

Commission Protection Cathodique et Revêtements Associés

Recommandations pour la définition des appareils de mesures utilisés en protection cathodique

AVERTISSEMENT : La présente recommandation a été établie par consensus par les membres de la commission Protection Cathodique et Revêtements Associés du CEFRACOR. Elle représente l'avis général de la profession et peut donc être à ce titre utilisée comme une base reflétant au mieux l'état de l'art au moment de sa publication. Elle ne saurait néanmoins engager de quelque façon que ce soit le CEFRACOR et les membres de la Commission d'étude qui l'ont établie.

1) OBJECTIF

L'objectif de cette recommandation est de définir les principales caractéristiques des appareils de mesures utilisés en protection cathodique.

Il n'est pas dans l'objectif de ce document de lister toutes les spécifications techniques de ces appareils. Seuls les points techniques qui ont un impact significatif sur les mesures de protection cathodiques sont abordés.

Il s'agit d'un guide à destination des sociétés de services et des maîtres d'ouvrages permettant de choisir au mieux le matériel à utiliser.

Les électrodes de référence sont exclues de cette recommandation ainsi que les indicateurs intégrés aux équipements de protection cathodique (soutirage, drainage...).

2) RÉFÉRENCES NORMATIVES

Standard NACE TM0101: *Measurement techniques related to criteria for cathodic protection on underground or submerged metallic tank systems*

NF EN ISO 10012:2003 ; *Exigences pour les processus et les équipements de mesure*

NF EN 13509 ; *Techniques de mesure en protection cathodique*

NF X07-001 : 1994 ; *Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie*

3) DEFINITIONS

3.1) Mesure

Les définitions des principaux termes utiles pour la lecture de cette recommandation sont issues de la norme NF X07-001.

Répétabilité – Reproductibilité – Fidélité

Termes proches signifiant l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesures successives.

Incertitude de mesure

Paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande.

Erreur (de mesure)

Résultat d'un mesurage moins une valeur vraie du mesurande.

3.2) Instrument de mesure

Échelle (d'un appareil de mesure)

Ensemble ordonné de **repères** avec toute chiffraison associée, formant partie d'un dispositif indicateur d'un appareil de mesure.

Calibrage (d'un instrument de mesure)

Positionnement matériel de chaque repère (éventuellement de certains repères principaux seulement) d'un instrument de mesure en fonction de la valeur correspondante du mesurande.

3.3) Caractéristiques des instruments de mesure

Calibre

Étendue d'échelle que l'on obtient pour une position donnée des commandes d'un instrument de mesure.

Intervalle de mesure

Module de la différence entre les deux limites d'une étendue.

Exemple : pour un calibre de -10 V à +10 V, l'intervalle de mesure est 20 V.

Sensibilité

Quotient de l'accroissement de la réponse d'un instrument de mesure par l'accroissement correspondant du signal d'entrée.

Résolution (d'un dispositif afficheur)

La plus petite différence d'indication d'un dispositif afficheur qui peut être perçue de manière significative.

Exactitude d'un instrument de mesure

Aptitude d'un instrument de mesure à donner des réponses proches d'une valeur vraie.

Classe d'exactitude

Classe d'instruments de mesure qui satisfont à certaines exigences métrologiques destinées à conserver les erreurs dans des limites spécifiées.

Erreur (d'indication) d'un instrument de mesure

Indication d'un instrument de mesure moins une valeur vraie de la grandeur d'entrée correspondante.

Fidélité (d'un instrument de mesure)

Aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications très voisines lors de l'application répétée du même mesurande dans les mêmes conditions de mesure.

4) TYPES D'APPAREILS

Le tableau suivant présente les principaux appareils de mesure utilisés dans le domaine de la protection cathodique.

Type d'appareil	Commentaires généraux
Multimètre (par multimètre on entend des appareils qui peuvent mesurer des tensions, des courants et des résistances)	Classique : Les points importants sont : la précision, la résolution, le calibre, une impédance d'entrée élevée (voltmètre), une résistance très faible (ampèremètre), et une filtration des courants alternatifs. Peut idéalement garder en mémoire le Min, Max et la Moyenne.
	Informatisé : Des multimètres permettent d'enregistrer des valeurs (éventuellement à partir d'un ou plusieurs seuils), d'ajouter éventuellement des commentaires, et / ou de faire des enregistrements programmables. La capacité d'enregistrement n'est pas le critère principal.

Enregistreurs (enregistrement de différence de potentiel uniquement)	<p><u>Mesureur de points</u>: des petits enregistreurs sont utilisés pour surveiller une différence de potentiel. Ils n'ont pas d'écran et sont généralement limités à deux voies d'enregistrement.</p> <p>Parfois ils peuvent enregistrer en plus de la tension continue une tension alternative.</p> <p><u>Enregistreurs de données</u> : ces appareils sont destinés à des mesures approfondies (AC et DC). Ils ont des caractéristiques proches des mesureurs de points mais sont plus performants dans les domaines suivants : précision, capacité mémoire, fréquence d'échantillonnage, nombre de voies et qualité de la filtration. Ils ont parfois un écran intégré.</p>
Ordinateur avec système d'acquisition de mesure	Des cartes d'acquisition peuvent être intégrées à des ordinateurs transportables pour effectuer des mesures (intensité, tension), visualiser un signal, enregistrer ces mesures ou réaliser des mesures plus complexes (courbes de polarisation etc.).
Oscilloscope	<p>Ces appareils sont destinés à l'expertise. Ils ont une capacité d'échantillonnage plus élevé que les enregistreurs. Ils permettent de visualiser un signal alternatif.</p> <p>Couplés à un ordinateur, leurs performances sont accrues et l'analyse du signal observé plus aisée. Ils présentent en option la capacité d'enregistrer. Ils peuvent être utilisés pour observer des phénomènes électriques non visibles avec les enregistreurs.</p>
Interrupteur cyclique de courant	Il faut pouvoir régler les temps ON & OFF, s'assurer de la qualité de la coupure, de la capacité de la coupure (A), et prendre en compte les caractéristiques de synchronisation éventuelles (unité « maître », radio, GPS etc...). L'interruption se fait soit mécaniquement (type relais) soit électroniquement (semi-conducteur). La capacité de l'appareil doit être adapté à l'intensité à couper (le couple intensité/tension est à prendre en compte et ne pas se fier aux indications données en général pour de l'alternatif).
Analyseur On/Off	<p>Certains appareils paramétrables (temps de la lecture après la coupure, durée de la lecture elle-même servant à la moyenne, rejet de valeurs extrêmes, etc...) permettent d'analyser la coupure On/Off.</p> <p>Ces modules peuvent être intégrés à l'interrupteur. Ils délivrent dans ce cas une grandeur telle que tension ou intensité qu'il faut lire via un multimètre. Ils peuvent également être intégrés au voltmètre informatisé. La coupure peut dans ce cas nécessiter un interrupteur annexe.</p> <p>Ces appareils peuvent être uniquement adaptés à des mesures locales sur coupes ou peuvent être utilisables sur toute une conduite (méthode CIPS).</p>
Pince ampèremétrique	Seules les pinces à effet Hall permettent la mesure du courant continu. Les pinces ampèremétriques n'ont pas une grande latitude en terme de calibre: il faut adapter le choix au type de courant lus (de quelques mA jusqu'à plusieurs dizaine d'ampères). Des pinces existent pour mesurer le courant sur des pipelines (colliers jusqu'à 60" !). La valeur mesurée peut être faussée par la multiplicité des signaux superposés (continus et/ou alternatifs). En protection cathodique, une pince ampèremétrique doit plus être considérée comme un appareil de contrôle qu'un appareil de mesure précis.

Mesureur de terre	En protection cathodique, la méthode de Wenner avec les quatre piquets est la plus usuelle. Mais pour obtenir une mesure précise dans certaines conditions particulières (profondeur « importante », résistivité de sol très importante,...), on utilisera avantageusement des techniques plus complexes (méthode dite de Schlumberger, méthode par induction électromagnétique) couplés à une analyse informatique (tomographie).
Détecteur de défaut d'isolation (sur équipement)	Ces appareils peuvent détecter les courts-circuits sur des joints mais aussi sur la boulonnerie. Ils utilisent un signal par fréquence radio (effet de peau) qui est efficace sur une courte distance, ce qui permet d'effectuer les essais même lorsque plusieurs isolations sont proches.
Détecteur de défauts (revêtement)	<p>Ces appareils utilisent trois méthodes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les gradients de potentiels continus - Les gradients de potentiels alternatifs. - L'atténuation électromagnétique due à un signal alternatif. <p>Parfois, un émetteur du signal à détecter est à synchroniser avec son récepteur.</p> <p>Le choix de l'appareil se fait en fonction du type d'ouvrage considéré, dans son environnement extérieur.</p> <p>Les grandeurs indiquées par les appareils basés sur la méthode des gradients de potentiels (entre deux électrodes) sont influencées par les caractéristiques internes du détecteur (impédance d'entrée, sensibilité, précision...).</p>
Convertisseur AC/DC	Interface électronique permettant d'enregistrer des tensions alternatives sur des enregistreurs dépourvus d'entrées prévues à cet effet.
Sonde à résistance	Ces sondes mesurent la résistance électrique d'une pièce métallique calibrée (section, épaisseur, longueur). La corrosion éventuelle de la pièce entraîne une augmentation de la résistance. La variation de cette résistance est convertie en vitesse de corrosion instantanée. Cette sonde peut être mise sous protection cathodique afin de vérifier l'efficacité de la protection. Ces sondes peuvent enregistrer la vitesse de corrosion avec une cadence adaptée aux conditions de terrain (par exemple 1 mesure par heure).

5) DESCRIPTIF DES CARACTERISTIQUES IMPORTANTES

Les termes suivi d'une * renvoient aux définitions simplifiée données en 2.

N°	Caractéristiques	Descriptif de son importance	Valeurs typiques
1	Calibre*	Doit correspondre au mieux à la valeur mesurée, en tenant compte du signal total (alternatif et continu). Attention à la prise en compte des calibres pour mesures sur shunt ou sur pince ampèremétrique (voir Shunt). Dans le cadre où le calibre n'est pas adapté, la valeur lue sera imprécise ou hors calibre (l'appareil pouvant être détérioré).	De quelques dizaines de mV à quelques dizaines de volts pour les tensions. De quelques microampères (pour mesures sur coupons) à plus de cent ampères (drainage SNCF).
2	Echelle*	Doit être adaptée au calibre des mesures à effectuer et faciliter la lecture des mesures.	

3	Précision* (en numérique)	Dépend de l'électronique de l'appareil. Elle est exprimée en % du calibre et en fonction de la résolution.	0,1% à 5% du calibre (+ le nombre de digit dû à la résolution).
4	Classe (en analogique)	Coefficient permettant de calculer l'erreur de mesure en fonction du calibre de l'appareil. Erreur = Calibre x Classe /100.	Classe 1,5 maximum recommandé.
5	Résolution*	Doit être cohérente avec la précision recherchée. Important aussi notamment pour les lectures sur shunt (voir Shunt).	Exemple : pour un calibre de 1 V, résolution de 0,1 mV. Pour un calibre de 500 mA, résolution de 0,1 mA.
6	Rafraichissement (multimètre)	Doit être suffisamment lent pour permettre de lire la valeur affichée sur les appareils numériques.	Deux valeurs par seconde en numérique.
7	Fréquence d'échantillonnage (enregistreur numérique)	La fréquence d'échantillonnage paramétrée dépend de la dynamique du signal, du type d'information à acquérir, des signaux perturbateurs éventuellement présents, et des contraintes liées à l'appareil (mémoire, autonomie...) Difficile d'aller au delà de 50 mesures par seconde si rejet AC par filtrage sans traitement du signal spécifique par filtre réjecteur..	1 mesure / s à 1 mesure par jour avec un <u>mesureur de point</u> (enregistrement sur canalisation par exemple) ; jusqu'à 100 mesures / s avec un <u>enregistreur de données</u> (sur coupon, en présence de courants vagabonds...) La fréquence peut dépasser 500 mesures / s avec un <u>oscilloscope</u> pour des mesures spécifiques.
8	Capacité mémoire	Conditionne l'autonomie de l'appareil en terme d'enregistrement. Le choix se fait en fonction du type d'enregistrement à faire. Certains appareils ont des outils de gestion de la mémoire (optimisation, compression...)	20000 à 60000 mesures pour <u>mesureur de point</u> , 200000 mesures à 1000000 pour <u>enregistreur de données</u> . Les appareils hauts de gammes possèdent en plus des mémoires externes.
9	Impédance d'entrée de voltmètre	Doit être élevée pour que le courant dérivé qui transite à travers le voltmètre n'altère pas la mesure. Il faut que les résistances mises en jeu dans le circuit de mesure (structure, électrode, électrolyte, câbles et connexions) soient négligeables par rapport à l'impédance d'entrée du voltmètre. Exemples : Pour une tension mesurée typique de 1 V, avec un voltmètre de 10 Mohm d'impédance d'entrée, une résistance de contact de l'électrode de 10 kohms, le courant circulant dans le circuit sera d'environ 0,1 micro ampère, et l'erreur de lecture due à	10 Mohm typique pour les numériques

		<p>l'électrode sera de 1 mV.</p> <p>Pour une tension mesurée typique de 1 V, avec un voltmètre de 100 kohm d'impédance d'entrée, une résistance de contact de l'électrode de 10 kohms, le courant circulant dans le circuit sera d'environ 9 micro ampère, et l'erreur de lecture due à l'électrode sera de 90 mV.</p> <p>Dans ces exemples les autres résistances de circuit sont considérées comme négligeables.</p> <p>Par contre, des appareils avec une impédance d'entrée trop élevée peuvent générer des erreurs de lecture, notamment dans le cas d'un défaut sur le circuit de mesure (coupure du câble, mauvais contact...). En effet ces appareils n'ont besoin que d'un courant de mesure très faible pour indiquer une valeur.</p> <p>Par ailleurs, dans un système de régulation, l'impédance d'entrée du voltmètre doit être élevée également pour éviter qu'un courant trop important ne circule dans une électrode de référence (en cas de mesure continue) et ne conduise à la dérive de son potentiel.</p>	
10	Rejet AC	<p>L'appareil de mesure doit être équipé d'un filtre de rejet AC lors de mesure en DC.</p> <p>Un filtre passif RC est généralement installé pour pouvoir effectuer les mesures en courant continu (sans perturbation liée à l'alternatif). Ce filtre a une influence sur la cadence d'enregistrement: il ne sera pas possible d'enregistrer un signal à une fréquence supérieure aux caractéristiques du filtre (typiquement 50 Hz).</p> <p>Des filtres réjecteur AC par traitement numérique permettent de concilier un rejet AC à une fréquence donnée et un enregistrement à une fréquence supérieure (le rejet se faisant a posteriori par traitement informatique du signal).</p> <p>Pour des mesures d'expertise, il peut être intéressant que l'efficacité du filtre AC soit paramétrable.</p>	
11	Interrupteur cyclique (dit « topeur »)	<p>L'interruption peut se faire par relais (contact sec) ou semi-conducteur.</p> <p>Le relais est la technique qui permet d'obtenir la meilleure coupure. Elle sera privilégiée pour les mesures de potentiels à courant coupé. Les autres techniques peuvent être employées pour les mesures du type DCVG.</p> <p>Définit par des temps de coupure paramétrables, et dont le rapport des temps (ouvert/fermé) doivent correspondre à un objectif bien précis :</p>	

		<ul style="list-style-type: none"> - ne pas avoir de dépolarisation de la structure en cas de mesures intensives (le temps d'ouverture doit être faible par rapport au temps de fermeture) - ne pas avoir de polarisation de la structure en cas de mesures de valeur d'isolement d'une canalisation (le temps de fermeture doit être faible par rapport au temps d'ouverture) <p>L'interrupteur doit être installé dans le circuit de protection cathodique de telle manière à assurer la fiabilité de la mesure.</p>	
12	Synchronisation sur interrupteur cyclique	La radio-synchronisation se fait par ondes longues (HBG, DCF ou France Inter, ou horloge de Frankfort) ou par GPS, ou par base de temps (quartz de précision) utilisant le principe maître esclave (dérive plus importante).	<p>Pour le GPS : dérive négligeable avec une erreur de quelques ms.</p> <p>Pour la radio, dérive de quelques dizaines de ms</p> <p>Pour appareil fonctionnant à quartz, dérive typique de 1 s/j.</p>
13	Résistance interne de l'ampèremètre (multimètre)	<p>La résistance interne de l'ampèremètre crée une chute de tension, l'intensité lue sera donc inférieure à la réalité. En générant cette chute de tension, la résistance interne peut également influencer sur les mesures de potentiels effectuées par ailleurs dans le système de protection cathodique.</p> <p>La résistance interne de l'ampèremètre doit être négligeable par rapport à la résistance du circuit de mesure. En laboratoire on peut utiliser également des appareils électroniques dits « à résistance nulle » ou ZRA (par compensation de courant).</p> <p>Les ampèremètres classiques créent une chute de tension de 100 mV ou plus (700 mV, voire 1,5 V). Pour des cas particuliers, il est préférable d'utiliser des shunts (voir item 19)</p>	
14	Protection (IP)	<p>Pour les multimètres, la protection recommandée est l'IP67.</p> <p>Pour les autres appareils portables dédiés à la protection cathodique, une protection IP67 (intégrée ou via un boîtier additionnel) sera préférentiellement recherchée.</p>	
15	ATEX	Peu de matériel existe avec une certification ATEX. Dans la pratique, les mesures sont effectuées avec des appareils communs, avec la plupart du temps un permis feu et un détecteur de gaz.	
16	Suivi métrologique	Sans cahier des charges spécifique, on partira sur une vérification annuelle pour les appareils utilisés couramment, et sur 2 à 3 ans pour les	

		autres types d'appareils (voir aussi la documentation des fabricants). Pour les électrodes de référence on se référera à la recommandation PCRA 005.	
17	Séparation	<p>Les appareils de mesures ou interfaces ont des entrées ou sorties soit totalement séparées (mode différentiel), soit avec une masse commune (mode commun).</p> <p>Le mode différentiel permet de réaliser des mesures sur des structures électriquement indépendantes.</p>	
18	Incertitude sur les mesures	<p>L'incertitude globale sur la mesure est la somme des incertitudes dans la chaîne de mesure. Elle doit être prise en compte dans l'analyse des résultats finaux.</p>	<p>Typiquement incertitude globale de 10 à 50 mV sur la mesure de potentiel.</p>
19	Shunt de mesure	<p>On choisira les shunts pour avoir des chutes de tension inférieures à 10 mV, en particulier pour les mesures sur témoin, et que l'on associera avec des voltmètres très sensibles pour que la mesure soit fiable (centième de millivolt).</p> <p>Le shunt devra comporter quatre bornes (deux pour la puissance, deux pour la mesure) sauf pour les très faibles courants (inférieur à 100 mA).</p> <p>Voir aussi point n°13.</p>	