

Conception d'un équipement de test, pour capteur infrarouge de sécurisation, miniaturisé par déviation optique

Ing. V. HELLAS
Ir N. VETCOUR
GRAMME – Liège

Le principe de détection du capteur concerné se base sur une mesure de distance par triangulation de faisceaux infrarouges. Cet article décrit la conception, la réalisation et la validation d'un équipement de test et de calibration miniaturisé grâce à l'intégration d'un concept de déviation optique. Pour ce faire, des lentilles, des prismes et des filtres d'intensité lumineuse ont été exploités en vue de reproduire les situations de calibration normales.

Mots-clefs : optique, infrarouge, triangulation, miniaturisation, calibration, équipement de test.

The detection principle of the sensor in question is based on the distance measurement by infrared beams triangulation. This article describes the design, the making and the validation of a miniaturized test and calibration equipment thanks to optical deviation. To reach this aim, lenses, prisms and light intensity filters were used in order to reproduce normal calibration situations.

Keywords : optics, infrared, triangulation, miniaturization, calibration, test equipment.

1. Introduction

Cet article s'efforce de décrire la démarche suivie lors de la conception d'un équipement de test et de calibration dédié à un capteur infrarouge. Ces étapes étant actuellement effectuées sur des bancs de test de dimensions importantes, le nouvel équipement de test doit remplir des fonctions identiques tout en occupant moins de volume dans les ateliers. Afin de tromper le capteur et de lui faire croire que le faisceau infrarouge a parcouru 2000 mm alors qu'en réalité la distance n'est que de 400 mm, un concept de déviation optique a été intégré, ce qui a permis la miniaturisation de l'équipement tout en conservant les caractéristiques existantes.

2. Description technique du capteur

La technologie embarquée pour repérer une présence est la mesure de distances par triangulation. Lorsqu'un obstacle se trouve dans la zone de détection, la distance mesurée par le capteur est inférieure à la distance de référence.

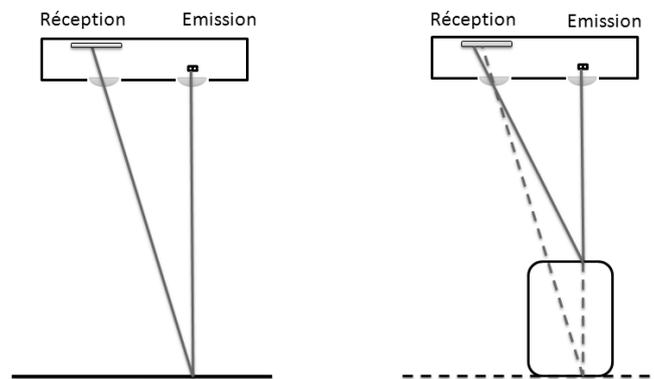


Figure 1 : Principe de triangulation

Plusieurs LEDs émettent alternativement des faisceaux infrarouges afin d'assurer un champ de détection suffisant. Ces derniers traversent une lentille plan-convexe placée devant les cellules émettrices pour ressortir quasiment collimatés. En réalité, ils se focalisent à une distance d'environ 2,2 m. En effet, les LEDs sont placées à environ un dixième de millimètre en retrait par rapport au foyer de la lentille.

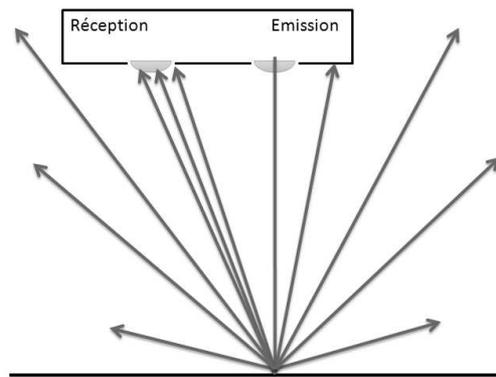


Figure 2 : Faisceaux diffusés par un obstacle

Lorsque le faisceau rencontre un obstacle, ce dernier réfléchit la lumière infrarouge dans toutes les directions. Une partie de cette lumière est captée par une autre lentille identique à la première, dont le rôle est de focaliser les rayons infrarouges sur le récepteur, une cellule photosensible de type PSD, *Position Sensing Device*.

La PSD est une photodiode à effet latéral qui peut être vue comme un ensemble de photodiodes mises en parallèle (fig. 3).

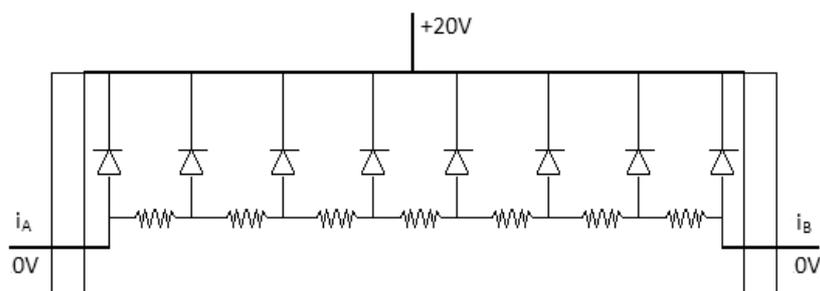


Figure 3 : Schéma équivalent d'une PSD

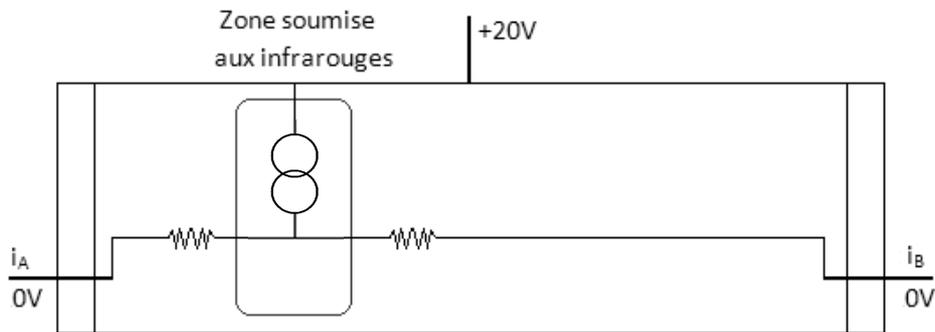


Figure 4 : Schéma équivalent d'une PSD soumise à un SPOT infrarouge

Lorsqu'une zone de la cellule PSD est soumise à un rayon infrarouge, elle se comporte comme un générateur de courant (fig. 4).

Ce courant va être réparti en deux courants I_A et I_B . La valeur de ces courants dépendra de la résistance électrique du chemin parcouru qui est proportionnelle à la distance qui sépare la zone exposée des bords de la cellule.

Ces deux courants dont les intensités sont liées à la position de la zone exposée peuvent être mesurés en sortie de cette photorésistance. Les intensités sont l'image de la position du faisceau réfléchi sur le PSD.

À l'instant où un obstacle entre dans la zone de détection, la hauteur de réflexion diffère de celle de référence. D'autres faisceaux avec un angle de réflexion différent, sont captés. Ceci a pour effet de translater la zone exposée des PSD et donc de modifier les valeurs des intensités des courants. Il y a détection.

Les valeurs de référence des courants sont déterminées par un microcontrôleur lors de la mise en service du détecteur, il s'agit de la calibration. De plus, étant donné la sensibilité à la variation de la distance de réflexion de ses faisceaux, l'appareil doit s'adapter à sa zone de travail de référence afin d'assurer un bon fonctionnement. Cet ajustement est réalisé par la translation des lentilles situées devant les modules de réception. Le déplacement des lentilles permet de maîtriser l'angle de réflexion des faisceaux captés et donc d'ajuster la position de référence des faisceaux réfléchis sur les PSD.

3. Cahier des charges

L'équipement miniaturisé doit remplir des fonctions identiques à celles du banc de test actuellement utilisé en production tout en occupant moins de volume dans les ateliers. Ces fonctions sont reprises ci-après.

En premier lieu, des tests fonctionnels de nature électronique sont effectués au moyen d'un programme informatique, d'une interface de communication et de pointes de contact pour se connecter au capteur à tester. Des mesures sont ainsi directement prises sur le circuit imprimé du capteur. Les valeurs efficaces de tension lorsque l'alimentation est continue ou alternative (RMS), le ripple, l'écriture et la lecture dans l'EEPROM, la consommation de courant ainsi que l'intensité lumineuse reçue par les PSD sont vérifiés.

Ensuite, vient la vérification de la calibration dont le processus se déroule comme suit. L'algorithme de calibration du capteur est initié par le programme de test. Les valeurs des courants sont constamment lues par le programme. Ce dernier détermine la position optimale des lentilles, fonction de la distance de travail.

L'algorithme de calibration du capteur s'arrête lorsque les intensités des courants sont dans la plage de valeurs acceptables.

Un premier test de calibration est réalisé sur un écran situé à 3m, au fond du banc. Cette opération est répétée pour une distance d'écran de 2m. La position des lentilles est ajustée pour cette distance, les nouvelles valeurs des intensités de courants obtenues doivent respecter les mêmes bornes de calibration.

Une dernière calibration est effectuée sans modifier l'ajustement des lentilles mais cette fois-ci, sur un écran recouvert d'un tapis dont le but est d'absorber les rayons infrarouges, l'intensité lumineuse est alors nettement affaiblie. Les nouvelles valeurs des courants sont comparées aux précédentes, à savoir celles du test à 2m. L'intérêt de ce test est de vérifier l'aptitude du capteur à se calibrer lorsque l'intensité des faisceaux infrarouges, arrivant sur ses cellules PSD, est faible. Le cahier des charges spécifie que l'équipement miniaturisé doit remplir les mêmes fonctions que le banc de test actuellement utilisé en production tout en occupant moins de volume dans les ateliers.

4. Etude du concept de déviation optique appliqué à la triangulation infrarouge

4.1 Présentation du concept

Le but de la technique de réduction de distances par déviation optique est d'obtenir, à distance réduite, un résultat de calibration du capteur identique à celui obtenu dans des conditions de fonctionnement normales illustrées à la figure suivante.

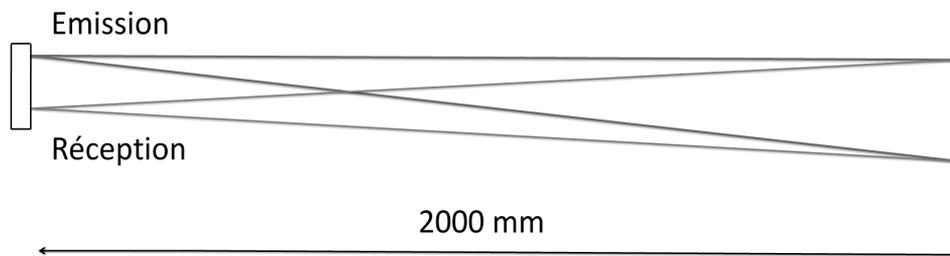


Figure 5 : Faisceaux infrarouges en conditions de fonctionnement normales

Pour la rendre industrialisable, la technique de simulation doit être validée et donc être vérifiée en pratique sur un capteur ayant réussi des tests sur le banc original. En effet, il est indispensable que les positions des faisceaux réfléchis sur les PSD des capteurs testés sur les deux bancs soient les plus proches possibles. Aussi, pour que la mesure par triangulation fournisse des résultats similaires, lorsque la distance de travail du capteur est fortement réduite, une focalisation grâce à des lentilles additionnelles [A], une déviation au moyen de prismes [B] ainsi qu'une atténuation de l'intensité lumineuse [C] des faisceaux infrarouges sont nécessaires¹.

¹ Cette combinaison d'éléments optiques a été étudiée dans le cadre d'un stage par Magali Durant, étudiante à l'ENSPS de Strasbourg.

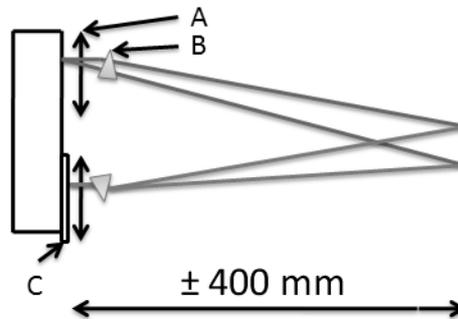


Figure 6 : Faisceaux infrarouges en conditions de fonctionnement réduites

4.2 Lentilles additionnelles

Dans le but de réduire la distance capteur écran tout en maintenant une image nette, une seconde lentille est placée devant l'émetteur. Il en est de même devant le récepteur. L'utilisation d'une seconde paire de lentilles est nécessaire afin d'éviter une image des spots sur le PSD floue ou encore entourée d'un halo ce qui n'est pas acceptable pour le bon fonctionnement du PSD. En effet, un spot trop large peut induire une perte de précision sur la mesure des courants.

La distance focale des lentilles additionnelles est un paramètre clé car ce dernier influence les dimensions du banc. Un compromis doit être trouvé entre la distance séparant l'écran du capteur et la précision du système optique. Plus les dimensions sont réduites, en particulier la longueur du banc, plus la précision exigée sur la position des spots sera élevée. Cette influence va alors se répercuter sur la précision de la déviation des prismes, la précision sur la distance à laquelle l'écran est placé et donc le coût final de l'équipement. Finalement, les distances entre capteur et écran ont été réduites à environ 400 et 420 mm au lieu de 2000 et 3000 mm sur le banc de première génération.

4.3 Dimensionnement des prismes

Détermination de la déviation

Lorsque la distance a été réduite, subsiste un problème : les faisceaux infrarouges réfléchis par l'écran et captés par les lentilles se focalisent à côté des PSD puisque l'objet qui les a réfléchis est en dehors des limites de

fonctionnement de la mesure de triangulation. Toute calibration est alors impossible quelle que soit la position des lentilles.

Afin que les images des spots infrarouges se focalisent correctement sur les PSD, il est nécessaire que l'angle des faisceaux infrarouges captés par les lentilles soit similaire à celui des rayons réfléchis par un objet situé à 2m. La solution consiste alors en l'insertion d'un prisme devant le module d'émission et d'un second devant le module de réception permettant aux spots de se focaliser sur les PSD comme ils le feraient avec un écran situé à 2m. L'angle de déviation subi par les faisceaux, illustré à la figure 7, est alors le suivant :

$$\alpha' = a \tan\left(\frac{1}{2} \frac{B \cdot (p - p^*)}{p \cdot p^*}\right)$$

où B est la distance séparant le module de réception du module d'émission,
 p est la distance capteur-écran initiale,
 p^* est la distance capteur-écran réduite,
 α' est l'angle de déviation des faisceaux infrarouges.

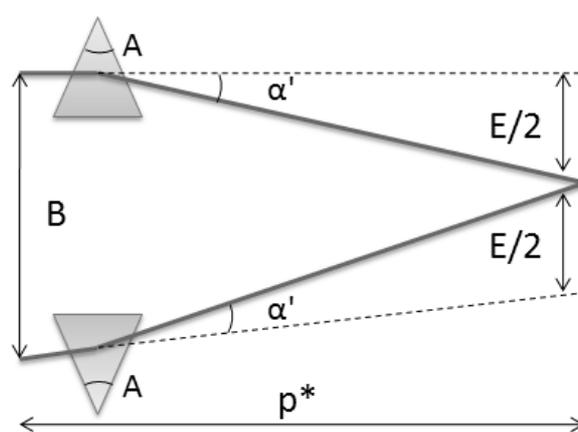


Figure 7 : Effet de deux prismes sur la position de la zone soumise aux infrarouges

Considérations relatives à la non linéarité de la déviation du prisme

Afin de tenir compte de la variation de la déviation en fonction de l'angle d'incidence, la formule utilisée est la suivante :

$$D = i + a \sin \left[n \sin \left(A - a \sin \frac{\sin i}{n} \right) \right] - A$$

où D est la déviation,

i est l'angle d'incidence du rayon traversant le prisme,

n est l'indice de réfraction du prisme,

A est l'angle au sommet du prisme.

Enfin, l'indice de réfraction de l'air est pris égal à 1.

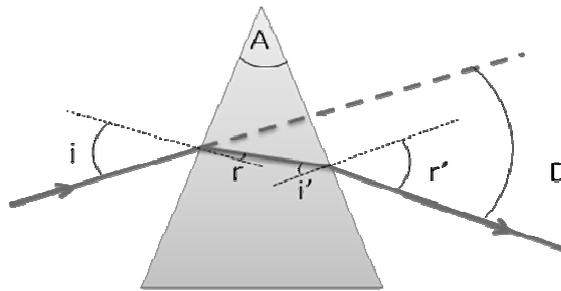


Figure 8 : Illustration d'un faisceau lumineux traversant un prisme

L'influence de l'angle d'incidence sur la déviation du prisme est illustrée par le graphique de la figure 8. Obtenir une déviation rigoureusement identique est impossible pour les différents spots puisqu'ils ont tous un angle d'incidence différent. Plusieurs prismes sont utilisés afin de pallier à cette non-linéarité. Puisque deux faisceaux émis traversent un même prisme, l'orientation de ce dernier sera calculée pour que la déviation de ces deux rayons soit la plus semblable possible.

L'analyse du graphique suivant permet de déterminer l'orientation à donner aux prismes afin que les déviations des faisceaux soient identiques. Néanmoins, la déviation varie avec l'angle d'incidence et il existe un angle d'incidence correspondant à une déviation minimale. Mais cet angle ne peut être appliqué que pour un seul des deux rayons car l'autre sera systématiquement dévié plus fortement, étant donné l'écart d'environ 3° entre les angles d'incidence de ces deux rayons.

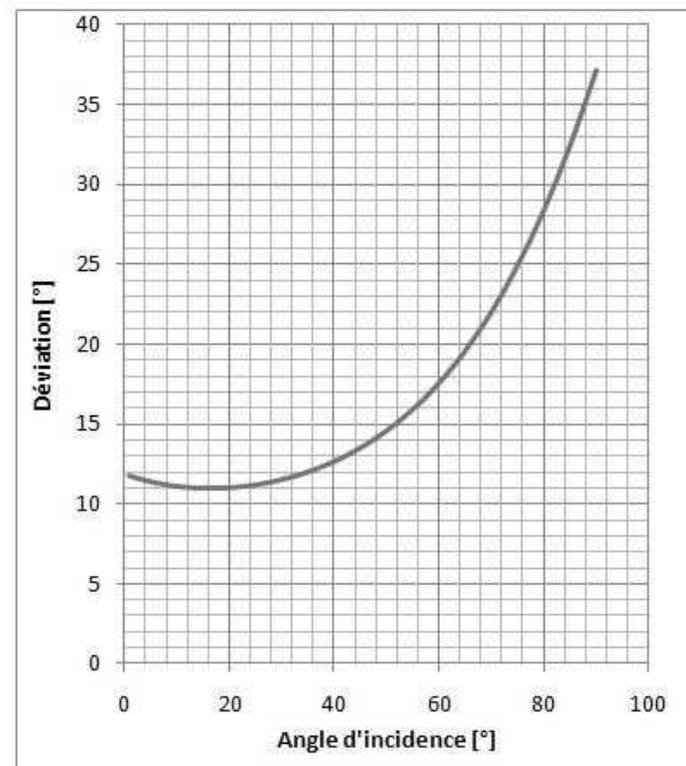


Figure 9 : Déviation en fonction de l'angle d'incidence
(pour un prisme en PMMA, $A=22^\circ$, $n = 1,49$)

L'analyse de la figure 9 démontre que deux rayons ayant un angle d'incidence différent peuvent avoir une même déviation. Pour ce faire, la moyenne de leur angle d'incidence doit être égale à l'angle d'incidence correspondant à la déviation minimale. Cette propriété sera utilisée pour pallier les problèmes dont il est question ci-avant.

Considérations relatives à l'épaisseur des prismes

Un autre phénomène peut induire un décalage non désiré. En effet, la déviation du prisme est sensible à la longueur du chemin parcouru par le faisceau à l'intérieur du prisme. Autrement dit, l'écart entre les spots ne sera pas conservé car un décalage est induit et ce dernier dépend de l'épaisseur du prisme et de l'angle d'incidence des rayons le traversant.

Ce phénomène sera négligé pour les raisons suivantes :

- Les paires de faisceaux sont assez rapprochées lorsqu'elles traversent les prismes parce que ces dernières sont près de la source, la différence de chemin parcouru à travers le prisme est négligeable,
- Les moyennes des paires de faisceaux possèdent un angle d'incidence correspondant à l'angle d'incidence de déviation minimale. Pour cet angle d'incidence, le décalage peut être négligé car les faisceaux traversent le prisme perpendiculairement à son axe de symétrie.

4.4 Adaptation photométrique

L'énergie lumineuse reçue par les PSD à distance réduite doit être semblable à celle reçue sur le banc de test de première génération. Dès lors, il convient de leurrer le capteur quant à la distance effectivement parcourue par la lumière infrarouge. Pour ce faire, une adaptation photométrique est nécessaire. Remarquons qu'une puissance lumineuse trop importante est à éviter car le PSD entre en saturation. Il faut également veiller à ce que ce flux soit suffisant afin que les courants de sortie des PSD soient supérieurs au minimum requis.

L'atténuation a été quantifiée afin d'adapter la puissance lumineuse en fonction du chemin parcouru par les faisceaux infrarouges et des angles d'incidence. Le flux lumineux est dépendant de l'intensité lumineuse mais également de l'angle solide dans lequel le faisceau s'inscrit. La surface d'éclairement et la distance étant fixées par le système de déviation optique, l'intensité lumineuse est le seul paramètre permettant d'adapter la puissance reçue par les PSD. Ainsi, dans le montage optique dimensionné précédemment, seulement 2,5 % de la lumière ne peut atteindre les PSD pour que le flux lumineux soit semblable à un flux lumineux qui proviendrait d'une réflexion située à 2000 mm.

L'intensité lumineuse est adaptée grâce à des filtres Kodak en gélatine. Dans le but de s'immuniser du bruit, ces filtres seront placés le plus près possible de la lentille de réception.

Le test de la calibration sur sol difficile ou sol gris, permet de vérifier l'aptitude à la calibration avec une faible puissance lumineuse. Le sol difficile sera alors simulé par une atténuation plus importante de l'intensité.

La calibration avec des valeurs faibles d'intensité (1,4% transmis) pourra alors être vérifiée.

L'étude du concept de déviation appliquée au fonctionnement optique du capteur a permis de dimensionner les éléments optiques nécessaires à sa mise en œuvre.

5 Réalisation d'un prototype intégrant le concept de déviation optique

Afin de vérifier expérimentalement la possibilité d'intégrer le concept de miniaturisation de l'équipement de test, un prototype a été conçu.

Le traitement des données récoltées suite à des calibrations successives de capteurs sur l'équipement de première génération, a permis d'obtenir l'intervalle de confiance des valeurs des courants lorsque la position des lentilles du capteur reste inchangée, il s'agit de la répétabilité, mais également lorsque cette dernière est modifiée et ensuite ajustée à nouveau, afin de déterminer la reproductibilité des valeurs mesurées. Ces valeurs ont été utiles pour la suite afin de valider le principe et ensuite l'équipement de test.

Une première validation optique du montage a été réalisée grâce à un faisceau de lumière blanche de forte intensité envoyé directement sur une cellule PSD. Cette lumière a été réfléchi et a traversé le système optique avant d'éclairer l'écran. Le rayon lumineux a parcouru en sens inverse le chemin que parcourrait le rayon infrarouge réfléchi depuis l'écran jusqu'aux cellules PSD. L'image de la cellule PSD était nette et dépourvue de halo.

Le principe a été validé une seconde fois via les valeurs des courants mesurées ainsi que du flux lumineux reçu par les PSD, ce qui a permis de prouver que le capteur considère les faisceaux traversant le montage optique comme étant des faisceaux provenant d'une réflexion sur sol à 2m. Ce constat est également valable lorsque les lentilles sont ajustées pour une distance réelle de 3m et que l'écran est déplacé pour simuler cette distance. L'adaptation du flux lumineux permet de reproduire l'énergie lumineuse reçue dans des conditions normales. De plus, l'atténuation supplémentaire de l'intensité pour simuler un sol gris s'est révélée convenable.

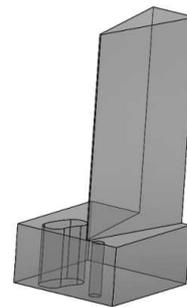
Grâce à ce prototype, les positions relatives des éléments optiques ainsi que leur précision, de l'ordre du dixième de millimètre, ont pu être déterminées. La précision de la déviation se chiffre en vingtième de degré.

6 Conception de l'équipement de test

Les différentes pièces ont été conçues en fonction de leur rôle, du moyen de fabrication (découpe laser, usinage à la fraiseuse numérique, etc.), mais également en fonction de la précision exigée pour le système optique.

Les différentes séquences de test nécessitent un déplacement de l'écran et un changement de combinaison de filtres. Ces actions sont générées par un système pneumatique.

Afin de minimiser les coûts tout en respectant les exigences de qualité, le mode de confection des prismes dont les dimensions et les formes ne sont pas standardisées, a fait l'objet d'un examen particulier. Le choix s'est porté sur une fabrication à partir d'un bloc de PMMA, auprès d'un sous-traitant mécanique. Les tolérances de fabrication ont été particulièrement cadrées pour éviter des défauts optiques inadmissibles. Un polissage à la main a ensuite été réalisé. Le design du prisme a été optimisé en intégrant dans sa base un système de réglage de l'orientation.



*Figure 10 :
Design d'un
prisme*

Les exigences de précision de la déviation ont été respectées non seulement par l'introduction de ce dispositif de réglage de l'orientation des prismes mais également par l'ajout d'un système d'ajustement de différentes positions que l'écran doit occuper lors de la procédure de calibration, permettant ainsi de limiter les coûts de fabrication.

L'ensemble de l'équipement de test ainsi que les mises en plan ont été modélisés sous Solidworks dans le but de faire réaliser une majeure partie des pièces par des ateliers mécaniques spécialisés.

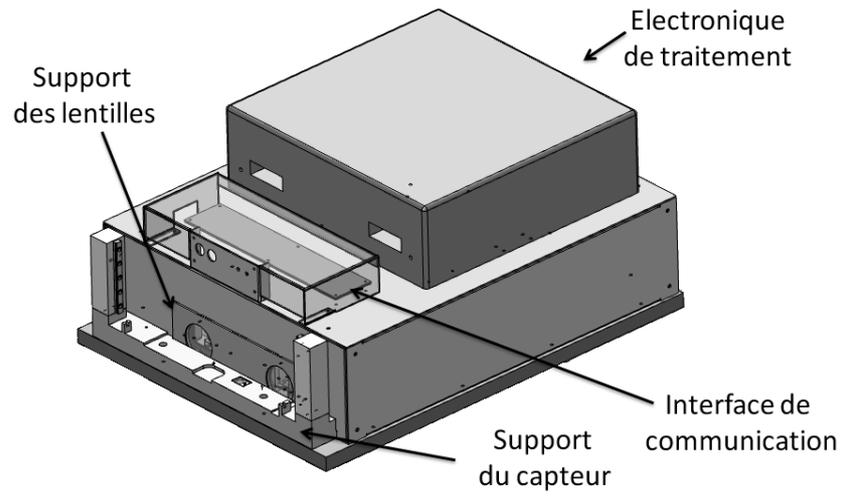


Figure 11 : Modélisation extérieure de l'équipement de test

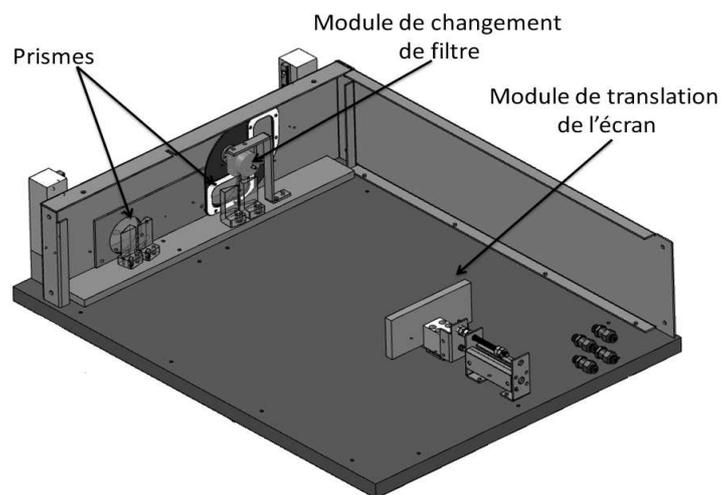


Figure 12 : Modélisation intérieure de l'équipement de test

7 Validation de l'équipement de test

7.1 Analyse des résultats

En vue d'une validation complète de l'équipement de test, des analyses et comparaisons des intensités de courants de séries de capteurs passés sur les deux types de banc ont été effectuées. Pour ce faire, les valeurs des courants, obtenus sur les deux bancs ont été récoltées et analysées. Ces dernières cadrent avec l'intervalle de confiance déterminé au préalable.

La valeur du flux lumineux reçu par le PSD a également fait l'objet de contrôles puisque ce paramètre est adapté au moyen de filtres pour correspondre à un fonctionnement dans des conditions normales.

Enfin, un dernier contrôle visuel de la position des lentilles des capteurs ayant subi un passage sur les deux bancs a été effectué. La différence d'ajustement des lentilles d'un même capteur ayant subi une calibration sur les deux bancs est alors acceptable.

7.2 Comparaison de l'équipement de test miniaturisé avec le banc de test actuel

Consommation d'air comprimé

Sous une pression de 6 bars, la consommation théorique du banc de test actuellement utilisé en production est estimée, sur base des données fournies par le constructeur, à 217 cm³ par capteur contrôlé. La consommation de l'équipement de test miniaturisé est estimée à 4,87 cm³. Le volume d'air comprimé nécessaire à la procédure de calibration est réduit d'un facteur supérieur à 40.

Durée de la procédure de test

Le temps nécessaire aux tests électroniques est inchangé. Grâce aux déplacements optimisés, la durée des calibrations est réduite. L'influence de cette réduction de temps est de l'ordre de 4 secondes par mouvement, soit 12 secondes par capteur calibré. Ce qui permet d'estimer que le gain de temps de productivité de 30%.

Dimensions

Les dimensions du banc de test actuellement utilisé en production et celles de l'équipement de test miniaturisé sont détaillées dans le tableau suivant :

	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Volume (m ³)
Banc de test actuel	3,250	1,150	1,250	4,672
Equipement miniaturisé	0,460	0,600	0,205	0,055

Comparaison des dimensions des deux types d'équipement

La réduction de volume est d'approximativement 98%. Remarquons que cette estimation est effectuée sans tenir compte des dimensions des accessoires nécessaires aux tests électroniques ni de l'encombrement du poste de travail.

8 Conclusion

L'objectif de cet article était de présenter un équipement de test miniaturisé dédié au test et à la calibration d'un capteur infrarouge pour mesure de distance. Le principe de la miniaturisation est de dévier le faisceau infrarouge par un dispositif optique qui impose le parcours du faisceau et altère ce dernier afin de le rendre similaire à un faisceau ayant parcouru la distance de travail.



Figure 13 : Vue extérieure de l'équipement de test réalisé

L'analyse du fonctionnement du capteur, de sa procédure de test, l'analyse du concept de déviation optique et la réalisation d'un prototype validant le principe ont conduit à la conception et la réalisation du banc de test final miniaturisé. Malgré la forte réduction de distance parcourue par les faisceaux infrarouges, l'aptitude à la calibration du capteur n'est pas altérée, et ce, grâce au système optique additionnel composé de lentilles, de prismes et d'un filtre d'intensité lumineuse.

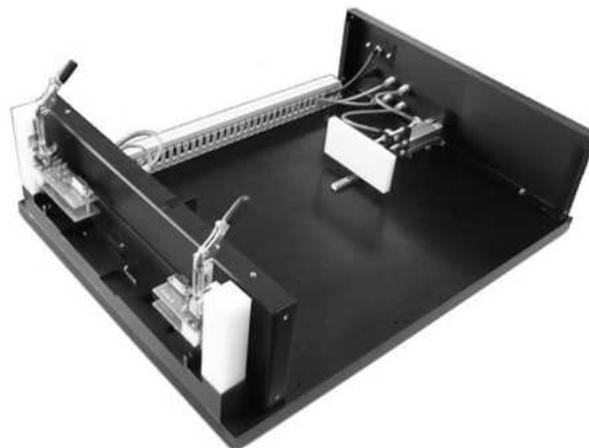


Figure 14 : Vue intérieure de l'équipement de test réalisé

Enfin, la mise en service de cet équipement dans la chaîne de production a eu lieu fin août 2009, il en résulte pour la procédure de test, un gain de productivité évalué à 30 %.

Dans ces conditions, le cahier des charges peut être considéré comme étant respecté puisque l'équipement de test de nouvelle génération permet alors d'effectuer des calibrations en leurrant le capteur.

9 Références bibliographiques

CHEVALIER A., *Guide du dessinateur industriel*, Hachette technique, 2004.

CORNET A. et DEVILLE J.P., *Physique et ingénierie des surfaces*, EDP Sciences, 1998.

DURAND M., *Study and realization of an alignment bench for infrared sensor*, ENSPS, 2007.

FLEURY P. et MATHIEU J.P., *Images optiques*, Eyrolles, 1960 (2^e édition).

MARIOGE J.P., *Surfaces optiques, Méthode de fabrication et de contrôle, Recherches*, EDP sciences, 2000.

SERWAY R. ; *Physique 3, Optique et physique moderne, De Broeck Université*, 1992 (3^{ème} édition).