

La technologie *Interférométrie polarimétrique en lumière blanche*

1. Introduction

Les capteurs à fibres optiques sont constitués de deux éléments principaux : le transducteur à fibres optiques (aussi appelé capteur à fibres optiques, jauge à fibres optiques ou sonde à fibres optiques) et le conditionneur de signal (aussi appelé poste de lecture). Dans le cas des capteurs dits extrinsèques, le transducteur à fibres optiques est fait d'un corps d'épreuve contenant un dispositif optique sensible à la grandeur physique à mesurer, i.e. le mesurande. La partie sensible du transducteur est habituellement située à l'extrémité de la fibre optique qui se connecte au conditionneur de signal. Ce dernier est utilisé pour : i) injecter la lumière dans la fibre optique du transducteur; ii) détecter et traiter le signal lumineux retourné par le transducteur; iii) convertir les résultats du traitement en unités physiques reliées au mesurande concerné.

Il existe différentes technologies de capteurs à fibres optiques et elles se distinguent par la grandeur optique modifiée ou modulée par le mesurande, soit l'intensité, la phase, la polarisation ou la longueur d'onde. Parmi celles-ci on compte l'interférométrie optique, une technique qui permet de moduler la phase des ondes lumineuses et qui est reconnue comme la technologie de capteur à fibres optiques la plus sensible. En effet, l'interféromètre est considéré comme l'un des outils de métrologie optique les plus précis permettant de mesurer d'infimes variations d'une grandeur physique au moyen de la mesure de la différence de marche de l'interféromètre. Cependant, lorsque la chaîne de mesure optique comprend une source lumineuse à spectre d'émission étroit tel un laser, la longueur de cohérence de la source est dans ce cas généralement supérieure à la différence de marche de l'interféromètre causant ainsi un problème d'ambiguïté de phase. Plus explicitement, la phase n'est connue que modulo 2π , en raison de la nature périodique des franges d'interférence. Ce problème a pour effet de limiter sévèrement la gamme d'applications de mesure, ce qui explique pourquoi plusieurs technologies de capteurs à fibres optiques de type d'interférométrique n'ont pu obtenir l'assentiment de l'industrie. Le problème d'ambiguïté de phase est résolu en utilisant une source lumineuse de

faible longueur de cohérence, c'est-à-dire une source lumineuse à large étendue spectrale. Dans ce cas, les franges d'interférence ne sont observées que dans une zone de différences de marche bien précise de tel sorte que cette différence de marche puisse être déterminée sans ambiguïté de phase et ce, en mesurant la position soit du maximum du pic des franges soit du maximum de l'enveloppe des franges selon la technique utilisée. Ce type d'interférométrie est connu sous le nom d'interférométrie en lumière blanche ou à faible cohérence. Les fondateurs d'Opsens sont les pionniers de l'utilisation de l'interférométrie en lumière blanche à la réalisation de capteurs à fibres optiques répondant aux normes industrielles. Ils sont fiers de présenter la plus récente évolution dans ce domaine, la technologie de l'interférométrie polarimétrique en lumière blanche (technologie IPLB)¹.

2. Transducteur à fibre optique

Les transducteurs à fibres optiques d'Opsens de type interférométrique sont regroupés sous la série de produits dénommée WLPI. Selon le mesurande concerné (pression, température, etc.), Opsens a sélectionné le meilleur type d'interféromètre et le design optimal pour ses transducteurs à fibres optiques. Tous les transducteurs WLPI d'Opsens sont faits de composants standards de l'industrie, tels les fibres optiques multimodes 62.5/125 microns et les connecteurs optiques de type SC, ce qui confère au client un coût d'acquisition avantageux.

La conception des transducteurs selon le type de mesurande est illustrée à la figure 1. On note que pour chaque type de transducteur, la différence de marche δ_s de l'interféromètre du transducteur, appelé ci après l'interféromètre de mesure, varie en fonction du mesurande. Par conséquent, on peut définir la différence de marche δ_s comme étant la grandeur de sortie du transducteur. Bien entendu cette grandeur n'est obtenue qu'indirectement, par la mesure du signal lumineux retourné par le transducteur et plus

¹ Brevets en instance

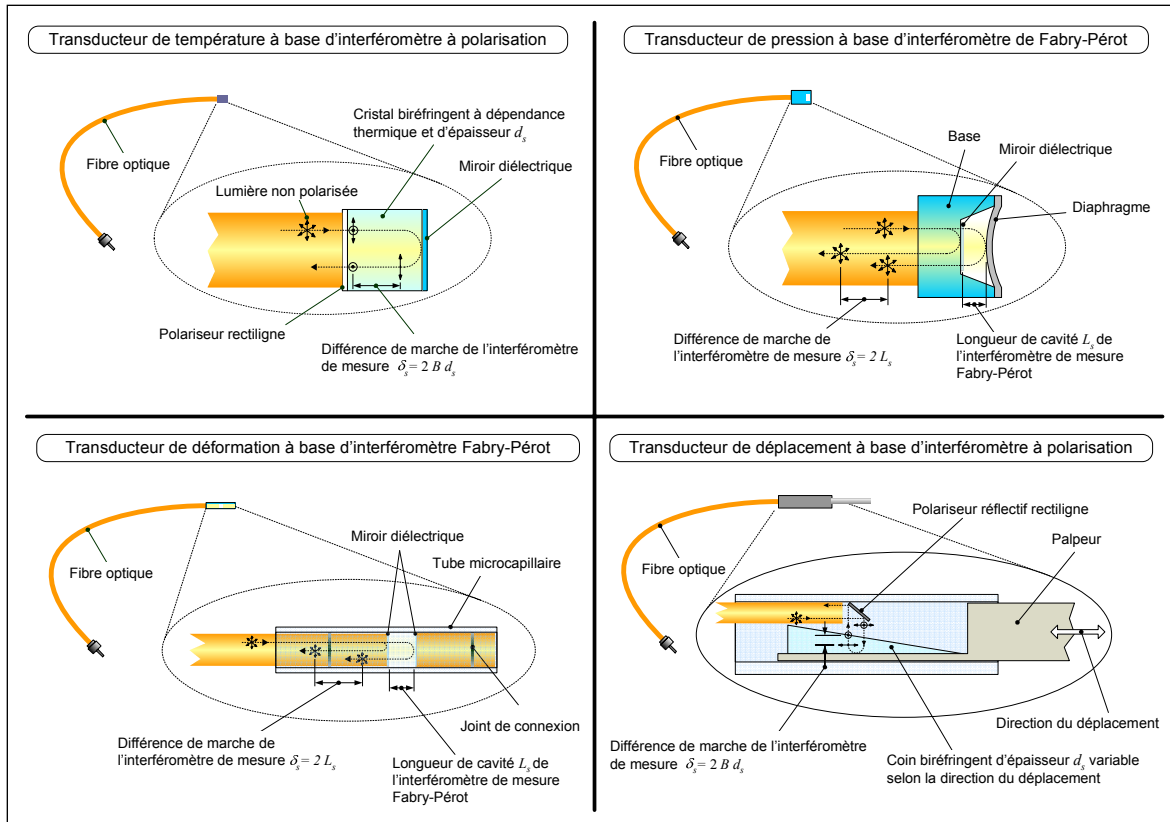


Figure 1 : Exemples de transducteurs interférométriques à fibres optiques de la série WLPI d'Opsens

spécifiquement par la mesure de l'un des ses paramètres physiques (dans ce cas ci la phase) qui varie en fonction de δ_s . La relation entre le mesurande M et la grandeur de sortie du transducteur δ_s peut s'écrire :

$$\delta_s = S \cdot M + \delta_o \quad (1)$$

S étant la sensibilité du transducteur, c'est-à-dire le rapport de la variation de la grandeur de sortie à la variation du mesurande qui lui a donné naissance, et δ_o la valeur de la grandeur de sortie lorsque la valeur du mesurande est égale à zéro. L'unité utilisée par Opsens pour la mesure de la différence de marche est le nanomètre et de manière générale celle-ci peut prendre des valeurs de 20 000 à 50 000 nanomètres.

2.1.1. Transducteur de température à fibre optique

Une illustration schématique du transducteur de température à fibres optiques de la série de produits WLPI d'Opsens apparaît dans le coin

supérieur gauche de la figure 1. Son principe de fonctionnement repose sur un interféromètre à polarisation fait d'un cristal dont la biréfringence dépend fortement de la température (brevets en instance). Un polarisateur rectiligne est placé sur la face d'entrée du cristal biréfringent et sa face arrière est recouverte d'un miroir diélectrique. Cet ensemble forme un interféromètre à polarisation à deux ondes et sa différence de marche a pour expression :

$$\delta_s = 2 \cdot B \cdot d_s \quad (2)$$

B étant la biréfringence du cristal, fonction de la température, et d_s l'épaisseur du cristal. La grandeur de sortie du transducteur exprimée en fonction de la température peut donc s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \delta_s(T) &= S \cdot T + \delta_o = 2 \cdot \frac{\partial}{\partial T} (B \cdot d_s) \cdot T + \delta_o \\ &\cong 2 \cdot \frac{\partial B}{\partial T} \cdot d_s \cdot T + \delta_o \end{aligned} \quad (3)$$

L'équation (3) indique que la sensibilité du transducteur à fibres optiques dépend principalement du coefficient de dépendance thermique ($\partial B / \partial T$) de la biréfringence du cristal. Il s'agit d'une caractéristique importante puisqu'il existe une variété de cristaux disponibles à cet usage et ce choix de cristaux offre une gamme de sensibilités très large qui s'étale sur plus de deux ordres de grandeur. Cela procure donc une grande flexibilité en matière de conception. Par exemple, si un large intervalle de température de fonctionnement n'est pas requis, alors un transducteur de température à haute résolution peut être conçu en utilisant un cristal à fort coefficient de dépendance thermique. C'est pourquoi Opsens utilise un cristal spécialement sélectionné pour ses transducteurs médicaux de température à fibres optiques, permettant ainsi d'offrir une résolution et une précision exceptionnelles.

Ce type de transducteur offre aussi d'autres avantages, les plus importants étant le faible encombrement de l'interféromètre à polarisation, l'absence de pièces mobiles et la très grande stabilité dans le temps. C'est sur ce dernier aspect que les transducteurs de température d'Opsens se démarquent des transducteurs à fibre optique à base d'interféromètre Fabry-Pérot disponibles commercialement. Il est important de noter que le principe de fonctionnement des transducteurs de température de type Fabry-Pérot repose sur la dilation thermique de l'une ou des deux fibres optiques de l'interféromètre. Par conséquent, la différence de marche de ce transducteur dépend des propriétés thermomécaniques du verre constituant la fibre optique. Hors il est bien connu que la stabilité dimensionnelle des matériaux amorphes tels que le verre peut être altérée de façon permanente lors de chocs thermiques ou en cyclage thermique intense. Ces altérations peuvent affecter substantiellement la précision à court et à long terme du transducteur. En revanche, la différence de marche de l'interféromètre à polarisation décrit précédemment ne dépend que des propriétés thermo-optiques d'un matériau monocristallin, propriétés qui demeurent très stable dans le temps même dans les conditions d'utilisation les plus adverses.

2.1.2. Autres transducteurs

Le principe de fonctionnement pour chacun des transducteurs de pression, de déformation et de déplacement, tous de la série de produits WLPI d'Opsens, est illustré à la figure 1. Dans tous les cas, la grandeur de sortie demeure la même, soit la différence de marche de l'interféromètre de mesure. La relation entre la grandeur de sortie et le mesurande concerné est donnée par une expression similaire à l'équation (1). Pour plus d'information, une ou plusieurs fiches signalétiques sont disponibles selon le nombre de modèles de chacun des transducteurs de la série WLPI d'Opsens illustrés à la figure 1.

3. Conditionneur de signal à fibres optiques

La technologie IPLB est au cœur des conditionneurs de signal de la série de produits WLPI d'Opsens. Cette technologie permet de mesurer de façon absolue et précise la différence de marche de tous les types de transducteurs interférométriques à fibres optiques. Par exemple, les conditionneurs de signal de la série WLPI peuvent mesurer la différence de marche d'un transducteur de température à base d'interféromètre à polarisation, celle d'un transducteur de déplacement à base d'interféromètre de Michelson ou à base d'interféromètre à polarisation, celle d'un transducteur de pression, de température ou de déformation à base d'interféromètre Fabry-Pérot, etc., et ce, avec une précision et une fidélité sans précédents.

Une illustration schématique de la technologie IPLB est représentée à la figure 2. Le transducteur interférométrique à fibres optiques y est schématisé sous la forme d'un interféromètre à deux ondes dans lequel on y distingue les deux chemins optiques (chemins (1) et (2)) de l'interféromètre. Un faisceau lumineux à faible longueur de cohérence, émis de la source située dans le conditionneur de signal, est transmis jusqu'au transducteur à fibres optiques. Le faisceau lumineux atteint l'interféromètre de mesure où il est divisé en deux faisceaux. Chacun des faisceaux effectue un parcours dans des chemins optiques différents (chemins (1) et (2)), avant d'être recombinaés en un faisceau unique et réfléchis vers le conditionneur de signal. On notera, tel que discuté à la section précédente,

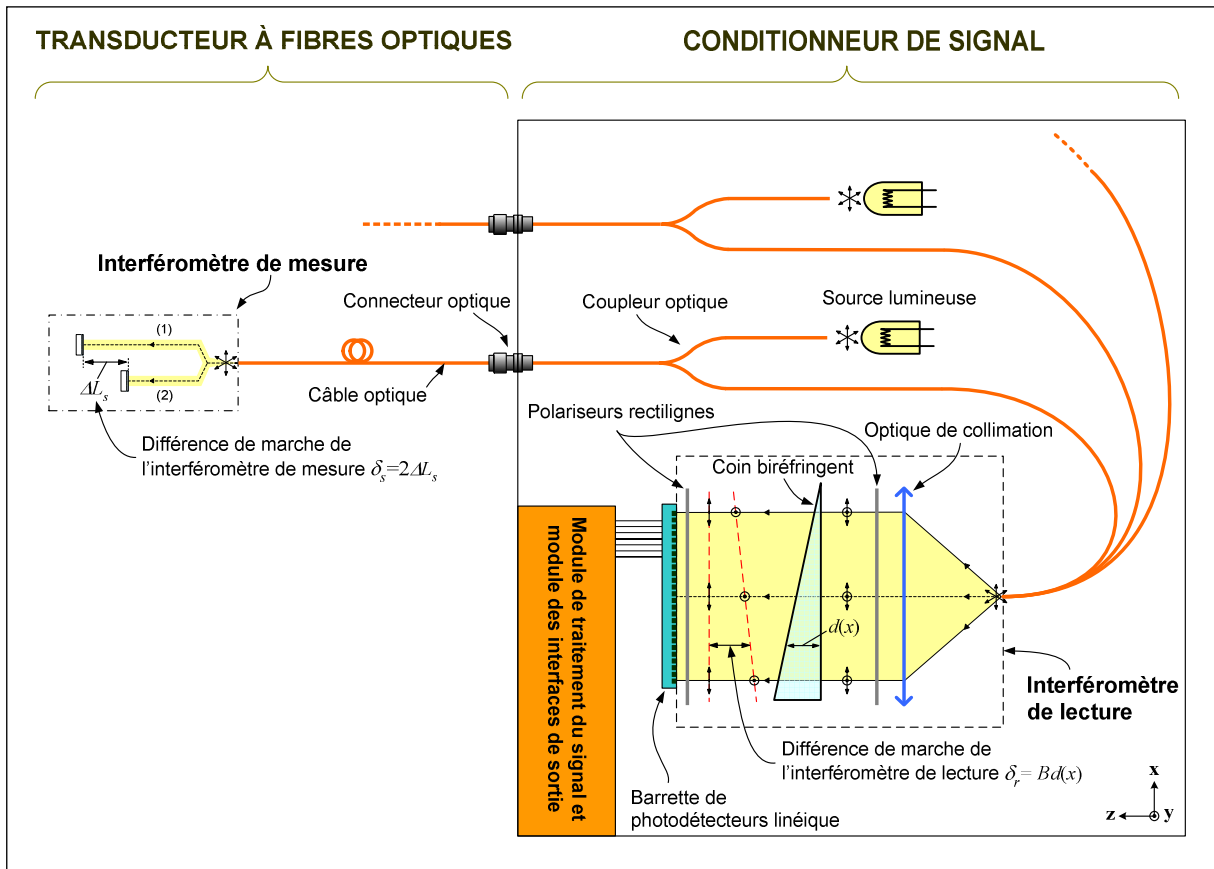


Figure 2 : Représentation schématique de la technologie IPLB utilisée dans les capteurs à fibres optiques de la série WLPI d’Opsens

que la différence dans la longueur des chemins optiques (1) et (2), appelée la différence de marche, varie en fonction du mesurande concerné. Il est aussi important de noter que le signal lumineux retourné vers le conditionneur de signal ne montre aucun phénomène d’interférence — cela en raison du fait que la longueur de cohérence du faisceau lumineux est inférieure à la différence de marche de l’interféromètre de mesure. Cependant, comme il sera montré ci-après, l’information sur la différence de marche de l’interféromètre de mesure est encodée de façon précise et univoque dans l’un des paramètres physiques du faisceau lumineux.

Le faisceau lumineux reçu du transducteur est transmis à l’interféromètre de lecture du conditionneur de signal (la figure 2 montre un conditionneur de signal multivoie). L’interféromètre de lecture est un interféromètre à

polarisation dont la différence de marche varie de façon linéaire dans une direction donnée (direction x sur la figure). Le faisceau lumineux traverse en premier lieu un dispositif optique qui permet d’obtenir un éclaircissement sur toutes les surfaces des différentes composantes de l’interféromètre. Le faisceau traverse ensuite un polariseur rectiligne situé dans le plan x-y de la figure et dont l’axe de transmission est orienté à 45° de l’axe x. Ce faisceau maintenant polarisé se décompose donc en deux composantes orthogonales de polarisation, soient les composantes x et y en référence aux axes du même nom. Le faisceau polarisé rectilignement passe au travers d’un coin optique fait d’un monocristal biréfringent uniaxe spécialement sélectionné pour cet application. L’axe optique de ce monocristal est orienté suivant l’axe x. On note aussi que l’épaisseur du coin varie selon l’axe des x.

En raison des propriétés optiques anisotropiques du cristal, les deux composantes de polarisation se déplacent à des vitesses différentes dans le coin et par conséquent, elles sont décalées l'une par rapport à l'autre à la sortie du coin. On en déduit que leurs chemins optiques diffèrent et ce même si les composantes empruntent le même parcours dans le coin. La différence de marche δ_r entre les deux composantes de polarisation à la sortie du coin biréfringent a pour expression

$$\delta_r(x) = B \cdot d(x) \quad (4)$$

B étant la biréfringence du cristal et $d(x)$ l'épaisseur du coin à la position x . Le faisceau traverse ensuite un second polariseur (appelé analyseur), permettant ainsi d'orienter les composantes orthogonales de polarisation dans une direction parallèle, pour atteindre en dernier lieu la surface d'une barrette de photodétecteurs linéique située à la sortie de l'interféromètre de lecture.

La sortie de la barrette de photodétecteurs fournit un signal représentatif de la distribution spatiale (selon x) de l'intensité lumineuse à la sortie de l'interféromètre de lecture. La théorie de la cohérence optique nous apprend que ce signal, appelé un interférogramme, est constitué de franges d'interférence de forme sinusoïdale ayant une amplitude modulée par une fonction de contraste et que cette dernière atteint un maximum lorsque $\delta_r(x) = \delta_s$.

Les figures 3A et 3B montrent deux interférogrammes mesurés par l'interféromètre de lecture du conditionneur de signal pour deux valeurs distinctes de mesurande M_1 et M_2 . Chaque interférogramme illustre la distribution de l'intensité lumineuse $I_r(\delta_r)$ en fonction de la différence de marche $\delta_r(x)$ de l'interféromètre de lecture. La courbe pleine représente la mesure de l'interférogramme, soit les franges d'interférence sinusoïdales, alors que la courbe pointillée représente l'enveloppe des franges, i.e. la fonction de contraste, sa mesure étant extraite par calcul de celle de l'interférogramme. La position en x du maximum du pic des franges ou bien celle du maximum de l'enveloppe des franges est située là où la différence de marche de l'interféromètre de lecture est égale à celle de l'interféromètre de mesure, i.e. lorsque $\delta_r(x) = \delta_s$. Ainsi de la mesure

de $\delta_r(x)$ s'obtient celle de δ_s : en utilisant un interféromètre de lecture préalablement étalonné, la mesure de la position du maximum du pic des franges ou bien celle du maximum de l'enveloppe des franges de l'interférogramme apporte toute l'information nécessaire à la connaissance de δ_s et par conséquent celle du mesurande M .

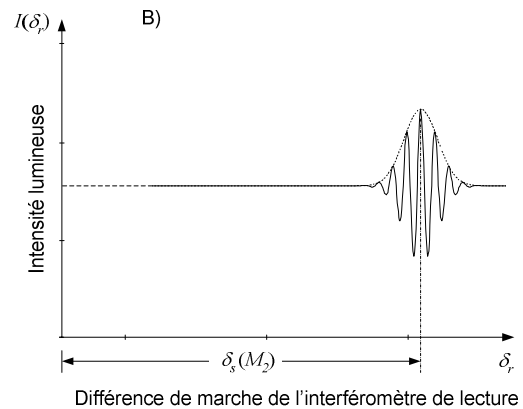
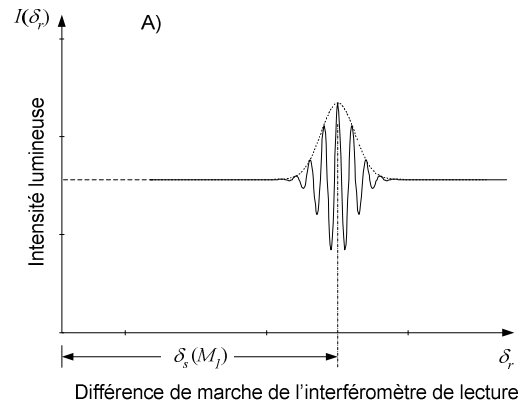


Figure 3 : Interférogrammes mesurés par le conditionneur de signal

La technologie IPLB se distingue donc de l'interférométrie classique. La mesure de la différence de marche de l'interféromètre ne s'obtient plus à partir des paramètres classiques de l'interférométrie, notamment la mesure de la phase et de l'amplitude des franges d'interférence, mais plutôt à partir de la position du maximum du pic des franges ou bien celui de l'enveloppe des franges.

Les avantages de la technologie IPLB se montrent ici évidents. Entres autres, on note que cette méthode de mesure est peu sensible aux grandeurs d'influences que l'on rencontre

fréquemment avec les mesures par fibres optiques et qui, malheureusement, sont trop souvent négligées de la part des concepteurs de capteurs à fibres optiques. En clair, des variations de l'intensité lumineuse induites, par exemple, par la courbure de la fibre, par des fluctuations de la source lumineuse ou bien par des pertes de transmission des connecteurs optiques vont modifier le niveau d'intensité de l'interférogramme, mais ne vont pas à priori affecter la position du maximum du pic des franges ou celle du maximum de l'enveloppe des franges de l'interférogramme. De plus, la mesure absolue de δ_r , i.e. une mesure sans ambiguïté de phase, fait en sorte qu'il n'y pas de perte de référencement à chaque fois que le conditionneur de signal est éteint.

On notera aussi, à la différence d'un interféromètre de Fizeau (un interféromètre à ondes multiples) équipant certains conditionneurs de signal à fibres optiques disponibles sur le marché, l'interféromètre de lecture à polarisation est un véritable interféromètre à deux ondes. L'utilisation de ce type d'interféromètre procure un interférogramme dont le contraste est au moins deux fois plus élevé que celui d'un interféromètre à ondes multiples tel que l'interféromètre de Fizeau. Il en découle une fidélité et une résolution supérieure. De plus, la construction de l'interféromètre à polarisation sans pièce mobile ni miroir lui confère une très bonne stabilité mécanique à long terme minimisant ainsi les opérations de réétalonnage.

La détermination de la valeur du mesurande procède en deux étapes. En première étape, le module de traitement du signal du conditionneur détermine la valeur de δ_s selon la méthode expliquée précédemment et en deuxième étape, ce même module procède au calcul de la valeur du mesurande M à partir de la relation suivante :

$$M = \frac{(\delta_s - \delta_o)}{S} \quad (5)$$

Si la réponse du transducteur est une fonction linéaire, i.e. sa sensibilité S ne dépend pas de M , l'équation (5) est facilement résolue à partir des constantes S et δ_o . Ces deux paramètres correspondent aux facteurs d'étalonnage des transducteurs d'Opsens. Pour le cas non linéaire, le transducteur aura trois facteurs d'étalonnage ou

plus. Dans tous les cas, le module de traitement du signal des conditionneurs d'Opsens est conçu pour traiter les réponses linéaires et non linéaires des transducteurs.

Avant d'utiliser un transducteur, ses facteurs d'étalonnage doivent être enregistrés dans la mémoire rémanente du conditionneur de signal. Pour ce faire, l'utilisateur entre les facteurs d'étalonnage fournis par Opsens une seule fois dans la mémoire rémanente du conditionneur de signal en sélectionnant la fonction appropriée dans le menu d'affichage du conditionneur ou en utilisant le logiciel de communication fourni avec le conditionneur.

4. Conclusion

La technologie IPLB offre un niveau de flexibilité exceptionnel dans la conception d'une variété de transducteurs à fibres optiques. De nombreuses applications de mesure et de monitoring peuvent donc profiter de cette fonctionnalité avantageuse et, considérant ses performances exceptionnelles, la technologie IPLB est en mesure de répondre aux applications les plus exigeantes!