

# Étude d'un nouveau procédé pour la mesure et la correction de la réfraction par corrélation d'images

■ Michel KASSER - Jean-Luc MAGNENAT

À l'occasion d'un travail de diplôme de bachelor (équivalent suisse de bac.+3), une série de tests préliminaires a été menée en vue de se donner les moyens de mesurer directement l'angle de réfraction d'une visée zénithale, en exploitant le caractère dispersif de l'air. Un dispositif de type réfractomètre d'un type nouveau a ainsi été imaginé, basé sur la corrélation entre les images obtenues séquentiellement avec deux filtres (rouge et bleu), et des tests ont été menés pour évaluer l'efficacité de la corrélation. Les résultats sont encore insuffisants, mais de bonnes pistes d'amélioration sont proposées.

## MOTS-CLÉS

Réfraction atmosphérique, réfractomètre, nivellement, corrélation d'images, dispersion atmosphérique

du GPS précis, pour tenter de mesurer exactement la réfraction sans avoir à faire aucune hypothèse. Toute une série de recherches menées ont été basées sur la dispersion atmosphérique, c'est-à-dire le fait que l'indice de l'air dépend de la couleur de la lumière considérée.

## Procédé réfractométrique étudié

Si une visée est effectuée entre deux points, la réfraction va dévier la visée par rapport à une ligne droite parfaite d'un angle  $\beta$ , et cet angle dépend légèrement de la couleur (phénomène que l'œil ne remarque guère qu'à l'occasion du "rayon vert", situation rare au coucher de Soleil). Le principe des recherches menées est le suivant : l'écart entre  $\beta_1$  et  $\beta_2$  est très petit, dépendant des deux longueurs d'ondes employées, mais il est exactement proportionnel à l'angle  $\beta_1$ . Donc si on mesure ce petit angle  $\beta_1 - \beta_2$ , en le multipliant par un coefficient fixe, malheureusement assez grand (de l'ordre de 40 pour du bleu et du rouge), on peut obtenir l'angle  $\beta_1$  exact, sans aucune hypothèse sur la forme de la trajectoire de la visée (cf. Figure 1). La difficulté évidente de ce dispositif est que, pour obtenir un angle  $\beta_1$  assez précis, l'écart entre  $\beta_1$  et  $\beta_2$  doit être mesuré avec environ 40 fois plus

## La réfraction pour le topographe

Dans toutes les mesures topométriques, la principale limitation des instruments les plus précis est liée à la traversée de l'atmosphère. Tout particulièrement dans le domaine du nivellement et des mesures altimétriques en général, les rayons lumineux formant la visée s'écartent de la ligne droite idéale, restant plus ou moins piégées dans un plan vertical. Cette réfraction topométrique est chiffrée traditionnellement par le coefficient de réfraction  $k = R / r$ ,  $R$  étant le rayon moyen de la Terre et  $r$  le rayon de courbure du rayon lumineux. Alors que les  $k$  de visées en altitude sont souvent évalués aux alentours de 0.12 (la visée est 8 fois moins courbée que la surface terrestre, la courbure est régulière car elle est principalement due au gradient de pression), il s'agit de valeurs de peu d'intérêt actuellement, car il est devenu rare de faire des visées optiques longues et donc depuis des sommets. Par contre, proches du sol, les visées du topographe subissent des gradients thermiques très élevés, avec des valeurs de  $k$  pouvant largement dépasser la valeur de 10, en positif comme en négatif, à proximité du sol (Dvoracek, 2012). Les mesures de nivellement optique sont basées sur des mesures d'angles zénithaux, soit à angle fixe (nivel-

lement direct), soit avec un angle mesuré (nivellement trigonométrique), et depuis longtemps il a été recherché une solution pour mesurer et se débarrasser au mieux de l'effet de la réfraction. Dans le cas du nivellement trigonométrique, l'emploi de zénithales réciproques et simultanées procure une bonne correction de cet effet, permettant par exemple d'atteindre une précision de l'ordre du  $\text{mm.km}^{-1/2}$  pour un cheminement de nivellement avec des visées n'excédant pas 300 m, la seule hypothèse ici (généralement très bien vérifiée) étant que la visée est bien modélisée par un arc de cercle (statistiques tirées de mesures de nivellement trigonométrique motorisé utilisé à l'IGN pour le NGF au début des années 80). Mais des efforts considérables ont été consentis par de nombreux chercheurs, avant l'arrivée

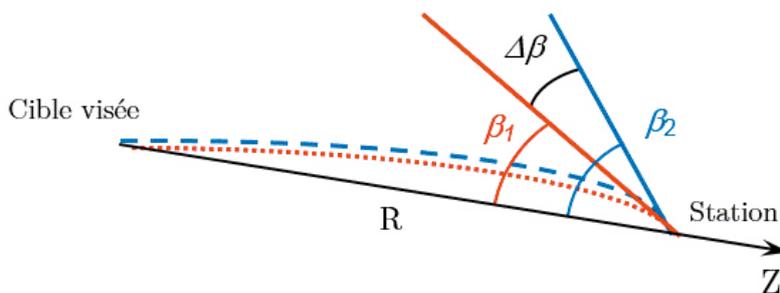


Figure 1. Pour une même visée, deux couleurs ne suivent pas exactement la même trajectoire, et à la station de mesure les angles zénithaux  $\beta_1$  et  $\beta_2$  sous lesquels une même cible est visée pour deux couleurs sont légèrement différents.



de précision que celle de l'angle final recherché, qui est typiquement celle du tachéomètre employé, soit par exemple 1cc, soit 1.6  $\mu$ rd. Il s'agit donc de mesurer cet écart à 0.04  $\mu$ rd près, ce qui explique l'échec de toutes les tentatives menées dans les années 70 à 90. Citons par exemple ici les travaux de Williams, reposant sur un dispositif très astucieux de disque tournant, dans lequel des ouvertures en spirale ont été effectuées (cf. Figure 2).

La très petite séparation physique entre les focalisations des faisceaux rouge et bleu est transformée en un décalage temporel entre les maxima vus par les canaux de détection des deux lasers.

Le projet qui a été mené ici est basé sur les mêmes effets physiques, mais en utilisant des technologies devenues disponibles depuis peu, celles de la corrélation d'images.

Dans la plupart des tachéomètres précis, une petite caméra intégrée est désormais disponible. Elle sert surtout à documenter le point mesuré, et dans certains cas il y en a deux, et l'une dispose alors d'un champ très étroit. Imaginons que dans un développement futur, deux filtres portés sur un disque en rotation soient commutés successivement, en un temps très bref, permettant d'acquérir deux images d'une même cible dans deux gammes spectrales différentes. En corrélant ces deux images, on peut espérer mesurer leur décalage avec une précision allant de 0.01 à 0.001 pixel, ce que l'on fait couramment en photogrammétrie moderne. Si un pixel correspond à un champ de 10  $\mu$ rd, on peut donc envisager d'obtenir la précision angulaire recherchée.

Les travaux menés en 10 semaines, dans le cadre d'un projet de fin d'études de la HEIG-VD ont donc visé à valider

le concept, et à identifier les problèmes potentiels. La mesure d'angles extrêmement petits de ce type, obtenus dans des domaines spectraux différents, se heurte à un bon nombre de problèmes :

- Les instabilités internes de la caméra dans le tachéomètre, et du tachéomètre lui-même. Si ce dernier est conçu pour atteindre la précision déjà extraordinaire de 1 cc, rien n'a été optimisé en vue d'une stabilité de 0.01 cc, probablement inatteignable avec un matériel de terrain même très bien industrialisé. L'hypothèse retenue est que toutes ces instabilités, y compris les inévitables effets thermiques, ont une constante de temps beaucoup plus grande que le temps d'acquisition des deux images, que l'on peut imaginer séparées de 10 ms : la mesure de l'angle différentiel ne devrait donc pas être polluée par ces effets.
- Le chromatisme des optiques, qui en aucun cas ne vise à une correction aussi poussée. Et dans un registre différent, les mêmes types de perturbations sont attendus si les filtres colorés sont légèrement prismatiques. Dans les deux cas, on peut s'attendre à des écarts stables dans le temps, que l'on pourra étalonner en procédant à des mesures sur très courtes distances, là où les effets de la réfraction sont sensiblement nuls.
- La scintillation atmosphérique, dont les effets se poursuivent à des fréquences allant très au-delà de la périodicité prévue de 10 ms. Il est espéré à ce stade que ce phénomène obéit à une statistique gaussienne, et que la multiplication des mesures différentielles sur une durée longue (quelques secondes) va en limiter les effets au niveau des seuils recherchés. Il existe de nombreuses études portant sur les applications astronomiques, mais les

cas qui nous intéressent ici sont bien plus défavorables, de sorte qu'à ce stade on ne peut pas être certain du résultat.

## Processus expérimental

Les tests ont porté sur la partie la plus difficile à anticiper, celle de la qualité des corrélations entre images successives. Pour ce faire, nous avons choisi une expérimentation sur une grande distance, de 3.5 km, afin d'obtenir un gros angle de réfraction (35  $\mu$ rd si  $k = 0.12$ ), où la réfraction différentielle entre les deux couleurs serait alors de l'ordre de 1  $\mu$ rd. Nous avons travaillé avec deux systèmes imageurs, en commençant avec une caméra dont le pixel correspond à un angle de 12  $\mu$ rd. Les deux extrémités de la visée sont sensiblement à même hauteur, environ 15 à 20 m au-dessus du lac qui sépare les deux sites (cf. Figure 3).

À titre indicatif, le début des essais a consisté à corréler deux images successives sans filtre, acquises avec cette caméra panchromatique de petite taille (<1Mpx), dans un intervalle de temps de 1 mn. Nous avons observé, sans surprise, un mouvement important entre les images (le dispositif n'a pas la stabilité suffisante), mais aussi un écart-type très encourageant de 0.0001 px, portant sur la partie détournée de l'image (suppression des zones de végétation, soit un ensemble restant de 0.34 Mpx, cf. Figure 4). Comme le pixel est ici de 12  $\mu$ rd, on voit que la précision atteignable, limitée aux outils de corrélation, est largement au-delà des attentes finales. Ceci est aussi largement lié aux coefficients de corrélation très élevés obtenus sur la quasi-totalité de l'image, dont la dynamique est excellente. Mais

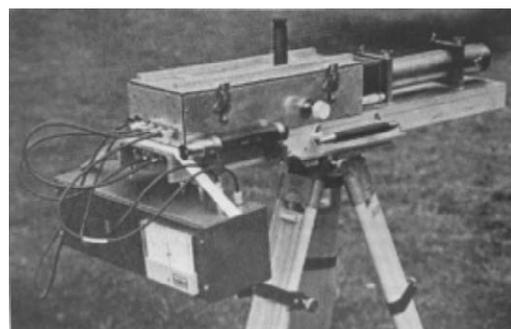
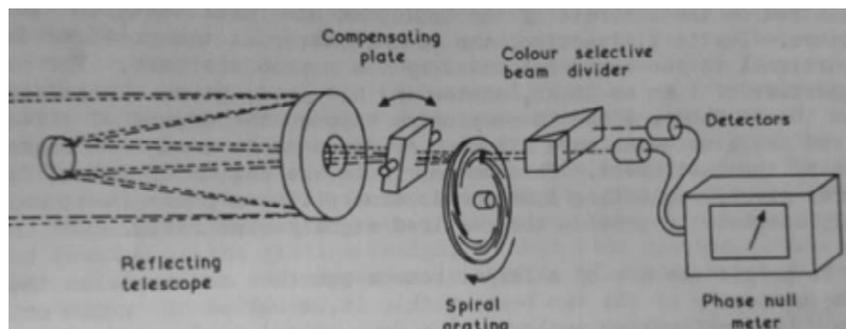


Figure 2. Le dispositif de réfractomètre développé par Williams.



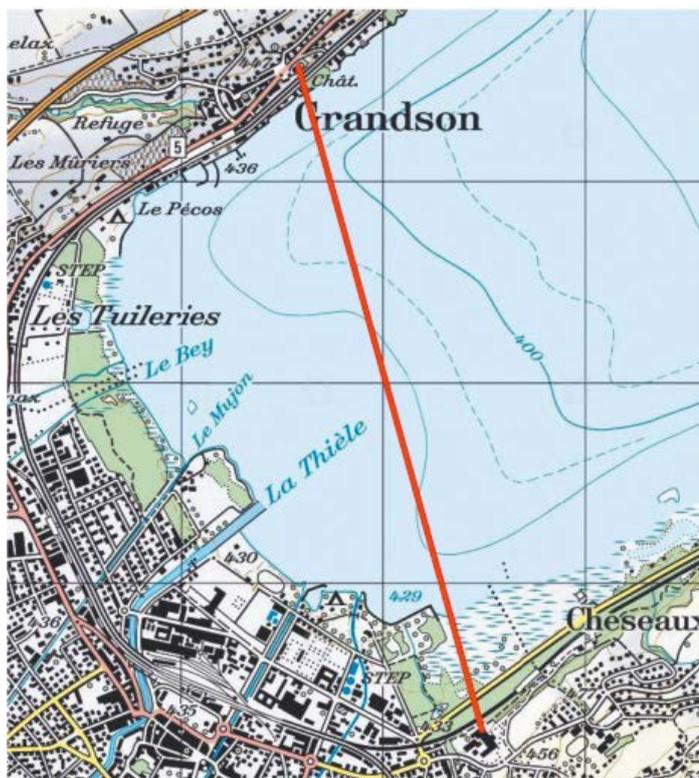


Figure 3. La visée effectuée entre Grandson et Yverdon (Suisse), ainsi qu'une vue du système Daedalus utilisé dans un premier temps, et qu'un profil en long de la visée montrant que celle-ci est dégagée du sol et du lac de 15 à 20 m, permettant d'anticiper un coefficient de réfraction assez peu perturbé et proche de 0.12.



▶ la question reste entière, quelle peut être la qualité de la corrélation avec deux filtrages chromatiques différents ? L'étape suivante a porté sur des acquisitions, toujours avec le système Daedalus, en commutant devant l'objectif successivement deux filtres, de type verre coloré, dont les pics de transmission se situent à 480 nm et 670 nm. Enfin une nouvelle étape a consisté à utiliser

un appareil photographique commercial Canon équipé d'une longue focale (600 mm) afin de travailler avec un pixel plus petit (6  $\mu$ rd) et un mode d'acquisition numérique beaucoup plus simple.

### Résultats

Comme prévu, les tests effectués ont porté seulement sur l'efficacité de la

corrélation, et ceci avec deux dispositifs imageurs différents, présentant des avantages et inconvénients nettement distincts. La caméra équipant un tachéomètre très précise, destinée à des mesures astronomiques (système Daedalus) donne des images panchromatiques simples, de bonnes performances radiométriques, et faciles à traiter. Par contre l'électronique d'ac-

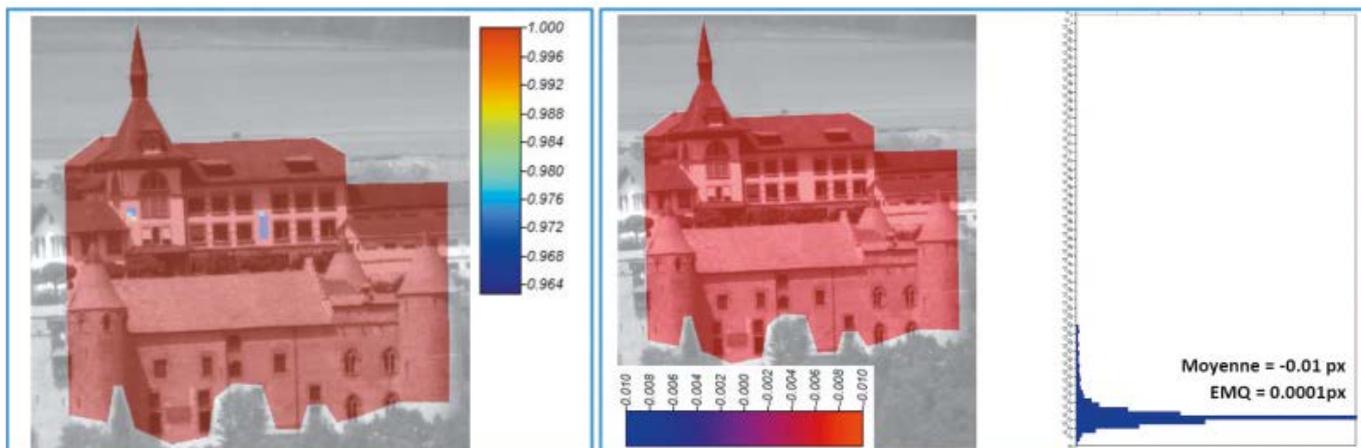


Figure 4. Image de bâtiments de Grandson vus à 3.5 km par la caméra du système Daedalus. À gauche, représentation du coefficient de corrélation entre deux images successives sans filtre, issu du logiciel MicMac. À droite, représentation des disparités verticales, avec leur histogramme.

quisition de cette version ancienne de matériel interdit les mesures à cadence rapide, et le nombre de pixels est réduit ( $< 1$  Mpx). L'autre solution a donc été un appareil photographique récent, donnant toute satisfaction pour des acquisitions et transferts rapides, par contre l'image est recomposée à partir d'un filtrage de type Bayer, avec des modes de prétraitements complètement inaccessibles. Sa radiométrie exacte est donc assez largement inconnue, et peut-être même inadaptée (cf. Figure 5).

Les corrélations ont été effectuées avec l'outil open source MicMac, pour lequel de nombreuses expériences ont montré qu'il faut atteindre un coefficient de corrélation très élevé (typiquement au moins égal à 0.97) pour obtenir un bon résultat. Et bien évidemment ceci implique plusieurs caractéristiques pour les images : une texture très variée (pas de surfaces uniformes) et un rapport signal/bruit élevé, directement lié à la dynamique du capteur. Les capteurs CCD largement utilisés actuellement peuvent fournir une excellente dynamique, mais il faut rappeler que leur emploi optimal implique que les images soient exposées au maximum, en limite de saturation.

Dans les cas d'emploi de ces deux systèmes imageurs, un artefact inattendu est apparu, les disparités verticales calculées entre images présentent des pics distincts séparés exactement d'un pixel, le pic central est heureusement plus important et permet de donner la valeur recherchée, mais ce phénomène de corrélation parasite entre pixels voisins devra être mieux compris (cf. Figure 6).



Figure 5. Le second dispositif expérimental, montrant l'appareil photographique avec son objectif de 600 mm de focale, ainsi que le support des filtres placé immédiatement devant, sans contact.

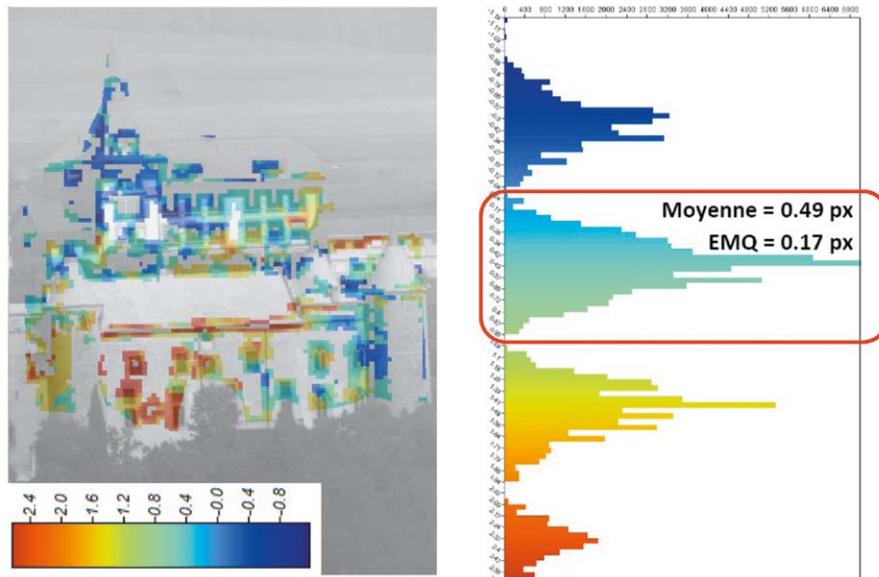


Figure 6. Représentation des disparités verticales obtenues entre deux images successives avec filtres rouge puis bleu. Les pics séparés de 1 pixel apparaissent bien, on note également que seuls les contours des fenêtres participent au calcul, la corrélation étant de qualité insuffisante ailleurs.

La corrélation entre images successives filtrées en bleu et rouge présente une difficulté, assez facile à anticiper, s'agissant de paysages urbains classiques : avec une séparation spectrale forte, le coefficient multiplicateur est minimal (ici, 40), mais la corrélation est assez médiocre.

Par exemple, une toiture en tuiles est très claire dans le rouge et très sombre dans le bleu, la corrélation y est donc mauvaise. Dans le cas de l'expérience menée, il a été décidé de travailler sur des images acquises depuis la tour de la HEIG-VD, sur le château de Grandson. La texture de ces surfaces en pierre semblait en effet offrir une texture bien adaptée. Néanmoins, les seules zones des images où le coefficient de corrélation était suffisamment élevé résultaient des contours des

murs et des fenêtres, et finalement portaient sur un ensemble très réduit de pixels (cf. Figure 7).

Au vu de ces résultats préliminaires, il est proposé d'explorer deux directions pour améliorer ces premiers résultats :

- Travailler avec une cible artificielle noire et blanche, couvrant un nombre élevé de pixels de la caméra, avec un motif aperiodique de type QR-Code, disposant de zones avec des motifs de dimensions caractéristiques variées, afin d'être exploitables dans une large zone de distances possibles. La corrélation entre des images parfaitement en noir et blanc, même filtrées, et ceci même dans des bandes spectrales très différentes, devrait devenir bien meilleure.
- Explorer d'autres couples de filtres colorés, afin de disposer d'une meilleure corrélation, même si c'est au prix d'un coefficient multiplicateur plus important. La précision de corrélation dans les cas explorés n'a jamais été meilleure que 0.1 px, alors que pour les images non filtrées une valeur 1 000 fois meilleure a été atteinte. Il faudra pratiquer une optimisation, en testant si avec un couple de filtres de longueurs d'ondes plus proches l'amélioration de la corrélation ne dépasse pas largement la perte due à l'accroissement du coefficient multipli-



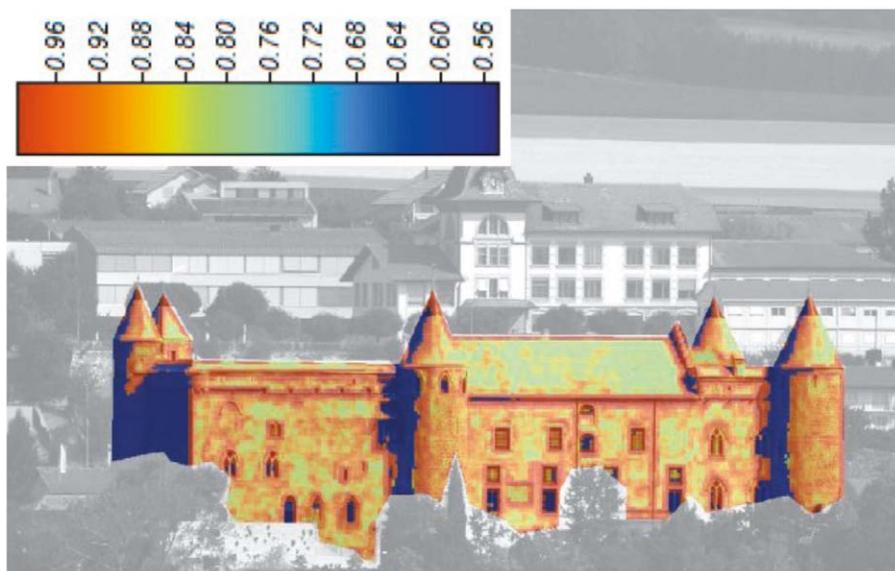


Figure 7. Représentation du coefficient de corrélation sur la façade du château de Grandson entre deux images successives avec filtres rouge et bleu.



cateur. D'éventuels bons résultats ainsi obtenus éviteraient alors de mettre en place une cible spécialisée.

Les résultats obtenus n'ont pas atteint l'objectif visé, mais ne sont pas négligeables pour autant et permettent de rester optimiste. La précision sur la mesure de l'angle entre les deux images filtrées a pu descendre à une valeur de  $0.7 \mu\text{rd}$  dans cette phase initiale, ce qui est 20 fois trop par rapport à la précision recherchée. Et si l'on anticipe un angle différentiel à mesurer de l'ordre de  $1 \mu\text{rd}$ , cette précision est clairement insuffisante. Mais il est certain que l'on n'a pas atteint ici les limites du procédé, qui mérite donc d'être approfondi. Il repose en effet sur des technologies d'acquisition déjà mises en œuvre de manière routinière dans beaucoup de tachéomètres, et des outils de calcul devenus classiques : si ce procédé permet d'atteindre la précision recherchée sur la mesure des disparités, par exemple en suivant les pistes évoquées, il ne présentera que peu de difficultés technologiques pour être installé dans un tachéomètre. Il convient donc d'encourager vivement la poursuite de cette recherche. ●

## Remerciements

Les auteurs remercient le professeur Hilmar Ingensand pour sa participation au suivi de ce travail de recherche.

## Bibliographie

F. Dvořáček, *Calibration of Electronic Distance Meters*, Thèse de doctorat, Czech Technical University In Prague, Faculty Of Civil Engineering, Department Of Special Geodesy, 2012.

D. C. Williams, *A Dispensometer for the Measurement of Angular Refraction*, Symposium on Electromagnetic Distance Measurement and the Influence of Atmospheric Refraction, 1974

## Contacts

**Michel KASSER**

michel.kasser@heig-vd.ch

**Jean-Luc MAGNENAT**

jean-luc.magnenat@heig-vd.ch

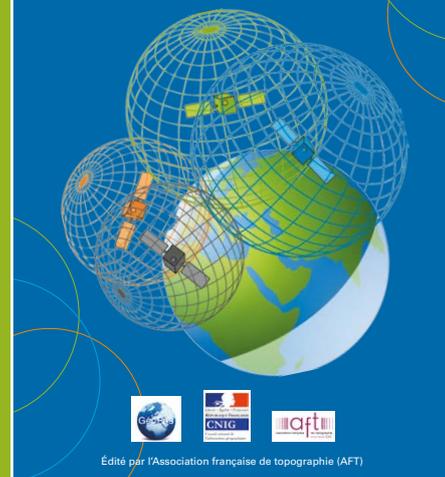
Département Environnement Construit et Géoinformation, HEIG-VD

## ABSTRACT

*During a bachelor's degree work, a series of preliminary tests was conducted to provide the means to directly measure the refraction angle of a zenithal angle, exploiting the dispersive nature of the atmosphere. A refractometer of a new type was thus imagined, based on the correlation between the images obtained sequentially with two filters (red and blue), and tests were conducted to evaluate the efficiency of the correlation. The results are still insufficient, but good possibilities of improvement are proposed.*

## Lexique GNSS pour le positionnement

Commission GEOPOS  
Groupe de travail GNSS



**COMMANDEZ LE "LEXIQUE GNSS  
POUR LE POSITIONNEMENT"  
AU PRIX DE 10,00 €  
21 x 29,7 cm, 32 pages  
frais de port inclus (France)**

M/Mme Nom : \_\_\_\_\_

Prénom : \_\_\_\_\_

Société ou organisme : \_\_\_\_\_

Adresse : \_\_\_\_\_

Code postal :

Ville : \_\_\_\_\_

Tél. :

Fax :

Courriel : \_\_\_\_\_

Date : \_\_\_\_\_

Signature \_\_\_\_\_

**Bulletin de commande à retourner  
accompagné d'un chèque  
à l'Association française de topographie**  
73, avenue de Paris - 94165 SAINT-MANDÉ  
Cedex - Tél. : +33 (0) 1 43 98 84 80

**Achat également sur Internet :  
www.aftopo.org**