



## Dossier de modélisation

**OPTOGEO  
MICROBAROMETRE OPTIQUE  
Convention 132906058**

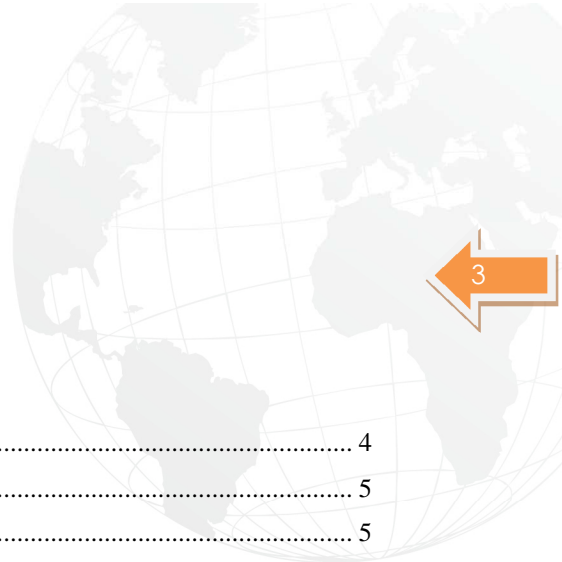
**LE TRANSDUCTEUR  
OPTIQUE**



## FICHE D'ETAT

Version	Date	Motif de la modification
00	21/03/2014	Création
01		
02		
03		
04		
05		

Visa Rédacteur(s) : Anthony HUE	Visas Approbateurs : Serge OLIVIER Nathalie OLIVIER
------------------------------------	---



## Table des matières

<b>1. LEXIQUE</b> .....	4
<b>2. PREAMBULE</b> .....	5
1.1 Contexte.....	5
2.1 Un peu d'historique.....	6
3.1 Le micro-baromètre optique .....	9
<b>3. INTRODUCTION</b> .....	11
<b>4. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'INTERFEROMETRE « PICOMOVE »</b> .....	13
2.1 Synoptique de l'interféromètre.....	13
2.2 Architecture réelle de l'interféromètre « PicoMove » .....	14
<b>5. ANALYSE THEORIQUE DU COMPORTEMENT OPTIQUE DU TRANSDUCTEUR</b> .....	16
3.1 Expression des intensités $I_{Ref1}$ et $I_{Ref2}$ .....	16
a. Champ complexe d'un faisceau gaussien dans le cas de l'optique guidée .....	16
b. Champs complexes des deux faisceaux gaussiens sur les sorties Ref1 et Ref2.....	17
c. Expression des intensités résultantes $I_{Ref1}$ et $I_{Ref2}$ .....	18
3.2 Expression des intensités $I_{Meas1}$ et $I_{Meas2}$ .....	18
a. Champs complexes des deux faisceaux gaussiens avant les pupilles circulaires S1 et S2.....	18
b. Champs complexes des deux faisceaux gaussiens après les pupilles circulaires S1 et S2:.....	19
c. Expression des intensités résultantes $I_{Meas1}$ et $I_{Meas2}$ .....	20
<b>6. DISCUSSION SUR LA SENSIBILITE DE L'INTERFEROMETRE</b> .....	25
<b>7. CONCLUSION</b> .....	26

## Table des illustrations

Figure 1: Système de surveillance international.....	5
Figure 2: MB2000.....	6
Figure 3: MB3 analogique et numérique.....	7
Figure 4: Low Noise Model .....	7
Figure 5: Synoptique du fonctionnement du MB3 analogique et numérique.....	8
Figure 6: Synoptique du micro-baromètre optique .....	10
Figure 7:Etapes de fabrication de l'interféromètre .....	12
Figure 8:synoptique de l'interféromètre .....	13
Figure 9:Architecture de l'interféromètre (unité en $\mu\text{m}$ ) .....	14
Figure 10: Interférogramme .....	24



## 1. LEXIQUE

CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives

DASE : Département Analyse Surveillance Environnement

OTICE : Organisation du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires

TICE : Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires

R&D : Recherche et Développement

LVDT : Linear Variable Differential Transformer

LNM : Low Noise Model

MB : Microbaromètre

MB2000 : Microbaromètre des années 2000 conçu par le DASE

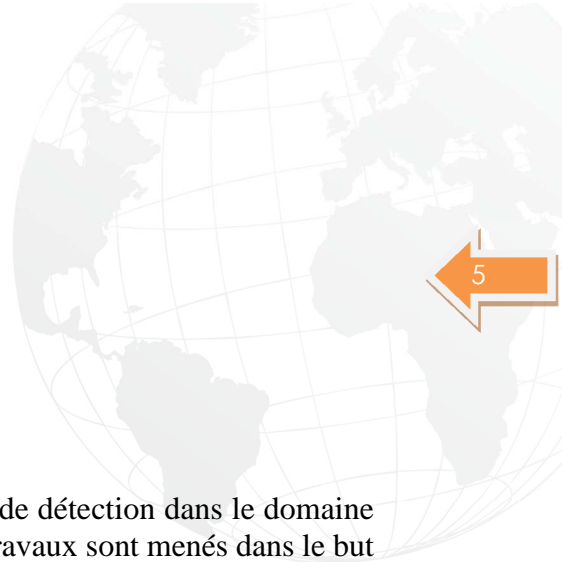
MB2005 : Microbaromètre des années 2005 conçu par le DASE

FO : Fibre Optique

IM : Interféromètre de Michelson

BF : Basse Fréquence

RMS : Root Mean Square



## 2. PREAMBULE

### 1.1 Contexte

Le CEA développe depuis la fin des années 60 des technologies de détection dans le domaine de la mesure sismique et infrason. Historiquement, les premiers travaux sont menés dans le but de détecter et caractériser les explosions nucléaires aériennes. A la mise en place du traité d'interdiction complète des essais nucléaires (TICE) dans les années 90, un réseau mondial de détection se met progressivement en place. Ce réseau comprendra à terme 60 stations infrasons, de 4 à 8 capteurs chacune, réparties sur toute la planète.

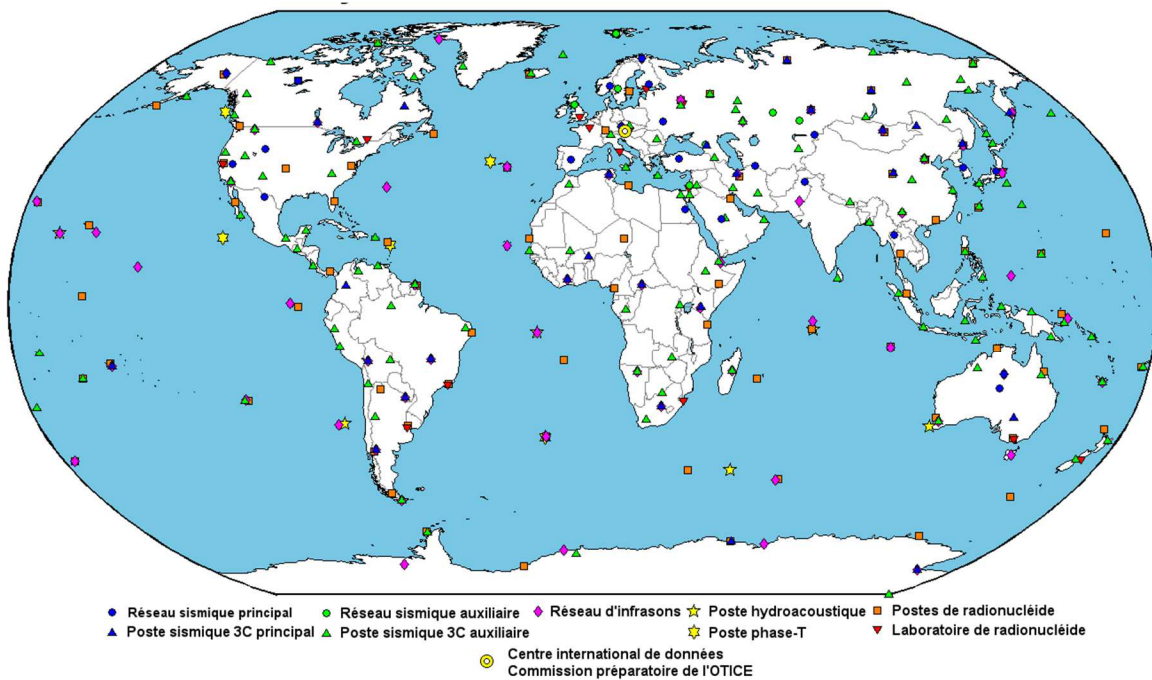


Figure 1: Système de surveillance international

Les microbaromètres développés par le CEA/DASE, et fabriqués par PROLANN, sont encore la référence mondiale du point de vue performance, en fiabilité et robustesse ainsi qu'en mesures BF. Après le MB 2000 qui a été largement diffusé mondialement dans le cadre de l'OTICE, le MB 2005 constitue la référence actuelle. Son successeur est le MB3, développé en version analogique et numérique, calibrable à distance et répondant aux critères du Low Noise Model.

Dans le cadre des évolutions des performances de ses capteurs géophysiques, le CEA a mis au point avec un partenaire industriel un transducteur optique de déplacement par interférométrie. Cette nouvelle brique technologique servira de base au projet que nous proposons.

Le projet OPTOGEO présente une étude conjointe (3 partenaires) sur 36 mois permettant d'envisager les possibilités techniques de ce transducteur optique et d'évaluer les gains en performances comparativement aux dispositifs électriques traditionnels du type bobine-aimant, LVDT ou mesure capacitive.



Ces recherches pourront voir leur application à terme, non seulement pour les microbarmètres mais aussi pour les sismomètres. Le projet s'attachera essentiellement aux mesures en environnement réel pour l'évaluation et la validation du concept sur les microbaromètres qui sont très sensibles aux variations de température engendrant un bruit très basse fréquence.

## 2.1 Un peu d'histoire...

3 générations de capteurs se sont succédées :

Années 90 -2010 : capteurs à technologie LVDT : Développement du MB 2000 qui a été largement diffusé mondialement dans le cadre de l'OTICE



Figure 2: MB2000

Après le MB 2000, le MB 2005 constitue la référence actuelle.

2010 : Son successeur le MB3 est basé sur une technologie bobine/aimant. Les données de sortie sont en dérivée de pression ou pression. Développé en version analogique et numérique, il est calibrable à distance et répond aux critères du Low Noise Model.

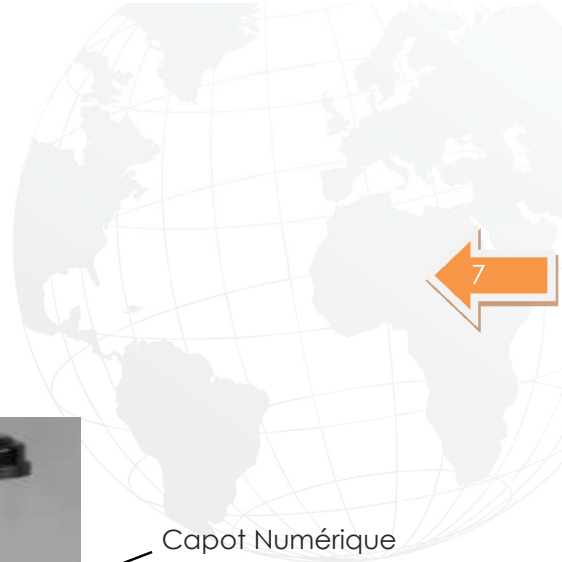


Figure 3: MB3 analogique et numérique

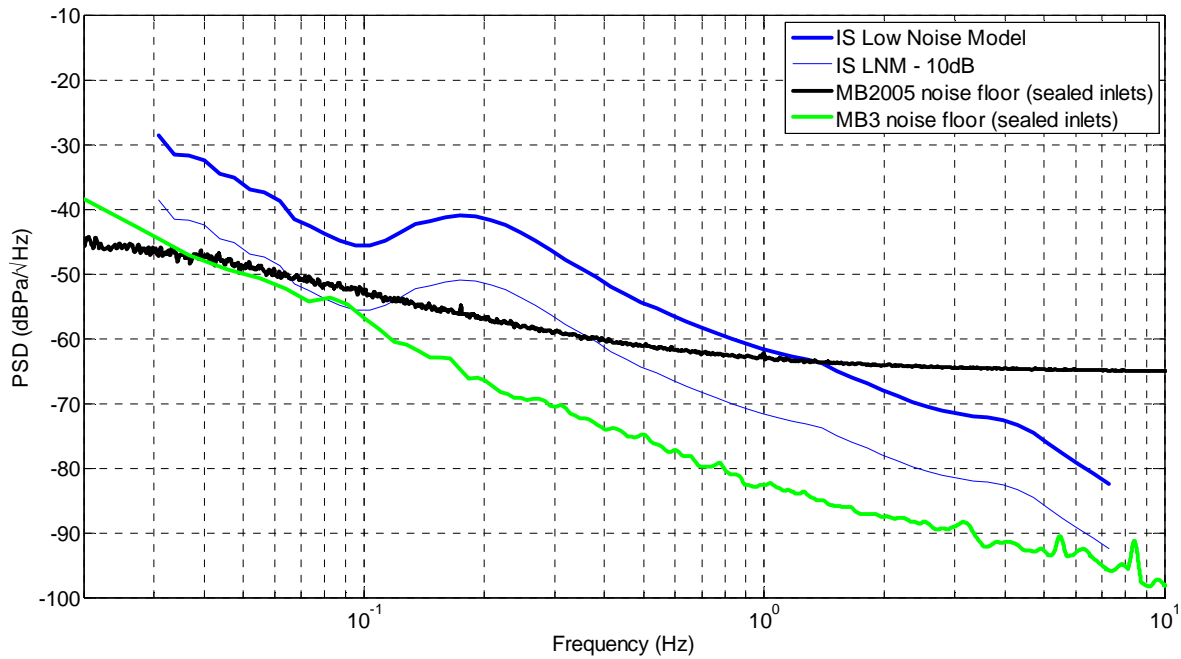
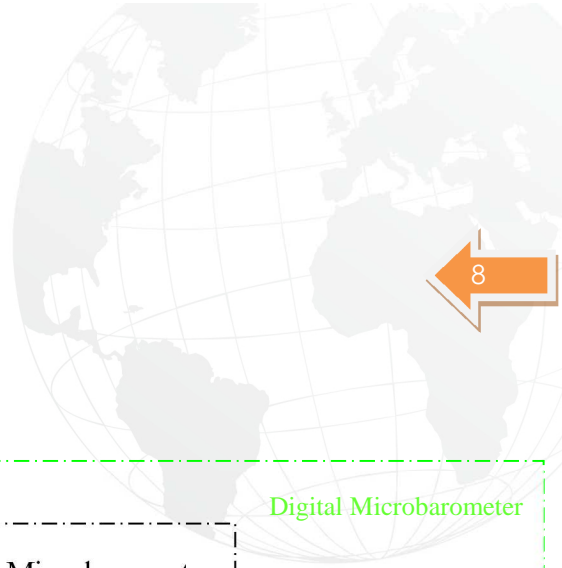


Figure 4: Low Noise Model



Synoptique de fonctionnement du MB3 actuel :

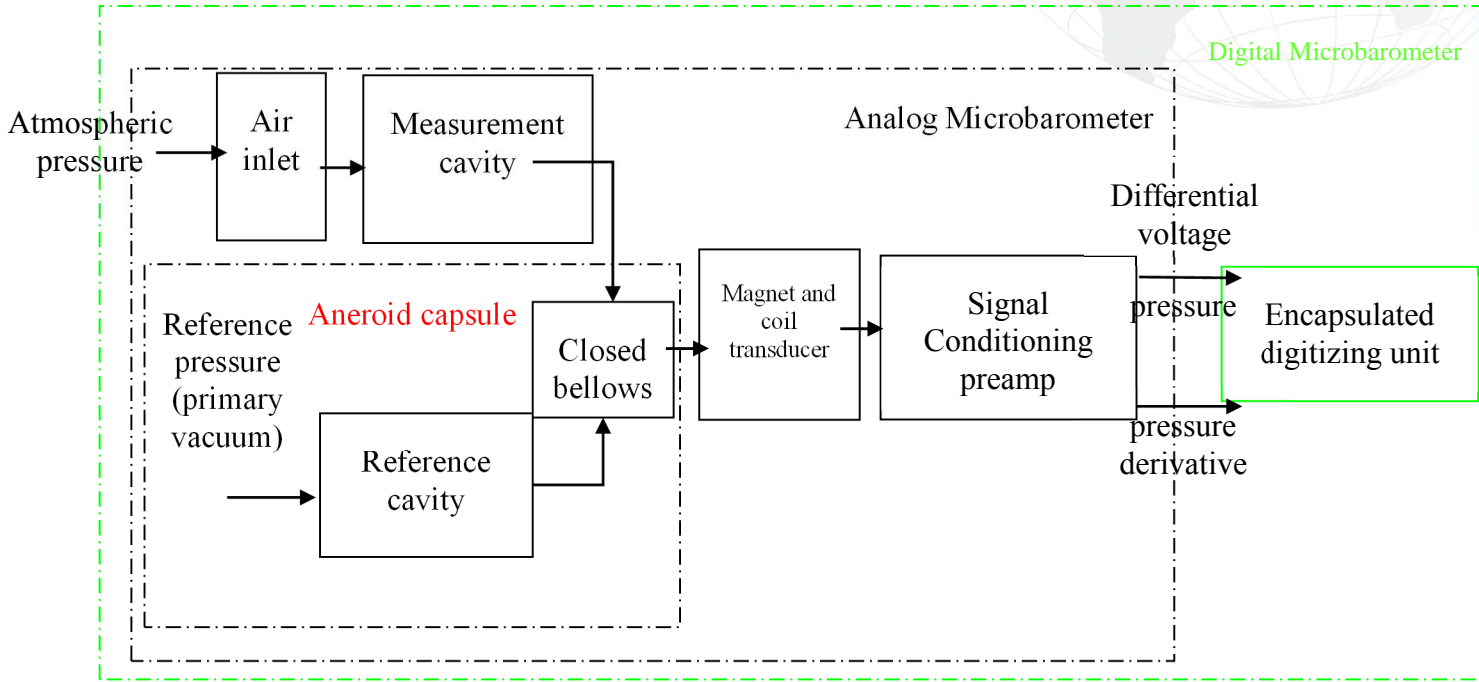


Figure 5: Synoptique du fonctionnement du MB3 analogique et numérique

### 3.1 Le micro-baromètre optique

Le but de ce projet de R&D est de proposer une rupture technologique en terme de transducteur permettant de dépasser certaines des performances actuelles des microbaromètres large bande standards. Les axes d'amélioration espérés sont la résolution, la bande passante et la dynamique. Pour cela, il est envisagé d'associer un soufflet de microbaromètre avec un transducteur optique. Le soufflet est sensible à la pression tandis que le transducteur mesure les déplacements du soufflet directement représentatif des variations de pression.

Différents montages sont disponibles en interférométrie parmi lesquels on peut citer les montages de type Mach-Zehnder, Fabry-Perot ou Michelson.

Le CEA/DASE a entrepris depuis 2006 d'explorer les performances d'un interféromètre de Michelson pour des applications en géophysique. Le montage initial (maquette sur table) réalisé avec des composants optiques du commerce proposait une analyse en quadrature de phase pour améliorer la résolution du dispositif. Une voie d'analyse supplémentaire était disponible pour la correction des fluctuations de la source laser. Ce premier montage fonctionnait à la longueur d'onde de 635 nm dans le visible pour des facilités de réglage. Un second montage à 1550 nm a été réalisé dans la foulée pour bénéficier des composants télécom (prix réduit des composants, robustesse et durée de vie accrue). Ces études ont abouties à la réalisation d'un transducteur de déplacement optique sous forme de composant miniaturisé réalisé par la société TEEM Photonics sous licence CEA.

Les performances atteintes par ces dispositifs ont été très satisfaisants en termes de résolution (inférieur au nm en rms) et de dynamique (importante liée à la cohérence spatiale de la source laser qui est de plusieurs mètres pour des lasers très stables en longueur d'onde). Nous avons par contre constaté une grande sensibilité vis-à-vis de la température de ce genre de montage.

Le projet consiste à définir le futur capteur à travers une étude de conception permettant d'assembler les différentes briques de base existantes, puis de réaliser un démonstrateur. L'électronique d'acquisition du signal est à prendre en considération ainsi que l'optimisation des traitements embarqués. Dans un premier temps une inter-comparaison sera menée entre un MB2005 standard constituant la référence actuelle dans le domaine de la mesure basse fréquence et un dispositif utilisant un interféromètre miniature. Après évaluation des performances, un concept de nouveau capteur sera proposé et prototypé.

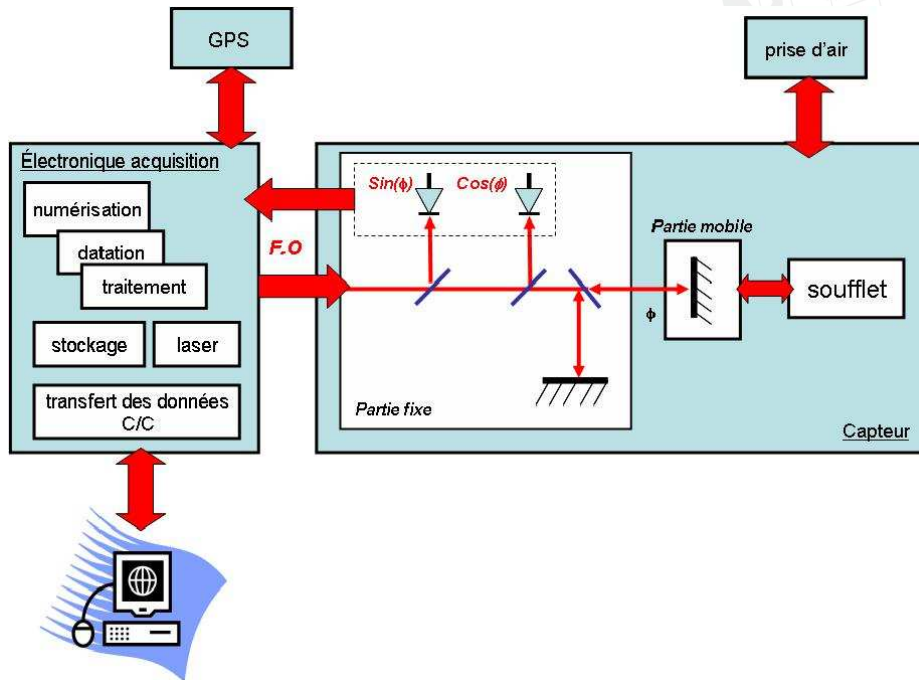
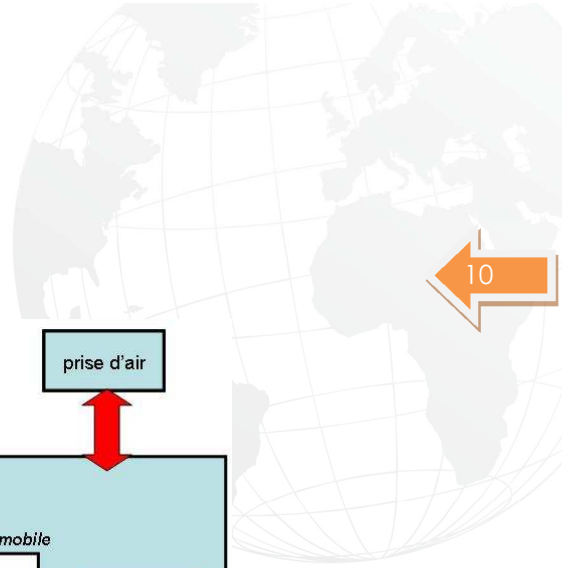


Figure 6: Synoptique du micro-baromètre optique



### 3. INTRODUCTION

La logique de déroulement du projet OPTOGEO s'articule de la manière suivante :

Une partie Modélisation :

- Acousto-mécanique
- Optique
- Complète

Une partie conception /réalisation :

- Prototype n°1
- Prototype n°2

Une partie caractérisation :

- Prototype n°1
- Prototype n°2

Ce rapport s'inscrit dans la partie modélisation du projet OPTOGEO et concerne le volet modélisation optique.

Après avoir modélisé la fonction de transfert du transducteur acousto-mécanique et étudié ses performances de détection de signaux infrasons, nous allons désormais nous intéresser au transducteur optique qui s'interface avec le soufflet. Le futur micro-baromètre intégrera un interféromètre de Michelson dénommé commercialement «PicoMove »qui constitue le transducteur optique.

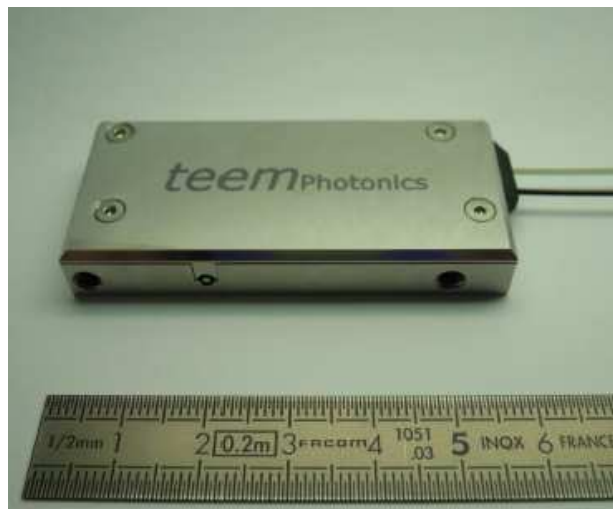


Figure 7: Photo de l'interféromètre PicoMove

Après un travail collaboratif sur plusieurs années entre le CEA et Teem Photonics un interféromètre de Michelson miniaturisé est aujourd'hui industrialisé.

Le processus de fabrication (illustré ci-après) de l'interféromètre est le suivant :

- Préparation des wafer : opérations de découpe et de polissage de plaques de silice
- Dépôt de couches métalliques par un procédé de photolithographie
- Création d'un réseau de guides d'ondes proche de la surface du wafer (réalisé par échanges ioniques)
- Découpage du wafer en plusieurs wafer de petites tailles
- Opération de raccordement de fibres optiques au bloc de silice (Pigtailing)
- Enfin une opération de packaging est réalisée

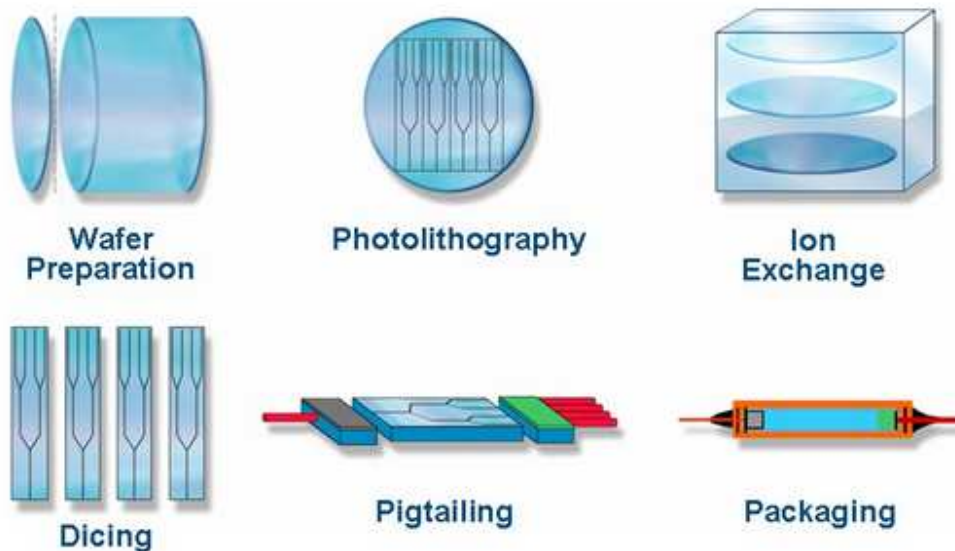


Figure 7: Etapes de fabrication de l'interféromètre

Il a donc été possible d'inscrire l'architecture d'un interféromètre au sein d'un bloc de silice offrant de nombreux avantages tels qu'une haute sensibilité pour la mesure de faible déplacement, sa robustesse, son faible encombrement...etc. La documentation technique de ce produit est donnée en annexe 1.



## 4. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'INTERFEROMETRE « PICOMOVE »

### 2.1 Synoptique de l'interféromètre

Pour comprendre son principe de fonctionnement, l'architecture de l'interféromètre peut être représentée de la sorte :

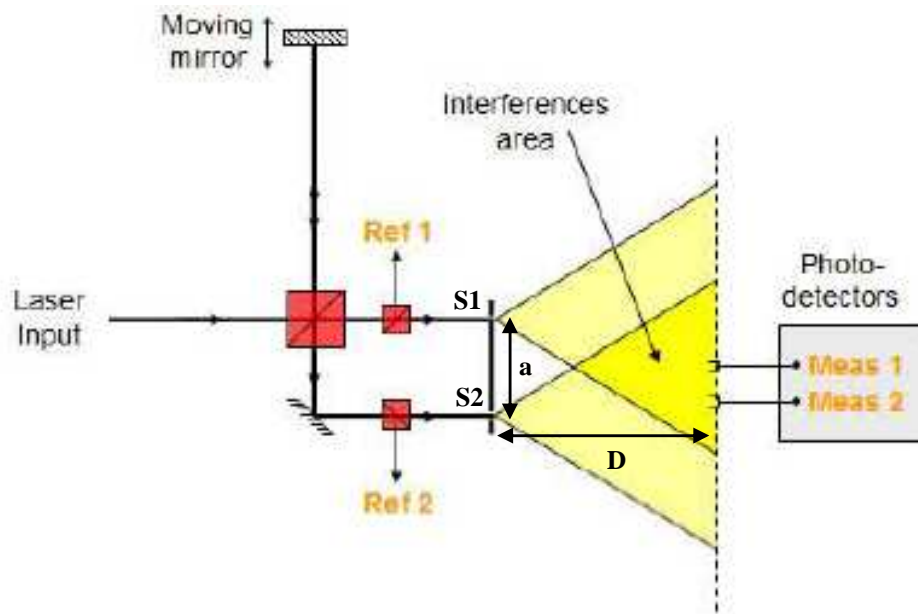


Figure 8: synoptique de l'interféromètre

Dans cette structure, nous retrouvons toujours un bras de référence, un bras de mesure sur lequel nous avons un système optique mobile et deux sorties de mesures (**Ref1** et **Ref2**) présentes sur chacun des bras permettant de réaliser une correction photométrique. La première particularité de ce montage se situe sur la zone d'interférence où les deux sources secondaires **S1** et **S2** sont séparées d'une distance **a**. Nous avons donc affaire à un dispositif interférentiel diviseur de front d'onde (configuration des fentes d'Young) qui donne des franges d'interférences rectilignes délocalisées. La seconde particularité concerne la mesure qui est effectuée à une distance **D** des sources secondaires et en deux points (**Meas1** et **Meas2**) distants de  $\lambda/4$  (ou équivalent à un déphasage de  $\pi/2 \pm 0,05$  rad) situés dans le même plan. De ce fait, cette mesure en quadrature de phase permet de construire une courbe de Lissajous pour remonter précisément à la variation de phase et donc d'estimer la variation du mouvement du miroir.



## 2.2 Architecture réelle de l'interféromètre « PicoMove »

Ci-dessous une vue interne du bloc de silice présentant le réseau de guides d'ondes inscrit :

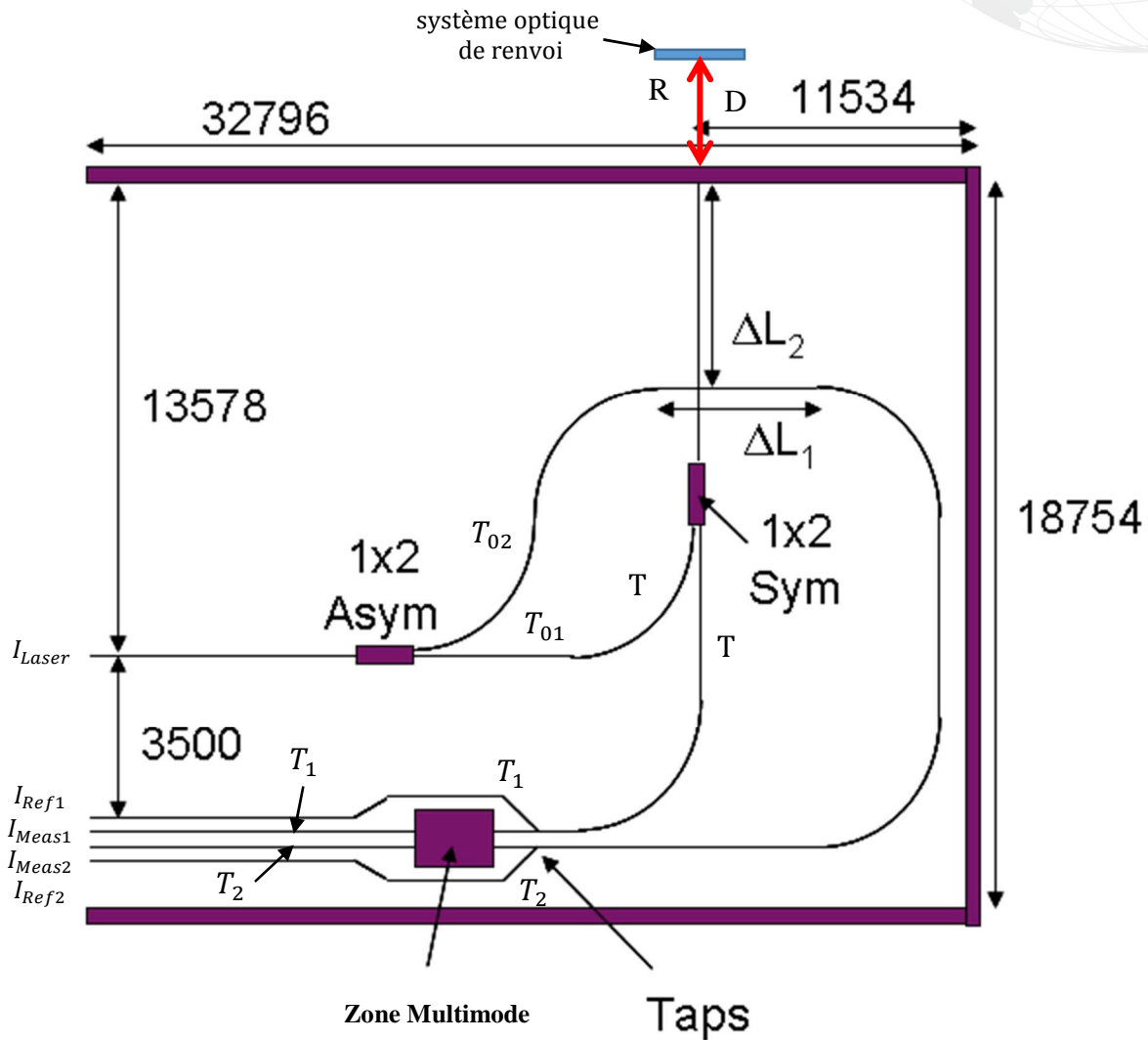


Figure 9: Architecture de l'interféromètre (unité en  $\mu\text{m}$ )

### Remarques :

Dans cette architecture nous retrouvons les fonctions optiques élémentaires suivantes :

- Des diviseurs de puissance symétrique et asymétrique
- Des guides d'ondes rectilignes
- Des guides d'ondes courbés
- Un taper (dénommé « TAPS ») qui a pour fonction de guider une portion du flux lumineux dans un guide d'onde monomode et l'autre portion du flux sur un guide d'onde multimode.



Il permet ainsi aux deux ondes se propageant vers les voies Meas1 et Meas2 d'interférer dans un espace multimodale d'une longueur de l'ordre du mm.

Ci-dessous sont définies les coefficients de transmission associés aux diviseurs de puissance et au taper :

$T_{01}$ : coefficient de transmission du diviseur de puissance asymétrique vers le bras de mesure

$T_{02}$ : coefficient de transmission du diviseur de puissance asymétrique vers le bras de référence

$T$ : coefficient de transmission du diviseur de puissance symétrique vers le diviseur de puissance asymétrique et vers le taper

$T_1$ : coefficient de transmission du taper vers la voie Ref1 et Meas1

$T_2$ : coefficient de transmission du taper vers la voie Ref2 et Meas2

$R$ : coefficient de réflexion du système optique situé à une distance  $D$  de l'interféromètre

Pour la compréhension de la partie théorique qui va suivre nous utiliserons les coefficients cités ci-dessus et on rappelle que :

$$R = |r|^2$$

$$T = |t|^2$$

$$T_1 = |t_1|^2 \text{ et } T_2 = |t_2|^2$$

$$T_{01} = |t_{01}|^2 \text{ et } T_{02} = |t_{02}|^2$$

Ces relations nous donnent le lien entre les coefficients en amplitude et les coefficients en intensité.



## 5. ANALYSE THEORIQUE DU COMPORTEMENT OPTIQUE DU TRANSDUCTEUR

Dans cette partie, nous déterminerons l'intensité résultante sur les deux voies de mesures Meas1 et Meas2 et sur les deux voies de références Ref1 et Ref2 citées précédemment.

Pour obtenir  $I_{Ref1}$  et  $I_{Ref2}$ , la démarche utilisée sera la suivante :

1. Expression du champ complexe d'un faisceau gaussien dans le cas de l'optique guidée
2. Expression des champs complexes des deux faisceaux gaussiens sur les sorties Ref1 et Ref2
3. Expression des intensités résultantes  $I_{Ref1}$  et  $I_{Ref2}$

Pour obtenir  $I_{Meas1}$  et  $I_{Meas2}$ , la démarche utilisée sera la suivante :

1. Expression des champs complexes des deux faisceaux gaussiens juste avant les pupilles circulaires S1 et S2
2. Expression des champs complexes des deux faisceaux gaussiens juste après les pupilles circulaires S1 et S2
3. Expression des intensités résultantes  $I_{Meas1}$  et  $I_{Meas2}$

### 3.1 Expression des intensités $I_{Ref1}$ et $I_{Ref2}$

#### a. Champ complexe d'un faisceau gaussien dans le cas de l'optique guidée

On considère la propagation suivant  $\vec{z}$  d'un faisceau gaussien monomode dont l'expression du champ complexe s'écrit :

$$\vec{\xi}(y, z, t) = E_0(y) \cdot e^{j(\omega t - \vec{\beta} \cdot \vec{z})}$$

$$\text{avec } E_0(y) = A \cdot e^{-\left(\frac{y}{W}\right)^2} \text{ et } \vec{\beta} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_0} \cdot n \cdot \vec{z}$$

$E_0(y)$  : représente l'amplitude d'un champ gaussien de la source laser

$W$  : représente le rayon du faisceau laser

$\beta$  : représente la constante de propagation



$n$ : représente l'indice de réfraction du coeur de la fibre supposé constant

$\lambda_0$ : longueur d'onde de la source laser dans le vide

## b. Champs complexes des deux faisceaux gaussiens sur les sorties Ref1 et Ref2

Pour la sortie Ref1, l'expression du champ complexe vaut :

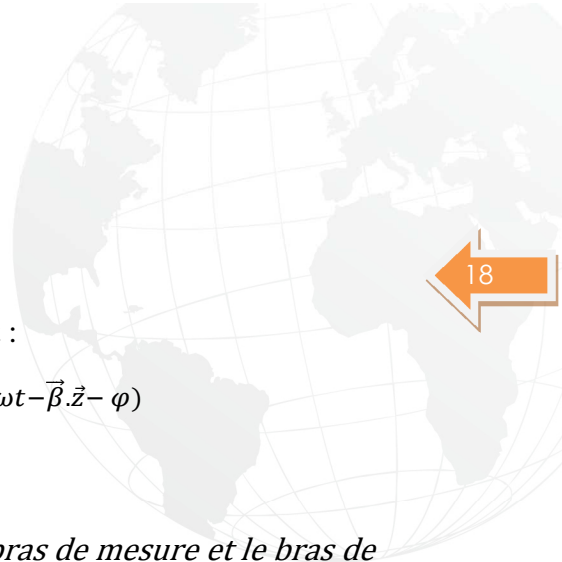
$$\vec{\xi}_{ref1}(y, z, t) = E_0(y) \cdot r \cdot t \cdot t_1 \cdot t_{01} \cdot (e^{j(\omega t - \vec{\beta} \cdot \vec{z} - \varphi_1)})$$

$$\text{avec } \varphi_1 = \frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot \cos(i)}{\lambda} + \varphi$$

$$d'où \varphi_1 - \varphi = \frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot \cos(i)}{\lambda}$$

$\varphi_1$  : représente la phase accumulée après un aller - retour du faisceau entre l'interféromètre et le système optique mobile dans un milieu d'indice 1 (se propage dans l'air). La présence d'un angle  $i$  permet de prendre en compte une configuration où la surface du système optique n'est pas à  $90^\circ$  du faisceau laser.

$\varphi$  : représente la phase commune accumulée dans le bras de mesure et le bras de référence (la propagation se fait dans un milieu d'indice  $n$ )



Pour la sortie Ref2, l'expression du champ complexe vaut :

$$\vec{\xi}_{ref2}(y, z, t) = E_0(y) \cdot t_2 \cdot t_{02} \cdot e^{j(\omega t - \vec{\beta} \cdot \vec{z} - \varphi)}$$

$\varphi$  : représente la phase commune accumulée pour le bras de mesure et le bras de référence.

### c. Expression des intensités résultantes $I_{Ref1}$ et $I_{Refs2}$

Sur la voie de sortie Ref1, on obtient l'intensité suivante :

$$I_{ref1}(y, z, t) = \vec{\xi}_{ref1}(y, z, t) \cdot \vec{\xi}_{ref1}(y, z, t)^*$$

$$I_{ref1}(y) = I_0(y) \cdot R \cdot T \cdot T_1 \cdot T_{01}$$

Sur la voie de sortie Ref2, on obtient l'intensité suivante :

$$I_{ref2}(y, z, t) = \vec{\xi}_{ref2}(y, z, t) \cdot \vec{\xi}_{ref2}(y, z, t)^*$$

$$I_{ref2}(y) = I_0(y) \cdot T_2 \cdot T_{02}$$

## 3.2 Expression des intensités $I_{Meas1}$ et $I_{Meas2}$

### a. Champs complexes des deux faisceaux gaussiens avant les pupilles circulaires S1 et S2

Avant la pupille circulaire au point S1 :

$$\vec{\xi}_1(x, y, z, t) = E_0(y) \cdot r \cdot t \cdot t_1 \cdot t_{01} \cdot e^{j(\omega t - \vec{\beta} \cdot \vec{z} - \varphi_1)}$$

$$\text{avec } \varphi_1 = \frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot \cos(i)}{\lambda} + \varphi_0$$

$$d'où \varphi_1 - \varphi_0 = \frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot \cos(i)}{\lambda}$$

$\varphi_1$  : représente la phase accumulée après un aller - retour du faisceau entre l'interféromètre et le système optique mobile dans un milieu d'indice 1 (se propage dans l'air). La présence d'un angle  $i$  permet de prendre en compte une configuration où la surface du système optique n'est pas à  $90^\circ$  du faisceau laser.

$\varphi_0$  : représente la phase commune accumulée dans le bras de mesure et le bras de référence (la propagation se fait dans un milieu d'indice  $n$ )

Avant la pupille circulaire au point S2 :

$$\vec{\xi}_2(x, y, z, t) = E_0(y) \cdot t_2 \cdot t_{02} \cdot e^{j(\omega t - \vec{\beta} \cdot \vec{z} - \varphi_0)}$$

$\varphi_0$  : représente la phase commune accumulée pour le bras de mesure et le bras de référence.

### b. Champs complexes des deux faisceaux gaussiens après les pupilles circulaires S1 et S2:

Comme nous l'avons vu au §2.2, à partir de S1 et S2 nous avons un changement de type de guide d'onde. En effet, nous passons de deux guides d'onde monomode à un seul guide d'onde multimode. Cette zone multimodale permet aux faisceaux lasers de diverger et d'interférer.

Cette configuration revient à considérer qu'une onde plane monochromatique passe à travers une pupille supposée circulaire, ce qui implique en sortie de la diffraction.

Les deux champs complexes  $\vec{\xi}_1(y, z, t)$  et  $\vec{\xi}_2(y, z, t)$  sont, a priori, modulés par un terme de diffraction à travers une pupille circulaire. Ceci dit, dans notre étude théorique nous négligerons la diffraction qui, en réalité n'a pas d'impact sur la mesure.

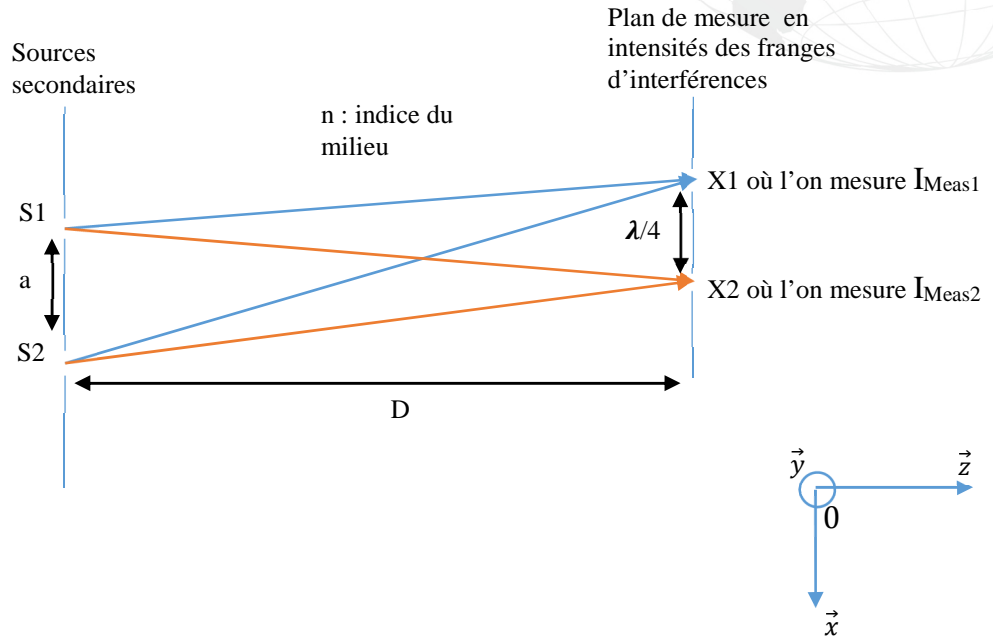
Nous avons donc pour les deux champs complexes après S1 et S2 les expressions suivantes :

$$\vec{\xi}_1(x, y, z, t) = E_0(y) \cdot r \cdot t_1 \cdot t_{01} \cdot e^{j(\omega t - \vec{\beta} \cdot \vec{z} - \varphi_1)}$$

$$\vec{\xi}_2(x, y, z, t) = E_0(y) \cdot t_2 \cdot t_{02} \cdot e^{j(\omega t - \vec{\beta} \cdot \vec{z} - \varphi_0)}$$

**c. Expression des intensités résultantes  $I_{Meas1}$  et  $I_{Meas2}$**

Dans la zone multimodale, nous avons la configuration géométrique suivante :



Dans le repère  $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ , on obtient pour  $\overrightarrow{S1X1}$  et  $\overrightarrow{S2X1}$ , les coordonnées suivantes :

$$\overrightarrow{S1X1} = \begin{pmatrix} x - \frac{a}{2} \\ D \\ z \end{pmatrix} \text{ et } \overrightarrow{S2X1} = \begin{pmatrix} x + \frac{a}{2} \\ D \\ z \end{pmatrix}$$

On obtient alors

$$\|\overrightarrow{S1X1}\| = \sqrt{D^2 \left(1 + \frac{z^2}{D^2} + \frac{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2}{D^2}\right)}$$

$$\|\overrightarrow{S2X1}\| = \sqrt{D^2 \left(1 + \frac{z^2}{D^2} + \frac{\left(x + \frac{a}{2}\right)^2}{D^2}\right)}$$



$$\text{Avec } \left| \overline{S2X1} \right| - \left| \overline{S1X1} \right| = -\frac{a.x}{D}$$

$\left| \overline{S1X1} \right|$  et  $\left| \overline{S2X1} \right|$  qui représentent respectivement les trajets parcourus par les faisceaux issus de S1 et S2 dans un milieu d'indice n.

Les phases associées à ces trajets sont donc :

$$\varphi_{\left| \overline{S1X1} \right|} = \frac{2. \pi. \left| \overline{S1X1} \right|}{\lambda} . n$$

$$\varphi_{\left| \overline{S2X1} \right|} = \frac{2. \pi. \left| \overline{S2X1} \right|}{\lambda} . n$$

Ce qui nous donne dans le plan de mesure pour les champs complexes  $\vec{\xi}_1$  et  $\vec{\xi}_2$  les expressions suivantes :

$$\vec{\xi}_1(x, y, z, t) = E_0(y).r.t.t_1.t_{01}.e^{j(\omega t - \vec{\beta} \cdot \vec{z} - \varphi_1 - \left| \overline{S1X1} \right|)}$$

$$\vec{\xi}_2(x, y, z, t) = E_0(y).t_2.t_{02}.e^{j(\omega t - \vec{\beta} \cdot \vec{z} - \varphi_0 - \left| \overline{S2X1} \right|)}$$

Nous pouvons dès lors calculer l'intensité résultante au point X1.

L'intensité est donnée par l'expression suivante :

$$I_{Meas1}(x, y, z, t) = (\vec{\xi}_1(x, y, z, t) + \vec{\xi}_2(x, y, z, t)) \times (\vec{\xi}_1(x, y, z, t) + \vec{\xi}_2(x, y, z, t))^*$$

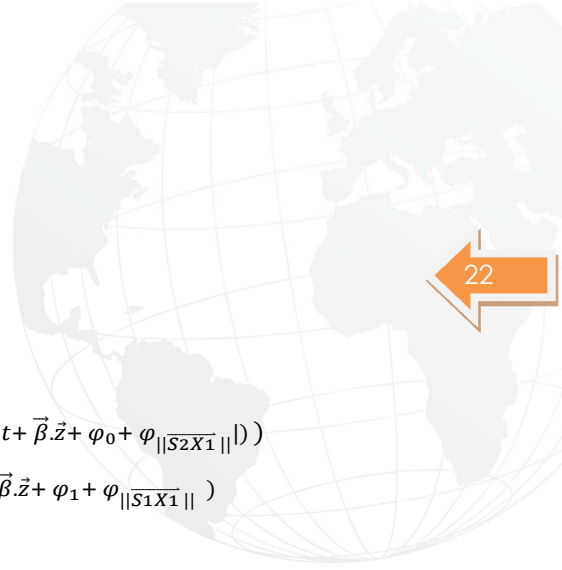
$$I_{Meas1}(x, y, z, t)$$

$$= \left( E_0(y).r.t.t_1.t_{01}.e^{j(\omega t - \vec{\beta} \cdot \vec{z} - \varphi_1 - \left| \overline{S1X1} \right|)} \right.$$

$$\left. + E_0(y).t_2.t_{02}.e^{j(\omega t - \vec{\beta} \cdot \vec{z} - \varphi_0 - \left| \overline{S2X1} \right|)} \right)$$

$$\times \left( E_0(y).r.t.t_1.t_{01}.e^{-j(\omega t - \vec{\beta} \cdot \vec{z} - \varphi_1 - \left| \overline{S1X1} \right|)} \right.$$

$$\left. + E_0(y).t_2.t_{02}.e^{-j(\omega t - \vec{\beta} \cdot \vec{z} - \varphi_0 - \left| \overline{S2X1} \right|)} \right)$$



$$\begin{aligned}
 I_{Meas1}(x, y, z, t) &= E_0(y)^2 \cdot r^2 \cdot t^2 \cdot (t_1 \cdot t_{01})^2 + E_0(y)^2 \cdot (t_2 \cdot t_{02})^2 \\
 &+ E_0(y) \cdot r \cdot t \cdot t_1 \cdot t_{01} \cdot t_2 \cdot t_{02} \cdot E_0(y) \cdot e^{j(\omega t - \vec{\beta} \cdot \vec{z} - \varphi_1 - \varphi_{\|\vec{s}_{1X1}\|} - \omega t + \vec{\beta} \cdot \vec{z} + \varphi_0 + \varphi_{\|\vec{s}_{2X1}\|})} \\
 &+ E_0(y) \cdot E_0(y) \cdot r \cdot t \cdot t_1 \cdot t_{01} \cdot t_2 \cdot t_{02} \cdot e^{j(\omega t - \vec{\beta} \cdot \vec{z} - \varphi_0 - \varphi_{\|\vec{s}_{2X1}\|} - \omega t + \vec{\beta} \cdot \vec{z} + \varphi_1 + \varphi_{\|\vec{s}_{1X1}\|})}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{Meas1}(x, y) &= E_0(y)^2 \cdot r^2 \cdot t^2 \cdot (t_1 \cdot t_{01})^2 + E_0(y)^2 \cdot (t_2 \cdot t_{02})^2 \\
 &+ E_0(y) \cdot E_0(y) \cdot r \cdot t \cdot t_1 \cdot t_{01} \cdot t_2 \cdot t_{02} \cdot e^{j(\varphi_{\|\vec{s}_{2X1}\|} - \varphi_{\|\vec{s}_{1X1}\|} - (\varphi_1 - \varphi_0))} \\
 &+ E_0(y) \cdot E_0(y) \cdot r \cdot t \cdot t_1 \cdot t_{01} \cdot t_2 \cdot t_{02} \cdot e^{-j(\varphi_{\|\vec{s}_{2X1}\|} - \varphi_{\|\vec{s}_{1X1}\|} - (\varphi_1 - \varphi_0))}
 \end{aligned}$$

Nous avons identifié précédemment que :

$$\begin{aligned}
 \varphi_1 - \varphi_0 &= \frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot \cos(i)}{\lambda} \\
 \varphi_{\|\vec{s}_{2X1}\|} - \varphi_{\|\vec{s}_{1X1}\|} &= -\frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot x}{\lambda \cdot D} \cdot n
 \end{aligned}$$

Remarque :

Ce dernier terme nous permet de calculer l'interfrange présent dans le plan de mesure (O,  $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$ )  
L'interfrange est donné par :

$$i = \frac{\lambda \cdot D}{a \cdot n}$$

De plus, nous pouvons simplifier l'expression en utilisant une relation usuelle de trigonométrie :

$$2 \cdot \cos \theta = e^{j\theta} + e^{-j\theta}$$

L'expression de l'intensité résultante au point X1 s'écrit:

$$\begin{aligned}
 I_{Meas1}(x, y) &= \\
 &I_0(y) \cdot R \cdot T \cdot T_1 \cdot T_{01} + I_0(y) \cdot T_2 \cdot T_{02} + 2 \cdot I_0(y) \sqrt{T_1 \cdot T_2 \cdot T_{01} \cdot T_{02} \cdot T \cdot R} \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot \cos(i)}{\lambda} + \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot x}{\lambda \cdot D} \cdot n\right)
 \end{aligned}$$



Nous savons que les deux points de mesures X1 et X2 sont séparés de  $\lambda/4$ , soit un déphasage de  $\pi/2 \pm 0,05$  rad. Nous pouvons donc en déduire l'expression de  $I_{meas2}$ .

L'expression de l'intensité résultante au point X2 est donc:

$$I_{Meas2}(x, y) = I_0(y) \cdot R \cdot T \cdot T_1 \cdot T_{01} + I_0(y) \cdot T_2 \cdot T_{02} + 2 \cdot I_0(y) \sqrt{T_1 \cdot T_2 \cdot T_{01} \cdot T_{02} \cdot T \cdot R} \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot \cos(i)}{\lambda} + \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot x}{\lambda \cdot D} \cdot n + \frac{\pi}{2} + \varphi_r\right)$$

$$I_{Meas2}(x, y) = I_0(y) \cdot R \cdot T \cdot T_1 \cdot T_{01} + I_0(y) \cdot T_2 \cdot T_{02} + 2 \cdot I_0(y) \sqrt{T_1 \cdot T_2 \cdot T_{01} \cdot T_{02} \cdot T \cdot R} \cdot \sin\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot \cos(i)}{\lambda} + \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot x}{\lambda \cdot D} \cdot n + \varphi_r\right)$$

Avec  $\varphi_r < 0,05$  rad, la phase résiduelle présente entre les deux voies de mesures.

**Pour synthétiser, ci-dessous les expressions en intensité des quatre sorties de mesures de l'interféromètre:**

$$I_{ref1}(y) = I_0(y) \cdot R \cdot T \cdot T_1 \cdot T_{01}$$

$$I_{ref2}(y) = I_0(y) \cdot T_2 \cdot T_{02}$$

$$I_{Meas1}(x, y) =$$

$$I_0(y) \cdot R \cdot T \cdot T_1 \cdot T_{01} + I_0(y) \cdot T_2 \cdot T_{02} + 2 \cdot I_0(y) \sqrt{T_1 \cdot T_2 \cdot T_{01} \cdot T_{02} \cdot T \cdot R} \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot \cos(i)}{\lambda} + \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot x}{\lambda \cdot D} \cdot n\right)$$

$$I_{Meas2}(x, y) =$$

$$I_0(y) \cdot R \cdot T \cdot T_1 \cdot T_{01} + I_0(y) \cdot T_2 \cdot T_{02} + 2 \cdot I_0(y) \sqrt{T_1 \cdot T_2 \cdot T_{01} \cdot T_{02} \cdot T \cdot R} \cdot \sin\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot \cos(i)}{\lambda} + \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot x}{\lambda \cdot D} \cdot n + \varphi_r\right)$$

**Remarque :** pour  $I_{meas1}$  et  $I_{meas2}$  les expressions en intensité sont exprimées dans le plan de mesure des franges d'interférence. Il faudrait donc prendre en compte la portion du flux injectée dans les deux guides d'ondes monomodes qui assurent la propagation du flux vers les sorties fibrées  $I_{meas1}$  et  $I_{meas2}$ .



Ci-dessous l'allure des signaux  $I_{meas1}$  et  $I_{meas2}$  obtenus en sortie des voies fibrées lorsque nous avons un déplacement du miroir :

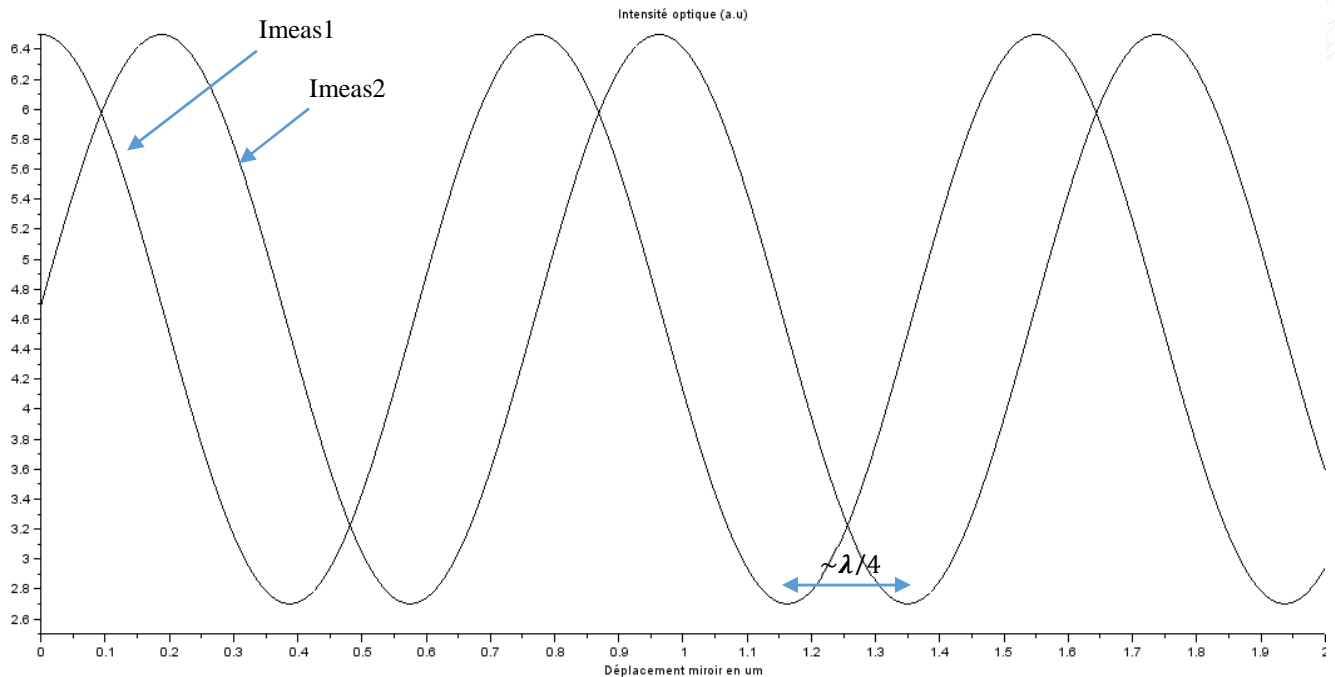


Figure 10: Interférogramme

**Remarque :**

L'allure des courbes observées correspondent bien à un système interférentiel (formation de franges rectilignes) présent dans le plan de mesure. Les deux points de détections étant distants de  $\sim \lambda/4$ , nous avons bien sur la voie Meas1 et Meas2 deux signaux sinusoïdaux déphasés d'approximativement  $\pi/2$ .

Lorsque nous avons un mouvement du système optique mobile, nous avons donc un déplacement du système interférentiel. A partir de la mesure de l'évolution de l'intensité sur les voies Meas1 et Meas2, il est donc possible par traitement du signal de remonter à une estimation de la variation de phase et donc au mouvement du système optique mobile.

Pour évaluer de manière optimale l'évolution de la phase nous réalisons une comparaison entre l'intensité mesurée et l'intensité théorique. Nous reviendrons sur cette partie de traitement du signal dans le dernier rapport synthétisant l'étude de modélisation du micro-baromètre optique.

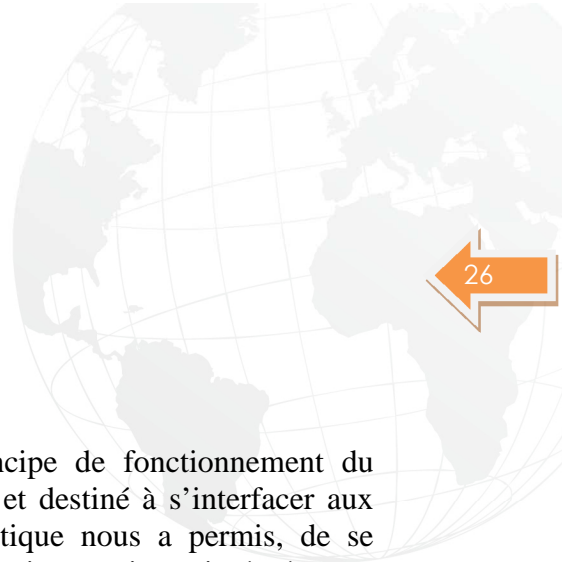
## 6. DISCUSSION SUR LA SENSIBILITE DE L'INTERFEROMETRE

La sensibilité du transducteur se traduit par sa capacité à convertir un mouvement (du système optique mobile) en variation d'intensité. Pour réaliser une mesure de qualité, il est donc essentiel d'avoir une stabilité en intensité du système interférentiel.

Comme nous pouvons le constater dans les expressions de  $I_{meas1}$  et  $I_{meas2}$ , la stabilité en intensité du système interférentiel dépend notamment de la stabilité en longueur d'onde de la source laser, de l'inclinaison du système optique mobile et de son coefficient de réflexion.

La sensibilité du transducteur peut également être dégradée pour les raisons suivantes :

- Les variations en températures ou en pressions peuvent provoquer localement un changement d'indice du milieu de l'air.
- Les vibrations mécaniques dues au milieu extérieur qui peuvent avoir un impact sur la connectique et sur le système optique mobile.
- Les particules en suspension induisent de la diffusion qui se superpose au signal.
- Le bruit optique lié à la source laser, en général causé par un bruit électronique.
- La qualité des connectiques fibrées. En effet plusieurs types de mésalignements peuvent être créés sur l'entrée et les sorties du transducteur : longitudinal, transversal, angulaire..etc.. Ces configurations peuvent créer des microcavités ou engendrer des pertes de puissances qui dégradent la mesure.



## 7. CONCLUSION

Cette deuxième étude nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement du transducteur optique développé par la société Teem Photonics et destiné à s'interfacer aux transducteurs acousto-mécanique du DASE. Cette analyse optique nous a permis, de se familiariser avec cette architecture spécifique et constituée de fonctions optiques intégrées.

Elle nous a également, permis d'établir les expressions en intensité des voies de mesure de l'interféromètre et ainsi de modéliser le comportement optique de ce transducteur.

Le développement de ce modèle numérique est une bonne base pour la phase de caractérisation où probablement, il sera nécessaire de modifier ou d'ajouter certains paramètres physiques d'influences (température, pression, humidité, vibrations mécaniques...etc).

Dans cette modélisation, nous nous sommes concentrés sur le transducteur optique, cependant la qualité de la mesure dépend de toute la chaîne optique: la source laser, l'interféromètre, les fibres optiques et les photodiodes. Cet aspect sera également abordé dans l'étape de caractérisation avec un numériseur optique spécialement développé pour les futurs micro-baromètres optiques. Ce numériseur intégrera la partie émission - réception du signal optique ainsi que son traitement.



ANNEXE 1

**teem photonics™**  
Photronics Integrated Circuits

**PicoMove**  
optical sensor for displacement/vibration measurements

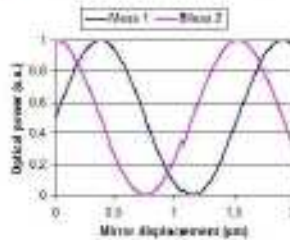
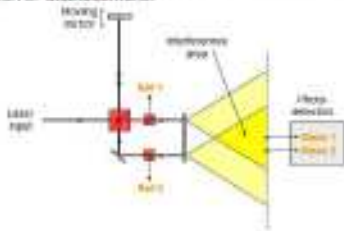
**Integrated waveguide interferometer with picometric performances**



With its flexible **Ion-Exchange technology** on glass substrate, Teem Photonics designs and realizes **Photronics Integrated Circuits (PICs)**, in which various optical functions are uniquely combined, to create **compact, stable, reliable, and high performances** optical sensors, such this interferometer\*.  
(\*patented design)

**Principle:**

An interference area is created thanks to a Michelson-like interferometer. Two  $\pi/2$ -phase shifted optical ports allow determining both amplitude and direction of the mirror displacement.



**Performances:**

Operating wavelength	1330 - 1550 nm
Measurement beam divergence	< 10 mrad
Interferences contrast	> 90% (1)
Measurement outputs phase shift	$\pi/2 \pm 0.05$ rad.
Optical path-length difference	< 0.1 mm (1)
Displacement resolution	< 10 pm (1)
Intrinsic noise	< 1pm/10 <sup>10</sup> at 1Hz
Packaging dimensions	59 x 26 x 0.5 mm
Storage temperature	-40 to +85 °C

(1) for a mirror working distance < 20mm ; (2) for a mirror working distance of 1mm ; (3) for oscillation frequency in the 10Hz - 10kHz range

**Typical applications:**

- Measurement of sub-nanometer displacements
- High precision position sensor
- High precision vibration sensor
- High precision refractive index measurement

**Features & benefits**

**Very high sensitivity**  
Exceptional displacement sensitivity and low intrinsic noise thanks to monolithic and very stable design

**Temperature insensitive**  
Compact and monolithic integration, very low thermal expansion of both glass-chip and INVAR™ packaging

**Monolithic integration**  
All optical functions integrated on a single wafer, very high stability of the measurement, insensible to vibration or shock

**Remote electrical operation**  
No electrical parts in the sensor head. Laser source and detectors remotely placed through reliable fibre optallino

**Eye-safe operation**  
1.55µm operating wavelength procure Eye safe conditions, compatibility with commercial Telecom sources

**Visible wavelengths compatibility**  
Optical beam for alignment purpose available at visible wavelengths

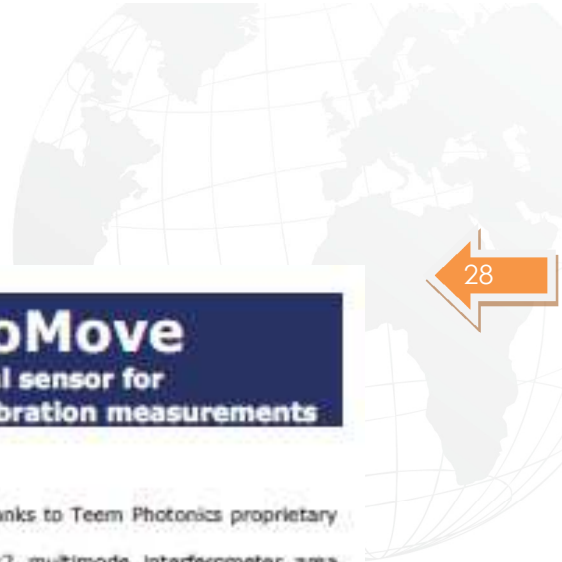
**Robust, stable, and highly reliable.**  
Intrinsically robust due to diffusion based process, glass based technology, no deposited layers, no etching.

**Vacuum environment compatibility**  
Compatible with vacuum operation

**Optional features**

**Plastic/Aluminium/Invar packaging**

**Four ports detection board with fibre-input and BNC-outputs available**



## teem photonics™ Photonics Integrated Circuits

## PicoMove optical sensor for displacement/vibration measurements

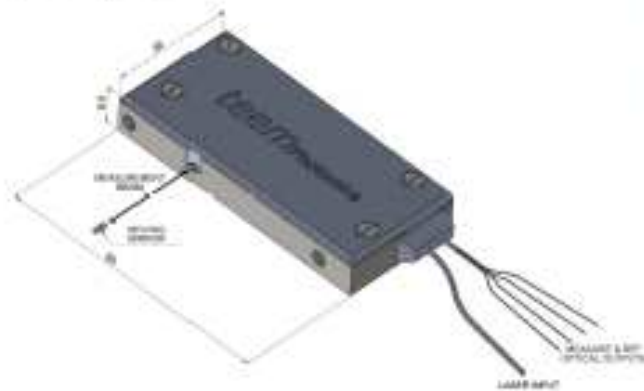
### Optical integration:

All the optical functions are monolithically integrated on a compact glass chip thanks to Teem Photonics proprietary ion-exchange technology.

The optical chip integrates two power splitters, two tap couplers, and a 2x2 multimode interferometer area (replacing the beam splitter of the above scheme). All these functions are optically linked via singlemode low-loss waveguides.

The multimode interferometer area has been designed to create a perfect  $\pi/2$  phase shift between the two output measurement waveguides (Meas1 and Meas2) in order to maximize the sensitivity of the displacement measurement. Taps allow evaluating optical powers in both input-arm and measurement-arm (Ref1 and Ref2). The splitters coupling-ratios have been selected to optimize the interferometer contrast.

### Optical ports:



- ▶ One fibered input\* (PM) for laser injection
- ▶ One collimated beam\*\* to be reflected on the moving object (measurement arm)
- ▶ Four fibered outputs\*:
  - two  $\pi/2$ -phase shifted measurement ports to determine both amplitude and direction of the mirror displacement
  - two reference ports to optimize the interferences contrast

\* These ports are reliably fibered to the glass chip with fibres array units

\*\* The collimated beam is obtained by a selfoc lens

### Packaging:

Our interferometer chip is protected by a compact package with dimensions as small as 59 x 26 x 8.5 mm. This package is standard made of aluminium-alloy, or made of INVAR™ for thermally sensitive applications. The measurement beam is perpendicular to the input and output fibres. Parallel design is feasible

### Detection system:

The optical sensor head can be remotely installed thanks to low loss optical fibres. The detection system is available in two options. The first integrates four low-noise photo-detectors and their pre-amplifiers. The second integrates the photo-detectors and the amplifiers together with the laser source, the digital acquisition board, and the associated software. A USB link allows for connexion to a computer.





## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A.Missof, S.Olivier, L.Chassagne, S.Topsu, B.Cagneau, Y.Alayli, P.Millier \_ Integrated waveguide interferometer with picometric performances : application to cantilever sensing
- D.Ponceau, P.Millier, S.Olivier \_ Subnanometric Michelson interferometry for seismological applications
- S.Olivier, D.Ponceau, P.Millier, N.BREBION\_Bulks optics for seismological applications
- Propagation Guidée et Microonde\_ Thierry Chartier
- A.Chevalier\_Guide du dessinateur industriel