

LE GEORADAR, UNE TECHNOLOGIE D'AVENIR AU SERVICE DU GÉOMÈTRE

1. Qu'est-ce que le georadar ?

1.1 Principe de fonctionnement

Le georadar, ou radar à pénétration de sol (Ground Penetrating Radar - GPR), est une technique d'auscultation non-destructive et non-intrusive qui exploite les ondes électromagnétiques pour obtenir des images des milieux et matériaux traversés, à l'image d'une échographie.

Un système de mesures georadar est composé d'une unité de contrôle, avec ou sans écran, connecté à une antenne (ou plusieurs suivant les applications), le tout alimenté par des batteries. L'unité de contrôle enregistre les données brutes provenant de l'antenne, permettant un traitement ultérieur par des logiciels métiers.

L'unité de contrôle permet aussi une visualisation en direct, des mesures en cours d'acquisition. La visualisation la plus communément utilisée est une image d'intensité de couleurs ou de tons de gris représentant les amplitudes des différentes réflexions du signal, dans le temps et à différentes profondeurs. Ainsi, l'échelle horizontale est généralement le temps en seconde (ou la distance parcourue par l'antenne, avec l'utilisation d'une roue codeuse ou d'un encodeur optique), et l'échelle verticale la profondeur d'auscultation en nanosecondes (Two-way-time - TWT) ou en mètre (par calibration ou à constante diélectrique moyenne estimée ou connue).



Figure 1 – Système georadar GSSI SIR-3000 avec trolley de mesure.

Un système géoradar fonctionne en émettant des ondes électromagnétiques à l'aide d'une antenne (partie émettrice). Lorsque ces ondes rencontrent des matériaux ou des objets avec des propriétés électromagnétiques différentes, elles sont partiellement réfléchies vers la surface où elles sont captées par la partie réceptrice de cette même antenne. C'est la raison pour laquelle les antennes georadar sont de type bipôle, avec une partie émettrice et une autre réceptrice. Le temps que prend chaque onde pour revenir à l'antenne réceptrice (Two-way-time) permet de déterminer la profondeur de l'objet ou de la structure détectée. Quant à l'amplitude du signal réfléchi, il indique la différence de caractéristique diélectrique entre les deux milieux. Plus un signal retour est fort, plus grand est le contraste à l'interface des deux milieux traversés, et plus forte est l'anomalie rencontrée.

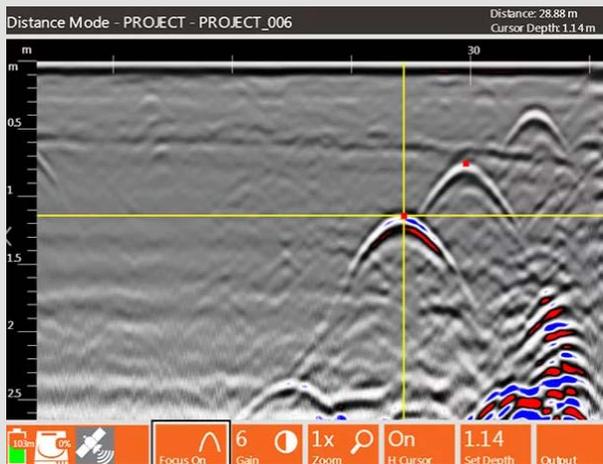


Figure 2 – Image radar en ton de gris (GSSI - SIR 4000)

1.2. Fréquence centrale

La distance entre les deux pôles de l'antenne définit la fréquence centrale du système géoradar. Elle est définie comme étant la fréquence à laquelle l'antenne du géoradar émet la majorité de son énergie. Par exemple, une antenne avec une fréquence centrale de 400 MHz émet principalement des ondes à cette fréquence.

Le choix de la fréquence centrale du système géoradar doit être réalisé avec soin car il aura un impact sur la résolution et la profondeur d'auscultation.

Une fréquence centrale élevée (par exemple 1000 MHz) permet d'obtenir une meilleure résolution spatiale, ce qui signifie que les détails plus fins peuvent être détectés.

Cependant, cela réduit la profondeur maximale de pénétration dans le sol. Une fréquence centrale plus basse (par exemple 50 MHz) permet aux ondes de pénétrer plus profondément dans le sol mais avec une résolution spatiale moindre. Cette caractéristique est utile pour les études nécessitant une exploration en profondeur plutôt qu'une analyse détaillée des structures superficielles.

Le choix de la fréquence centrale dépend principalement des objectifs spécifiques de l'étude ainsi que des propriétés du sol ou du

matériau étudié.

- Études archéologiques et forensiques : elles utilisent généralement des fréquences élevées (500 à 2000 MHz) pour détecter des objets ou structures enterrés à faible profondeur, mais avec une grande précision (murs, fondations, structures architecturales ou objet enfouis, etc...).
- Génie civil : il peut utiliser une gamme variée de fréquences selon les besoins; par exemple, pour inspecter les couches supérieures d'une route (épaisseurs d'enrobés) ou les couches superficielles d'un ouvrage (armatures, câbles de précontrainte), on utilise des fréquences élevées (de 900 à 2'000 MHz). En revanche, pour analyser des fondations profondes, rechercher des conduites ou des canalisations, des fréquences plus basses sont préférées (100 à 600 MHz).
- Explorations environnementales et géologiques : les applications nécessitant l'exploration profonde utilisent souvent des fréquences basses (10 MHz à 200 MHz), notamment pour la glaciologie ou la géologie profonde. Pour des études nivologiques, les profondeurs d'auscultation sont plus réduites, et la fréquence centrale se situe communément proche de 400 à 500 MHz.

1.3. Dispositif de mesures géoradar

La technologie du géoradar peut être déployée de différentes manières. En règle générale, les antennes sont en contact direct avec le milieu ausculté (ground-coupled antennas), ce qui garantit souvent une meilleure qualité et pénétration des ondes dans les matériaux. C'est par exemple le cas par l'utilisation de trolley pour la recherche

de conduites ou de mini-kart pour la recherche d'armatures dans les structures en béton.

Il est aussi possible de réaliser des mesures georadar sans contact direct avec le milieu ausculté, par exemple avec un système georadar embarqué dans un hélicoptère pour des applications nivologiques ou glaciologiques, ou sur drones.

Le positionnement des scans georadar est aussi un élément essentiel pour une exploitation optimale des mesures et pour leur représentation cartographique. Pour ce faire, les unités de contrôle géoradar sont capables d'interfacer des équipements de positionnement satellitaire (via le format d'échange standard NMEA). Il est aussi possible, et cela a été développé par Geosat pour des applications de glaciologie et de nivologie, de générer depuis les équipements GNSS des marques (type PPS) à intervalles réguliers qui sont enregistrées simultanément dans les fichiers bruts GNSS et radar. Un calcul en post-traitement de ces marques GNSS permet de géoréférencer les scans radar.

1.4 Post-traitement georadar

Comme évoqué plus haut, l'interprétation des images (ou scans) georadar peut être réalisée en direct sur le site de mesures à l'aide de l'écran de l'unité de contrôle. Des logiciels de post-traitement sont aussi communément utilisés pour réaliser des traitements sur les fichiers bruts. Ces opérations post-mesures permettent d'améliorer la qualité des données et d'en faciliter leur interprétation. Les principaux traitements utilisés sont les suivants :

- Correction temps zéro : alignement des scans entre eux pour que le temps zéro corresponde à la surface du sol ou à une position de référence fixe.

- Filtrage : élimination des fréquences indésirables (bruit) pour une meilleure lisibilité des scans.
- Gain : augmenter ou diminuer le contraste d'une partie du signal (en général atténuation en surface et augmentation en profondeur, là où le signal est le plus atténué).
- Correction topographique : ajuster les données pour tenir compte des variations topographiques du terrain. Des géodonnées 3D (modèle numérique de terrain) permettent de corriger les variations altimétriques de l'antenne et d'avoir une représentation plus fidèle de la topographie dans les images des scans.
- Migration : corriger les effets géométriques dus à l'angle d'incidence des ondes radar et repositionner correctement les réflecteurs dans leur emplacement réel.

La combinaison de ces différentes opérations permet d'obtenir des scans georadar de meilleure qualité, avec une résolution améliorée, réduisant le bruit et les signaux parasites, corrigeant les artefacts (multi écho par exemple), et aboutissant in fine à des résultats plus aisés à interpréter.

2. Applications georadar réalisées par Geosat SA

Depuis sa fondation en 2000, le bureau Geosat SA s'est grandement spécialisé dans la mise en œuvre de la technologie georadar pour différents types de problématiques et d'applications. Plusieurs équipements de fournisseurs différents ont été testés et utilisés. Actuellement Geosat exploite un équipement nouvelle génération et des antennes couvrant une gamme de fréquences de 40 à 1'500 MHz.

Ceci permet de répondre efficacement à différents types de demandes :

- *génie civil* : scan routier pour cartographie des enrobés, recherche d'armatures, de câbles de précontrainte ou de conduites diverses, recherche d'affouillement ou de vides suite à des inondations ou des aléas géologiques.



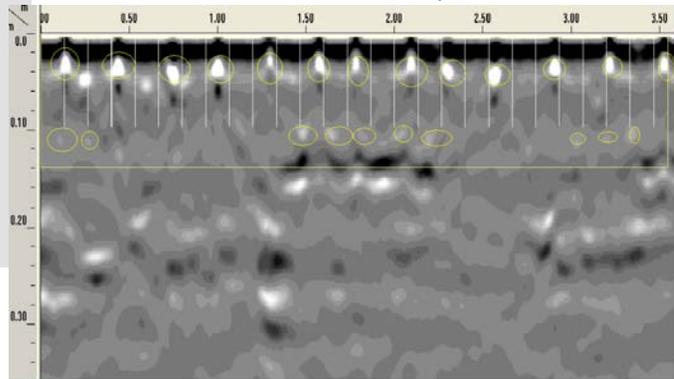
Recherche de conduites (PE, PVC, ciment, fonte, etc...)



Auscultation non destructive d'un pont; localisation des armatures et de la précontrainte



Cartographie des armatures sur le tarmac de l'aéroport de Genève-Cointrin



Scan figurant les armatures dans une dalle en béton

- *nivologie* : mesures hélicoptérées, sur dameuses, ski-doo ou à skis pour mesures d'épaisseur du manteau neigeux, recherche de victimes d'avalanche, estimation du SWE (snow water equivalent) dans le domaine hydroélectrique (potentiel hydrique des bassins versants).

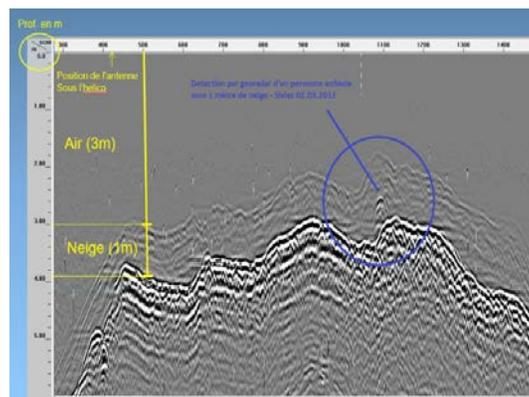


Figure 3 – Recherche de victime d'avalanche par georadar hélicoptéré (image et scan georadar tirés d'un exercice de sauvetage en 2018)

- *glaciologie* : mesures au sol ou héliportées pour détermination des profondeurs de glace ou de la composition de glaciers rocheux. Projet de référence : inventaire par georadar des glaciers suisses, en partenariat avec l'ETHZ, institut de géophysique et laboratoire de glaciologie. Ce projet particulier fait l'objet d'une présentation pratique dans le prochain chapitre.



Figure 4 – Systèmes de mesures georadar héliportés ou au sol pour mesures nivologiques et glaciologiques

3 Projet Airborne Ice Radar (AIR-ETH) pour inventaire glaciaire suisse par georadar

3.1 Contexte général

Depuis la fin du Petit Âge glaciaire vers 1850, plus de la moitié du volume des glaciers des Alpes suisses a été perdue, avec une accélération de cette perte ces dernières décennies. Les projections futures indiquent que, sous des scénarios d'émissions élevés, les Alpes pourraient être largement déglacées d'ici 2100. Les glaciers jouent un rôle important en tant que réservoirs d'eau, influençant la production d'hydroélectricité, l'agriculture, le tourisme et la gestion des ressources en eau.

A la suite de plusieurs années de recherche et de tests, et un partenariat public – privé fructueux impliquant notamment l'institut de géophysique et le laboratoire de glaciologie de l'ETHZ, le bureau Geosat SA, l'entreprise BRTechnik et la compagnie d'hélicoptère Air-Glaciers SA, un système de

mesures héliporté combinant les technologies georadar et GNSS a vu le jour et a permis de collecter des données sur les principaux « grands » glaciers suisses entre 2016 et 2021.

Le financement de cet important projet a été assuré par l'ETHZ, la commission suisse de géophysique et le centre de compétence suisse pour la recherche sur l'énergie (SCCER).



3.2 Description du système de mesures

Le système de mesures est monté entièrement sur une plateforme carrée de 5

mètres de côté, suspendue par un filin de 14m sous un hélicoptère. L'entier du système pesant environ 250 kg peut être largué en cas d'urgence. Il est composé des éléments principaux suivants :

- Unité de contrôle georadar : Sensor Software NIC-500X
- Antennes géoradar : double système bipôle avec 2 antennes émettrices et deux antennes réceptrices de 4m de longueur – type Sensor Software pulseEKKO 25 MHz
- Positionnement : 3 récepteurs Javad Alpha avec antennes GRAnt
- Altimètre laser : Jenoptik LDM-301

L'unité de contrôle GPR et les récepteurs GNSS sont situés dans le boîtier de la plateforme au milieu du cadre (Fig. b ci-dessus). Ils peuvent être contrôlés via n'importe quel appareil doté d'un navigateur et d'une connexion sans fil (par exemple,

laptop, tablette) depuis le cockpit de l'hélicoptère.

Les trois antennes GNSS, fixés dans 3 coins du cadre, sont connectées par câbles coaxiaux aux 3 récepteurs géodésiques et permettent une détermination des positions, pitch, roll and yaw à une fréquence de 1Hz, en post-traitement. Pour mesurer la hauteur du système au-dessus de la surface, un altimètre laser LDM-301 a été installé.

À des fins de navigation, la position et l'élévation GNSS au-dessus du sol sont affichées simultanément sur un écran dans le cockpit de l'hélicoptère. Enfin, une caméra GoPro orientée vers le bas est fixée à la plateforme pour collecter des images/vidéos de la surface glaciaire. La vitesse de vol optimale est de 30-40 km/h, ce qui permet d'obtenir des données georadar de qualité adéquate.

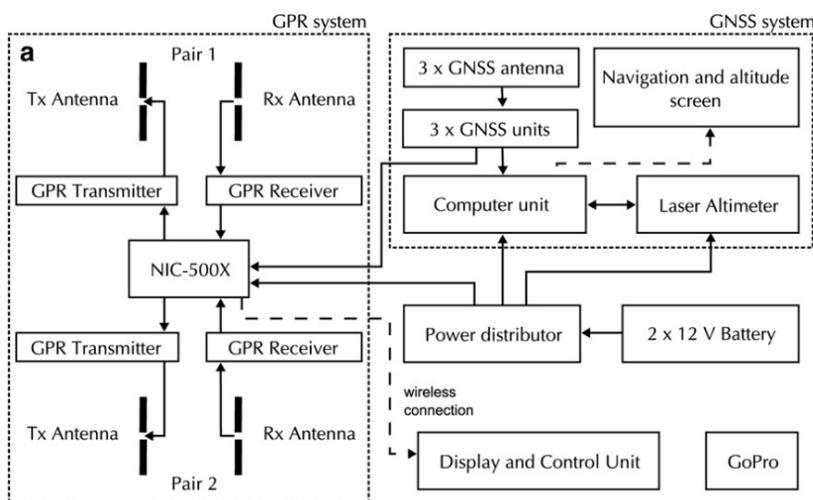


Figure 5 – Description des composantes du système AIR-ETH (sources ETHZ – Geosat SA)



Figure 6 – Système GPR AIR ETH lors d'une campagne de mesures dans le Val d'Hérens

3.3 Résultats obtenus

Les campagnes d'acquisitions menées de 2016 à 2021 ont fourni une quantité de données GPR qui ont été post-traitées par l'ETH Zürich et géoréférencées à l'aide des données de positionnements traitées par Geosat SA. Ceci a permis de cartographier les épaisseurs de glace de 251 glaciers, représentant 81% de la surface glaciaire suisse et 93% de son volume total de glace.

Ces données sont actuellement disponibles sur le portail cartographique national (www.geoadmin.ch sous le nom de couche « Epaisseur des glaciers ».

Pour plus de détails sur ce projet, un article scientifique rédigé par l'ETHZ – institut de géophysique est aussi consultable en ligne avec la référence suivante : « Ice thickness distribution of all Swiss glaciers based on extended ground-penetrating radar data and glaciological modeling »⁵.

5. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/485883>

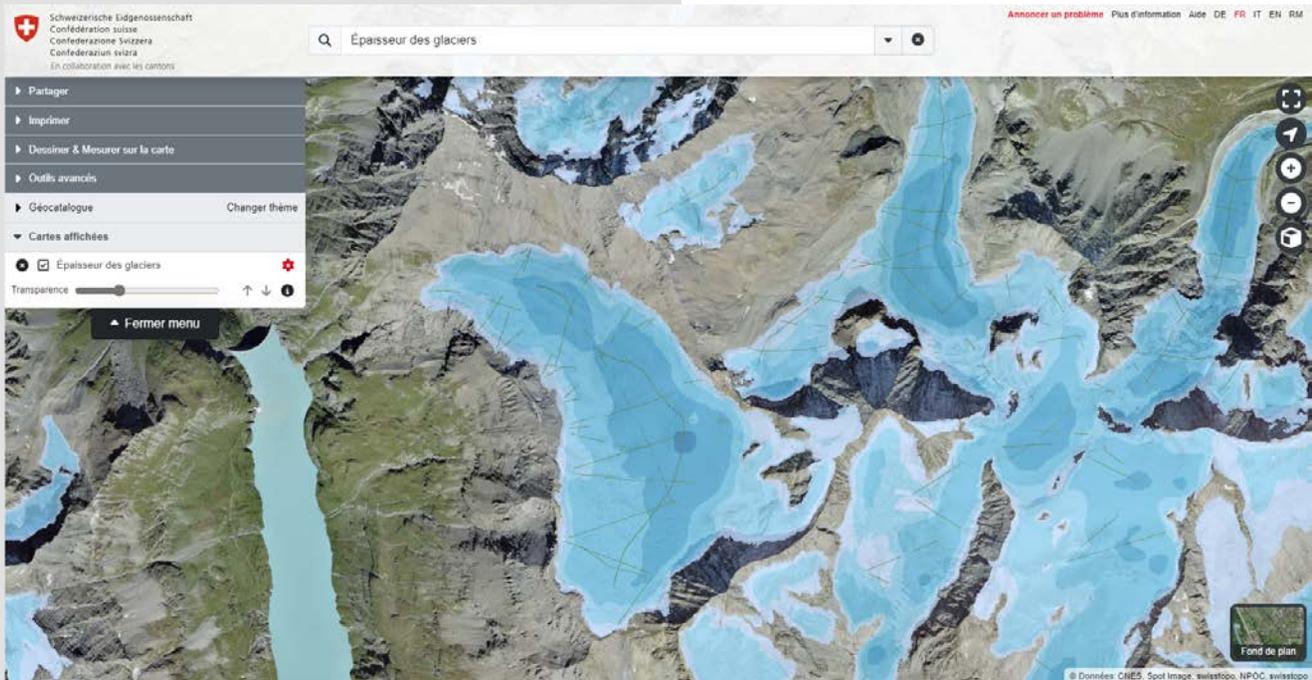


Figure 7 – Extrait de la couche Épaisseur des glaciers sur le guichet cartographique national : map.geo.admin.ch

Cette étude améliore considérablement notre compréhension de l'épaisseur de la glace et du volume des glaciers suisses, avec des implications importantes pour les projections futures sur la gestion de l'eau et les impacts du changement climatique. Les données recueillies sont publiques et donc disponibles pour d'autres recherches.

4. Conclusion

Le géoradar est une technologie en plein essor qui ouvre de belles perspectives pour notre métier car il fait appel à de nombreuses compétences propres ou connexes à celles du géomètre, notamment le traitement d'images, la gestion des données de plusieurs capteurs, leur

synchronisation et leur géoréférencement. Les domaines d'application principaux sont aussi intéressants pour notre profession car ils nous concernent de près ou de loin, que ce soit le génie civil, la construction, l'environnement ou la géologie par exemple. Enfin, les développements actuels des différents fournisseurs visent principalement à améliorer l'ergonomie et la portabilité des géoradars pour en faciliter leur mise en œuvre sur le terrain. Des exemples récents de géoradars embarqués sur des drones commencent à se voir sur le WEB. Ceci ne manquera pas d'éveiller notre curiosité et notre intérêt. Affaire à suivre donc.

Patrick LATHION, ing. EPF/SIA et géomètre breveté, Geosat SA, Sion