

Le monitoring en ligne du point de rosée des équipements isolés au SF₆

La surveillance du point de rosée en ligne du SF₆ devient de plus en plus fréquente ces dernières années. Cependant, les facteurs affectant la fiabilité de la mesure en ligne dans un environnement où ne se produit aucun déplacement du gaz ne sont pas vraiment bien connus. Cet article explique le comportement transitoire de la vapeur d'eau et de l'humidité et examine leur impact fondamental pour l'installation, la conception de l'installation et la sélection des matériaux de raccordement et d'étanchéité.

Pour s'assurer des propriétés isolantes du SF₆ et minimiser la formation de produits corrosifs résultant de la décomposition du SF₆, il est indispensable de maintenir une

quantité minimum de vapeur d'eau dans l'équipement à haute tension isolé au SF₆. Bien que l'équipement soit initialement rempli avec un gaz sec, dans un espace totalement clos

sous forte pression sans aucun apport de gaz externe, la haute capacité de pénétration des molécules d'eau est susceptible d'augmenter le niveau d'humidité, en particulier avec le vieillissement de l'équipement.

Traditionnellement, le niveau d'humidité se vérifie par échantillonnage périodique du gaz. Mais ces dernières années, des systèmes de surveillance incorporant une instrumentation en ligne pour la mesure du point de rosée du SF₆ se sont fortement généralisés. Il est toutefois apparu que ce type d'application lance des défis totalement différents de ceux expérimentés avec la mesure du point de rosée plus industrielle ou la mesure de paramètres de base tels que la pression et la température. En particulier la méthode d'installation, les matériaux utilisés dans le système de mesure et le type de connecteurs sont les points critiques permettant d'apprécier si les mesures fournissent effectivement les données valables nécessaires pour la gestion du dispositif. De plus, une localisation éloignée impose souvent des exigences importantes au regard de la stabilité et de la longueur des intervalles de maintenance de l'instrumentation utilisée pour la surveillance des équipements.

Pression et point de rosée de la vapeur d'eau

La vapeur d'eau est omniprésente et contribue toujours à la pression totale d'un gaz – par exemple, à la pression atmosphérique (barométrique) ou à la pression interne dans un équipement isolé au gaz. (GIE).

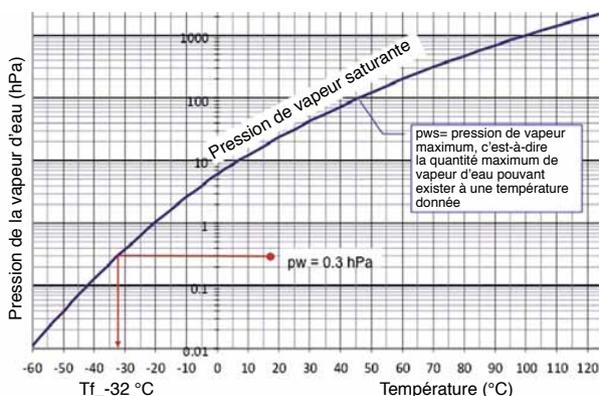


Figure 1. Exemple : pression de la vapeur d'eau 0,3 hPa (mbar) et point de rosée correspondant

+20°C		
	SF ₆ @ 4 BAR	AIR AMBIANT
Point de rosée	-40 °C	+9,3 °C
Humidité relative	0,6 %RH	50 %RH
Pression de vapeur (pw)	0,13 mbar	11,7 mbar
+35 °C		
Point de rosée	-40 °C	+31 °C
Humidité relative	0,2 %RH	80 %RH
Pression de vapeur (pw)	0.13 mbar	45 mbar

Tableau 1. Exemples de point de rosée, humidité relative et pression de vapeur dans un réservoir de gaz et dans l'air ambiant à deux températures (+20 et +35°C) et humidités relatives ambiantes (50 et 80 %RH). Les molécules d'eau (H₂O) tendent à passer d'une haute pression de vapeur à la pression inférieure pour atteindre l'équilibre.



Le point de rosée/givre ($T_{d/f}$) se définit comme la température à laquelle la pression partielle de la vapeur d'eau (p_w) d'un gaz est égale à la pression de vapeur saturante (p_{ws}). Autrement dit, le point de rosée est la température à laquelle un gaz doit être refroidi pour que la vapeur d'eau se condense sous forme de rosée ou de givre →

$$P_w = P_{ws}(T_{d/f})$$

Le point de rosée n'est pas un paramètre dépendant de la température ; on peut ainsi le mesurer par prélèvement d'un échantillon de gaz à une température différente de celle du système. Il est par contre fortement dépendant de la pression ; il est donc crucial de s'assurer que la mesure se fait à la même pression que le volume de gaz principal, ou de connaître les valeurs exactes de la pression, pour pouvoir effectuer une conversion correcte – par exemple, un point de rosée à 4 bars ou à la pression atmosphérique.

Diffusion de la vapeur

En phase vapeur (gaz), les molécules d'eau ne sont pas liées et, en raison de leur faible taille moléculaire, peuvent se déplacer aisément. La vapeur d'eau tend à l'équilibre entre les différentes phases, les molécules d'eau tendant à migrer d'une pression élevée à une pression plus basse, même à travers des matériaux polymères tels que les joints ou

le long des surfaces métalliques aux jointures. Ce comportement se produit également à partir d'une pression de gaz totale basse vers une pression de système plus élevée, par exemple dans le cas de l'opposition de l'air ambiant et du SF6 dans les équipements hautes tensions. L'étanchéité à la pression ne signifie donc pas nécessairement l'étanchéité à la vapeur d'eau. L'effet de diffusion est très lent et n'est décelable qu'à travers la mesure en ligne de petits volumes de gaz statique.

Transferts d'humidité

La pression de vapeur d'eau à l'intérieur d'un système gazeux hermétique ne reste pas exactement constante même s'il ne se produit aucune diffusion. Les variations de température du système induisent des transferts d'humidité (vapeur) entre les deux phases – gaz et matériaux solides en contact avec celui-ci. Quand la température augmente, les matériaux solides dégagent de la vapeur dans le gaz parce que les deux phases différentes tendent à un équilibre d'humidité, c'est-à-dire à l'humidité relative à l'équilibre ; et inversement quand la température diminue. Les sources d'humidité à l'intérieur des systèmes peuvent être les pores des surfaces métalliques et des matériaux organiques tels que les entretoises

et les joints d'étanchéité. Plus la zone de surface des matériaux solides est grande par rapport au volume de gaz, plus grand est l'effet des transferts de vapeur sur le point de rosée.

La Figure 3 montre l'effet des transferts de vapeur lors d'une installation sur un site en Finlande au cours de l'automne 2010. Le capteur étant installé dans un petit bloc à l'extrémité d'une longue tubulure et de points de connexion multiples éloignée du volume de gaz principal, l'ambiance autour du capteur ne représente pas nécessairement les conditions de point de rosée de l'intérieur du réservoir de gaz.

Il est difficile de savoir si les transferts d'humidité détectés se sont produits seulement dans le volume de gaz principal ou le long de la ligne d'échantillonnage de gaz sur laquelle le capteur était installé. Il n'a pas été possible de faire des mesures de référence directement sur le volume de gaz principal parce qu'il n'y avait aucun point de connexion disponible pour un capteur supplémentaire.

Un autre facteur important avec de telles installations est la température. Si le capteur est installé en "déporté", il est possible que la température à l'emplacement du capteur soit significativement différente de celle du volume de gaz principal. Les transferts d'humidité dans le volume de gaz principal et le long de la conduite entraînent des différences significatives dans les niveaux d'humidité. Compte tenu de la lenteur de la diffusion de la vapeur dans un gaz statique, les valeurs du point de rosée mesurées peuvent ne pas être représentatives du volume de gaz principal. Ceci est tout particulièrement probable en cas de variations thermiques récurrentes produisant des transferts d'humidité dynamiques continus et empêchant ainsi l'équilibre.

Non problématique dans le cas de mesures de pression ou de densité, ce type d'installation pour la mesure du point de rosée est susceptible



Figure 2: Installation extérieure dans un "bloc capteur".

de donner des résultats erronés. Le volume de vapeur d'eau lié aux transferts d'une conduite de gaz est infime, mais il devient perceptible par la mesure en ligne dans un petit volume de gaz statique.

Installation d'un capteur de point de rosée en ligne

Lors de la conception d'une mesure en ligne pour un capteur de point de rosée dans un équipement isolé au SF₆, il convient de tenir compte des principes de base du comportement de la vapeur d'eau évoqués plus haut afin de garantir l'exactitude de la mesure pour pouvoir en tirer des conclusions valables. Traditionnellement, le point de rosée du SF₆ est mesuré par prélèvement d'un échantillon de gaz du réservoir, où se produit toujours un déplacement de gaz. Ce mouvement du gaz occulte l'effet de la très lente diffusion et des transferts de vapeurs se produisant entre le gaz et les matériaux solides.

A ce jour, il est encore très fréquent d'installer les capteurs de point de rosée dans le même bloc que les relais de pression ou les capteurs de densité. De plus, ces blocs ne sont souvent pas directement fixés sur le réservoir de gaz principal mais reliés à celui-ci par une tubulure en polymère ou en métal. Les divers points de raccordement et les tubulures peuvent donner lieu à une diffusion de vapeur et à fournir un véhicule pour les transferts d'humidité. Dans un volume de gaz statique relativement faible, ces effets commencent à jouer un rôle dominant. L'installation d'un capteur de point de rosée de cette manière a ainsi toutes les chances de produire des mesures qui ne donneront pas nécessairement les données valables voulues pour la gestion du dispositif.

Pour garantir la meilleure mesure en ligne du point de rosée, il faut installer le capteur aussi près que possible du volume de gaz principal, de préférence directement sur la paroi du réservoir. Il est également recommandé de minimiser le nombre de points de connexion et d'éviter l'usage d'éléments

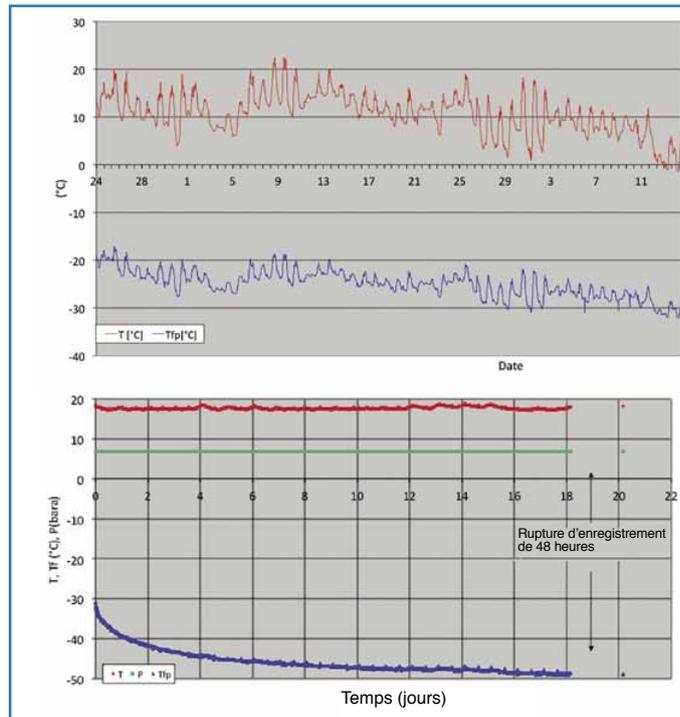


Figure 3. Point de rosée (T_{fp}) et température d'un interrupteur isolé au SF₆ en Finlande (automne 2010)

Figure 4. Valeurs mesurées (point de rosée, pression et température) à partir d'un système extérieur

en plastique ou en caoutchouc à proximité de la cellule de mesure. Les jointures métal sur métal doivent être privilégiées chaque fois que cela est possible.

Réponse du système après installation du capteur

Le temps de réponse de la mesure du point de rosée d'un équipement isolé au gaz n'est pas déterminé par celui du capteur, lequel se chiffre habituellement en secondes ou minutes. Le facteur dominant est la réponse du système après installation. Lors de l'installation du capteur, une certaine humidité provenant de l'air ambiant se trouve également introduite au point de connexion du système. Compte tenu du volume total de SF₆, cette quantité de vapeur est négligeable ; mais du point de vue du capteur se trouvant à l'intérieur de la cellule de mesure, l'effet est clairement lisible et mesurable. Il faut donc un temps important pour que la pression de vapeur à l'intérieur de la cellule atteigne l'équilibre avec le volume de gaz principal. Même si le capteur est monté très près du réservoir principal, plusieurs heures ou même quelques jours peuvent être nécessaires avant que la pression de

vapeur – et par-là le point de rosée – soit égale dans les deux volumes.

Le temps de réponse du système est déterminé par la vitesse à laquelle la cellule de mesure sèche pour atteindre la même pression de vapeur que le volume de SF₆ principal après l'installation, c'est à dire la vitesse à laquelle les molécules d'eau passent des matériaux solides au gaz de la cellule, puis diffusent de la cellule vers le réservoir pour finalement atteindre l'équilibre. Plus le gaz est sec, plus le séchage des matériaux solides et des surfaces prend du temps, en particulier dans le cas d'un gaz statique. La distance entre ces deux volumes et la siccité du SF₆ influent sur le taux de diffusion de la cellule au réservoir. Plus cette distance est grande et plus le gaz est sec, plus il faut de temps pour parvenir à une réponse 100 % correcte. Si la diffusion est trop importante à travers la tubulure ou les points de contact, il est aussi possible que la pression de la vapeur à l'intérieur de la cellule de mesure n'atteigne jamais l'équilibre avec le volume de gaz principal et que par conséquent la mesure ne soit pas représentative des conditions réelles de l'intérieur du réservoir.



Figure 5. Installation d'un capteur de point de rosée, pression et température (DPT145) directement sur le réservoir de gaz principal (25.3 – 14.4.2010). Le volume de gaz contenu dans la cellule de mesure est d'environ 20 ml.

Il est ainsi très important de minimiser l'humidité initiale introduite au cours de l'installation. Pour éviter que des gouttelettes d'eau pénètrent dans le raccord du capteur, l'installation ne devrait pas être effectuée à l'extérieur par temps pluvieux. Un soin tout particulier doit également être pris pour veiller à ce qu'aucune poussière ou particule ne restent sur les surfaces d'étanchéité, celles-ci étant susceptibles par la suite de servir de véhicule pour la diffusion des molécules d'eau, ce qui ruinerait la mesure et dans le pire des cas entraînerait une humidification du SF₆. Dans les installations extérieures, un capot anti-pluie doit être utilisé pour empêcher l'eau de s'accumuler sur les points de jonction et d'augmenter ainsi la diffusion.

Réponse du système en fonctionnement

On peut se demander comment le capteur répond lorsque le point de rosée du volume de gaz principal commence à augmenter, étant donné

la relative lenteur de réponse du système à la suite de l'installation du capteur.

Le facteur prédominant de cette lente réponse initiale est que le séchage des surfaces des matériaux solides (les pores) demande beaucoup de temps même dans un gaz en mouvement et encore plus avec un gaz statique. Ce phénomène n'a qu'un effet marginal quand un gaz plus humide diffuse du réservoir principal vers la cellule de mesure plus sèche, où a lieu la mesure du point de rosée.

Un second facteur à prendre en compte est que dans un grand volume de SF₆, l'augmentation du point de rosée par diffusion à travers les matériaux d'étanchéité ou le long des surfaces métalliques est un processus très lent. Il est évident que lorsque le point de rosée commence à augmenter dans le réservoir principal, il commence aussi à augmenter dans la cellule de mesure et que la hausse est détectée par le capteur plus ou moins simultanément

– supposition faite que le capteur est suffisamment près du réservoir principal.

Que les valeurs du point de rosée soient ou ne soient pas exactement identiques temporellement (réponse 100%) n'est pas vraiment pertinent, car c'est la tendance vers l'augmentation qui met en évidence le fait qu'une action corrective doit être entreprise.

Tout changement rapide, très important au niveau du point de rosée indique une fuite qui doit aussi être détectée par la mesure de la pression.

En résumé

Pour s'assurer qu'un système de mesure en ligne produit des valeurs fiables et valables de point de rosée, avec une incertitude minimisée, il est crucial d'accorder une attention minutieuse à la fois à la conception de l'installation et à l'installation du capteur de point de rosée. La qualité et la stabilité à long terme du capteur constituent également des facteurs critiques. Les meilleurs résultats de mesure s'obtiendront avec une installation directe du capteur sur le réservoir de gaz principal. Seuls des matériaux métalliques de haute qualité doivent être utilisés tant pour les connecteurs que les pièces d'étanchéité proches du capteur. En s'assurant après l'installation que l'indication du capteur atteint effectivement la valeur du point de rosée du volume de SF₆ principal, il est possible de confirmer que toute diffusion se produisant à travers les connexions et/ou la conduite ne perturbe pas la mesure et que les données obtenues sont fiables sur le long terme, et ainsi d'éviter toute alarme induite.