

LA PHOTOGRAPHIE TERRESTRE HAUTE RESOLUTION POUR QUANTIFIER LES DYNAMIQUES NIVALES DE VERSANTS : L'EXEMPLE D'UN BASSIN GLACIAIRE ARCTIQUE (LOVEN EST – SPITSBERG 79°N)

Éric BERNARD⁽¹⁾, Jean-Michel FRIEDT⁽²⁾, Gilles MARTIN⁽²⁾

Madeleine GRISELIN⁽¹⁾, Christelle MARLIN⁽³⁾

⁽¹⁾ Université de Franche-Comté, CNRS UMR ThéMA e-mail: eric.bernard@gmail.com et madeleine.griselin@univ-fcomte.fr

⁽²⁾ Université de Franche-Comté, CNRS UMR FEMTO-ST e-mail: jmfriedt@femto-st.fr

⁽³⁾ Université de Paris-Sud, Orsay, CNRS UMR IDES e-mail: christelle.marlin@u-psud.fr

Pour comprendre le fonctionnement d'un système glaciaire, l'entrée nivologique est un élément capital. Abordé sur la zone glaciaire, il est assez aisé de quantifier l'information issue de données en télédétection et mesures in situ afin d'obtenir la fraction de couverture neigeuse ou de glace vive, nombre et surface couverte par les avalanches, reptation de la neige et autres effets dynamiques du manteau neigeux. En revanche, quantifier l'information issue des versants s'avère beaucoup plus délicat : les surfaces réelles rapportées au plan amputent une grande partie de l'information, d'autant plus que la pente est forte. Cette dernière caractéristique est capitale, puisque les versants ont des pentes moyennes supérieures à 35° et ils représentent un tiers de la superficie du bassin étudié. Dans ces conditions, la photographie au sol peut permettre d'extrapoler de l'information quantitative à partir de clichés qualitatifs.

Dans le cadre du programme Hydro-Sensor-FLOWS (2006-2010), un réseau de capteurs équipe le glacier Loven Est (5 km²), sur la côte occidentale du Spitsberg (79°N). Des stations photographiques automatiques sont spécialement installées à des points stratégiques du bassin glaciaire pour en couvrir l'intégralité. La rectification pour projection orthogonale des photographies tangentielles est possible : si elle s'avère précieuse pour les zones relativement plates, elle pénalise totalement l'approche des versants. Le présent article démontre qu'il est possible de tirer de l'information quantitative des photographies non orthorectifiées. En disposant des données nécessaires (Modèle Numérique de Terrain, coordonnées et images satellites), il est possible de déterminer des surfaces à partir de prises de vues in situ. Ce travail démontre la complémentarité des images zénithales et des images terrestres tangentielles pour comprendre les processus régissant la dynamique des versants.

MOTS CLEFS : Photographie haute resolution – Arctique – Glacier – Versants – Imagerie au sol

High resolution ground-based digital photography for quantitative slope dynamics analysis: application to an arctic glacier basin

(AustreLovén glacier – Spitsbergen 79°N)

Snow input is a significant element in order to understand a glacier system behaviour. On the glacier area itself, quantifying information coming from remote and in situ sensing is easily performed thanks to the smooth and flat surface. Such quantitative processing is however more complex on the slopes, where effective areas converted to 2D projections hide a great part of the information: the steeper the slope, the larger the correction between projected area and effective area. In the present study, the mean slope angle is 35°, while slopes account for a third of the whole area of the basin.

*In the frame of the Hydro-Sensor-FLOWS program (2006-2010), a network of sensors has been installed around the AustreLovén glacier (5 km²), on the West coast of Svalbard (79°N). Some automated digital cameras are located at strategic places of the glacier basin to cover the whole glacier. While ground based tangential picture geometrical correction is efficient on the flattest parts of the glacier, it becomes ineffective on the steep slopes. The present article demonstrates how quantitative information can be recovered even without geometric correction of the pictures. Using the required datasets (digital elevation models, camera coordinates and satellite imagery), **in situ** pictures provide the snow coverage on the slopes. This work demonstrates the complementary use of zenithal and tangential views in order to better understand slope dynamics.*

KEY WORDS : high resolution photography – Arctic – Glacier – Slopes – Ground based images

I INTRODUCTION

L'image satellite a considérablement changé la donne en ce qui concerne l'analyse de processus glaciologiques. Cependant, le travail sur image projetée, s'il permet une quantification avérée par comptage de pixels de surface en neige ou en glace, pénalise totalement l'étude des versants. Pour cette dernière, la photographie prise du sol est une alternative intéressante. La photographie tangentielle à partir de stations automatiques au sol permet une approche de qualité grâce à la grande fréquence des prises de vues. Au-delà du suivi des avalanches de façon qualitative, par comptage des coulées, et de l'évolution des versants dans le temps, la photographie haute résolution tangentielle permet des quantifications très précises de surfaces par des processus qui sont l'objet du présent article.

II CADRE DE RECHERCHE ET PROBLEMATIQUE

Le Loven Est (Austre Lovénbreen), petit glacier de type alpin, est considéré comme représentatif des glaciers arctiques (Fig. 1). En pleine phase de retrait, ancien affluent du Kongsvegen (glacier à front marin), il est devenu au fil du temps un glacier de vallée simple, alimenté à la fois par les précipitations neigeuses mais aussi par la neige issue de ses versants. Comme cela a déjà été démontré [2] [3], les versants arctiques, très instables, sont très propices aux coulées, et en particulier aux avalanches. Surfaces topographiques déclives structurant les principaux écoulements, les versants du bassin de l'Austre Lovénbreen possèdent donc, avec une inclinaison moyenne de 35°, une topographie idéale favorisant le déclenchement d'avalanches [4].

Toutefois, il existe une forte hétérogénéité entre les zones dont les coulées atteignent le glacier (et peuvent l'alimenter), et celles dont les coulées n'atteignent pas l'Austre Lovénbreen. Théoriquement, le géofaciès général des versants doit favoriser une importante fréquence des avalanches et l'apport d'un volume de neige significatif (Fig. 2). De plus, les versants représentent 35 % de la surface totale du bassin soit environ 3,6 km² : l'approvisionnement théorique en neige pourrait donc provenir pour un tiers de ces zones [5][6]. Il semble donc pertinent d'étudier les dynamiques des versants afin de quantifier et d'évaluer l'importance de la neige qui en est issue. En effet, tel qu'on peut l'observer en fin de saison, les avalanches semblent contribuer en certains endroits à un apport significatif de neige au glacier.

Pour suivre et observer les dynamiques des versants, et en particulier l'évolution de la couverture neigeuse, nous pouvons nous fonder sur 11 images satellite par an, dans le cadre du programme Hydro-Sensor-FLOWS. Or, si ces clichés permettent de chiffrer le nombre de coulées et de les localiser très précisément, ils ne permettent pas, en revanche, d'obtenir une information quantitative dans les versants à cause, principalement, de la projection et de la résolution (Fig. 3). Nous sommes donc confrontés à un double handicap : d'une part, la résolution temporelle des images satellite est insuffisante pour observer des dynamiques dont l'occurrence est très rapide et ponctuelle ; d'autre part, ces images sont projetées et la simulation en 3D n'est pas satisfaisante à causes d'importantes déformations.

La 2D pose le problème de la surface considérée : elle ne correspond pas à la réalité et amenuise les surfaces et donc les quantités de neige. Il faut alors avoir recours à un autre moyen pour surveiller et mesurer l'apport en neige des versants. La photographie oblique semble dans ce cas être une solution envisageable [7] à condition d'en extraire des informations quantitatives (Fig. 3).

III IMAGES BRUTES OU IMAGES CORRIGÉES GEOMETRIQUEMENT

Les photographies tangentielles peuvent être corrigées puis mosaïquées de façon à couvrir l'ensemble du glacier et venir en relais des images satellite pour permettre la quantification, par exemple, de l'évolution des surfaces en neige ou en glace sur un glacier [8]. Par l'orthorectification, on perd l'information des versants.

Comme le notent Griselin *et al.* [9] « la prise de vue oblique des images compromet tout bilan surfacique : les pixels ne couvrent pas la même étendue entre le premier et le dernier plan de la scène ». La figure 4 montre, pour l'une des stations du Loven Est, la relation image tangentielle et sa projection zénithale sur l'image satellite. La photographie rectangulaire donne une même largeur de 2 000 pixels pour :

- 14 m au pied de la butte où se trouve la station ;
- 189 m à 300 m de la station ;

- 378 m à la limite du premier éperon distant de 537 m de la station ;
- 1 554 m sur le glacier au 3^e plan, au pied des crêtes ;
- 1 783 m sur les crêtes.

Les effets de la projection conique sont encore plus criants si on compare les surfaces (exprimées en pourcentage du total) entre la photographie tangentielle et son équivalent projetée (Fig. 4) : les deux premiers plans (rocher, glacier 2^e plan) représentent près des deux tiers de la photographie pour seulement 13 % de la projection.

De l'information importante peut être perdue par l'orthorectification, d'où l'intérêt de coupler les deux visions obliques et zénithales [10].

IV OUTILS ET METHODES

IV.1 Les outils

Pour palier le problème technique posé par des images projetées en 2D, la solution proposée s'envisage à partir du réseau de stations photographiques automatiques. Ce dispositif est installé en bordure du bassin versant de l'Austre Lovénbreen pour en couvrir l'ensemble dans le cadre plus global de l'étude des processus hydrologiques du programme Hydro-sensor-FLOWS. A l'origine, les stations photographiques ont été installées pour suivre avec une grande précision spatio-temporelle les dynamiques du glacier. Il paraît donc intéressant de tirer profit de ce potentiel pour surveiller également les versants. Ce choix a par ailleurs été fait par P. Janssen [11] pour observer un versant du glacier norvégien Storglaciären.

Les stations photographiques automatiques, développées par le laboratoire FEMTO-ST (Fig. 5), ont été élaborées à partir de boîtiers du commerce Leica D-lux 4 de 10 Mpixels -- capteur CCD de 1.63'' x 1'' découpé en 4224x2376 pixels, focale nominale en grand angle de 28 mm -- et programmées pour obtenir trois clichés par jour (8h, 12h et 16h). Ce choix permet d'une part de diminuer l'incertitude sur une journée en garantissant *a priori* au moins une photographie par jour en cas de dysfonctionnement ou de mauvais temps. D'autre part, cela permet un confort d'analyse et d'observation en obtenant différents éclairages, toujours particuliers en milieu arctique : l'angle zénithal solaire important induit de fortes variations d'illumination et des ombres portées très étendues.

On dispose donc à partir de ce réseau d'une bonne résolution temporelle mais également d'images tangentielles qui déforment beaucoup moins la géométrie des versants qu'une image projetée. La haute résolution constitue également un atout très important dans une analyse envisagée à échelle fine.

Deux années ont été nécessaires à la mise au point de ce projet, les conditions arctiques particulièrement difficiles ayant compliqué la mise en place d'un fonctionnement acceptable des stations photographiques. En particulier, nous avons conclu sur l'isolation par deux caissons étanches, l'un sous atmosphère neutre et l'autre sous air mais étanche à l'eau pour protection contre les intempéries des circuits électroniques, qui restent néanmoins facilement accessibles lors des missions de maintenance et de remplacement des piles (Fig. 5). L'ensemble des circuits et appareil photographique sont alimentés par piles lithium SAFT LSH14, seules garantes d'une autonomie de plus de 8 mois quelque soient les conditions d'ensoleillement et températures, notamment pendant l'hiver arctique.

Le réseau de stations photographiques permet d'avoir, dans un premier temps, une approche qualitative des données photographiques en ayant une vue d'ensemble, phase obligatoire par laquelle il est possible de comprendre de nombreux phénomènes en les localisant dans l'espace et dans le temps. Cette phase est également une étape qui permet d'effectuer un tri nécessaire des données.

IV.2 Méthode adoptée pour déterminer la surface qu'un pixel représente sur le terrain

Les calculs ont été effectués dans le but d'associer à un pixel de l'image, la taille qu'il représente sur le terrain en fonction de la distance entre la cible et la station photo. Ces calculs sont fondés sur les caractéristiques techniques de l'appareil (Fig. 6a). La démarche se découpe en quatre phases, faisant l'hypothèse de l'absence de déformation géométrique de l'objectif de l'appareil photographique, et donc de la projection conique du terrain :

- Au préalable, on va calibrer l'extension réelle d'un pixel. Pour ce faire, on mesure en laboratoire la largeur L (m) d'un objet situé à la distance D (m) de l'appareil photographique (on observe $L = 1,27 \pm 0,02$ m à $D = 1$

m) et on en déduit l'ouverture angulaire t d'un pixel en divisant $L/2$ par la demi-largeur $x = 4224/2$ de l'image (en pixels). Ce calcul s'écrit :

$$L/(D \times x) = \tan(t)$$

donc $\arctan(L/(D \times x))$ rad/pixel ($2,8 \times 10^{-4}$ rad/pixel)

On trouve une ouverture angulaire globale de 65 degrés, en accord avec les données techniques de l'appareil (objectif de 28 mm équivalent 35 mm).

- Connaissant l'ouverture angulaire d'un pixel, on en déduit la largeur d'un pixel pour un objet situé à une distance d : en supposant que $\tan(t) \sim t$, alors $d \times t$ donne la largeur du pixel (par exemple à 1 km, la taille du pixel est de 28 cm).

- En supposant que le facteur soit le même en x et y , validé par le fait que le ratio des pixels est dans le ratio des dimensions de l'image ($4224/2376=16/9$), on en déduit la surface du pixel dans le plan de l'image $(d \times t)^2$

- La surface réelle se déduit, d'après le Modèle Numérique de Terrain (MNT), par l'angle entre la surface observée et le plan de l'image (plan normal à l'axe de visée de l'objectif).

Connaissant les coordonnées de la station photo, on en déduit avec le MNT son altitude, soit 532 m pour la station utilisée. On choisit parallèlement des points de contrôle au sol (Ground Control Point, GCP) facilement identifiables dans le versant considéré. Ces GCP sont caractérisés par leurs coordonnées en x , y et z . Il est donc possible de calculer par trigonométrie la distance réelle entre un GCP et la station photographique en tenant compte de l'altitude (Fig. 6b).

IV.3 Le test

Un test fondé sur des clichés du 3 juillet 2009 a été effectué. Ce n'est certes pas la période la plus propice aux avalanches, puisque l'activité commence plus tôt dans la saison (dès le mois de mai) pour atteindre un maximum en juin. Mais le début d'été présente la garantie d'avoir plus de points de contrôles identifiables dans les versants pour effectuer des mesures et valider la méthode.

Le test est envisagé avec deux angles de vue différents. On a donc mobilisé les données de deux stations photographiques qui visent le même versant. A partir de ces clichés (un par station), une zone clairement identifiable a été extrudée, puis sa superficie calculée. Cette surface est une partie de versant récemment dégarnie de neige. Quelques GCP sont suffisants pour l'évaluation, et la robustesse de la méthode sera donc vérifiée par la proximité (ou non) de l'estimation de surface.

Le calcul présenté a été appliqué à six points pour déterminer la surface qu'ils représentent sur le terrain et extrapoler ces valeurs pour la zone considérée. Le choix des GCP s'est fait de façon manuelle sur des points facilement identifiables en tenant compte de l'inclinaison du versant.

Le nombre de points sélectionnés est volontairement faible : l'important n'étant pas, pour cet article, d'obtenir la superficie réelle, mais de mener une approche comparative. Pour une évaluation précise des surfaces, une sélection d'un maximum de GCP serait nécessaire.

V RESULTATS

Une zone test a été définie sur le versant du Haavimbjelllet, une montagne dont le versant étudié a une valeur de pente continue. La zone est de surcroît dépourvue de neige ce qui, pour ce test, permet de déterminer un périmètre de neige facilement identifiable. La figure 7 montre la zone extrudée pour le comptage des pixels.

La zone, vue de l'épaulement, est composée de 66 596 pixels. La même zone, vue du cirque, compte 62 589 pixels. La différence du nombre de pixels s'explique par la différence d'angle de vue, qui est soumis à un bombement du versant et qui induit une déformation. Toutefois, la zone a été précisément déterminée en utilisant le MNT, l'image satellite et les photographies.

A la suite de cette étape de détermination visuelle, la distance réelle entre la zone-test et la station photographique a été calculée entre l'appareil et le barycentre de la zone sélectionnée. Lorsqu'on applique une triangulation, l'appareil de l'épaulement est situé à 1 419 m (contre 1 324 m en vue projetée) de la cible, et celui du cirque à 1 010 m (contre 917 m en projection). Cette étape a ensuite été renouvelée pour chacun des six GCP utilisés pour le calcul de surface et répartis à la périphérie de la zone (Fig. 7).

En appliquant le calcul qui permet d'estimer la taille du pixel en fonction de sa distance à l'objectif pour chacun des 6 points de contrôle, on obtient des valeurs qu'il est possible de généraliser à la surface considérée. Pour cette étape, le choix s'est porté sur une discrétisation de l'espace en appliquant la méthode des polygones de Voronoï [12][13]. On obtient donc les 6 surfaces auxquelles il est mathématiquement pertinent d'attribuer la valeur de chacun des pixels test. La somme des surfaces déterminées donne la surface de la zone considérée. Les valeurs obtenues par cette méthode ont été comparées avec la moyenne des 6 points-test généralisée à la surface. Étant donné la faible différence de surface de chaque pixel-test à cette distance (de l'ordre du kilomètre), une moyenne de leur valeur, attribuée à l'ensemble des pixels de la zone donne un résultat très proche (fig. 7). On peut donc raisonnablement utiliser la moyenne arithmétique

Pour la zone vue de l'Épaulement, la moyenne des pixels-test représente $0,502 \text{ m}^2$ sur le terrain. Pour la zone vue du Cirque, on obtient une moyenne équivalente à $0,514 \text{ m}^2$.

Par simple multiplication, on obtient pour la première vue une surface calculée de $33\,431 \text{ m}^2$ et de $32\,171 \text{ m}^2$ pour la seconde (fig. 8). La différence d'estimation est de l'ordre de 2,4 %, ce qui, compte tenu de la surface, de la distance cible/appareil, et de l'utilisation souhaitée est tout à fait acceptable.

Nous avons étendu cette analyse à une série de clichés couvrant la période 26 juin au 25 juillet (Fig. 9), sélectionnée du fait de la fonte de la couverture neigeuse sur le versant sans que des avalanches ne soient observées. Nous ne traitons pas ici du cas des avalanches en l'absence d'information stéréographique permettant de remonter au volume des coulées, mais nous contentons d'une analyse 2D des surfaces de fontes en proposant la surface du versant dont la roche est exposée. Le point initial de ce graphique est une surface de $23\,000 \text{ m}^2$ de roche exposée alors que le manteau neigeux est évacué vers le glacier sous forme d'avalanche. À partir de cette date du 26 juin, aucune avalanche n'est observée, et la fonte sur cette période de 1 mois, s'appliquant à une superficie de $42\,000 - 23\,000 = 19\,000 \text{ m}^2$, ne contribue pas à l'accumulation du glacier mais alimente le bassin lié à ce versant.

VI DISCUSSION

Cette démonstration n'a requis que quelques GCP comme points de références. Toutefois, comme mentionné plus haut, ce choix de restreindre le nombre de point de contrôle est délibéré, l'objectif principal étant de valider le fonctionnement de la méthode. Dans le but d'avoir une surface la plus proche possible de la réalité, il conviendra bien entendu de prendre un maximum de points. On les sélectionnera de préférence sur toute la périphérie de la surface considérée, là où ils sont le plus facilement identifiables. Or plus la surface à calculer a une pente faible, plus son étalement spatial est important par rapport à l'appareil. Donc il faut plus de GCP dans un plan incliné que dans un plan se rapprochant de la verticalité.

La difficulté vient de la détermination de points test. Dans l'exemple étudié, il est impossible de sélectionner des points remarquables dans la partie haute de la zone. À cette distance ($\sim 1\,000 \text{ m}$) et compte tenu de la résolution de l'image satellite référence ($\sim 2 \text{ m}$), on ne peut que s'appuyer sur des contrastes binaires (neige-rochers).

Comme on l'a déjà évoqué plus haut, d'un point de vue paysager, les portions d'espaces visibles sont très différentes en taille selon que l'on considère une vue tangentielle ou une vue zénithale. C'est un paramètre dont il faut tenir compte, surtout lorsque l'on souhaite travailler conjointement avec des photographies projetées et des photographies obliques. Un même cliché va représenter la réalité de deux façons différentes.

Cette courte démonstration prouve que vues tangentielles et zénithales se complètent. Utiliser l'une et l'autre semble être la meilleure approche possible pour avoir l'information la plus riche.

Un autre problème que l'on peut soulever concerne l'inclinaison de la station photographique elle-même. Le test présenté est fondé sur deux des stations les plus verticales du réseau. La topographie des crêtes et des zones où sont implantés les appareils ne permet pas facilement une installation verticale : la plupart des stations sont penchées pour couvrir un maximum de surface du glacier. Pour une étude spécifique des versants, il serait nécessaire au moment de l'implantation de veiller à obtenir un maximum de verticalité de la station photo. Il est également important de chercher le positionnement le plus central possible de la station par rapport à la zone étudiée. Toutefois, les stations nécessitant un support rocheux stable, les contraintes du terrain conditionnent et limitent considérablement l'implantation dans un bassin glaciaire.

Appliqués à une photographie entière, les calculs d'évaluation de surface, peuvent être faussés par des déformations. La portion d'espace offerte à la vue est tellement importante que les phénomènes très locaux, tels que les avalanches, sont beaucoup plus difficiles à appréhender. La solution proposée dans cet article se fonde sur la partition de l'image. En ne sélectionnant que certaines zones représentatives ou d'intérêt, on

peut avoir une analyse beaucoup plus fine. C'est pourquoi l'application d'une méthode par ROI (Region Of Interest) semble être une solution pour optimiser les résultats, en travaillant à échelle fine d'une part et en évitant tout problème lié à la déformation de l'image [14]. Plutôt qu'une approche globale, l'analyse porterait sur différentes zones clefs des versants, principalement en fonction de la pente et de la nature du sol.

VII CONCLUSION

Outre la validation de ce test, il est important de souligner trois points. D'une part, le recours à la photographie tangentielle s'avère indispensable dès lors qu'on étudie des surfaces déclives. Et plus elles le sont, plus cette approche a du sens compte tenu des problèmes liés à la projection. Les versants rentrent dans cette catégorie et sont un élément structurant des dynamiques nivo-glaciologiques. Ils nécessitent donc d'utiliser ce type d'outils comme l'a démontré le programme CG38 développé par le Cemagref [15, 16].

D'autre part, compte tenu des effets de perspective et des déformations de la photographie, il serait dommage de se passer de l'image projetée. La solution peut donc s'envisager en appliquant une correction géométrique aux clichés à partir desquels on souhaite travailler. Cette méthode permet de projeter les images sur lesquelles peuvent s'effectuer d'autres types de calculs. Cet aller-retour entre cliché tangentiel et cliché projeté permet, dans les deux cas, d'extraire une information qualitative et quantitative.

Enfin, le dernier point concerne ce que l'on mesure. Nous avons établi ici une méthode valide pour estimer des surfaces à partir d'images *in situ*. Le prolongement de cette application réside dans l'estimation des volumes qui nous permettrait, par exemple, de quantifier l'apport théorique des versants en neige. Donc connaissant une surface, il est possible de calculer un volume pour peu qu'on puisse mesurer *in situ* des hauteurs de neige dans la zone étudiée. S'il est envisageable d'avoir quelques points d'échantillonnage dont on interpole les valeurs pour l'ensemble du versant, le recueil de cette donnée pose en revanche problème : l'instabilité des versants est telle qu'elle rend leur accès et donc les mesures très délicats.

Le challenge est donc de croiser les mesures de terrain possibles avec les données de *téledétection* et *détection in situ*. Cette approche semble la plus pertinente dans la problématique des versants.

VIII REFERENCES ET CITATIONS

- [1] Kaser, G., Fountain, A., & Jansson, P. (2003). - A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers, *IHP-VI, Technical Documents in Hydrology*, **59**.
- [2] André, M. F. (1993). - *Les versants du Spitsberg, approche géographique des paysages polaires*, éd. PUN., 361 p.
- [3] Mercier, D. (2001). - *Le ruissellement au Spitsberg*, éd. PUBP, coll. Nature & Sociétés, 278 p.
- [4] Ancy, C. (coordonnateur) *et al.* (1998). - *Guide Neige & Avalanches*, éd. Edisud, 334 p.
- [5] Young, G. J. (1974). - A stratified sampling design for snow surveys based on terrain shape, *Proceedings of the Western Snow Conference* **42**, 14-22.
- [6] Young, G. J. (1975). - Accumulation and ablation patterns as functions of the surface geometry of a glacier, *Snow and Ice*, (J. C. Rodda, éd.), *International Association of Hydrological Sciences*, **104**, 34-138.
- [7] Elder, K., & Dozier, J. (1990). - Improving methods for measurement and estimation of snowstorage in alpine watersheds, *Hydrology in Mountainous Regions. I - Hydrological Measurements; the Water Cycle*, Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990. IAHS Publ. **193**, 147-156.
- [8] Laffly D., Bernard E., Friedt J.M., Martin G., Tolle F., Marlin C., Griselin M. (2011 in press). - High temporal resolution monitoring of snow cover using oblique view ground-based pictures, *Polar Record*.
- [9] Griselin M., Nageleisen S., & Ormaux S., (2005). - La photographie oblique terrestre pour une veille environnementale en Arctique (Webcam du Zeppelinjället, 79°N, Spitsberg). Actes du Colloque Théo Quant. <http://thema.univ-fcomte.fr/theoq/fr/publications.php?menus=publications&annee=2005>

- [10] Hinkler, J. , Pedersen, S. B., Rasch, M. & Hansen, B. U. (2002). - Automatic snow cover monitoring at high temporal and spatial resolution, using images taken by a standard digital camera, *International Journal of Remote Sensing*, **23: 21**, 4669 — 4682
- [11] Janssen, P., (1999). - Effect of uncertainties in measured variables on the calculated mass balance of Storglaciären. *Geografiska Annaler*, **81 A (4)**, 633-642.
- [12] Okabe, A. (1992). - *Spatial tessellations: concepts and applications of Voronoi diagrams*. John Wiley and Sons, New York.
- [13] Shepard, D. (1968). - A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data, *Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference*, 517-524.
- [14] Schweitzer, J., Heilig, A., Bellaire, S., & Fierz, C., (2008). - Variations in snow surface properties at the snowpack-depth, the slope and the basin scale. *Journal of Glaciology*, **54**, No. 188, 846-856.
- [15] Soruco, A., Thibert, E., Vincent, C., Harter, M., Blanc, R., & Heno, R., (2009). - Photogrammétrie et risques naturels : application à la dynamique des avalanches et aux chutes de séracs. *Projet CG38 piloté par le CEMAGREF*, disponible à http://www.obs.ujf-grenoble.fr/risknat/pages/programme_dep/projets/cemagref_etna/thibert_2009.html.
- [16] Soruco A., Thibert, E., Vincent, C., Blanc, R., & Héno, R., (2011), - Measurement of avalanche front velocity from high-speed terrestrial digital photogrammetry. *Geophysical Research Abstracts*, **13**, EGU2011-8177, 2011, EGU General Assembly 2011 Vienna (Austria)

Figure 1 – Localisation de la zone d'étude et des stations photographiques automatiques : situé au Svalbard à 79°N, le glacier Austre Lovénbreen est sélectionné pour sa configuration hydrologique unique dans laquelle une barre calcaire canalise tous les écoulements en deux points permettant une comparaison hydrologique et glaciologique du comportement de ce bassin glaciaire. 6 stations photographiques automatisées sont distribuées autour du bassin pour une couverture complète du glacier sur les photographies acquises 3 fois par jour.

Figure 2 – Les versants sont des zones clés dans l'apport en neige sur le glacier. Surveiller les événements avalancheux est donc capital pour comprendre le manteau neigeux. A gauche, la pente calculée sur le modèle numérique de terrain du bassin glaciaire indique que la majorité des versants présente une pente de plus de 35°. Ces versants sont difficiles à instrumenter car instables, et propices aux avalanches : l'analyse de photographies pour en déduire l'évolution de la couverture neigeuse permet de palier aux difficultés d'instrumentation (en bas à droite).

Figure 3 – La projection pose problème. Évaluer les dynamiques d'un versant suppose de prendre en compte les tailles réelles des objets : plus les pentes sont fortes, plus les distorsions sont importantes.

Figure 4 – Image tangentielle (photographie prise depuis le sol, en bas à gauche) et projection verticale sur l'image satellite (en haut à gauche). Lors de cette projection, les plans successifs occupent une surface dépendant de leur distance à l'objectif, nécessitant une prise en compte de la géométrie de la prise de vue pour une analyse quantitative (milieu en haut). Droite : comparaison de la contribution en surface des divers plans visibles sur la photographie prise depuis le sol, et comparaison avec ces mêmes éléments vus sur une image zénithale prise par satellite.

Figure 5 – Couverture du bassin de l'Austre Lovénbreen avec 6 des stations photographiques automatiques (droite), et exemple de cliché en vue oblique de chaque appareil (gauche). En bas, les stations de prises de vues automatisées comportent un appareil photographique numérique commercialement disponible placé dans une double enceinte étanche, commandé par une carte de contrôle alimenté sur piles lithium. Les panneaux solaires n'ont que vocation à alimenter l'horloge temps-réel permettant la datation des photographies.

Figure 6 – En se fondant sur un MNT et connaissant les positions des cibles et des stations photo, il est possible de déterminer la distance réelle cible-objet et de déduire la surface couverte par un pixel en tenant compte des caractéristiques optiques de l'appareil photographique. Le calibrage de l'objectif s'obtient en laboratoire afin de corroborer les informations fournies par le constructeur, tandis que la connaissance des positions de la station de prise de vue et de quelques GCP sur le terrain permet d'évaluer la taille de chaque pixel sur la photographie (en haut à droite). Cette analyse n'est possible que si l'appareil reste fixe au cours d'une séquence de prises de vues : un montage robuste est garant du respect de cette hypothèse (en bas à droite).

Figure 7 – Application des polygones de Voronoï pour la discrétisation de l'espace considéré afin d'extrapoler sur l'ensemble du versant l'analyse obtenue sur quelques points de contrôle. Nous constatons que l'erreur sur la surface estimée au moyen de deux stations de prises de vues situées à des distances différentes de la cible et selon des orientations différentes par rapport à la pente est inférieure à 5%.

Figure 8 – Le même versant est étudié sous deux angles de vue grâce à deux stations photos différentes. La comparaison de ces deux analyses indépendantes fournit une estimation de l'erreur associée à notre procédure de traitement de données. En haut : configuration des prises de vues avec la position des deux appareils photographiques et le versant analysé. Pour chaque appareil (gauche et droite), la région d'intérêt contenant le versant de montagne est analysé par l'interpolation de la surface de pixels sélectionnés comme points de contrôle (bas), et la surface de roche exposée permet de déduire l'évolution de la couverture neigeuse sur ce versant.

Figure 9 – Evolution de la fraction de roche exposée sur le versant du Haavimbfjellet au cours de la période du 26 juin au 25 juillet. Cette période est sélectionnée car ne présentant plus d'avalanche : la fonte ne fait qu'alimenter le bassin versant en eau, mais ne contribue pas à l'accumulation du glacier. La contribution de la fonte (période présentée ici) est du même ordre de grandeur que la surface du manteau neigeux évacuée par avalanches (point initial de cette courbe, 23000 m²). Les courbes bleu et rouge étant établies par des analyses indépendantes de séries de clichés pris par des appareils photographiques situés en des emplacements très distincts et selon des orientations différentes, l'écart entre ces deux courbes permet d'estimer la barre d'erreur sur la méthode d'analyse à moins de 5%. Le cadre rouge sur chaque photographie (haut) illustre la zone analysée.

Figure 1 – Localisation de la zone d'étude et des stations photos automatiques : situé au Svalbard à 79°N, le glacier Austre Lovénbreen est sélectionné pour sa configuration hydrologique unique dans laquelle une barre calcaire canalise tous les écoulements en deux points permettant une comparaison hydrologique et glaciologique du comportement de ce bassin glaciaire. 6 stations photographiques automatisées sont distribuées autour du bassin pour une couverture complète du glacier sur les photographies acquises 3 fois par jour.

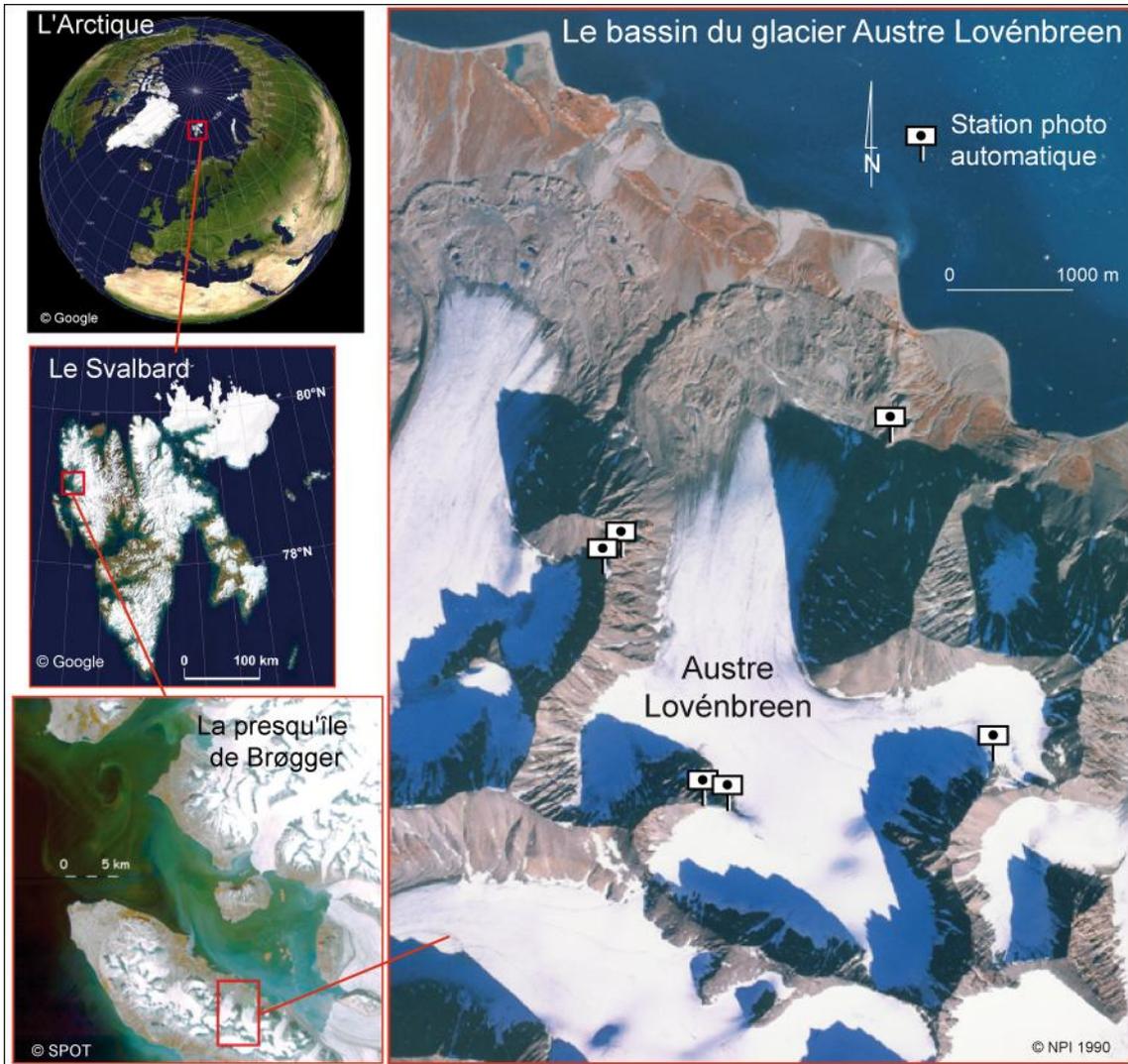


Figure 2 – Les versants sont des zones clés dans l'apport en neige sur le glacier. Surveiller les événements avalancheux est donc capital pour comprendre le manteau neigeux. A gauche, la pente calculée sur le modèle numérique de terrain du bassin glaciaire indique que la majorité des versants présente une pente de plus de 35°. Ces versants sont difficiles à instrumenter car instables, et propices aux avalanches : l'analyse de photographies pour en déduire l'évolution de la couverture neigeuse permet de palier aux difficultés d'instrumentation (en bas à droite).

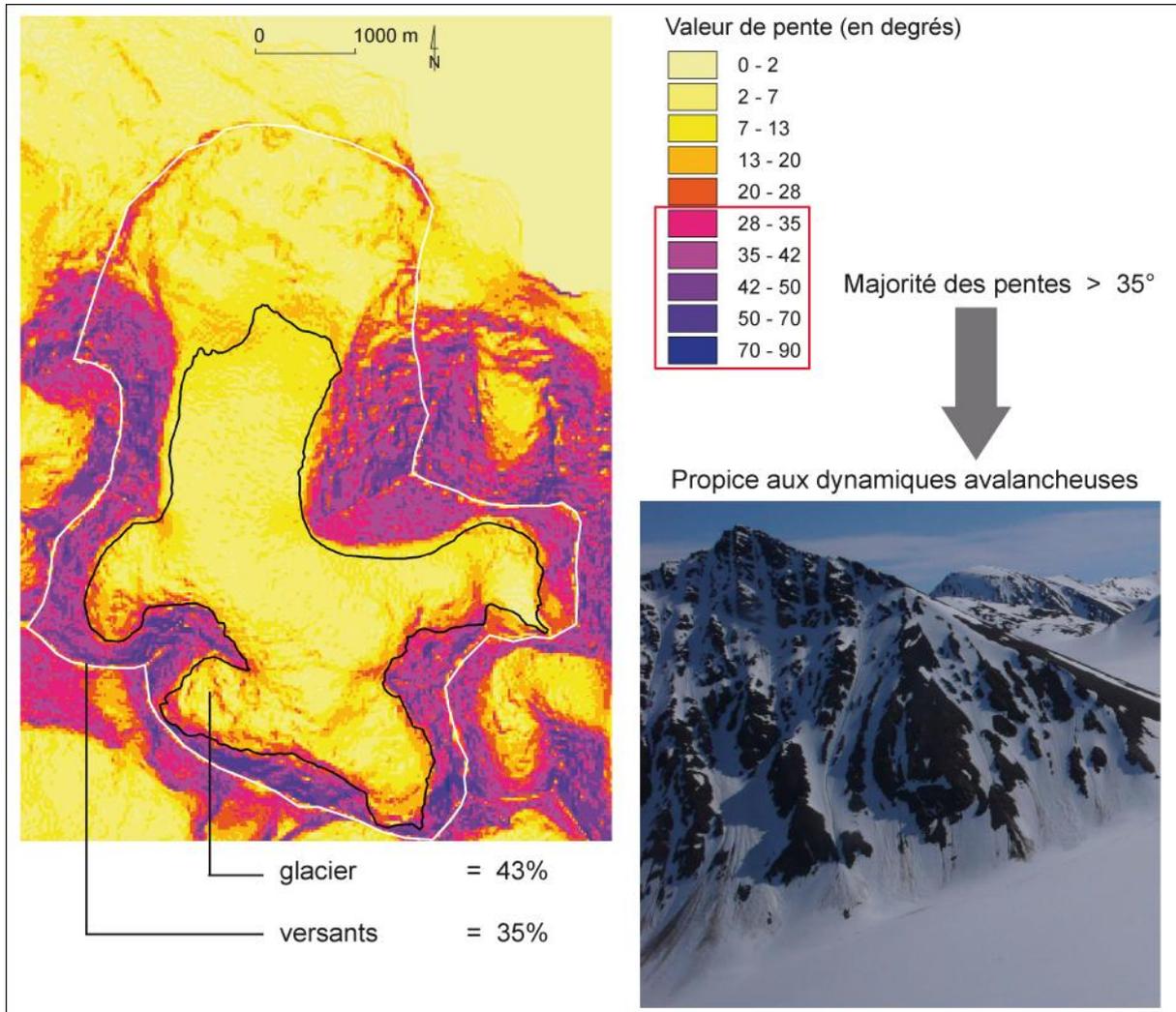


Figure 3 – La projection pose problème. Evaluer les dynamiques d'un versant suppose de prendre en compte les tailles réelles des objets : plus les pentes sont fortes, plus les distorsions sont importantes.

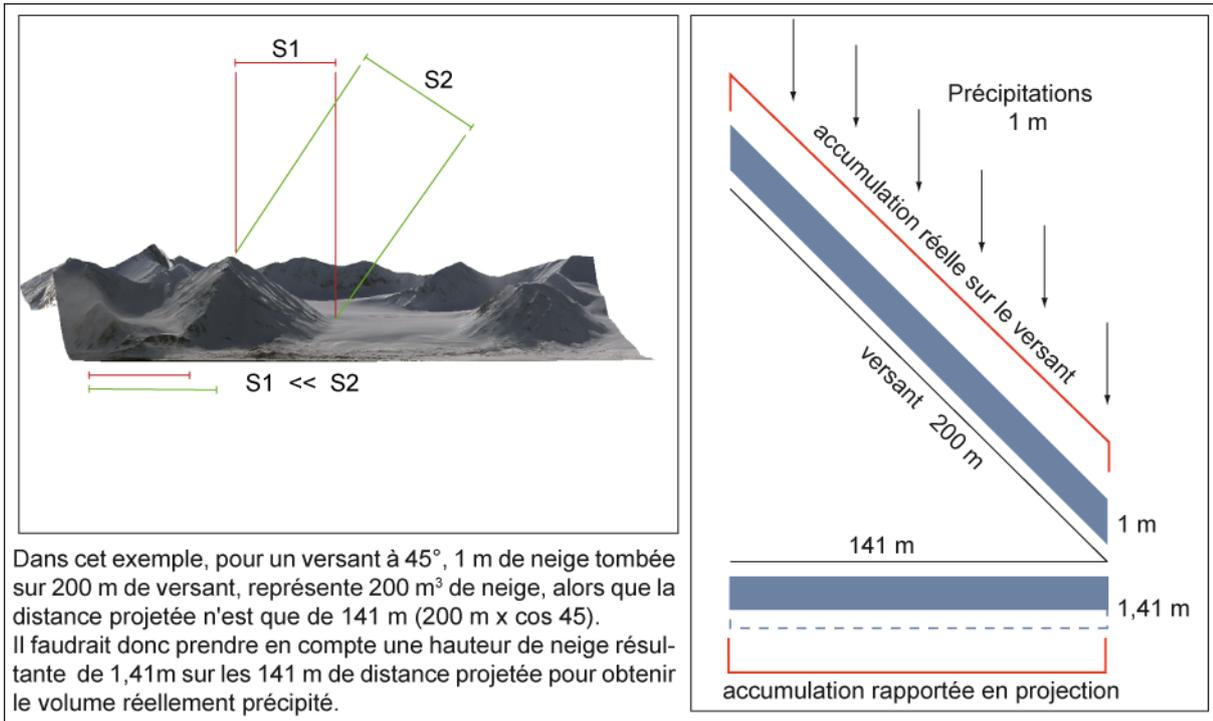


Figure 4 – Image tangentielle (photographie prise depuis le sol, en bas à gauche) et projection verticale sur l'image satellite (en haut à gauche). Lors de cette projection, les plans successifs occupent une surface dépendant de leur distance à l'objectif, nécessitant une prise en compte de la géométrie de la prise de vue pour une analyse quantitative (milieu en haut). Droite : comparaison de la contribution en surface des divers plans visibles sur la photographie prise depuis le sol, et comparaison avec ces mêmes éléments vus sur une image zénithale prise par satellite.

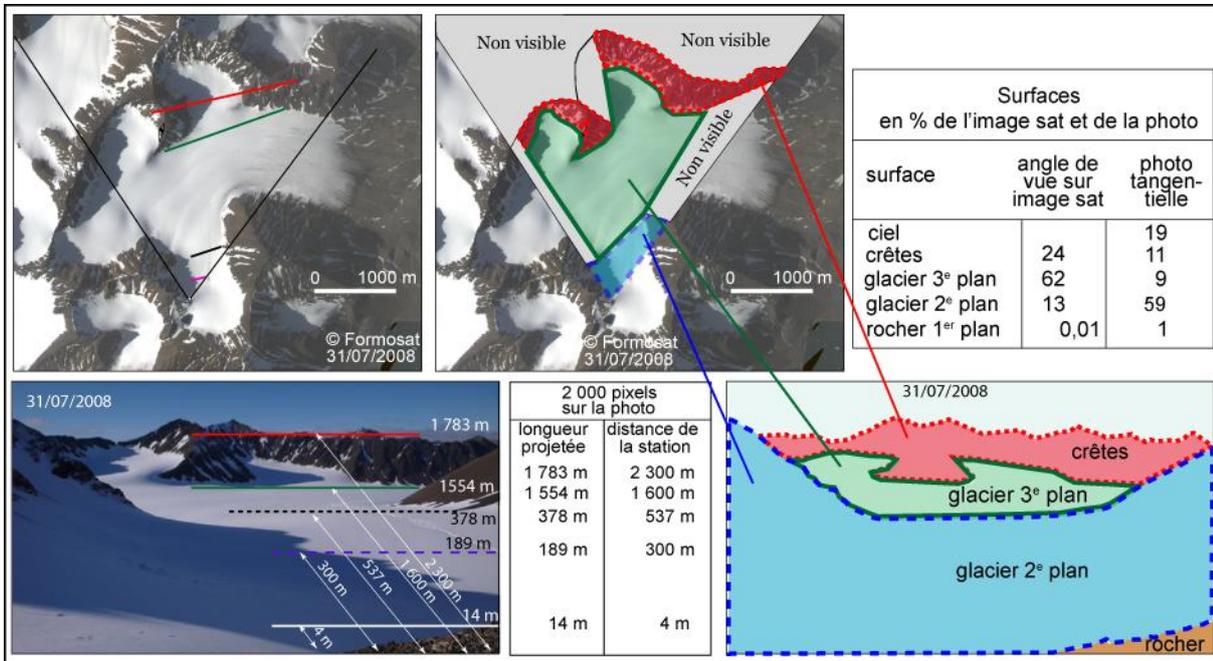


Figure 5 – Couverture du bassin de l'Austre Lovénbreen avec 6 des stations photographiques automatiques (droite), et exemple de cliché en vue oblique de chaque appareil (gauche). En bas, les stations de prises de vues automatisées comportent un appareil photographique numérique commercialement disponible placé dans une double enceinte étanche, commandé par une carte de contrôle alimenté sur piles lithium. Les panneaux solaires n'ont que vocation à alimenter l'horloge temps-réel permettant la datation des photographies.

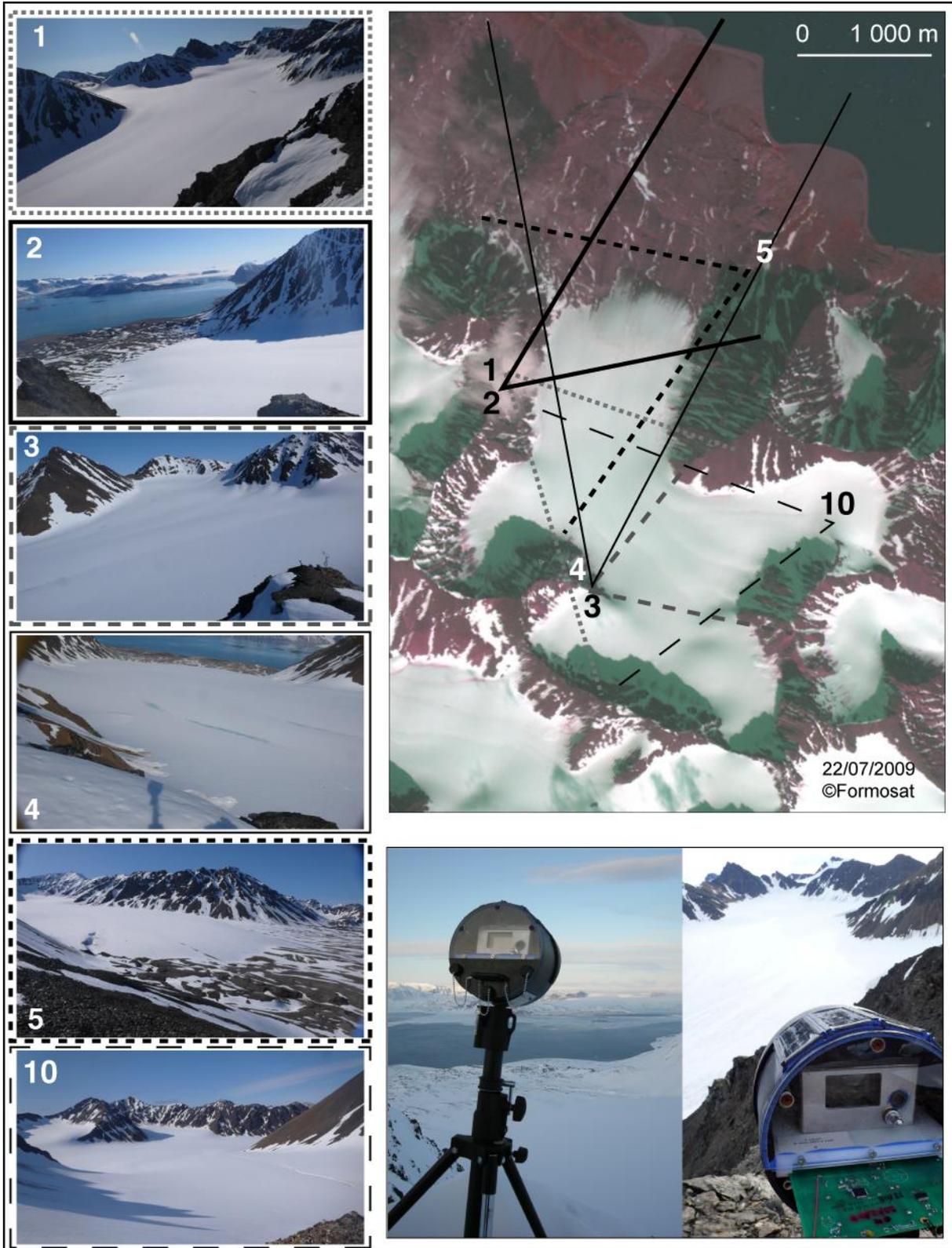


Figure 6 – En se fondant sur un MNT et connaissant les positions des cibles et des stations photo, il est possible de déterminer la distance réelle cible-objet et de déduire la surface couverte par un pixel en tenant compte des caractéristiques optiques de l'appareil photographique. Le calibrage de l'objectif s'obtient en laboratoire afin de corroborer les informations fournies par le constructeur, tandis que la connaissance des positions de la station de prise de vue et de quelques GCP sur le terrain permet d'évaluer la taille de chaque pixel sur la photographie (en haut à droite). Cette analyse n'est possible que si l'appareil reste fixe au cours d'une séquence de prises de vues : un montage robuste est garant du respect de cette hypothèse (en bas à droite).

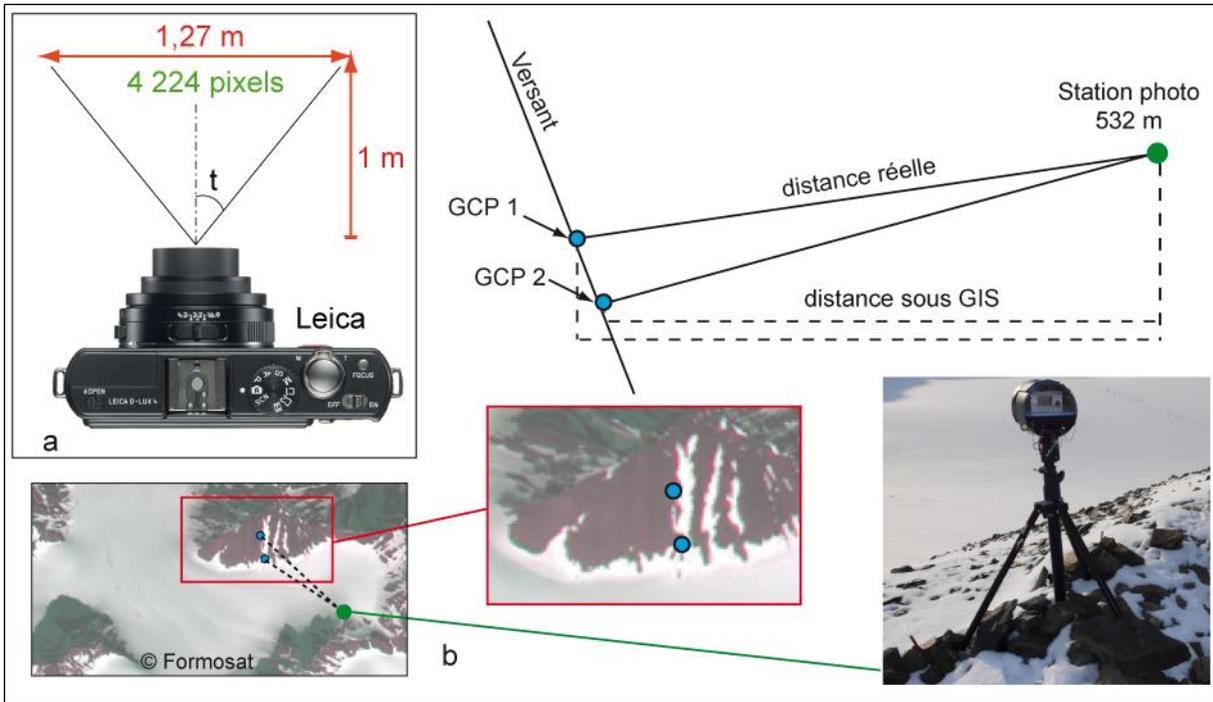


Figure 7 – Application des polygones de Voronoï pour la discrétisation de l'espace considéré afin d'extrapoler sur l'ensemble du versant l'analyse obtenue sur quelques points de contrôle. Nous constatons que l'erreur sur la surface estimée au moyen de deux stations de prises de vues situées à des distances différentes de la cible et selon des orientations différentes par rapport à la pente est inférieure à 5%.

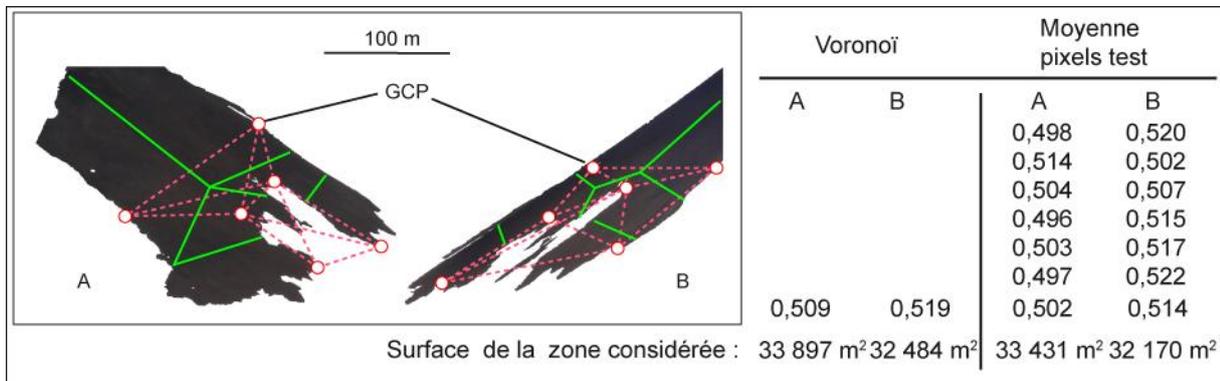


Figure 8 – Le même versant est étudié sous deux angles de vue grâce à deux stations photos différentes. La comparaison de ces deux analyses indépendantes fournit une estimation de l'erreur associée à notre procédure de traitement de données. En haut : configuration des prises de vues avec la position des deux appareils photographiques et le versant analysé. Pour chaque appareil (gauche et droite), la région d'intérêt contenant le versant de montagne est analysé par l'interpolation de la surface de pixels sélectionnés comme points de contrôle (bas), et la surface de roche exposée permet de déduire l'évolution de la couverture neigeuse sur ce versant.

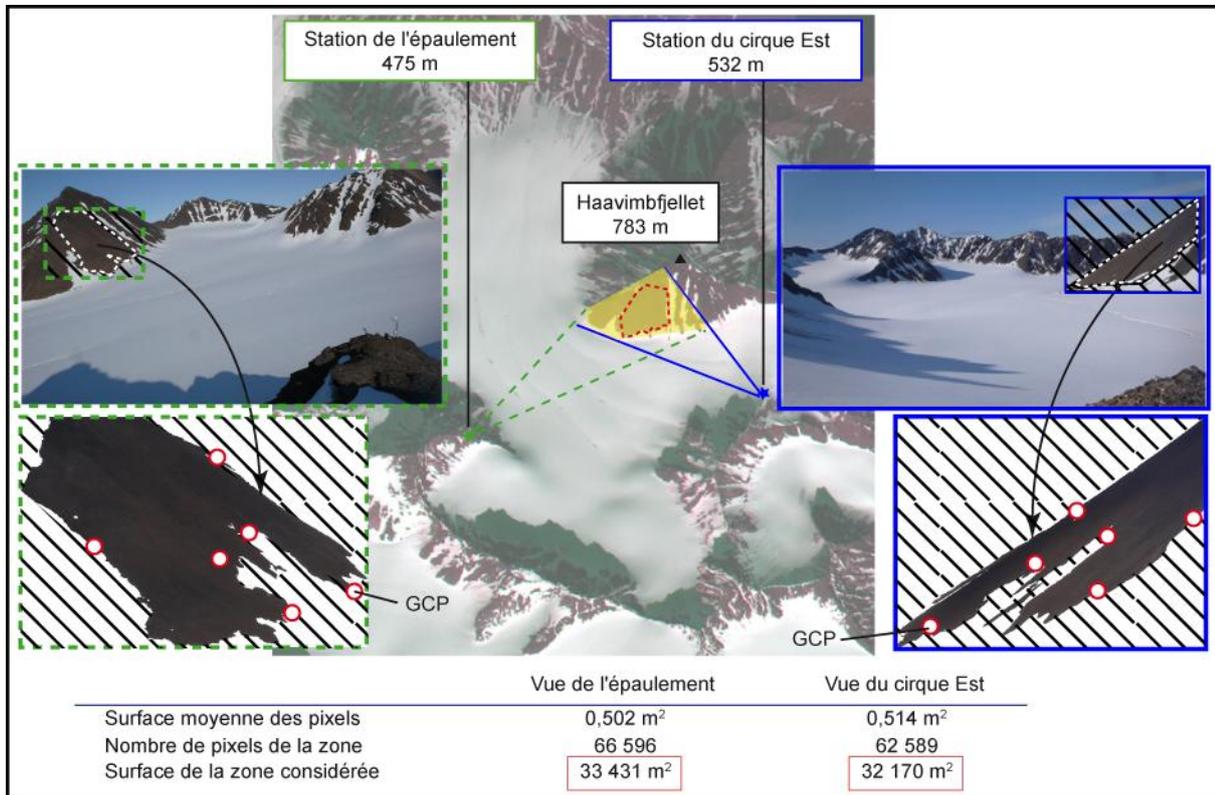


Figure 9 – Evolution de la fraction de roche exposée sur le versant du Haavimbjfellet au cours de la période du 26 juin au 25 juillet. Cette période est sélectionnée car ne présentant plus d'avalanche : la fonte ne fait qu'alimenter le bassin versant en eau, mais ne contribue pas à l'accumulation du glacier. La contribution de la fonte (période présentée ici) est du même ordre de grandeur que la surface du manteau neigeux évacuée par avalanches (point initial de cette courbe, 23000 m²). Les courbes bleu et rouge étant établies par des analyses indépendantes de séries de clichés pris par des appareils photographiques situés en des emplacements très distincts et selon des orientations différentes, l'écart entre ces deux courbes permet d'estimer la barre d'erreur sur la méthode d'analyse à moins de 5%. Le cadre rouge sur chaque photographie (haut) illustre la zone analysée.

