

MESURES RADIOMÉTRIQUES

Précision, répétabilité et
erreurs



 **BERTHOLD**

Introduction

Les process industriels exploitent les mesures radiométriques depuis plusieurs années. Celles-ci jouent un rôle décisif dans les applications critiques de niveau, de densité et de débit. Les jauges utilisant des radionucléides sont parfois la seule solution de mesure. Elles offrent de remarquables résultats en environnements hostiles et ne souffrent pas des températures élevées, pressions et autres conditions ambiantes et de process difficiles. La plupart du temps, il s'agit de mesures de densité et de niveau sans contact dans diverses cuves, trémies ou tuyauteries, de mesures d'interface dans des séparateurs ou de teneur en humidité. Elles peuvent également être utilisées comme alarme de niveau sans contact.

Qu'est-ce qu'une mesure radiométrique ?

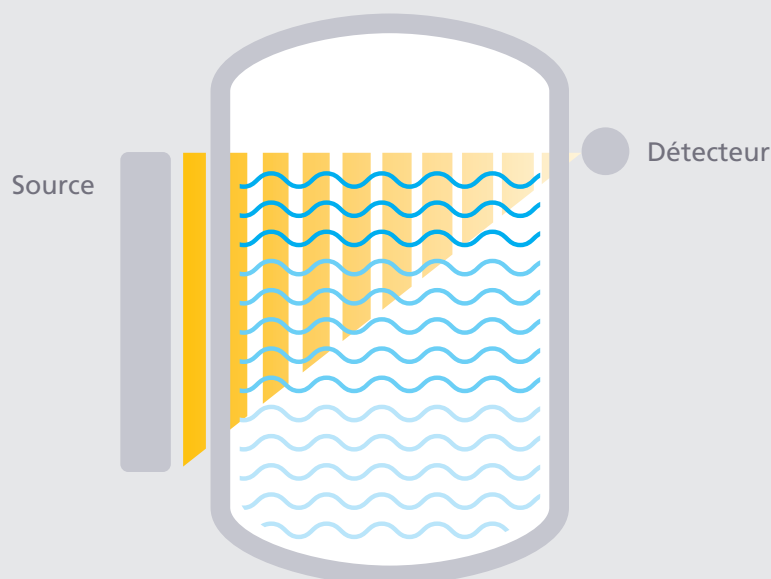
Le fonctionnement d'une telle mesure s'appuie sur un concept simple : le principe de l'atténuation de son rayonnement par la matière. Une mesure radiométrique fait intervenir :

- une source qui émet un rayonnement γ , produit à partir d'un radionucléide,
- une cuve ou un réservoir contenant le produit à mesurer,
- un détecteur de rayonnement γ .

Si rien ou presque ne se trouve sur le trajet du faisceau de rayons, l'intensité du rayonnement restera forte. En présence de produit dans le faisceau, l'intensité du rayonnement sera atténuée. L'irradiation décelée par le détecteur peut permettre alors de calculer la valeur du paramètre process recherché. Ce principe s'applique à la quasi-totalité des mesures radiométriques. La technologie de mesure radiométrique est très reproductible. Grâce aux principes physiques, aux calculs statistiques et à des logiciels perfectionnés, ces mesures sont extrêmement fiables. Il convient toutefois de disposer d'informations exactes sur l'application pour que ces mesures soient précises et reproductibles. Technologie totalement sans contact et non intrusive, la mesure radiométrique est la méthode appropriée aux applications les plus complexes et les plus exigeantes.

Toutes les mesures, y compris radiométriques, impliquent et comportent des erreurs. Nous nous pencherons ici sur leur nature et leurs causes, ainsi que sur leur élimination par l'adoption de meilleures pratiques et une construction efficace.

Fig. 1 Schéma d'une mesure radiométrique



Radioéléments

Les mesures radiométriques n'exploitent pas tous les isotopes radioactifs naturels et artificiels connus. En applications industrielles, seuls quelques nucléides sont utilisés pour les mesures. L'isotope radioactif est généralement placé dans un blindage solide constitué de plomb et d'une enveloppe en acier, pour une sécurité maximale. Le blindage fait écran au rayonnement émis par l'isotope radioactif, sauf sur la trajectoire qu'il doit suivre. Une petite ouverture dans le blindage appelée canal d'irradiation permet de projeter le faisceau à différents angles sur la tuyauterie ou la cuve, limitant ainsi l'irradiation du personnel dans l'environnement direct, le principe ALARA (As Low As Reasonably Achievable, aussi faible que raisonnablement possible) s'applique en toutes circonstances, pour une sécurité maximale sur le lieu de travail.

Radioactivité

Les isotopes les plus couramment utilisés sont le césium 137 et le cobalt 60. L'américium 241 est parfois employé dans certaines applications. Ces isotopes se distinguent par leur demi-vie et l'énergie gamma qu'ils émettent. L'"activité" et l'"énergie" du rayonnement émis par une source sont des notions faciles à confondre.

- L'activité décrit le nombre moyen de décroissances nucléaires de l'isotope qui se traduisent par l'émission d'un quantum gamma, en d'autres termes : la quantité de matière radioactive.
- Chaque quantum gamma présente une énergie spécifique. La répartition de l'énergie des photons gamma émis est caractéristique de chaque isotope. L'énergie gamma est directement liée à la capacité du rayonnement à traverser les matériaux (produit, cuve, etc.).

Il est important de comprendre que le nombre de quanta gamma émis, c'est-à-dire l'activité, ne dépend pas de leur énergie. De même que la couleur de la lumière n'est pas liée à son intensité. La demi-vie d'une source ne doit pas non plus être confondue avec sa durée de vie ! Propriété physique immuable d'un isotope, sa demi-vie renvoie à la durée nécessaire à la réduction de moitié de l'activité d'un matériau. Les sources radiométriques sont généralement conçues pour offrir une durée de vie de 10 à 15 ans, quel que soit l'isotope utilisé. Le choix de la mesure à réaliser dépend du produit à mesurer, de la configuration (c.-à-d. source ponctuelle ou allongée) et des conditions de construction sur place. La décroissance d'un isotope répond à la théorie stochastique et peut donc être analysée à l'aide de méthodes statistiques.

Fig. 2 Capsule de la source



Sources ponctuelles

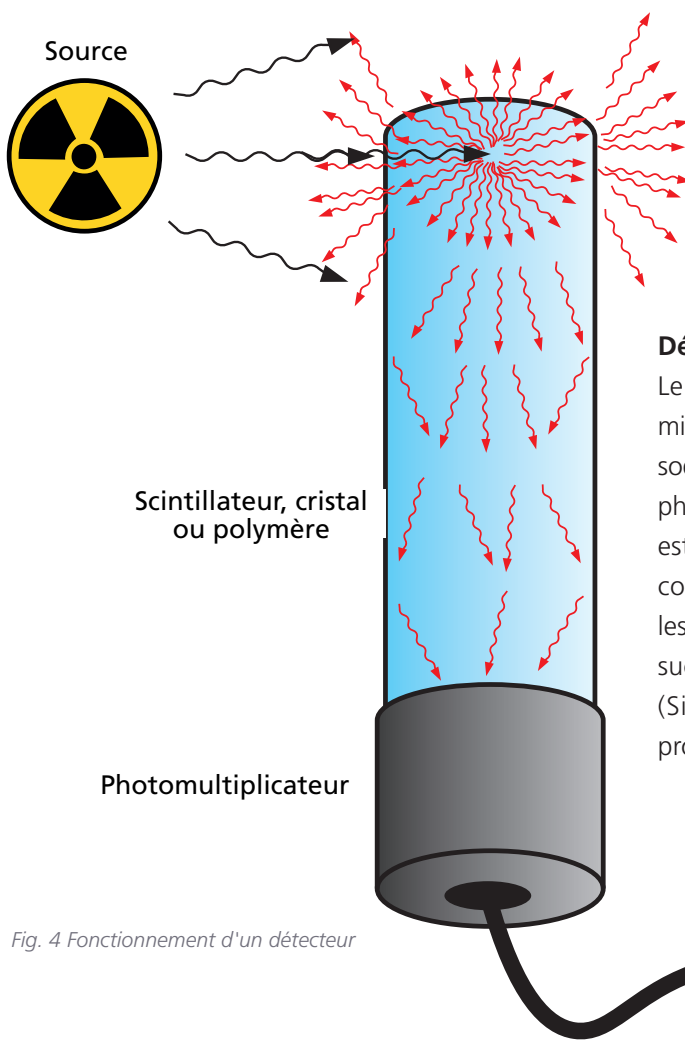
Les sources ponctuelles sont largement utilisées dans tout type de mesure – densité, niveau... – ou comme alarme de niveau. Elles se composent généralement d'une capsule interne, qui encapsule solidement la matière radioactive, et d'un blindage à obturateur pour contrôler le faisceau de rayonnement.

Sources allongées

Avec les sources allongées, la zone active est répartie sur toute la plage de mesure grâce, par exemple, à un fil de cobalt (Co-60) activé enroulé autour d'une tige. Les sources allongées offrent un étalonnage "parfaitement" linéaire du signal détecté (taux de comptage / niveau en %), ce qui signifie que le pourcentage de variation du taux de comptage est directement lié à celui du paramètre process.



Fig. 3 Blindage de source ponctuelle



Détecteurs

Le détecteur de rayonnement contient soit un cristal minéral, soit un polymère spécial (tel que de l'iodure de sodium) appelé scintillateur. Le scintillateur convertit les photons gamma entrants en éclairs lumineux. Le cristal est couplé optiquement à un photomultiplicateur qui convertit la lumière en signaux électriques. Bien que les photomultiplicateurs classiques soient utilisés avec succès depuis des décennies, des versions en silicium (SiPM) sont également disponibles et s'imposent progressivement dans les détecteurs industriels.

Fig. 4 Fonctionnement d'un détecteur

La Fig. 4 schématise le fonctionnement d'un détecteur. Lorsque les photons gamma émis frappent le cristal après avoir traversé les parois de la cuve, la tuyauterie et le produit à mesurer, chacun peut générer un éclair lumineux et les scintillations sont enregistrées par le tube photomultiplicateur. Chaque scintillation est convertie en signal électrique par le photomultiplicateur. Après numérisation, ces signaux sont comptés pour établir le "taux d'impulsions", généralement exprimé en nombre de coups par seconde (cps) ou en fréquence (Hz). Le capteur ou l'unité de traitement intègre les algorithmes permettant de distinguer les différents types de mesure (c.-à-d. niveau ou densité). Le taux d'impulsions, signal lié au process, est utilisé pour l'affichage de la sortie courant analogique ou de la connexion à un DCS ou à un autre automate programmable.

Le détecteur mesure tout rayonnement γ parvenant au scintillateur, qu'il s'agisse d'un "taux d'impulsions utile" issu de la source ou du rayonnement naturel du bruit de fond de l'environnement. Le traitement du rayonnement parasite occasionné lors de radiographies de soudures et la gestion des variations du rayonnement naturel du bruit de fond sont abordés plus loin.

Détecteurs ponctuels

Les détecteurs équipés d'un petit scintillateur sont dits ponctuels. Ils exploitent souvent un scintillateur cylindrique de taille réduite (50 mm de diamètre sur 50 mm de hauteur, par exemple). Ils sont généralement utilisés en applications de densité, mais servent également d'alarmes de niveau ou aux mesures de niveau en continu. La taille du scintillateur dépend du type de mesure. Le faible volume utile des détecteurs ponctuels limite l'influence des fluctuations de bruit de fond. Ces détecteurs peuvent être facilement dotés d'un collimateur en plomb qui réduit encore la sensibilité au rayonnement du bruit de fond.

Détecteurs allongés

L'utilisation d'un détecteur allongé peut être recommandée pour couvrir une plage de mesure plus vaste. En application de mesure de niveau, la source ou le détecteur couvre généralement toute la plage de mesure, qui peut atteindre 8 m pour un détecteur.

Le détecteur allongé a pour principal avantage d'être moins coûteux qu'une source allongée, mais cette dernière est technologiquement plus adaptée. Le rayonnement gamma mesuré par un détecteur allongé subit l'influence de la géométrie de son emplacement. Cependant, ce type de détecteur est nettement plus impacté par son volume, l'absence de collimateur, ce qui le rend plus sensible aux variations du rayonnement naturel du bruit de fond, sachant que, suite à des périodes de pluies par exemple, ces fluctuations peuvent être de $\pm 15\%$ par la présence du radon 222 et de ses produits de décroissance, comme nous le verrons plus loin.

Fig. 5 Détecteur ponctuel / détecteur allongé



Types d'erreurs

Nous allons, ici, clarifier les différents types d'erreurs survenant lors d'une mesure radiométrique. L'erreur statistique est le premier auquel l'on pense, mais nous verrons que d'autres facteurs d'influence sont aussi à l'origine d'erreurs. Les erreurs de mesure peuvent être systématiques ou statistiques (aléatoires). Une configuration de mesure adaptée offre un résultat satisfaisant, d'une précision et d'une reproductibilité appropriées, ce qui prévaut souvent sur la précision absolue de la valeur, pourvu que les tolérances admissibles soient respectées.

Lorsque vous regardez la télévision, il vous est égal de connaître le niveau exact d'atténuation du signal jusqu'à votre téléviseur, l'important étant que la retransmission soit toujours fiable et qu'elle ne soit pas parasitée par le bruit électrique d'une usine voisine. Tenant compte de cette relation de précision et de répétabilité, nous aborderons ici le champ spécifique de la mesure radiométrique et décrirons brièvement :

- Différents types d'erreurs, les erreurs statistiques dues à la nature de la décroissance du radionucléide étant les plus connues.
- Différents types de jauges de mesure.
- Les types d'erreurs les plus courants par application.

- La relation entre la sensibilité du système et le rapport signal/bruit.
- L'importance du choix de la source de rayonnement.

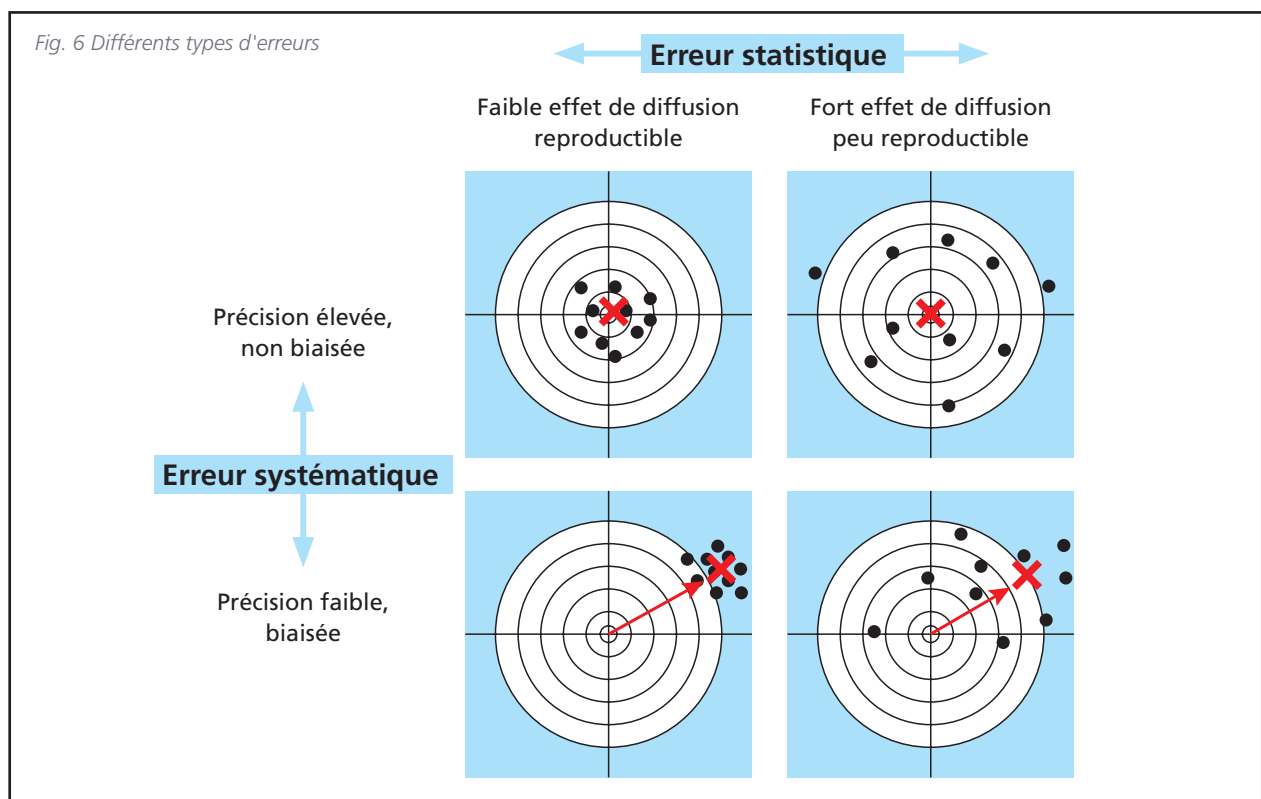
Pour plus de clarté, nous exposerons quelques définitions et termes statistiques. Nous nous représenterons une cible, dont le centre est la valeur correcte, et chaque "tir", un résultat de mesure.

Erreurs statistiques

Les erreurs aléatoires sont inhérentes à chaque mesure et provoquées par des fluctuations intrinsèquement imprévisibles dans les lectures d'un appareil de mesure ou dans l'interprétation des résultats par le technicien. Elles se traduisent par des résultats différents pour une même mesure répétée. Appelées erreurs statistiques, elles suivent généralement la loi normale et peuvent donc être traitées à l'aide de méthodologies statistiques.

Erreurs systématiques

Non aléatoires, les erreurs systématiques suivent, à paramètres identiques, un schéma reproductible. Dans une configuration appropriée, elles sont prévisibles et généralement constantes ou proportionnelles à la valeur réelle.



Exemples d'erreurs systématiques à prendre en compte dans les mesures radiométriques :

- Fluctuations de la sensibilité dues à des variations de température ou des composants du détecteur.
- Fluctuations du taux de comptage dues à des variations d'intensité du rayonnement naturel du bruit de fond (radon...).
- Bruit imprévisible dû à l'inspection de soudures ou à d'autres interférences.
- Étalonnage incorrect.

Effets de la température et du vieillissement

Il est possible de limiter au moins les deux premières erreurs systématiques listées ci-avant grâce à des méthodes de compensation, avec des algorithmes sophistiqués et des mesures indépendantes de la sensibilité d'un détecteur, par comparaison du signal avec une référence connue. Le système de mesure doit prévoir un contrôle automatique du gain ou une régulation de la haute tension. Les algorithmes utilisés par Berthold reposent sur une analyse spectrale du rayonnement émanant soit du radionucléide primaire utilisé, soit du rayonnement cosmique, pour que ces erreurs ne dépassent pas 0,1 % du taux de comptage détecté dans une plage de température allant de -60 à +70 °C et sur une période de plus de 10 ans.

Rayonnement naturel du bruit de fond

Nous sommes continuellement exposés à un rayonnement d'origine naturelle, résultant principalement du rayonnement cosmique ou terrestre : le rayonnement naturel du bruit de fond. Les variations de ce dernier sont plus difficiles à compenser. Le rayonnement du bruit de fond résulte principalement du rayonnement cosmique ou terrestre. Contrairement au rayonnement cosmique, très constant, le rayonnement du bruit de fond terrestre peut considérablement varier selon la localisation. Les formations rocheuses géologiques intégrant des quantités différentes de radionucléides naturels, le rayonnement du bruit de fond terrestre varie. Par exemple, le gaz de type radon 222 (Rn-222) et ses produits de décroissance influent sensiblement sur l'intensité du bruit de fond. Émanant de formations rocheuses, le Rn-222 se répand dans l'atmosphère et dégage une quantité mesurable de radioactivité dans l'air, juste au-dessus du sol. La pluie peut également

augmenter provisoirement la concentration en radon et ses produits de décroissance au sol, ce qui impacte le bruit de fond.

Ces fluctuations du rayonnement du bruit de fond affectent davantage les détecteurs allongés que les détecteurs ponctuels, car ces derniers sont souvent dotés d'un collimateur qui élimine ce rayonnement, alors que les détecteurs allongés sont généralement non blindés et présentent un volume de scintillateur supérieur. Le rapport signal/bruit est donc plus élevé pour les détecteurs ponctuels que pour les détecteurs allongés.

Rayonnement parasite

L'inspection des soudures d'un site industriel ou de son infrastructure peut être à l'origine d'interférences imprévisibles. Les sources gamma (par ex., iridium 192) utilisées peuvent provoquer une hausse du rayonnement, qui entraîne une modification rapide du signal mesuré, ce qui produit des erreurs sur la lecture des paramètres de process. La conception du détecteur de rayonnement doit tenir compte de ce cas de rayonnement parasite. La perte du signal est susceptible d'être bien plus longue que la perturbation elle-même (saturation). Un tel rayonnement peut endommager le détecteur de manière irrémédiable. Les appareils équipés de la fonction XIP de Berthold détectent le rayonnement parasite et gèlent le signal de mesure pendant la perturbation. La fonction RID, quant à elle, repose sur un algorithme qui permet de séparer l'interférence du taux de comptage réel de la mesure émis par une source de cobalt 60.



Fig. 7 Fluctuation du rayonnement du bruit de fond (mesuré à Bad Wildbad, en Allemagne) due à la pluie

Étalonnage

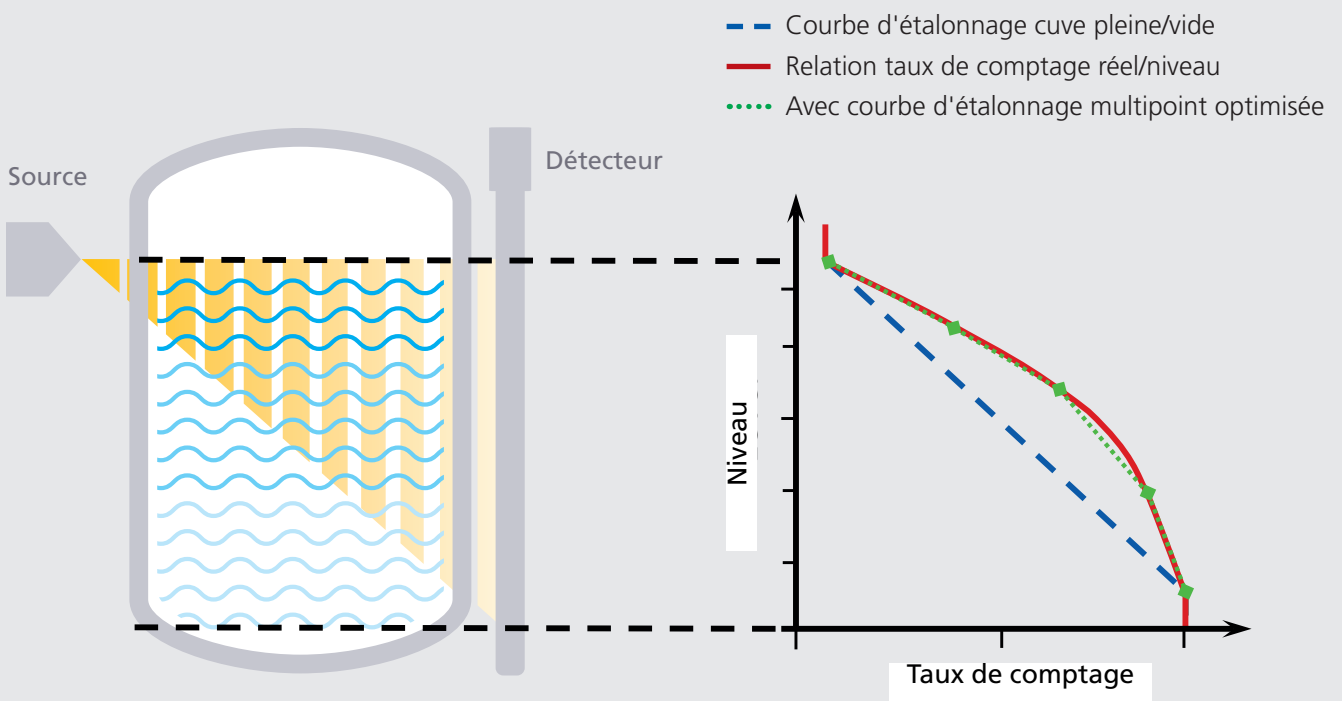
Les mesures radiométriques fonctionnent selon le principe de l'atténuation. De manière générale, toute matière interagit avec le rayonnement γ et présente un effet d'atténuation. Dans le contexte du Process Control, cet effet résulte non seulement du produit à mesurer, mais également des parois en acier voire de sa construction interne, de l'isolation, de la structure, etc. Prenons une unité de cokéfaction différée type d'une raffinerie, avec ses parois d'acier isolées de 20 à 50 mm d'épaisseur et de 5 à 9 m de diamètre. Il est évident que, pour refléter l'atténuation non liée au process, le système de mesure de niveau doit être calibré sur place, et non à l'usine. Il en va de même pour les mesures de densité, avec au moins un point de référence de densité connue.

En général, l'appareil est étalonné dans des conditions de process connues, par ex. cuve pleine et vide pour une mesure de niveau en continu ou avec au moins une densité établie de liquide dans la tuyauterie pour une mesure de densité. L'étalonnage doit être adapté, mais également correct.

Sources d'erreurs types :

- Étalonnage dans des conditions inadaptées. L'étalonnage doit être effectué dans des conditions aussi proches que possible de celles du process. Des différences en termes de température, densité de gaz, agitateurs, buses, etc. peuvent affecter l'atténuation. La prévalence de ces conditions pendant l'étalonnage et non le process crée une erreur systématique.
- Utilisation d'une référence erronée, par ex. étalonnage d'un système à vide (niveau de remplissage = 0 %) alors qu'il reste du produit dans la cuve.
- En mesure de densité, échantillons destinés à déterminer la valeur de process dans le tableau de calibrage non représentatifs des conditions réelles.
- Temps d'acquisition des taux de comptage d'étalonnage insuffisant (voir les références aux erreurs statistiques ci-incluses).

Fig. 8 Courbe d'étalonnage



Outre les sources d'erreurs décrites ci-avant, il existe une autre erreur systématique. Lorsqu'un détecteur allongé est associé à une source ponctuelle, la corrélation entre le taux de comptage et le niveau de remplissage n'est pas linéaire (parcours de rayonnement plus long et parois plus épaisses en limite basse de la plage de mesure). La Fig. 8 illustre cet effet. Si l'appareil de mesure utilise à présent une droite (bleue) d'étalonnage, il perdra systématiquement en précision, mais préservera la reproductibilité totale. En d'autres termes, le système indiquera toujours le même niveau à conditions de process identiques, mais avec un écart par rapport au niveau réel (rouge). Un calibrage multipoint peut permettre de linéariser la courbe et ainsi de réduire l'erreur systématique et d'améliorer la précision de la mesure (vert). Néanmoins, la précision moindre due à la non-linéarité parfaite de la mesure étant souvent négligeable, la reproductibilité de la mesure prévaut.

Autres erreurs liées au process et à l'application

Outre les erreurs systématiques inévitables décrites ci-avant, gérables par l'adoption de meilleures pratiques et une construction efficace, il existe plusieurs sources d'erreurs liées au process et à l'application. Ces sources d'erreurs sont souvent sous-estimées et négligées. Or, elles peuvent nuire à la précision de la mesure. Elles doivent être prises en compte par l'utilisateur final des mesures radiométriques et ne peuvent pas être limitées par l'adaptation de la construction des appareils de mesure. Liste non exhaustive de sources possibles d'erreurs liées au process et à l'application :

- Dépôts de produit sur un élément structural
- Diaphonie
- Teneur en hydrogène
- Formation de mousse
- Condensats, bulles de gaz ou soufflures
- Blindage de la source fermé

On peut déduire de ce qui précède que la qualité d'une mesure radiométrique ne se limite pas à la sensibilité du détecteur radiométrique et qu'elle est impactée par plusieurs erreurs systématiques. La sensibilité doit être considérée à l'échelle globale des performances et fonctionnalités du système. Sans mesures appropriées, une sensibilité supérieure accroît le bruit de fond mesuré et n'améliore pas nécessairement l'efficacité du système.

Ainsi, si seul le signal de télévision est amplifié, le bruit augmente et la qualité de la retransmission ne s'en trouve pas meilleure. Il convient donc d'améliorer le rapport signal/bruit au lieu de se focaliser sur la sensibilité.

Types d'applications

Alarme de niveau

Une alarme de niveau est une mesure point à point réalisée à l'aide d'une source et d'un détecteur ponctuels.

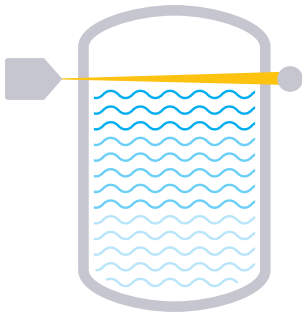


Fig. 9 Schéma d'une alarme de niveau

Il est possible d'en limiter les erreurs systématiques en optimisant l'installation et la configuration du système, notamment grâce à un calcul correct des valeurs limites. L'alarme de niveau radiométrique est surtout impactée par l'erreur statistique, qui est traitée par des méthodes statistiques, telles que la définition d'une constante de temps appropriée et l'établissement d'une valeur moyenne raisonnable. Il est possible d'éviter les erreurs de déclenchement en configurant le système avec un taux de comptage et une variance entre les comptages "vide" et "plein" suffisamment élevés. La Fig. 11 montre que, par sécurité, une différence d'au moins 6σ est recommandée. 0,0000001973 % des mesures présentent un taux de comptage en dehors du domaine 6σ en raison de variations statistiques, ce qui se produit seulement tous les 16 ans avec des caractéristiques de détecteur types.

Densité

À l'instar de l'alarme de niveau radiométrique, les mesures de densité sont généralement des mesures point à point aux mêmes modes d'erreur.

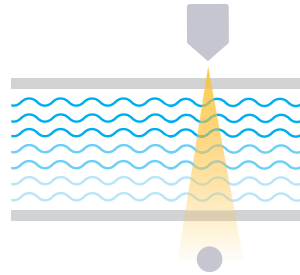
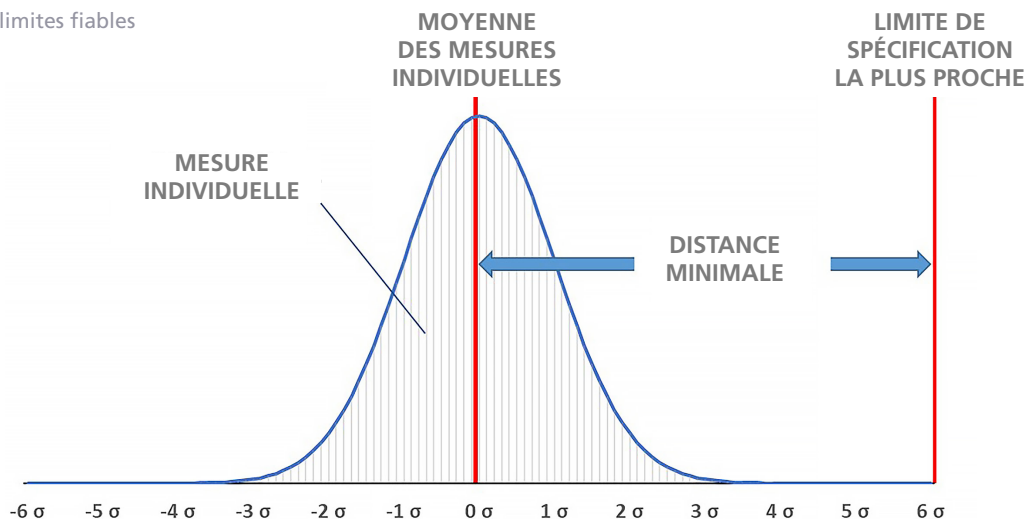


Fig. 10 Schéma d'une mesure de densité

Dans les applications de mesure de densité, il est important d'analyser les causes potentielles des erreurs systématiques. Comme expliqué ci-avant, des procédures de compensation de la température et du vieillissement préservent la reproductibilité de la mesure. Il est également essentiel de veiller au bon étalonnage du système lorsque l'échantillonnage et les mesures en laboratoire peuvent impacter la précision de sa valeur. La mesure subit surtout des erreurs statistiques. Dans la réalité, une mesure de densité se révèle exigeante en termes de précision et de reproductibilité dans une plage d'étalonnage limitée. De ce fait, le faible ratio du taux d'impulsions entre les valeurs minimum et maximum d'une gamme de mesure de densité ne peut pas être utilisé pour une détection de seuil. Pour traiter l'erreur statistique, mieux vaut disposer d'un taux de comptage élevé associé à une constante de temps importante.

Fig. 11 Valeurs limites fiables



Niveau continu

Contrairement aux alarmes de niveau radiométriques et mesures de densité, pour lesquelles la connexion point à point, avec une source et un détecteur ponctuels, est la norme industrielle, les mesures de niveau en continu ont généralement recours à au moins un dispositif allongé.

Elles subissent surtout des erreurs dues au bruit de fond car, comme indiqué ci-avant, les détecteurs allongés y sont sensibles. La sensibilité d'une mesure radiométrique n'est pas un indicateur automatique de sa qualité. Le bruit de fond et ses fluctuations jouent un rôle majeur dans ce contexte, et les erreurs associées peuvent impacter le système. Il est généralement admis que réduire de moitié l'activité équivaut à diviser la sensibilité par deux.

Cette baisse de sensibilité ne modifie pas l'erreur globale du système, à supposer qu'il n'y ait pas d'autre source importante de bruit, par ex. électronique,

neutralisable uniquement si l'appareil de mesure est développé et fabriqué selon des normes élevées. Les calculs montrent que le rapport signal/bruit est un meilleur levier, influencé positivement par la gestion du bruit de fond.

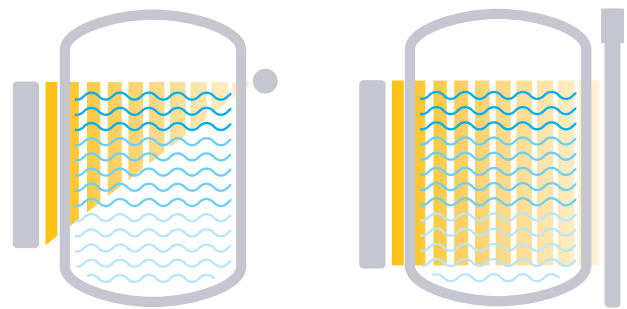


Fig. 12 Source ponctuelle - détecteur allongé / source allongée - détecteur allongé

Synthèse

Comme expliqué dans le présent document, il n'existe pas de mesure précise à 100 %, et l'utilisateur peut être confronté à plusieurs pièges, certains propres à la mesure radiométrique, qui réclament donc des dispositions particulières, et d'autres traitables via une construction adaptée et du bon sens technique. Pour toute mesure, il est important d'utiliser un outil et une configuration appropriés, au niveau de précision adéquat.

Pour les mesures radiométriques, la précision repose essentiellement sur les comptages lus et leur interprétation. La sensibilité joue évidemment un rôle, mais elle n'est qu'un élément de l'équation ; une sorte de condition préalable. Elle est nécessaire à l'obtention d'une mesure correcte, mais un système sensible réagit à tout rayonnement gamma, y compris celui du bruit de fond.

La sensibilité est primordiale pour les détecteurs

ponctuels. Le bruit de fond peut être exclu (collimateur), ce qui limite son impact. Pour les détecteurs allongés, le bruit de fond prévaut, la sensibilité seule important peu.

Mieux vaut ici adopter une approche holistique du système plutôt que de se focaliser sur la sensibilité. Un calcul montre que la réduction de moitié de la sensibilité n'a pratiquement aucun effet sur la précision des mesures. En veillant à ce que le système de mesure, de par sa conception, offre un bon rapport signal/bruit, les experts de Berthold, avec leurs technologies adaptées, apportent une véritable valeur ajoutée au client. Nous sommes déterminés à assurer la sécurité de votre process. Nous œuvrons à l'amélioration de votre productivité et à la prévention des interruptions de process imprévues. Nos efforts se traduisent par des gains de temps et d'argent pour nos clients.



L'EXPERT EN MESURE DES RAYONNEMENTS

Berthold Technologies est le pionnier de la mesure radiométrique en industrie. L'entreprise est spécialisée dans cette technologie depuis plus de 70 ans. L'image de Berthold Technologies est associée à son savoir-faire, à la qualité et la fiabilité de ses produits.

Nos solutions sont orientées clients, nous considérons et apprenons votre métier et ses contraintes. Notre expérience, nos connaissances, notre large gamme de produits, sont autant d'atouts pour une collaboration étroite avec les utilisateurs et les prescripteurs sur les besoins de mesure spécifiques, sur la conception, le développement d'applications et de solutions dans tous les secteurs de l'industrie.

Nous sommes présents à vos côtés... dans le monde entier

Les équipes de Berthold technologies sont à votre écoute quel que soit l'endroit où vous vous trouvez. Notre réseau mondial vous garantit une assistance rapide et efficace. Il est disponible dans les délais les plus brefs pour apporter la réponse appropriée à vos demandes et besoins.

BERTHOLD FRANCE SAS

8, route des Bruyères · 78770 Thoiry · France
+33 (0)1 34 94 79 00 · berthold-france@berthold.com · www.berthold.fr

