

par **Jean-Claude FOLLIO**

*Chef du département Métrologie électrique et angulaire
du Laboratoire de Recherches Balistiques et Aérodynamiques (LRBA)*

1. Précautions à prendre	R 985 - 2
1.1 Couples thermoélectriques.....	— 2
1.2 Boucles de masse.....	— 3
1.3 Couplages magnétiques	— 3
1.4 Couplages électrostatiques.....	— 3
1.5 Bruit de la source à mesurer.....	— 3
1.6 Réjection de mode série, réjection de mode commun.....	— 3
1.7 Illusion des mesures numériques	— 4
1.8 Cas particulier des piles étalons.....	— 4
2. Tensions continues	— 4
2.1 Amplificateur de tension.....	— 4
2.1.1 Amplificateur galvanométrique.....	— 5
2.1.2 Amplificateur de tension différentiel	— 5
2.2 Détecteur de zéro. Microvoltmètre.....	— 5
2.2.1 Principe de fonctionnement.....	— 6
2.2.2 Performances. Emploi	— 6
2.3 Nanovoltmètre	— 7
2.3.1 Principe de fonctionnement.....	— 7
2.3.2 Caractéristiques essentielles. Emploi	— 7
2.4 Pont potentiométrique	— 7
2.5 Voltmètre différentiel analogique.....	— 8
2.5.1 Principe de fonctionnement.....	— 8
2.5.2 Caractéristiques essentielles. Emploi	— 8
2.6 Voltmètre numérique	— 8
3. Tensions alternatives	— 9
3.1 Amplificateur de tension.....	— 9
3.2 Amplificateur à détection synchrone	— 9
3.2.1 Principe de fonctionnement.....	— 10
3.2.2 Caractéristiques essentielles	— 10
3.3 Détecteur de zéro	— 10
3.3.1 Caractéristiques techniques.....	— 10
3.3.2 Emploi.....	— 10
3.4 Micropotentiomètre.....	— 11
3.4.1 Principe de fonctionnement. Emploi.....	— 11
3.4.2 Performances	— 11
3.5 Voltmètre analogique	— 11
3.5.1 Voltmètre sensible à la valeur efficace	— 11
3.5.2 Voltmètre analogique sensible à la valeur moyenne	— 12
4. Évolution	— 13
Pour en savoir plus	Doc. R 985

Le présent article a pour but de proposer des solutions concrètes aux manipulateurs qui, dans l'industrie ou les laboratoires d'essais, se trouvent confrontés à la mesure ou à la détection de très faibles tensions. Le domaine concerné va **de la fraction de microvolt à la centaine de microvolts**, en courant continu et en courant alternatif (de 5 Hz à 1 MHz).

Détection ou mesure ? **Détecter**, c'est déceler un signal dont l'existence était cachée. **Mesurer**, c'est déterminer, en grandeur et en signe, le signal détecté.

La détection suffit quand il s'agit de compenser ou d'annuler une tension, en agissant sur un potentiomètre par exemple. La mesure s'impose dès qu'il s'agit de recueillir une information pour l'exploiter.

Les moyens à mettre en œuvre étant pratiquement les mêmes, nous traiterons, sauf exception signalée, du **cas plus général de la mesure**.

Mesurer des tensions de l'ordre du microvolt implique, dans tous les cas, l'emploi d'un **amplificateur**. Quelquefois, cet amplificateur est utilisé comme tel, c'est-à-dire comme un instrument dont l'entrée est réunie à la tension à mesurer et la sortie à un voltmètre. Le plus souvent, la tension est directement branchée aux bornes de l'appareil de mesure ; dans ce cas, l'amplificateur est incorporé à l'appareil, entre ses bornes d'entrée et son indicateur analogique ou numérique.

L'inventaire des moyens de mesure qui est présenté va donc accorder une plus large place aux différents types d'amplificateurs commercialisés, à leurs performances et à leurs domaines d'emploi.

Le lecteur s'apercevra qu'il est relativement aisé d'obtenir, par amplification, un niveau de tension mesurable par des moyens courants.

Toutefois, la règle fondamentale applicable à toute mesure voit son importance accrue lorsqu'il s'agit de mesurer de très faibles tensions : **l'insertion d'un appareil de mesure dans un circuit perturbe toujours ce circuit** ; la grandeur mesurée est donc (indépendamment des autres sources d'erreurs) une image plus ou moins fidèle de sa vraie valeur. Il convient donc de savoir apprécier objectivement l'importance relative de la perturbation apportée ; c'est pourquoi, outre les moyens et les méthodes à employer, le lecteur trouvera des informations quant aux précautions à prendre et aux exactitudes qu'il est raisonnable d'attendre dans des conditions bien définies.

Enfin, pour des informations plus techniques concernant les différents appareils présentés, le lecteur pourra consulter les articles spécifiques de ce traité ainsi que ceux mentionnés dans la fiche documentaire [Doc. R 985].

1. Précautions à prendre

La mesure des très faibles tensions, en courant continu et en courant alternatif, impose de prendre, en plus des précautions prises habituellement pour les mesures à des niveaux classiques de tension, certaines dispositions dont l'ordre d'importance dépendra du but recherché : l'impédance du câble sera par exemple le point critique dans le cas de la mesure d'une tension alternative dont la fréquence varie alors que, dans le cas de la mesure d'une tension continue, ce sera peut-être l'influence des forces électromotrices d'origine thermique qui sera prépondérante.

Nota : pour les mesures à des niveaux classiques de tension, se reporter à l'article *Phénomènes parasites perturbant les mesures* [R 1 065] dans le présent traité.

Quelle que soit la mesure à effectuer, l'opérateur devra toujours être à même de définir les caractéristiques essentielles des éléments de sa chaîne de mesure et de leur compatibilité : niveau, impédance, fréquence, isolement, exactitude, coefficient de température, etc.

1.1 Couples thermoélectriques

Les effets thermoélectriques apparaissent dès que la nature des conducteurs est différente de celle des bornes sur lesquelles ils sont connectés et qu'un écart de température existe entre ces bornes.

Le tableau [1](#) indique, par rapport au cuivre, quelques couples thermoélectriques [\[1\]](#) [\[2\]](#).

Pour réduire l'influence des couples thermoélectriques, on prendra soin :

- d'utiliser des conducteurs de mesure de même nature que celle des bornes, qui sont le plus souvent en cuivre ou en cuivre étamé, argenté ou doré ;
- de réaliser les liaisons des conducteurs avec les cosses, fiches ou pinces de même nature soit par sertissage, soit avec de la soudure spéciale cadmium-étain à faible couple (Cu/Cd-Sn : 0,3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) ;
- d'enlever l'oxyde de cuivre des bornes, cosses, fiches, pinces ou conducteurs ;

- de protéger les bornes des variations de température en les couvrant d'un boîtier thermo-isolant ;
- d'inverser, lorsque cela est possible, le sens du courant : pour des conditions thermiques stables, l'effet perturbateur des forces électromotrices est annulé en prenant la moyenne arithmétique des mesures positives et négatives ;
- de manipuler dans une ambiance thermique stable ;
- d'attendre, lorsque cela est possible, la stabilité de la mesure, notamment après manipulation, câblage, commutations, qui sont créateurs d'échauffements ponctuels.

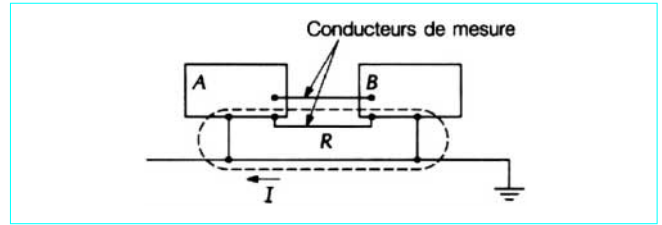


Figure 1 – Boucle de masse

Tableau 1 – Exemples de couples thermoélectriques	
Couple thermoélectrique Matériaux	Effet thermoélectrique ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)
Cuivre/cuivre	$\leq 0,2$
Cuivre/or	0,2 à 0,3
Cuivre/argent	0,3
Cuivre/cadmium-étain	0,3
Cuivre/plomb-étain	1,3
Cuivre/manganin	1,5
Cuivre/aluminium	3,4
Cuivre/carbone	4
Cuivre/laiton	4
Cuivre/fer	11
Cuivre/constantan	42
Cuivre/silicium	400
Cuivre/cobalt	500
Cuivre/oxyde de cuivre	1 000

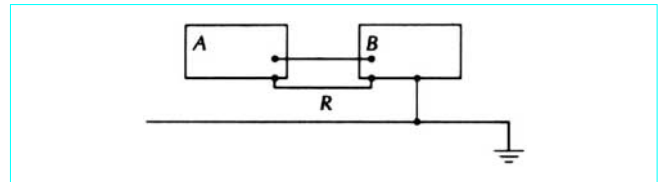


Figure 2 – Élimination de la boucle de masse

1.2 Boucles de masse

La figure 1 représente une chaîne de mesure que l'on rencontre fréquemment. Les masses des éléments A et B de la chaîne sont réunies à la terre par le conducteur de protection du cordon d'alimentation. Si les points bas de la sortie de A et de l'entrée de B sont réunis aux masses respectives de A et de B, il se forme une **boucle** dans laquelle peut circuler un courant I. La tension à l'entrée de B sera donc de $V_A + RI$ au lieu de V_A .

Prenons un **exemple** : $V_A = 1 \mu\text{V}$;
 $R = 0,1 \Omega$ (résistance de la boucle) ;
 $I = 100 \text{ nA}$.

L'erreur RI apportée par la boucle de masse sera de 10 nV, soit 1 %.

Le remède à apporter est représenté par la figure 2 : le maintien d'une seule liaison à la terre, tout en assurant la sécurité de l'opérateur, élimine la boucle de masse, donc le courant perturbateur.

1.3 Couplages magnétiques

On peut sinon s'affranchir, du moins réduire sensiblement l'effet des perturbations magnétiques en :

- supprimant les transformateurs d'alimentation (cas des appareils pouvant fonctionner sur secteur ou sur batterie) ;
- éloignant les appareils de détection des transformateurs ;
- utilisant des cordons coaxiaux ou, à défaut, torsadés ;
- réduisant la longueur des cordons ;
- évitant de déplacer les conducteurs (l'influence du champ magnétique terrestre peut provoquer des signaux parasites significatifs dans la mesure des nanovolts).

1.4 Couplages électrostatiques

On s'affranchit généralement de ces couplages (capacités parasites) en **blindant** les différents éléments de la chaîne de mesure.

1.5 Bruit de la source à mesurer

Toute source de tension émet un bruit minimal dû à l'agitation thermique et directement lié à sa résistance. Souvent négligeable, ce bruit voit son importance s'accroître dès que la tension à mesurer diminue. Il est donc important que le manipulateur connaisse la valeur de la résistance de la source qu'il veut mesurer pour apprécier le bruit propre à cette résistance, bruit qui vient s'ajouter à celui de l'appareil de mesure. La limite inférieure de ce bruit est donnée par la relation :

$$E = \sqrt{4kTR\Delta f}$$

avec E (V) valeur efficace de la tension de bruit,
 k constante de Boltzmann ($k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$),
 R (Ω) résistance,
 T (K) température,
 Δf (Hz) bande passante.

À la température ambiante, la formule s'écrit :

$$E_{20^\circ\text{C}} = 1,3 \times 10^{-10} \sqrt{R\Delta f}$$

À titre **d'exemple**, pour une résistance de source de 10 k Ω et une bande passante de 0,5 Hz, la tension efficace de bruit est au minimum de 10 nV, soit environ 50 nV crête à crête [3] (il est en effet admis que, dans 99 % des cas, le bruit crête à crête est égal à cinq fois le bruit en valeur efficace [3]).

1.6 Réjection de mode série, réjection de mode commun

Dans la mesure des très faibles tensions, l'importance des **taux de réjection** est capitale.

Exemple : soit 60 dB le taux de réjection de mode série (TRMS) d'un microvoltmètre et 10 mV la tension crête de mode série (50 Hz) : l'erreur apportée sera de 10 μV , soit 10 % pour une tension théorique de 100 μV !

1.7 Illusion des mesures numériques

Sans nier l'intérêt croissant et justifié des appareils de mesure à affichage numérique, il est important que l'opérateur ne se laisse pas abuser par les chiffres affichés au moment de définir l'incertitude de sa mesure et ne confonde pas *résolution* et *exactitude*.

Cette recommandation est bien sûr valable pour toute mesure numérique mais son importance, dans le cas qui nous concerne, est capitale comme le prouve l'exemple suivant.

Exemple : soit une lecture de 0,100 mV sur le calibre 100 mV d'un voltmètre numérique dont l'exactitude est définie comme suit :

$$\pm (3 \times 10^{-5} \text{ de la valeur lue} + 1 \times 10^{-5} \text{ du calibre})$$

L'erreur absolue est de $\pm 1 \mu\text{V}$ soit une erreur relative de $\pm 1 \%$. On voit tout de suite que les 10^{-5} qui peuvent, à première vue, séduire l'opérateur, sont trompeurs !

1.8 Cas particulier des piles étalons

La nature même des piles étalons (éléments chimiques) impose de prendre des précautions particulières pour mesurer leur force électromotrice (méthode d'opposition) en la perturbant le moins possible. Outre les précautions générales évoquées, l'opérateur doit :

– s'assurer que le courant parasite émis par son appareil de mesure est suffisamment faible pour ne pas modifier à la fois la

mesure et la force électromotrice de la pile dont la résistance interne est voisine de $1\,000 \Omega$;

- éviter de faire déborder la pile, en utilisant une méthode et un appareil bien adaptés ;
- opérer dans un environnement stable du point de vue des vibrations.

2. Tensions continues

Le tableau 2 résume les grandeurs mesurées, les exactitudes moyennes obtenues et les emplois des appareils présentés dans ce paragraphe.

2.1 Amplificateur de tension

L'amplificateur de tension continue est l'élément essentiel de toute mesure de très faible tension : il faut en effet amplifier le signal pour permettre sa mesure avec un voltmètre traditionnel.

Pour la mesure des très faibles tensions, le choix du type d'amplificateur se fera en tenant particulièrement compte :

- de l'exactitude, de la linéarité et de la stabilité du gain ;
- du bruit ;
- du courant parasite d'entrée ;
- du temps de réponse.

Tableau 2 – Appareils de mesure des tensions continues : résumé des caractéristiques

Appareil	Domaine d'emploi	Exactitude moyenne des appareils existant sur le marché (exactitude de l'appareil seul)	Observations
Amplificateur galvanométrique (associé à un galvanomètre, un voltmètre ou un enregistreur)	– À partir du nanovolt – Méthodes de zéro	suivant étalonnage	– Le moins « bruité » des amplificateurs – Plus adapté à la détection qu'à la mesure – Doit être isolé des vibrations
Amplificateur de tension différentiel (associé à un voltmètre ou un enregistreur)	– À partir du microvolt – Capteurs, jauges de contraintes, sondes	10 μV : $\pm 3 \mu\text{V}$ 100 μV : $\pm 3 \%$	– Gains étalonnés – Filtres commutables – Résistance d'entrée élevée – Entrée/sortie isolées
Détecteur de zéro Microvoltmètre	– À partir du microvolt – Méthodes de zéro – Mesures directes	1 μV : $\pm 0,5 \mu\text{V}$ 100 μV : $\pm 3 \%$	– Appareils analogiques – Calibres multiples – Résistance d'entrée élevée
Nanovoltmètre	– À partir de 10 nV – Piles étalons – Températures, faibles résistances	1 μV : $\pm 0,1 \mu\text{V}$ 100 μV : $\pm 0,1 \%$	– Analogique ou numérique – Résistance d'entrée élevée – Sortie analogique
Pont potentiométrique	– À partir de 10 nV – Laboratoire de métrologie pour les plus performants – Écoles : intérêt pédagogique	1 μV : $\pm 0,1 \mu\text{V}$ 100 μV : $\pm 0,1 \%$	– Nécessite une tension de référence (pile étalon), une alimentation (batterie) et un détecteur de zéro – Résistance d'entrée infinie à l'équilibre
Voltmètre différentiel analogique	– À partir du microvolt – Mesure directe et suivi de l'évolution d'une tension	1 μV : $\pm 2 \mu\text{V}$ 100 μV : $\pm 2 \%$	– Principe du pont potentiométrique – Constructeurs de plus en plus rares
Voltmètre numérique	– À partir du microvolt – Mesure directe – Chaîne de mesures automatiques	1 μV : $\pm 0,1 \mu\text{V}$ 100 μV : $\pm 0,1 \%$	– Nombreux modèles disponibles (évolution constante) – Possibilités de programmation – Attention à l'illusion des mesures numériques

2.1.1 Amplificateur galvanométrique

2.1.1.1 Principe de fonctionnement

La figure 3 illustre le principe de l'amplificateur Guildline 9460A. Le courant I_g provoque la rotation du miroir du galvanomètre G qui renvoie les rayons lumineux issus de la source S sur les cellules photoélectriques C1 et C2 montées en opposition parallèle. La tension résultante fournie par ces cellules alimente le détecteur (de résistance R_c) placé en sortie et le circuit de contre-réaction.

On a :

$$V_e = V_f + I_g R_g$$

avec R_g résistance interne du galvanomètre.

et $V_f = (I_0 + I_g) R_f$

soit $V_e = I_0 R_f + I_g (R_f + R_g)$

Si A , gain en boucle ouverte, est égal à $\frac{I_0}{I_g}$, on peut écrire :

$$V_e = I_0 R_f + \frac{I_0}{A} (R_f + R_g)$$

A étant grand ($\approx 1\,800$), il vient :

$$V_e \approx I_0 R_f$$

Par ailleurs :

$$V_s = I_0 R_c$$

R_f étant d'environ $2\,\Omega$, le gain en tension est :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{R_c(\Omega)}{2}$$

En réalité, la contre-réaction est variable et ajustée au moyen d'un potentiomètre, ce qui permet d'accroître le gain.

2.1.1.2 Caractéristiques. Emploi

L'amplificateur galvanométrique permet surtout de détecter (le gain est variable et un étalonnage préalable est nécessaire s'il doit être utilisé pour mesurer) des tensions à partir du nanovolt. Il se caractérise par :

- un très faible bruit : de l'ordre du nanovolt, ramené à l'entrée ;
- une faible dérive : inférieure à 10 nV/h , ramenés à l'entrée ;
- une très bonne réjection de mode série : supérieure ou égale à 120 dB à 50 Hz ;
- des bornes d'entrée isolées et symétriques par rapport à la masse, autorisant l'inversion de polarité et, par suite, l'élimination des effets thermoélectriques.

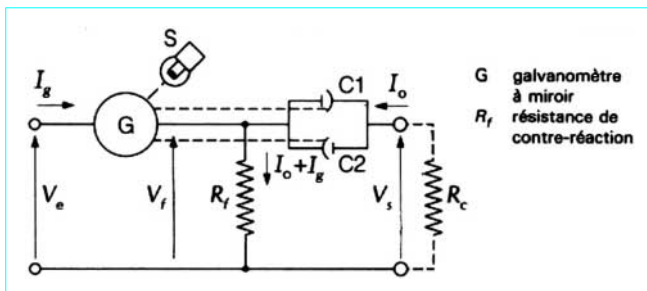


Figure 3 – Amplificateur galvanométrique : principe

Ses principaux inconvénients sont :

- une faible résistance d'entrée, dépendant du gain : de $100\,\Omega$ à quelques kilohms ;
- une sensibilité aux vibrations, conséquence du système galvanométrique ;
- des facteurs d'amplification non calibrés ;
- un temps de réponse relativement élevé, dépendant du gain : de $0,1$ à 2 s .

L'amplificateur galvanométrique est surtout utilisé en laboratoire de métrologie où, associé à un galvanomètre à spot, à un enregistreur ou à un voltmètre numérique, il permet la détection ou la mesure de très faibles tensions.

On l'emploie toutefois aussi dans l'industrie, notamment pour les mesures de déformations, contraintes, températures, etc. Il est alors le plus souvent placé devant un voltmètre ou un enregistreur dans la branche de détection d'un montage du type pont de Wheatstone, par exemple.

2.1.2 Amplificateur de tension différentiel

2.1.2.1 Principe de fonctionnement. Caractéristiques essentielles

La plupart des nombreux amplificateurs disponibles sur le marché ont en commun le principe de découpage du signal d'entrée par un commutateur électronique (*chopper*). Ce système assure une bonne stabilité du zéro ($\approx 3\,\mu\text{V}/8\text{ h}$) ainsi qu'un faible courant parasite ($\approx 100\text{ pA}$).

La figure 4 illustre le principe de l'amplificateur ANS 400.

Les entrées et sorties sont isolées entre elles et de la masse. Les filtres commutables permettent de réduire ou d'annuler l'effet des bruits superposés au signal d'entrée.

La résistance d'entrée est élevée ($\approx 100\text{ M}\Omega$) et celle de sortie faible ($\approx 0,1\,\Omega$), ce qui permet une liaison sans inconvénients majeurs à la plupart des voltmètres, détecteurs ou enregistreurs.

Les gains de ces types d'amplificateurs atteignent ou dépassent $1\,000$ et sont calibrés, d'après tous les constructeurs, à 1×10^{-4} ou 2×10^{-4} près. Cette performance peut paraître très intéressante *a priori* mais, lorsqu'il s'agit de mesurer des tensions inférieures à $100\,\mu\text{V}$, il est indispensable de tenir compte du bruit dans la configuration d'emploi (gain-filtre) et éventuellement des effets du courant d'entrée, sans pour autant négliger un étalonnage préalable du gain, opération peu aisée pour la valeur $1\,000$ puisqu'il est nécessaire d'appliquer, à l'entrée de l'amplificateur, une tension étalonnée de 10 mV à $1\,\mu\text{V}$ près.

Les temps de réponse des amplificateurs différentiels sont de l'ordre de la centaine de microsecondes.

2.1.2.2 Domaine d'emploi. Performances

L'amplificateur différentiel peut être utilisé pour mesurer des très faibles tensions en laboratoire ou en milieu perturbé. Associé à un enregistreur ou à un voltmètre, il permet le suivi de l'évolution ou la mesure des tensions à partir du microvolt. Il est très bien adapté à l'exploitation de signaux issus des couples thermoélectriques, des sondes, des jauges de contraintes, etc. Les performances qu'il autorise sont, en ce qui concerne l'exactitude :

- pour $10\,\mu\text{V}$: $\pm 3\,\mu\text{V}$, soit $\pm 30\%$;
- pour $100\,\mu\text{V}$: $\pm 3\,\mu\text{V}$, soit $\pm 3\%$.

2.2 Détecteur de zéro. Microvoltmètre

Ces deux appareils, analogiques, ont, sous des appellations différentes, les mêmes technologies et souvent les mêmes fonctions et emplois. La seule différence réside dans le fait que le détecteur de zéro est à zéro central alors que le microvoltmètre peut avoir son zéro à gauche ; comme, le plus souvent, l'opérateur peut

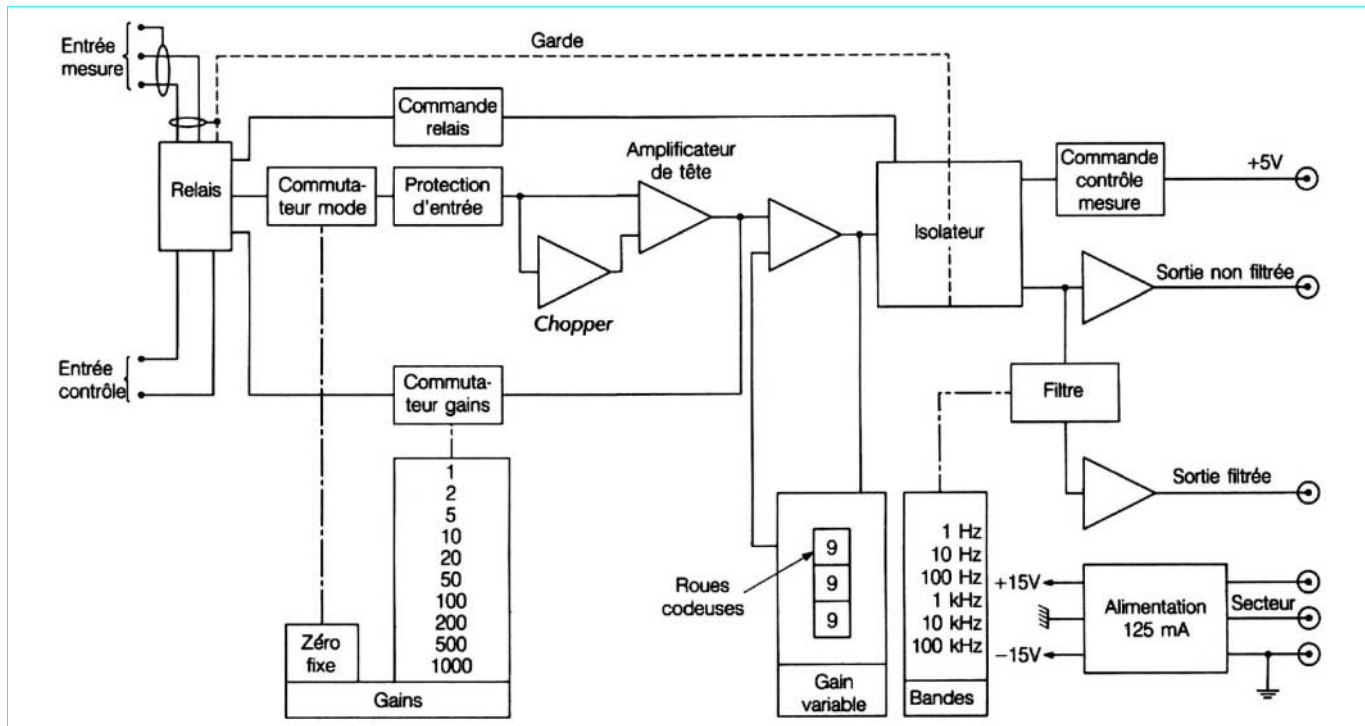


Figure 4 - Amplificateur ANS 400 : principe

décaler ce zéro et le mettre à droite ou à gauche pour le détecteur ou au centre pour le microvoltmètre, on voit que la distinction entre détecteur et microvoltmètre ne s'impose pas vraiment.

Remarque : certains constructeurs appellent microvoltmètre un voltmètre numérique ayant une résolution du microvolt. Ce cas est traité au paragraphe 2.6.

2.2.1 Principe de fonctionnement

La figure 5 illustre le principe du détecteur AOIP *Eva*.

Remarque : cet appareil assure également les fonctions nanoampèremètre et millivoltmètre qui ne sont pas représentées.

Le signal d'entrée est adressé à l'amplificateur à découpage qui assure une bonne stabilité du zéro ainsi qu'une faible dérive. Le gain de cet amplificateur est de l'ordre de 2×10^5 en boucle ouverte et ajusté par un réducteur résistif de 10^1 à 10^4 .

L'amplificateur de sortie, monté en inverseur, permet d'obtenir jusqu'à 100 mV pour une déviation étendue de mesure de l'indicateur sur le calibre 10 μV .

Le zéro peut être ramené au centre par l'injection d'un courant constant au point de sommation de cet amplificateur.

2.2.2 Performances. Emploi

L'exactitude des détecteurs et des microvoltmètres est de l'ordre de $\pm 3\%$ de l'étendue de mesure $\pm 0,2 \mu\text{V}$. Leur bruit est voisin de $0,2 \mu\text{V}$ (entrée en court-circuit). Les calibres de mesure les plus sensibles sont couramment de $10 \mu\text{V}$ mais peuvent atteindre 3, voire $1 \mu\text{V}$.

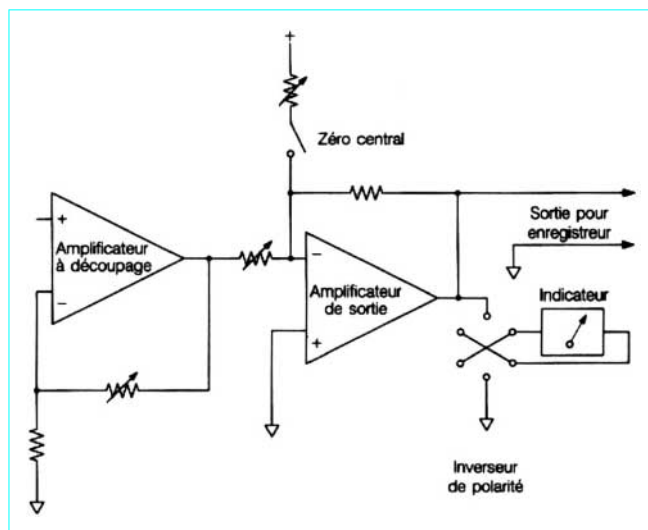


Figure 5 - Microvoltmètre AOIP *Eva* : principe (fonction tension inférieure à 100 mV seulement)

Pour des mesures de 1,10 et 100 μV sur des calibres de 10 à 100 μV par exemple, les incertitudes sont les suivantes :

- pour 1 μV : $\pm 0,5 \mu\text{V}$, soit $\pm 50\%$;
- pour 10 μV : $\pm 0,5 \mu\text{V}$, soit $\pm 5\%$;
- pour 100 μV : $\pm 3,2 \mu\text{V}$, soit $\pm 3,2\%$.

Pratiquement tous les détecteurs et les microvoltmètres ont en commun :

- une entrée très bien isolée (résistance d'isolement $\approx 10^{12} \Omega$) et à haute impédance ($> 1 \text{ M}\Omega$) ;

- des taux de réjection de mode commun et de mode série élevés : supérieurs à 100 dB en mode série, supérieurs à 160 dB en mode commun ;
- une possibilité de fonctionnement avec piles ou batteries ;
- une sortie analogique, appelée souvent sortie pour enregistreur : par exemple 1 V pour une déviation de l'aiguille d'une étendue de mesure.

L'intérêt de la sortie analogique n'est pas toujours perçu par les manipulateurs qui la réservent souvent au suivi dans le temps de la dérive d'une tension. Cette sortie peut aussi être exploitée d'autres façons :

- visualisation du temps de stabilisation sur un enregistreur après branchement du signal d'entrée (effets thermoélectriques) ;
- traitement du signal d'entrée : un voltmètre numérique programmable de 20 000 points (prix \approx 10 kF) peut être utilisé pour traiter la mesure par ordinateur ;
- asservissement d'un système : la tension de sortie est utilisée comme signal d'erreur dans la boucle d'asservissement.

Les **emplois** des détecteurs de zéro et des microvoltmètres sont essentiellement :

- la mesure directe des faibles tensions ;
- la mesure différentielle de deux tensions de valeurs très voisines (méthode d'opposition : cas des piles étalons) ;
- la détection dans les ponts de mesures.

Selon l'emploi, il conviendra d'attacher plus d'importance à l'une ou l'autre des caractéristiques, sans négliger celle qui n'est pas toujours mentionnée et qui peut avoir une influence néfaste à la fois sur la qualité de la mesure et sur la source à mesurer : le courant parasite émis par les bornes d'entrée (§ 1.8).

2.3 Nanovoltmètre

On désigne sous cette appellation un voltmètre, analogique ou numérique, capable de mesurer une tension avec une résolution de 1 ou 10 nV.

Remarque : on ne confondra pas cet appareil avec certains voltmètres numériques récents qui, grâce au microprocesseur, permettent l'affichage des nanovolts en faisant la moyenne de plusieurs mesures (§ 2.6).

2.3.1 Principe de fonctionnement

La figure 6 illustre le principe du nanovoltmètre numérique Keithley 181, le plus utilisé sans doute depuis la disparition du marché français du *TE 925* de Tekelec. Seule l'entrée mV est représentée, l'entrée V étant semblable à celle des voltmètres numériques courants et n'entrant pas dans le cadre de cet article.

Le microprocesseur calcule et affiche la tension d'entrée à partir de quatre mesures :

- amplification puis intégration du signal d'entrée (commutateurs : C1 fermé, C2 ouvert, C4 fermé) ;
- zéro de l'amplificateur (commutateurs : C1 ouvert, C2 fermé, C4 fermé) ;
- gain de conversion (commutateurs : C3 fermé, C4 ouvert, C5 ouvert) ;
- zéro du convertisseur (commutateurs : C3 ouvert, C4 ouvert, C5 fermé).

Pour éviter les perturbations de source que provoquent les amplificateurs à découpage, la commutation est réalisée par des transistors à effet de champ et contrôlée par microprocesseur. Grâce au filtrage numérique, les temps de réponses sont réduits : en un temps inférieur à 2 s, la valeur finale est affichée à quelques unités près.

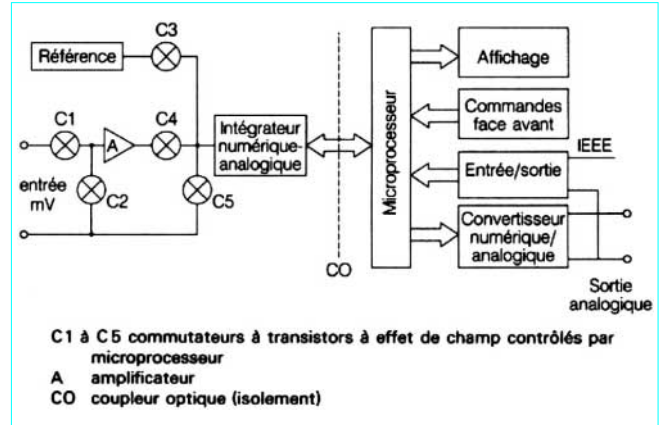


Figure 6 – Nanovoltmètre Keithley 181 : principe

L'information numérique est transférée au microprocesseur par l'intermédiaire de coupleurs optiques qui assurent l'isolement entre les points bas de l'entrée et de la sortie analogique.

2.3.2 Caractéristiques essentielles. Emploi

Le constructeur du nanovoltmètre Keithley 181 annonce l'exactitude suivante pour le plus petit calibre (2 mV) : $\pm (6 \times 10^{-5})$ de la lecture + 50 nV.

Cette spécification est donnée pour 24 heures à 23 ± 1 °C, le zéro de l'appareil étant correctement réglé et le filtre en service. Dans cette condition, deux mesures de 1 et 100 μ V seraient données avec les incertitudes suivantes :

- pour 1 μ V : ± 50 nV, soit ± 5 % ;
- pour 100 μ V : ± 60 nV, soit $\pm 0,06$ %.

Toutefois, l'opérateur ne devra pas oublier que, outre le fait que ces incertitudes supposent un appareil correctement étalonné, elles ne concernent que le nanovoltmètre. Or, comme nous l'avons vu au paragraphe 1.5, il faudra aussi tenir compte du bruit de la source et ce indépendamment des autres sources d'erreurs contre lesquelles il conviendra de se prémunir (§ 1).

Le nanovoltmètre Keithley 181 présente des caractéristiques intéressantes en ce qui concerne :

- sa résistance d'entrée : supérieure à 1 G Ω sur la calibre 2 mV ;
- son courant d'entrée : inférieur à 5 pA ; soit une erreur inférieure à 5 nV dans le cas de la mesure d'une tension ayant 1 000 Ω de résistance interne ;
- sa capacité d'entrée : 5 nF ;
- ses possibilités de programmation par le bus IEEE 488.

Par contre, l'importance relative du bruit (30 nV crête à crête) peut conduire à lui préférer les nanovoltmètres analogiques (Keithley 148 ou Tinsley 6045 par exemple), moins précis pour les tensions supérieures à 10 μ V et non programmables, mais dont le bruit crête à crête n'excède pas 1 nV.

2.4 Pont potentiométrique

Cet appareil, qui fut pendant longtemps le moyen le plus utilisé dans les laboratoires de métrologie et même dans l'industrie pour les mesures précises de tension, a aujourd'hui presque complètement disparu, pour deux raisons essentielles :

- la commercialisation des voltmètres différentiels puis des voltmètres numériques de hautes performances équipés de références de tension (diodes Zener) ;

– les contraintes de mise en œuvre et d’emploi des ponts potentiométriques : ambiances thermique et vibratoire stables, manipulateur très qualifié, étalonnage long et complexe, plage de mesure limitée, etc.

L’intérêt de citer ce type d’appareil est qu’il offre trois avantages techniques que les constructeurs d’appareils de mesure cherchent à approcher sur les voltmètres modernes ainsi qu’un intérêt pédagogique certain. Ces avantages sont :

- une résistance d’entrée quasiment infinie à l’équilibre ;
- un courant parasite émis par les bornes d’entrée nul ;
- un bruit très faible (pas d’éléments électroniques).

Remarque : en 1986 deux ponts de mesure de tension de très hautes performances subsistent sur le marché : Guildline 9930 et 9936. Leur conception et leur emploi (laboratoire de métrologie électrique de haut niveau) ne permettent pas de les classer dans la catégorie des ponts potentiométriques classiques.

2.5 Voltmètre différentiel analogique

Appelé à subir le sort du pont potentiométrique qu’il a lui-même évincé, le voltmètre différentiel analogique est tout de même encore commercialisé par quelques rares constructeurs (Fluke, EDC, etc.).

2.5.1 Principe de fonctionnement

Pour le domaine de mesure qui nous concerne, le voltmètre différentiel analogique est en fait un pont potentiométrique compact puisqu’il comprend, intégrés dans un boîtier, tous les éléments du pont :

- une référence de tension ;
- un diviseur de type Kelvin-Varley ;
- un détecteur de zéro.

La tension d’entrée est comparée, après amplification ou division, à une tension de référence (diodes Zener thermostatées ou non) par l’intermédiaire d’un détecteur de zéro.

Une sortie analogique délivre une tension proportionnelle à la déviation du détecteur de zéro et permet le suivi de l’évolution de la tension d’entrée.

2.5.2 Caractéristiques essentielles. Emploi

Les caractéristiques indiquées ci-après sont celles du voltmètre différentiel Fluke 895 A :

- calibre le plus faible : 1 V ;
- résolution : 1 μ V ;
- impédance d’entrée : infinie à l’équilibre ;
- réjection de mode commun : 140 dB en continu et à 50 Hz ;
- exactitude (à 23 ± 10 °C), pendant 90 jours : $\pm 5 \times 10^{-5}$ de la valeur lue ± 5 μ V, soit, pour deux mesures de 10 puis 100 μ V, des incertitudes de :
 - pour 10 μ V : ± 5 μ V, soit ± 50 %,
 - pour 100 μ V : ± 5 μ V, soit ± 5 %.

Ce type d’appareil peut être employé soit comme voltmètre, soit comme détecteur de zéro ou microvoltmètre.

2.6 Voltmètre numérique

L’évolution technologique des voltmètres numériques est particulièrement sensible en ce qui concerne l’exactitude, la résolution, la linéarité, la dérive et la cadence de mesure.

Sauf pour de rares applications industrielles, les voltmètres numériques ont maintenant définitivement remplacé les voltmètres analogiques et autres ponts potentiométriques. La difficulté du **choix** s’est accrue. Il est indispensable de bien définir son besoin avant de faire ce choix. Le tableau 3 donne une idée significative du marché en 1993.

Pour ce qui concerne la mesure des faibles tensions continues, le manipulateur trouvera trois types d’appareils :

- le **voltmètre** dit **20 000 points** avec un calibre de 20 mV (résolution 1 μ V), appelé parfois microvoltmètre ;
- le **voltmètre 200 000 points** avec un calibre de 200 mV (résolution 1 μ V) ;
- le **voltmètre > 1 000 000 points** avec un calibre de 1 V (résolution 1 μ V) ou même 100 mV (résolution 0,1 μ V).

Il est intéressant de noter que, pour la seule mesure des très faibles tensions qui nous concerne, les performances de ces appareils ne sont pas liées à leur prix. Ainsi, pour une mesure de 100 μ V, l’exactitude ne sera pas meilleure que 2 %, que l’on utilise un voltmètre de 20 000 points ou un voltmètre de plus d’un million de points.

Par ailleurs sur certains voltmètres, les chiffres les moins significatifs (microvolts ou moins) sont obtenus par la moyenne d’un nombre défini de mesures. Cette technique peut présenter un intérêt, mais ne doit pas être confondue avec celle qui consiste à donner un affichage par mesure.

Tableau 3 – Caractéristiques d’appareils commercialisés en 1993

Appareil numérique	Plus petit calibre (en mV) Tension continue	Résolution (en μ V)	Exactitude constructeur sur 24 h à (23 ± 1) °C	
			annoncée (avec U = tension mesurée en volts)	calculée de 1 à 100 μ V (en μ V)
AOIP MN 5150	20	0,1	$\pm (40 \cdot 10^{-6} U + 2 \mu\text{V})$	2
Datron 1281	100	0,01	$\pm (1 \cdot 10^{-6} U + 0,1 \mu\text{V})$	0,1
Fluke 8505	100	0,1	$\pm (18 \cdot 10^{-6} U + 1,5 \mu\text{V})$	1,5
Hewlett-Packard 3458A Fluke	100	0,01	$\pm (2,5 \cdot 10^{-6} U + 0,5 \mu\text{V})$	0,5

3. Tensions alternatives

Le tableau 4 résume les grandeurs mesurées (valeur efficace et fréquence), les exactitudes moyennes obtenues et les emplois des différents appareils présentés dans ce paragraphe. Il n'a qu'une valeur indicative puisqu'il suppose, sauf en ce qui concerne les mesures par détection synchrone, que les signaux sont sinusoïdaux. Rappelons brièvement l'incidence de la présence d'**harmoniques** sur la valeur efficace d'un signal :

$$U_s = U_f \sqrt{1 + k^2}$$

avec U_s valeur efficace du signal,

U_f valeur efficace du fondamental,

k facteur de distorsion harmonique $k = \sqrt{k_2^2 + k_3^2 + \dots + k_n^2}$
(k_n facteur d'harmonique de rang n).

Par **exemple**, pour un facteur de distorsion harmonique $k = 0,05$ (taux de distorsion 5 %), l'écart relatif entre U_s et U_f sera de 0,12 %.

Pour apprécier au mieux l'exactitude de sa mesure, l'opérateur devra tenir compte du type de détection du voltmètre utilisé et de la forme du signal mesuré.

Le lecteur pourra se reporter utilement à l'article *Mesures en électrotechnique. Mise en œuvre* [D 1502] dans le traité Génie électrique.

3.1 Amplificateur de tension

L'amplificateur de tension différentiel décrit au paragraphe 2.1.2 est utilisable pour la mesure des tensions alternatives jusqu'à 1 MHz pour certains appareils, mais plus couramment jusqu'à 100 kHz. Il est particulièrement bien adapté à cette mesure

lorsque seule l'amplitude du signal intéresse l'opérateur. Néanmoins, les précautions habituelles décrites au paragraphe 1 devront être respectées, surtout en ce qui concerne les liaisons de l'entrée et de la sortie de l'amplificateur avec la source à mesurer et le voltmètre : nature et longueur des câbles (type coaxial de préférence, les plus courts possibles), compatibilité des impédances (sortie de la source, câble, entrée et sortie de l'amplificateur, voltmètre) aux fréquences de mesure.

L'exactitude globale de la mesure que l'on peut raisonnablement attendre est voisine de :

$$\left. \begin{array}{l} \pm 10 \% \text{ jusqu'à } 10 \text{ kHz} \\ \pm 20 \% \text{ de } 10 \text{ à } 100 \text{ kHz} \\ \pm 30 \% \text{ de } 100 \text{ kHz à } 1 \text{ MHz} \end{array} \right\} \text{ de } 20 \text{ à } 100 \mu\text{V}$$

Cette exactitude peut être améliorée en étalonnant la chaîne de mesure (amplificateur et voltmètre) au voisinage des valeurs à mesurer (tension et fréquence) avec un micropotentiomètre (§ 3.4).

3.2 Amplificateur à détection synchrone

Dès que les niveaux des tensions à mesurer sont faibles, l'opérateur est gêné par les phénomènes de bruit qui altèrent plus ou moins l'exactitude de la mesure ou la rendent tout simplement impossible.

Pour pouvoir effectuer correctement une mesure, il faut donc réduire l'influence des signaux parasites issus de sources diverses pour ne conserver que le signal lui-même avec son bruit propre (il n'est évidemment pas question d'obtenir un rapport signal sur bruit meilleur que celui qui existe au niveau de la source). Si le signal et le bruit ont des spectres de fréquences bien séparés, un simple filtrage permet d'extraire le signal du bruit. Si ce n'est pas le cas, on a recours, pour les signaux de très faibles niveaux, à l'amplificateur ou au voltmètre à détection synchrone.

Tableau 4 – Appareils de mesure des tensions alternatives : résumé des caractéristiques

Appareil	Domaine d'emploi	Exactitude moyenne des appareils existant sur le marché	Observations
Amplificateur différentiel (associé à un voltmètre)	À partir de 20 μV de 0 à 1 MHz	De 10 à 30 % (§ 3.1)	<ul style="list-style-type: none"> – Gains étalonnés – Filtres commutables – Entrée/sortie isolées – Impédance d'entrée élevée
Amplificateur à détection synchrone	À partir de 0,1 μV de 1 Hz à 100 kHz ou plus	Dépend du signal et du temps d'intégration : 1 % au mieux	<ul style="list-style-type: none"> – Signaux noyés dans le bruit – Grande sensibilité – Programmation possible – Nécessite un signal de référence lié en phase au signal à mesurer
Détecteur de zéro	À partir de 0,1 μV de 20 Hz à 20 kHz	Suivant étalonnage et facteurs d'harmoniques du signal (§ 3.3)	<ul style="list-style-type: none"> – Grande sensibilité – Grande sélectivité – Utilisation possible en amplificateur – En voie de disparition
Micropotentiomètre	À partir de 20 μV et de 5 Hz	<ul style="list-style-type: none"> ≤ 10 kHz : 2 % ≤ 100 kHz : 5 % ≤ 1 MHz : 10 % 	<ul style="list-style-type: none"> – Générateur de tension efficace étalonnée – Référence la plus précise pour les fréquences supérieures à 10 kHz
Voltmètre analogique	Sensible à la valeur efficace : à partir de 10 μV environ, de 100 Hz à 10 kHz	De 10 à 20 % en lecture directe De 2 à 10 % après étalonnage avec micropotentiomètre (§ 3.5.1)	<ul style="list-style-type: none"> – Mesure différentielle par couples thermoélectriques – Sortie analogique proportionnelle à la déviation du détecteur
	Sensible à la valeur moyenne : à partir de 2 μV environ, de 30 Hz à 500 kHz	<ul style="list-style-type: none"> ≤ 100 kHz : 4 % ≤ 500 kHz : 10 % (§ 3.5.2)	<ul style="list-style-type: none"> – Indication en valeur efficace (influence des harmoniques)

3.2.1 Principe de fonctionnement

La figure 7 représente le principe de fonctionnement d'un amplificateur à détection synchrone. La technique de détection synchrone impose de disposer d'un signal de référence dont la phase est liée à celle du signal. Le déphasage entre la référence et le signal importe peu, car les amplificateurs à détection synchrone sont munis de déphaseurs qui permettent de le compenser, mais il doit être stable pour ne pas introduire de bruits supplémentaires.

Le signal est d'abord modulé (multiplié), ce qui a pour effet de transférer son spectre hors du spectre de bruit (figure 8) ; il est ensuite démodulé, puis filtré par un filtre passe-bas qui élimine les fréquences supérieures aux fréquences maximales du spectre du signal.

Pour que le signal de sortie soit l'image la plus fidèle possible du signal d'entrée à mesurer, l'opérateur devra faire un compromis entre dynamique (rapport signal sur bruit) et exactitude et choisir ainsi un temps d'intégration suffisamment grand pour que le rapport signal sur bruit soit élevé, mais pas trop grand pour que le signal soit transmis sans déformation.

3.2.2 Caractéristiques essentielles

Les caractéristiques suivantes sont celles de l'amplificateur à détection synchrone ATNE type ADS 1 :

- sensibilité : à partir de 0,1 μV ;
- calibre de fréquence : 0,6 Hz à 100 kHz ;
- bruit propre : 5 nV / $\sqrt{\text{Hz}}$ à 1 kHz, ramené à l'entrée ;
- constante de temps : 1 ms à 100 s ;
- impédance d'entrée : 100 M Ω – 5 pF.

L'exactitude que l'on peut attendre de cet appareil dépend du signal d'entrée (largeur du spectre, bruit) et du choix du temps d'intégration. Dans le meilleur des cas, elle sera de l'ordre de 1 %.

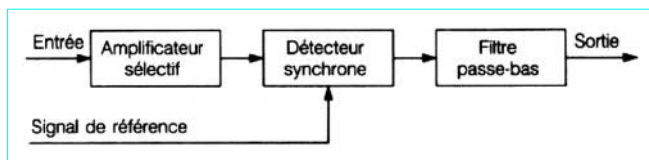


Figure 7 – Amplificateur à détection synchrone : principe

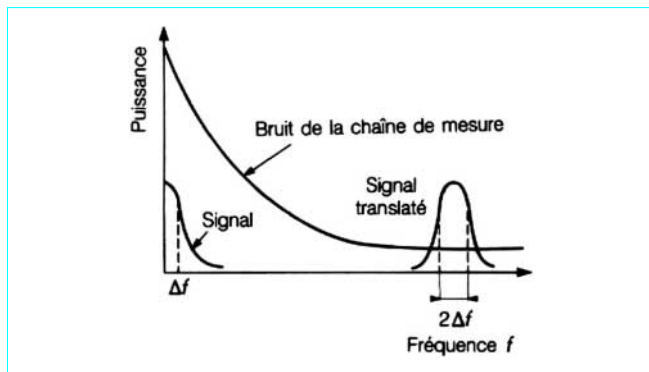


Figure 8 – Effet de la modulation

En option, l'amplificateur ADS 1 est programmable par bus IEEE.

Les caractéristiques suivantes sont celles de l'amplificateur à détection synchrone Stanford SR 850 commercialisé en 1993 :

- sensibilité : à partir de 0,01 μV ;
- fréquence : 1 mHz à 100 kHz ;
- bruit propre : 4 nV / $\sqrt{\text{Hz}}$ à 1 kHz ;
- constante de temps : 100 μs à 30 s ;
- impédance d'entrée : 100 M Ω - 25 pF.

L'exactitude optimale de cet appareil est de l'ordre de 1 %. Il est, par ailleurs, entièrement programmable.

3.3 Détecteur de zéro

Le détecteur de zéro est constitué, pour l'essentiel, d'un amplificateur sélectif à gain élevé suivi d'un pont redresseur et de l'indicateur à cadre mobile (magnétoélectrique).

Conçu pour une utilisation dans les ponts de mesure (détection), il peut toutefois servir de voltmètre sélectif pour mesurer des tensions à partir de 0,1 μV et même moins. Dans ce cas, un étalonnage préalable, à la fréquence utile, est nécessaire. Suivant la fréquence du signal, cet étalonnage peut être effectué par la méthode du micropotentiomètre (§ 3.4.1) ou par celle du diviseur inductif associé à un étalon de tension alternative (figure 9).

3.3.1 Caractéristiques techniques

Les détecteurs de zéro ont généralement en commun :

- une sensibilité élevée : inférieure à 1 μV pour une déviation étendue de mesure de l'indicateur ;
- une grande sélectivité : ≈ 40 dB pour l'harmonique 2, ≈ 5 % de largeur de bande à 3 dB de la fréquence nominale ;
- un bruit à l'entrée très faible : $\approx 0,2 \mu\text{V}$ à 1 kHz (entrée en court-circuit) ;
- une sortie amplifiée à gain élevé : ≈ 120 dB.

3.3.2 Emploi

Outre son emploi dans les ponts de mesure, le détecteur de zéro peut être utilisé comme amplificateur à faible bruit ou comme analyseur de signal. Le développement des ponts de technologie numérique a eu pour effet la disparition du marché de deux détecteurs très connus : ESI 801 et Genrad 1232 A : faute d'information concernant un éventuel autre constructeur, le tableau en documentation [Doc. R 985] ne comporte pas cette rubrique.

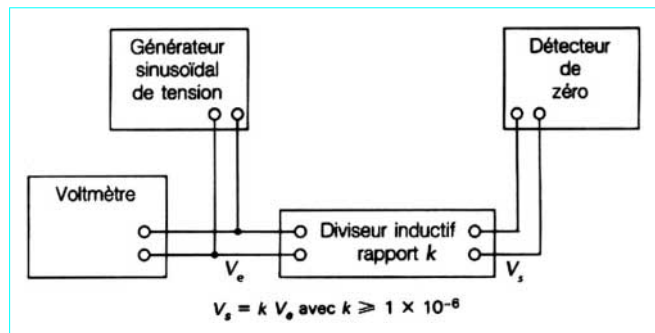


Figure 9 – Étalonnage du détecteur de zéro

3.4 Micropotentiomètre

Le micropotentiomètre ne mesure pas une tension, il la produit. Pourtant, l'intérêt qu'il présente dans la mesure des très faibles niveaux est certain. Il permet en effet d'étalonner, avec la meilleure exactitude, le gain d'un amplificateur, un voltmètre, un détecteur de zéro ou une chaîne de mesure dans toute la plage de fréquence qui nous intéresse (5 Hz à 1 MHz). C'est un avantage certain sur la méthode étalon de tension – diviseur inductif qui limite à quelques kilohertz la possibilité de génération d'une faible tension.

3.4.1 Principe de fonctionnement. Emploi

Le micropotentiomètre est composé de deux éléments essentiels : le thermoélément et la résistance radiale.

Pour les détails concernant plus particulièrement le thermoélément, le lecteur peut se rapporter à l'article *Mesures en électrotechnique. Mise en œuvre* [D 1 502].

La figure 10 représente le micropotentiomètre Ballantine 440.

Pour couvrir la plage de 20 à 100 μV , il peut être nécessaire d'utiliser soit deux thermoéléments Th (5 mA et 10 mA) avec une seule résistance radiale R de 0,01 Ω , soit un thermoélément de 5 mA avec deux résistances radiales (0,010 et 0,015 Ω). La résistance d'entrée sera voisine de 90 Ω pour le thermoélément de 5 mA et de 25 Ω pour celui de 10 mA.

La tension nominale délivrée par le couple thermoélectrique est de 7 mV en circuit ouvert. L'exactitude du millivoltmètre mesurant cette tension est secondaire. Seules sa stabilité, sa résolution et sa répétabilité sont importantes.

La tension alternative de sortie s'obtient en opérant de la manière suivante :

– choix du thermoélément et de la résistance radiale : pour délivrer 20 μV , on associe par exemple la résistance de 0,01 Ω au thermoélément de 5 mA ;

– étalonnage en tension continue : la tension V_{e1} issue du générateur G1 est ajustée jusqu'à ce que la tension V_{s1} , lue sur le microvoltmètre continu, soit de 20 μV ($I_{Th} = 2$ mA) ; la tension V_{th} mesurée au millivoltmètre est relevée (après quelques minutes nécessaires à l'obtention de l'équilibre thermique) ;

– étalonnage en tension alternative : le générateur G2 remplace G1. Réglé à la fréquence utile, sa tension V_{e2} est ajustée jusqu'à ce que V_{th} soit retrouvée (après stabilisation).

La tension étalonnée V_{s2} est alors égale à V_{s1} , soit 20 μV dans l'exemple choisi.

3.4.2 Performances

Les performances atteintes avec les micropotentiomètres seront voisines de :

- 2 % de 5 Hz à 10 kHz ;
- 5 % de 10 kHz à 100 kHz ;
- 10 % de 100 kHz à 1 MHz.

3.5 Voltmètre analogique

3.5.1 Voltmètre sensible à la valeur efficace

Lorsqu'il s'agit de mesurer la valeur efficace de tensions inférieures à 100 μV , le marché des voltmètres n'offre que peu de choix. La plupart des voltmètres ayant des calibres sensibles n'autorisent les mesures qu'à partir de quelques dizaines de microvoltmètres pour les fréquences inférieures à 1 MHz.

Le voltmètre le mieux adapté aux mesures qui nous intéressent ici est le Fluke 931 B qui, bien que non spécifié pour les tensions inférieures à 200 μV , permet d'effectuer ces mesures avec une exactitude sans doute médiocre en mesure directe, mais intéressante si l'on peut effectuer un étalonnage préalable à l'aide d'un micropotentiomètre par exemple (§ 3.4).

3.5.1.1 Principe de fonctionnement

Le voltmètre Fluke 931 B est un voltmètre à thermoéléments dont le principe est illustré par la figure 11.

La tension alternative à mesurer produit, aux bornes du thermoélément T_1 , une tension continue (l'article *Mesures en électrotechnique. Mise en œuvre* [D 1 502] traite du thermoélément). Cette tension est opposée à celle produite par le thermoélément T_2 . Ce dernier est alimenté par une tension continue de référence à travers un diviseur étaloné dont les indications, lorsque l'équilibre est atteint, donnent la valeur efficace du signal à mesurer.

Pour remédier aux défauts des thermoéléments dont la réponse évolue avec le temps et la température, un circuit de calibration permet, par simple pression sur un bouton situé sur la face avant de l'appareil, d'alimenter les deux thermoéléments avec la même tension continue de référence V_{ref} . La rotation de ce bouton dans un sens ou dans l'autre modifie le courant traversant T_2 . L'équivalence des tensions est obtenue lorsque l'indication analogique est nulle.

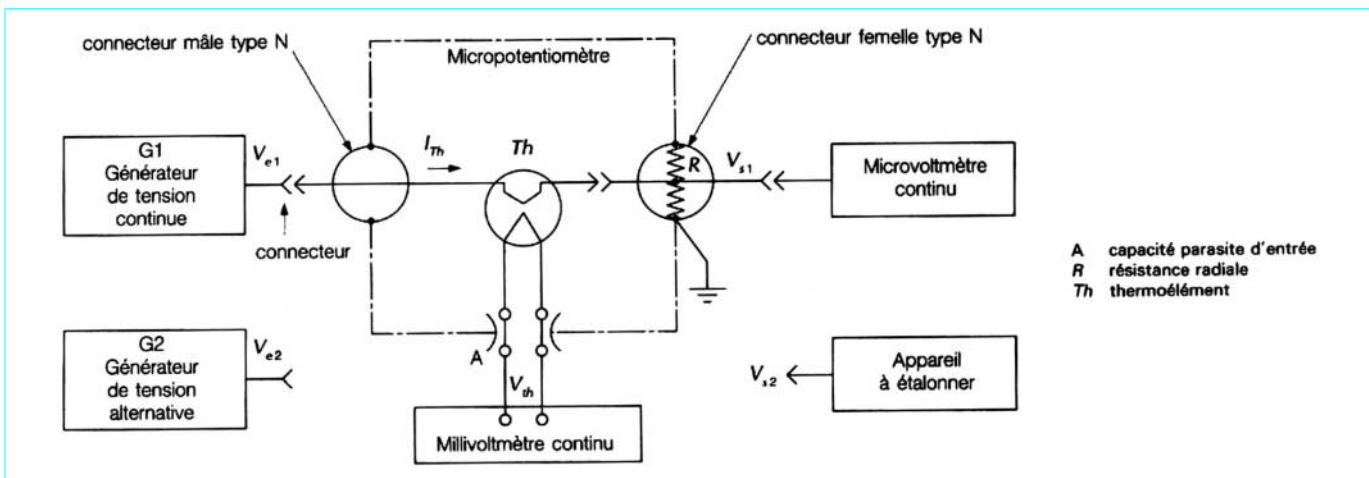


Figure 10 – Micropotentiomètre Ballantine 440

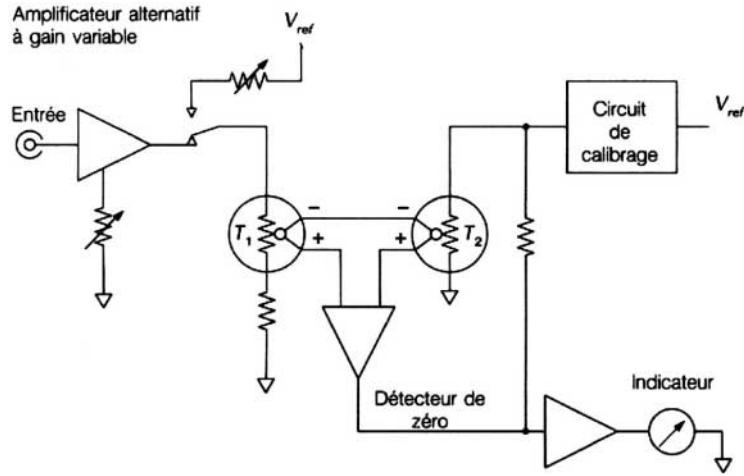


Figure 11 – Voltmètre différentiel alternatif Fluke 931 B : principe

3.5.1.2 Caractéristiques essentielles

Pour des tensions inférieures à $100\ \mu\text{V}$, le voltmètre Fluke 931 B voit sa bande passante très sensiblement réduite, tant vers les hautes que vers les basses fréquences. Il est tout de même utilisable dans la plage 100 Hz à 10 kHz.

L'exactitude en mesure directe sera de l'ordre de 20 % aux environs de $20\ \mu\text{V}$ et de 10 % à $100\ \mu\text{V}$. Si l'appareil a été préalablement étalonné avec un micropotentiomètre au voisinage des tensions et des fréquences à mesurer, l'exactitude sera améliorée d'un facteur deux au moins. Par ailleurs, le voltmètre présente les autres caractéristiques suivantes :

- un facteur de crête de 10 ;
- une impédance d'entrée de $1\ \text{M}\Omega$, en parallèle sur une capacité de $8\ \text{pF}$;
- une stabilité dans le temps de 2×10^{-4} /jour ;
- une sortie continue proportionnelle à la déviation de l'aiguille du détecteur (§ 2.2.2 pour les applications).

3.5.2 Voltmètre analogique sensible à la valeur moyenne

Le recours à ce type de voltmètre est possible quand le signal est sinusoïdal ou que l'exactitude recherchée n'est pas élevée. En effet, si la détection est sensible à la valeur moyenne du signal, l'indication est en valeur efficace et les erreurs relatives pourront être très importantes, sans que l'opérateur puisse les estimer car, dans la quasi-totalité des cas, il ignore l'amplitude, le rang et la phase des harmoniques qui altèrent le signal.

■ **Caractéristiques essentielles** : les caractéristiques suivantes sont celles du voltmètre Hewlett-Packard 400 F qui n'est plus commercialisé :

- exactitude (calibre $100\ \mu\text{V}$) :
 - meilleure que 4 % de 30 Hz à 100 kHz,
 - meilleure que 10 % de 100 à 500 kHz ;
- impédance d'entrée : $10\ \text{M}\Omega$.

4. Évolution

Entre 1986 et 1993, la technologie relative à la mesure des très faibles tensions n'a pas progressé de façon significative.

Concernant le marché de l'instrumentation analogique, on note même une érosion de l'offre puisque des instruments de mesure disparaissent des catalogues sans être remplacés, ou sont encore inscrits mais avec la mention « disponibilité limitée ».

Ce tableau résume l'évolution de la situation de 1986 à 1993.

Domaine	Technologie		Observations
	Analogique	Numérique	
Tension continue	<ul style="list-style-type: none"> – Offre un peu plus réduite – Pas d'évolution des performances 	<ul style="list-style-type: none"> – Offre plus étendue – Performances améliorées 	Voltmètres numériques plus performants en exactitude, résolution, rapidité...
Tension alternative	<ul style="list-style-type: none"> – Offre très réduite – Pas d'évolution des performances 	<ul style="list-style-type: none"> – Seule offre connue : démodulateur synchrone 	1 mV semble être la limite actuelle de mesure des voltmètres numériques

Mesure et détection des très faibles tensions

par **Jean-Claude FOLLIOT**

*Chef du département Métrologie électrique et angulaire
du Laboratoire de Recherches Balistiques et Aérodynamiques (LRBA)*

Bibliographie

- [1] *Low voltage measurements. Applications overview. Model 182 sensitive digital voltmeter.* 36 p., édition Keithley Instruments Inc (1991) (□▲).
- [2] MIQUEL (R.). – *La mesure des très faibles tensions continues.* Toute l'électronique, p. 27, juil. 1975 (▲).
- [3] *Low level measurements.* 127 p., p. 19, Keithley Instruments Inc., édition(1984) (□▲).

▲ résultats pratique.

□ descriptions d'appareillages.

Tableau A – Exemples d'appareillages courants

Nature du signal	Désignation	Constructeur. Références	Fournisseur
CONTINU	Amplificateur galvanométrique	Guildline 9460A (Guildline Instruments Ltd Canada)	MB Électronique
	Amplificateur différentiel	ANS 400	Analogique Numérique Système ANS
	Détecteur de zéro	AOIP Eva	AOIP
	Nanovoltmètre	Keithley 181 ou 182	Keithley Instruments
	Pont potentiométrique	Leeds et Northrup 8693	Leeds et Northrup
	Voltmètre différentiel analogique	Fluke 895A (disponibilité limitée)	Philips/Fluke
	Voltmètre numérique	AOIP MN 5150	AOIP
ALTERNATIF	Amplificateur différentiel	ANS 400	Analogique Numérique Système (ANS)
	Amplificateur à détection synchrone	Stanford SR 850	Optilas
	Micropotentiomètre	Ballantine 440 (Ballantine Laboratories Inc. États-Unis)	Ballantine Laboratories Inc. (États-Unis)
	Voltmètre analogique sensible à la valeur efficace	Fluke 931B (disponibilité limitée)	Philips/Fluke