

RAPPORT D'ÉTUDE  
N°DRA-15-149138-10562C

21/03/2017

**Guide INERIS pour la mise en œuvre d'un  
système de détection de fuite sur  
tuyauteries par fibre optique**

**INERIS**

maîtriser le risque |  
pour un développement durable |



# **Guide INERIS pour la mise en œuvre d'un système de détection de fuite sur tuyauteries par fibre optique**

Direction des Risques Accidentels

Verneuil-en-Halatte (60)

Destinataire : MTES

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Ahmed ADJADJ, Stéphane DUPLANTIER, Olivier GENTILHOMME

## PRÉAMBULE




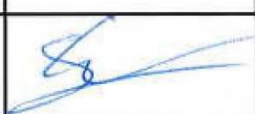
Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Étant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification		Approbation
NOM	A. ADJADJ O. GENTILHOMME S. DUPLANTIER	V. DE-DIANOUS B. TRUCHOT	F. MERLIER	S. CHAUMETTE
Qualité	Ingénieurs Quantification des Risques et performances des Barrières (QRIB) Dispersion Incendie Expérimentation et Modélisation (DIEM) Responsable de pôle Phénomènes Dangereux et Résistance des Structures (PHDS) Direction des Risques Accidentels	Responsables d'unités Quantification des Risques et performances des Barrières (QRIB) Dispersion Incendie Expérimentation et Modélisation (DIEM) Direction des Risques Accidentels	Délégué Appui à l'Administration Direction des Risques Accidentels	Responsable de pôle Analyse et Gestion Intégrée des Risques (AGIR) Direction des Risques Accidentels
Visa				

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>5</b>
1.1	Objet.....	5
1.2	Champ d'application.....	5
1.3	Évaluation de la barrière de sécurité.....	6
1.4	Organisation du document.....	6
<b>2</b>	<b>PARTIE I - DESCRIPTION DE LA FIBRE OPTIQUE</b> .....	<b>9</b>
2.1	Principe de fonctionnement de la détection de variation de température par fibre optique.....	9
2.2	Utilisation connue de la fibre optique comme dispositif de sécurité.....	11
2.3	Description des différents éléments du dispositif de détection par fibre optique.....	12
2.4	Critères de dimensionnement du dispositif.....	15
2.5	Essais réalisés pour démontrer l'efficacité de la fo.....	20
2.5.1	Essais sur liquide froid.....	20
2.5.2	Essais sur petite fuite confinée.....	20
2.5.3	Domaine d'utilisation de la fibre optique.....	21
2.6	Retour d'expérience.....	22
2.6.1	Retour d'expérience sur déclenchements.....	22
2.6.2	Retour d'expérience sur diagnostic.....	22
<b>3</b>	<b>PARTIE II – NIVEAU DE CONFIANCE (NC)</b> .....	<b>23</b>
3.1	Reconnaissance nc.....	23
3.1.1	Moyens de tests et de diagnostic.....	23
3.1.2	Conclusion.....	25
3.2	Perspective pour une conformité sil.....	26
<b>4</b>	<b>PARTIE III – GUIDE DE CONCEPTION, D'INSTALLATION, D'EXPLOITATION ET DE MAINTENANCE D'UN SYSTEME DE DETECTION PAR FIBRE OPTIQUE</b>	<b>27</b>
4.1	Processus de dimensionnement d'un système de détection.....	27
4.2	Évaluation a posteriori du système.....	30
<b>5</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>LISTE DES ANNEXES</b> .....	<b>41</b>



# 1 INTRODUCTION

## 1.1 OBJET

L'objet de ce document est de fournir des éléments relatifs à la performance de la barrière de détection dont le premier élément est constitué d'une fibre optique.

**Ce sous-système « détection par fibre optique » est envisagé pour le cas d'une fuite accidentelle de produits dont la mise à l'atmosphère entraîne une chute de température significative liée à l'évaporation instantanée d'une partie du rejet.**

Cela peut être le cas par exemple de l'ammoniac ou de la plupart des gaz liquéfiés sous pression.

## 1.2 CHAMP D'APPLICATION

Ce dispositif de détection par fibre optique permet de détecter et localiser les fuites de produits dont la mise à l'atmosphère entraîne une chute de température significative (ex. : ammoniac) sur les tuyauteries, les éléments associés (brides, vannes, pompes, ...) et les capacités.

Concernant l'ammoniac, cette technique de détection est réservée aux tuyauteries et équipements contenant de l'ammoniac liquide (sous pression et cryogénique) afin que la fibre optique puisse être refroidie lors de la détente et la vaporisation de l'ammoniac pendant son émission à l'atmosphère (température d'équilibre de l'ammoniac à pression atmosphérique : - 33°C).

**Le présent rapport se focalise sur la détection de fuite d'ammoniac liquide sur les tuyauteries. Le système pourrait être appliqué à d'autres fluides présentant les mêmes propriétés.**

La mise en œuvre pour la détection sur les capacités pourrait prendre des formes différentes.

Un guide<sup>1</sup> rédigé par la profession décrit le système de détection de fuite par fibre optique et propose des bonnes pratiques d'installation, d'utilisation et de maintenance de ce système.

---

<sup>1</sup> Détection de fuites d'ammoniac liquide par fibre optique en milieu industriel : Description de la technologie et référentiel d'installation et d'utilisation, Edition février 2015 révision 3

### 1.3 ÉVALUATION DE LA BARRIÈRE DE SÉCURITÉ

Il est important de rappeler que la détection par fibre optique n'est qu'une partie d'une barrière instrumentée de détection de fuite (cf. Figure suivante). Cette partie détection intègre un traitement complexe propre à sa fonction et qui nécessite une attention particulière. Cette barrière peut être valorisée comme MMRIS<sup>2</sup> dans une EDD dès lors qu'elle respecte les exigences de la doctrine MMRI du 2 octobre 2013.



Figure 1 : Éléments d'une barrière instrumentée de détection de fuite

Ce guide traite de la performance (efficacité, temps de réponse et Niveau de Confiance) de ce moyen de détection. Il est nécessaire de prendre en compte la performance des autres parties pour pouvoir évaluer la barrière de sécurité dans sa globalité.

### 1.4 ORGANISATION DU DOCUMENT

Ce document comporte quatre parties :

- La première partie présente le principe de fonctionnement de la fibre optique, des utilisations connues et les éléments constitutifs d'un système de détection de fuite par mesure de température par fibre optique. Elle présente ensuite les critères de dimensionnement à prendre en compte pour la détection de fuite d'ammoniac ainsi que les tests qui ont été réalisés pour démontrer sa capacité à détecter une fuite.
- Dans une deuxième partie, des informations sont fournies sur les exigences attendues en termes de niveau de confiance (au regard notamment de la note de doctrine MMRI du 2 octobre 2013) et ensuite sur les reconnaissances possibles en termes de niveau SIL.

---

<sup>2</sup> MMRIS : Mesure de Maitrise de Risques Instrumentée de Sécurité



- La troisième partie traite plus particulièrement de la conception, de l'installation, de l'exploitation et de la maintenance d'un tel dispositif ainsi que de l'évaluation de la performance du dispositif une fois que celui-ci est installé. Elle présente la liste des éléments à prendre en compte pour démontrer la performance de ce dispositif de sécurité sur site industriel. Un exemple est présenté en annexe pour illustrer cette démarche de démonstration.
  
- La quatrième partie correspond aux annexes :
  - Annexe 1 : Principe de fonctionnement de la rétrodiffusion ;
  - Annexe 2 : Exemple de démonstration de la performance de ce dispositif de sécurité sur site industriel (dimensionnement pour un scénario donné).



## 2 PARTIE I - DESCRIPTION DE LA FIBRE OPTIQUE

Ce chapitre décrit les éléments constitutifs d'un système de détection de fuite par mesure de température par fibre optique ainsi que le principe de fonctionnement de la fibre optique. Il précise ensuite les tests qui ont été réalisés pour démontrer sa capacité à détecter une fuite.

### 2.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA DÉTECTION DE VARIATION DE TEMPÉRATURE PAR FIBRE OPTIQUE

Comme ce système est relativement nouveau pour la détection de fuite, le parti a été pris de le détailler assez finement.

Ce système de détection est basé sur la réflectométrie optique temporelle. Cette technique consiste à injecter, de façon répétée, une impulsion de lumière monochromatique (de longueur d'onde  $\lambda_0$ ) dans une fibre optique et d'analyser la lumière rétrodiffusée par celle-ci. Cette lumière rétrodiffuse au fur et à mesure que l'impulsion chemine dans la fibre.

Comme le montre la Figure 2, la lumière rétrodiffusée contient plusieurs composantes : l'une d'entre elles, appelée composante de Rayleigh, a la même longueur d'onde que l'impulsion de lumière alors que les autres, dites composantes de Raman ou de Brillouin, ont des longueurs d'onde différentes.

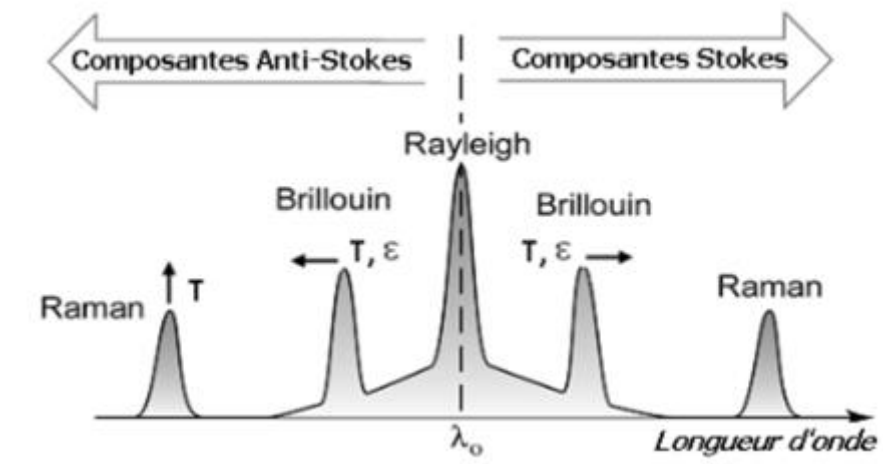


Figure 2 : Composantes de la lumière rétrodiffusée dans une fibre optique

Chacune de ces composantes a des propriétés distinctes :

- composante de Rayleigh : l'amplitude de cette composante est fonction de la température et de la déformation subies par la fibre ;
- composante de Raman : celle-ci se sépare en deux ondes (Stokes et Anti-Stokes). L'amplitude de l'onde Anti-Stokes de Raman est fortement dépendante de la température subie par la fibre alors que l'onde Stokes de Raman ne l'est pas ;
- composante de Brillouin : celle-ci se sépare elle aussi en deux ondes

(Stokes et Anti-Stokes). La fréquence de ces deux ondes dépend de la température et de la déformation subie par la fibre.

En conséquence, la température « vue » par la fibre peut être déduite de l'analyse des propriétés de ces composantes de la lumière rétrodiffusée selon le type d'équipement connecté à la fibre optique (aussi appelé « interrogateur »).

Grâce à cette description, on conçoit aisément que la fibre optique joue à la fois le rôle de capteur et celui de support de transmission de la lumière, d'abord de l'interrogateur vers le point de mesure, puis du point de mesure vers l'interrogateur. Le transport de l'information peut être dégradé si la fibre comporte des défauts ou si l'installation est mal faite. Il est donc essentiel de vérifier la bonne propagation de la lumière dans la fibre avant que cette dernière ne soit mise en service. La Figure 3 présente quelques exemples de dégradation possible de la propagation du signal.

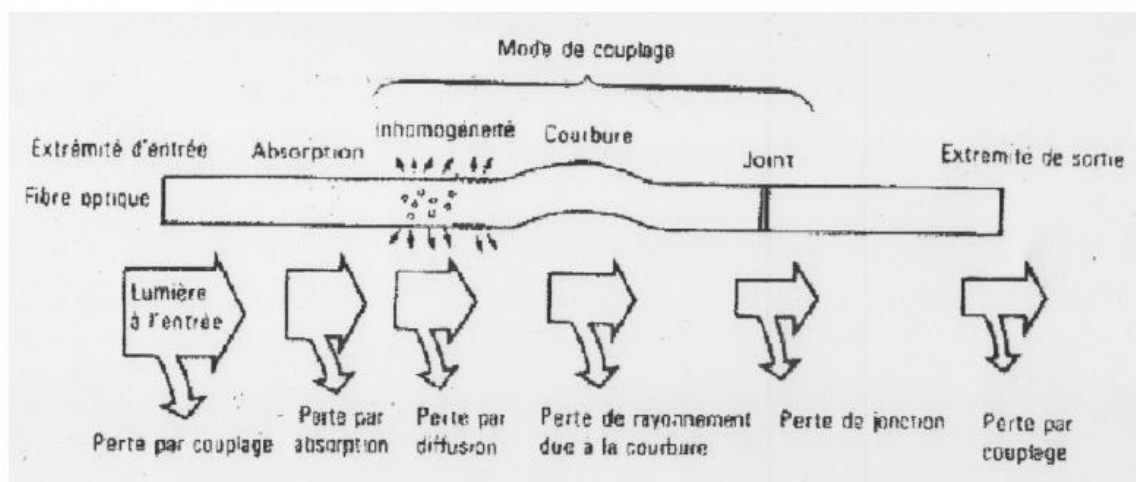


Figure 3 : Exemples de perturbations auxquelles la fibre est sensible

La fibre optique permet donc de connaître le champ de température sur toute sa longueur. En effet, la localisation de la mesure est connue à partir de la vitesse de propagation de la lumière et du temps écoulé entre le moment où l'impulsion de lumière est envoyée par l'interrogateur et le moment où la lumière rétrodiffusée est récupérée. De même, il faut préciser que la fibre optique a une certaine résolution spatiale. Cela signifie que la température mesurée par la fibre correspond à la moyenne de la température « vue » par la fibre sur cette résolution spatiale.

Pour plus d'informations sur le fonctionnement de la fibre optique, le lecteur pourra se reporter en Annexe 1 où une présentation du principe de fonctionnement d'un réflectomètre est faite.

## 2.2 UTILISATION CONNUE DE LA FIBRE OPTIQUE COMME DISPOSITIF DE SÉCURITÉ

Elle est actuellement plus couramment utilisée pour détecter des départs d'incendie et donc des montées en température. Un exemple de critères permettant de signaler des détections incendie par FO est donné ci-après :

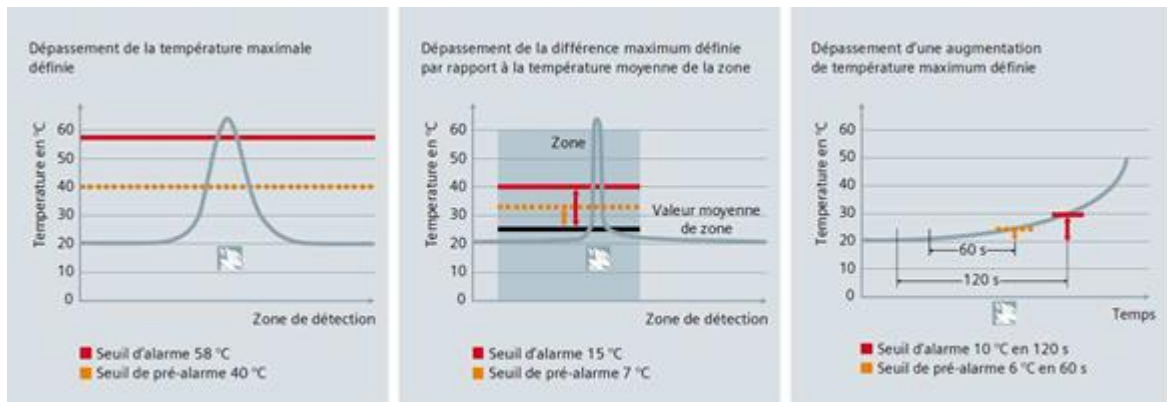


Figure 4 : Critères de déclenchement pour la détection incendie par FO

Ce type de détection a déjà été implanté dans les tunnels routiers comme par exemple le tunnel du Mont Blanc en France mais aussi dans d'autres tunnels de par le monde : Gotthard (Suisse), Rennsteig (Allemagne), Lecco (Italie), Funing (Chine), ou encore KP Expressway (Singapour).

Il est possible d'en trouver également dans les tunnels ferroviaires plutôt à l'étranger : Indra Railway Tunnel (Espagne), MRTA Metro Bangkok (Thaïlande), Betuwe Route Railway Tunnel (Pays-Bas) ou Orte Railway Tunnel (Italie).

Elle est également implantée dans des applications industrielles :

- Traitement des déchets (ordures ménagères) - Usine d'incinération (Issy les Moulineaux) ;
- Helsinki Energy (Finlande);
- Ontario Power Generation (Canada);
- Centrale d'Opatovice (République Tchèque);
- Raffinerie OMV de Schwechat (Autriche) ;
- Chi Ma Wan Cable Tray (Hong Kong);
- Surveillance de fuite de canalisations enterrées (Allemagne) et de digues (EdF) ;
- Depuis 2000 dans l'inter paroi (entre les cuves interne et externe) des grands réservoirs de GNL (Dunkerque).

Ces équipements peuvent répondre aux normes en vigueur en matière de détection de chaleur linéaire. Ils peuvent être certifiés VdS selon la norme Pr EN 54-22 (détecteurs de chaleur linéaires).

## 2.3 DESCRIPTION DES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS DU DISPOSITIF DE DÉTECTION PAR FIBRE OPTIQUE

En raison de sa capacité à mesurer des températures « linéaires » et à réagir relativement rapidement, le recours à la fibre optique est envisagé pour détecter des fuites générant des niveaux de température très bas en un temps très court le long de canalisations.

Ce guide a été élaboré sur la base des essais réalisés pour des canalisations d'ammoniac liquide. En effet, ce produit génère un nuage particulièrement froid lorsqu'il est rejeté accidentellement.

Comme il n'est pas possible d'être exhaustif sur la description des schémas de principe de ces systèmes de détection, le parti a été pris de se baser sur ceux qui ont été utilisés par l'INERIS.

Bien que le fonctionnement de ce dispositif soit totalement différent de celui d'un détecteur de gaz, il reste néanmoins valorisé pour la même fonction de sécurité sur une installation industrielle (fonction : détection de fuite).

Un exemple de composition du système de détection de fuite par fibre optique par rapport à celle d'un détecteur de gaz ponctuel est présenté dans le schéma suivant :

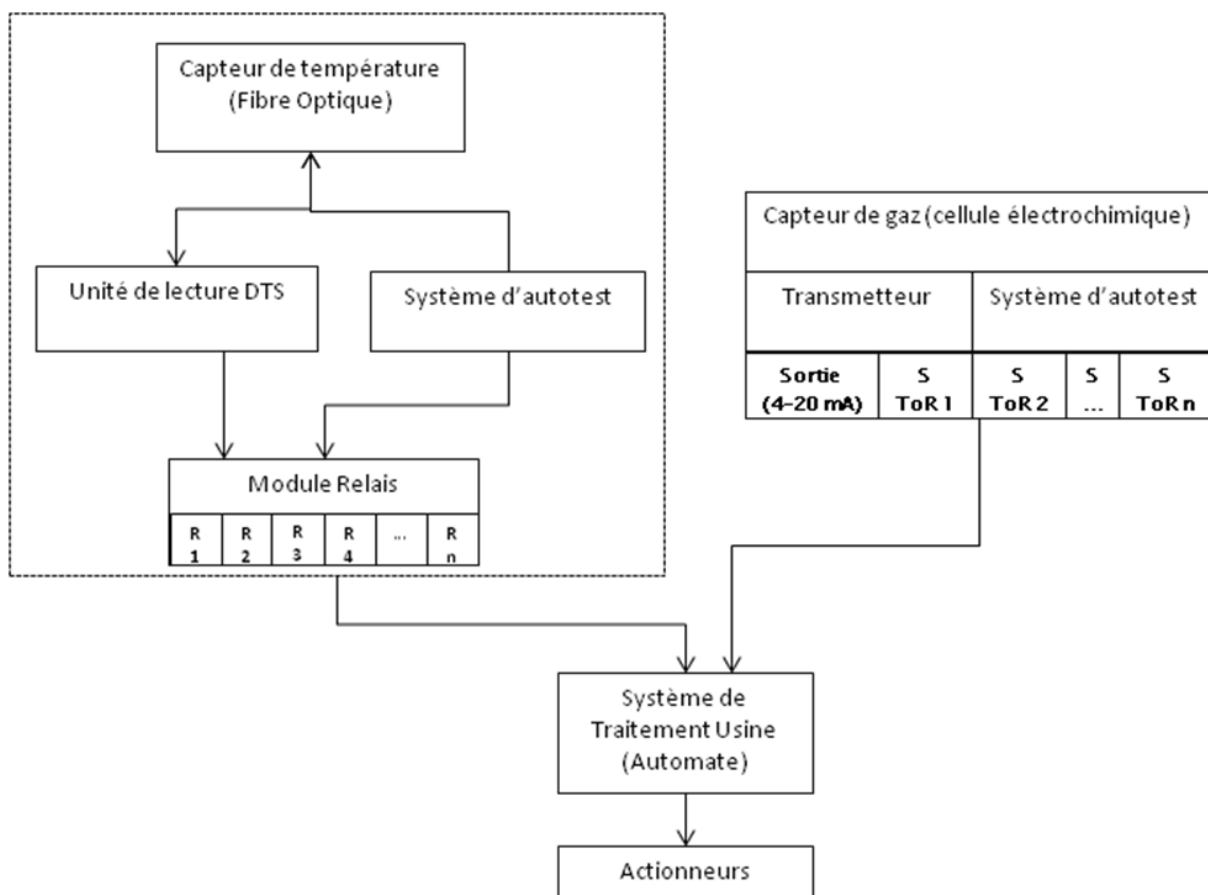


Figure 5 : Composition du système de détection de fuite par fibre optique par rapport à celle d'un détecteur de gaz ponctuel

Ce schéma correspond à une représentation simplifiée. La détection de fuite par fibre optique est constituée d'éléments plus complexes sur lesquels il convient d'être particulièrement vigilant.

Le tableau suivant présente, de manière plus détaillée et sous forme d'exemple, le fonctionnement de ces deux moyens de détection de fuite :

Description	Système de détection de fuite par fibre optique	Détecteur de gaz ponctuel
<b>Partie capteur</b>	<p>Un câble de mesure à fibres optiques installé le long des canalisations. Le câble est fixé à la canalisation par un simple jeu de colliers. Le positionnement du câble se fait préférentiellement sur la génératrice inférieure pour les canalisations horizontales et en spirale facilitant le démontage pour les canalisations verticales tel que défini dans le guide professionnel.</p>	<p>Élément sensible (cellule électrochimique, catalytique, ...) qui transforme une information physique (en l'occurrence une concentration de gaz) en un signal électrique adaptée au traitement.</p>
<b>Partie transmetteur</b>	<p>L'unité de lecture DTS (Distributed Temperature Sensing system) envoie une impulsion laser dans une fibre optique et reçoit la lumière rétrodiffusée. Elle fait l'analyse spectrale de la lumière rétrodiffusée et en déduit le profil de température le long de la fibre. Le DTS enregistre les mesures de la fibre optique par intervalle régulier de quelques secondes sur deux canaux de mesure. Chaque canal correspond à une direction différente du faisceau dans la fibre optique qui est installée en boucle fermée.</p> <p>Le DTS surveille en permanence le niveau du signal reçu et informe quand le signal n'est pas exploitable (trop faible). Cela permet notamment un contrôle de la qualité des connexions, raccords ou soudures de la fibre</p> <p>Un module Relais pour transmettre les alertes de fuite et de fonctionnement aux automates de l'usine (génère une alerte en cas de dysfonctionnement du système d'exploitation, du logiciel, ou de l'unité de lecture).</p> <p>Le module relais communique avec le logiciel de détection et avec l'unité de lecture DTS. L'ensemble des liaisons est surveillé par un protocole avec confirmation des échanges. Un chien de garde ou watchdog signale une perte de communication entre les différents appareils.</p> <p>Le Module Relais peut être intégré dans l'unité de lecture DTS.</p>	<p>Transmetteur qui assure le conditionnement du signal émis par le capteur pour l'interface utilisateur. Le signal transmis peut être un signal analogique 4-20 mA, un signal numérique ou un signal de type Tout ou Rien (1/0).</p>

Description	Système de détection de fuite par fibre optique	Détecteur de gaz ponctuel
<b>Partie diagnostic</b>	<p>Un module d'autotest pour vérifier périodiquement le bon fonctionnement de la chaîne de mesure complète par une fuite simulée.</p> <p>Le Module Autotest est un appareil indépendant du système DTS qui permet de vérifier le fonctionnement de toute la chaîne de détection. A titre d'exemple il est possible de simuler une fuite d'ammoniac liquide sous pression par un refroidissement artificiel maîtrisé (par exemple une cellule à effet Peltier) sur deux tronçons de 2 m de fibre optique situés dans le module auto test. Ces tronçons de fibre sont inclus dans la boucle de mesure, au début et à la fin de la boucle même. Ce refroidissement déclenche deux alertes, correspondant aux zones du module relais dédiées aux tronçons de fibre du module autotest.</p> <p>Une liste non exhaustive des différentes alarmes générées est donnée ci-après :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• une fibre cassée ;</li> <li>• un dysfonctionnement de l'unité de lecture DTS ;</li> <li>• un déclenchement de chaque cycle d'autotest.</li> </ul>	<p>Fonction d'autotest pour détecter certains défauts :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Un arrêt du logiciel (watchdog) ;</li> <li>• Un dysfonctionnement de la carte électronique ;</li> </ul>
<b>Particularités</b>	<p>Un câble permet de détecter les fuites le long de la canalisation.</p> <p>Aujourd'hui pour les dispositifs connus par l'INERIS, l'unité de lecture est un PC industriel avec les particularités suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Système qui fonctionne avec un OS<sup>3</sup> générique (Windows),</li> <li>• Logiciel applicatif (algorithme de traitement de la lumière rétrodiffusée) qui doit être paramétré par l'utilisateur.</li> </ul> <p>Une configuration spécifique et un niveau de fiabilité et de disponibilité limité.</p>	<p>Plusieurs détecteurs répartis autour de la canalisation sont nécessaires pour détecter les fuites.</p> <p>Le transmetteur est une carte électronique avec un OS propre et un logiciel applicatif (algorithme relativement simple) déjà intégré.</p> <p>Configuration relativement simple (réglage des seuils de détection) et un niveau de fiabilité et disponibilité intéressant (NC1 à NC2).</p>

*Tableau 1 : Fonctionnement d'un système de détection de fuite par fibre optique et d'un détecteur de gaz ponctuel*

<sup>3</sup> OS : Operating System (Système d'exploitation)



Comme pour toute chaîne de sécurité, il peut être pertinent d'avoir un archivage des mesures de température pour les tuyauteries surveillées sur une durée qui dépendra de la capacité mémoire du système de stockage de données. Les données seront conservées sur une période permettant une analyse a posteriori en cas d'évènement indésirable.

Pour constituer un dispositif adapté et résistant, les câbles standards de mesure de température (fibre optique) doivent présenter les caractéristiques suivantes :

- Câble résistant aux contraintes pouvant être rencontrées dans l'environnement du site industriel :
  - Câble renforcé Inox,
  - Résistance élevée à la traction pour faciliter la pose,
  - Résistance élevée à la compression,
  - Excellente résistance aux petits rongeurs,
  - Résistance élevée aux produits chimiques,
  - Gaine robuste et résistante à l'abrasion,
  - Étanche,
- Rayon de courbure suffisant (avec traction et sans traction) pour faciliter la pose et pour ne pas l'endommager,
- Repérage de distance inscrit directement sur la gaine extérieure qui permet de relier le repère à un endroit géographique et/ou à un équipement afin de faciliter le paramétrage du système (« mapping »).

## 2.4 CRITÈRES DE DIMENSIONNEMENT DU DISPOSITIF

De façon générale, les fuites peuvent être classées selon plusieurs critères indépendants listés ci-après :

- **Le débit de fuite** qui peut aller de quelques grammes par seconde à plusieurs kilogrammes par seconde. L'influence de ce paramètre est importante car le débit de fuite a une incidence directe sur les dimensions du rejet et donc de la zone où la température va fortement baisser.
- **La phase du rejet** qui peut être gazeuse, diphasique ou liquide (réfrigérée). L'influence de ce paramètre est importante également car la capacité de refroidissement du liquide est beaucoup plus forte que celle du gaz. L'implantation de la fibre est plutôt recommandée pour des fuites en phase liquide ou diphasique :
  - Le contact des gouttes permet de réduire suffisamment la température du tronçon de fibre optique potentiellement impacté ;
  - Dans le cas de l'ammoniac, la fuite en phase liquide est plus favorable que la fuite gazeuse à la détection par fibre optique car elle va générer une chute de température plus forte due au flash du liquide (température de -60 à -80°C dans le nuage).
- **L'environnement proche de la canalisation**, celle-ci pouvant être calorifugée ou nue.

- Dans le cas d'une canalisation calorifugée, la fibre optique doit être placée à l'extérieur du calorifugeage<sup>4</sup> ou, le cas échéant, entre le calorifuge et l'enveloppe externe de maintien du calorifuge (la tôle).
- En cas de fuite, le liquide sera d'abord canalisé dans le calorifugeage avant de mouiller in fine la fibre.
- En l'absence de calorifugeage, la fibre implantée doit être placée sous la génératrice inférieure. De la sorte, en cas de fuite, et du fait de l'interaction de la fuite avec la brèche, on s'attend à ce que des gouttes viennent ruisseler sur la fibre.

Toutefois, en fonction des propriétés du produit, d'autres implantations sont possibles comme envisagé ci-dessous.

- **Le lieu où se produit la fuite**, dans un espace confiné ou en champ libre. La détection est plus facile dans le cas d'un espace confiné car d'une part les perturbations liées aux conditions ambiantes sont moindres et, d'autre part, l'encombrement y est plus important favorisant ainsi la projection de gouttes sur la fibre.

Comme le montre la Figure 6, un effet toxique donné sur un individu (léthal, irréversible, olfactif...) est fonction du débit de fuite et de la durée d'exposition de cet individu à cette fuite. Par conséquent, si le système de détection est mis en place pour se prémunir d'un effet bien précis, la chaîne de sécurité devra avoir un temps de réponse d'autant plus rapide que le débit de fuite est important.

La Figure 7 présente de façon très schématique l'influence du débit de fuite sur le refroidissement auquel sera exposée la fibre optique. Pour un emplacement donné de la fibre, on constate que ce refroidissement sera d'autant plus important que le débit de fuite est lui-même important.

En combinant les deux précédents graphes, on obtient la Figure 8. Imaginons qu'une chaîne de sécurité utilisant un système de détection basé sur la fibre optique soit mise en place sur un site industriel pour se prémunir de l'effet « bleu ». Il est demandé à ce système de détection qu'il soit efficace pour des fuites dont le débit varie entre  $Q_1$  et  $Q_2$ . Grâce à la Figure 8, on conclut que le système de détection devra être capable de détecter un refroidissement de  $\Delta T_2$  et la chaîne de sécurité devra avoir un temps de réponse de  $\Delta t_1$ .

La précision de l'interrogateur et les variations climatiques font que, en réalité, le refroidissement devra être supérieur à une certaine valeur plancher, dite « bruit de fond », pour qu'il puisse être détecté par la fibre optique. La Figure 9 illustre la situation lorsque ce bruit est compris entre  $\Delta T_1$  et  $\Delta T_2$ . Dans ce cas, la fibre optique ne sera pas capable de détecter une partie des fuites pour lesquelles on l'a mise en place, rendant ainsi la chaîne de sécurité inefficace.

---

<sup>4</sup> Dans le cas où la fibre optique serait placée à l'intérieur du calorifugeage, elle serait dès lors en équilibre thermique avec l'ammoniac circulant dans la canalisation. Dans le cas d'une fuite d'ammoniac liquide, cette fibre optique pourrait alors ne pas « voir » la chute de température.

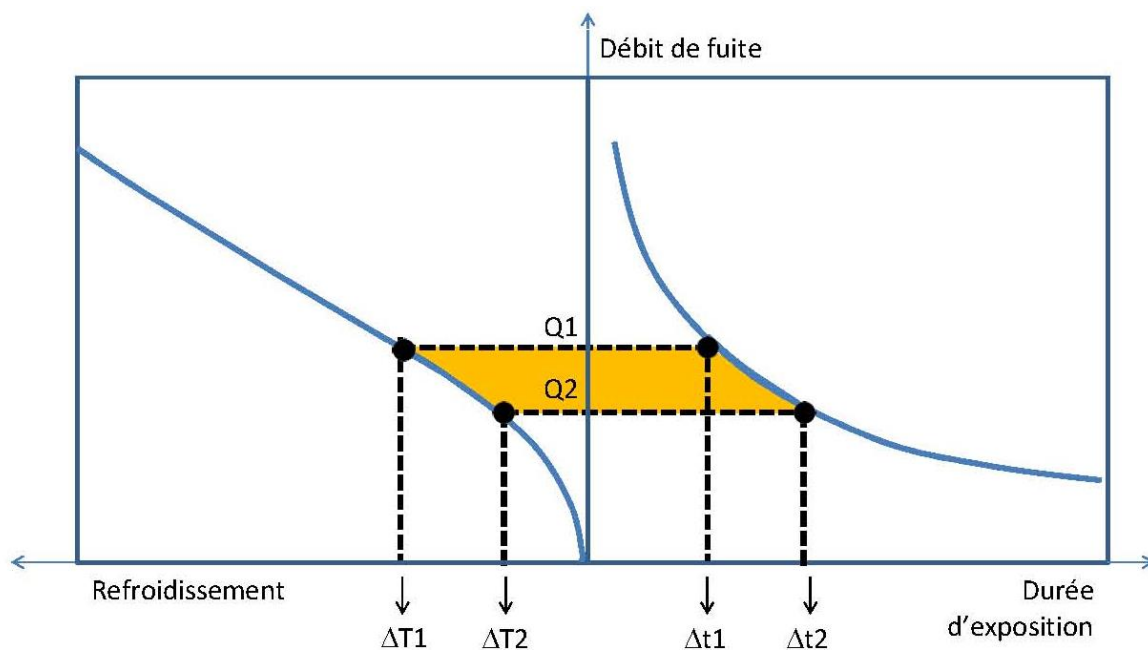
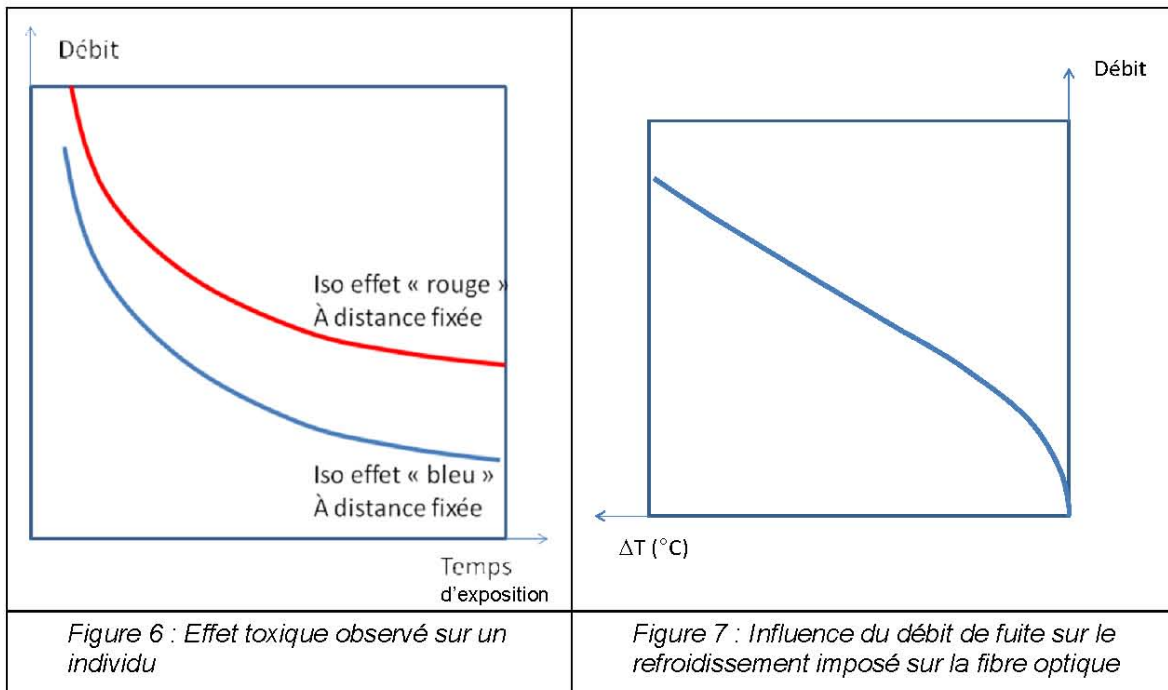


Figure 8 : Lien entre débit de fuite, durée maximale d'exposition pour un effet donné et refroidissement imposé sur la fibre optique

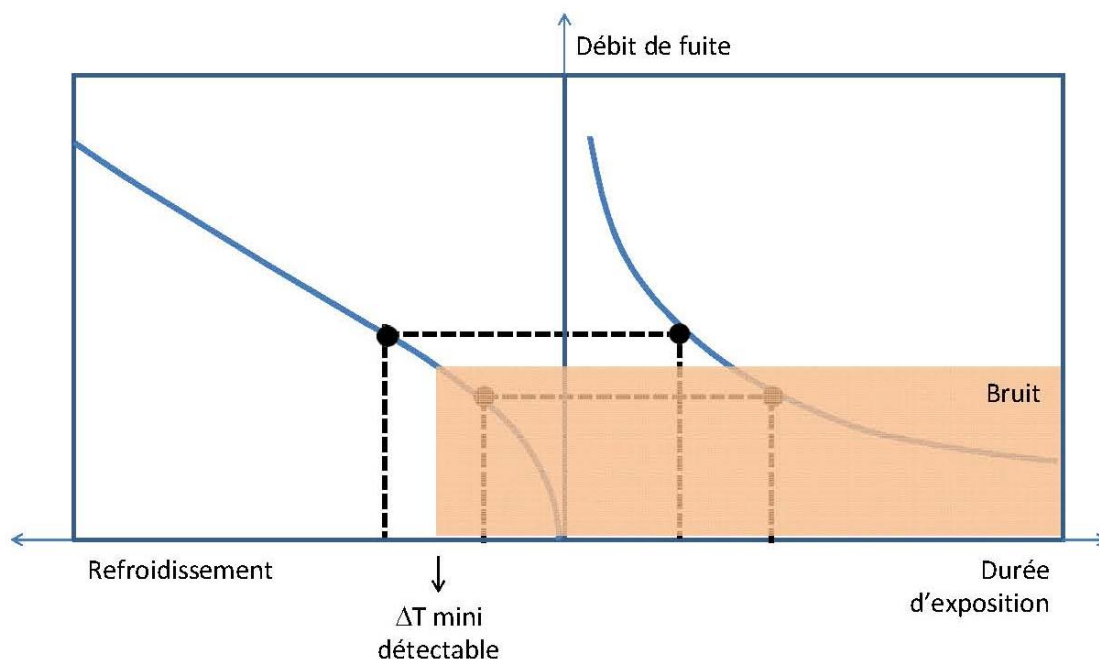


Figure 9 : Influence d'un « bruit de fond » sur l'efficacité d'un système de détection par fibre optique

La bonne pratique est de placer la fibre optique sous la canalisation car les essais réalisés ont montré que cette position permettait de détecter des fuites dans toutes les directions à partir de la fraction liquide qui ruisselle sous la canalisation. Dans certains cas (par exemple, où les cibles potentielles se situent dans une zone plutôt "concentrée") et comme la mesure avec la fibre optique se fait avec une certaine résolution spatiale (habituellement 1 m), on pourrait avoir intérêt à placer celle-ci de façon pertinente par rapport à la canalisation c'est-à-dire à une distance telle que le refroidissement de la fibre soit maximal et que la longueur du tronçon refroidi soit la plus importante possible. En procédant de la sorte, la température mesurée par la fibre se rapprochera de la température d'exposition. De façon schématique, la Figure 10 montre un exemple d'optimisation de positionnement de la fibre optique. Sur cet exemple, l'emplacement n°2 est le plus intéressant car il correspond à l'emplacement où une longueur relativement importante de la fibre sera la plus refroidie.

Plus la résolution spatiale de la fibre est faible et moins ce travail d'optimisation du positionnement de la fibre s'avère nécessaire. Par contre, de par le principe de fonctionnement des interrogateurs, une diminution de la résolution spatiale se traduit inexorablement par un temps de réponse plus long. En effet, ce temps de réponse dépend :

- du temps de propagation du signal lumineux (incident et rétrodiffusé) dans la fibre : ce temps est négligeable (de l'ordre de la ms pour une fibre de 30°km) ;
- du temps de traitement des informations reçues par l'interrogateur (et donc de la résolution spatiale de la fibre) : ce temps est dimensionnant (de l'ordre de 10 s pour une résolution spatiale de 1 m) ;

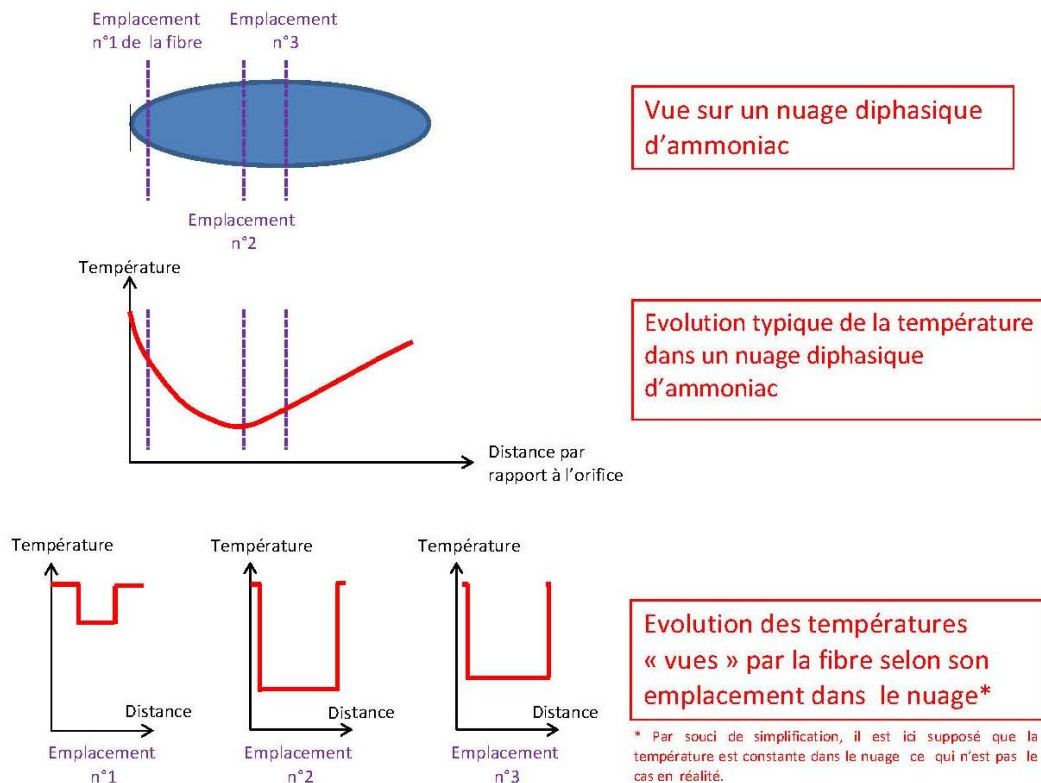


Figure 10 : Positionnement de la fibre optique optimisé en fonction du refroidissement constaté dans le nuage et de la longueur du tronçon exposé de la fibre

- **Plusieurs seuils de détection** peuvent être utilisés simultanément. Ceux-ci peuvent s'appliquer à l'intégralité de la fibre optique (détection globale) ou être spécifiques aux tronçons considérés de la fibre (détection par zone). Ces seuils sont généralement basés sur la chute de température mesurée par la fibre optique en un temps donné. Une règle de bonne pratique consiste à considérer deux seuils de variation temporelle de température :
  - Rapide chute de température en un temps court (de l'ordre de la dizaine de secondes). Ce seuil est adapté à la détection de fuites qui entraînent un mouillage de la fibre optique avec une baisse rapide de la température ;
  - Importante chute de température en un temps long (de l'ordre de quelques minutes, c'est-à-dire la différence entre la dernière mesure et la mesure enregistrée quelques minutes auparavant). Ce seuil est adapté pour la détection de fuites qui entraînent une baisse plus progressive de la température due au contact de la fibre optique avec un nuage gazeux d'ammoniac.

Ces seuils de variation de température sont choisis de manière à ce qu'ils soient toujours significativement différents des variations de température normales liées aux opérations d'exploitation des installations et aux variations de température de l'environnement (dites « bruit de fond »).

Pour éviter d'activer une alarme du fait d'un ombrage d'une partie de la fibre optique ou du fait d'un remplissage de l'installation en ammoniac, un seuil de variation spatiale de température peut être aussi utilisé.

Ces seuils sont à paramétrer pour chaque site industriel. Ils doivent également être établis pour minimiser les déclenchements intempestifs.

Afin d'éviter les déclenchements intempestifs, des modifications pourront également être nécessaires sur les installations proches de la tuyauterie (exemple: déporter des purges, ...).

Il convient de rappeler, que pour être valorisé en tant que MMRIS, le déclenchement de ce dispositif doit entraîner une mise en sécurité. Le temps nécessaire pour la mise en sécurité (asservissement associé à la détection) doit être compatible avec la cinétique du scénario de fuite considéré.

**La précision de la température, la précision du positionnement de la mesure sur la longueur de fibre surveillée et le temps de mesure sur toute la longueur de la fibre sont interdépendants et nécessitent donc d'être optimisés globalement en fonction du ou des scénarios qui doivent être détectés.**

## **2.5 ESSAIS RÉALISÉS POUR DÉMONTRER L'EFFICACITÉ DE LA FO**

Il est important de remarquer que la capacité de détection, et donc de reproduire les résultats obtenus lors des essais industriels et de l'INERIS, dépend des performances des appareils de mesure utilisés et ne s'applique pas automatiquement à d'autres systèmes de mesure par fibre optique similaires.

### **2.5.1 ESSAIS SUR LIQUIDE FROID**

Une première série d'essais a été réalisée par les industriels sur les sites des sociétés YARA France au Havre et BOREALIS à Ottmarsheim ; ces essais ont consisté en un déversement en quelques minutes de quantités de l'ordre de 1 kg d'ammoniac liquide sur des tuyauteries équipées de capteurs à fibres optiques. Ces tests ont démontré que la fibre optique enregistre toujours une baisse rapide de température dès qu'elle est en contact avec l'ammoniac liquide. La vitesse et l'amplitude de cette baisse de température dépendent notamment de la longueur de câble qui est refroidie, de la fibre de mesure utilisée et du temps d'acquisition.

Les essais avec l'appareil testé ont été capables de détecter en 10 à 20 secondes des fuites simulées qui affectaient 50 cm de fibre optique.

### **2.5.2 ESSAIS SUR PETITE FUITE CONFINÉE**

Des essais ont été réalisés par l'INERIS à la demande des sociétés YARA France et BOREALIS pour évaluer expérimentalement l'efficacité de la fibre optique pour détecter des petites fuites d'ammoniac liquide sous pression survenant sur une conduite non calorifugée à travers un orifice correspondant à 5% du Diamètre Nominal (DN).

Les essais ont consisté à simuler des fuites d'ammoniac liquide sous pression, verticales et horizontales, sur une canalisation de 40 mm de diamètre interne, à travers une fente de section équivalente à un trou parfaitement circulaire de diamètre 2 mm (soit 5% du DN). En fonction de la pression interne les débits moyens de fuite ainsi obtenus ont varié de 35 à 55 g/s (126 à 198 kg/h).

Dans les conditions des essais, c'est-à-dire en milieu fermé et légèrement ventilé, la fibre optique (avec une résolution spatiale de 1 m) a mesuré un refroidissement de température de plus de 4°C/min, que cela soit en configuration de rejet vertical ou horizontal. La fibre optique peut assurer sa fonction dès lors que les seuils de détection sont correctement définis.

En appliquant un post-traitement décrit dans le rapport d'essais, l'INERIS a pu conclure que la fibre optique pouvait mesurer une chute de température de quelques degrés (2 à 3°C) pour ces mêmes fuites survenant à l'extérieur en 30 à 60 s.

Dès lors, la chute de température serait plus facile à détecter pour les débits considérés par la profession car la zone refroidie dépend directement du débit de fuite (cf. vidéo des essais NH3 INERIS). Par conséquent, l'INERIS estime que la fibre optique est à même de détecter des fuites d'ammoniac en phase liquide ou diphasique pour des débits minimaux de l'ordre de 50 g/s.

### 2.5.3 DOMAINE D'UTILISATION DE LA FIBRE OPTIQUE

Fuite en phase gazeuse	Fuite en phase liquide ou diphasique				
	Canalisation calorifugée	Canalisation « nue »			
		Débit <50 g/s <sup>5</sup>		Débit >50 g/s	
		Confiné	Aérien	Confiné	Aérien
A priori non pertinent	Adapté (la présence du calorifuge favorise le mouillage de la fibre et donc son refroidissement)	Pas testé (Peu ou pas d'éléments pour évaluer la pertinence)	Non pertinent (la fuite est trop petite pour conduire à une chute de température significative sur la fibre)	Adapté	Adapté

Tableau 2 : Domaine d'utilisation de la fibre optique

Lorsque la canalisation est calorifugée, la fibre doit être positionnée à l'extérieur du calorifuge (ou le cas échéant entre le calorifuge et l'enveloppe extérieure) mais il est fort probable que l'information relative à la localisation de la fuite soit faussée car l'écoulement du fluide se fera au niveau des jonctions de l'enveloppe externe de maintien du calorifuge (la tôle) et pas au niveau de la fuite sur la canalisation. Idéalement, elle peut être positionnée entre le calorifuge et son enveloppe externe de maintien.

**Dans le cas de l'ammoniac (voire produits ayant des propriétés similaires), la fibre ne devra pas être positionnée entre la canalisation et le calorifuge, car la fibre serait à la température du liquide et une fuite de liquide ne provoquerait pas de variation de température au niveau de la fibre.**

Pour rappel, un guide<sup>6</sup> rédigé par la profession propose des bonnes pratiques d'installation de la fibre optique sur des canalisations d'ammoniac liquide.

<sup>5</sup> Les débits seuils indiqués sont des ordres de grandeur issus des essais réalisés par l'INERIS.

<sup>6</sup> Détection de fuites d'ammoniac liquide par fibre optique en milieu industriel : Description de la technologie et référentiel d'installation et d'utilisation, Edition février2015, révision n°3

## **2.6 RETOUR D'EXPÉRIENCE**

Selon les industriels, environ 30 km de fibre ont été installés depuis 2009 en France sur 6 sites industriels, ce qui permet aux industriels d'avoir aujourd'hui un certain retour d'expérience.

Ce retour d'expérience (capitalisant les déclenchements suite à une fuite et les détections de défaillances sur diagnostic et tests) permettra aux industriels de suivre la performance de ce dispositif.

### **2.6.1 RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR DÉCLENCHEMENTS**

La sensibilité de la fibre optique a permis de détecter une microfuite lors de l'installation d'une fibre sur le presse-étoupe d'une vanne. Lors de la mise en service de l'ensemble du système de détection pour le repérage longitudinal, la mesure d'une température plus basse que la température ambiante a permis de constater que la portion de fibre concernée correspondait à son passage à proximité immédiate du défaut d'étanchéité de la vanne en question.

### **2.6.2 RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR DIAGNOSTIC**

Par ailleurs, le module d'auto-test (pour un système utilisé par l'INERIS) permet de valider la réponse du système à une sollicitation de refroidissement de la fibre et permet de détecter très rapidement des indisponibilités du système. Le module d'autotest intègre un enregistrement de toutes les données de tests et permet donc de produire des statistiques permettant de prouver le niveau de confiance du système par le retour d'expérience.

Pour une période de 12 mois de fonctionnement et un test par heure, cela représente plus de 8 600 tests par an. Pour avoir un niveau de confiance de 1, il faut qu'au moins 90% des tests soient positifs.



## **3 PARTIE II – NIVEAU DE CONFIANCE (NC)**

### **3.1 RECONNAISSANCE NC**

La fiabilité de ce système de détection par fibre optique repose sur le bon fonctionnement de son traitement (logiciel et matériel) exécuté, pour les dispositifs connus de l'INERIS à ce jour, par un PC industriel sous Windows. En effet, comme nous n'avons pas été exhaustifs dans l'analyse de tous les systèmes de détection pouvant exister, le parti a été pris de se baser sur ceux qui ont été utilisés par l'INERIS.

Pour être valorisé en tant que dispositif de sécurité, ce système de détection doit respecter les exigences suivantes :

- PC compatible avec les exigences industrielles (CEM<sup>7</sup>, Température, HR<sup>8</sup>, vibration, ...)
- PC dédié uniquement à l'application « Détection » ;
- Installation du système, configuration et test du logiciel par une personne compétente (par exemple le fournisseur) ;
- Unité de traitement équipé d'un Watch-Dog matériel ;
- Réalisation de tests automatiques et manuels (Cf. §3.1.1).

De plus, il doit faire l'objet d'une phase de qualification sur site, conformément aux éléments présentés dans la partie III de ce guide qui permettent de valider sa performance. Sa mise en service doit être réalisée à travers deux phases importantes de vérification et de validation qui doivent être formalisées :

- FAT (Factory Acceptance Test), correspondant aux tests en usine du fabricant ;
- SAT (Site Acceptance Test), correspondant aux tests sur site d'installation.

#### **3.1.1 MOYENS DE TESTS ET DE DIAGNOSTIC**

##### **3.1.1.1 MODULE RELAIS**

Un module relais reçoit en entrée les alertes du logiciel et génère en sortie des signaux d'alarmes et/ou des actions de sécurité.

Le module relais communique avec le logiciel de détection et avec les appareils DTS. L'ensemble des liaisons est surveillé par un protocole avec confirmation des échanges et un chien de garde (ou watchdog) signale une perte de communication entre les différents appareils.

---

<sup>7</sup> CEM : Compatibilité Électromagnétique

<sup>8</sup> HR : Humidité Relative

Le Module Relais est donc utilisé pour transmettre les alertes en cas de détection de fuites, de déclenchement du système d'autotest et en cas de dysfonctionnement du système. Le module relais comporte un programme d'autocontrôle (chien de garde ou watch-dog) qui génère une alerte en cas de dysfonctionnement :

- du système d'exploitation ;
- du logiciel ;
- de l'unité de lecture ;
- de la communication entre les différents appareils.

Les différentes alarmes générées par le module relais sont :

- le dépassement d'un seuil de température ou d'un seuil de variation de température (selon paramétrage), plusieurs relais sont utilisés correspondant aux différentes zones de la tuyauterie et reliés à des séquences de déclenchement différentes. Une zone au début et à la fin de la fibre est réservée au système d'autotest ;
- la fibre cassée ;
- l'arrêt logiciel (watchdog) ;
- le dysfonctionnement de l'unité de lecture DTS ;
- le déclenchement de chaque cycle d'autotest.

La logique de câblage des relais est à sécurité positive (contact ouvert = défaut). De plus, un système permettant l'ouverture volontaire des relais afin de réaliser le test des relais est implémenté. Ce système de test peut être automatique ou manuel.

### 3.1.1.2 MODULE D' AUTOTEST

Le Module Autotest est un appareil indépendant du système DTS qui permet de vérifier le fonctionnement de toute la chaîne de détection. Une fuite d'ammoniac liquide sous pression est simulée par un refroidissement artificiel maîtrisé (par exemple une cellule à effet Peltier) de deux tronçons de 2 m de fibre optique situés dans le module auto test. Ces tronçons de fibre sont inclus au début et à la fin de la boucle de mesure. Ce refroidissement déclenche deux alertes, correspondant aux zones du module relais dédié aux tronçons de fibre du module autotest.

Si un élément de la chaîne est en défaut (câble, appareil DTS, serveur et logiciel, module relais), cette alerte n'est pas déclenchée ce qui permet de détecter un dysfonctionnement propre à l'ensemble du système de détection.

La fréquence de test peut être par exemple d'une fois par heure.

A chaque cycle, le module d'autotest génère une alerte normale « test en cours », juste avant de procéder au refroidissement artificiel de la fibre. En cas de défaut du module d'autotest, cette alerte normale « test en cours » n'est pas envoyée, ce qui permet de détecter un dysfonctionnement de ce module même.

Le module d'autotest enregistre ensuite le temps de réaction du système en attendant que les relais correspondants aux zones de test se déclenchent. En cas de non déclenchement dans un temps prédéfini, un signal d'alerte est émis et est transmis à l'automate de l'usine.

La période d'autotest permet de valider les éléments suivants :

- le bon fonctionnement de l'ensemble DTS (mesure + traitement) ;
- le bon fonctionnement de l'interface relais (uniquement les relais d'autotests).

Ainsi, l'automate de l'usine permet de valider que l'autotest apparaît à chaque période de test (par exemple sur la base d'un test toutes les heures, une période maximum sans ouverture du relais pendant 1h10 est donc anormale). Seul le front d'ouverture du relais est pris en compte. De plus, une alarme peut également être déclenchée si le relais ne se ferme plus (cela permet de détecter la défaillance des relais d'autotest).

### 3.1.1.3 TESTS PÉRIODIQUES

Une inspection visuelle annuelle du bon positionnement des câbles sur les tuyauteries, les accessoires et les équipements et de leurs fixations doit être réalisée avec enregistrement afin de préciser :

- la date des inspections visuelles ;
- le (re)positionnement correct des câbles ;
- la vérification des fixations des câbles de détection ;
- l'absence des dégradations visuelles des câbles ;
- l'étanchéité des boîtes de jonction.

Des tests périodiques (sur les différents tronçons de fibre optique) pour vérifier toute la chaîne de détection et les actions de mise en sécurité sont également à réaliser. Ces tests, effectués une fois par an, doivent être gérés par la procédure de gestion des MMRI en fonction du niveau de confiance requis et du plan de maintenance défini. Ils peuvent consister à refroidir par exemple avec un extincteur de CO<sub>2</sub> une petite partie de la fibre afin de vérifier l'efficacité de tout ou partie de la chaîne de détection.

### 3.1.2 CONCLUSION

Au vu des conditions de mise en œuvre du système présenté dans ce rapport :

- PC compatible avec les exigences industrielles (CEM, température, HR, vibration, ...) et dédié uniquement à l'application « Détection » ;
- Installation du système, configuration et test du logiciel par une personne compétente (fournisseur) ;
- Réalisation des tests automatiques (Watch dog et module autotests) et manuels (inspection visuelle et vérification périodique) ;
- Validation formalisée par des FAT et des SAT.

Sous réserve de la mise en place de tous ces éléments, l'INERIS considère que le niveau de confiance pour l'ensemble du système de détection retenu est de 1 du fait du fonctionnement sous Windows.

Pour des niveaux de confiance supérieurs, la structure et l'architecture doivent être revues (traitement assuré par un PLC<sup>9</sup> spécifique).

### **3.2 PERSPECTIVE POUR UNE CONFORMITÉ SIL**

L'évaluation de la fiabilité de ce dispositif (pour définir son niveau de confiance) peut également reposer sur la base de sa conformité SIL. De plus, sur le marché des dispositifs de sécurité à base d'électronique programmable, la bonne pratique des fournisseurs est de vérifier la conformité SIL.

Cette conformité consiste à vérifier que l'équipement répond aux exigences de la norme NF EN 61508 relative aux systèmes Électriques/ Électroniques/ Électroniques Programmables (E/E/PE) relatifs à la sécurité. Il s'agit d'une démarche volontaire.

La norme NF EN 61508 spécifie des exigences techniques de construction, de démonstration et de validation du niveau de sécurité des systèmes. Les exigences de cette norme portent sur la gestion de la sécurité fonctionnelle.

Les conditions d'obtention du Certificat sont remplies par la validation des éléments suivants :

- Cycle de vie de sécurité global intégrant un système d'assurance qualité de conception, une gestion de documentation et des méthodes de développement permettant d'assurer le suivi de la sécurité fonctionnelle du système ;
- Objectifs qualitatifs et quantitatifs de comportement du système de sécurité en présence de dysfonctionnements ;
- Cycle de vie de développement du logiciel ;
- Activités de tests et de validation (FAT et SAT).

Il est également possible d'évaluer la boucle instrumentée de sécurité dans sa globalité conformément aux normes de sécurité fonctionnelle, en particulier la norme NF EN 61511.

Pour mémoire, la doctrine MMRI du 2 octobre 2013 exige une conformité aux normes de sécurité fonctionnelle NF EN 61508 et/ou NF EN 61511 (conformité SIL) dans les cas où le système est valorisé dans une nouvelle MMRIS et que celle-ci est assurée par un automate de sécurité qui gère à la fois la conduite (uniquement des opérations de conduite simples comme des actions binaires) et la sécurité d'un process industriel.

---

<sup>9</sup> PLC : Programmable Logic Controller

## 4 PARTIE III – GUIDE DE CONCEPTION, D'INSTALLATION, D'EXPLOITATION ET DE MAINTENANCE D'UN SYSTEME DE DETECTION PAR FIBRE OPTIQUE

Cette partie a pour objectif de préciser les éléments à prendre en compte pour la conception, l'installation, l'exploitation et la maintenance d'un tel dispositif ainsi que pour l'évaluation de la performance du dispositif une fois que celui-ci est installé.

Elle est destinée :

- d'une part, aux exploitants industriels et aux fournisseurs pour sa maîtrise et sa mise en place sur site ;
- d'autre part, aux inspecteurs des installations classées pour vérifier sa performance.

Le paragraphe 4.1 présente le questionnement à dérouler dans le cadre de la mise en place de la fibre optique et le paragraphe 4.2 présente le questionnement dans le cas d'une évaluation a posteriori du système.

### 4.1 PROCESSUS DE DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTÈME DE DÉTECTION

Pour dimensionner un système de détection quel qu'il soit, il est indispensable de prendre en compte la spécificité du/des scénarios de fuite dont on veut se protéger ainsi que la spécificité du site sur lequel elles pourraient survenir.

Un panel de scénarios doit être identifié car le dimensionnement vis-à-vis notamment des critères efficacité et temps de réponse ne repose pas sur un seul scénario mais sur plusieurs scénarios tels que :

- Une fuite majeure (rupture guillotine) sera dimensionnante vis-à-vis d'un temps de réponse requis ;
- Une petite fuite sera dimensionnante vis-à-vis de la résolution spatiale et des seuils de déclenchement ;
- Des scénarios intermédiaires seront également définis avec des tailles de brèche et/ou des orientations de fuite variables.

**Une optimisation est donc à rechercher sur l'ensemble de ces critères pour définir un cahier des charges.** En tout état de causes, dès lors que la technologie le permet, il convient de ne pas se limiter aux scénarios d'accidents majeurs.

Un exemple de dimensionnement pour un scénario donné est présenté dans l'annexe 2.

De fait, l'exploitant devra répondre aux questions suivantes pour bien dimensionner son dispositif :

Q1. Identifier clairement les scénarios de fuite pour lesquels la fibre optique sera mise en place et les caractériser

Q2. Traduire les modélisations des scénarios en termes de spécifications pour la fibre optique

- Q3. Prise en compte de l'environnement météo et procédés dans le fonctionnement de la fibre
- Q4. Fonctionnement proprement dit de la fibre
- Q5. Adéquation implantation de la fibre / scénarios
- Q6. Traitement du signal reçu avant action
- Q7. Post traitement pour action
- Q8. Action déclenchée en cas de dépassement des seuils (traitement aval dans la chaine complète de sécurité)
- Q9. Vérification que le temps de réponse de la chaine de sécurité est compatible avec l'objectif
- Q10. Modes communs, causes communes de défaillance et niveau de confiance
- Q11. Réception, exploitation, maintien en condition opérationnelle, gestion de l'obsolescence

#### **Q1 – Identification et caractérisation des scénarios de fuite**

L'objectif est d'identifier les scénarios de fuite, dont on cherche à atténuer les effets, afin de caractériser le plus finement possible le rejet formé près des fuites (liquide ou diphasique) ou plus loin (gazeux ou brouillard). Il peut s'agir par exemple de scénarios de fuite qui conduisent à des effets jugés inacceptables pour les travailleurs et/ou riverains du site.

#### **Q2 – Traduction de la modélisation des scénarios en spécifications pour le dispositif de détection**

Le fournisseur de la fibre optique n'est pas nécessairement en mesure de traduire les enseignements des résultats de la modélisation des scénarios de fuite en spécifications (position de la fibre, seuils de déclenchement, temps de détection) pour son dispositif de détection.

Pourtant, ce traitement est nécessaire pour pouvoir montrer ultérieurement l'adéquation entre les performances de la fibre optique et les spécifications attendues. A partir de ces informations, le fournisseur pourra paramétrer le dispositif de détection afin d'assurer sa fonction de sécurité.

#### **Q3 – Prise en compte de l'environnement météo et du procédé dans le fonctionnement du dispositif**

Il s'agit ici d'identifier les perturbations possibles de la détection par fibre optique du fait de l'environnement au sens large : la météo (influence du vent, de la neige, de l'ensoleillement qui peuvent créer des différentiels de températures sur un même site), le procédé et toutes les phases transitoires liées au transfert. Il faudra aussi prendre en considération les impacts éventuels associés à des travaux à proximité (chocs, pincement,...).

L'objectif de cette question repose notamment sur le bon positionnement du curseur entre la détection des fuites et le déclenchement minimal de fausses alarmes.

#### **Q4 – Fonctionnement proprement dit du dispositif**

La détection par fibre optique étant plutôt nouvelle dans le monde industriel, il est important de consacrer un chapitre à la description du dispositif, son principe de fonctionnement, sa résolution spatiale... et bien évidemment, si l'information est disponible, fournir du REX sur son implantation. Cette description doit notamment montrer les écarts avec celle faite en première partie de ce guide afin d'en évaluer le niveau de confiance par exemple.

#### **Q5 – Adéquation de l'implantation du dispositif par rapport aux scénarios**

Pour la fibre optique, la démonstration doit être faite que l'implantation de la fibre permet de détecter l'ensemble des scénarios de fuite identifiés en Q1 quelles que soient les conditions météorologiques.

#### **Q6 – Traitement du signal reçu avant action**

La fibre optique renvoie un signal optique qu'il convient de transformer avant de l'utiliser pour déclencher une action ou non. Il est important de savoir comment ce signal est transformé et de connaître ses caractéristiques (fréquence d'acquisition de la température sur une portion donnée, comment la température moyenne spatiale est-elle calculée ?...)

#### **Q7 – Post-traitement pour action**

Une fois le signal transformé, il est nécessaire de décrire précisément le processus qui conduit à une action ou pas, en d'autres termes de préciser les critères de déclenchement.

Il serait pertinent de présenter le processus (sous la forme d'un logigramme par exemple) et de bien mettre en évidence les critères de déclenchement (chute de température de XX°C sur une minute, chute de température de YY°C en 5 secondes, écart de température de ZZ°C entre deux tronçons successifs, ...).

Ces critères doivent être définis en fonction des éléments de réponse de Q3.

#### **Q8 – Actions déclenchées en cas de dépassement des seuils (traitement aval dans la chaîne de sécurité)**

En cas de dépassement de seuils, il faut s'assurer que le traitement aval le détecte et pour les actionneurs, il reste à démontrer, pour chaque implantation de la fuite, que les équipements actionnés sont en nombre suffisant, bien positionnés, efficaces et actionnables dans un délai compatible.

#### **Q9 – Vérification que le temps de réponse de la chaîne de sécurité est compatible avec l'objectif**

Une fois les exigences précédentes satisfaites, il est nécessaire de démontrer que la durée de mise en œuvre de la chaîne complète depuis le début de la fuite jusqu'à son arrêt est inférieure au temps nécessaire à la formation d'un nuage présentant un risque inacceptable.

#### **Q10 – Modes communs / causes communes de défaillance et NC**

Une étude qualitative des causes communes et modes communs de défaillance et/ou des mesures prises pour les limiter nous semble importante afin de démontrer que ceux-ci ne viennent pas dégrader le niveau de confiance global de la fonction de sécurité.

### Q11 – Réception, exploitation, Maintien en condition opérationnelle, gestion de l'obsolescence

La configuration du logiciel (algorithme de détection) étant très particulière et au cœur du système, celle-ci ne peut être réalisée et modifiée que par du personnel compétent ; Du coup, la disponibilité à long terme (maintien en condition opérationnelle, obsolescence) de ce système nécessite un personnel maîtrisant le matériel (pièce de rechange) et le logiciel (compétence pour évaluer l'impact des mises à jour et des modifications sur l'efficacité).

Cet aspect doit être pris en compte par l'industriel pour définir sa politique de maintenance (contrats de soutien du fournisseur, stocks de pièces de rechanges, formations spécifiques, ...). De plus, les industriels devront assurer un suivi formalisé de ce système pour avoir un retour d'expérience.

Tableau 3 : Objectif des différentes questions du processus de dimensionnement

Le tableau suivant précise qui est en charge (entre l'exploitant et le fournisseur) de traiter les différentes questions du processus de dimensionnement et de mise œuvre d'un nouveau dispositif de détection de fuite :

		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11
1	Définition du cahier des charges EXPLOITANT	X	X	X								
2	Description du système de détection FOURNISSEUR				X		X				X	
3	Démonstration de l'adéquation du système de détection FOURNISSEUR et EXPLOITANT		X			X		X	X	X	X	
4	Implantation et réglage du système de détection EXPLOITANT ET FOURNISSEUR		X			X	X	X	X	X		
5	Réception sur site EXPLOITANT						X	X	X	X	X	X
6	Exploitation du système de détection EXPLOITANT											X
7	Maintenance du système de détection EXPLOITANT ET FOURNISSEUR											X

Tableau 4 : Interaction entre les intervenants et les différentes questions du processus de dimensionnement

## 4.2 ÉVALUATION A POSTERIORI DU SYSTÈME

Dans l'optique de l'évaluation a posteriori du système pour un(des) scénario(s) donné(s) (cadre de l'instruction d'une étude de dangers ou d'une inspection par exemple), on s'intéresse à un(des) scénario(s) explicite(s).

**Il faut évaluer, pour chaque scénario considéré (Q1), les performances du système :**



Critères de performances	Questions concernées
Description du système	Q4
Efficacité	Q5, Q6, Q3, Q7
Temps de réponse	Q2, Q8
NC	Q10, Q11
Testabilité et maintenabilité	Q9

Tableau 5 : Relation entre les critères de performance et les différentes questions du processus de dimensionnement

L'exemple en annexe 2 illustre les possibilités de réponses aux questions posées.

**Le point de départ de l'évaluation est le(s) scénario(s) de fuite considéré(s) et correspond donc à la première question (Q1) du processus de dimensionnement présenté au paragraphe 4.1.**

Q1 – identification et caractérisation des scénarios de fuite	
Points à vérifier	<p>Est-ce que la description du(des) scénario(s) comprend les éléments suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nature du scénario (fuite canalisation / ras de paroi / diamètre)</li> <li>• Justification du scénario choisi</li> <li>• Débit en fonction du temps</li> <li>• Durée de fuite (du scénario « brut », du scénario permettant de protéger les cibles), c'est une indication essentielle pour s'assurer que la barrière joue bien le rôle attendu</li> <li>• Prise en compte de la vidange après action</li> <li>• Localisation de la fuite</li> <li>• Caractéristiques du rejet (température, fraction liquide, dimensions de l'écoulement liquide et du panache ...)</li> </ul>

Efficacité	
<p><b>Q5 - Adéquation implantation de la fibre / scénarios :</b></p> <p>La fibre est positionnée sous la génératrice, présentant l'avantage de détecter potentiellement toute fuite par ruissellement.</p>	
Points à vérifier	<p>Comment le fournisseur justifie-t-il que la position proposée pour la fibre est bien pertinente ?</p> <p>Comment s'assure-t-on que les fuites sont bien localisées ?</p>
<p><b>Q6 - Traitement du signal reçu avant action</b></p> <p>La résolution spatiale et le seuil de déclenchement doivent être compatibles avec les scénarios envisagés.</p> <p>Pour un scénario donné, la longueur de fibre impactée par la baisse de température dépend de la position de la fibre par rapport à la fuite. Le seuil de déclenchement doit donc être adapté à la position de la fibre et/ou au scénario envisagé (un exemple est présenté en Annexe 2).</p> <p>Plus la longueur impactée est importante, plus la moyenne sur la résolution spatiale sera importante. Dans ce cas, des seuils de déclenchements relativement élevés sont possibles. Cependant, pour des fuites plus petites pour lesquelles la longueur de jet et/ou le refroidissement seraient plus faibles, la moyenne sur la résolution spatiale serait plus faible.</p> <p>Une optimisation doit donc être trouvée entre seuil de déclenchement et risque de déclenchement intempestif.</p>	
Points à vérifier	<p>Comment est réalisé l'étalonnage de la fibre optique sur la plage de température prévue pour le fonctionnement ?</p>
<p><b>Q3 - Prise en compte de l'environnement météo et procédés dans le fonctionnement de la FO</b></p> <p>Il faut étudier dans quelle mesure des déclenchements intempestifs (chute de température en l'absence de fuite) seraient possibles liés à des variations normales de fonctionnement et/ou des conditions météorologiques spécifiques. Dans ce cas, il est nécessaire de les prévenir en mettant en œuvre plusieurs seuils de détection et des logiques de prise en compte de ces différents seuils (cf. Q7). La nécessité de réduire les déclenchements intempestifs peut conduire à des traitements de l'information importants et augmenter le temps de réponse du système de détection.</p> <p>Afin d'éviter les déclenchements intempestifs, des modifications pourront également être nécessaires sur les installations proches de la tuyauterie (exemple : déporter des purges, ...).</p>	

Points à vérifier	<p>Quels sont les points particuliers de l'exploitation qui pourraient perturber le fonctionnement de la fibre optique ?</p> <p>Est-ce que ces points ont été identifiés par l'exploitant et transmis au fournisseur via le cahier des charges par exemple ?</p> <p>Est-il prévu de traiter ce point particulier lors de la phase de réglage sur site ?</p> <p>Voici quelques points qui pourraient être évoqués :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Phases d'exploitation pouvant engendrer des variations de température (phases transitoires : vidange, approvisionnement,...)</li> <li>• Conditions météorologiques du site</li> <li>• Points de purge, soupapes...</li> </ul>
<p><b>Q7 - Traitement pour action</b></p> <p>Les seuils de détection doivent être définis en fonction des fuites possibles (capacité à détecter les fuites) tout en limitant les déclenchements intempestifs (baisse de température en l'absence de fuite). Pour cela différents seuils sont envisageables. Des logiques de vote sont souvent prises en compte ; elles sont alors à analyser pour s'assurer qu'elles ne sont pas mises en œuvre au détriment de la sécurité.</p>	
Points à vérifier	<p>Quels sont les critères et sont-ils compatibles avec les éléments définis au Q3 ?</p> <p>Comment l'exploitant s'assure que le dispositif limite les fausses alarmes (phase de réglage) ?</p> <p>Comment sont pris en compte les signaux de défaut transmis par la fibre ?</p>

Lorsque l'efficacité de la détection est validée (étape précédente), les choix effectués concernant la résolution spatiale, les seuils de détection... déterminent le temps de réponse du système de détection pour le scénario étudié.

## Temps de réponse

### Q2 - Traduire les modélisations des scénarios en termes de spécifications pour la fibre optique

Le temps de réponse de la fibre optique doit être précisé. Il dépend essentiellement :

- de la résolution spatiale, du nombre de seuils de déclenchement et des logiques de vote mises en œuvre... ; le temps de migration du signal reste toujours négligeable (de l'ordre de la milliseconde) ;
- du seuil de déclenchement mis en œuvre ; le temps de réponse dépendra notamment de la durée sur laquelle s'effectue la comparaison des températures (de quelques secondes à quelques minutes selon les seuils concernés).

Le temps de réponse global de la barrière devra intégrer ce temps de réponse de la fibre optique mais aussi :

- le temps de réponse pour que le rejet (liquide, gaz, aérosol) atteigne la fibre et que la fibre se refroidisse : ce temps est a priori de l'ordre de la seconde ;
- le temps de réponse du reste de la chaîne de sécurité (partie traitement et mise en œuvre des actionneurs). Ces temps dépendent des conditions de chaque site (temps de fermeture de vannes...)

Pour un contexte d'utilisation donné, il sera donc possible de déterminer la cinétique du scénario résiduel et de vérifier son positionnement vis-à-vis des critères d'acceptabilité.

Points à vérifier	<p>Quelles sont les spécifications transmises au fournisseur ?                  Contiennent-elles les éléments suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Température et longueur exposées de la FO</li> <li>• Temps de réponse du capteur compatible avec la fonction souhaitée (temps d'atteinte de la fibre + temps de détection)</li> </ul> <p>Idéalement, il faudrait pouvoir disposer d'un diagramme temporel de ce type :</p>				
	Différentes phases de la fuite :				
	Fuite alimentée			Vidange des canalisations	
	Décomposition de la durée totale d'exposition des cibles suite à la détection de la fuite et à l'action programmée après la détection :				
	Temps d'atteinte des capteurs	Temps de détection de la fuite	Temps de traitement de l'information	Temps d'action pour arrêter la fuite	Temps de vidange des canalisations
Durée totale potentielle d'exposition des cibles, cette durée doit être suffisamment courte pour que les cibles ne soient pas exposées à des doses conduisant à des effets non désirés...					

	<p>Les temps indiqués en noir sont des données d'entrée qui relèvent des caractéristiques du site (automate, actionneur, section isolée, distance aux cibles).</p> <p>En rouge, ce sont des temps qui vont dépendre des performances de la fibre optique et de son positionnement, la somme de ces deux temps additionnée du temps de traitement de l'information et de fermeture des vannes d'isolement doit être inférieure à la durée de fuite. On parlera pour cette somme de temps de réponse du capteur. A ce temps devra être ajouté le temps de vidange de la tuyauterie.</p>
<p><b>Q8 - Actions déclenchées en cas de dépassement des seuils (traitement aval dans la chaîne de sécurité)</b></p> <p>Les actions mises en œuvre en cas de détection doivent être précisées (fermeture de vannes, arrêt de pompes...), pour analyse du scénario résiduel avec fonctionnement effectif de la barrière.</p> <p>Pour un contexte d'utilisation donné, il sera donc possible de déterminer la cinétique du scénario résiduel et de vérifier son positionnement vis-à-vis des critères d'acceptabilité.</p> <p>Il convient de rappeler, que pour être valorisé en tant que MMRI, le déclenchement de ce dispositif doit entraîner une mise en sécurité. Le temps nécessaire pour la mise en sécurité (asservissement associé à la détection) doit être compatible avec la cinétique du scénario de fuite considéré.</p>	
Points à vérifier	<p>Les actions de sécurité sont-elles compatibles avec le scénario de fuite ?</p> <p>S'assure-t-on qu'on isole les bons organes en fonction de la fuite ?</p>

Le NC doit être apprécié en fonction des critères présentés au chapitre 3. De plus, d'autres critères doivent être pris en compte (sécurité positive, existence de tests périodiques, de procédures d'installation, mise en service, modifications...).

<p><b>Niveau de Confiance (NC)</b></p>	
<p><b>Q10 - Modes Communs, causes communes de défaillance et niveau de confiance</b></p> <p>Les défauts externes (type rupture de câble) et internes doivent être détectés. La fibre doit être à sécurité positive. Des inspections visuelles périodiques permettent de surveiller l'état du système.</p> <p>Des tests SAT et FAT ainsi qu'un module d'autotests sont nécessaires pour valider la performance en NC1 d'un tel dispositif dont le traitement est assuré à ce jour sous PC Windows. D'autres critères figurent au chapitre 3.</p>	
Points à vérifier	<p>Quels sont les événements identifiés qui pourraient conduire à une fuite et un dysfonctionnement de la fibre (par exemple agression mécanique) ?</p> <p>Quelles sont les parades vis-à-vis de ses agressions ?</p>

	<p>Le module d'autotest est-il mis en œuvre ?</p> <p>Les vérifications (inspections visuelles et tests fonctionnels) sont-elles réalisées ?</p>
<p><b>Q11 - Réception, exploitation, maintien en condition opérationnelle, gestion de l'obsolescence</b></p> <p>La performance du système doit aussi s'appuyer sur des procédures de mises en service, suivi, gestion de modifications spécifiques. Un contrat de suivi avec le fournisseur doit être établi.</p>	
Points à vérifier	<p>Les opérateurs de conduites ont-ils été formés à l'exploitation de ce système ?</p> <p>Qui sont les personnes qui peuvent intervenir sur le réglage (seuils, ...) ? Si ce n'est pas le fournisseur, comment ont-elles acquis les compétences pour le faire ?</p> <p>Comment sont gérées les modifications ?</p> <p>L'industriel respecte-t-il les prescriptions du DT93 (si applicable) et la doctrine MMRI du 2 octobre 2013 dans le cas où le dispositif est valorisé comme élément d'une MMRI ?</p>

Le maintien des performances d'une barrière dans le temps doit être assuré. Les tests périodiques sont réalisés pour valider ces performances. Ils doivent inclure l'ensemble de la chaîne de sécurité.

<b>Testabilité et maintenabilité</b>	
<p><b>Q9 - Vérification que le temps de réponse de la chaîne de sécurité est compatible avec l'objectif</b></p> <p>Il est nécessaire de vérifier périodiquement que la chaîne de sécurité reste performante. Pour cela des essais sont réalisés périodiquement en refroidissant ponctuellement la fibre et en vérifiant la mise en œuvre de la chaîne de sécurité. Le temps de réponse peut à cette occasion être vérifié.</p> <p>Note : les autotests permettent également de vérifier périodiquement le bon fonctionnement de la partie traitement (matériel et logiciel) du système de détection (cf. Q10).</p>	
Points à vérifier	<p>Est-ce que les caractéristiques cinétiques de la chaîne du dispositif est en adéquation avec les éléments de Q2 ?</p> <p>Comment ces caractéristiques ont-elles été obtenues ? Par un test complet sur site ou par des tests partiels ?</p> <p>Pour des cas de tests partiels, comment sont gérées les interfaces ?</p>

## 5 CONCLUSION

Le système de détection de fuite par fibre optique permet de mesurer et de donner le profil de température sur toute la longueur de la fibre.

Le traitement des mesures effectuées permet de connaître le lieu (ou les lieux) où la fibre subit une chute de température dépassant une valeur seuil.

La fibre optique apparait donc comme un système efficace de détection de fuite de substance générant une baisse de température en cas de fuite. La méthode de mesure se révèle très intéressante si la fibre est correctement positionnée par rapport aux sources potentielles de fuite.

Les points à considérer pour statuer sur les critères de performance de ce dispositif sont les suivants :

- **Pour l'efficacité :**

Concernant l'ammoniac, cette technique de détection est réservée aux tuyauteries et équipements contenant de l'ammoniac liquide afin que la fibre optique puisse être refroidie lors de la détente et la vaporisation de l'ammoniac pendant son émission à l'atmosphère.

Le tableau suivant rappelle le domaine d'utilisation de ce système de détection de fuite par fibre optique.

Fuite en phase gazeuse	Fuite en phase liquide ou diphasique				
	Canalisation calorifugée	Canalisation « nue »			
		Débit <50 g/s <sup>10</sup>		Débit >50 g/s	
		Confiné	Aérien	Confiné	Aérien
A priori non pertinent	Adapté (la présence du calorifuge favorise le mouillage de la fibre et donc son refroidissement)	Pas testé (Peu ou pas d'éléments pour évaluer la pertinence)	Non pertinent (la fuite est trop petite pour conduire à une chute de température significative sur la fibre)	Adapté	Adapté

Tableau 6 : Domaine d'utilisation de la fibre optique

Lors d'une fuite d'ammoniac liquide, les frigories et l'ammoniac vont se disperser dans l'environnement en fonction de nombreux paramètres et notamment du vent.

Afin de discriminer l'origine, de limiter le temps de détection et d'augmenter les possibilités de mesure de variation de la température, une longueur de fibre doit être installée au plus près et sous les sources potentielles de fuite.

<sup>10</sup> Les débits seuils indiqués sont des ordres de grandeur issus des essais réalisées par l'INERIS.

Pour détecter une fuite d'ammoniac, une longueur minimale de fibre (qui dépend de la résolution spatiale) doit être soumise à une variation de température.

En fonction des conditions de rejet et de dispersion, différents seuils doivent être utilisés simultanément pour détecter une fuite, soit deux seuils de variations de température temporelle :

1. Une rapide chute de température en un temps court ; ce seuil est particulièrement adapté pour les portions de fibre se trouvant mouillées par un écoulement ou des vésicules d'un brouillard d'ammoniac qui entraînent une baisse rapide de la température.
2. Une chute de température sur un temps plus long ; ce seuil est adapté pour la détection de fuites qui entraînent une baisse plus progressive de la température par convection liée à nuage gazeux d'ammoniac lorsque la fibre est plus éloignée du point de fuite.

Ces sens et seuils de variation de température sont à déterminer de manière à ce qu'ils soient toujours significativement différents des variations naturelles et des variations associées aux opérations d'exploitation des installations d'ammoniac.

Pour éviter d'activer une alarme du fait d'un ombrage d'une partie de la fibre optique ou du fait d'un remplissage de l'installation en ammoniac, un seuil de variation spatiale de température peut être aussi utilisé.

Il est donc nécessaire pour l'utilisateur :

- d'une part, d'identifier toute variation de température normale de l'environnement proche du lieu de passage de la fibre optique. Une période de mise au point de la mesure permet de s'assurer qu'il n'existe pas de cause potentielle de fausses alertes. Afin d'éviter les déclenchements intempestifs, des modifications pourront être nécessaires sur les installations proches de la tuyauterie (exemple : déporter des purges, ...) ;
- d'autre part, de le combiner avec les autres seuils (seuils de variations de température temporelle) pour fixer les conditions de déclenchement.

- **Pour le temps de réponse :**

Le temps de mesure est dépendant de plusieurs facteurs :

- les conditions de rejet et de dispersion de l'ammoniac ;
- la longueur de fibre ;
- la précision recherchée (résolution spatiale, ...) ;
- les seuils de variation de température retenus.

La précision de la température, la précision du positionnement de la mesure sur la longueur de fibre surveillée et le temps de mesure sur toute la longueur de la fibre sont interdépendants et nécessitent donc d'être optimisés globalement en fonction du ou des scénarios qui doivent être détectés.



Il convient de rappeler, que pour être valorisé en tant que MMRI, le déclenchement de ce dispositif doit entraîner une mise en sécurité. Le temps nécessaire pour la mise en sécurité (asservissement associé à la détection) doit être compatible avec la cinétique du scénario de fuite considéré.

- **Pour le Niveau de Confiance :**

La fiabilité de ce système de détection par fibre optique repose sur le bon fonctionnement de son traitement (logiciel et matériel) exécuté, pour les dispositifs connus de l'INERIS à ce jour, par un PC industriel sous Windows.

Au vu des conditions de mise en œuvre du système présenté dans ce rapport :

- PC compatible avec les exigences industrielles (CEM, Température, HR, vibration, ...) et dédié uniquement à l'application « Détection » ;
- Installation du système et configuration et test du logiciel par une personne compétente (fournisseur) ;
- Réalisation des tests automatiques (Watch dog et module autotests) et manuels (inspection visuelle et vérification périodique) ;
- Validation formalisée par des FAT et des SAT.

Sous réserve de la mise en place de tous ces éléments, l'INERIS considère que le niveau de confiance pour l'ensemble du système de détection retenu est de 1 du fait du fonctionnement sous Windows.

Pour des niveaux de confiance supérieurs, la structure et l'architecture doivent être revues. L'évaluation de la fiabilité de ce dispositif peut également reposer sur la base d'une conformité SIL (du matériel et du logiciel).

- **Pour la testabilité et la maintenabilité :**

Le système de détection par fibre optique fait l'objet d'auto-tests périodiques de bon fonctionnement (intégrés au système). D'autre part, des tests périodiques de bon fonctionnement incluant la chaîne de sécurité globale doivent également être mis en œuvre périodiquement sur tous les tronçons de fibre optique.

**En conséquence -et comme pour toutes les autres méthodes de détection de fuite d'ammoniac- la détection par fibre optique est un système de détection qui peut être efficace. Les performances sont à optimiser en termes d'efficacité ou de temps de réponse selon les fuites d'ammoniac envisagées.**

**L'évaluation des performances doit être réalisée au cas par cas, dans le contexte d'utilisation, pour des fuites données et des performances données de la fibre.**

De plus, pour valoriser la détection par fibre optique en tant que MMRI dans une EDD, il convient de vérifier la conformité à la doctrine MMRI du 2 octobre 2013.



## 6 LISTE DES ANNEXES

<b>Repère</b>	<b>Désignation</b>	<b>Nombre de pages</b>
Annexe 1	Fonctionnement de la Fibre Optique	4
Annexe 2	Exemple applicatif du dimensionnement d'une détection par FO pour une fuite d'ammoniac sur un tronçon court de tuyauterie	16



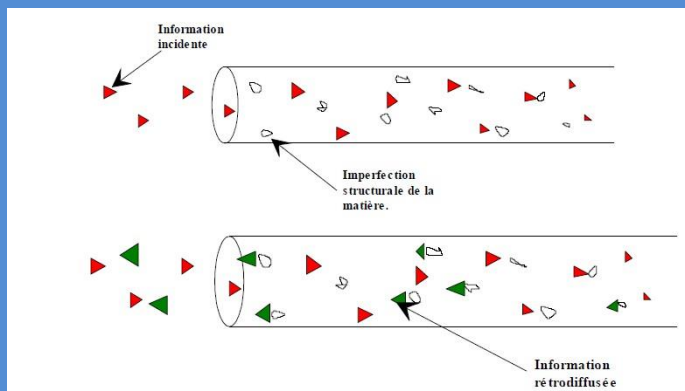
## **Annexe 1**

# **Fonctionnement de la fibre optique**

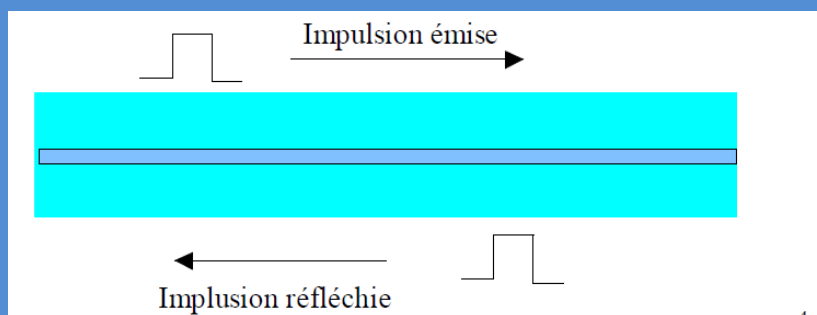


## Principe de fonctionnement de la rétrodiffusion

La rétrodiffusion consiste à mesurer le temps mis par une impulsion lumineuse pour aller et revenir dans la liaison.



La vitesse dans la fibre est d'environ :



### La résolution spatiale :

La distance d'un point sur la fibre au réflectomètre est égale à :

$D = T \times C/2n$  (avec  $T$  : temps de trajet aller et retour de l'impulsion). Pour les fibres optiques en silice  $D = (T \times 100)$  en m

Le **pouvoir séparateur** dépend du choix de l'impulsion.

Si  $L = 10\text{ns}$ , le pouvoir séparateur correspondra à 1 mètre.

Le pouvoir séparateur est d'autant meilleur que l'impulsion est étroite.

En résumé, plus la résolution spatiale est élevée, plus le réflectomètre pourra distinguer de défauts voisins. Pour cela, les impulsions doivent être brèves (exemple une nanoseconde).

Dans ce cas la longueur explorée sera réduite.

Le pouvoir séparateur d'un réflectomètre est sa capacité à distinguer deux (ou plusieurs) défauts consécutifs. Il est directement lié à la largeur d'impulsion choisie et à l'amplitude du défaut.

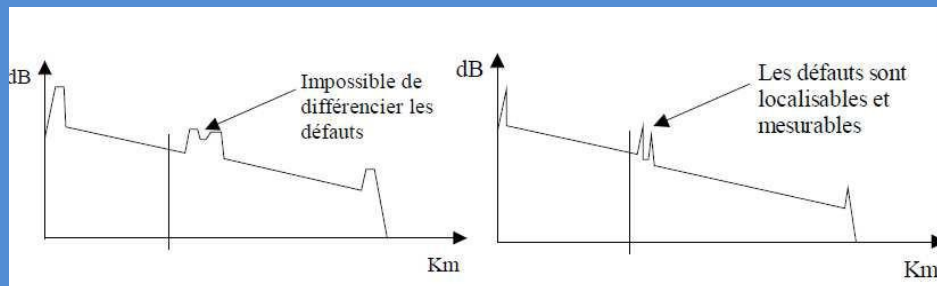
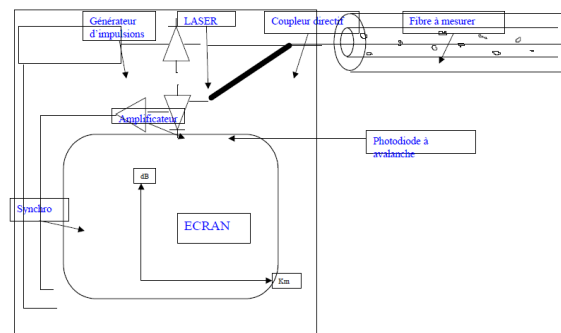
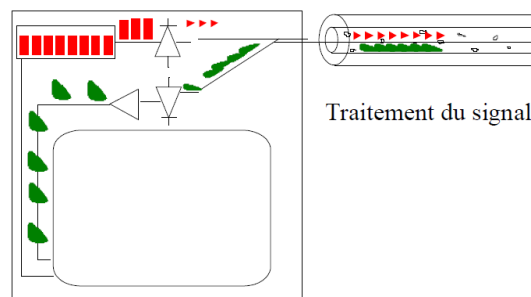


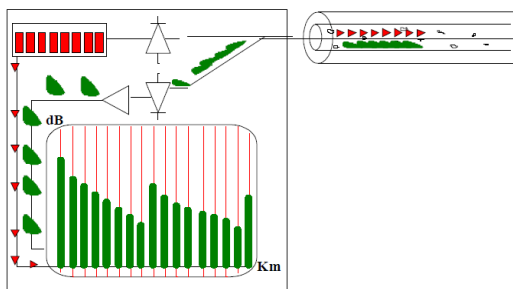
Schéma de principe de réflectomètre:



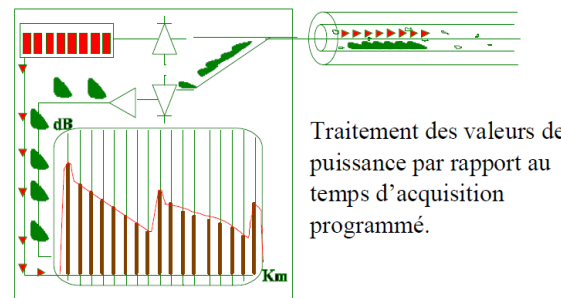
Choix des impulsions: Impulsions courtes (suite)



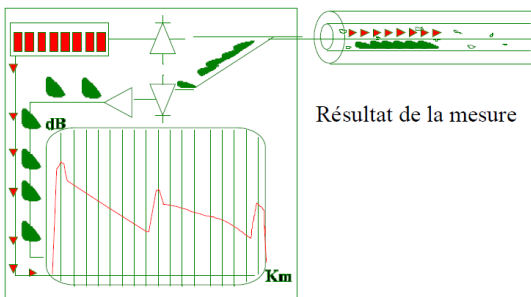
Choix des impulsions: Impulsions courtes (suite)



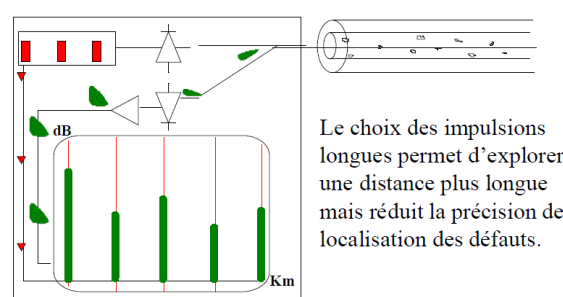
Choix des impulsions: Impulsions courtes (suite)



Choix des impulsions: Impulsions courtes (suite)



Choix des impulsions: Impulsions longues

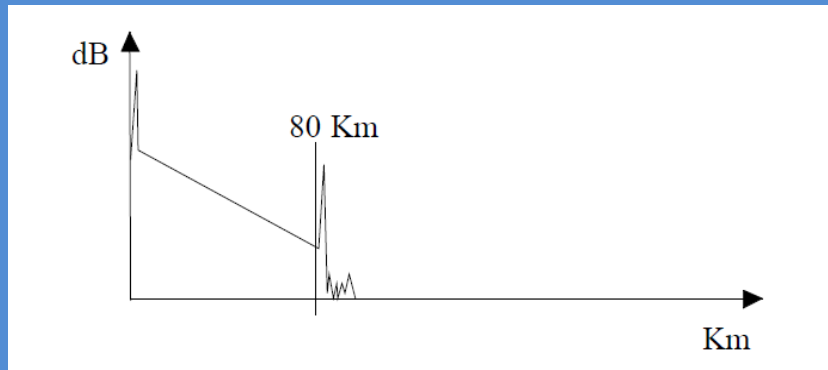


### La Dynamique de mesure :

La distance d'exploration d'une liaison dépend de la puissance d'injection du signal. En effet il faut que la lumière puisse faire l'aller et le retour avant d'être traitée par le réflectomètre.



L'**atténuation** est le rapport entre la lumière envoyée et la lumière reçue. En réalité, l'atténuation est double car il y a l'aller mais aussi le retour de la lumière dans la fibre.

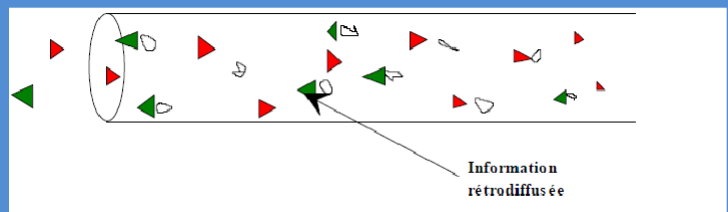


**La réflectance d'un événement :**

C'est le rapport entre la puissance incidente et la puissance réfléchie aux événements (épissure mécanique, connecteurs, etc...)

**Le coefficient de diffusion :**

Le coefficient de diffusion d'une fibre représente la quantité de lumière rétrodiffusée par la fibre. Ces coefficients sont spécifiques à chaque fibre et dépendent de la longueur d'onde.



**Indice de réfraction :**

Noté « n », c'est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse dans le milieu considéré.

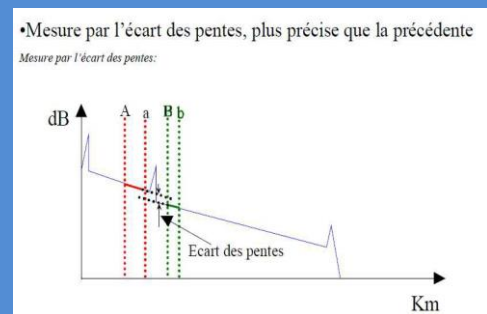
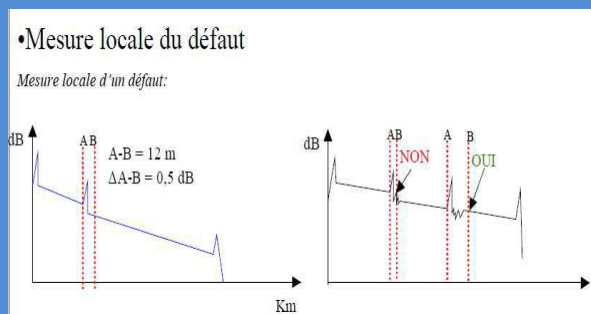
$$n = C/v$$

C'est un paramètre important en réflectométrie car il permet la localisation d'un événement (en Km), par rapport au temps mis par l'impulsion pour aller et revenir. Une imprécision d'indice provoque une erreur de localisation.

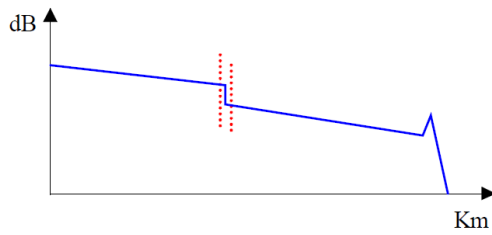
**La fréquence de répétition (portée) :**

Elle est choisie en fonction de la longueur de la liaison à mesurer. Une nouvelle impulsion ne doit pas être émise tant que la première n'a pas parcourue le trajet aller et retour de la longueur de la fibre.

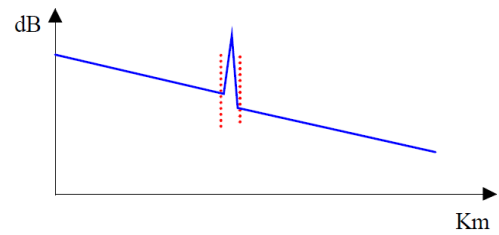
**Mesure des défauts :**



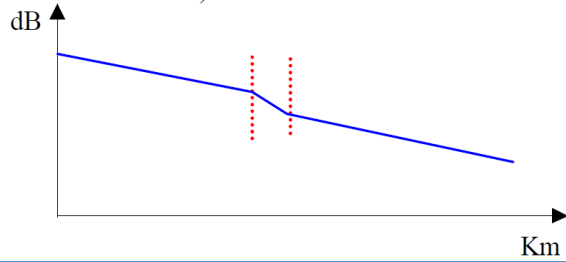
1) Défaut non réfléchissant (épissures, contraintes):



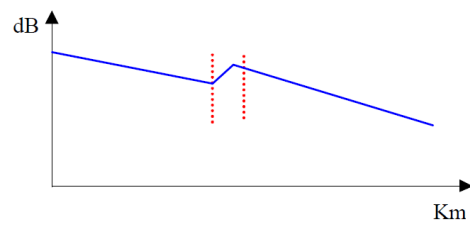
2) Défaut réfléchissant (épissures mécanique, fibre cassée, connecteur):



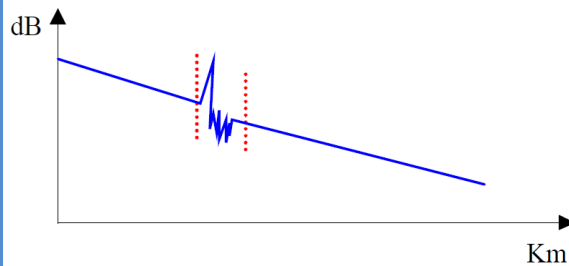
3) Défaut non réfléchissant avec changement de pente (contrainte sur la fibre):



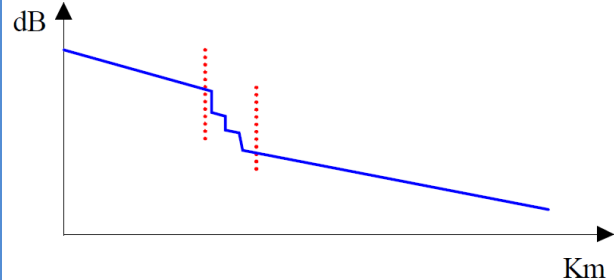
4) Défaut positif (variation du coefficient de rétrodiffusion, variation du diamètre de champ de mode):



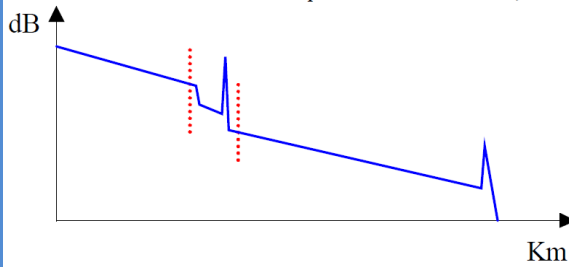
5) Fibre stressée



6) Défauts non réfléchitifs cumulés (soudure et lovage)



7) Défauts non réfléchitifs cumulés à un défaut réfléchitif (Rayon de courbure avant une connectique ou cassure de fibre)



Référence : <http://sti.mermoz.free.fr/mo/fo/reflectometrie.pdf>

## **Annexe 2**

### **Exemple applicatif du dimensionnement d'une détection par FO pour une fuite d'ammoniac sur un tronçon court de tuyauterie**

NB : Ce n'est qu'un exemple théorique non transposable à une situation réelle. Les justifications sont à adapter au cas réel.



## Q1 – Identification et caractérisation du scénario de fuite

Objectif de l'item :	L'objectif de cette étude est d'identifier le scénario de fuite, dont on cherche à atténuer les effets, afin de caractériser le plus finement possible le nuage formé près de la fuite (liquide ou diphasique) ou plus loin (gazeux ou brouillard). Il peut s'agir par exemple de scénarios de fuite qui conduisent à des effets jugés inacceptables pour les travailleurs et/ou riverains du site.
Points à vérifier	<p>Est-ce que la description du(des) scénario(s) comprend les éléments suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Nature du scénario (fuite canalisation / ras de paroi / diamètre)</li><li>• Justification du scénario choisi</li><li>• Débit en fonction du temps</li><li>• Durée de fuite (du scénario « brut », du scénario permettant de protéger les cibles), c'est une indication essentielle pour s'assurer que la barrière joue bien le rôle attendu</li><li>• Prise en compte de la vidange après action</li><li>• Localisation de la fuite</li><li>• Caractéristiques du nuage (température, fraction liquide...)</li></ul>

### Application :

La situation étudiée est illustrée sur la Figure 1 suivante.

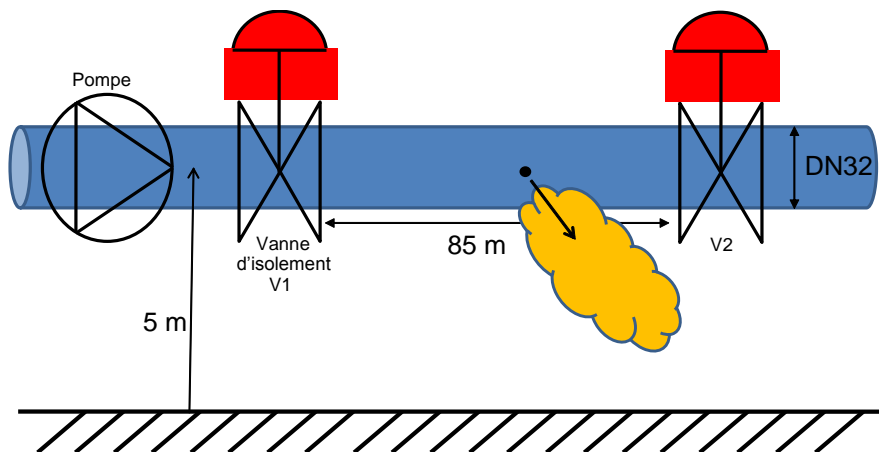


Figure 1 : Situation étudiée

Une canalisation DN32, de 85 m de long, circule à 5 m de hauteur sur un site industriel. Elle transporte de l'ammoniac liquide sous sa pression de vapeur saturante.

Le scénario de rupture franche de cette canalisation a été rendu physiquement impossible par la mise en place de barrières techniques. En revanche, le scénario de petite fuite horizontale, de section équivalente à 1% de celle de la canalisation, donne

une distance au seuil des effets irréversibles (SEI)<sup>1</sup> allant au-delà des limites du site. Ces limites sont situées à 70 m de la canalisation. La fuite peut survenir à tout endroit sur cette canalisation délimitée, de part et d'autre, par des vannes d'isolement. À partir du moment où la fuite est détectée, le traitement du signal et la fermeture des vannes s'effectue en 10 s environ.

Conformément à la préconisation du guide, la fibre optique est installée sous la génératrice inférieure de la canalisation.

#### Éléments de réponse :

On cherche à s'assurer que le système de détection par fibre optique est efficace pour ce scénario de petite fuite horizontale (avec par exemple des effets irréversibles restant inscrits sur le site).

Les données d'entrée sont les suivantes :

- Fuite d'ammoniac liquide sous pression de diamètre  $\approx 3$  mm
- Rejet horizontal à 5 m de haut
- Conditions météorologiques étudiées : D5 (soit une température ambiante de 20°C et une vitesse de vent égale à 5 m/s à 10 m de haut) et F3 (soit une température ambiante de 15°C et une vitesse de vent égale à 3 m/s à 10 m de haut) selon les classes de stabilité de Pasquill.

Caractéristique du terme source :

- Débit de fuite calculé à 0,133 kg/s (soit 0,5 t/h)

Résultats de dispersion (PHAST v6.54) :

- Si la fuite est ininterrompue (1 heure max. d'exposition au nuage toxique) :
  - Effets SEI à 110 m
  - Effets SEL : aucun effet au sol mais effets possibles jusqu'à 20 m en hauteur (dans l'axe du nuage)
- Pour que les effets SEI restent inscrits sur le site industriel, il faut limiter la durée d'exposition à 10 min.

---

<sup>1</sup> Dans cet exemple, il a été choisi de retenir un seuil réglementaire pour déterminer les performances du système de détection. Un tout autre objectif, comme par exemple l'absence d'effet olfactif au-delà des limites du site, aurait tout aussi bien pu être choisi.

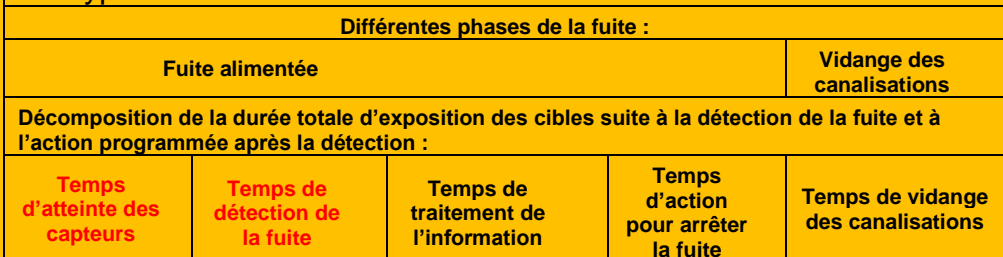
## Q2 – Traduction de la modélisation du scénario en spécifications pour le dispositif de détection

**Objectif de l'item :** Le fournisseur de la fibre optique n'est pas nécessairement en mesure de traduire les enseignements des résultats de la modélisation du scénario de fuite en spécifications (position de la fibre, seuils de déclenchement, temps de détection) pour son dispositif de détection. Pourtant, ce traitement est nécessaire pour pouvoir montrer ultérieurement l'adéquation entre les performances de la fibre optique et les spécifications attendues. À partir de ces informations, le fournisseur pourra paramétrer le dispositif de détection afin d'assurer sa fonction de sécurité.

**Points à vérifier** Quelles sont les spécifications transmises au fournisseur ?  
 Contiennent-elles les éléments suivants :

- Température et longueur exposées de la FO
- Temps de réponse du capteur compatible avec la fonction souhaitée (temps d'atteinte de la fibre + temps de détection)

Idéalement, il faudrait pouvoir disposer d'un diagramme temporel de ce type :



Durée totale potentielle d'exposition des cibles, cette durée doit être suffisamment courte pour que les cibles ne soient pas exposées à des doses conduisant à des effets non désirés...

Les temps indiqués en noir sont des données d'entrée qui relèvent des caractéristiques du site (automate, actionneur, section isolée, distance aux cibles). En rouge, ce sont des temps qui vont dépendre des performances de la fibre optique et de son positionnement.

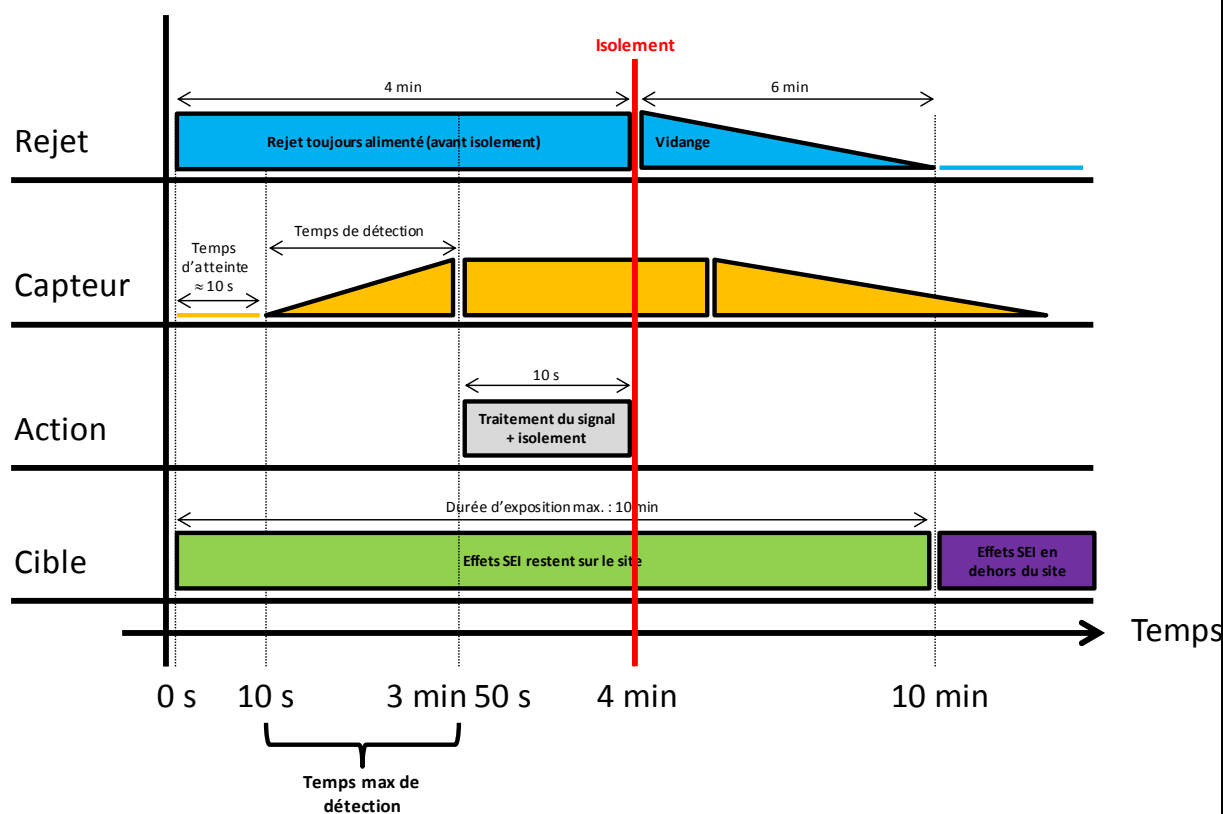
La somme de ces deux temps additionnés du temps de traitement de l'information et de fermeture des vannes d'isolement doit être inférieure à la durée de fuite. On parlera pour cette somme de temps de réponse du capteur. A ce temps devra être ajouté le temps de vidange de la tuyauterie.

### Application :

Éléments de réponse :

- Temps de réponse (cf. Figure 2) :
  - Pour que les effets SEI restent sur le site industriel, il a été vu précédemment que la durée d'exposition doit être limitée à 10 min. En d'autres termes, il faut que la chaîne de sécurité constituée notamment du système de détection par fibre optique puisse arrêter réellement la fuite d'ammoniac en moins de 10 min.

- La fuite d'ammoniac est d'abord composée d'un rejet alimenté (tant que la canalisation n'a pas été isolée) et d'une vidange de la canalisation. Le volume de la canalisation est  $V = L \times S = 85 \times \pi/4 \times 0,032^2 \approx 0,07 \text{ m}^3$ . Cela correspond à un inventaire de 50 kg environ en ammoniac liquide. Si l'on fait l'hypothèse que ce tronçon se vide au débit constant et maximal de 0,133 kg/s (correspondant au débit de fuite calculé), le temps de vidange est de l'ordre de 6 min.
- Si la fibre se situe sous la génératrice inférieure de la canalisation, le temps d'atteinte du capteur est de l'ordre de la dizaine de seconde (selon les essais réalisés par INERIS en 2013 pour un débit de 50 g/s) puisqu'il faut compter sur le ruissellement de l'ammoniac liquide le long de la canalisation et sur le fait que celui-ci goutte sur la fibre.
- Selon les données d'entrée, le temps de traitement du signal et de fermeture des vannes est fixé à 10 s.
- Par conséquent, le temps de détection de la fuite doit être au maximum de 10 min (durée maximale d'exposition) – 6 min (durée de vidange de la canalisation) – 10 s (temps d'atteinte de la fibre par l'ammoniac liquide) – 10 s (temps de traitement du signal et de fermeture des vannes) = 3 min et 40 s soit 220 s.





### **Q3 – Prise en compte de l'environnement météo et du procédé dans le fonctionnement du dispositif**

**Objectif de l'item :** Il s'agit ici d'identifier les perturbations possibles de la détection par fibre optique du fait de l'environnement au sens large : la météo (influence du vent, de la neige, de l'ensoleillement qui peuvent créer des différentiels de températures sur un même site), le procédé et toutes les phases transitoires liées au transfert. Il faudra aussi prendre en considération les impacts éventuels associés à des travaux à proximité (chocs, pincement...). L'objectif de cette question repose notamment sur le bon positionnement du curseur entre la détection des fuites et le déclenchement minimal de fausses alarmes.

**Points à vérifier**

Quels sont les points particuliers de l'exploitation qui pourraient perturber le fonctionnement de la fibre optique ?  
Est-ce que ces points ont été identifiés par l'exploitant et transmis au fournisseur via le cahier des charges par exemple ?  
Est-il prévu de traiter ce point particulier lors de la phase de réglage sur site ?  
Voici quelques points qui pourraient être évoqués :

- Phases d'exploitation pouvant engendrer des variations de température (phases transitoires : vidange, approvisionnement...)
- Conditions météorologiques du site
- Points de purge, soupapes...

#### **Application :**

Éléments de réponse :

- La canalisation est située dans une zone où le risque d'agression externe est faible (c'est d'ailleurs pour cette raison que le scénario de rupture franche de canalisation a pu être écarté). Il en va de même pour la fibre optique.
- Il n'y a pas de points de purge ou de soupape sur la zone de canalisation équipée de la fibre optique.
- Plusieurs éléments sont de nature à perturber le fonctionnement de la fibre optique et devront être pris en compte pour son paramétrage sur site :
  - Les conditions climatiques du site : même si la température ambiante peut varier de façon importante sur une saison, voire même sur une journée, c'est toute la longueur de la fibre optique qui est normalement exposée à ce changement de température et pas seulement un tronçon (comme dans le cas d'une fuite). Toutefois, comme la fibre couvre 80 m de canalisation et passe le long d'un bâtiment, on ne peut pas exclure qu'une partie de cette fibre se refroidisse du fait de conditions environnementales particulières (passage à l'ombre, pluie fortement localisée...). À noter que cette perturbation est moins pertinente en période hivernale puisque le phénomène d'ombrage est moins influant et la température ambiante est déjà faible.
- Les phases de remplissage et de vidange de l'installation : comme ces phases peuvent refroidir rapidement et significativement la canalisation, elles peuvent conduire à des fausses alarmes. Ces opérations sont régulières (fréquence hebdomadaire).

#### Q4 – Fonctionnement proprement dit du dispositif

Objectif de l'item :	La détection par fibre optique étant plutôt nouvelle pour la détection de fuite d'ammoniac, il est important de consacrer un chapitre à la description du dispositif, son principe de fonctionnement, sa résolution spatiale... et bien évidemment, si l'information est disponible, fournir du REX sur son implantation. Cette description doit notamment montrer les écarts avec celle faite en première partie afin d'en évaluer le niveau de confiance par exemple.
Points à vérifier	Quelles sont les caractéristiques de l'installation proposée par le fournisseur : Quelle résolution spatiale ? Quelle résolution temporelle (fréquence d'acquisition) ? Quelles sont les justifications apportées par le fournisseur ? Le REX est-il pris en compte (de l'utilisation de la fibre optique en général mais également du matériel proposé) ?

#### Application :

Éléments de réponse :

- La chaîne de sécurité est constituée des éléments suivants :  
Capteur (câble optique) → Traitement (interrogateur + logiciel + module relais)  
→ Traitement usine (centrale détection, Automate Programmable de Sécurité...) → Action (fermeture vanne d'isolement)
- La détection de fuite par fibre optique repose sur la réflectométrie optique temporelle. Cette technique consiste à envoyer, de façon répétée, une impulsion de lumière monochromatique dans la fibre optique et à analyser les lumières rétrodiffusées par celle-ci. Du fait des échanges d'énergie entre le photon incident et les molécules du milieu traversé, les lumières rétrodiffusées voient leurs caractéristiques modifiées par rapport à celles de la lumière incidente.
- La fibre optique, installée sur site, aura les caractéristiques suivantes :
  - La résolution spatiale est de 1 m. C'est ce que semble permettre la technologie actuellement disponible.
  - La résolution en température est inférieure à 1°C.
  - Le temps de mesure est de 10 s dans une direction donnée du faisceau.
- Justificatifs :
  - Le fabricant est capable de fournir les conclusions des tests « FAT » (pour *Factory Acceptance Test*) au cours duquel la résolution spatiale du système est vérifiée (par immersion d'1 m de câble dans un liquide avec au moins 10°C de différence de température avec l'ambient).
  - L'installateur de la fibre optique est aussi capable de fournir les conclusions des tests « SAT » (pour *Site Acceptance test*). Durant ces tests, il est vérifié le temps de mesure ainsi que le bruit de mesure (par réalisation de 10 mesures sur toute la longueur du câble et par calcul de l'écart type des 10 mesures sur chaque point le long du câble). En aucun point, l'écart ne doit dépasser 1°C.

### **Q5 – Adéquation de l'implantation du dispositif par rapport au scénario**

Objectif de l'item :	Pour la fibre optique, la démonstration doit être faite que l'implantation de la fibre permet de détecter l'ensemble des scénarios de fuite identifiés en Q1 quelles que soient les conditions météorologiques.
Points à vérifier	Comment le fournisseur justifie-t-il que la position proposée pour la fibre est bien pertinente ? Comment s'assure-t-on que les fuites sont bien localisées ?

#### **Application :**

Éléments de réponse :

- Une opération de repérage (*mapping*) a été effectuée afin d'assurer une correspondance exacte entre les coordonnées longitudinales et l'emplacement physique du câble sur la canalisation. Cela a consisté à refroidir le câble avec un extincteur CO<sub>2</sub> à proximité de chaque vanne d'isolement et d'observer sur l'interrogateur l'endroit où survient la chute de température. On ne s'est pas contenté d'un marquage métrique sur le câble, jugé insuffisamment précis. De la sorte, on s'assure que les fuites seront bien localisées.

## Q6 – Traitement du signal reçu avant action

Objectif de l'item :	La fibre optique renvoie un signal optique qu'il convient de transformer avant de l'utiliser pour déclencher une alarme ou non. Il est important de savoir comment ce signal est transformé et de connaître ses caractéristiques (fréquence d'acquisition de la température sur une portion donnée, comment la température moyenne spatiale est-elle calculée ? ...)
Points à vérifier	Comment est réalisé l'étalonnage de la fibre optique sur la plage de température prévue pour le fonctionnement ?

### Application :

Éléments de réponse :

- Le câble optique est connecté à un interrogateur, qui a pour fonction de convertir les caractéristiques des lumières rétrodiffusées en une mesure distribuée de température sur toute la longueur du câble. En effet, connaissant la vitesse de la lumière dans la fibre, et mesurant le temps écoulé entre l'émission du signal incident et la réception du signal rétrodiffusé par l'interrogateur, il est possible de déterminer une température moyenne pour chaque résolution spatiale du câble optique. Selon Q4, la fibre installée a une résolution spatiale de 1 m.
- Toujours selon Q4, le temps d'analyse de l'interrogateur est de 10 s. Cela signifie que le système est capable de détecter une baisse de température sur une période de 10 s au minimum.
- Comme indiqué sur la Figure 3, la fibre mesure une température  $T_1$  moyennée sur la résolution spatiale et celle-ci peut être différente de la température  $T_2$  de l'ammoniac liquide impactant la fibre. Soit  $\Delta T_1$  le refroidissement maximal de  $T_1$  par rapport à l'ambient. Soit  $\Delta T_2$  le refroidissement maximal de  $T_2$  par rapport à l'ambient. En supposant que la température d'exposition  $T_2$  évolue selon un profil « créneau », on a la relation suivante :

$$\Delta T_1 = \Delta T_2 \times \min(\text{longueur exposée} / \text{résolution spatiale} ; 1)$$

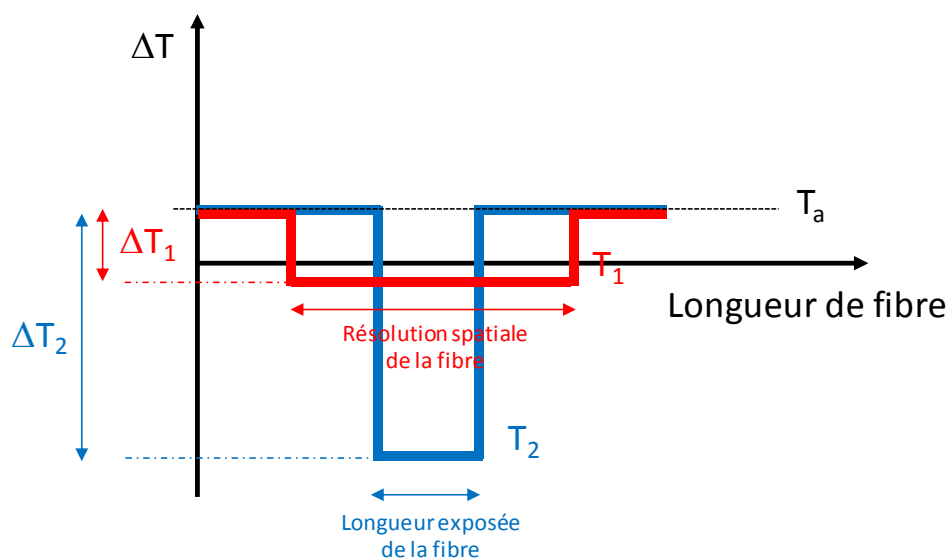


Figure 3. Différence entre température d'exposition et température « vue » par la fibre

Les deux tableaux ci-dessous regroupent les valeurs prédites de refroidissement ( $= \Delta T_1$ ) en fonction de la valeur exposée de la fibre (3 mm soit la taille de l'orifice de fuite, 30 mm et 300 mm) et pour deux résolutions spatiales différentes de la fibre : 1 et 5 m. Lorsque l'ammoniac liquide impacte la fibre, la partie exposée de la fibre va donc passer rapidement de la température ambiante (15 - 20°C selon Q1) à la température d'ébullition de l'ammoniac, soit - 33°C. Le refroidissement subi par celle-ci est donc de 48 – 50°C. Dans la suite de cet exercice, il est supposé que  $\Delta T_2 = 50^\circ\text{C}$ .

	Résolution spatiale = 1 m $\Delta T_2 = 50^\circ\text{C}$		
Longueur exposée	3 mm	30 mm	300 mm
$\Delta T_1$ [°C]	0,2	1,5	15

	Résolution spatiale = 5 m $\Delta T_2 = 50^\circ\text{C}$		
Longueur exposée	3 mm	30 mm	300 mm
$\Delta T_1$ [°C]	< 0,1	0,3	3

*Remarque : cet exemple montre, s'il en était besoin, tout l'intérêt de bien optimiser la résolution spatiale de la fibre. En effet, avec une résolution spatiale trop importante, le refroidissement induit par la fuite risque de ne pas être perçu par la fibre. En revanche, une résolution spatiale trop faible risque de pénaliser trop fortement le temps de réponse de l'équipement. Selon le guide des Industriels, une résolution de 1 m semble être un bon compromis à ce jour.*

- Dans le cadre de l'exercice fil rouge, il convient maintenant d'évaluer la longueur exposée de fibre. L'analyse des essais INERIS montre que, dans de telles conditions de fuite, la longueur mouillée de la fibre est de l'ordre de 60 fois la taille de l'orifice (cf. encadré suivant pour justifications). Dès lors :
  - La longueur mouillée de fibre sera de l'ordre de  $60 \times 3 = 180$  mm
  - Sur une résolution spatiale de 1 m, on peut s'attendre à avoir au minimum  $180 / 2 = 90$  mm de fibre exposée à la température de - 33°C (cas le plus défavorable où le mouillage est réparti sur deux résolutions).
  - Le calcul du refroidissement mesuré par la fibre donne  $\Delta T_1 = 50 \times 0,09/1 = 4,5^\circ\text{C}$ . On s'attend à avoir ce refroidissement en 30 – 60 s comme durant les essais.
  - NB : dans le cas où la température ambiante n'est plus que de 0°C, on aura  $\Delta T_1 = 33 \times 0,09/1 = 3,0^\circ\text{C}$ . En période hivernale, on s'attend donc à avoir un refroidissement plutôt de 3,0°C en 30 – 60 s.

### Justification de longueur exposée de fibre :

La longueur d'exposition de la fibre est fonction de l'ampleur de la perte de confinement et tendra à augmenter au cours du temps (cf. Figure 4). En effet :

- Sur l'installation, la fibre est fixée à la canalisation par un jeu de colliers placés à des intervalles réguliers. Dès lors, la fibre n'est pas parfaitement horizontale ce qui favorise la propension de l'ammoniac liquide impactant celle-ci à s'écouler le long de celle-ci et donc à augmenter la longueur mouillée de façon « mécanique » (dans la direction de la pente).
- De plus, le refroidissement fortement localisé au début du rejet se propage par conduction le long de la fibre, et dans les deux directions, au fur et à mesure que le rejet perdure.

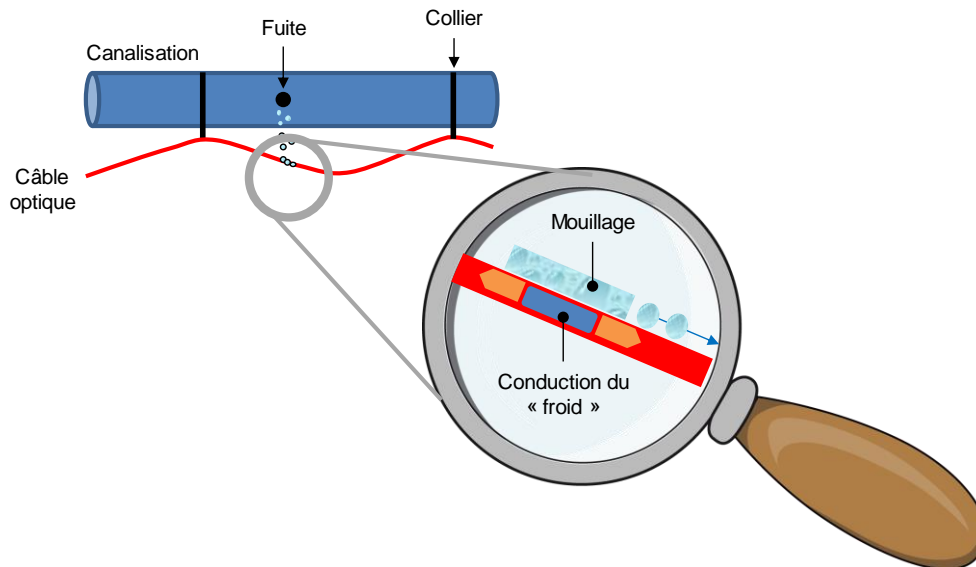


Figure 4. Illustration du refroidissement progressif du câble optique

Pour évaluer la longueur exposée de fibre, l'INERIS a développé un modèle simple de conduction thermique et l'a ensuite recalé par rapport aux essais INERIS de 2013 pour en tirer des enseignements.

- Présentation du modèle : ce modèle prédit l'évolution de température le long de la fibre en supposant que (1) la fibre est parfaitement horizontale<sup>2</sup>, (2) la fibre est constituée uniquement de polyéthylène haute densité<sup>3</sup>, (3) la longueur mouillée de la fibre est constante au cours du temps et se retrouve à la température d'ébullition de l'ammoniac, soit  $-33^{\circ}\text{C}$  et (4) au-delà de cette longueur mouillée, le champ de température de la fibre évolue comme une plaque semi-infinie, initialement à la température ambiante, et brusquement exposée sur sa face à  $-33^{\circ}\text{C}$ . Dans ce modèle, les données d'entrée sont donc la longueur mouillée de fibre et les propriétés du PEHD<sup>4</sup>.

<sup>2</sup> De façon prudente, le modèle ne tient pas compte de l'écoulement du liquide le long de la fibre du fait de la pente. On considère ici que l'ammoniac liquide, après avoir mouillé le tronçon de fibre, tombe verticalement au sol et ne participe donc plus au refroidissement de la fibre.

<sup>3</sup> Par abus de langage, on a parlé jusqu'ici de fibre au lieu de câble. En réalité, c'est un câble optique qui est installé près des canalisations et ce câble est généralement constitué d'une ou plusieurs fibres optiques cerclée(s) d'un tube métallique, lui-même entourée d'une gaine en PEHD (ou polyéthylène haute densité). Le comportement thermique du câble est essentiellement régi par celui du PEHD, d'où l'hypothèse faite par le modèle.

<sup>4</sup> Propriétés du PEHD : masse volumique =  $950 \text{ kg/m}^3$ , chaleur spécifique =  $1900 \text{ J/kg.K}$  et conduction thermique =  $0,5 \text{ W/m.K}$ .

Une fois l'évolution de la température connue le long de la fibre, le modèle détermine la température mesurée par la fibre à partir de la connaissance de la résolution spatiale.

- Retour d'expérience : les essais INERIS de 2013 ont montré que la fibre, placée dans des conditions très similaires à celles considérées ici, pouvait mesurer une chute de température de 2 – 3°C en 30 à 60 s pour des fuites d'ammoniac liquide sous pression de 40 – 50 g/s. Précisons qu'il s'agit ici du refroidissement généré par le seul ruissellement de l'ammoniac liquide sur celle-ci ; dans une approche prudente, la part de refroidissement lié à l'environnement n'est pas prise en compte. Durant les essais, l'orifice de fuite était alors de 2 mm.
- Exploitation des résultats : l'INERIS a utilisé le modèle de conduction thermique pour déterminer quelle longueur exposée de fibre optique il fallait imposer en donnée d'entrée pour obtenir le refroidissement observé de 2 – 3°C en 30 – 60 s dans les conditions des essais. Il est apparu que cette longueur exposée devait être de 120 mm, soit 60 fois la taille de l'orifice. De prime abord, ce ratio semble très important mais, au vu des vidéos thermiques enregistrés durant les essais INERIS de 2013 (cf. Figure 5), il paraît crédible.

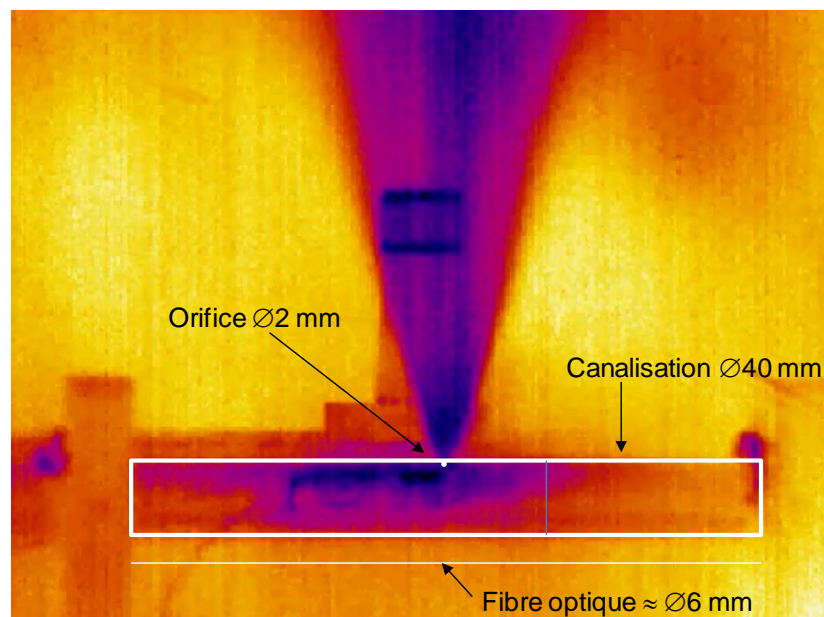


Figure 5. Capture d'écran d'une des vidéos thermiques enregistrées lors des essais INERIS de 2013

- Enseignements généraux à tirer de l'utilisation du modèle :
  - Sur la base des éléments présentés ci-dessus, il peut être considéré que la surface mouillée de la fibre est de l'ordre de 60 fois la taille de l'orifice.
  - Le refroidissement mesuré par la fibre est davantage conditionné par la longueur mouillée de celle-ci que par la durée de la fuite. Par exemple, si les essais INERIS ont montré que la fibre mesurait un refroidissement de 2 – 3°C après 30 à 60 s de fuite, le modèle prédit que le « sur-refroidissement » sera seulement de 1°C après 600 s de fuite.

## Q7 – Traitement pour action

Objectif de l'item :	Une fois le signal transformé, il est nécessaire de décrire précisément le processus qui conduit à une action ou pas, en d'autres termes de préciser les critères de déclenchement. Il serait pertinent de présenter le processus sous la forme d'un logigramme et de bien mettre en évidence les critères de déclenchement (chute de température de XX°C sur une minute, chute de température de YY°C en 5 secondes, écart de température de ZZ°C entre deux tronçons successifs...). Ces critères doivent être définis en fonction des éléments de réponse de Q3.
Points à vérifier	Quels sont les critères et sont-ils compatibles avec les éléments définis au Q3 ? Comment l'exploitant s'assure que le dispositif limite les fausses alarmes (phase de réglage) ? Comment sont pris en compte les signaux de défaut transmis par la fibre ?

### Application :

Éléments de réponse (apportés par le Fournisseur et l'Exploitant) :

- Il faut insister sur deux objectifs : (1) le (ou les) seuil(s) de détection doit(vent) être défini(s) en fonction du refroidissement que l'on s'attend à mesurer à l'aide de la fibre optique et (2) si le seuil repose sur un gradient de température mesuré sur une certaine échelle de temps, il faut que cette échelle de temps soit compatible avec la durée maximale de détection de la fuite.
- Selon Q6, on s'attend à avoir un refroidissement de 4,5°C en 30 à 60 s pour une température ambiante de 15 – 20°C (et de 3°C pour une température ambiante de 0°C). Dans le cadre de cet exercice, il est donc décidé de fixer un seuil de détection équivalent à 2 - 3°C atteint en 30 s.
  - Par rapport à l'objectif (1), cette cinétique de refroidissement semble suffisamment basse pour détecter efficacement la fuite à la température ambiante de 15 – 20°C (même avec des variations de conditions climatiques) et en période hivernale. De plus, cette cinétique semble suffisamment élevée pour ne pas générer trop de fausses alarmes.
  - Par rapport à l'objectif (2), ce temps de 30 s est largement compatible avec le temps de détection maximale de la fuite qui avait été calculé à 220 s (cf. Q2)
- NB : le guide de la Profession propose deux seuils de détection sur le refroidissement : 6°C en 20 s et 12°C en 120s. Selon la Profession, le premier seuil est « adapté pour les portions de fibre se trouvant mouillées par un écoulement ou des vésicules d'un brouillard d'ammoniac » tandis que le second est adapté « à la seule convection lorsque la fibre est plus éloignée du point de fuite et soumise à de l'ammoniac gazeux ». Selon l'INERIS, le premier seuil est clairement défini pour détecter des fuites plus importantes que celle considérée dans cet exercice fil rouge (selon le modèle, orifice de fuite supérieur à 7 mm). Quant au second seuil, il est surtout pertinent lorsque la fuite survient en milieu encombré (peu ou pas de ventilation de la zone impactée par la fuite) ou en milieu fermé.



### Q8 – Actions déclenchées en cas de dépassement des seuils (traitement aval dans la chaîne de sécurité)

Objectif de l'item :	Pour les actionneurs, il reste à démontrer, pour chaque implantation de la fuite, que les équipements actionnés sont en nombre suffisant, bien positionnés, efficaces et actionnables dans
Points à vérifier	Les actions de sécurité sont-elles compatibles avec le scénario de fuite ? S'assure-t-on qu'on isole les bons organes en fonction de la fuite ?

#### **Application :**

Éléments de réponse (apportés par l'Exploitant) :

- Lors de la détection d'une fuite, le module relais transmet une alerte qui agit sur :
  - L'arrêt de la pompe de transfert,
  - La fermeture des vannes d'isolement : V1 puis V2.

### Q9 – Vérification que le temps de réponse de la chaîne de sécurité est compatible avec l'objectif

Objectif de l'item:	Une fois les exigences précédentes satisfaites, il est nécessaire de démontrer que la durée de mise en œuvre de la chaîne complète depuis le début de la fuite jusqu'à son arrêt est inférieure au temps nécessaire à la formation d'un nuage présentant un risque inacceptable pour les riverains.
Points à vérifier	Est-ce que les caractéristiques cinétiques de la chaîne du dispositif sont en adéquation avec les éléments de Q2 ? Comment ces caractéristiques sont-elles obtenues ? Par un test complet sur site ou par des tests partiels ? Pour des cas de tests partiels, comment sont gérées les interfaces

#### **Application :**

Éléments de réponse (apportés par l'Exploitant) :

- Régulièrement, le temps de réponse de la chaîne de sécurité est vérifié sur site par la simulation d'une fuite sur une zone du câble optique (utilisation d'un extincteur CO<sub>2</sub>) et par la mesure du temps écoulé entre le début de la fuite et la fermeture effective des vannes d'isolement.
- Ce temps de réponse est largement inférieur à 220 s, qui est le temps maximal à ne pas dépasser pour que le scénario de fuite horizontale ne génère pas d'effets en dehors du site.

<b>Q10 – Modes communs / causes communes de défaillance et NC</b>	
Objectif de l'item :	Une étude qualitative des causes communes et modes communs de défaillance et/ou des mesures prises pour les limiter nous semble importante afin de démontrer que ceux-ci ne viennent pas dégrader le niveau de confiance global de la fonction de sécurité.
Points à vérifier	<p>Quelles sont les événements identifiés qui pourraient conduire à une fuite et un dysfonctionnement de la fibre (par exemple agression mécanique) ?</p> <p>Quels sont les parades vis-à-vis de ses agressions ?</p> <p>Le module d'autotest est-il mis en œuvre ?</p> <p>Les vérifications (inspection visuelle et tests fonctionnels) sont-elles réalisées ?</p>
	<p><b><u>Application :</u></b></p> <p>Éléments de réponse :</p> <p>Une défaillance du système de détection par fibre optique peut avoir pour origine une cause interne et/ou externe :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pour les causes internes, des tests de bon fonctionnement sont réalisés automatiquement de façon périodique (toutes les heures) par le module d'autotests et permettent de détecter les cas de dysfonctionnement (matériels et logiciels) du système d'exploitation, du logiciel de traitement ou de l'unité de lecture.</li> <li>• Pour les agressions externes, de type agression mécanique, la rupture de câble est détectée et un signal d'alerte est généré et il peut être utilisé comme une fuite potentielle de canalisation et servir au déclenchement des actions d'isolement de la partie de canalisation supportant le câble rompu.</li> </ul> <p>Des vérifications (inspection visuelle et tests fonctionnels) sont réalisées périodiquement et permettent d'une part de vérifier l'état général du système (usure, mauvais positionnement, étanchéité des boîtes de jonctions, ...) et de vérifier son bon fonctionnement.</p> <p>Le système étant à sécurité positive, la perte d'alimentation électrique entraîne une indisponibilité totale du système et sa mise en sécurité.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lors du test FAT (« Factory Acceptance Test »), il est vérifié le déclenchement des alertes systèmes au niveau des modules relais.</li> <li>• Lors du test SAT (« Site Acceptance Test »), on simule une rupture de la fibre optique (par déconnexion par exemple d'un connecteur le long de la fibre) et on vérifie les actions associées.</li> <li>• Un module autotest permet de vérifier le bon fonctionnement de la partie (Capteur + Traitement de l'interrogateur) de la chaîne de sécurité. Il opère de la façon suivante : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Étape n°1 – Génération d'une alerte normale « test en cours ». En cas de défaut du module d'autotest, cette alerte normale n'est pas envoyée. Cela permet de</li> </ul> </li> </ul>

	<p>détecter un dysfonctionnement du module.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>○ Étape n°2 – Refroidissement d'une partie du câble optique à l'aide d'une cellule Peltier.</li><li>○ Étape n°3 – Enregistrement du temps de réaction du système avant que le module relais se déclenche. En cas de non-déclenchement dans un temps prédéfini, un signal d'alerte est émis.</li></ul> <p>La fréquence de ce test est d'une fois par heure.</p> <p>Selon l'Oméga 10 et sous conditions (voir §3.1), un NC1 peut être retenu. Dans le cas particulier où ce dispositif est valorisé dans une nouvelle MMRIS et que celle-ci est assurée par un automate de sécurité gérant à la fois la conduite (uniquement des opérations de conduites simples comme des actions binaires) et la sécurité d'un process industriel, un niveau de SIL peut être exigé selon la doctrine MMRI du 2 octobre 2013</p>
--	--

## Q11 – Réception, exploitation, Maintien en condition opérationnelle, gestion de l'obsolescence

Objectif de l'item :	<p>La configuration du logiciel (algorithme de détection) étant très particulière et au cœur du système, celle-ci ne peut être réalisée et modifiée que par du personnel compétent ; en l'occurrence le fournisseur. Du coup, la disponibilité à long terme (maintien en condition opérationnelle, obsolescence) de ce système nécessite un soutien du fournisseur sur le matériel (pièce de rechange) et sur le logiciel (compétence pour évaluer l'impact des mises à jour et des modifications sur l'efficacité).</p> <p>Cet aspect doit être pris en compte par l'industriel pour définir sa politique de maintenance (contrats de soutien du fournisseur, stocks de pièces de rechanges, formations spécifiques, ...). De plus, les industriels devront assurer un suivi formalisé de ce système pour avoir un retour d'expérience.</p>
Points à vérifier	<p>Les opérateurs de conduites ont-ils été formés à l'exploitation de ce système ?</p> <p>Qui sont les personnes qui peuvent intervenir sur le réglage (seuils...) ? Si ce n'est pas le fournisseur, comment ces personnes ont elles acquis les compétences pour le faire ?</p> <p>Comment sont gérées les modifications ?</p> <p>L'industriel respecte-t-il les prescriptions du DT93 (si celui-ci est applicable) ?</p>

### **Application :**

Éléments de réponse :

L'installation et la mise en service de ce système de détection de fuite ont été réalisées par le fournisseur.

La politique de maintenance de l'industriel intègre la prise en compte et la définition d'un contrat de soutien du fournisseur, d'un stock de pièces de rechanges, la formation spécifique des opérateurs de conduite et de maintenance.

Les modifications seront réalisées par du personnel reconnu compétent (fournisseur ou personnel qualifié) et se feront dans le cadre d'un système de management de la sécurité (demande de modification, analyse d'impact, réalisation des modifications, vérification du bon fonctionnement après modification).

La gestion de ce système, faisant partie d'une MMRi, répond aux exigences du guide de maîtrise du vieillissement des MMRi DT 93 (si applicable).



**INERIS**

*maîtriser le risque  
pour un développement durable*

**Institut national de l'environnement industriel et des risques**

Parc Technologique Aiaia  
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : [ineris@ineris.fr](mailto:ineris@ineris.fr) - Internet : <http://www.ineris.fr>