

EVOLUTION RECENTE DU GLACIER DU MIAGE :

ETUDE DIACHRONIQUE PAR BALAYAGE LASER TERRESTRE

Société d'accueil : Laboratoire EDYTEM

PFE présenté par : **Charles GRANGE**

Directeur du PFE : Thierry VILLEMIN

Correcteurs : Pierre GRUSSENMEYER, Emmanuel ALBY



1. Le laboratoire EDYTEM

Ce Projet de Fin d'Etudes a été réalisé au sein du laboratoire EDYTEM (Environnements Dynamiques et Territoire de la Montagne), sur le campus scientifique du Bourget du Lac en Savoie. Le laboratoire est une Unité Mixte de Recherche (UMR) rattachée à l'Institut Ecologie et Environnement (INEE) du CNRS et travaillant sur l'axe prioritaire « Montagne » de l'Université de Savoie. Les recherches du laboratoire portent sur l'étude des environnements de montagne en déroulant trois axes transversaux de recherche : (i) les systèmes nivo-glaciaires ; (ii) les systèmes hydrothermo-minéraux ; (iii) les systèmes et milieux karstiques. Afin de favoriser l'organisation des recherches interdisciplinaires, trois équipes structurent le laboratoire : Equipe 1 : Archives environnementales des milieux de montagne ; Equipe 2 : Dynamiques actuelles des milieux de montagne ; Equipe 3 : Ressources patrimoniales, vulnérabilités et recomposition des territoires de montagne. Trois plateformes technologiques sont également présentes : Caractérisation des matériaux, Métrologie de terrain, Cartographie, Topographie et Imagerie 3D (CTI3D). Ce projet contribue à l'axe de recherche nivo-glaciaire dans le cadre des travaux de l'équipe II en lien avec la plateforme CTI3D.

2. Présentation et objectif du projet

Dans le cadre des travaux de recherches entrepris sur le Massif du Mont-Blanc, des levés au scanner laser Optech ILRIS 3D longue portée ont été effectués entre juillet 2003 et juin 2010 au lac du Miage (Val d'Aoste, Italie), par une équipe mixte d'Imageo et du laboratoire EDYTEM. Le glacier du Miage, l'un des principaux glaciers noirs des Alpes, permet, grâce à sa couverture détritique, l'utilisation de la technique par balayage laser terrestre.

En vue d'une analyse diachronique de la falaise de glace, l'étude se penche sur la précision de construction des modèles 3D en relevant les impacts dus à la complexité et à l'irrégularité des surfaces, l'humidité sur les parois de glace, la présence de masques dus à des blocs rocheux pluri-métrique et la technique retenue basée sur la consolidation par Best-Fit. Les nuages de points 3D ont été traités et consolidés en utilisant plus particulièrement le module IMAlign du logiciel Polyworks. L'algorithme de consolidation nommé Best-Fit a été notamment analysé par une série de tests afin de connaître ses capacités intrinsèques et d'évaluer la pertinence et la précision de la construction des modèles 3D.

En gardant toujours une optique quantitative de précision, et dans le but d'évaluer l'évolution géomorphologique du glacier, l'exploitation des nuages de points a conduit à des rendus graphiques 2D avec une cartographie des vitesses de déplacement et de la morphologie de la falaise (vecteurs, profils, courbes de niveaux). L'étude géomorphologique a principalement pour objectif d'apporter des réponses aux impacts des changements environnementaux sur les dynamiques actuelles des glaciers de montagne.

3. Le glacier du Miage

Le glacier du Miage, alimenté par la confluence de plusieurs glaciers qui prennent naissance à plus de 4 000 m d'altitude, est localisé sur le versant sud-est du massif du Mont Blanc (Figure 1), en territoire Italien. Sa superficie de 10,6 km² (2005) fait de lui l'un des principaux glaciers italiens mais également l'un des principaux glaciers noirs des Alpes. En effet, en dessous de 2400 m d'altitude, le glacier est entièrement recouvert de débris hétérométriques (sables, graviers et blocs de toutes dimensions) s'étalant sur une langue de 6 km de long et de 0,5 à 1 km de large. Le glacier termine sa course dans le Val Veny par une langue trilobée, dont les fronts principaux se situent à environ 1750 m d'altitude. Un amphithéâtre morainique flanque la moraine latérale droite dans la courbure du glacier, au centre duquel se trouve notre objet d'étude, la falaise de glace d'où se détachent de petits icebergs au niveau du lac juxtaglaciaire du Miage.

Le lac du Miage est un site remarquable (Figure 2), d'une part par sa taille et d'autre part par son évolution récente rapide qui a modifié le paysage au cours des dernières années. La particularité de ce lieu repose sur une dynamique glaciaire unique. De manière pratiquement continue, on observe des avalanches de cailloux et de débris rocheux glissant sur la falaise de glace et tombant dans le lac. Il arrive également que le lac se vidange brutalement à travers un réseau de crevasses qui s'ouvre dans le glacier. Ce fut le cas en septembre 2004, où la topographie du terrain sous le lac a pu être levée à l'aide d'un scanner laser terrestre (Optech Ilris 3D). Depuis cette date, des évolutions morphologiques de la falaise de glace ont pu être observées, transformant au fil des années la géométrie du site. Enfin, les interactions entre le lac et le glacier permettent d'étudier une dynamique glaciaire encore mal comprise. La scène, de part sa taille (200 m x 300 m) et son environnement naturel (moraines, blocs rocheux et glace) rend aussi l'étude intéressante d'un point de vue topographique et géomorphologique.

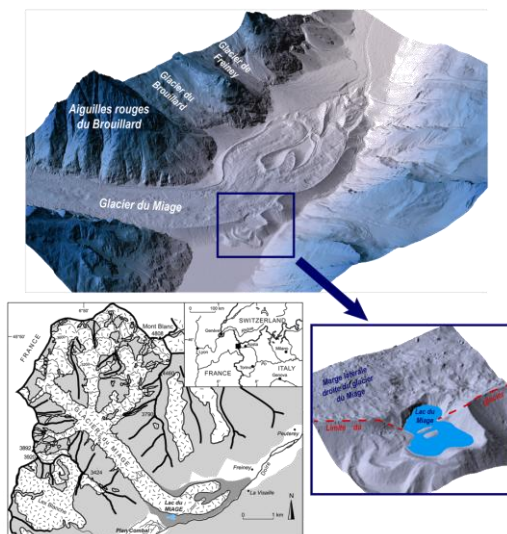


Figure 2: Le lac du Miage en juillet 2009. Deux personnes sur les moraines «centrales» nous indiquent l'échelle de la scène. En arrière plan, on peut voir l'Aiguille Noire de Peuterey.



Figure 1: Localisation du site d'étude, le lac du Miage et son glacier sont situés sur le versant italien du massif du Mont Blanc. Le modèle 3D est un MNT à 2 m issu du logiciel Surfer.

4. Caractéristiques des données

Une à deux fois par an (Tableau 1), des levés au scanner laser ont été acquis sur une journée, durant les mois de juin, juillet ou septembre ou octobre. Les campagnes de mesures n'ont pas pu être temporellement régulières en raison (i) des difficultés d'accès au site liées à l'enneigement, (ii) des conditions météorologiques qui rendent impropre l'utilisation de la technique ou encore (iii) de la disponibilité du matériel et du personnel. Avec une fenêtre de travail de 40° x 40°, le scanner Optech Ilris 3D peut acquérir 2000 points/seconde utilisant une longueur d'onde de 1500 nm portant un signal qui est rétrodiffusé par la surface de glace en présence de sédiments. Le nombre de points acquis à chaque mission (Tableau 1) varie entre 5 et 20 millions en fonction des limites de la zone balayée et de l'importance dans la scène totale de la surface occupée par le lac.

La largeur de la scène à laquelle on s'intéresse est d'environ 200 m. Cela a nécessité à chaque fois la réalisation de 8 à 10 levés indépendants. Ces levés ont été réalisés depuis 3 positions dans la plupart

des cas, chaque position regroupant plusieurs orientations du scanner afin de couvrir une fenêtre plus large que 40° x 40°. Enfin, dans chaque situation du scanner, plusieurs fenêtres ont été ciblées sur les parties clés de l'objet (de 1 à 4 fenêtres). La réduction de la taille des fenêtres a permis (i) un gain de temps considérable dans l'acquisition des données en évitant notamment l'acquisition de points sur le lac. Ce facteur temps est particulièrement important (durée de la mission, autonomie des batteries) puisqu'il influe sur le choix des pas angulaires lors du levé ; (ii) l'uniformisation de la densité de points (nombre de points par unité de surface) sur l'ensemble de la scène ; en effet, en fixant le pas angulaire horizontal et vertical, l'éloignement de la position du scanner laser à l'objet diminue proportionnellement la résolution spatiale. Pour avoir une meilleure densité de points des nuages et augmenter le niveau de détail sur l'ensemble de la scène, la solution retenue a été de spécifier des pas angulaires propres à chaque fenêtre afin d'obtenir un pas moyen de la dizaine de centimètres sur l'ensemble de l'espace couvert par le projet.

Epoques	Nombre de stations	Nombre de points dans le nuage	Erreur absolue globale de consolidation du modèle	Erreur maximale de consolidation du modèle	Référencement : Erreur absolue globale de consolidation par rapport à juin 2010
23/07/ 2003	11	5 652 088	<10 cm	15 cm	< 30 cm
04 /06/ 2004	6	4 496 381	<10 cm	15 cm	< 20 cm
08 /09/ 2004	18	10 758 984	<20 cm	30 cm	< 20 cm
06 /06/ 2005	7	17 938 828	<15 cm	30 cm	< 20 cm
20 /09/ 2005	8	20 350 328	Entre 20 et 40 cm	90 cm	-
21 /06/ 2006	7	6 975 991	<15 cm	30 cm	< 20 cm
05 /10/ 2006	9	5 017 443	<10 cm	20 cm	< 10 cm
18 /07/ 2007	8	7 055 699	<10 cm	30 cm	< 10 cm
24 /06/ 2008	12	11 786 222	<10 cm	20 cm	< 15 cm
10 /10/ 2008	10	8 435 193	<10 cm	20 cm	< 10 cm
17 /06/ 2009	10	5 358 321	<10 cm	30 cm	< 10 cm
25 /06/ 2010	10	8 116 974	<10 cm	20 cm	-

Tableau 1 : Chronologie des campagnes de mesures de la falaise de glace du lac du Miage, erreurs globales des modèles issues de la consolidation pour chaque époque et écart de consolidation des nuages de points de 2003 à 2009 par rapport au modèle de 2010. Les écarts sont estimés grâce à l'outil de comparaison Best-Fit sous IMAAlign de Polyworks. Compte tenu des données inutilisables de septembre 2005.

En connaissant la distance moyenne pour chaque fenêtre (entre 100 et 500 m, prise avec un distance mètre longue portée) et la résolution spatiale finale espérée (10 cm), on peut retrouver les pas angulaires spécifiques. Ainsi, les pas angulaires horizontaux et verticaux choisis ont été de l'ordre de 20 mgon sur les moraines « centrales », 10 mgon sur la falaise de glace et 5 mgon sur les parties éloignées au-dessus du glacier. Au final, on obtient un espacement entre les points de 8 à 15 cm pour les parties à l'avant de la falaise de glace et de 20 cm pour les parties plus éloignées. La taille de l'empreinte laser varie entre 3 cm à 100 m et 10 cm à 500 m. La résolution spatiale de nos nuages de points n'est pas affectée par la taille de la tâche du rayon laser car l'espacement choisi entre nos points est, dans notre cas, toujours supérieur.

5. Consolidation des nuages de points

Afin d'apprécier l'outil Best-Fit et notamment sa précision dans le module IMAAlign de Polyworks, deux tests ont été réalisés avec trois nuages de points acquis en septembre 2005. Le nuage central a ainsi été assemblé indépendamment avec les nuages recouvrant à gauche et à droite. Dans chacun de ces deux tests, la consolidation s'est faite en faisant varier la distance maximale de 10 m à 1 cm afin de dépasser la valeur optimale du rayon de recherche. Ces deux tests ont été réalisés dans le but de comprendre l'algorithme du Best-Fit afin de pouvoir dégager une méthode pour optimiser le processus et quantifier la précision de la consolidation de deux nuages pour le lac du Miage. L'analyse des données du processus (nombre d'itérations, nombre de paires de points), les histogrammes (distribution de la distance entre points appariés caractérisée par sa moyenne et son écart-type) et l'outil de comparaison Best-Fit (inspection des nuages de points) ont permis d'obtenir une analyse cohérente des résultats pour les deux tests.

Pour construire le modèle de chaque année, la procédure retenue à l'issue des tests précédents a été appliquée et validée. Il en est ressorti des écarts moyens absolus entre les nuages globalement inférieurs à 10 cm sauf pour septembre 2004 et septembre 2005 (Tableau 1). Septembre 2005 a été considéré comme très peu fiable et éliminé de la suite de l'étude à cause d'erreurs de consolidations trop importantes dans la partie centrale de la scène (entre 20 et 40 cm). Ainsi, globalement, les modèles montrent des écarts inférieurs à 15 cm, ce qui reste acceptable pour l'étude.

6. Référencement des modèles

Tous les modèles ont été référencés par rapport à la même période 25/06/2010 en appliquant à nouveau le principe du Best-Fit. Comme les points situés sur le glacier sont en mouvement d'une année sur l'autre, une partie fixe à chaque époque a été préalablement extraite. Cette zone correspond aux moraines "centrales" et à la moraine à l'est de la scène. L'application de ce traitement révèle des écarts de consolidation entre modèles (Tableau 1). Juillet 2003 et juin 2004 présentent ainsi des écarts respectivement inférieurs à 30 et 20 cm. Ceci peut s'expliquer par le fait que leur recouvrement avec le modèle de 2010 ne concerne que la moraine à l'est de la scène. Le Best-Fit a donc été appliqué sur une zone mal répartie dans la largeur de la scène, et qui n'est de surcroît pas absolument fixe : en effet, au fur et à mesure des consolidations, cette moraine a toujours affiché des écarts plus élevés que le reste de la zone fixe, car davantage affectée par l'érosion (ruissellement, déchaussement de blocs). A partir d'octobre 2006, les consolidations sont meilleures (écart généralement inférieur à 10 cm). Ensuite, un plan horizontal de référence a été créé à partir du contour du lac du Miage en juin 2010 et le Nord a été obtenu par l'intermédiaire d'une orthophoto de 2006. Cela constitue, après changement de repère, le plan Est-Nord du repère relatif des modèles à inspecter.

7. Rendus graphiques

Plusieurs rendus graphiques ont été effectués : (i) des courbes de niveaux ont été réalisées sous le logiciel Surfer en transformant les nuages de points en une grille régulière de 1 m, grâce à une triangulation de Delaunay avec interpolation linéaire (ii) plusieurs blocs rocheux ont été repérés et suivi sur les nuages de points d'une année sur l'autre avec le logiciel Polyworks. L'importation dans le logiciel Arcgis de ces points a permis de réaliser une carte de déplacements des blocs rocheux sur le glacier (iii) Sous Polyworks, deux plans de sections ont été créés afin d'analyser les avancements et reculs de la falaise de glace suivant les époques, en effectuant une sélection de points à 2 cm de part et d'autre du plan. Les courbes ont été réalisées sous Grapher en gardant une centaine de points.

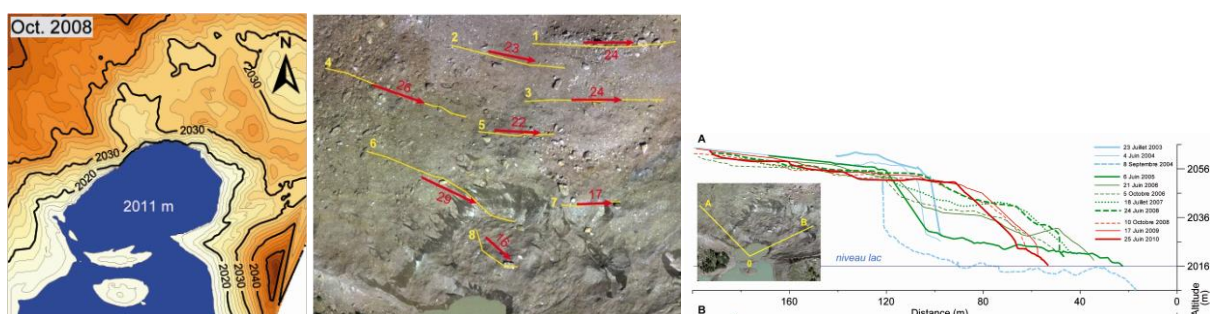


Figure 3: Courbes de niveaux, Carte de déplacements et Profils de la falaise de glace

8. Conclusion

La précision des modèles du site entre 2003 et 2010 a été déterminée et a permis de proposer la borne inférieure pour l'évaluation des déplacements détectables avec le scanner laser terrestre Ilris 3D. Ainsi, pour les modèles de juillet 2003 à juin 2006, l'erreur de mesure des points est de 35 cm. Elle est de 20 cm pour les modèles d'octobre 2006 à juin 2010. Ces erreurs sont l'addition des écarts moyens des modèles issus des consolidations propres à chaque année et du référencement par rapport à 2010. Les erreurs de levé, liées aux erreurs instrumentales ou à la capacité de réflectance des objets naturels (glace) sont de fait incluses dans les écarts de consolidation des modèles pour chaque période. En effet, les erreurs de consolidations dépendent de l'erreur de mesure ainsi que de l'espacement entre points des nuages levés. Des méthodes de cartographie 2D ont été appliquées en application au site d'étude tout en alliant précisions et interprétations des résultats (détaillés dans le mémoire). Ainsi, la vidange de septembre 2004 a introduit une rupture durable dans le fonctionnement « normal » du système glacier/lac dont la dynamique de la falaise est la résultante.

Le projet a actuellement permis la rédaction de deux articles dans la collection EDYTEM « Images et modèles 3D en milieux naturels » : le premier sur l'optimisation des consolidations de nuages de points en application au lac du Miage (Grange et al., 2011) et le deuxième sur l'évolution morphologique de la falaise de glace du lac du Miage (Deline et al., 2011).