. Afin de pouvoir capter les variations brusques, le bargraphe est rafraîchi très souvent (20 à 30 fois par seconde). Certains appareils offrent une fonction de loupe permettant de visualiser sur le bargraphe de très petites variations.

### 9.3.3 Caractéristiques

Grande impédance d'entrée (5 M $\Omega$ , 10 M $\Omega$  ou plus), constante pour toutes les gammes voltmétriques.

Changement automatique ou manuel de gamme de mesure.

Déplacement possible du point zéro (fonction de décalage). Possibilité de mesurer des résistances, des températures, des fréquences, des minima ou des maxima, des valeurs de crête, des rapports cycliques, de tester des diodes ou des transistors. Choix d'échelles de lecture en dB, pour le tracé de courbes de réponse.

Surveillance de limites fixées par l'utilisateur et avertissement sonore de dépassement.

Mémoire de stockage pour une ou plusieurs valeurs.

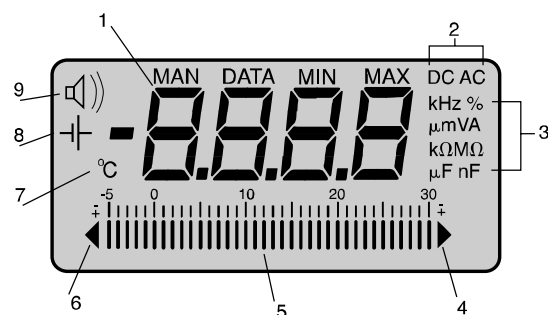
Dialogue possible avec un ordinateur, au moyen d'un bus d'interface ou d'une transmission infrarouge.

Protection par disjoncteur à réarmement automatique, par fusibles rapides (F ou FF) et par diodes de puissance, sur presque toutes les gammes.

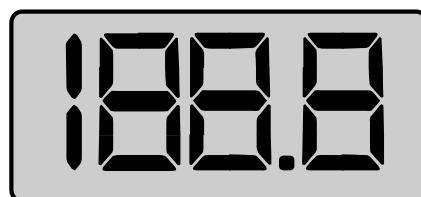
Fonction de déclenchement automatique afin de ménager la pile.

### 9.3.4 Résolution

La résolution dépend du nombre de chiffres («digits») que peut afficher l'appareil. Avec trois chiffres et demi, un appareil peut afficher au maximum 1999 valeurs. Le demi-chiffre représente soit un blanc, soit un 1. Chaque gamme de mesure est ainsi divisible en 1999 points. Sur un calibre 200 V, un tel appareil pourra encore afficher le dixième de volt. Un instrument à 4 chiffres permet lui d'afficher au maximum 9999 points.



1. Affichage numérique avec indication de virgule et de polarité
2. Affichage du genre de signal mesuré
3. Affichage de l'unité de mesure
4. Affichage de dépassement de gamme de mesure positif
5. Aiguille de l'affichage analogique
6. Affichage de dépassement de gamme de mesure négatif
7. Affichage de l'unité °C lors de la mesure de la température
8. Indication de tension insuffisante de pile
9. Indication de mise en circuit du signal acoustique



Affichage à 3<sup>1</sup>/<sub>2</sub> chiffres





### 9.3.5 Précision

La précision de l'instrument dépend du convertisseur de mesure utilisé. Elle est en général très bonne, même pour des appareils bon marché. Elle varie entre 0,01 % et 1 %. Elle est donnée en % de la valeur mesurée et non de la valeur à pleine échelle.

La classe de précision est exprimée généralement par la combinaison d'une erreur en % sur la valeur mesurée et d'une erreur d'affichage sur le dernier chiffre.

#### Exemple

Instrument avec une résolution de 4 chiffres et une précision de  $\pm (0,3\% + 2 \text{ chiffres})$

Pour une valeur affichée par l'instrument de 500 V, l'erreur absolue est de:

$$Er_{\text{abs}} = \pm \frac{0,3}{100} \cdot 500 = \pm 1,5 \text{ V}$$

Valeur réelle maximale du signal:  $500 + 1,5 = 501,5 \text{ V} + 2 \text{ chiffres} = \mathbf{501,7 \text{ V}}$

Valeur réelle minimale du signal:  $500 - 1,5 = 498,5 \text{ V} - 2 \text{ chiffres} = \mathbf{498,3 \text{ V}}$

**La valeur réelle du signal est comprise entre 498,3 V et 501,7 V.**

La précision est meilleure en continu qu'en alternatif RMS. Les appareils sont conçus pour garantir la meilleure précision lorsque la fréquence du signal mesuré est comprise entre 40 et 100 Hz. La classe de précision varie en fonction de la fréquence et certains instruments sont prévus pour des plages de fréquence plus étendues.

### 9.3.6 Inconvénients

Les derniers chiffres affichés changent souvent, ce qui rend la lecture parfois fatigante. Les variations rapides des signaux sont parfois difficiles à détecter, même au moyen du bargraphe. Lorsque plusieurs instruments numériques sont utilisés simultanément, il devient difficile d'apprécier rapidement les tendances ou le bon fonctionnement d'une installation.

Ces appareils contiennent de nombreux circuits intégrés et sont parfois sensibles aux décharges électrostatiques ainsi qu'aux perturbations haute fréquence.

Tous ces appareils utilisent une source de tension interne (pile) qu'il faut régulièrement changer.