

# Utilisation de caméras all-sky en stéréovision pour la géolocalisation des nuages

Pierre Crispel (Météo-France/DSM/AERO)

Septembre 2016

*Cet article a été rédigé suite à un stage de fin d'études sous la direction de Gregory Roberts (Météo-France/CNRM/GMEI/MNPCHA), et Grégoire Cayez (Météo-France/ENM)*

## Introduction

La connaissance des propriétés des nuages est d'une grande importance pour comprendre les phénomènes météorologiques et climatiques majeurs. A l'échelle climatique, il est globalement admis que les nuages et notamment l'interaction entre aérosols et nuages est une cause d'incertitude dans les modèles climatiques (IPCC, 2013), que ce soit pour l'équilibre énergétique ou le cycle de l'eau. Sur le plan de la météorologie, les nuages et leur évolution ont une influence sur l'ensemble des activités des sociétés (précipitations, orages, ensoleillement, indice UV). Les propriétés des nuages ont d'abord été étudiées à l'aide de l'observation humaine, avec à partir du XIX<sup>e</sup> siècle une méthodologie scientifique de classification. Actuellement, les instruments utilisés pour la télédétection des nuages depuis le sol sont les télémètres à nuages, les lidars, les radars millimétriques (radars à nuages). Les télémètres et lidars fonctionnent sur le principe de rétrodiffusion d'un signal laser. Ils permettent d'estimer la hauteur des bases de plusieurs couches nuageuses, et de mesurer l'épaisseur d'une couche nuageuse traversée. Les radars millimétriques disposent des mêmes capacités mais sont capables en plus d'obtenir des informations sur la nature des éléments condensés dans le nuage (cristaux, gouttelettes), ainsi que sur les vitesses verticales de ces éléments. Tous ces instruments sont généralement orientés vers le zénith, et disposent d'un champ de vision restreint. Ils ne sont donc pas en mesure de fournir des renseignements précis sur l'organisation horizontale d'un champ de nuages en temps réel, et sont difficilement utilisables pour suivre individuellement un nuage dans son déplacement.

L'utilisation de caméras est utile pour appréhender un champ de nuages de manière globale et tridimensionnelle avec une bonne résolution spatiale et temporelle. Plus spécifiquement, l'utilisation de caméras all-sky capables de projeter l'ensemble de la voûte céleste permet de nombreuses applications parmi lesquelles l'observation du cycle de vie encore mal connu des nuages. Enfin, de part leur développement commercial, les caméras sont accessibles à un très faible coût comparativement aux instruments précédemment décrits (d'un facteur de 10 à 100).

La stéréophotogrammétrie, qui est la technique de reconstruction tridimensionnelle d'une scène observée à partir d'images stéréo, est utilisée en météorologie depuis les débuts de la photographie avec des images analogiques et plus récemment avec les caméras numériques. Au cours des deux dernières décennies, plusieurs progrès ont rendu accessible l'utilisation de ces techniques et étendu le champ des possibilités : qualité des objectifs, résolution des images, efficacité des réseaux, puissance de calcul, baisse des coûts. Il convient de mentionner aussi les progrès réalisés dans l'efficacité, la robustesse, et l'accessibilité des algorithmes de vision par ordinateur, en particulier dans le domaine de la stéréovision (bibliothèque logicielle OpenCV). De nos jours, il devient ainsi possible de réaliser automatiquement une reconstruction 3D d'un champ de nuages. Suivant les applications, les caméras ont des angles de vue plus ou moins grands (objectif classique à objectif fisheye), sont orientées vers le zénith ou vers l'horizon, sont espacées de quelques centaines de mètres à plus d'un km. Parmi les travaux les plus récents, citons l'utilisation de caméras classiques pour étudier l'organisation tridimensionnelle de la convection orographique (Hu et al., 2009). Citons aussi Beekmans et al. (2016) qui ont effectué une reconstruction 3D dense d'un cumulus en développement à partir d'une paire de caméras haute définition à objectif fisheye espacées de 300 m.

## Objectifs de l'étude

A terme, les objectifs de cette étude consistent à estimer les paramètres macroscopiques du champ de nuage observé (altitude et vitesse moyenne des différentes couches de nuages, nébulosité, nombre de nuages), et les paramètres individuels de chaque nuage (estimation de la position du nuage, altitude, largeur de la base, extension verticale). Ce travail devrait aussi être utilisé pour développer un outil de géolocalisation et de suivi des nuages basé sur des images stéréo all-sky, celui-ci étant destiné à s'inscrire dans le projet SkyScanner (Lamraoui et al., 2016). Ce projet est le fruit d'une collaboration entre différents organismes : CNRS/LAAS, CNRM, ISAE, ONERA, ENAC : il vise à échantillonner des nuages de type cumulus avec une flotte de drones instrumentés capables de se coordonner et d'adapter leurs trajectoires suivant la mission qui leur est assignée. Les résultats de ces mesures sont destinés à mieux faire comprendre les processus encore mal connus de formation et d'évolution des nuages cumuliformes de basses couches, ainsi que les mécanismes responsables des précipitations.

## Matériel et mise en œuvre expérimentale

Nous utilisons pour notre expérimentation deux caméras fisheye réseau VIVOTEK FE8391-V conçues pour des applications de vidéo-surveillance en extérieur. Ces caméras sont équipées d'une lentille fisheye ayant un champ de vision de 180° (voir figure 1a et 1b). Le capteur photosensible fournit une image de taille 2944 x 2944 pixels. Ces caméras transfèrent leurs images de manière synchronisée par liaison wi-fi à un ordinateur portable qui déclenche la prise de vue, capte les images et effectue le traitement. La transmission est rendue possible par l'utilisation d'antennes wi-fi unidirectionnelles (voir figure 1c). Les expériences se sont déroulées pendant les mois de Juin et Juillet 2016 sur la Météopole toulousaine. Les caméras ont été installées à proximité du parc à instrument de l'Ecole Nationale de la Météo, espacées de 150 m l'une de l'autre, et surélevées sur des trépieds à environ 2 m de hauteur. L'axe optique des caméras est orienté vers le zénith et les caméras sont alignées de manière à ce que l'axe médian et horizontal de l'une soit orienté vers l'autre (voir figure 1d). Cette orientation nommée *frontale alignée* est obtenue en utilisant un niveau à bulle circulaire pour l'horizontalité, ainsi que des viseurs optiques fixés sur le support des caméras pour ajuster la rotation dans le plan horizontal. La position des caméras est déterminée par l'utilisation d'un GPS, ce qui permet de calculer la distance les séparant et leur orientation dans le repère terrestre.

### Caméra et image all-sky



### Installation

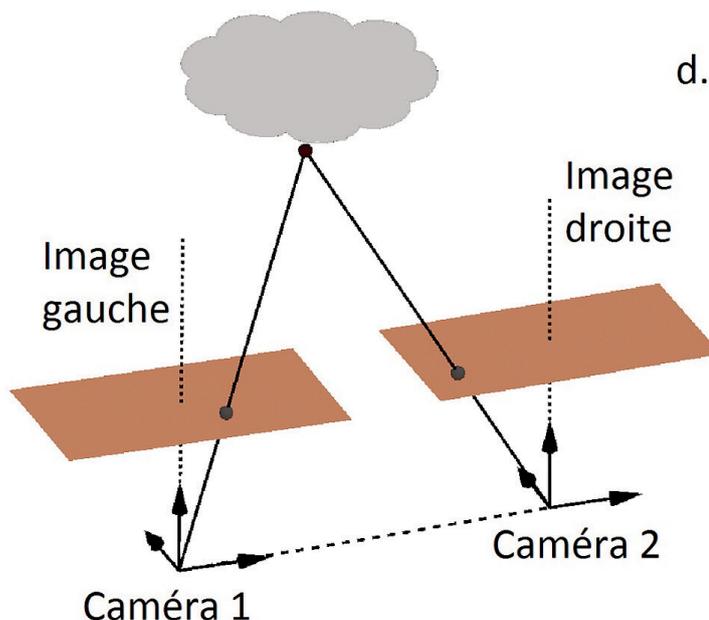


Figure 1 : Caméra all-sky avec système d'orientation et d'alignement (a), image all-sky (b), installation des caméras sur un mât avec antenne wi-fi (c), et orientation des caméras (d).

## Reconstruction 3D par stéréophotogrammétrie

La reconstruction par stéréophotogrammétrie est basée sur le principe de triangulation : les coordonnées tridimensionnelles d'un point physique dans le repère terrestre sont déterminées en calculant le point d'intersection des deux rayons optiques issus des pixels stéréo représentant ce point (voir figure 1d). En plus d'être capable de reconnaître deux pixels stéréo, la reconstruction exige de connaître la distance entre les caméras, l'orientation des caméras dans le repère terrestre, ainsi que la fonction de projection d'un rayon optique sur l'image. La sensibilité de la méthode de reconstruction 3D nécessite une grande précision pour chacune de ces étapes.

*Étalonnage des caméras* : L'étalonnage des caméras permet de faire correspondre un pixel à un rayon optique incident (voir figure 2). Dans le cas d'une caméra classique idéale, cette correspondance s'effectue par une projection perspective simple faisant intervenir un seul paramètre : la longueur focale. Dans le cas d'une caméra non-idéale, qui de plus, est dotée d'un objectif fisheye, plusieurs effets/défauts doivent être modélisés sous la forme d'une fonction de projection plus complexe faisant intervenir un plus grand nombre de paramètres appelés paramètres intrinsèques de la caméra. Parmi ces effets, les plus importants sont les distorsions radiales et tangentielles dues à l'objectif, la non-perpendicularité entre l'axe optique et le capteur, ou encore le non-alignement entre l'axe optique et le centre du capteur. L'étalonnage d'une caméra revient à déterminer les paramètres intrinsèques de la caméra par l'utilisation d'une mire (voir figure 3).

Figure 2 : Illustration de la fonction de projection  $G^{model}$  permettant d'associer un pixel de l'image à un rayon optique incident.

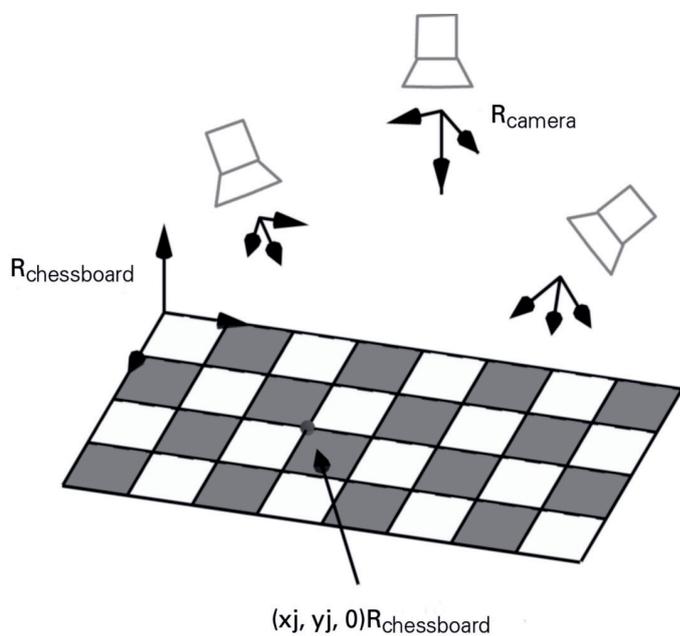
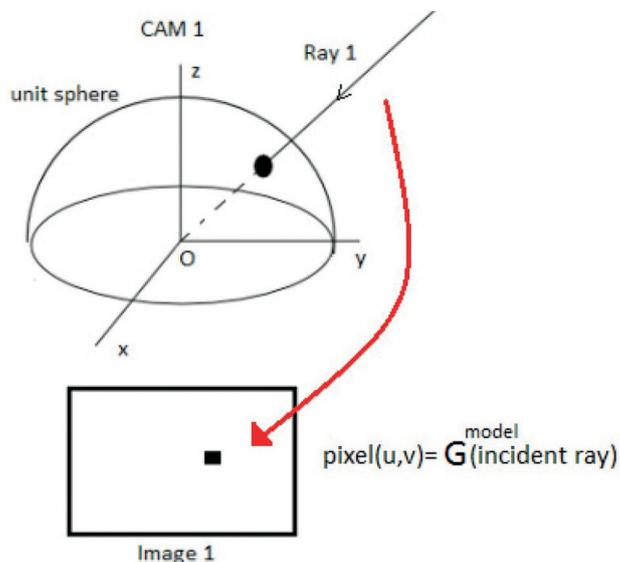


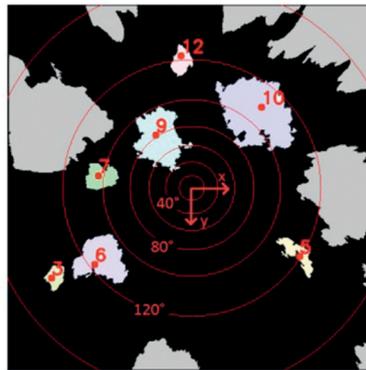
Figure 3 : Technique d'étalonnage : prises de vue multiples d'un échiquier. La technique d'étalonnage utilisée dans notre étude est assez simple à mettre en œuvre. Elle est basée sur l'utilisation d'un damier pris sous différents angles de vue. L'identification des points d'intersection entre carreaux noirs et blancs à travers un nombre important de prises de vues permet de fournir l'information nécessaire pour ajuster les paramètres intrinsèques de la caméra avec une excellente précision (Scaramuzza et al. 2006).

## Position et vitesse de déplacement des nuages

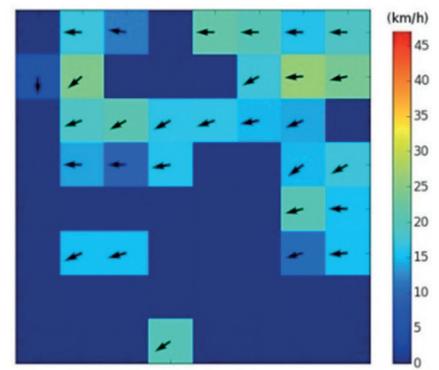
Dans le cas où les nuages sont suffisamment isolés les uns des autres, les outils de segmentation d'image peuvent être combinés aux informations spatiales tridimensionnelles pour effectuer un traitement de haut niveau. La segmentation d'images est l'un des problèmes majeurs de la vision par ordinateur. Elle consiste à découper l'image en un ensemble de régions connexes ; celles-ci ont l'avantage de pouvoir être traitées comme des objets ayant des caractéristiques de forme, de position, de taille, etc... Dans notre cas, l'intérêt est d'accéder aux caractéristiques spatiales des nuages présents dans le champ de vision de la caméra (ex : hauteur de la base, centre de la surface constituant la base du nuage). Il existe un grand nombre de techniques pour segmenter une image. Dans notre cas, les contours des nuages sont extraits en filtrant les teintes bleues de l'image, le soleil étant quant à lui filtré par la carte d'altitude. La carte de vitesse de déplacement des nuages est quant à elle produite en utilisant la donnée d'altitude et le déplacement en pixels des nuages d'une image à une autre. On utilise pour cela une méthode de suivi de sous-parties rectangulaires de l'image par un algorithme dit de template matching. Un exemple des résultats obtenus est présenté sur la figure 7.



Estimation de la nébulosité : 23%



Vent à la base des nuages dans le repère (x,y)



vitesse moyenne 17 km/h  $\pm$  5 km/h  
direction moyenne +170°  $\pm$  13°

### Tableau des résultats

Identifiant nuage	Hauteur estimée de la base	Position (x,y) du centre de la surface de la base dans le repère de la caméra 1
n° 3	1440 m	(- 2.69 km , +1.75 km)
n° 5	1670 m	(+2.41 km, +1.55 km)
n° 6	1420 m	(- 1.83 km , +1.46 km)
n° 7	1450 m	(- 1.80 km , -0.23 km)
n° 9	1430 m	(- 0.68 km , -1.00 km)
n° 10	1450 m	(+1.35 km, -1.57 km)
n° 12	1640 m	(- 0.23 km , -2.89 km)

Figure 7 : De gauche à droite: image rectifiée issue de la caméra de gauche, cartographie des nuages identifiés comme des objets, champ de vitesse. Le tableau compile les caractéristiques des nuages présents dans l'image (position horizontale estimée du centre de la surface de la base des nuages, hauteur de la base).

## Conclusion et perspectives

Notre étude confirme la faisabilité et l'intérêt du développement d'un système de stéréovision basé sur des caméras all-sky pour la détection de la base des nuages. L'étude fait apparaître une incertitude spatiale de 10 % pour un rapport de 10 entre la hauteur des nuages et la distance entre les caméras. Cette incertitude provient de l'étape de correction de l'orientation des caméras. Dans le cadre du projet SkyScanner, la précision obtenue est néanmoins suffisante pour pouvoir diriger une flotte de drones vers un nuage. Du point de vue opérationnel, ce travail devrait se poursuivre avec le couplage du système de stéréovision avec le pilotage automatique des drones vers le nuage ciblé.

Par ailleurs, plusieurs pistes peuvent être explorées pour améliorer la précision du système. La première piste consiste à éloigner les caméras. En contrepartie, la mise en correspondance des pixels peut être difficile pour les nuages bas. La seconde piste vise à améliorer la précision de l'étape d'étalonnage du système stéréo. Dans la littérature, cet étalonnage s'appuie sur des éléments identifiés du paysage : étoiles, arbres, bâtiments, ligne d'horizon. Cette prise en compte d'éléments particuliers est adaptée au contexte d'une installation fixe mais inadéquate pour une installation mobile (ex : campagne de mesure). Dans ce cadre là, on peut envisager l'utilisation d'images successives d'un ballon captif ou d'un drone circulant dans le champ de vision des caméras. Une autre possibilité est d'utiliser une série tem-

porelle de paires d'images au lieu d'une seule paire actuellement pour calculer les paramètres de correction de l'orientation. Enfin, une troisième piste pour améliorer le système consiste à organiser un réseau de plusieurs caméras pour améliorer la précision des mesures obtenues par triangulation (ex : organisation en carré pour 4 caméras) ; les caméras peuvent aussi être organisées de manière à s'adapter à différentes couches nuageuses (ex : organisation en ligne avec des caméras proches pour les nuages bas et éloignées pour les nuages élevés).

### Pour en savoir plus

Beekmans, C., J. Schneider, T. Läbe, C. Stachniss, and C. Simmer. (2016). Cloud photogrammetry with dense stereo for fisheye cameras, *Atmospheric Chemistry and Physics*.

Horaud, Radu, and Monga, O (1995). *Vision par ordinateur: outils fondamentaux*. Editions Hermès, 1995.

Hu, J., A. Razdan, and J. A. Zehnder. (2009). Geometric calibration of digital cameras for 3d cumulus cloud measurements, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26 (2), 200-214.

IPCC, Climate Change. (2013). *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1535 pp., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

OpenCV : Open Source Computer Vision library (Python, C++).

Scaramuzza, D., A. Martinelli, and R. Siegwart. (2006). A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras, in 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5695-5701, IEEE.

Szeliski, R. (2010). *Computer vision: algorithms and applications*. Springer Science & Business Media, 2010.

---