



Article

Enquêtes expérimentales sur Capteurs à fibre optique distribués pour Surveillance des conduites d'eau

Manuel Bertulessi, Daniele Fabrizio Bignami, Ilaria Boschini, Marina Longoni, Giovanni Menduni et
Jacopo Morosi

Probleme special

Nouvelles perspectives dans les capteurs et applications à fibre optique

Edité par

le professeur Dr Xingwei Wang et le Dr Xu Guo



Article

Enquêtes expérimentales sur les capteurs à fibre optique distribués pour la surveillance des conduites d'eau

Manuel Bertulesi ^{1,*} , Daniele Fabrizio Bignami ² , Ilaria Boschini ¹ , Marina Longoni ¹, Jean Menduni ¹  et Jacopo Morosi ³

¹ Département de génie civil et environnemental, Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci, 32, 20133 Milano, Italie ; ilaria.boschini@polimi.it (IB); marina.longoni@mail.polimi.it (ML); giovanni.menduni@polimi.it (DG)

² Fondazione Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci, 32, 20133 Milano, Italie ; daniele.bignami@fondazione.polimi.it

³ Coharentia Srl, Via Pinturicchio 5, 20131 Milan, Italie ; jacopo.morosi@cohaerentia.com * Correspondance : manuel.bertulesi@polimi.it

Résumé : La perte d'eau (WL) est un problème mondial. En Italie, par exemple, WL a atteint 36,2 % de l'eau douce totale acheminée en 2020. L'entretien d'un système d'approvisionnement en eau est une tâche stratégique qui nécessite chaque année d'énormes investissements. Dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur l'utilisation de capteurs à fibre optique distribués (DFOS) basés sur la technologie de diffusion Brillouin stimulée (SBS) pour la surveillance des réseaux de canalisations d'eau. Nous avons travaillé sur des tuyaux en polyéthylène haute densité (PEHD), aujourd'hui les plus utilisés pour la réalisation de conduites d'eau. En enroulant et en fixant le câble à fibre optique sur la surface externe de la conduite, nous avons vérifié la capacité à détecter les contraintes liées aux anomalies de pression le long d'une canalisation, par exemple celles causées par une fuite d'eau. Nous avons réalisé deux phases expérimentales. Dans la première, nous avons évalué la sensibilité de la disposition des capteurs sur une canalisation en PEHD sollicitée avec une pression statique. Nous avons étudié la rhéologie viscoélastique du matériau en calibrant et en validant les paramètres d'un modèle de Burger, dans lequel les modèles Maxwell et Kelvin-Voigt sont connectés en série. Dans la deuxième phase expérimentale, nous nous sommes plutôt concentrés sur la détection de l'anomalie de pression produite par une fuite dans un circuit de canalisation configuré avec de l'eau courante déplacée par une pompe. Les études théoriques et expérimentales réalisées ont donné un retour globalement positif sur l'utilisation du DFOS pour la surveillance des conduites d'eau. Les développements futurs se concentreront sur des études plus détaillées de cette solution de surveillance et sur la production industrielle de tuyaux en PEHD "nativement intelligents" dans lesquels des câbles DFOS sont intégrés à la surface du pipeline lors du processus d'extrusion.

Mots-clés : surveillance de l'état des pipelines ; DFO Brillouin ; détection de fuite d'eau; tuyau intelligent



Citation : Bertulesi, M. ; Bignami, D.F. ; Boschini, I. ; Longoni, M. ; Menduni, G. ; Morosi, J. Enquêtes expérimentales sur les capteurs à fibre optique distribués pour la surveillance des conduites d'eau. Capteurs 2023, 23, 6205. <https://doi.org/10.3390/s23136205>

Rédacteur académique : Francesco Prudeniano

Reçu : 13 juin 2023
Révisé : 30 juin 2023
Accepté : 4 juillet 2023
Publié : 6 juillet 2023



Copyright : © 2023 par les auteurs.
Licencié MDPI, Bâle, Suisse.
Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions des Creative Commons
Licence d'attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

L'eau est notoirement une ressource stratégique et fondamentale pour le bien-être social et la croissance économique de toute nation. Une politique de gestion efficace des ressources en eau est aujourd'hui un objectif commun aux gouvernements du monde entier pour prévenir le gaspillage de l'eau. De plus, la disponibilité de ce bien primaire est de plus en plus menacée par l'impact du changement climatique sur la chaîne hydrologique [1].

Concernant les réseaux d'adduction d'eau, la Water Loss (WL) est un problème mondial : 48,6 milliards de mètres cubes sont perdus par an dans le monde [2]. En Italie, par exemple, WL a atteint 36,2 % de l'eau totale transportée en 2020, soit 0,9 milliard de mètres cubes (Institut national des statistiques ISTAT, 2022). Les WL affectent la stabilité technique du système d'approvisionnement en eau et son âge opérationnel, ainsi que la quantité et la qualité de l'eau transportée [3].

Les mécanismes de défaillance des canalisations d'eau peuvent être classés en trois groupes : intrinsèques aux canalisations, opérationnels et environnementaux [4]. La première catégorie comprend l'âge, la dégradation chimique et les défauts de fabrication du tuyau et/ou du système de joint. La deuxième catégorie de défaillance de conduite concerne principalement les opérations de réseau qui peuvent produire des pressions cycliques et

saute de pression transitoire. Cet effet, également connu sous le nom de « coup de bélier », entraîne une surpression de la conduite et représente une cause importante de défaillance, en particulier dans les conduites de gros diamètres [5]. Enfin, la dernière catégorie englobe toutes les défaillances de conduites causées par des changements saisonniers soudains ou importants ; les thermiques sont les plus liés aux défaillances [6].

Dans ce cadre, l'entretien d'un système d'approvisionnement en eau est une tâche stratégique qui nécessite d'énormes investissements chaque année. Une rupture de canalisation, selon le type de fluide et le rejet transporté, peut engendrer de lourds dommages à l'exposition environnante. Considérons, par exemple, le risque d'inondation induit en aval par une défaillance cachée d'une conduite forcée acheminant l'eau vers une centrale hydroélectrique [7]. Ceci peut être atténué par l'installation d'un système de surveillance capable de détecter à temps les tendances de déformation de la conduite forcée non conformes à l'état opérationnel.

Concernant les systèmes de surveillance des pipelines, il existe plusieurs solutions disponibles dans la littérature, la plupart liées au domaine de l'approvisionnement en pétrole et en gaz.

Les techniques de surveillance basées sur le matériel peuvent être divisées en deux catégories principales : non invasives lorsque les capteurs sont installés à l'extérieur du tuyau et invasives lorsqu'ils sont placés à l'intérieur [8]. La première catégorie comprend l'inspection visuelle (VI) pour les canalisations hors sol et le géoradar (GPR) pour les réseaux souterrains. Cependant, cette technologie est inefficace pour détecter les fuites d'eau dans les canalisations non métalliques et est aujourd'hui couramment utilisée pour les réseaux d'adduction d'eau [9]. Les techniques invasives nécessitent plutôt l'installation de capteurs à l'intérieur du tuyau pour détecter la pression, le débit, la température, la densité de l'eau et la viscosité. Les capteurs acoustiques, par exemple, peuvent détecter de petites vibrations produites par l'eau sortant du pipeline [10]. La procédure d'installation de ces capteurs doit être très précise et précise afin d'éviter la création de sources de perturbation de l'écoulement régulier du fluide véhiculé. De plus, également dans le cas des réseaux de capteurs sans fil (WSN), ils ont besoin d'une alimentation en énergie, ce qui constitue un problème coûteux pour les infrastructures de canalisations longues placées en dehors des zones urbaines.

Au lieu de cela, les méthodes logicielles localisent les fuites en surveillant et en élaborant en permanence une ou plusieurs variables internes. Certaines de ces méthodes effectuent des analyses statistiques sur des mesures, tandis que d'autres prennent en compte des lois physiques [11]. Une solution innovante dans ce domaine est représentée par l'utilisation d'algorithmes de Machine Learning (ML) sur des données brutes pour construire des modèles de prédiction sur la présence de fuites [12].

Dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur l'utilisation de capteurs à fibre optique (FOS) pour la surveillance des réseaux de canalisations d'eau. L'utilisation de ce type de capteur pour la surveillance de la santé des structures (SHM) et la surveillance de la santé géotechnique (GHM) est largement utilisée pour sa grande adaptabilité à chaque type d'infrastructure et son immunité aux interférences électromagnétiques [13].

Les capteurs à réseau de Bragg à fibre (FBG) sont des FOS quasi distribués utilisés pour détecter tout changement mécanique de l'état du pipeline, tel que la flexion, l'impact et la fatigue [14]. Les FBG ont été installés dans plusieurs environnements, y compris les oléoducs et gazoducs sous-marins [15]. Ces capteurs peuvent détecter l'onde de pression négative (NPW) produite par la fuite [16].

En effet, lorsqu'une fuite se produit, une onde de chute de pression se propage du point de fuite vers les deux extrémités de la canalisation modifiant la contrainte circonférentielle. Par conséquent, une série de capteurs de contrainte de frette FBG installés le long du pipeline peut détecter avec une grande précision la position de fuite au moment de l'arrivée de l'onde et l'entité de la variation de contrainte de frette. Cependant, ces capteurs offrent une surveillance ponctuelle des contraintes et, dans le cas des réseaux de canalisations, généralement de 10 à des centaines de kilomètres de long, ils représentent une solution coûteuse en raison de la quantité importante de câbles non sensibles nécessaires pour les alimenter et les connecter.

Les capteurs à fibre optique entièrement distribués (DFOS) sont plutôt une solution compétitive pour la surveillance des grandes structures et infrastructures civiles, hydrauliques et géotechniques [17,18]. Avec cette technologie, le câble à fibre optique détecte sur toute sa longueur, et cette caractéristique convient bien à la nature linéaire typique des infrastructures. De plus, l'alimentation en énergie n'est nécessaire qu'à l'unité d'interrogation, qui peut également être placée à quelques kilomètres de la structure surveillée. Les coûts de plus en plus compétitifs des composants du système ouvrent la voie à une utilisation extensive du DFOS, même intégré dans les matériaux de structure ou les revêtements [19-21].

Les principales applications de DFOS dans le domaine de la surveillance de l'état des pipelines (PHM) sont toutes liées aux systèmes d'approvisionnement en pétrole et en gaz. Deux technologies principales sont couramment utilisées à cette fin : Stimulate Brillouin Scattering (SBS) et Distributed Acoustic Sensing (DAS).

SBS est la solution la plus affirmée et la plus largement appliquée de la famille DFOS. Son succès est sûrement dû au fait que l'effet Brillouin peut être utilisé sur des fibres optiques de télécommunication monomodales standard kilométriques [22]. Dans ce travail, nous avons utilisé la technique de détection Brillouin la plus largement utilisée, l'analyse optique dans le domaine temporel de Brillouin (BOTDA). Les détails techniques de cette technologie seront illustrés dans la section 2. Les unités d'interrogation basées sur SBS sont de plus en plus rentables et fournissent une mesure absolue liée à la superposition linéaire de la contrainte mécanique et de la température. Cela signifie que le système dispose d'une mémoire et peut être réglé sur un temps d'acquisition donné, ce qui réduit la consommation d'énergie.

Le DAS appartient plutôt à la famille DFOS basée sur Rayleigh, et il peut détecter les vibrations locales du pipeline induites par les fuites du pipeline [23]. Des fuites de gazoduc de l'ordre de 1% ont été détectées dans les investigations expérimentales de Stajanca et al. [24], montrant une sensibilité beaucoup plus élevée que le DFOS à base de Brillouin. Cependant, les expériences ont été réalisées dans des conditions statiques sans le bruit de fond vibratoire d'un fluide traversant. La signature vibratoire d'une fuite est également caractérisée par une grande variabilité, et elle dépend fortement à la fois de la géométrie de la canalisation et de son emplacement et de l'entité de la fuite elle-même. Ainsi, cette méthode nécessite une phase de post-traitement importante pour filtrer les modes vibrationnels des parasites et détecter la présence de ceux liés aux fuites. De plus, dans la littérature, il n'y a aucune preuve de l'ouvrabilité de cette méthode sur les tuyaux en PEHD qui sont la cible de nos investigations. Concernant les mesures, celles issues du DAS ne sont pas des valeurs absolues, mais elles renvoient une variation de température ou de contrainte concernant l'instant de démarrage de l'interrogateur. En ce sens, un système DAS doit être actif en permanence pour suivre correctement l'historique de santé du pipeline, en particulier lorsque des sollicitations importantes se produisent.

Les schémas d'installation couramment testés dans la littérature pour le PHM sont au nombre de trois : axial, en boucle ou hélicoïdal.

La géométrie axiale est avantageuse pour la détection des fuites et des dislocations de canalisations. Dans le premier cas, le câble DFOS peut être simplement positionné dans une disposition lâche, c'est-à-dire sans liaison mécanique [25]. Lorsque le fluide transporté s'échappe de la canalisation, il modifie la température locale du sol, et cette variation est suffisante pour être détectée par le DFOS [26]. La dislocation du pipeline, au contraire, est perceptible en collant trois câbles DFOS déplacés de 120° autour de la circonférence du pipeline [27]. À partir de la mesure de la déformation le long de ces trois lignes et compte tenu de la théorie du faisceau d'Euler – Bernoulli, il est possible de détecter la dislocation du pipeline et également d'estimer la direction dans laquelle elle se produit.

En configuration en cercle ou en boucle, le câble DFOS s'incurve autour de la surface extérieure du pipeline pour détecter les variations de déformation en cercle induites par des anomalies de pression liées à des fuites ou à la corrosion du pipeline. Dans le premier cas, le DFOS mesure la variation de contrainte de frette produite par la fuite, comme cela sera montré dans ce travail. Concernant la corrosion, la déformation circonférentielle est strictement liée à l'épaisseur de la canalisation, et ce paramètre peut évoluer dans le temps et localement du fait des phénomènes de corrosion. Des expériences réalisées sur une canalisation en acier corrodée avec un procédé contrôlé ont montré que des variations d'épaisseur de l'ordre du mm peuvent être mesurées par des arceaux de câble DFOS [28].

Enfin, la configuration hélicoïdale est une variante de la précédente, mais dans ce cas, la canalisation est enveloppée en continu dans le câble DFOS, évitant les connecteurs ou les portions de câble non liées.

Ce travail vise à tester cette dernière disposition de capteur sur des tuyaux en polyéthylène haute densité (PEHD), aujourd'hui les plus utilisés pour créer des conduites d'eau jusqu'à 300 mm de diamètre [29]. Ce matériau offre de faibles taux de défaillance et une bonne résistance aux sols corrosifs, une flexibilité aux mouvements du sol et aux surpressions transitoires. De plus, le PEHD résiste mieux aux grandes excursions thermiques concernant les tuyaux en fer et en acier [30]. En enroulant le câble à fibre optique sur la surface externe du tuyau, nous avons vérifié la capacité à détecter les contraintes liées aux anomalies de pression le long d'un pipeline, par exemple celles causées par une fuite d'eau. De cette façon,

ff

nous voulons tester les performances de cette technologie appliquée au domaine de l'approvisionnement en eau en tant que solution de surveillance rentable pour atténuer les WL. Notre enquête commence par les conduites d'eau urbaines en considérant les tuyaux en PEHD de petit à moyen diamètre. Cependant, le principe de surveillance peut être facilement étendu à de plus grands pipelines faits de différents matériaux, par exemple, des conduites forcées d'eau en acier hors sol.

Nous avons réalisé deux phases expérimentales. Dans le premier, nous avons évalué la disposition du capteur sur une canalisation en PEHD avec pression statique. L'objectif principal était d'évaluer la sensibilité à la déformation de cette solution sur la dilatation simple du tuyau donnée par la pression interne. Des phénomènes viscoélastiques ont été observés et pris en compte dans la création d'un jumeau numérique du dispositif expérimental. Ce dernier a été modélisé pour comparer les résultats expérimentaux avec la solution analytique et vérifier la sensibilité à la déformation de la disposition du capteur.

Dans la deuxième phase expérimentale, nous nous sommes plutôt concentrés sur la détection de l'anomalie de pression produite par une fuite dans un circuit de canalisation configuré avec de l'eau courante déplacée par une pompe. La fuite a été contrôlée par un robinet-vanne pour faire varier le débit sortant et trouver l'anomalie de pression minimale perceptible par le système DFOS.

Les deux phases ont donné des retours positifs sur la cohérence des mesures et sur la capacité du DFOS à surveiller les anomalies de déformation, donc les anomalies de pression, dans les canalisations en PEHD. Il convient de souligner ici que le comportement rhéologique du PEHD montre un caractère viscoélastique fort et complexe assez éloigné de la simple élasticité linéaire de l'acier. Cet aspect est particulièrement pertinent partout où l'on souhaite garantir un caractère définitivement quantitatif à la mesure. D'autres investigations sont nécessaires pour la détection d'autres phénomènes, par exemple, la dislocation des conduites, et pour l'installation de DFOS sur les conduites d'un point de vue industriel.

L'article est subdivisé comme suit : dans la section 2, les matériaux et les montages expérimentaux mis en œuvre dans les deux phases sont largement décrits. En outre, le contexte théorique hydraulique et la technologie DFOS adoptée sont largement illustrés, ainsi que le processus d'élaboration des données brutes pour obtenir des mesures de déformation distribuées du tuyau. La section 3 montre les principaux résultats obtenus à partir des deux phases expérimentales, tandis que dans la section 4, nous les analysons et discutons. Cette section se termine par nos conclusions sur ces investigations expérimentales et les développements futurs possibles de cette recherche.

2. Matériels et méthode 2.1.

Technologie et disposition des capteurs

Le câble de détection utilisé dans les expériences est une fibre optique à tampon serré monomode standard (SM G652D) ayant un diamètre de 0,9 mm et un revêtement polymère non armé qui répond aux spécifications LSZH. Le câble est enroulé en hélice sur la surface externe du tuyau avec un espacement uniforme, comme illustré à la figure 1. La liaison est simplement assurée par du ruban adhésif qui suit le chemin du câble. Le câble du capteur détecte simultanément les variations de contrainte et de température. À l'extrémité du tuyau, une partie du câble de détection retournant à l'interrogateur est fixée de manière lâche au tuyau pour la compensation de l'effet thermique sur la mesure DFOS [31].

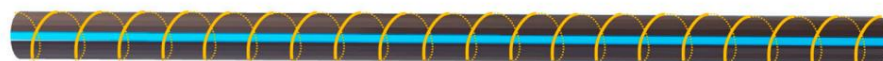


Figure 1. Un schéma de la disposition du capteur adopté : le câble DFOS est enroulé en hélice sur la surface externe du tuyau.

L'interrogateur DFOS - fourni par Coherentia Srl - repose sur la technique standard BOTDA, et son schéma fonctionnel est présenté à la figure 2. Le principe de fonctionnement est basé sur la diffusion stimulée de Brillouin (SBS), qui est l'interaction entre une onde de pompe pulsée et une sonde de contre-propagation à onde continue (CW) [32].

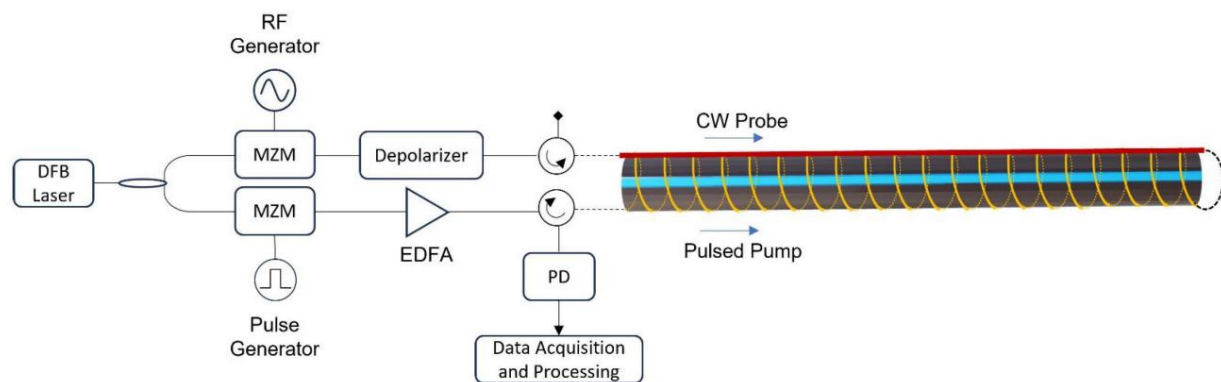


Figure 2. Schéma fonctionnel de l'unité BOTDA. En jaune, la fibre optique enroulée en hélice liée au tuyau en PEHD pour la détection de contrainte, et en rouge, la fibre renvoyée, fixée de manière lâche au tuyau, pour la compensation de température.

La lumière provenant d'un laser à rétroaction distribuée (DFB) de 1530 nm est divisée en deux branches par un coupleur optique de 3 dB. La branche supérieure est modulée de manière sinusoïdale par un modulateur Mach-Zehnder (MZM) piloté par un générateur RF pour fournir un signal de sonde à onde continue (CW) lancé depuis l'extrémité éloignée de la fibre de détection via un circulateur optique. Sa fréquence est décalée d'environ 10,8 GHz par rapport à la fréquence de pompe et balayée sur une plage de 1 GHz (équivalent à une dynamique de 20 mε). Un dépolariseur passif est utilisé pour éviter l'évanouissement de la polarisation [33]. Dans la branche inférieure, un autre modulateur Mach-Zehnder, piloté par un générateur d'impulsions et suivi d'un amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA), est utilisé pour générer des impulsions de pompe de 20 ns (équivalentes à une résolution spatiale de 2 m) avec un taux de répétition de 30 kHz, lancé dans la fibre de détection à partir d'un deuxième circulateur optique. Le même circulateur achemine également le signal de la sonde vers un photodétecteur 125 MHz (PD). Pour chaque position le long de la fibre de détection, le balayage de fréquence de la lumière de la sonde nous permet de reconstruire le spectre de gain Brillouin (BGS) dû au signal de rétrodiffusion généré par la pompe pulsée. La fréquence spécifique correspondant au maximum du BGS - appelée Brillouin Frequency Shift (BFS) - dépend de la température locale et de la contrainte agissant sur la fibre de détection. Après le PD, le signal est échantillonné par une carte de convertisseur analogique-numérique (ADC) de 125 MS/s (équivalent à un échantillonnage spatial de 80 cm) et traité pour récupérer le profil BFS sur toute la longueur du câble de détection. La précision de mesure de l'interrogateur BOTDA utilisé a été vérifiée comme étant meilleure que 0,5 °C/10 με.

Etant donné l'état de référence t_0 , le BFS à un instant générique t est la composition linéaire de déformation et variation de température concernant le premier [34] :

$$\Delta u_{BFS, \Delta t} = u_{BFS, t} - u_{BFS, t_0} = CT\Delta T + C\epsilon\epsilon, \quad (1)$$

où CT [MHz/°C] et $C\epsilon$ [MHz/με] sont les coefficients thermo-optique et de sensibilité à la déformation qui, pour un câble à fibre optique standard tel que celui utilisé ici, correspondent respectivement à 1 MHz/°C et 0,05 MHz/με [35]. Cependant, ces paramètres sont fortement influencés par les propriétés de revêtement du câble et les conditions de collage, qui peuvent modifier leur valeur [36]. Dans ce travail, nous supposons les valeurs standard des coefficients. En considérant le BFS par rapport à un état de référence, il est possible d'éliminer la composante de précontrainte sur le câble DFOS causée par la procédure d'installation. Dans chaque cas expérimental, l'état de référence a été pris avant la cause perturbatrice, c'est-à-dire avant le pompage de l'eau en phase I et la création de la fuite d'eau en phase II.

Pour chaque point de prélèvement, les variations de déformation et de température sont intégrées sur un intervalle spatial de 2 m, qui définit la résolution spatiale effective de l'interrogateur. Compte tenu de la disposition du capteur, la résolution spatiale linéaire effective du système le long du tuyau dépend du diamètre externe du tuyau et de l'espacement choisi lors du montage de la bobine de câble.

$$j\epsilon \Delta s = \frac{S}{L_c}, \quad (2)$$

où i est la résolution spatiale de l'interrogateur [m], S [m] est l'espacement des bobines et L_c [m] est la longueur de bobine égale à

$$L_c = S \sqrt{2} + C_e^2, \tag{3}$$

où C_e [m] est la circonférence externe du tuyau.
Le tableau 1 reprend la valeur de ces paramètres pour chaque phase expérimentale réalisée .

Tableau 1. Longueur de la bobine DFOS, espacement des bobines DFOS et résolution spatiale effective de déformation et de température pour chaque phase expérimentale.

Phase	CL [m]	S [m]	Δs [m]	Δv [GHz]	v_s [MHz]	Navigation	Δt [s]
Ie	0,198	0,05	0,45	10,4–11,4	5	256	7
II	0,108	0,04	0,72	10,75–11,3	1	256	20

Le temps de mesure total Δt a été ajusté en fonction des besoins expérimentaux par régler correctement la fenêtre de balayage de fréquence Δv , le pas de fréquence v_s et le nombre des moyennes N_{avg} par pas de fréquence, comme indiqué dans le tableau 1. En phase I, Δt a été fixé à 7 s pour suivre strictement le comportement viscoélastique du tuyau lorsqu'un palier de pression a été appliqué. Dans la phase II, l'accent a été mis sur les effets statiques causés par la fuite sur la déformation régime; par conséquent, Δt a été fixé à 20 s pour augmenter encore la précision de la mesure.

2.2. Phase I : Évaluation de la sensibilité de la disposition du capteur

La phase I visait à caractériser la sensibilité de l'aménagement choisi, c'est-à-dire la capacité du câble DFOS, enroulé en hélice et fixé sur la surface du tuyau à l'aide de ruban adhésif, pour détecter correctement les contraintes circonférentielles ou circonférentielles ϵ_θ . Cette déformation est théoriquement donnée par :

$$\epsilon_\theta = \frac{u}{r_e}, \tag{4}$$

où u est le déplacement radial et r_e est le rayon extérieur du tuyau. Le déplacement radial dépend de la géométrie de la section du tuyau, des propriétés mécaniques du matériau composant la conduite (module d'Young E et coefficient de Poisson ν) et sur la pression p_i [37] :

$$u = (2 - \nu) \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \frac{r_e p_i}{E}, \tag{5}$$

où β [-] est le rapport entre le rayon interne et le rayon externe du tuyau. Considérant Équations (4) et (5), nous avons :

$$\epsilon_\theta = (2 - \nu) \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \frac{p_i}{E}, \tag{6}$$

Comme pour tous les matériaux thermoplastiques, la réponse du HDPE à la contrainte instantanée provoquée par la pression interne p_i n'est pas simplement régi par la loi de Hooke en raison de sa viscoélastique rhéologie [38]. ϵ_θ est la combinaison d'une composante élastique instantanée $\epsilon_{\theta,0}$ et d'un composante visqueuse ou de fluage retardée dépendant du temps $\epsilon_{\theta,r}(t)$ [39] :

$$\epsilon_\theta(t) = \epsilon_{\theta,0} + \epsilon_{\theta,r}(t), \tag{7}$$

Ce comportement mécanique est bien reproduit par un modèle de Burger, dans lequel le Maxwell et les modèles Kelvin-Voigt sont connectés en série (Figure 3). Ce modèle est largement utilisé pour modélisant la première et la deuxième étape caractéristique du fluage dans les matériaux polymères [40]. Le modèle est régi par la loi suivante :

$$\epsilon_\theta(t) = \sigma_0 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) + \frac{t}{\eta_3} \right), \tag{8}$$

où σ_0 est la contrainte constante instantanée, E_1 [Pa] est le module d'élasticité, E_2 [Pa] est le module d'élasticité de la réponse au fluage et η_2 et η_3 [Pa s] sont les coefficients de viscosité dynamique. Le rapport η_2/E_2 détermine le retard ou temps de réponse τ [s] du matériau.

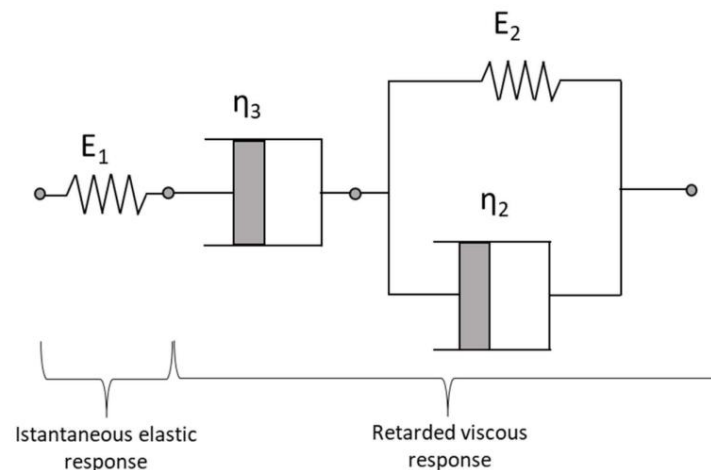


Figure 3. Le modèle Burger se compose de modèles Maxwell et Kelvin-Voigt en série.

En remplaçant l'Équation (8) dans l'Équation (6) ainsi que la composante de déformation thermique en cas de variation de température ΔT [°C], le modèle mécanique final du tuyau PEHD est donné par :

$$\beta \varepsilon_\theta(t) = (2 - \nu) \frac{2}{\pi} \frac{1}{1 - \nu} = \beta \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \frac{t}{\eta_3} \right] + \alpha_{HDPE} \frac{\Delta T}{KT}, \quad (9)$$

où α_{HDPE} est supposé égal à $200 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ et KT est un coefficient de température d'échelle, déterminé empiriquement, pour considérer l'inertie thermique du tuyau.

Si tous les paramètres de l'équation (9) peuvent être considérés comme constants le long de la dimension longitudinale du tuyau, la déformation circonférentielle est uniforme sur cette dimension. Sinon, une perturbation locale de 1 ou plusieurs d'entre eux génère également une perturbation de ε_θ qui peut être détectée à partir de la disposition hélicoïdale DFOS en réglant correctement l'espacement des bobines de câble en fonction du paramètre à surveiller.

Au cours de cette phase expérimentale, nous avons utilisé des barres tubulaires en PEHD de 2 m de longueur avec un diamètre extérieur de 63 mm et différentes Pressions Nominale (PN), c'est-à-dire différentes épaisseurs. Plus précisément, les barres PN10, PN16 et PN25 ont été testées. Chaque type de barre a été mis sous pression avec de l'eau à l'aide d'une pompe hydrostatique reliée à 1 des bords (Figure 4).

De l'autre côté, une soupape d'aération a été installée pour éliminer toutes les bulles d'air internes.

Dans chaque expérience, le tuyau a été pressurisé à une valeur donnée - 5 ou 10 bars - puis le comportement de déformation a été suivi dans le temps à l'aide de DFOS.

2.3. Phase II : Détection de fuite d'eau

Après avoir testé positivement la sensibilité de la disposition des capteurs adoptée dans la phase précédente, nous nous sommes concentrés sur la détection d'anomalies de pression le long du tuyau données, par exemple, par une fuite d'eau.

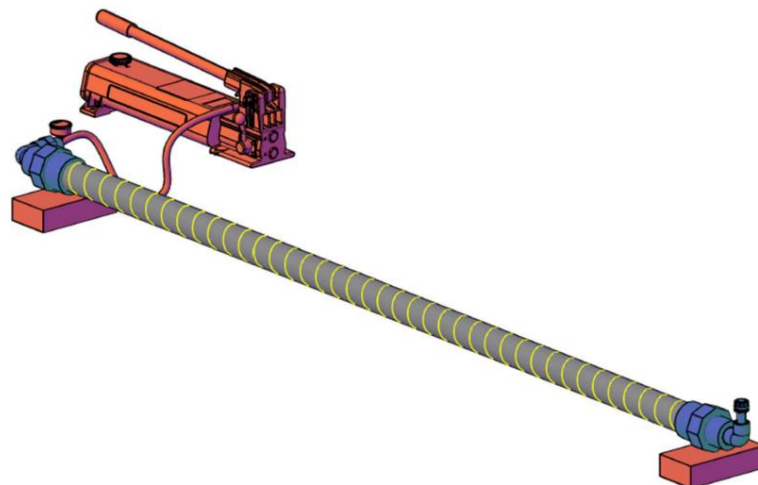


Figure 4. Configuration expérimentale de phase I. La barre est pressurisée à l'aide d'une pompe de test manuelle. De l'autre côté, une soupape d'aération empêche la formation de bulles d'air.

Le contexte théorique est principalement basé sur le coefficient de pertes de charge réparties J . Si l'on considère l'équation habituelle de Darcy – Weisbach pour un fluide incompressible dans un écoulement turbulent, J est égal à

$$VJ = \frac{2}{\lambda 2gD} \quad (\text{dix})$$

où λ est le facteur de friction, V est la vitesse d'écoulement moyenne, g est l'accélération de la gravité et D est le diamètre interne du tuyau. Pour l'estimation de λ , l'équation de Colebrook–White [41] a été utilisée.

Si l'on considère une longueur ΔL d'une canalisation uniforme sans pertes de charge concentrées, la perte de charge totale ΔH produite par J est :

$$\Delta H = J\Delta L \quad (11)$$

La perte de charge ΔP est alors liée à la perte de charge

$$\Delta p = \gamma \Delta h = \gamma \Delta H, \quad (12)$$

où γ [kg/m³] est le poids spécifique de l'eau et Δh la perte de hauteur piézométrique.

Compte tenu de ces considérations, une fuite d'eau génère en aval un débit plus faible, donc une vitesse moyenne plus faible et un J plus faible le long de la conduite principale. Cela signifie que si l'on prend 2 tronçons de canalisation surveillés par DFOS de même longueur ΔL en amont et en aval du point de fuite, on a 2 valeurs de ΔP différentes, donc 2 différences de contrainte de frette différentes $\Delta \epsilon_{\theta, \text{amont}}$ et $\Delta \epsilon_{\theta, \text{aval}}$. Cette déformation, compte tenu de l'échelle temporelle du phénomène, peut être calculée à partir de l'équation (9) en ne considérant que la contribution élastique instantanée et en négligeant les composantes fluage et thermique :

$$\beta \Delta \epsilon_{\theta} = \frac{2}{2 - \beta^2} \frac{\Delta p}{E_1}, \quad (13)$$

Le terme v a également chuté par rapport au cas précédent car l'eau n'est pas confinée au bord des conduites.

Pour être détectable, cette différence de contrainte doit être supérieure à la précision de la mesure, soit 10 $\mu\epsilon$. Par conséquent, pour chaque système de canalisation d'eau, il existe un débit de fuite minimal détectable qui dépend des caractéristiques géométriques et mécaniques de la canalisation, de la vitesse de l'eau et de l'espacement des spires du câble.

Dans cette phase, nous avons utilisé un tuyau PEHD PN10 d'un diamètre extérieur de 32 mm. Une canalisation de 8 m de longueur formant un « U » (Figure 5) a été créée sur un plan horizontal.

Un robinet-vanne au milieu a été installé pour simuler la fuite d'eau. Comme dans la phase précédente, des DFOS ont été installés sur la surface extérieure de la conduite. Les 2 lignes de détection avant et après le robinet-vanne sont reliées à l'aide d'un connecteur à fibre optique. L'eau est déplacée par une pompe submersible placée dans un réservoir d'eau.

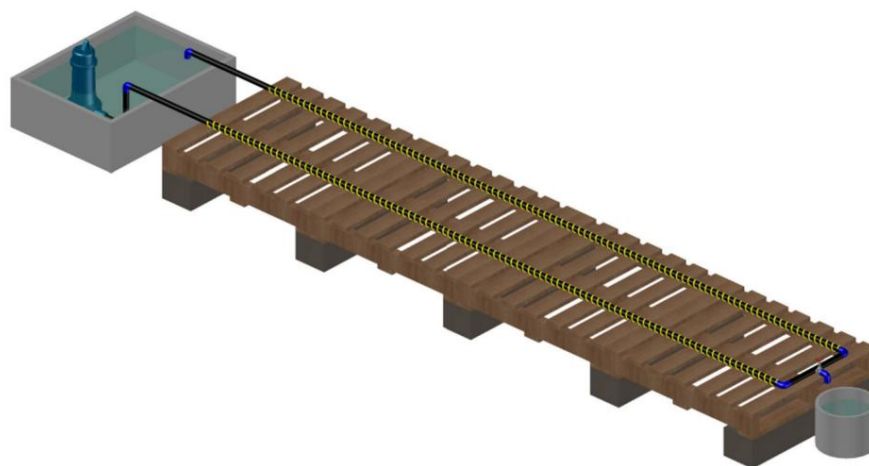


Figure 5. Configuration expérimentale de phase II. Une canalisation en PEHD de 8 m de long a été créée sur un plan horizontal avec un robinet-vanne pour simuler une fuite d'eau. L'eau est déplacée par une pompe submersible reliée à un bord du pipeline.

La courbe caractéristique de la pompe a été déterminée expérimentalement en faisant varier le débit et en vérifiant la hauteur manométrique simultanément avec un transducteur de pression. La courbe d'interpolation des points expérimentaux (ligne bleue) est représentée sur la figure 6, ainsi que la courbe caractéristique de l'installation (en cas d'absence de fuites) déterminée analytiquement.

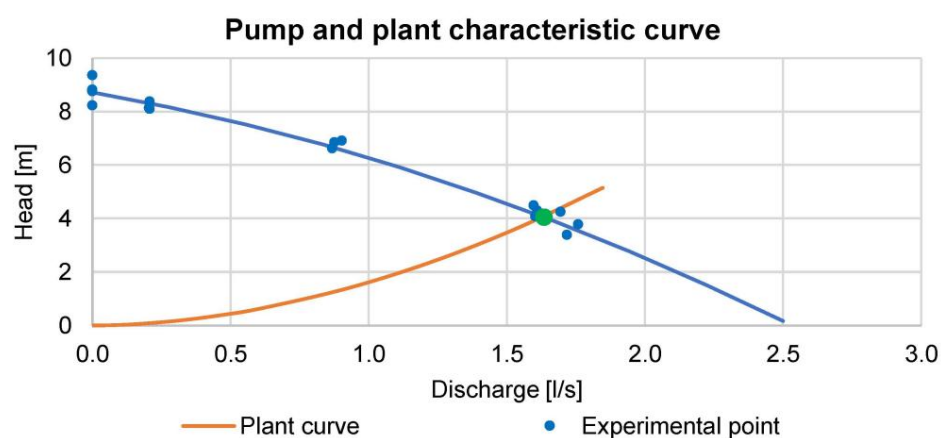


Figure 6. Courbe caractéristique de la pompe et de l'installation.

Le point de fonctionnement de la pompe, vérifié expérimentalement, est placé à 1,63 L/s ce qui correspond à une hauteur manométrique de 4,07 m.

Lors de l'essai, à l'ouverture du robinet-vanne, le point de fonctionnement de la pompe se décale vers le débit supérieur et la hauteur manométrique inférieure. Cela affecte la valeur des pertes de charge réparties et, par conséquent, la déformation de la conduite. Grâce au DFOS, nous avons surveillé ces changements pour la localisation de l'anomalie de pression donnée par la fuite.

3. Résultats

3.1. La phase I

Les principaux résultats obtenus à partir de cette phase expérimentale sont illustrés ci-dessous. La figure 7 montre les profils BFS et BGS brut mesurés par l'interrogateur BOTDA sur la conduite PN16 à 0, 5 et 10 bar.

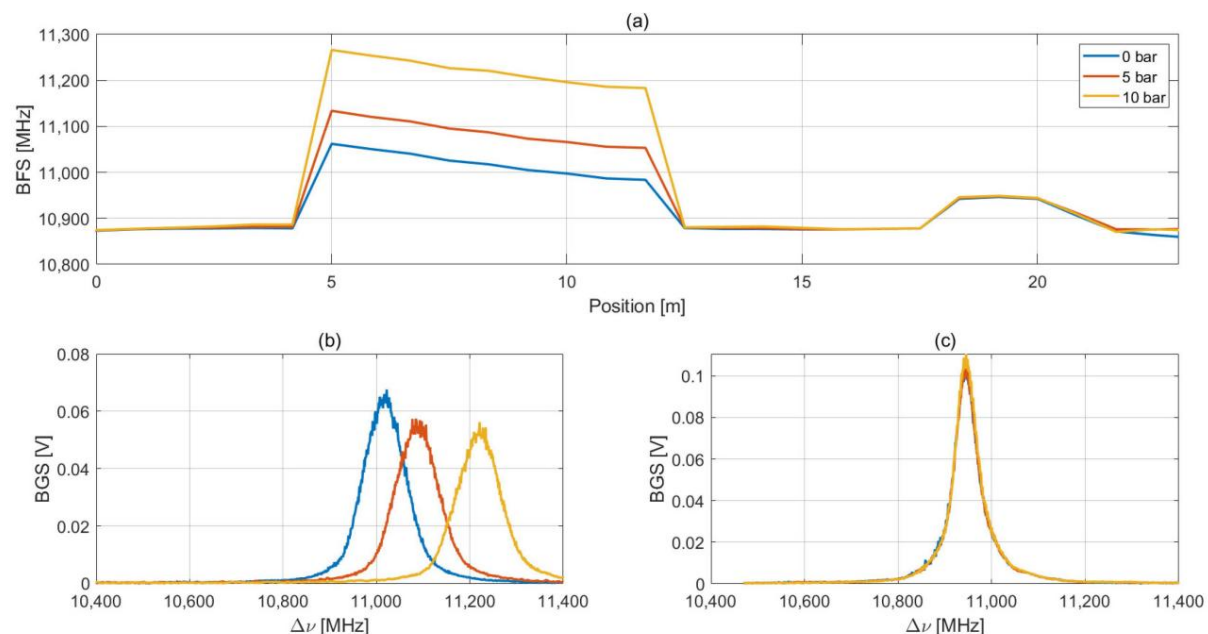


Figure 7. (a) Profils BFS mesurés pour différentes valeurs de pression appliquées au tuyau. (b) Profils BGS mesurés sur la fibre de détection enroulée en hélice dans la partie centrale du tuyau (8 m). (c) BGS mesuré sur la fibre de compensation de température dans la même position que (b).

D'après la figure 7a, il est clair que la section de fibre enroulée en hélice commence autour de 4 m et se termine à 12,5 m. La section de fibre faiblement liée au tuyau pour la compensation de température passe de 18 à 20 m. La valeur BFS plus élevée pour la section de courbe 0 bar correspondant à la fibre enroulée sur le tuyau est clairement due à la précontrainte induite lors de l'installation, tandis que la différence de BFS des courbes 5 et 10 bar par rapport à la courbe 0 bar de référence est due à une contrainte circonférentielle croissante lorsque la pression du tuyau est augmentée. La figure 7b rapporte les courbes BGS mesurées pour chaque pression appliquée dans la zone centrale de la conduite (8 m). Comme prévu, un décalage net de 73 et 200 MHz dû à une contrainte de cerceau accrue par rapport au BGS de référence à 0 bar est évident. La figure 7c montre les courbes BGS mesurées sur la fibre lâche approximativement à la même position du tuyau (19 m). Du fait d'une température ambiante stable pendant cette phase expérimentale, il n'y a pas de décalage entre les courbes BGS. Nous soulignons également que le rapport signal sur bruit (SNR) de la mesure BGS est toujours supérieur à 40 dB, ce qui conduit à une estimation très précise des valeurs BFS.

La figure 8 rapporte l'historique des déformations circonférentielles du tuyau PN16 pressurisé à 5 bar. Le comportement de déformation est typiquement viscoélastique avec une récupération complète de la déformation après l'instant de déchargement. Après le développement de la déformation élastique instantanée et de l'étape de fluage primaire, le processus de déformation entre dans l'étape de fluage secondaire, où la vitesse de déformation est constante dans le temps. Les variations de température, comme on peut le voir sur le tracé, sont négligeables pendant l'essai, de même que les effets associés sur les mesures et sur le matériau.

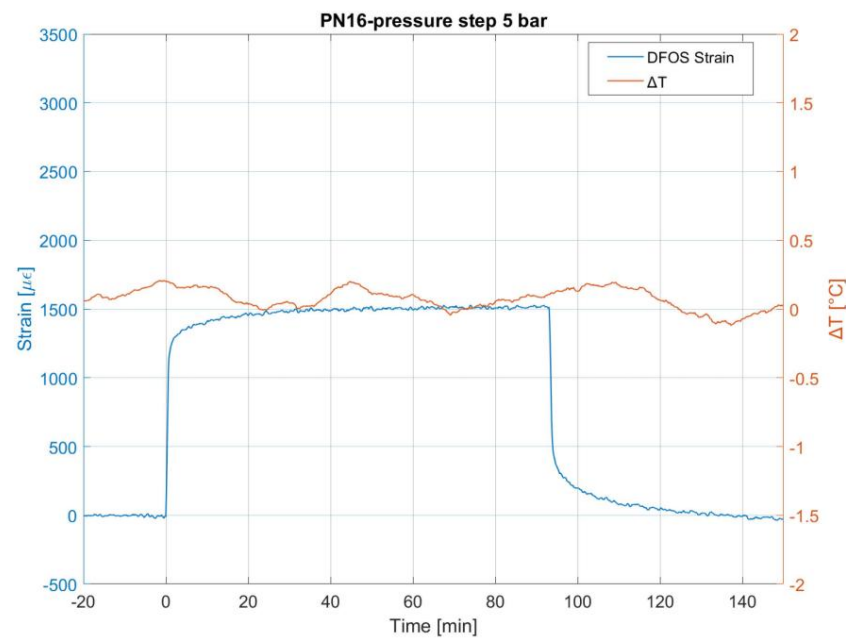


Figure 8. Déformation spatiale moyenne et variation de température mesurées par le DFOS lors de l'essai de pression sur la canalisation PN16.

Les effets thermiques sont plutôt évidents lors du test de pression sur le PN25. Dans ce cas, la partie lâche de la disposition du capteur DFOS a mesuré une variation de température allant jusqu'à 4 °C. Cette variation implique une déformation thermique qui n'est pas récupérée dans l'étape de déchargement, comme on peut le voir sur la figure 9.

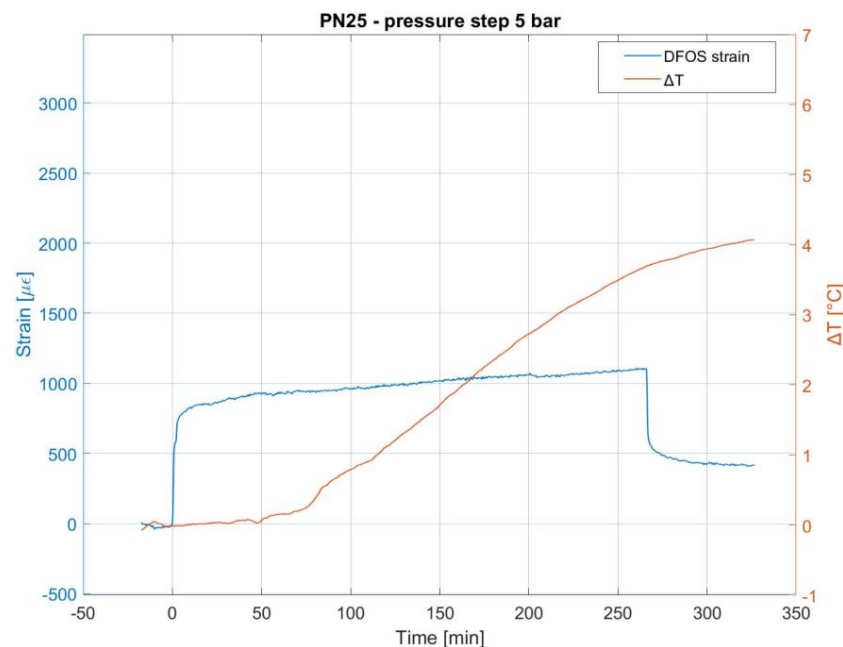


Figure 9. Déformation spatiale moyenne et variation de température mesurées par DFOS lors de l'essai de pression sur la conduite PN25.

De plus, la contrainte appliquée a une influence importante sur le processus de fluage : les étapes de fluage primaire et secondaire varient en forme et en durée selon l'entité [42]. Ceci a été observé lors de l'essai sur le tuyau PN10 qui a l'épaisseur la plus faible, et donc la contrainte appliquée la plus élevée. La figure 10 compare la réponse à la contrainte avec celle enregistrée avec

le tuyau PN16. L'étape de fluage primaire dans PN10 montre un temps de retard plus élevé, alors que la deuxième étape est régie par un taux de déformation plus élevé.

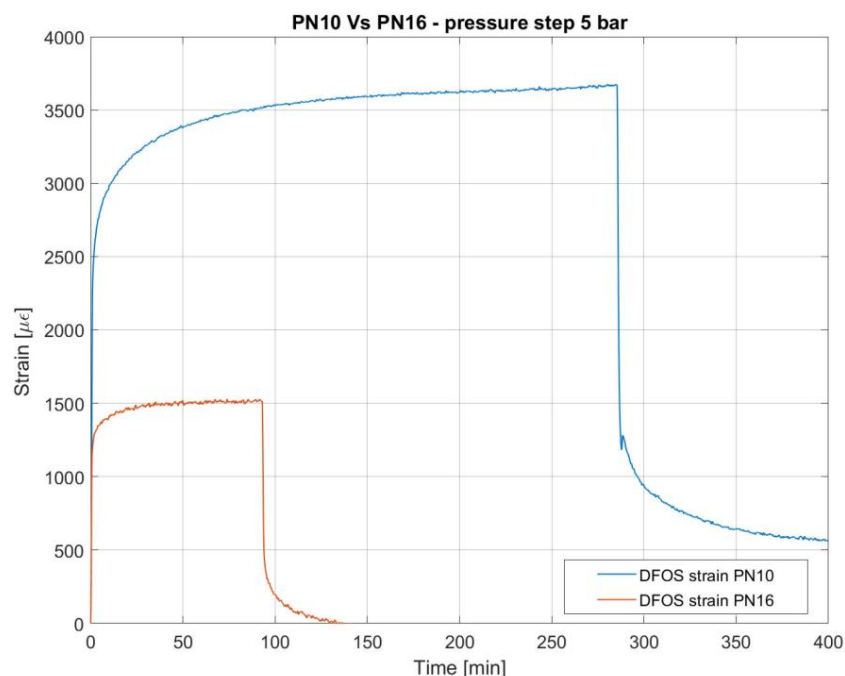


Figure 10. Comparaison entre les déformations spatiales moyennes mesurées par DFOS sur les canalisations PN10 et PN16 pressurisé à 5 bars. Les deux expériences ont été réalisées à température constante.

Sur la base de ces observations expérimentales, nous avons calibré et validé un Burger modèle viscoélastique utilisant le schéma mécanique rapporté à la figure 3. Les paramètres estimés pour chaque type de canalisation sont synthétisés dans le tableau 2. Pour les paramètres ν , $E1$ et α HDPE nous avons pris les valeurs couramment présentes dans la littérature. Les autres paramètres ont été calibré sur les données expérimentales en minimisant la somme des écarts carrés entre les déformations circonférentielles mesurées et modélisées. PN16 et PN25 se sont révélés régis par le même ensemble de valeurs pour $E2$, $\eta2$ et $\eta3$, alors que pour PN10 ces paramètres sont légèrement différente en raison des considérations précédentes. La figure 11 compare les résultats expérimentaux avec l'historique de déformation donné par le modèle pour les canalisations PN10 et PN16 pressurisées à 5 bar.

Tableau 2. Les paramètres géométriques et mécaniques ont été estimés pour chaque type de tuyau testé.

Paramètre	eu h	PN10	PN16	PN25
β	-	0,86	0,78	0,70
ν	-	0,4	0,4	0,4
$E1$	MPa	$1,05 \times 10^3$	$1,05 \times 10^3$	$1,05 \times 10^3$
$E2$	MPa	$1,65 \times 10^3$	$4,47 \times 10^3$	$4,47 \times 10^3$
$\eta2$	MPa	$2,04 \times 10^6$	$2,77 \times 10^6$	$2,77 \times 10^6$
$\eta3$	MPa	$2,13 \times 10^8$	$4,68 \times 10^8$	$4,68 \times 10^8$
α HDPE	$\mu\epsilon/^\circ\text{C}$	200	200	200
KT	-	4	4	4

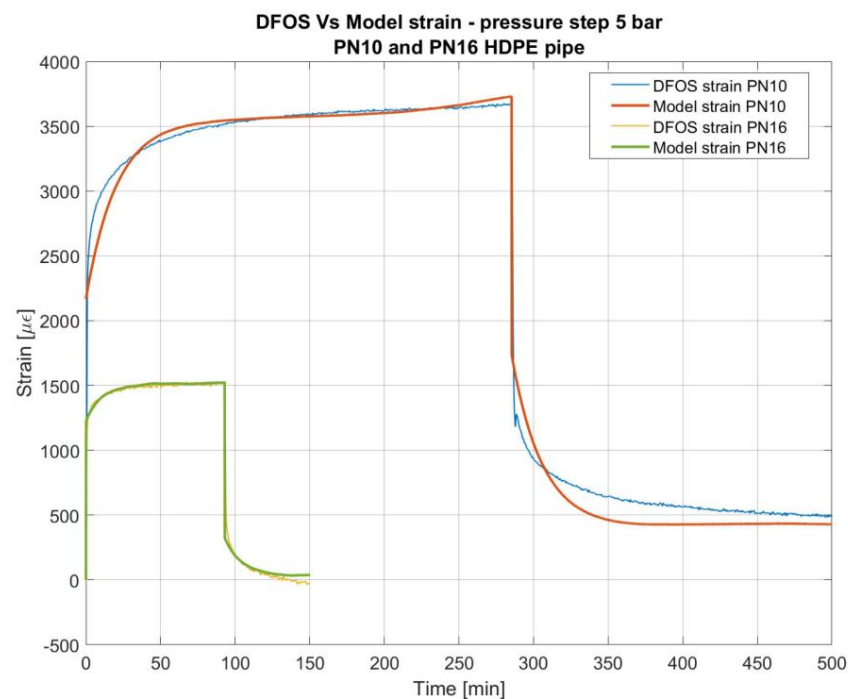


Figure 11. Comparaison entre la déformation mesurée par DFOS et la déformation modélisée à l'aide du modèle de fluage de Burger pour une conduite PEHD PN10 et PN16 pressurisée à 5 bar.

3.2. Phase II

La figure 12 montre les tendances théoriques le long de la canalisation de la charge hydraulique et la hauteur piézométrique avant et après l'ouverture de la vanne, simulant la fuite. La vanne, placée à 4,20 m, a été ouverte à son maximum, fournissant un débit vers l'extérieur égal à 34 % de celui qui coule lorsque la vanne est fermée.

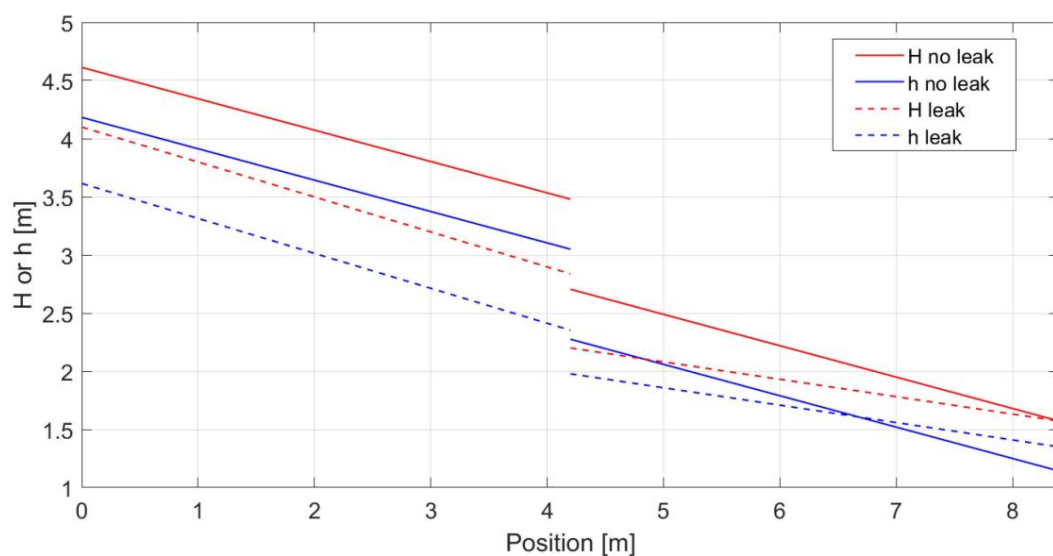


Figure 12. Charge hydraulique et hauteur piézométrique le long de la canalisation avant (traits pleins) et après (traits pointillés) l'ouverture de la vanne de fuite.

Comme on peut le voir sur le graphique, la fuite produit une diminution de la hauteur piézométrique en amont, donnée par une augmentation du débit et donc de la vitesse. Ceci produit une déformation circonférentielle négative tout le long de la conduite amont, dont l'entité varie le long de celle-ci en fonction du nouveau Jamont supérieur établi.

Dans le cas contraire, la conduite aval subit une diminution du débit d'écoulement qui génère un Javal beaucoup plus faible. Cela provoque une augmentation de la hauteur piézométrique d'où une déformation circonférentielle positive perceptible à une certaine distance du point de fuite.

La figure 13a montre la déformation expérimentale du cerceau (marqueurs de points) mesurée par le DFOS par rapport à la prédiction théorique (représentée par une ligne continue droite) pour les deux sections amont et aval de la canalisation après l'ouverture de la vanne. Les données expérimentales de déformation du cerceau ont été extraites en traitant le BFS acquis avant et après la fuite (Figure 13b) avec la méthode décrite dans la section 2. La section de canalisation l'amont de la vanne de fuite est positionné entre 9 et 16 m, alors que l'aval on est de 29 m à 36 m. Ces positions se réfèrent à la longueur réelle du câble à fibre. Le le pic à la position 20 m est donné par le connecteur.

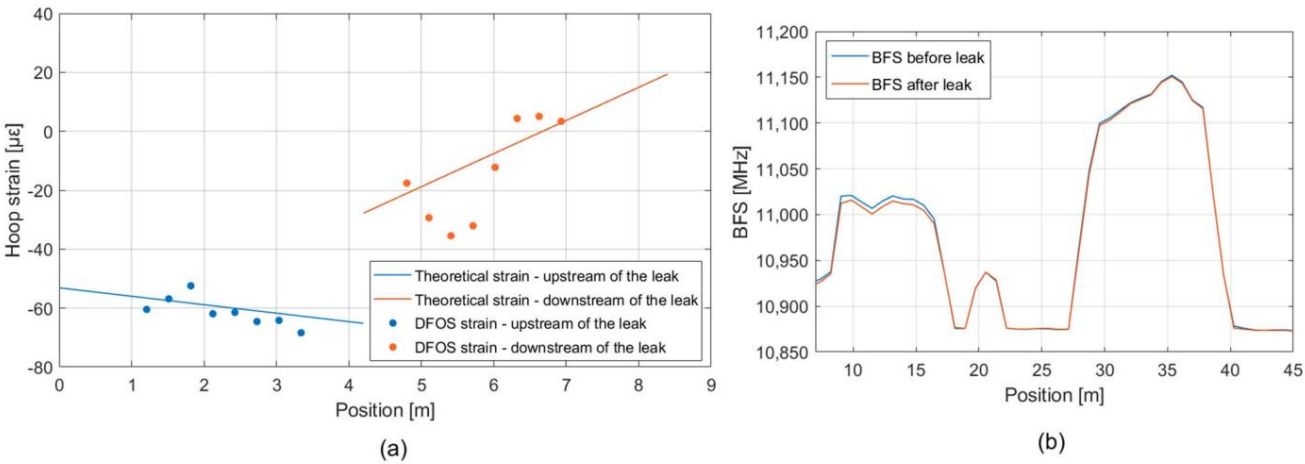


Figure 13. (a) Comparaison entre la déformation théorique du cercle et les mesures DFOS le long la canalisation après l'ouverture de la vanne de fuite. (b) Profils BFS le long du pipeline mesurés avant et après l'ouverture de la vanne de fuite.

Comme on peut le voir à partir de la solution théorique, la conduite aval est soumise à une plus grande variation de déformation le long de la conduite concernant la conduite en amont du point de fuite : à bord du premier, on a estimé environ +50 μɛ de différence, alors qu'au même point de ces derniers, cette valeur a été fixée à -12 μɛ. Ceci est causé par la variation du J donné par la fuite d'eau. Le tableau 3 reprend la variation attendue de J par rapport à la valeur théorique arrière-plan et ceux mesurés en considérant le point DFOS le plus éloigné disponible et n'est pas affecté par les conditions aux limites. Le pourcentage d'erreur est plus grand dans le tuyau en amont en raison des très faibles variations de déformation, proches de la précision du système DFOS.

Tableau 3. Variation attendue et mesurée de J en amont et en aval du point de fuite.

Tuyau	ΔJ Estimation	ΔJ mesuré	Erreur %
En amont de la fuite	−0,03	−0,04	30.27
En aval de la fuite	+0,12	+0,11	12.31

Concernant les mesures DFOS, celles recueillies sur la conduite aval sont localement plus dispersée par rapport à la valeur estimée. Certains points DFO sont supérieures à 20 μɛ loin des valeurs estimées, alors que sur la conduite amont, tous les points de mesures sont dans la plage ±3 μɛ, donc en dessous de la précision du système. Ce fait est probablement dû à la turbulence produite par la fuite qui, compte tenu de la petite dimension de l'expérience configuration, affecte les mesures DFOS sur le tuyau en aval.

4. Discussion et conclusions

Les études expérimentales que nous avons menées ont donné des retours positifs sur l'utilisation du DFOS pour la surveillance des conduites d'eau en PEHD.

Tout d'abord, la disposition choisie des capteurs garantit une excellente sensibilité dans le suivi de l'historique de déformation de la conduite. En ce qui concerne la résolution spatiale, celle-ci peut être simplement réglée en faisant varier l'espacement des bobines de câble DFOS. La précision de déformation est de $10\ \mu\text{e}$, ce qui signifie que si l'on considère un tuyau en PEHD PN10 d'un diamètre extérieur de 63 mm, toutes les variations de pression supérieures à 0,016 bar produisent une déformation circonférentielle mesurable.

En mesurant la déformation circonférentielle ou frette lors de la première phase des expérimentations, nous avons réussi à calibrer et valider les paramètres rhéologiques d'un modèle viscoélastique. De plus, en réalisant ces essais sur des canalisations d'épaisseurs différentes, nous avons démontré que cette solution pouvait potentiellement être utilisée pour le suivi de l'état d'usure des canalisations. Pensez, par exemple, à une conduite forcée en acier vieillie amenant l'eau à une centrale hydroélectrique dont l'épaisseur a diminué après plusieurs décennies de service. En enroulant le câble DFOS autour de la surface externe de la conduite forcée et en connaissant l'épaisseur de conception d'origine pour chaque portion de la ligne, grâce à la mesure de la contrainte périphérique, il est possible de faire un dépistage distribué de l'épaisseur réelle et de localiser les sections qui ne satisfont pas les conditions de service. Si l'on considère, par exemple, une conduite forcée en acier ayant un diamètre extérieur de 0,72 m, une épaisseur de 16 mm et une pression intérieure d'environ 35 bars, les DFOS sont capables de détecter des variations d'épaisseur de l'ordre de 2,5 % (0,4 mm).

Concernant la deuxième phase expérimentale, nous avons appliqué pour la première fois la technologie DFOS à un système de canalisation en PEHD avec eau courante. La configuration de détection déployée est capable de détecter des anomalies de pression le long d'un pipeline, données, par exemple, par une fuite d'eau. Le concept de surveillance est basé sur les effets que ces événements produisent sur la pente des pertes de charge réparties J - donc sur la déformation circonférentielle - en aval du point de fuite. Le débit d'eau, en réduisant son débit, donc sa vitesse, diminue les pertes par frottement par rapport à l'état de fonctionnement. La disposition du système DFOS mis en œuvre est capable de détecter cette variation. Malgré un certain bruit affectant les mesures DFOS donné par les caractéristiques du montage expérimental, la correspondance avec les valeurs théoriques attendues est bonne.

Au niveau opérationnel, la précision de déformation de l'unité d'interrogation définit l'extension minimale requise pour détecter correctement la variation de J . La figure 14 montre comment la longueur minimale requise change sur un tuyau en PEHD PN10 avec un diamètre extérieur de 32 mm et une disposition d'espacement des câbles DFOS de 4 cm en considérant différentes vitesses d'écoulement et différents pourcentages de fuite.

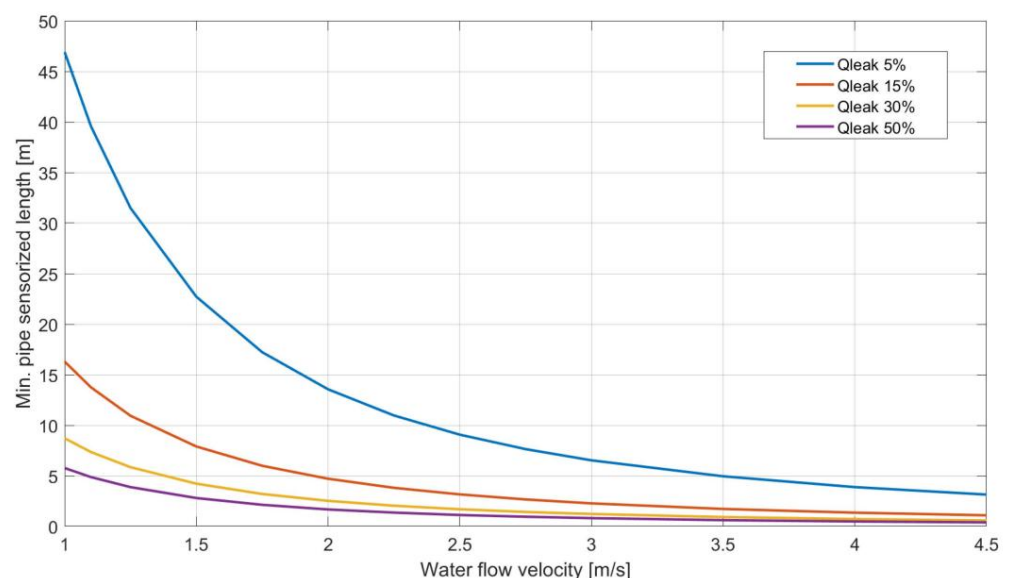


Figure 14. Longueur minimale de tuyau détectée requise pour détecter un changement sur J en tenant compte de différentes vitesses d'écoulement et de différents pourcentages de débit de fuite par rapport à l'état de fonctionnement.

Compte tenu du débit opérationnel du système de conduites, plus le débit sortant minimal devant être détecté est faible, plus la longueur de capteur DFOS minimale requise est élevée. Ce paramètre dépend également des propriétés géométriques et mécaniques de la section de tuyau.

Un résultat important est qu'en ne surveillant qu'une partie donnée d'un pipeline, il est possible d'avoir suffisamment d'informations sur l'intégrité de la partie en amont du système. Par conséquent, un système de surveillance basé sur DFOS est potentiellement capable de couvrir même plusieurs kilomètres d'infrastructure de pipeline en installant simplement des éléments de conduite sensoriels avec une fréquence spatiale personnalisée.

Dans ce travail, nous avons étudié pour la première fois l'utilisation du DFOS Brillouin pour la surveillance des infrastructures de canalisations d'eau en PEHD, dont la gestion est un problème croissant partout dans le monde. Le principe de détection des fuites est basé sur la surveillance de la contrainte périphérique de la canalisation. Il s'agit d'une mesure indirecte de la variation de pression interne provoquée par une fuite d'eau. Par conséquent, une fois connues la mécanique du matériau et les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement de l'eau, l'effort de traitement des données est assez rapide. Il s'agit d'une approche alternative par rapport à celle basée sur les méthodes acoustiques/vibratoires, principalement utilisées sur les canalisations en acier. D'autres solutions de surveillance de déformation, comme les réseaux de Bragg en fibre ou les extensomètres à corde vibrante, peuvent fournir une meilleure précision que le DFOS de Brillouin, mais elles n'offrent qu'une mesure de déformation ponctuelle. Par conséquent, leur utilisation intensive dans un pipeline, comme nous l'avons fait avec le DFOS, impliquerait des coûts beaucoup plus élevés et une configuration du système plus complexe.

Nous avons prouvé que cette technologie est capable de détecter en continu les anomalies de pression temporelle et spatiale affectant le pipeline en modifiant sa contrainte circonférentielle. Cela signifie que l'on peut considérer que cette technologie a atteint une maturité RTL de niveau 4, « Technologie validée en labo ».

Ce type de surveillance de canalisations va au-delà des solutions traditionnelles de surveillance de la pression des canalisations, limitées à un nombre donné de points caractéristiques, et offre éventuellement, une fois des preuves supplémentaires recueillies dans des environnements pertinents et opérationnels, et certaines barrières technologiques d'industrialisation franchies, une vision continue et simultanée de l'évolution des charges sur l'ensemble du réseau. Les tests ont été effectués sur des tuyaux en PEHD, couramment utilisés pour les infrastructures de transport d'eau à des fins agricoles, civiles et industrielles. Le câble DFOS a été enroulé et fixé sur la surface externe du tuyau.

La sensibilité de cette configuration de capteur a été positivement évaluée grâce à nos tests expérimentaux effectués dans la première phase.

Dans une deuxième phase, nous nous sommes plutôt concentrés sur la possibilité de détecter les effets liés à une fuite d'eau le long d'une canalisation. En particulier, nous avons basé notre étude sur la variation du coefficient de perte de charge distribué J , en gardant clairement à l'esprit qu'il s'agit du paramètre principal qui régit les pertes de charge dans les réseaux de canalisations longs. Nous nous sommes concentrés non seulement sur la détection des fuites mais aussi sur l'estimation de leur entité. Des fuites d'eau de l'ordre de 5% sont potentiellement détectables dans les canalisations avec une vitesse d'écoulement comprise entre 2 et 4 m/s en ajustant simplement la longueur captée avec le DFOS. Les résultats théoriques et expérimentaux sont prometteurs et les caractéristiques opérationnelles de cette technologie, là encore à considérer comme atteignant un niveau RTL de 4, sont compatibles avec des applications sur le terrain. L'alimentation en énergie n'est requise que par l'unité de dispositif d'interrogation qui peut être placée même à plusieurs kilomètres de la section surveillée du réseau de canalisations.

Les développements futurs se concentreront sur des études plus détaillées de cette solution de surveillance (environnement réel inclus) et sur la production industrielle de tuyaux en PEHD "nativement intelligents", dans lesquels des câbles DFOS sont intégrés à la surface du pipeline lors du processus d'extrusion. La compensation des effets thermiques produits par les gradients thermiques présents le long du trajet du pipeline dans la tranchée de sol est également un autre défi qui pourrait être potentiellement résolu en installant un câble DFOS lâche à côté du pipeline. Enfin, une couche d'interprétation des données DFO basée sur des algorithmes d'apprentissage automatique pourrait être développée pour créer un modèle de prédiction des fuites.

Contributions des auteurs : Conceptualisation, MB, IB et GM ; méthodologie, GM ; analyse formelle, MB, IB, ML et GM ; enquête, MB, IB et ML ; ressources, GM et JM ; conservation des données, MB et IB ; rédaction—préparation du brouillon original, MB ; rédaction—révision et édition, MB, DFB, GM et JM ; visualisation, IB ; supervision, directeur général ; administration du projet, GM et DFB Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Cette recherche n'a reçu aucun financement externe.

Déclaration du comité d'examen institutionnel : sans objet.

Déclaration de disponibilité des données : les ensembles de données sont disponibles sur demande auprès de l'auteur correspondant.

Remerciements : Les auteurs tiennent à remercier Cohaerentia Srl pour la mise à disposition de l'unité d'interrogation et pour le support technique constant.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

1. Frederick, KD; Major, DC Changement climatique et ressources en eau. *Clim. Chang.* 1997, 37, 7–23. [\[Référence croisée\]](#)
2. Farley, M.; Wyeth, G.; Ghazali, ZBM ; Istandar, A.; Singh, S.; Dijk, N.; Raksakulthai, V.; Kirkwood, E. Le manuel du gestionnaire sur l'eau non génératrice de revenus : un guide pour comprendre les pertes d'eau ; Ranhill Utilities Berhad ; L'Agence des États-Unis pour le développement international : Bangkok, Thaïlande, 2008.
3. Al-washali, T. ; Sharma, S.; Kennedy, M. Méthodes d'évaluation des pertes d'eau dans les systèmes d'approvisionnement en eau : un examen. *Ressource en eau.* Géré. 2016, 30, 4985–5001. [\[Référence croisée\]](#)
4. Barton, Amérique du Nord ; Adieu, TS ; Hallett, SH; Acland, TF Amélioration des prédictions de défaillance des conduites : Facteurs affectant la défaillance des conduites dans les réseaux d'eau potable. *Eau Rés.* 2019, 164, 114926. [\[Référence croisée\]](#)
5. Martínez-Codina, Á. ; Castillo, M.; González-Zeas, D.; Garrote, L. La pression en tant que prédicteur de l'occurrence de ruptures de conduites dans l'eau réseaux de diffusion. *Urban Water J.* 2016, 13, 676–686. [\[Référence croisée\]](#)
6. Laucelli, D.; Rajani, B.; Kleiner, Y.; Giustolisi, O. Étude sur les relations entre les covariables liées au climat et les ruptures de conduites à l'aide d' une modélisation basée sur l'évolution. *J. Hydroinform.* 2014, 16, 743–757. [\[Référence croisée\]](#)
7. Adamkowski, A. Étude de cas : Défaillance de la conduite forcée de la centrale électrique de Lapino. *J. Hydraul. Ing.* 2001, 127, 547–555. [\[Référence croisée\]](#)
8. Ben Saleh, MS ; Qasim, SM ; Obeid, AM ; Garcia-Ortiz, A. Un examen du réseau de capteurs sans fil pour les applications de surveillance des conduites d'eau. Dans *Actes de la Conférence internationale 2013 sur les technologies et les systèmes de collaboration (CTS)*, San Diego, Californie, États-Unis, 20-24 mai 2013 ; IEEE : Piscataway, NJ, États-Unis, 2013 ; p. 128–131.
9. Bimpas, M. ; Amditis, A.; Uzunoglu, N. Détection des fuites d'eau dans les conduites d'alimentation à l'aide d'un capteur à onde continue fonctionnant à 2,45 GHz. *J. Appl. Géophys.* 2010, 70, 226–236. [\[Référence croisée\]](#)
10. Ayadi, A. ; Ghorbel, O.; Ben Salah, MS ; Abid, M. Un cadre de surveillance des techniques de canalisation d'eau basé sur des capteurs les technologies. *Université J. King Saud. Calcul. Inf. Sci.* 2022, 34, 47–57. [\[Référence croisée\]](#)
11. Aamo, OM Détection de fuites, estimation de taille et localisation dans les écoulements de conduites. *IEEE Trans. Automat. Contre.* 2015, 61, 246-251. [\[Référence croisée\]](#)
12. Ullah, N. ; Ahmed, Z.; Kim, J.-M. Détection des fuites de pipeline à l'aide d'algorithmes d'émission acoustique et d'apprentissage automatique. *Capteurs* 2023, 23, 3226. [\[Référence croisée\]](#)
13. Lopez-Higuera, JM ; Cobo, LR ; Incera, AQ; Cobo, A. Capteurs à fibre optique dans la surveillance de la santé structurelle. *J.Lumière. Technol.* 2011, 29, 587–608. [\[Référence croisée\]](#)
14. Ho, M.; El-Borgi, S.; Patil, D.; Song, G. Systèmes d'inspection et de surveillance des pipelines sous-marins : un document de synthèse. *Structure. Moniteur de santé.* 2020, 19, 606–645. [\[Référence croisée\]](#)
15. Ren, L. ; Jia, Z.; Ho, MSC ; Yi, T.; Li, H. Application d'un capteur de contrainte basé sur un réseau de Bragg à fibre dans les vibrations induites par un vortex de pipeline la mesure. *Sci. Chine Technol. Sci.* 2014, 57, 1714–1720. [\[Référence croisée\]](#)
16. Jia, Z. ; Ren, L.; Li, H.; Ho, S.; Song, G. Étude expérimentale de la détection des fuites de pipeline basée sur la mesure de la déformation du cerceau. *Structure. Surveillance de la santé de contrôle.* 2015, 22, 799–812. [\[Référence croisée\]](#)
17. Barrias, A.; Casas, JR ; Villalba, S. Un examen des capteurs à fibre optique distribués pour les applications de génie civil. *Capteurs* 2016, 16, 748. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
18. Hong, C.-Y. ; Zhang, Y.-F. ; Li, G.-W. ; Zhang, M.-X.; Liu, Z.-X. Les progrès récents de l'utilisation des capteurs à fibre optique distribués Brillouin pour surveillance de la santé géotechnique. *Sens. Actionneurs A Phys.* 2017, 258, 131-145. [\[Référence croisée\]](#)
19. Bertulesi, M. ; Bignami, DF ; Boschini, I.; Chiarini, A.; Ferrario, M.; Mazzon, N.; Menduni, G.; Morosi, J.; Zambrini, F. Conceptualisation et prototype d'un revêtement de détection anti-érosion pour la surveillance des digues : tests expérimentaux et modélisation numérique. *Eau* 2020, 12, 3025. [\[CrossRef\]](#)
20. Zhao, X. ; Gong, P.; Qiao, G.; Lu, J.; Lv, X. ; Ou, J. Brillouin Capteurs de dilatation de la corrosion pour les structures en béton armé utilisant une méthode d'enroulement de bobine à fibre optique. *Capteurs* 2011, 11, 10798–10819. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
21. Biondi, AM ; Zhou, J.; Guo, X.; Wu, R.; Tang, Q. ; Gandhi, H.; Yu, T.; Gopalan, B.; Hanna, T.; Ivey, J.; et coll. Surveillance de la santé structurelle des pipelines à l'aide d'un textile de détection à fibre optique distribuée. *Opter. Technologie fibre.* 2022, 70, 102876. [\[Référence croisée\]](#)

22. Galindez-Jamioy, Californie ; Lopez-Higuera, JM Brillouin Capteurs à fibre distribués : aperçu et applications. J. Sens. 2012, 2012, 204121. [\[Référence croisée\]](#)
23. Wang, C. ; Olson, M.; Sherman, B.; Dorjkhanda, N.; Mehr, J.; Singh, S. Détection fiable des fuites dans les pipelines à l'aide d'un capteur de température DdTS intégré et d'un capteur acoustique à fibre optique DAS. Dans Actes de la Conférence internationale Carnahan 2018 sur les technologies de sécurité (ICCST), Montréal, QC, Canada, 22-25 octobre 2018 ; IEEE : Piscataway, NJ, États-Unis, 2018 ; p. 1–5.
24. Stajanca, P. ; Chruscicki, S.; Homann, T.; Seifert, S.; Schmidt, D.; Habib, A. Détection des vibrations de pipeline induites par des fuites à l'aide de fibre—Détection acoustique distribuée optique. Capteurs 2018, 18, 2841. [\[CrossRef\]](#)
25. Niklès, M. ; Vogel, BH; Briffod, F.; Grosswig, S.; Sauser, F.; Luebbecke, S.; Bals, A.; Pfeiffer, T. Détection des fuites à l'aide de la surveillance de la température distribuée par fibre optique. Dans Smart Structures and Materials 2004 : Smart Sensor Technology and Measurement Systems ; SPIE : Bellingham, WA, États-Unis, 2004 ; p. 18–25.
26. Prisutova, J. ; Krynkina, A.; Tait, S.; Horochenkova, K. Utilisation de capteurs à fibre optique pour l'état des conduites et les mesures hydrauliques : A examen. CivilEng 2022, 3, 85–113. [\[Référence croisée\]](#)
27. Bernini, R.; Minardo, A.; Zeni, L. Surveillance de la dislocation vectorielle des pipelines à l'aide de capteurs à fibre optique à base de Brillouin. Maître intelligent. Structure. 2007, 17, 015006. [\[Référence croisée\]](#)
28. Ren, L. ; Jiang, T.; Jia, Z.; Couvrecle, Y.; Yuan, C.; Li, H. Surveillance de la corrosion et des fuites des pipelines basée sur la technologie de détection par fibre optique distribuée. Mesure 2018, 122, 57–65. [\[Référence croisée\]](#)
29. Twort, AC ; Ratnayaka, DD ; Brandt, MJ Approvisionnement en eau ; Elsevier : Amsterdam, Pays-Bas, 2000.
30. Ruchti, GF Water Pipeline Condition Assessment; Société américaine des ingénieurs civils (ASCE): Reston, VA, États-Unis, 2017.
31. Bastianini, F. ; Di Santé, R.; Falcetelli, F.; Marini, D.; Bolognini, G. Câbles de détection à fibre optique pour les mesures distribuées basées sur Brillouin. Capteurs 2019, 19, 5172. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
32. Feng, C. ; Kadum, JE ; Schneider, T. L'état de l'art de la détection par fibre distribuée Brillouin ; IntechOpen : Londres, Royaume-Uni, 2019.
33. Diaz, S.; Mafang, SF ; Lopez-Amo, M. ; Thévenaz, L. Un capteur optique à fibre distribuée Brillouin dans le domaine temporel à haute performance. IEEE Sens. J. 2008, 8, 1268–1272. [\[Référence croisée\]](#)
34. Zou, W.; Lui, Z. ; Hotate, K. Discrimination complète de la contrainte et de la température à l'aide du décalage de fréquence de Brillouin et de la biréfringence dans une fibre à maintien de polarisation. Opt. Express 2009, 17, 1248–1255. [\[Référence croisée\]](#)
35. Lanticq, V. ; Quiertant, M.; Merliot, E.; Delépine-Lesoille, S. Brillouin câble détecteur : conception et validation expérimentale. IEEE Sens. J. 2008, 8, 1194–1201. [\[Référence croisée\]](#)
36. Bertulesi, M. ; Bignami, DF ; Boschini, I.; Brunero, M.; Ferrario, M.; Menduni, G.; Morosi, J.; Paganone, EJ; Zambrini, F. Surveillance des Infrastructures Hydrauliques Stratégiques par Brillouin Distributed Fiber Optic Sensors. Eau 2022, 14, 188. [\[CrossRef\]](#)
37. Petrucci, G. Lezioni di Costruzione di Macchine; Dipartimento Di Meccanica E Aeronautica : Palerme, Italie, 2002.
38. Elleuch, R.; Taktak, W. Comportement viscoélastique du polymère HDPE utilisant une charge de traction et de compression. J. Mater. Ing. Effectuer. 2006, 15, 111–116. [\[Référence croisée\]](#)
39. Fathi-Moghadam, M. ; Kiani, S. Simulation d'écoulement transitoire dans des réseaux de canalisations viscoélastiques. J. Hydraul. Rés. 2019, 58, 531–540. [\[Référence croisée\]](#)
40. Majda, P. ; Skrodzewicz, J. Un modèle de fluage modifié d'adhésif époxy à température ambiante. Int. J. Adhes. Adhés. 2009, 29, 396–404. [\[Référence croisée\]](#)
41. Colebrook, FC ; White, CM Expériences de frottement fluide dans des tuyaux rugueux. Proc. R. Soc. Londres. 1937, 161, 367–381. [\[Référence croisée\]](#)
42. Li, J. ; Dasgupta, A. Modèles de mécanisme de défaillance pour le fluage et la rupture par fluage. IEEE Trans. Fiab. 1993, 42, 339–353. [\[Référence croisée\]](#)

Clause de non-responsabilité/note de l'éditeur : les déclarations, opinions et données contenues dans toutes les publications sont uniquement celles des auteurs et contributeurs individuels et non de MDPI et/ou des éditeurs. MDPI et/ou le(s) éditeur(s) déclinent toute responsabilité pour tout dommage aux personnes ou aux biens résultant de toute idée, méthode, instruction ou produit mentionné dans le contenu.