

# LA GAZETTE

# N°29

# 2024

Techniques  
d'auscultation

Le bulletin d'information  
de l'association des  
Ingénieurs Géomètres de  
Suisse Occidentale

I G S O INGÉNIEURS GÉOMÈTRES  
DE SUISSE OCCIDENTALE

**GEO**  
SUISSE

Schweizerischer Verband für Geomatik und Landmanagement  
Société suisse de géomatique et de gestion du territoire  
Società svizzera di geomatica e di gestione del territorio  
Societad svizra da geomatica e da gestiun dal territori

*Dans la présente Gazette, le mode masculin inclut indistinctement les personnes de tout genre.*

**LA GAZETTE IGSO**

© 2024

## **REDACTION**

Bertrand **CANNELLE**

Yves **DEILLON**

Jérôme **HENRY**

Michel **KASSER**

## **CONTACT**

Secrétariat IGSO

Route du Lac, 2 - Paudex

Case postale 1215

1001 Lausanne

 : 021 796 33 43 / 00

 : [igso@centrepatronal.ch](mailto:igso@centrepatronal.ch)

 : [www.igso.ch](http://www.igso.ch)

## EDITO

Nous avons le plaisir de présenter ce nouveau numéro de la Gazette IGSO, qui est consacré aux techniques d'auscultation, aussi bien sur les aspects logiciels, que matériels, ainsi que dans des conditions variées. Les contributeurs nous viennent de toute la Suisse Romande et nous font partager leurs projets et leurs résultats.

Nous avons la chance d'avoir une profession avec des applications très larges qui nécessitent une mise à jour permanente de nos bureaux, aussi bien dans nos compétences que dans les capteurs, jusqu'à leurs intégrations et à la diffusion des résultats.

Une bonne nouvelle est arrivée cet été : la filière Génie territorial a pu intégrer le programme PiBS (bachelor intégrant la pratique), ce qui permet d'augmenter significativement le bassin de recrutement, et donc potentiellement le nombre d'ingénieur HES dans notre domaine. Le dernier article de ce numéro y est d'ailleurs consacré !

Bonne lecture à toutes et tous !

**Bertrand CANNELLE**

## SOMMAIRE

Table des matières

<b>Édito</b> . . . . .	<b>3</b>
<b>Assemblée Générale de l'IGSO</b> . . . . .	<b>4</b>
<b>NELCAS, plus-values de la méthode des moindres carrés avec contraintes</b> . . . . .	<b>6</b>
<b>Une autre manière de détecter des mouvements</b> . . . . .	<b>16</b>
<b>Application du nivellement hydrostatique</b> . . . . .	<b>21</b>
<b>Surveillance des parois rocheuses</b> . . . . .	<b>27</b>
<b>Microtunnelier sous voies CFF</b> . . . . .	<b>34</b>
<b>Le georadar, une technologie d'avenir au service du géomètre</b> . . . . .	<b>41</b>
<b>HEIG-VD : Intégration du programme PiBS</b> . . . . .	<b>49</b>

# ASSEMBLÉE GÉNÉRALE DE L'IGSO

## NYON - 17 AVRIL 2024

Le comité était composé, en 2023, des membres suivants : Etienne Borloz (président de l'OVG), Gaëtan Martin (président de l'AGG), Sébastien Monnier, Philippe Calame, Audrey Ueberschlag (vice-présidente), Bertrand Cannelle et moi-même, avec comme secrétaire général, Albin de Miéville du Centre Patronal. L'association comptait 108 membres, dont 56 étaient présents ou représentés.

En 2023 IGSO a commencé à utiliser les outils de gestion proposés par Geosuisse, ils ont donné toute satisfaction.

Réflexions sur les bases de financement de l'IGSO :

Jusqu'à présent le mode d'inscription à IGSO était inadapté à des participations hors des cantons VD et GE, nous avons donc décidé de changer la situation pour les bureaux de géomètres privés, avec un dispositif unique

basé sur la masse salariale des employés géomaticiens. Désormais il existe un tarif individuel de 180 CHF et pour tous les bureaux, une cotisation de 0.14 % de la masse salariale, sur une base déclarative similaire à ce qui est utilisé pour Geosuisse.

Par ailleurs le Comité a initié une démarche auprès des administrations et entreprises publiques employant des géomaticiens pour les solliciter financièrement, sur une base volontaire. Tout ceci dans l'idée de faire baisser les charges sur les bureaux, tout en complétant notre association en direction d'autres collègues romands, afin de permettre de mieux travailler à la promotion de nos métiers, en particulier auprès des jeunes, et puis aussi de dynamiser nos actions de formation, etc.

**Michel KASSER** , Président IGSO

## PRIX IGSO

Notre association remet tous les ans, le prix IGSO, aux diplômé.e.s des différents formations en géomatique, qui récompensent les meilleurs travaux de diplôme.

Mme Romana Chiara Paganinia (cf. figure 1) reçu le prix IGSO lors de la cérémonie de remise des diplômes du master en Sciences et Ingénierie de l'Environnement (SIE) pour son excellent travail de diplôme intitulé : *"Assessment of Multitemporal Drought Damage in Beech Forests Using Commercial Smallsats"*.



Figure 1 – Mme Romana Chiara Paganini (à droite) et Michel Kasser, président de l'IGSO.

M. Fabien Délèze (cf. figure 2) a reçu le prix IGSO lors de la cérémonie de remise des diplômes du Master en Développement Territorial (MDT), orientation Ingénierie géomatique (IG) pour son excellent travail de diplôme intitulé : *"Développement d'un système de mesures astro-géodésiques"*.



Figure 2 – M. Fabien Delèze (à gauche) et Bertrand Cannelle, membre du comité IGSO.  
©Anouk Ruffieux, 2024.

Nous adressons nos plus vives félicitations aux élu.e.s et nous leur souhaitons une carrière pleine de plaisir et de réussite!

## INGÉNIEURS GÉOMÈTRES BREVETÉS 2024

A la suite des examens pratiques subis avec succès à Macolin, le titre d'ingénieur géomètre breveté a été décerné à :

- Bai, Isabelle, Bern
- Bosson, Adrien, Farvagny
- Caillet-Bois, Samuel, Collombey
- Casutt, Fabian, Küblis
- Chevrier, Méric, Bramois
- Däppen, David, Therwil
- Ducrey, Laura, Corseaux
- Forrer, Ernst, Appenzell
- Gentilini, Enea, Bellinzona
- Keusch, Patrick, Boswil
- Kùpfer, Vaïk, Nyon
- Monney, Claire, Sugiez
- Piringer, Felix, Chur
- Plattner, Benjamin, Oeschgen
- Stäuble, Oliver, Amriswil

Pour la relève de notre profession, il y a lieu de se réjouir du nombre important de lauréats en 2024. Nous adressons nos plus vives félicitations aux lauréats et nous leur souhaitons une poursuite de carrière pleine de plaisir et de réussite !

## DIPLÔMÉS DU CAS HES-SO EN GÉOMATIQUE & AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

Les diplômes du CAS HES-SO en Géomatique & Aménagement du Territoire ont été décernés, après validation d'au moins 2 modules et la réalisation d'un travail personnel à :

- Pabst, Sylvain
- Staub, Michaël
- Thevenet, Régis
- Vuignier, Jean-Marie

Toutes nos félicitations aux diplômés et plein de succès pour la suite de leur carrière !

# PLUS-VALUES DE LA MÉTHODE DES MOINDRES CARRÉS AVEC CONTRAINTES

## 1. Introduction

Pour les domaines de la géomatique qui nécessitent un haut niveau de qualité de la détermination spatiale des objets du territoire, la méthode des moindres carrés apporte des plus-values techniques et d'efficacité significatives par rapport aux déterminations topométriques classiques. En effet, en plus d'une détermination rigoureuse et qualifiée des points à partir d'observations variées, elle permet d'analyser le réseau des points nouveaux et son intégration dans le référentiel déterminé par différents types de calculs ainsi que des indicateurs statistiques rigoureux de précision et de fiabilité.

La définition spatiale d'objets du territoire (biens-fonds, bâtiments, ouvrages, installations techniques, etc.) ou d'exigences juridiques et techniques (limites des constructions, périmètres d'implantation ou de restrictions d'usage, points identiques éventuellement à des hauteurs différentes, etc.) comprend régulièrement des conditions géométriques, notamment, de parallélisme, de perpendicularité, de points homologues en planimétrie ou en altimétrie, de lieux géométriques (droite, arc de cercle, clothoïde, etc.).

Dans ce contexte, les déterminations de points nécessitant la gestion de conditions géométriques, comme l'acquisition et la mise à jour des différents systèmes cadastraux, utilisent des outils logiciels qui sont basés sur des méthodes de détermination topométriques classiques et séquentielles, dont la qualification de la précision et de la

fiabilité n'est souvent que qualitative, partielle et peu rigoureuse. Ces applications ont été développées durant les années 1970 – 1980 et résultent principalement des :

- différentes méthodes de détermination des points sur le terrain, en relation avec des types de capteurs utilisés,
- méthodes spécifiques pour assurer le respect de certaines conditions géométriques,
- règles « métier » empiriques pour assurer un niveau de qualité suffisant des déterminations des points.

Ces méthodes font souvent l'hypothèse que la précision des différents types d'observations est homogène, ce qui n'est pas forcément le cas selon les capteurs mis en œuvre et/ou la récupération d'observations existantes. De plus, les distances de contrôle ne servent qu'à fiabiliser, dans le meilleur des cas, les coordonnées des points, mais ne participent pas à leur détermination.

La Haute École d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (HEIG-VD), suite à un travail de bachelor de Matteo Casto « Réalisation d'une plateforme de calcul par les moindres carrés des points fixes et des points de détail combinés, adaptée aux spécificités de la MO »<sup>1</sup> portant, en particulier, sur l'intégration naturelle des conditions géométriques directement dans l'ajustement selon les moindres carrés a commencé à développer depuis 2023 une solution logicielle NELCAS<sup>2</sup> proposant :

- une normalisation xml des observations et conditions géométriques
- une solution modulaire, transparente et moderne de la mise en œuvre de la méthode des moindres carrés avec conditions géométriques.

Initialement, le premier objectif du développement de NELCAS portait sur la mise en œuvre d'une solution pédagogique moderne et adaptative pour les cours de « maîtrise foncière et systèmes cadastraux ». Progressivement les domaines d'utilisation et les publics cibles se sont étendus.

## 2. Méthode des moindres carrés avec contraintes

L'estimation des moindres carrés est une approche statistique générale permettant d'obtenir la solution de maximum de vraisemblance d'un vecteur d'inconnues à partir d'observations distribuées de manière gaussienne :

$$\mathbf{l} \sim N(\mathbf{\check{I}}, \mathbf{K}_{\mathbf{II}})$$

avec :

- $\mathbf{\check{I}}$  : le vecteur des observations vraies.
- $\mathbf{K}_{\mathbf{II}}$  : La matrice de variance-covariance des observations.

Le vecteur des observations est relié au vecteur des inconnues par les équations d'observation qui sont souvent exprimées de la façon suivante (modèle fonctionnel de Gauss-Markov sans contraintes) :

$$\mathbf{l} + \hat{\mathbf{v}} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}})$$

avec :

- $\mathbf{l}$  : le vecteur des observations.
- $\hat{\mathbf{x}}$  : le vecteur des inconnues estimées.
- $\hat{\mathbf{v}}$  : le vecteur des résidus estimés.
- $\mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}})$  : le vecteur des fonctions qui relient les observations aux inconnues.

Ainsi, trouver le vecteur des inconnues selon la méthode des moindres carrés correspond à trouver les valeurs de  $\hat{\mathbf{x}}$  qui minimisent la somme des carrés des résidus pondérés en fonction de leurs écarts-types théoriques. Mathématiquement cela s'exprime de la façon suivante :

$$\hat{\mathbf{x}} = \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmin}} \hat{\mathbf{v}}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{v}}$$

avec :

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{\mathbf{II}}^{-1} \quad \text{et} \quad \mathbf{Q}_{\mathbf{II}} = \frac{1}{\sigma_0^2} \cdot \mathbf{K}_{\mathbf{II}}$$

La Figure 1 présente de manière intuitive la solution selon les moindres carrés d'un exemple simple d'une droite passant au mieux par trois points en explorant le champ de l'ensemble des valeurs possibles pour le vecteur des inconnues.

1. <https://tb.heig-vd.ch/7721>

2. NELCAS : NETwork Least-square adjustment for CAdastral Surveying

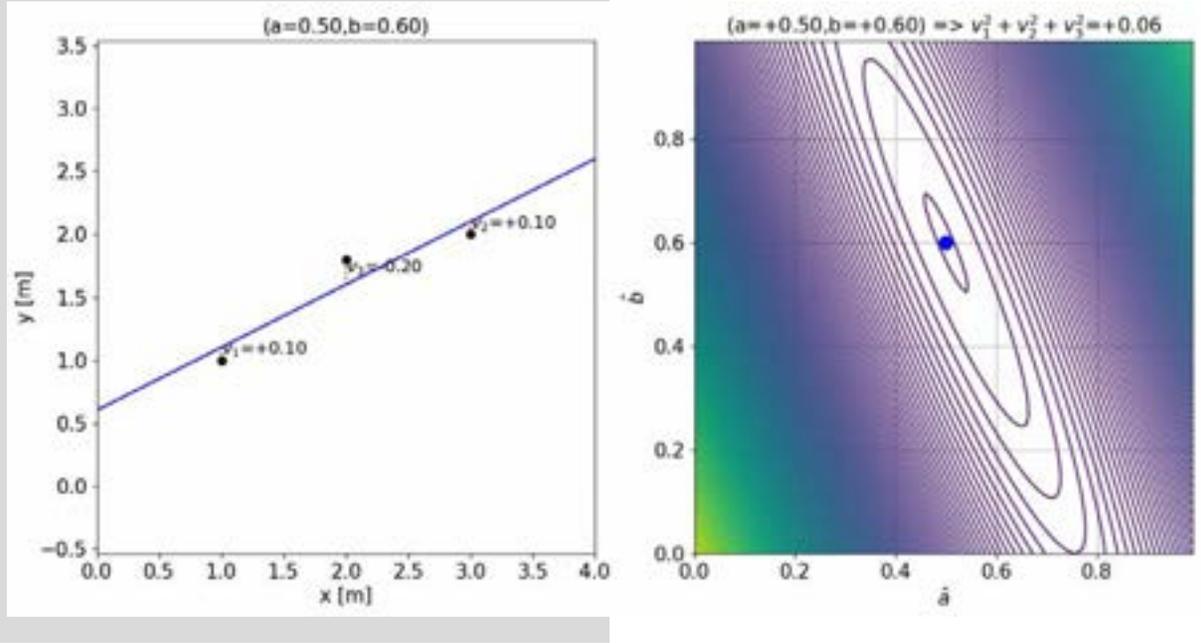


Figure 1 – (Gauche) Droite déterminée par la méthode des moindres carrés (Gauss-Markov sans contraintes) passant au mieux par trois points. (Droite) Représentation de la somme des résidus au carré en fonction des paramètres inconnus de la droite. Le point bleu représente la solution qui minimise la somme des résidus au carré.

Dans cet exemple, le modèle mathématique de Gauss-Markov sans contraintes est le suivant :

$$l = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} \quad \hat{x} = \begin{pmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{pmatrix} \quad K_{ll} = I \implies P = I$$

avec le modèle fonctionnel suivant :

$$\underbrace{\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix}}_l + \underbrace{\begin{pmatrix} \hat{v}_{y_1} \\ \hat{v}_{y_2} \\ \hat{v}_{y_3} \end{pmatrix}}_{\hat{v}} = \underbrace{\begin{pmatrix} \hat{a} \cdot x_1 + \hat{b} \\ \hat{a} \cdot x_2 + \hat{b} \\ \hat{a} \cdot x_3 + \hat{b} \end{pmatrix}}_{f(\hat{x})}$$

Le modèle Gauss-Markov avec contraintes donne la possibilité d'ajouter des équations de contraintes à l'estimation de la solution des moindres carrés. Ainsi, le modèle fonctionnel de Gauss-Markov avec contraintes peut s'écrire de façon générale par :

$$\begin{cases} l + \hat{v} = f(\hat{x}) \\ c(\hat{x}) = 0 \end{cases}$$

avec :  $c(\hat{x}) = 0$  les équations de contraintes entre paramètres inconnus.

La Figure 2 présente également, de manière intuitive, la solution selon les moindres carrés avec contraintes d'un exemple simple d'une droite passant au mieux par trois points avec la condition supplémentaire que la droite doit passer par le premier point. Dans cet exemple, le modèle mathématique de Gauss-Markov avec contraintes est le suivant :

$$l = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} \quad \hat{x} = \begin{pmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{pmatrix} \quad K_{ll} = I \implies P = I$$

avec le modèle fonctionnel suivant :

$$\begin{cases} \underbrace{\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix}}_l + \underbrace{\begin{pmatrix} \hat{v}_{y_1} \\ \hat{v}_{y_2} \\ \hat{v}_{y_3} \end{pmatrix}}_{\hat{v}} = \underbrace{\begin{pmatrix} \hat{a} \cdot x_1 + \hat{b} \\ \hat{a} \cdot x_2 + \hat{b} \\ \hat{a} \cdot x_3 + \hat{b} \end{pmatrix}}_{f(\hat{x})} \\ \underbrace{(\hat{a} \cdot x_1 + \hat{b} - y_1)}_{c(\hat{x})} = \underbrace{(0)}_0 \end{cases}$$

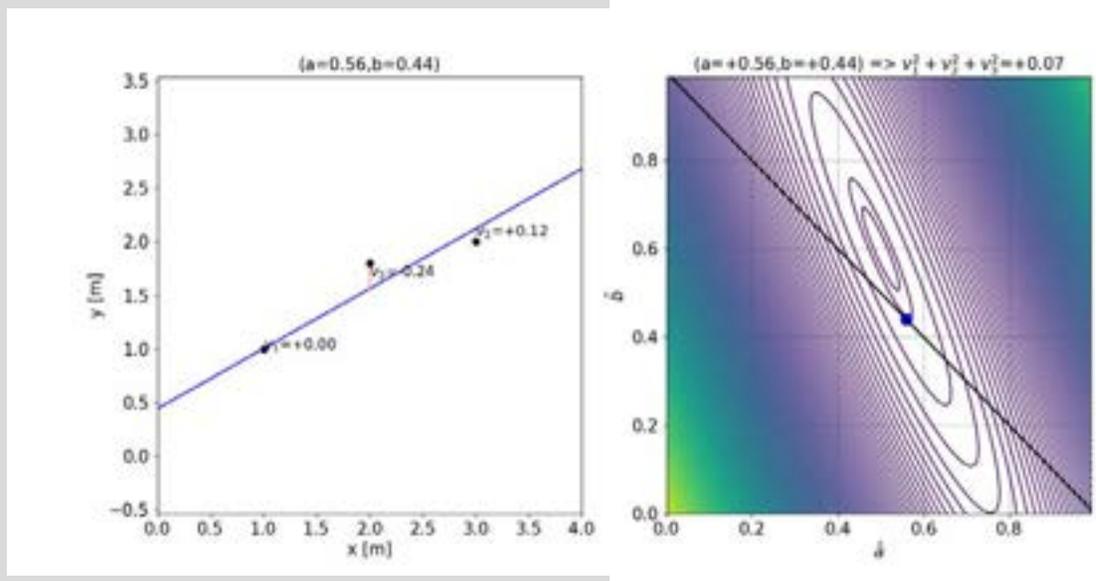


Figure 2 – (Gauche) Droite déterminée par la méthode des moindres carrés (Gauss-Markov avec contraintes) passant par le premier point. (Droite) Représentation de la somme des résidus au carré en fonction des paramètres inconnus de la droite. La droite noire représente l'espace des paramètres qui satisfait l'équation de condition. Le point bleu représente la solution qui minimise la somme des résidus au carré et qui satisfait l'équation de condition.

### 3. Plus-values de l'ajustement selon les moindres carrés avec conditions géométriques par rapport aux méthodes topométriques classiques

techniques et d'efficacité par rapport aux déterminations topométriques classiques sans aucun moyen et coût supplémentaire. Elles sont résumées dans le tableau ci-après.

La méthode des moindres carrés avec conditions géométriques apporte des plus-values

<p>► Abstraction Méthodes d'acquisition Données existantes</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le niveau d'abstraction plus élevé permet de traiter toutes les observations indépendamment des méthodes de détermination, des capteurs utilisés, des sources et générations des observations (nouvelle détermination ou récupération de données existantes). Ainsi, on gagne en souplesse, agilité et efficacité.</li> <li>• Les précisions des observations, dont les sources et qualités peuvent être multiples, sont documentées dans le modèle stochastique permettant ainsi de définir rigoureusement leurs influences dans la détermination des points</li> </ul>
<p>► Introduction des contraintes géométriques de manière naturelle</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La prise en compte des conditions géométriques directement dans la détermination des points est indispensable à la définition d'objets de certains domaines de la géomatique.</li> <li>• L'analyse des résidus des observations sur les points devant satisfaire des conditions géométriques permet d'apprécier le respect des contraintes par lesdits points.</li> </ul>

<p>► Qualification indépendante des observations et des points de rattachement</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les ajustements libre et libre-ajusté permettent de qualifier de manière indépendante les observations et les points de rattachement.</li> <li>• Cette distinction est indispensable pour effectuer les choix nécessaires, aussi bien sur les observations à considérer que sur le rattachement du nouveau réseau dans le référentiel déterminé.</li> </ul>
<p>► Indicateurs rigoureux de précision et de fiabilité</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La détermination d'indicateurs rigoureux de précision et de fiabilité permet d'apporter la preuve que les méthodes et capteurs mis en œuvre respectent les critères fixés dans le mandat.</li> <li>• On évite d'appliquer des règles « métiers » empiriques qui ne sont pas toujours pertinentes et adaptées aux opérations à réaliser.</li> </ul>
<p>► Analyses et contrôles rigoureux des résultats par des outils simples</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les bonnes pratiques dans la mise en œuvre des moindres carrés ainsi que des outils adaptés de visualisation sous forme graphique et de reporting complet permettent de simplifier et fiabiliser l'analyse et le contrôle du traitement des observations, respectivement de la détermination des points.</li> <li>• Il est possible d'automatiser de nombreux contrôles et d'améliorer ainsi la fiabilité et l'efficacité des processus de travail.</li> <li>• Une documentation complète et rigoureuse accompagne chaque traitement avec la mise en évidence des éléments essentiels à l'analyse des résultats.</li> </ul>
<p>► Répétabilité des processus pour de nombreux mandats</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'utilisation d'une même chaîne de traitement pour des mandats multiples permet de favoriser la stabilité et la répétabilité des processus de travail.</li> <li>• On est meilleur, en termes de qualité, de fiabilité et d'efficacité, si l'on répète régulièrement et de manière constante les mêmes processus de travail!</li> </ul>

## 4. NELCAS

### 4.1 Généralités

La solution développée par la HEIG-VD est aujourd'hui opérationnelle aussi bien pour des relevés courants que des mensurations technique et officielle. NELCAS ajuste selon les moindres carrés avec conditions géométriques la planimétrie et l'altimétrie de manière indépendante. Ainsi, la planimétrie est ajustée dans un espace à deux dimensions et l'altimétrie à une dimension (désigné comme un ajustement 2D + 1). Ce choix permet de combiner un grand nombre de types d'observations avec la souplesse nécessaire aux opérations traditionnelles de géomatique.



Les types d'observations traités sont :

- Levés polaires (directions, distances inclinées, angles zénithaux).
- GNSS (choix et détermination des paramètres usuels de transformation des sessions GNSS).
- Systèmes locaux (levés et cheminement orthogonaux, distances cumulées et systèmes homogènes de coordonnées et d'altitudes)

- Mesures simples (distances, gisements, dénivelées, observations de coordonnées et/ou d'altitude)
- Contraintes (alignement, perpendiculaire, arc de cercle ainsi que coordonnée est et/ou coordonnée nord et/ou altitude identiques entre deux points).

### 4.2 Interface utilisateur

NELCAS favorise une approche modulaire, transparente et rigoureuse du traitement selon les moindres carrés avec une interface utilisateur épurée, selon la figure 4. Son champ fonctionnel reste uniquement dans un contexte technique et les éléments opé-

rationnels sont facilement manipulables par un large spectre de professionnels ayant des compétences en géomatique. Ainsi l'utilisateur conserve la maîtrise de l'ensemble des éléments techniques et étapes du calcul à partir de quatre fichiers standardisés en XML :

- fichier des points
- fichier des observations
- fichier de l'ensemble des paramètres de l'ajustement selon les moindres carrés
- fichier des résultats de l'ajustement selon les moindres carrés en XML

Pour le moment, l'interface utilisateur est disponible uniquement en français.

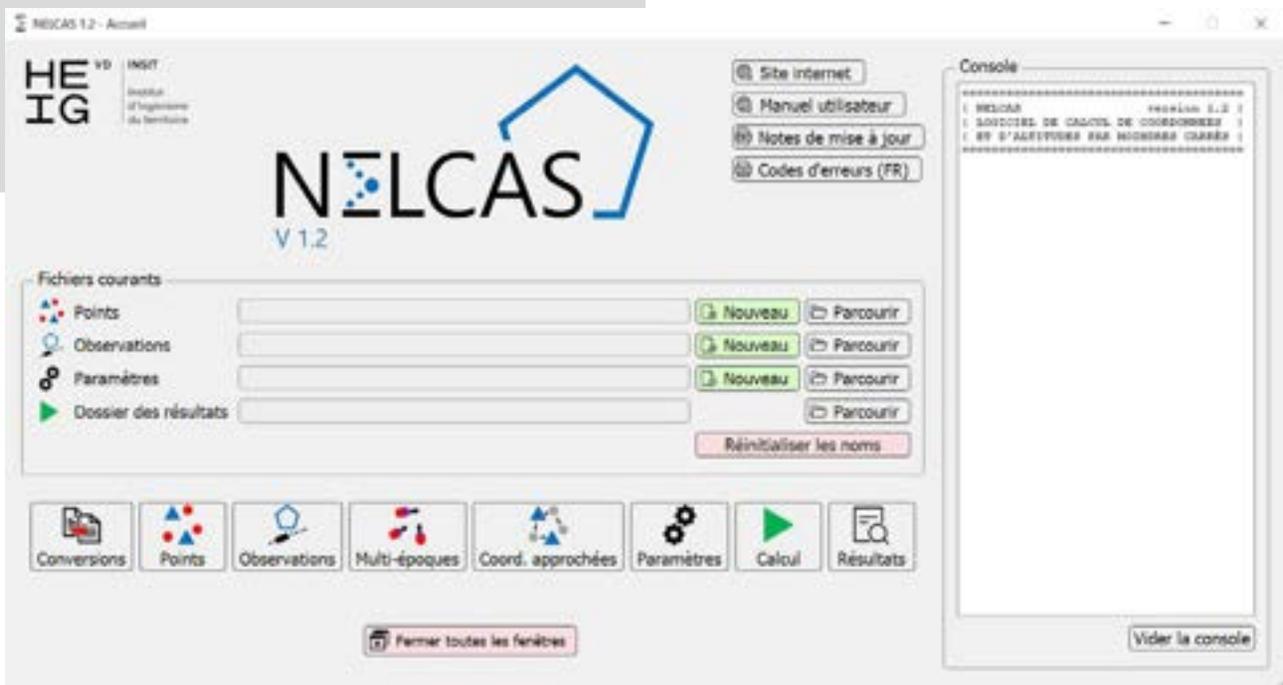


Figure 3 – Console épurée et modulaire de NELCAS

### 4.3 Périmètre fonctionnel

Le périmètre fonctionnel de NELCAS, mentionné à la figure 4, porte sur :

- Outils de conversion entre différents formats d'observations et de points
- Editeurs des points, des observations et des paramètres de l'ajustement selon les moindres carrés

- Outils pour la génération de fichiers consolidés permettant des traitements « multi-époques » de réseaux d'auscultation
- Moteur de détermination des coordonnées approchées des points nouveaux
- Moteur de calcul des observations et conditions géométriques selon les

moindres carrés permettant de réaliser des ajustements «libre», «libre-ajusté», «contraint» et «tout contraint».

- Consultation des résultats d'ajustement selon les moindres carrés avec conditions géométriques :

- sous forme synthétique à l'écran,
- sous forme d'un reporting complet dans un fichier pdf,
- au moyen d'un visualisateur graphique (ResMap).

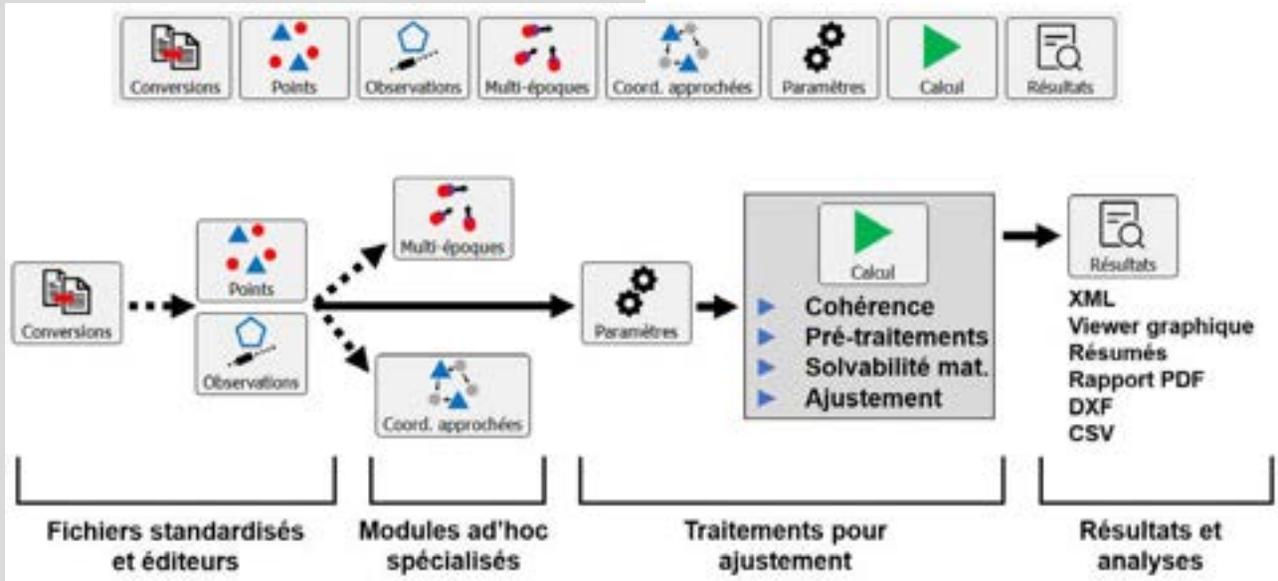


Figure 4 – Périmètre fonctionnel de NELCAS



Figure 5 – Interface de ResMap pour visualiser les réseaux et les résultats de l'ajustement

Un accent particulier a été mis sur les possibilités de consultation et d'analyses des résultats, en les visualisant directement à l'écran, sous la forme d'un reporting complet pdf ou de manière graphique au travers de ResMap. Il offre des possibilités de sélection, de tris et d'impression des réseaux comme le montre la figure 5.

#### 4.4 Domaines d'application

Dans le contexte des plus-values et des fonctionnalités de NELCAS, cette solution couvre les exigences de la plupart des mandats de la géomatique qui nécessitent un haut niveau de qualité de détermination spatiale et permet de qualifier les observations, le rattachement au référentiel déterminé ainsi que les coordonnées et altitudes des points nouveaux de manière rigoureuse. Ainsi, elle est particulièrement adaptée aux opérations telles que :

- implantation d'ouvrages,
- auscultation ponctuelle ou régulière d'infrastructures et ouvrages, y compris le traitement multi-époques associés,
- premier relevé, renouvellement, mise à jour permanente et autres opérations de mensuration officielle,
- détermination et mise à jour des objets de cadastre souterrain et d'autres types de cadastre comme par exemple les éléments de base du cadastre RDPPF,
- expertises techniques et/ou juridiques de situations particulières.

#### 4.5 Documentation, formation, accès au logiciel NELCAS et contact

Un site internet <sup>3</sup> fournit les principales informations et documents sur NELCAS et permet son téléchargement via l'onglet « Téléchargement ». Un manuel d'utilisation de NELCAS <sup>4</sup> est disponible et comprend en plus de la description systématique et détaillée de toutes les fonctionnalités, quelques exemples d'utilisation et l'ensemble des modèles mathématiques appliqués dans le traitement des observations et conditions géométriques.



Figure 6 – Cours ponctuel de la HEIG-VD sur NELCAS.

Dans le cadre de la formation continue HEIG-VD, l'équipe de projet a formé lors de 7 sessions d'une journée plus de 120 professionnels de la géomatique à l'utilisation de NELCAS. Son contenu était le suivant :

- concept et périmètre fonctionnel de NELCAS,
- rappel théorique sur les moindres carrés par une approche intuitive,
- présentation de manière systématique des fonctionnalités de NELCAS, illus-

3. <https://nelcas.heig-vd.ch/>

4. [https://nelcas.heig-vd.ch/wp-content/uploads/FR\\_Manuel\\_NELCAS.pdf](https://nelcas.heig-vd.ch/wp-content/uploads/FR_Manuel_NELCAS.pdf)

trée par des exemples et des propositions de bonnes pratiques,

- exercices pratiques par les participants.

Ces prochaines années, selon les demandes, la HEIG-VD organisera à nouveau des cours de formation sur NELCAS.

Les coûts de développement de NELCAS sont couverts par des projets de Ra&D en lien avec les évolutions et perspectives de développement des systèmes cadastraux de l'Institut d'ingénierie du territoire (INSIT) de la HEIG-VD. Aujourd'hui, environ une trentaine de bureaux en Suisse romande et au Tessin utilisent régulièrement et gratuitement NELCAS pour leurs mandats.

Dans le but de consolider et pérenniser l'organisation du développement et de la maintenance de NELCAS, des premières discussions sont en cours avec différents partenaires pour mettre en place une organisation participative plus large à l'échelle nationale.

Un des principes du développement de NELCAS est le partenariat avec les professionnels. L'e-mail [nelcas@heig-vd.ch](mailto:nelcas@heig-vd.ch) est à disposition pour échanger avec l'équipe de projet.

## 5. Perspectives et conclusions

Pour ces deux prochaines années, les perspectives de développement de NELCAS portent principalement sur les éléments suivants :

- amélioration constante de NELCAS, suite aux retours des utilisateurs et des expériences d'utilisation,
- développement de quelques outils

pour l'intégration de systèmes locaux (observations fictives, maillages triangulaires et autres),

- projet avec l'Etat de Vaud et swisstopo pour optimiser les processus de travail liés au renouvellement des mensurations officielles de type semi-numérique,
- version multilingue,
- préanalyses des réseaux avec des outils graphiques simples et rapides.

La méthode des moindres carrés avec conditions géométriques est une évolution naturelle des pratiques professionnelles qui apporte des plus-values significatives aussi bien techniques que d'efficacité des procédures de travail. Elle permet également de valoriser la qualité des prestations effectuées par les professionnels de la géomatique en fournissant un traitement et une documentation technique complète, en particuliers, avec des indicateurs rigoureux de précision et de fiabilité sur les points et les observations.

A tous les professionnels de la géomatique, n'hésitez pas à utiliser NELCAS et prenez-y du plaisir!

**Matteo CASTO** , Collaborateur scientifique

**Kilian MOREL** , Collaborateur scientifique

**Sébastien GUILLAUME** , Professeur en géodésie, méthodes d'estimation et positionnement

**Yves DEILLON** , Professeur en maîtrise foncière et systèmes cadastraux



THE ART OF  
GUE GUEL  
color: AN/VA

# WE WANT YOU

**TRAVAILLER EN EXTÉRIEUR OU AU BUREAU ?**

**PAS DE CHOIX À FAIRE, TOUT EST POSSIBLE DANS NOTRE PROFESSION !**

# UNE AUTRE MANIÈRE DE DÉTECTER DES MOUVEMENTS

*Suivi d'une culée avec des inclinomètres et des mesures de distances*



Figure 1 – Culée aval du viaduc de Milan (TPC), source swisstopo

## Introduction

Lors de la réfection de la conduite forcée qui alimente les Salines de Bex, les Transports publics du Chablais (TPC) ont demandé à ce que la culée aval du Viaduc historique de Milan soit surveillée. La surveillance était planifiée et s'est déroulée entre juillet 2022 et avril 2023 avec la phase la plus sensible du chantier durant l'hiver.

## Mise en place

La demande se basait sur un suivi en XZ par rapport au plan du mur en moellons à surveiller. Vu la saisonnalité, 3sigmas a préféré s'orienter vers un suivi par une combinaison de capteurs pour s'affranchir au mieux des conditions météo et de l'exigüité des lieux.

- Une chaîne inclinométrique positionnée entre un repère stable en altimétrie et un des angles de la culée. Ces 12 barres en carbone muni de MEMS placées horizontalement dans un tube en plastique (habituellement foré dans le sol) permettent de simuler un cheminement de nivellement (cf. figure 2)



Figure 2 – Utilisation d’une chaîne inclinométrique pour suivre les variations altimétriques proches du capteur 01Sup

- 2 capteurs inclinomètres sur batterie sont là pour détecter les tassements longitudinaux et le basculement de la culée (cf. figure 3).

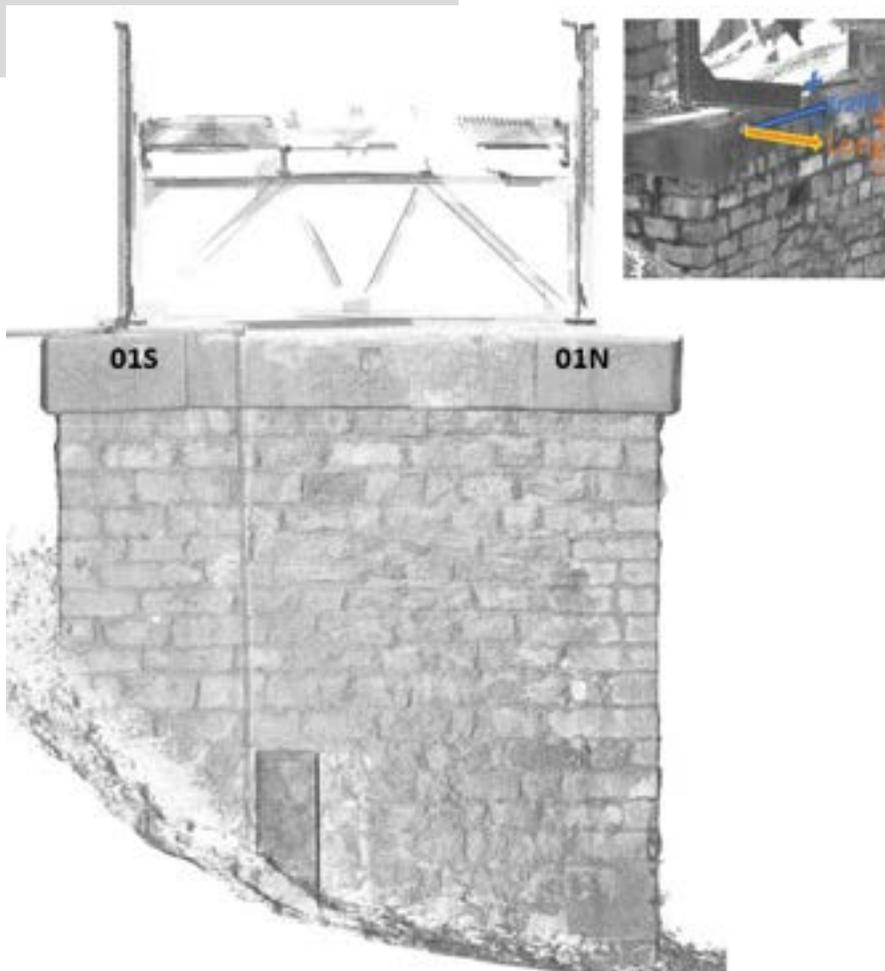


Figure 3 – Les 2 capteurs inclinaisons et de distance au sommet de la culée à contrôler (vue de face)

- Les mesures de distances vers la culée opposée permettent de savoir si c'est le haut ou le bas de la culée qui est l'élément stable (cf. figure 4)

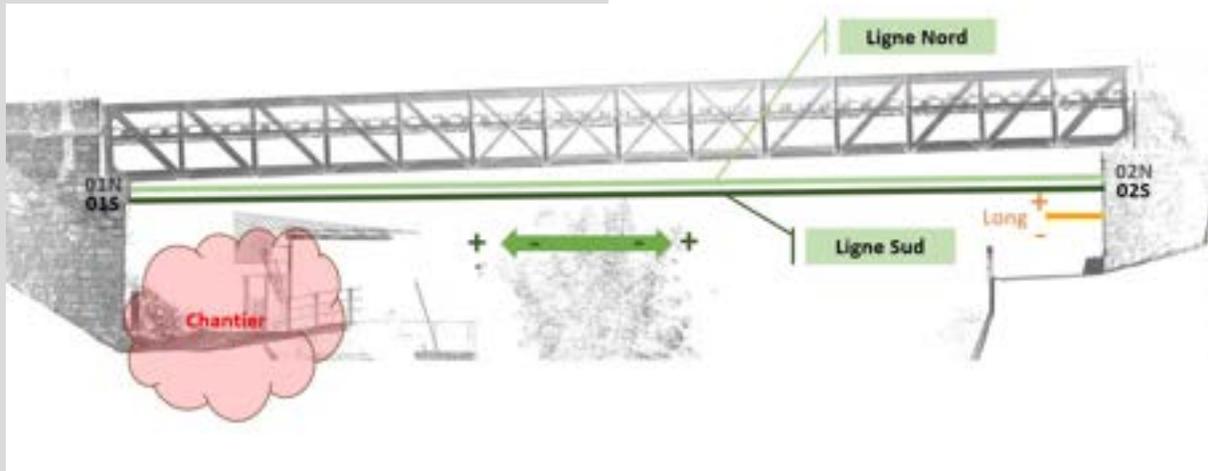


Figure 4 – Coupe de l'ouvrage avec les 2 distances mesurées et les capteurs 02N et S qui valident la stabilité de la culée amont

- Finalement, pour fiabiliser le dispositif, 2 inclinomètres autonomes contrôlent la stabilité de la culée amont (cf. figure 5).

Le comportement en un bloc de l'ensemble de la culée a dû être analysé et validé par les ingénieurs civils. La transformation des mesures d'inclinaisons et de distances en variations altimétriques et perpendiculaires au mur a demandé quelques manipulations mathématiques.



Résumé des formules		
	delta X	delta Z
01Ssup	-Δd	Delta Chaîne
01Sinf	-Δd - 4.5°*long	idem 01Ssup
01Nsup	-Δd	3.84 * moyenne Pente
01Ninf	-Δd - 4.5°*long	idem 01Nsup

Figure 5 – Formules pour passer des valeurs mesurées aux valeurs Δ X ΔZ à évaluer selon les seuils donnés

L'avantage de ce dispositif est d'être très peu sensible à l'environnement. Seules les distances entre les 2 culées (mesures réalisées à l'abri des 2 poutres métalliques maîtresses du viaduc) peuvent être perturbées par les travaux du chantier.



Figure 6 – Photos présent durant le chantier

## Suivi et conclusions

Ce dispositif permet d'augmenter la fréquence des mesures en cas de mouvements suspects. Cette technique permet facilement de fournir une mesure par minute, si nécessaire. Pour ce chantier, l'ensemble des capteurs, fournis via un réseau type Wifi, envoie vers une centrale GSM les mesures toutes les 30 minutes et toutes les 3h, puis la valeur médiane est analysée par rapport aux seuils d'alarmes. Le seuil le plus restrictif était à 2mm en altimétrie. Palier qui a été atteint principalement par les effets de la température sur l'ouvrage (un différentiel de plus de 30° en moyenne journalière entre la pose en juillet et les journées les plus froides de décembre).

Finalement, le système a fonctionné par tous les temps jusqu'en avril 2023, avec une seule intervention sur le chantier à la suite d'un problème de transmission GSM. Une autre alarme importante a été déclenchée par les gaz d'une foreuse qui étaient, malheureusement, juste sur le chemin d'une mesure de distance durant plusieurs heures.

La chaîne inclinométrique, habituellement placée dans des forages a montré une sensibilité aux variations de température plus importante que les autres capteurs. Un calcul de corrélation, avant les gros travaux, a permis d'évaluer son impact.

### Perspective

Avec une mesure supplémentaire, au milieu, entre les 2 culées, sur une plaque à 45°, 3sigmas a testé une configuration particulière qui permettrait de mettre en relation les changements de distance sur cette plaque avec les variations verticales. Les tests ont fourni des résultats intéressants, pour une distance plus courte que les 34m qu'il y avait entre les 2 culées.

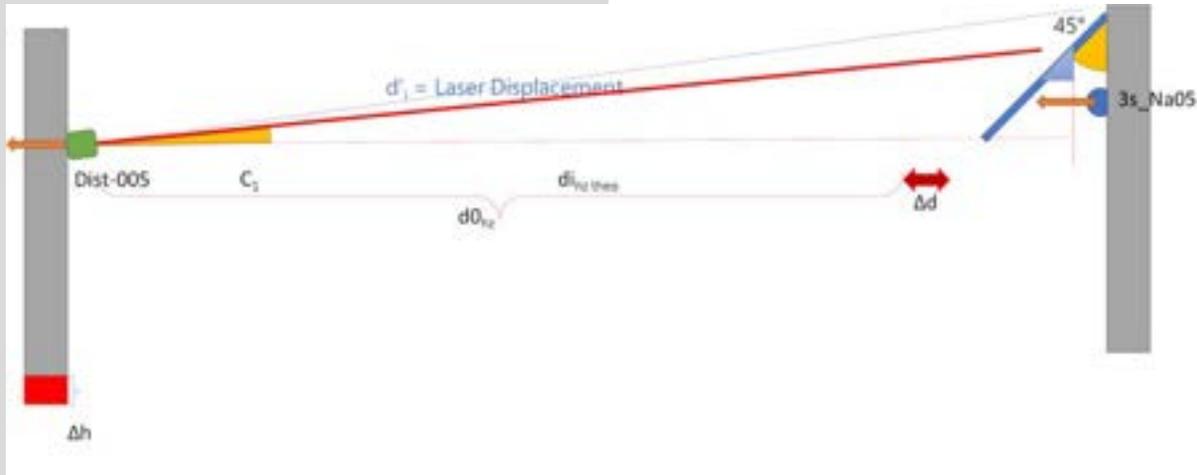


Figure 7 – : Schéma de la configuration testé sur une plaque à 45°.

**Vincent BARRAS**, 3sigmas SA  
[vincent.barras@3sigmas.ch](mailto:vincent.barras@3sigmas.ch)  
<https://3sigmas.ch>

# APPLICATION DU NIVELLEMENT HYDROSTATIQUE POUR LA SURVEILLANCE GÉOMÉTRIQUE D'UN BÂTIMENT DURANT DES TRAVAUX DE REPRISE EN SOUS-ŒUVRE



Figure 1 – Vue du bâtiment avant et après travaux de reprise en sous-œuvre

## Introduction

Dans le cadre de la création d'un nouvel arrêt de tram pour la ligne T1 de la région lausannoise, des travaux de reprise en sous-œuvre d'un bâtiment ont été nécessaires. Le tram reliera l'ouest lausannois au centre-ville de Lausanne, à la place de l'Europe, un important nœud de transport connectant les métros M1/M2 et le train régional LEB. Ces travaux comprennent

la démolition d'un mur de soutènement de 3,50 m de hauteur et la construction d'un nouveau mur en béton armé de 5 m de hauteur sous un bâtiment habité. La surveillance géométrique du bâtiment durant ces travaux est cruciale pour garantir sa stabilité et la sécurité des occupants et des ouvriers.

La reprise totale en sous-œuvre, d'une longueur de 20 m, présente plusieurs défis. Les travaux doivent être réalisés tout en

maintenant l'occupation du bâtiment et en tenant compte de sa proximité avec la rue de Genève, un axe majeur reliant le centre de Lausanne à l'ouest lausannois. Pour minimiser les risques, des mesures de sécurité rigoureuses ont été mises en place, incluant des mesures tachéométriques permanentes et automatisées sur 35 cibles extérieures, surveillées par deux stations totales pilotées par le système VIGILE.

Pour les points situés à l'intérieur du bâtiment, une solution classique avec prismes et stations totales n'était pas envisageable. Un espace restreint, encombré et sans visibilité stable rendait cette solution techniquement et financièrement non viable. La solution alternative proposée était le nivellement hydrostatique, une méthode basée sur le principe des vases communicants.



Figure 2 – Zone à surveiller à l'intérieur du bâtiment : 19 points répartis sur le plafond hourdi de la cave

### Réseau de nivellement hydrostatique

Le système de nivellement hydrostatique utilise un réseau de réservoirs de liquide reliés par des tubes permettant la circulation du liquide et de l'air. Le réservoir principal, placé dans une zone stable, sert de référence. De plus petits réservoirs, ou capteurs/jauges hydrostatiques, sont reliés

en chaîne (cf. figures 3 et 4). Les variations de pression dans ces capteurs, dues à des déplacements verticaux, permettent de déterminer les variations altimétriques. Les capteurs sont connectés à un collecteur de données qui enregistre les valeurs de pression, converties ensuite en millimètres, permettant une surveillance précise des mouvements.

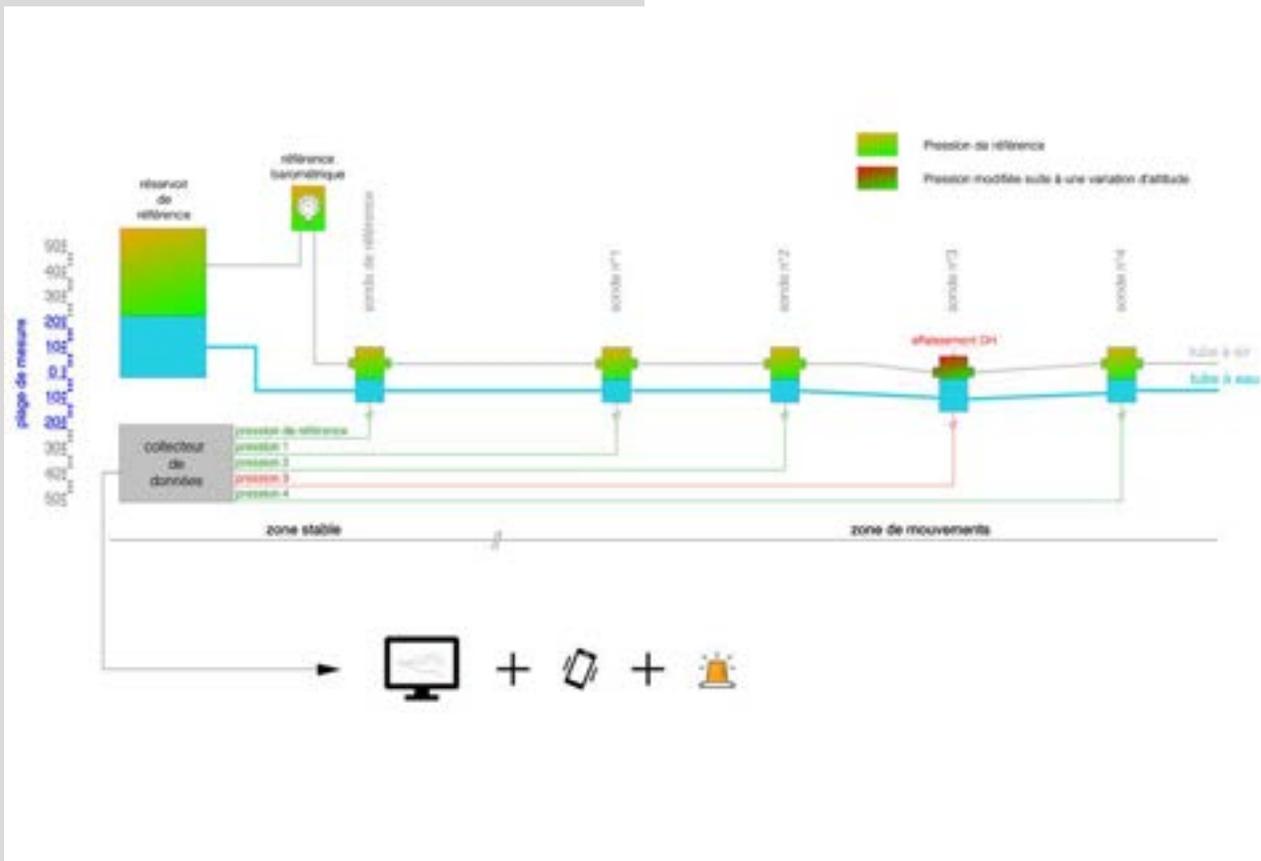


Figure 3 – Schéma de fonctionnement d'un système de nivellement hydrostatique



Figure 4 – Plan d'installation du système de nivellement hydrostatique

Le réseau installé pour ce chantier comprenait un réservoir de référence, une jauge de contrôle de stabilité, et 19 jauges placées selon les instructions de l'ingénieur. La longueur totale du réseau était de 30 m, bien que ce type de système puisse s'étendre sur plusieurs centaines de mètres. Le réseau incluait également un régulateur de pression, un collecteur de données, et un système de communication via un routeur 4G. Toutes les informations étaient ensuite

transmises au serveur central pour une diffusion des données et la gestion des alertes avec la plateforme LOGGIS.APP. L'installation du système dans un sous-sol encombré a nécessité une planification minutieuse. Un relevé 3D par laserscanning a permis d'identifier les obstacles et de dimensionner précisément les pièces du système. La protection des tubes et câbles par des gaines métalliques a minimisé le risque de dommages durant les travaux.

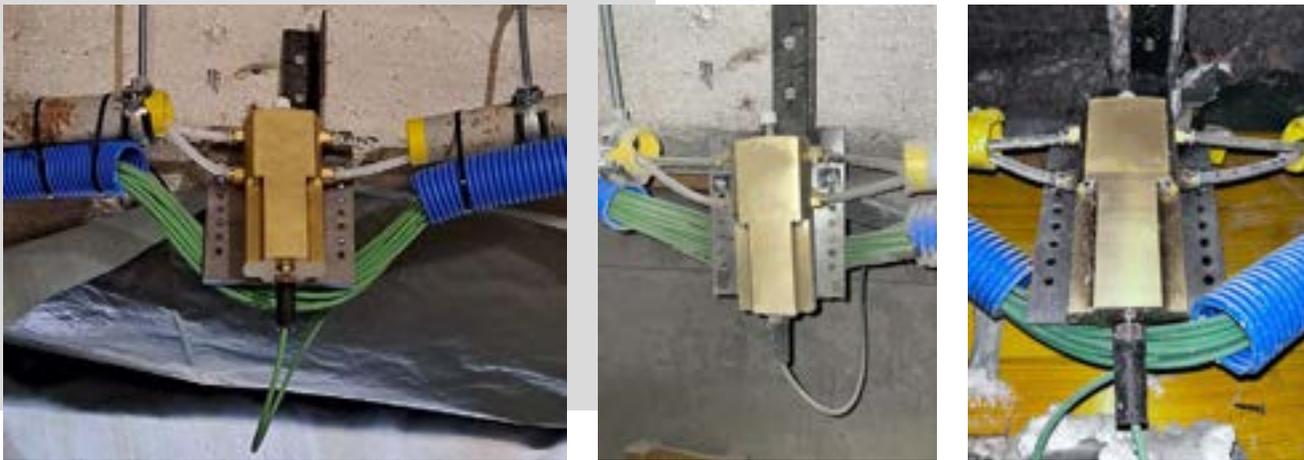


Figure 5 – Installation des sondes sur plateformes métalliques avec protection des tubes et câbles

La stabilité du réservoir de référence était primordiale, et des mouvements inattendus ont été compensés grâce à un prisme surveillé par le système de stations totales.

### Points de vigilance, avantages et inconvénients

Pour assurer le bon fonctionnement du système de nivellement hydrostatique, il est crucial de veiller à plusieurs points. Tout d'abord, une mise en place soignée du système est nécessaire, incluant la vérification et l'élimination des bulles d'air perturbatrices. De plus, il est primordial

d'assurer une installation la plus horizontale possible pour éviter des oscillations verticales qui pourraient affecter les performances du système. La protection du système contre les risques liés à l'activité du chantier est également essentielle, notamment en utilisant des gaines de protection métalliques fixées à la structure du bâtiment (cf. figure 5). Enfin, il est recommandé de disposer d'un système de contrôle indépendant, tel un géomonitoring tachéométrique ou d'organiser des campagnes de mesures régulières pour garantir la fiabilité et la pertinence des résultats diffusés.



Figure 6 – Plan d'installation du système de nivellement hydrostatique

Le système de nivellement hydrostatique présente plusieurs avantages significatifs. Sa robustesse industrielle est remarquable, avec une fiabilité assurée par la qualité de fabrication des composants, comme en témoigne son fonctionnement sans défaillance pendant 60 semaines d'activité. En termes de précision, le système offre une précision de +/-1 mm sans compensation de température, ce qui est suffisant pour de nombreux cahiers des charges, équivalant à celle des systèmes tachéométriques classiques. De plus, ce système est particulièrement adapté aux environnements confinés ou sans visibilité directe entre les capteurs, ce qui en fait une solution idéale pour les intérieurs de bâtiments ou les chantiers encombrés.

Cependant, le système présente également certains inconvénients. Sa mise en place est plus complexe par rapport aux systèmes classiques tels que les stations totales. L'initialisation du système prend plusieurs

jours, ce qui le rend inadapté pour les situations d'urgence, mais plutôt pour les situations qui peuvent être bien planifiées. Enfin, ce système n'est pas adapté aux situations présentant une forte différence de niveau entre les capteurs, nécessitant alors plusieurs réseaux à des altitudes différentes pour assurer des mesures précises.

### Conclusion

Le nivellement hydrostatique a permis de surmonter les défis liés à la surveillance géométrique dans des conditions difficiles. La mise en place d'un réseau de capteurs, bien que complexe, a offert une solution précise et fiable. Ce système faisait partie d'un dispositif de géomonitoring multicapteurs plus global, comprenant deux stations totales contrôlées par le système VIGILE et mesurant 35 prismes, et des capteurs hydrostatiques, intégrés à la plateforme de consultation et d'alerte en ligne LOGGIS.APP.



Figure 7 – Plateforme LOGGIS.APP : suivi des mesures en temps réel, conservation de l’historique des mesures et gestion des alertes

Le succès de ce projet démontre l'importance de la collaboration entre les différents partenaires de HYP-ARC MONITORING SA, qui, grâce à leur expertise, fournissent des solutions complètes et adaptées aux besoins des clients. Le nivellement hydrostatique, malgré ses contraintes, s'est avéré être une méthode efficace pour la surveillance géométrique dans des environnements complexes, offrant un complément viable aux méthodes classiques de mesure également présentes sur ce chantier. En résumé, le système a démontré une robustesse industrielle, une

précision adéquate pour les exigences du projet et une adaptabilité aux conditions difficiles du chantier, tout en soulignant la nécessité d'une planification minutieuse et d'une mise en œuvre soignée.

**Eduardo RODRIGUES** , ingénieur géomètre breveté

**Juliette BOUCHE** , Ingénieure INSA et KIT en géomatique  
 HYP-ARC MONITORING SA  
[info@hyparc-monitoring.ch](mailto:info@hyparc-monitoring.ch)  
[hyparc-monitoring.ch](http://hyparc-monitoring.ch)

# SURVEILLANCE DES PAROIS ROCHEUSES : UNE ALTERNATIVE ÉCONOMIQUE GRÂCE À LA PHOTOGRAMMÉTRIE ?

## 1. Introduction

Ces dernières années, l'utilisation d'une caméra unique s'est imposée comme une solution économique pour la surveillance périodique des parois rocheuses et des instabilités de versant. Contrairement au scanner laser terrestre, cette méthode de télédétection ne fournit pas directement des mesures 3D précises. En effet, elle génère des cartes de déplacements limités au plan de l'image capturée par l'appareil photo, ce qui limite la compréhension complète des déplacements et des mécanismes de rupture liés à des instabilités gravitaires.

Pour surmonter les contraintes souvent rencontrées sur le terrain, ce projet explore l'option d'installer un dispositif de surveillance à plusieurs centaines de mètres des parois rocheuses. L'implémentation d'un tel dispositif à longue distance représente une réelle nouveauté qui vise à élargir les possibilités de surveillance des falaises dans les années à venir. Pour résoudre ces défis, nous proposons de comparer des méthodes d'empilement d'images et de super-résolution tirant profit des images en série temporelle.

Enfin, le fait qu'un compartiment rocheux connaisse actuellement des déplacements présente un intérêt supplémentaire pour cette recherche, afin de valider *in situ* notre

méthode : une comparaison avec un extensomètre sera réalisée.

## 2. Situation

La falaise retenue pour tester l'expérimentation est située au-dessus de la Commune de Salvan, dans le Canton du Valais (Figure 1). Dans cette paroi, une écaille rocheuse d'environ 30 m<sup>3</sup> est actuellement en train de basculer et est surveillée en permanence par deux extensomètres (Figure 1).

Les données de déplacements récoltées *in situ* nous permettront de déterminer la précision de la surveillance 3D photogrammétrique. Plusieurs défis devront être relevés pour garantir un suivi 3D automatique de qualité à faible coût :

- (1) choix de matériel « low-cost » robuste et durable en extérieur ;
- (2) implémentation d'une méthode garantissant la précision des résultats ;
- (3) automatisation des traitements.

L'intérêt ici réside dans la possibilité de pouvoir appliquer et améliorer des techniques en partie développées, à un site surveillé qui présente actuellement des déplacements de 5 à 6 cm/an comme le montrent les mesures des extensomètres entre janvier 2021 et janvier 2023 (Figure 1) D'autre part, la surveillance de toute la paroi

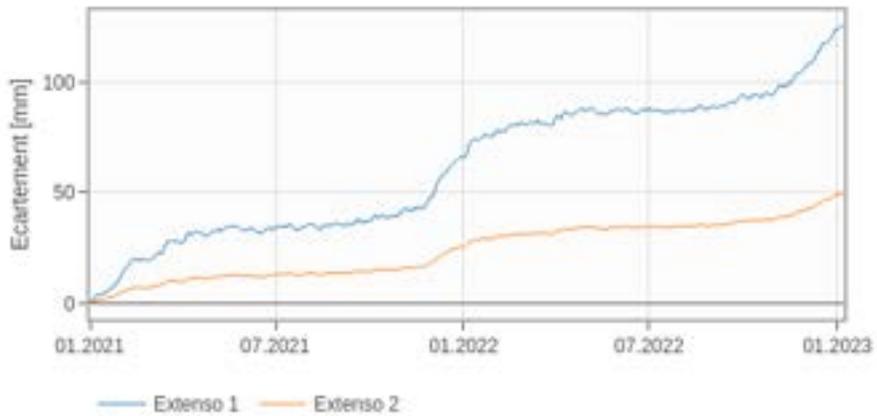
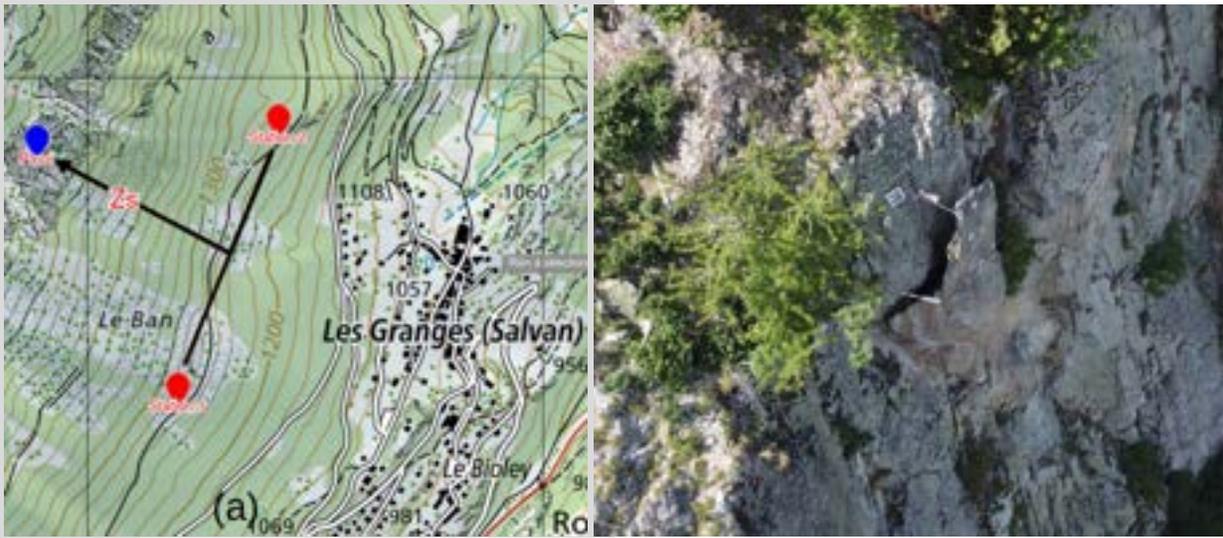


Figure 1 – Situation de la paroi rocheuse et des deux systèmes de mesure, écaïlle rocheuse basculant (vue drone) et mesures de deux extensomètres placés sur l'écaïlle rocheuse entre 01.01.21 et 07.01.23

visé également à déterminer quelles sont les possibilités et les limites d'une telle approche à plusieurs centaines de mètres de distance.

### 2.1 Préétude

Le déplacement de l'écaïlle rocheuse sera mesuré par photogrammétrie à l'aide de deux caméras industrielles 12 MP (Imaging Source DFK 38UX304) équipées d'objectifs de focale de 75 mm (Imaging Source TCL7528).

Les caméras sont positionnées de façon à viser l'écaïlle rocheuse à une distance d'environ 700 m avec une base (distance entre les caméras) égale à 650 m selon la

Figure 1.

Avec cette disposition, la taille d'un pixel sur une image correspond à environ 2.5 cm sur le terrain. La gamme de précision peut être estimée avec l'équation (1) qui relie la précision dans l'axe de vue  $Z_s$  pour un couple stéréoscopique (voir Figure 1), telle que décrite dans le livre [3].

$$S_z = \frac{h^2}{b \cdot c} S_{px'} \tag{1}$$

avec  $S_{px'}$  la précision de pointé en coordonnée image (de l'ordre de grandeur de la taille d'un photosite);  $b$  la distance entre les deux caméras;  $c$  la distance principale (ou focale) de la caméra;  $h$  la distance entre le système et à la falaise.

Notre configuration et spécification de caméras utilisées nous permettent de détecter théoriquement des mouvements autour de 3.5 cm.

Pour détecter des mouvements plus petits, nous proposons d'étudier différentes méthodes, comme l'utilisation d'un algorithme de Deep-Learning de super-résolution pour augmenter la résolution d'un facteur deux, ou l'utilisation de plusieurs images consécutives. Ces dernières pouvant servir soit à effectuer un empilement d'image par interpolation linéaire afin d'augmenter la résolution d'un facteur deux, soit à la multiplication des mesures afin de réduire les erreurs aléatoires. Ces points sont détaillés à les sections suivantes.

Pour faciliter la détection de mouvement, 5 cibles ont été placées sur l'écaille rocheuse et 4 cibles sur des zones fixes de la paroi rocheuse (Figure 1). Ces cibles de dimension 180x180 mm visibles depuis les deux stations permettent de déterminer le déplacement relatif de l'écaille par rapport à la paroi rocheuse et de détecter d'éventuels axes de basculement. Les positions des cibles ont été mesurées le 20 juin 2022 à l'aide d'une station totale.

## 2.2 Super-résolution

Les réseaux neuronaux convolutifs (CNN) sont largement utilisés pour le traitement d'images. Il existe de nombreuses applications surtout en ce qui concerne la reconnaissance d'images ou de vidéo, mais également pour l'élaboration d'algorithmes de super-résolution. Les recherches récentes sur le sujet ont progressé avec le développement de nouveaux réseaux de neurones de plus en plus performants [2]. La plupart des algorithmes de super-résolution utilisent des réseaux de neurones pré-entraînés et permettent d'effectuer un

sur-échantillonnage d'image d'un facteur 2 ou 4.

## 2.3 Empilement d'images (stacking)

L'empilement d'images (stacking) consiste à combiner plusieurs images acquises consécutivement afin de recréer une seule image. Le stacking est utilisé à la suite d'un sur-échantillonnage avec interpolation linéaire de chacune des images. Ceci permettant d'obtenir une image de plus haute résolution. Les tests effectués ont montré qu'au-delà de 50 images, le gain d'information reste inchangé.

## 2.4 Chaîne de traitement des images

Pendant une acquisition, 50 images sont prises consécutivement à chacune des stations. Toutes ces images passent d'abord par un algorithme de super-résolution décrit précédemment, ceci permettant d'obtenir des images sur-échantillonnées d'un facteur 2. Ensuite, les images sont dimensionnées avec une interpolation linéaire augmentant la résolution d'un facteur 2. Chacune de ces images est ensuite empilée afin de générer une seule image comprenant la valeur du pixel médian 50 autre, la chaîne de traitement et un exemple de résultat sont présentés à la Figure 2 ou une cible a été extraite.

## 2.5 Système et traitement des données

### a. Acquisition des images et envoi des données

Pour l'acquisition, les deux caméras Imaging Source sont connectées à des Raspberry-Pi 4 (RPI) permettant de déclencher l'acquisition et d'enregistrer les images. Une fois que l'acquisition est terminée, les images sont envoyées sur un serveur et

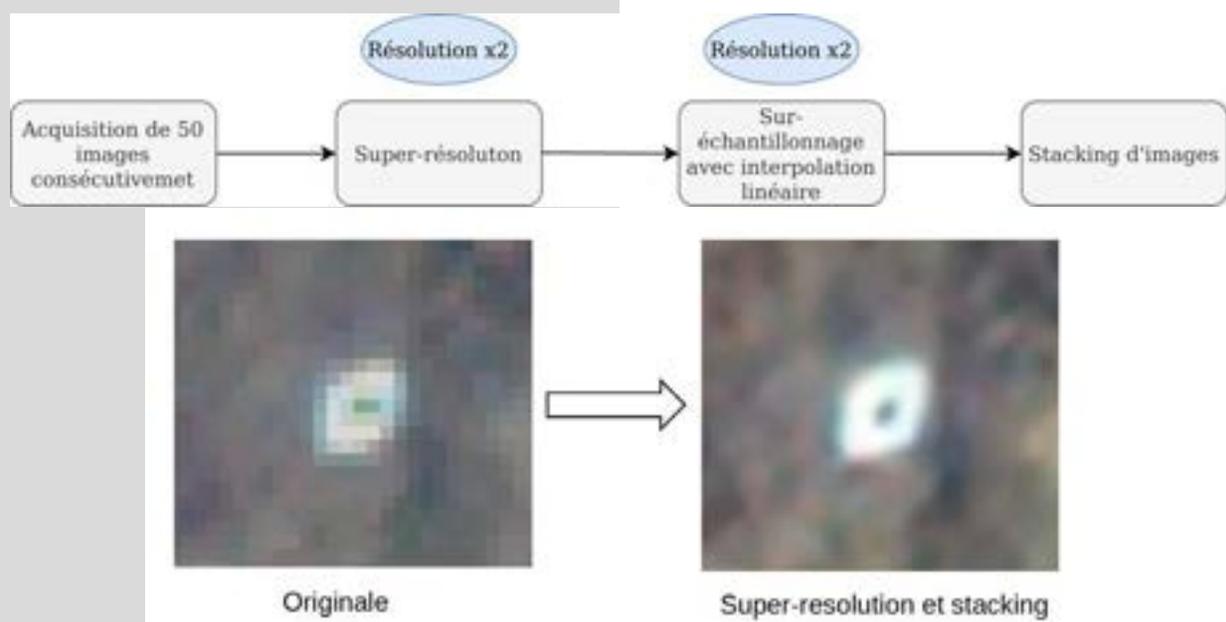


Figure 2 – Chaîne de traitement et Exemple de résultat de la super-résolution pour une cible

récupérées afin d'effectuer les chaînes de traitement. Une connexion internet 4G à chacune des stations permet l'envoi des données. Les RPI sont accessibles à distance par SSH. Afin d'être autonomes en termes d'énergie, une alimentation comprenant un panneau solaire et une batterie ont été installées. Un module Arduino MKR1400 est installé et permet de mettre hors tension le RPI ceci afin d'économiser de l'énergie. La communication avec l'Arduino se fait par SMS, il permet également de changer la fréquence d'acquisition des mesures. Du côté du serveur, les images sont enregistrées et triées selon l'heure et la date.

## b. Traitement des données terrain

### Limitations rencontrées

1) La première limitation rencontrée est le manque de points de liaisons pour aligner les caméras. Pendant l'installation des systèmes sur le terrain, les positions des cibles ainsi que les positions des caméras ont été relevées afin de contraindre au maximum le calcul photogrammétrique. De

par l'angle de visée important (environ 60 degrés) et la forte variation de relief autour de l'écaille rocheuse (surplombs et creux) peu de points de liaisons ont été déterminés. Différents algorithmes de détection de points de liaison ont également été testés (SURF, SOFT, DSP SIFT) sans succès.

2) La seconde limitation est la présence de micro mouvements durant certaines acquisitions. Les caméras étant positionnées sur des mâts comprenant le panneau solaire et l'alimentation, la prise au vent engendre une oscillation du système qui est visible sur les images prises consécutivement. Un décalage de quelques pixels implique une variation des coordonnées images des 9 cibles positionnées sur la paroi. Ceci empêche d'effectuer correctement l'empilement des images étant donné que l'emplacement des cibles varie sur chacune des images.

### Solutions proposées

Pour palier au manque de points de liaison nous proposons d'effectuer un calcul de compensation photogrammétrique à la main en spécifiant la position *a priori* des

MI			SR			SI		
<b>0.033</b>	0.016	0.024	<b>0.039</b>	0.018	0.027	<b>0.060</b>	0.009	0.014
0.016	<b>0.025</b>	0.015	0.018	<b>0.031</b>	0.017	0.009	<b>0.058</b>	0.009
0.024	0.015	<b>0.030</b>	0.027	0.017	<b>0.036</b>	0.014	0.009	<b>0.059</b>

Table 1 – Matrice de variance-covariance a posteriori ( $K_{xx}$ ) pour : le multi-image (MI), la super-résolution (SR), et le single-image (SI).

cibles supposées fixes ainsi que la position des caméras.

Pour conserver l'avantage de l'empilement des images, nous proposons d'extraire les positions des cibles individuellement sur l'ensemble des 50 images pour chaque acquisition et de les insérer comme observation dans le calcul de compensation (multi-image - MI), cette méthode s'inspire de celle proposée dans [1]. Cette méthode permettra de recalculer l'orientation de chacune des 50 images, et ainsi corriger les effets dû à l'oscillation du mat.

La super-résolution (SR) combinée à l'empilement sera quand même testée malgré la présence de vent. Pour ce faire, une présélection manuel des images avec peu de vent sera effectuée en amont. Les résultats seront comparés aux données des extensomètres sur le Point 3 qui se trouve proche de l'extensomètre 1.

## 2.6 Résultats

La période d'acquisition a débuté au mois de novembre 2022. Ce moment de l'année a été choisi, car il s'agit de la période où des mouvements de plus grande amplitude sont mesurés par les extensomètres (cf. Figure 1). En outre, les acquisitions sont impactées par la météo (brouillard local le matin) ainsi que des problèmes d'alimentation électrique due au faible ensoleillement et au rétrécissement des jours d'hiver ont été observés. Ainsi, sur la période d'étude, environ 30% des images sont exploitables : ce qui permet un suivi quasiment quotidien

de l'écaille. Au vu de l'amplitude des mouvements et la précision *a priori* de notre système (de l'ordre du cm), nous n'avons pas jugé utile de mettre en place une stratégie d'amélioration de ce point (augmentation de la fréquence de mesure).

### Analyse de précision

Afin de qualifier la précision *a posteriori* de notre méthode, nous avons réalisé un calcul par moindres carrés et analysé les indicateurs statistiques fournis par cette méthode. En particulier, l'analyse de la matrice des variances-covariances *a posteriori* ( $K_{xx}$ ) montre des écarts importants (voir Table 1) : la SR et encore plus la MI permettent d'améliorer les variances de chacune des trois composantes (X, Y, Z), en la réduisant de moitié dans le cas de la MI par rapport à l'utilisation d'une seule image par caméra (SI), en augmentant raisonnablement les covariances (termes non diagonaux).

### Déplacements observés

La courbe de déplacement (cf. Figure 3) indique une tendance qui a l'air plus significative dans le cas de la MI que dans celui de la SR, ce qui est en lien avec l'analyse de précision précédente. Par ailleurs, la vitesse moyenne de déplacement en 3D du Point 3 par MI (0.85 mm/j) est légèrement plus importante que celle de l'extensomètre 1 (0.58 mm/j). Ceci peut s'expliquer par le fait que

l'extensomètre ne mesure un déplacement que sur un seul axe et non un déplacement 3D comme celui mesuré par photogrammétrie. Comme attendu, la vitesse mesurée par la méthode SR (0.15 mm/j) ne semble pas pertinente non plus.

## 2.7 Conclusion

En conclusion, dans le cadre de ce projet, nous avons développé et mise en place un système d'acquisition stéréoscopique autonome, afin de surveiller une écaille rocheuse sur la commune de Salvan. Le système est fonctionnel et permet de mesurer et récupérer quotidiennement les images sur un serveur de la HEIG-VD. Les positions des cibles sont extraites de manière semi-automatique de ces images. Deux méthodes différentes ont été testées afin de calculer le plus précisément possible les positions 3D des cibles : soit par super-résolution, soit par multi-image. Malgré les bons résultats visuels de la super-résolution, c'est la deuxième méthode qui donne la meilleure précision dans notre expérimentation. Cependant, dans les conditions difficile rencontrée à Salvan, la précision obtenue par notre système ne permet pas un suivi assez fin en comparaison des mesures à l'extensomètre de cette écaille, même si une première

courbe de tendance a pu être extraite. Ce projet ouvre de nombreuses perspectives, d'une part à court terme, car il permettrait de monitorer précisément des déplacements en se plaçant dans des conditions plus favorables (avec la possibilité de mettre les caméras plus proches de l'objet d'étude), éventuellement a une plus grande fréquence (même de nuit en utilisant des lumières type flash). À plus long terme, l'apport du multi-image et de la super-résolution pourrait être encore étudié en détail dans des conditions différentes.

## Remerciements

Nous tenons tout particulièrement à remercier Ludwig HAAS et Guillaume FAVRE-BULLE du Canton du Valais, pour nous avoir fourni l'aide et prêté le matériel nécessaire afin d'installer nos caméras sur le terrain, ainsi que François BAILLIFARD et Antoine GUERIN de Norbert SA, Martigny avec qui nous avons réalisé ce projet.

**Jason BULA**, Collaborateur scientifique,  
HEIG-VD

**Adrien GRESSIN**, Professeur de  
photogrammétrie, HEIG-VD



## Références

- [1] Xabier Blanch et al. « Multi-Epoch and Multi-Imagery (MEMI) Photogrammetric Workflow for Enhanced Change Detection Using Time-Lapse Cameras ». In : *Remote Sensing* 13.8 (2021), p. 1460.
- [2] Bee Lim et al. « Enhanced deep residual networks for single image super-resolution ». In : *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops*. 2017, p. 136-144.
- [3] T. Luhmann et al. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. De Gruyter Textbook*. De Gruyter, 2013. isbn : 9783110302783.

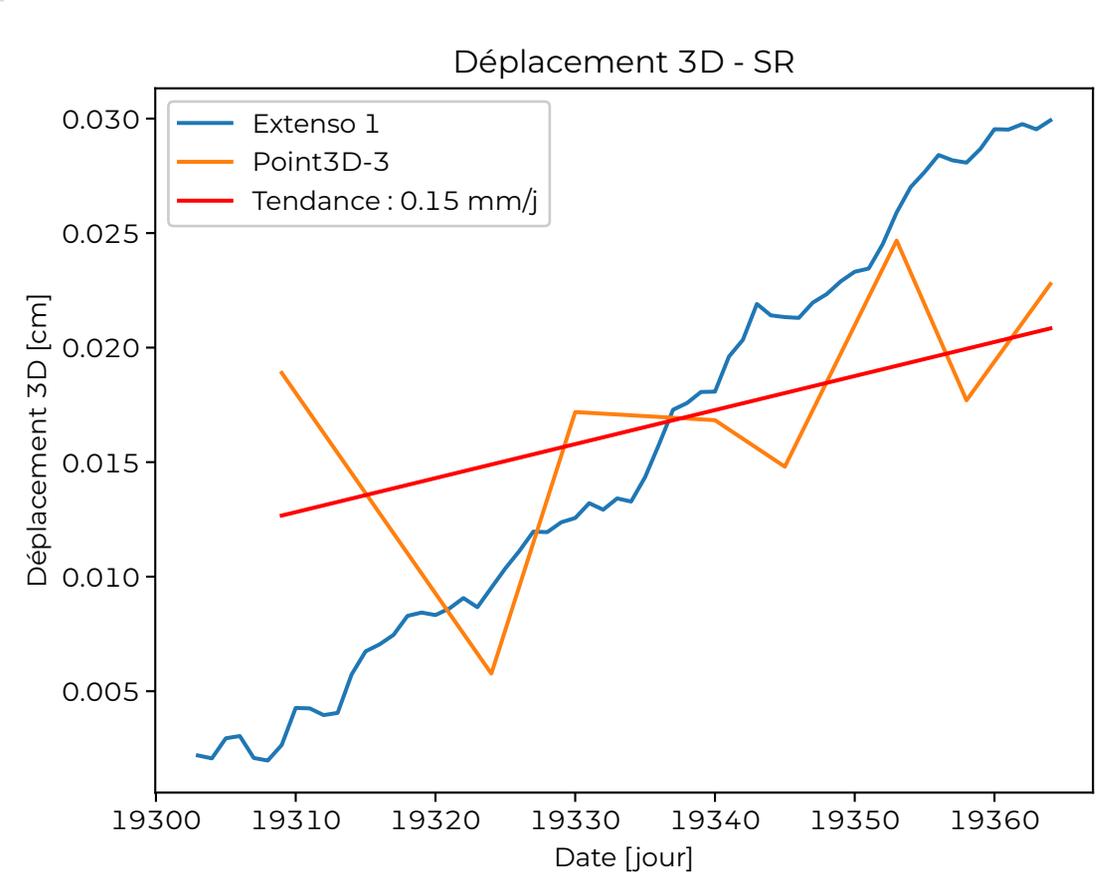
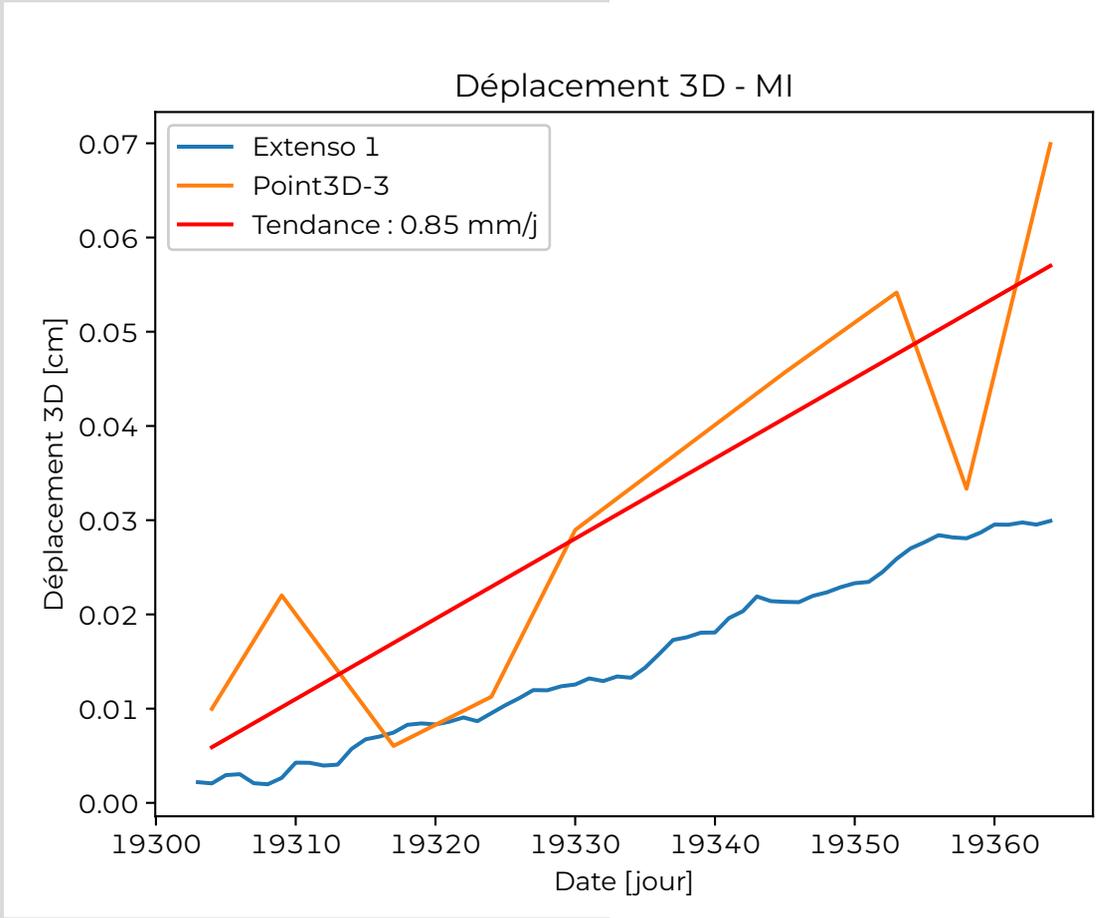


Figure 3 – Courbe de déplacement du Point 3 mesuré en multi-image (MI) en haut et super-résolution (SR) en bas, en comparaison de la valeur de référence de l’extensomètre.

# MICROTUNNELIER SOUS VOIES CFF : CAS DE L'OUEST LAUSANNOIS

Surveillance des voies par chaines inclinométriques et station totale

## Contexte

Le chantier prévoyait le passage d'un microtunnelier sous huit voies CFF dont six avec un trafic important. Afin de garantir la sécurité ferroviaire, le bureau IGemetris Technologies SA (IGT) a été mandaté pour la surveillance automatique des voies et des alentours lors du passage de la tête de la foreuse, mais aussi pour le suivi à long terme. La réglementation I-50009 des CFF devait être appliquée. La surveillance a commencé en février 2022 et une partie du système est encore en activité.

## Réglementation I-50009 des CFF

La réglementation des CFF (I-50009) travaille avec des valeurs de gauches, flèches verticales, flèches horizontales et d'inclinaison des mâts. Ces valeurs découlent des formules suivantes et se basent sur une distance entre les sections de mesure de 4.8 mètres.

**Gauche** : le gauche est la variation de dévers exprimé sur une base de 4.8 mètres. Cette déformation est la principale cause de déraillement.

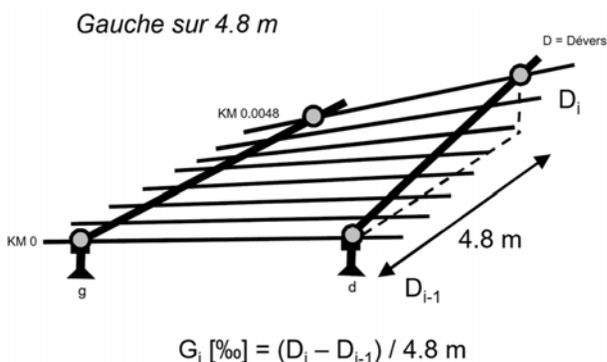


Figure 1 – Extrait du règlement relatif au calcul du gauche

**Flèche verticale** : elle est calculée sur une base de 9.6 mètres selon cette formule :

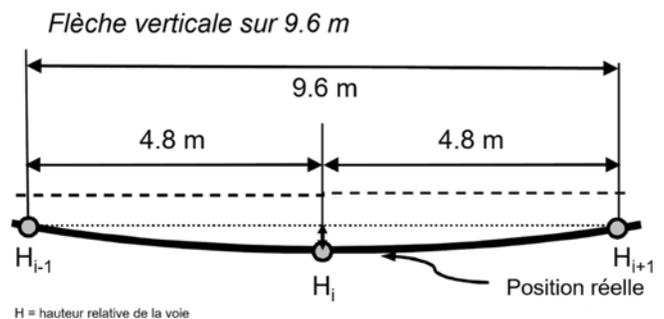


Figure 2 – Extrait du règlement relatif au calcul de la flèche verticale

**Flèches horizontales** : pour la flèche horizontale ( $Flh_i$ ), le principe est légèrement différent étant donné que des écarts latéraux ( $Ech_i$ ) par rapport à la mesure initiale sont utilisés pour chaque section et non pas des valeurs absolues comme des altitudes.

$$Flh_i = Ech_i - (Ech_{i-1} + Ech_{i+1}) / 2$$

Figure 3 – Extrait du règlement relatif au calcul de la flèche horizontale

**Inclinaison des mâts** : l'inclinaison des mâts est également un élément de la réglementation et doit être intégrée dans la surveillance. La variation est donnée en mm/m par rapport à la valeur de référence.

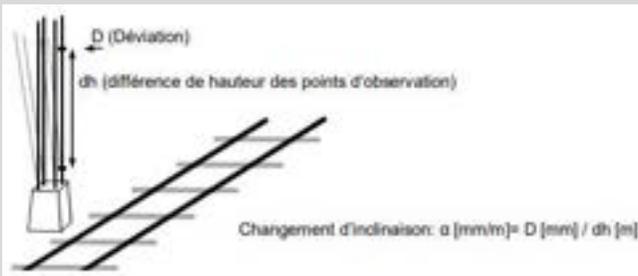


Figure 4 – Extrait du règlement relatif à la variation d'inclinaison des mâts

### Valeurs limites

Le règlement fixe en général les valeurs limites des déformations admissibles selon la vitesse de circulation. Elles sont classées en trois seuils (valeurs de précaution, d'intervention et d'intervention immédiate). Ses valeurs sont toujours déterminées et validées préalablement par les CFF.

Niveaux d'alarme	Valeur de de précaution	Valeur d'intervention	Valeur d'intervention immédiate
Vitesse (km/h)	$VR \leq 80km/h$	$VR \leq 80km/h$	$VR \leq 80km/h$
Gauche (‰)	2.5	3.5	4.0
Flèche verticale (mm)	9	12	16
Flèche horizontale (mm)	9	12	14

Figure 5 – Extrait du règlement relatif aux valeurs limites

### Exemples de déformations en images

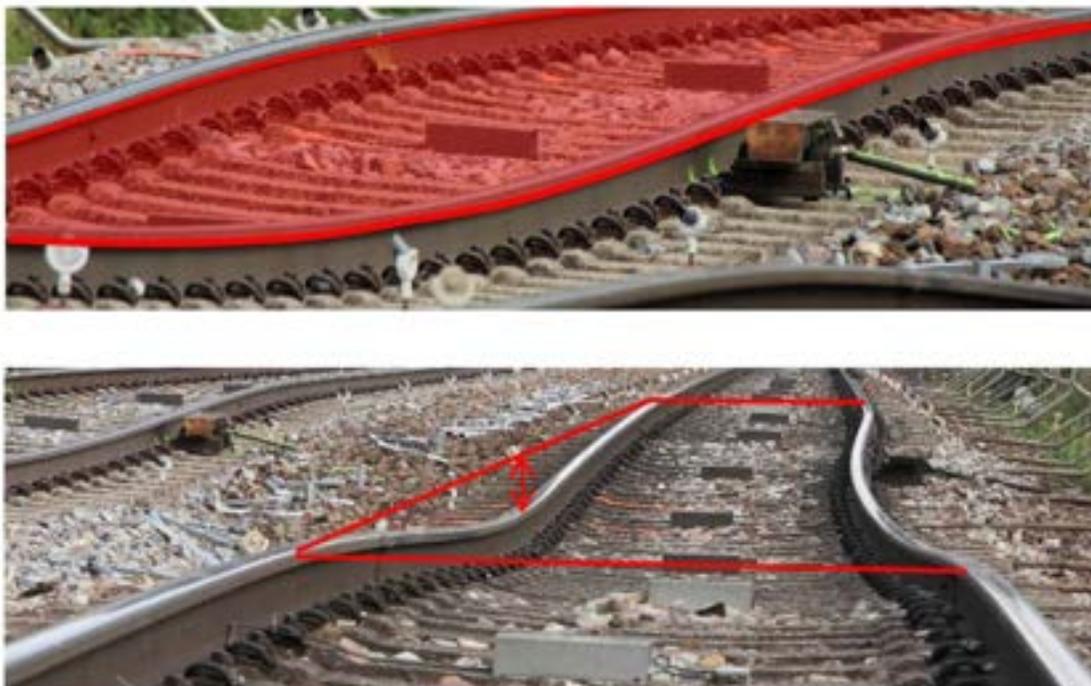


Figure 6 – Déformations du gauche et de la flèche verticale (extrait de la documentation track control d'Amberg 7D)

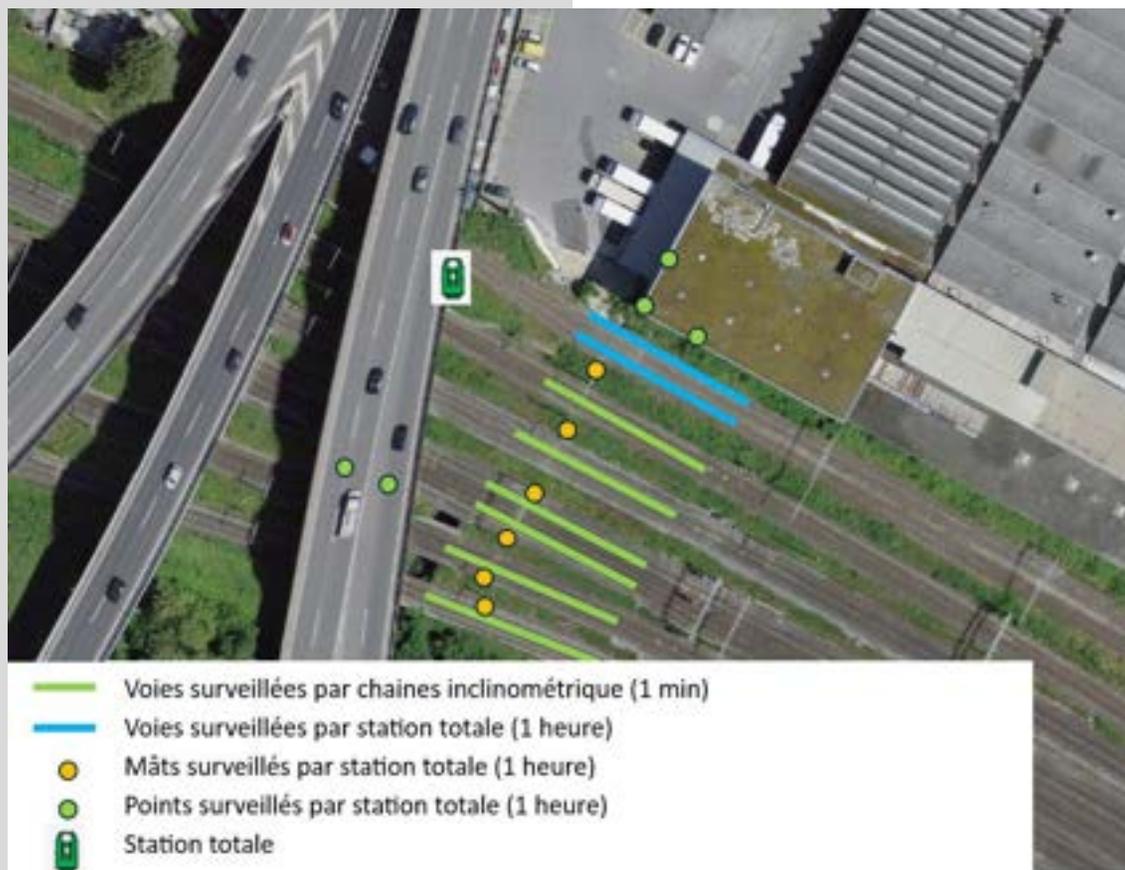


Figure 7 – Plan d’ensemble du site à surveiller

### Instrumentation utilisée

Les CFF demandent que l’instrumentation et la chaîne de traitement soient validées par une procédure afin de garantir la conformité à la réglementation I-50009 et d’autoriser le déploiement du matériel sur leurs voies. Tous les instruments installés par IGT ont été certifiés par les CFF (document officiel à l’appui) après avoir passé une mise à l’épreuve.

Les chaînes inclinométriques (le système Trackcontrol) sont fabriquées et fournies par « Amberg 7D », partenaire de longue date d’IGT. Ces chaînes sont composées chaque 4.8 mètres d’un capteur transversal (inclinomètre) permettant de déterminer le dévers d’une traverse (la différence de 2 dévers détermine le gauchissement de la voie) et d’un capteur longitudinal tous les 1.2 mètres pour la détermination de la flèche verticale par intégration des variations

angulaires. Il a été observé que l’utilisation d’un capteur longitudinal tous les 4.8 m ne permet pas d’atteindre les précisions nécessaires pour la détermination de la flèche verticale.



Figure 8 – Composition d’une chaîne inclinométrique

Ce système permet de mesurer avec un intervalle d’une minute. Cependant, la technologie embarquée ne donne pas

d'information planimétrique ouvrant la voie au contrôle de la flèche horizontale. Dans ce cas précis, le maître de l'ouvrage a estimé que cette composante pouvait être écartée au profit d'une plus grande réactivité de la surveillance.

Lors de l'installation, des mesures manuelles de la voie à la latte à deux prismes sont nécessaires afin de translater les mesures relatives de la chaîne aux valeurs absolues de la voie.

### Station totale



Figure 9 – Station totale

Une station totale traditionnelle a été installée sur la pile du pont d'autoroute. La station a été introduite comme station libre et sa position est recalculée à chaque session. Les différents points fixes (7 points) sont également contrôlés et validés lors de

chaque calcul. En cas de mouvements détectés, le point en question est écarté automatiquement du calcul de la station.

### 2 phases de surveillance

La surveillance mise en place peut être séparée en deux phases :

- Passage du microtunnelier
- Phase de suivi long terme

#### Phase 1 – mars à avril 2022

Selon les hypothèses de base posées par les bureaux d'ingénieurs, un mouvement rapide et brusque devait être observable sur les six premières voies (indiquées en vert sur la figure 7 « Plan d'ensemble du site à surveiller »). Des chaînes inclinométriques ont donc été installées permettant une mesure à la minute et un déclenchement d'alarme après trois mesures; soit 3 minutes. L'inclinaison des mâts et les points aux alentours (pont, bâtiments) sont mesurés par station totale à une fréquence d'une heure. Des prismes ont également été installés sur les voies permettant d'assurer une continuité des observations entre les phases 1 et 2.

Cette surveillance a duré deux mois avant d'être remplacée par celle mise en place en phase 2

#### Phase 2 – mai 2022 ->...

Cette phase doit permettre d'appréhender d'éventuels mouvements lents. Pour cela, la fréquence d'une heure a été jugée suffisante. Seule la station totale continue donc de mesurer les points situés sur les voies et les ouvrages environnants. Au moment de la rédaction de cet article, le système fonctionne toujours.

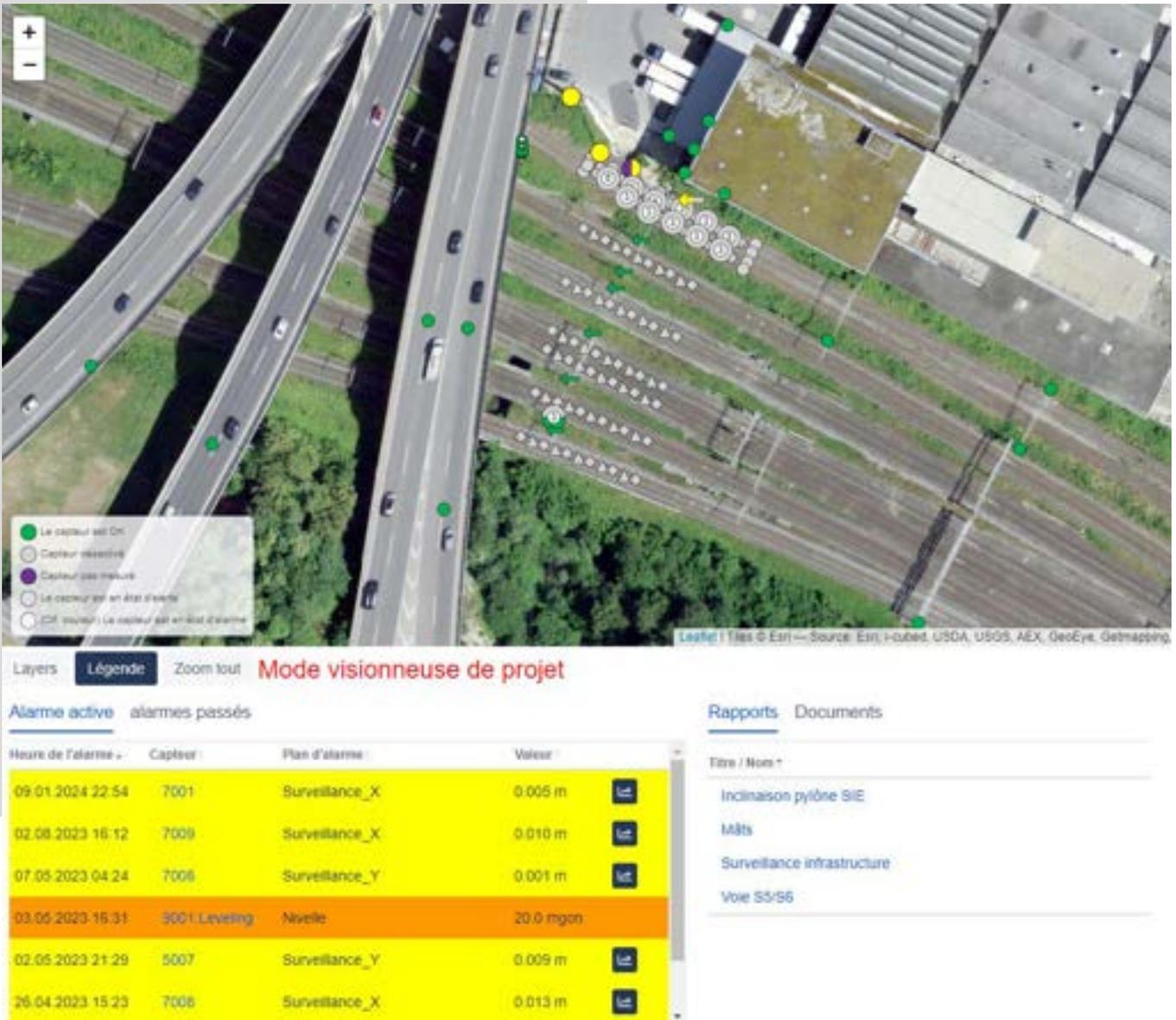


Figure 10 – Visualisation Geovis 4.0

**Représentation des résultats**

Les résultats sont importés sur la plateforme en ligne GEOvis 4.0.

Sur la carte, les différents points y sont représentés avec leurs statuts actuels (non mesurés, en alarme, OK). Les points désactivés (utilisés lors de la phase 1) sont indiqués en gris.

Sur la partie inférieure se trouve :

- les alarmes actives,
- les rapports disponibles et
- les documents pouvant être partagés (plans d'installation, photos...)

**Rapports**

Les rapports permettent de représenter toutes les informations utiles pour la bonne compréhension des mesures et le suivi du système.

Les valeurs de la réglementation CFF I-50009 y sont représentées avec les différentes valeurs limites déterminées avec le MO. En fonction des limites et conformément au plan de surveillance, les alarmes peuvent être envoyées par SMS et/ou par mail. Ci-dessous un exemple de représentation graphique des valeurs de gauche.

Des rapports internes permettent également de connaître l'état de santé du système et de détecter la provenance

d'éventuelles pannes (batterie, valeurs de compensateur, orientation de l'instrument...)



Figure 11 – Exemple de graphique du suivi du "gauche"

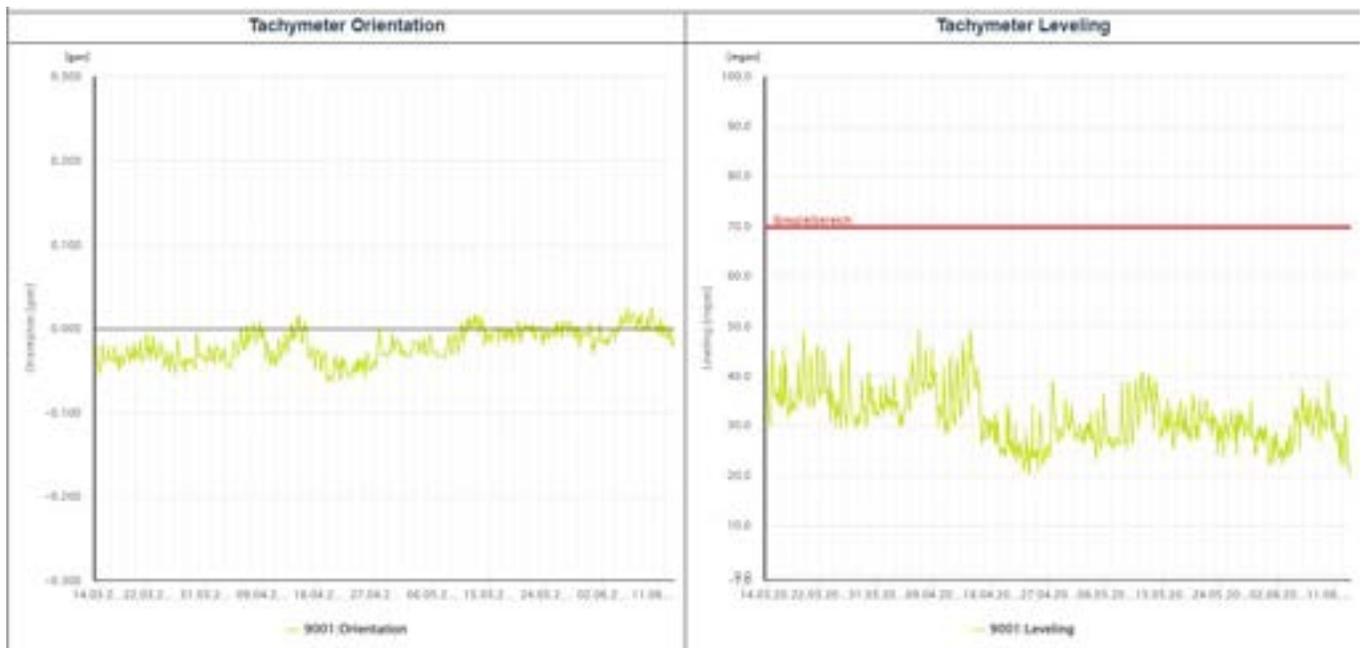


Figure 12 – Rapports internes

## Conclusion

Les systèmes de surveillance doivent être élaborés de cas en cas et de concert avec les bureaux d'ingénieurs et les maîtres de l'ouvrage. En fonction des besoins (environnement de mesure, typologie des mouvements, sensibilité des observations, engagement financier du MO ...), le choix du système le plus pertinent est effectué. Par exemple, pour ce chantier, il ne faisait pas sens de laisser en place des chaînes inclinométriques pendant 2 ans (balance

coût / opportunité défavorable). Pour surveiller les voies, le processus complet (matériel et traitement) doit être approuvé par les CFF. Le système mis en place a répondu pleinement aux attentes du Maître de l'ouvrage et des CFF

**David MARTY**, Membre de la Direction  
IGemetris Technologies SA  
Membre du réseau SIGN (Structural  
Intelligence Geo Network)  
Chexbres, Sion et Sonceboz-Sombeval

[www.igemetris.ch](http://www.igemetris.ch)

# 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.

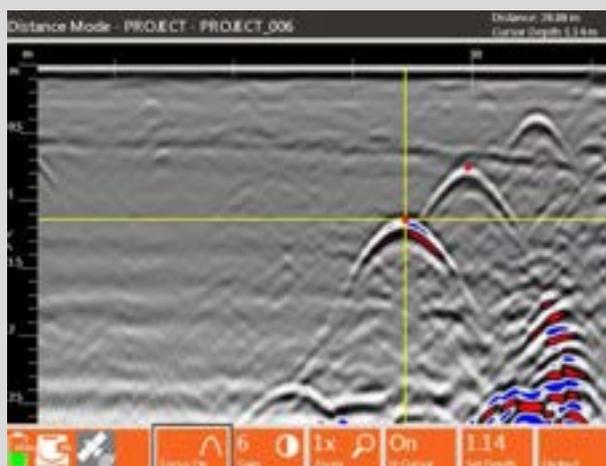


Figure 2 – Image radar en ton de gris (GSSI - SIR 4000)

## 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.



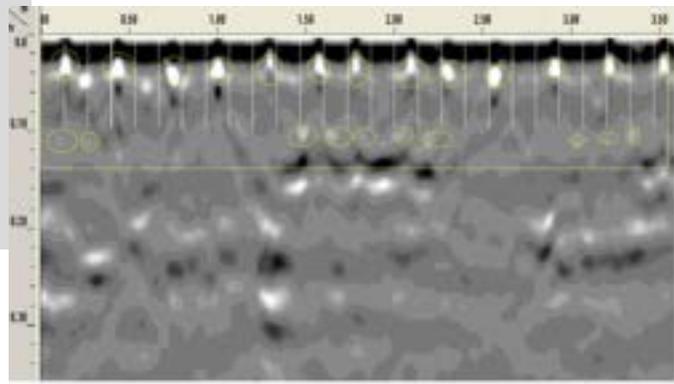
Recherche de conduites (PE, PVC, ciment, fonte, etc...)



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 héliportées, 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).

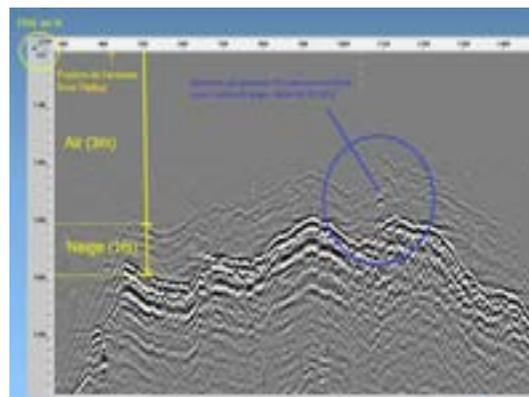


Figure 3 – Recherche de victime d'avalanche par georadar héliporté (image et scan georadar tirés d'un exercice de sauvetage en 2018)

- *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.

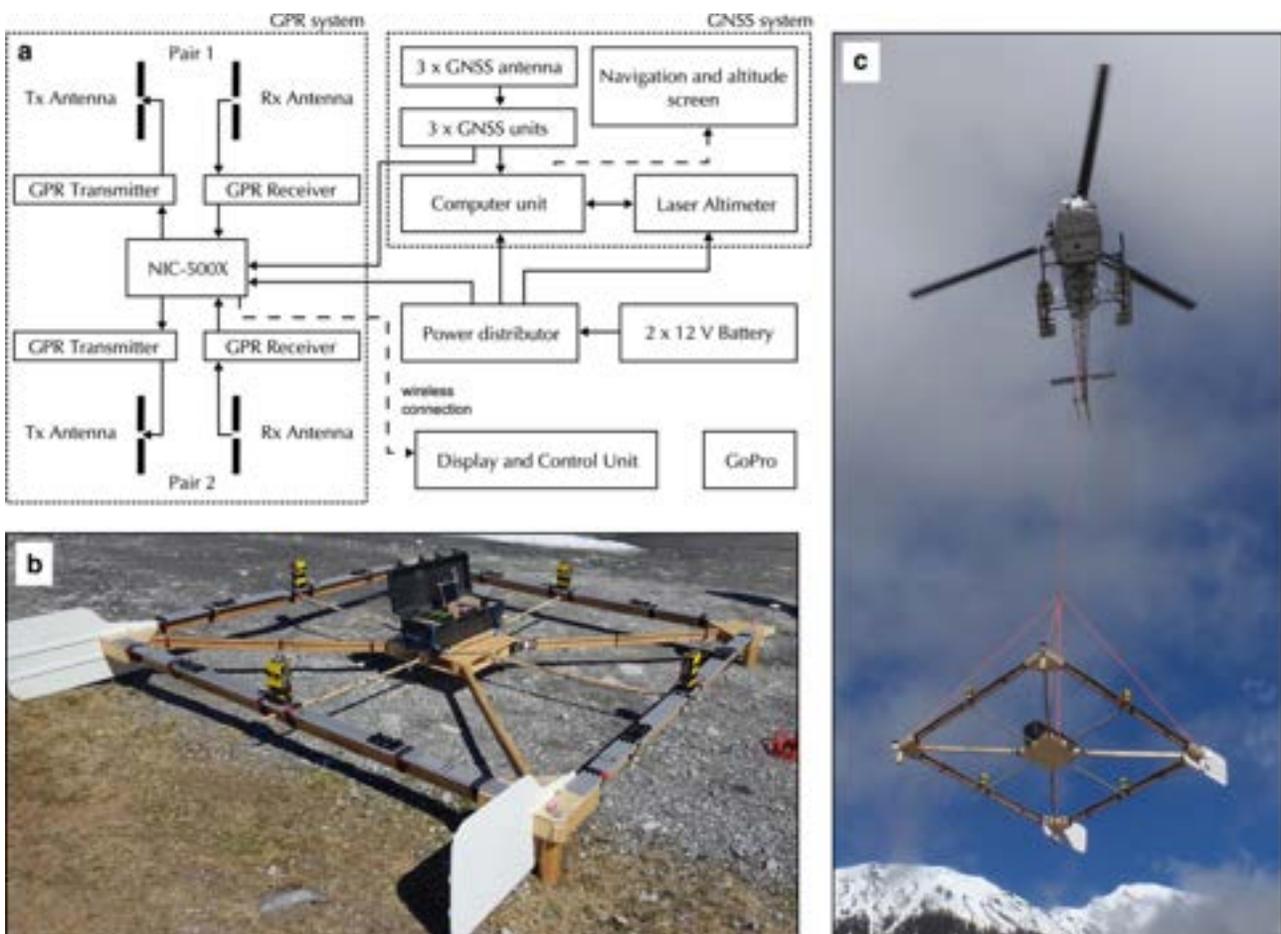


Figure 5 – Description des composants du système AIR-ETH (sources ETHZ – Geosat SA)



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](http://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 »<sup>5</sup>.

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

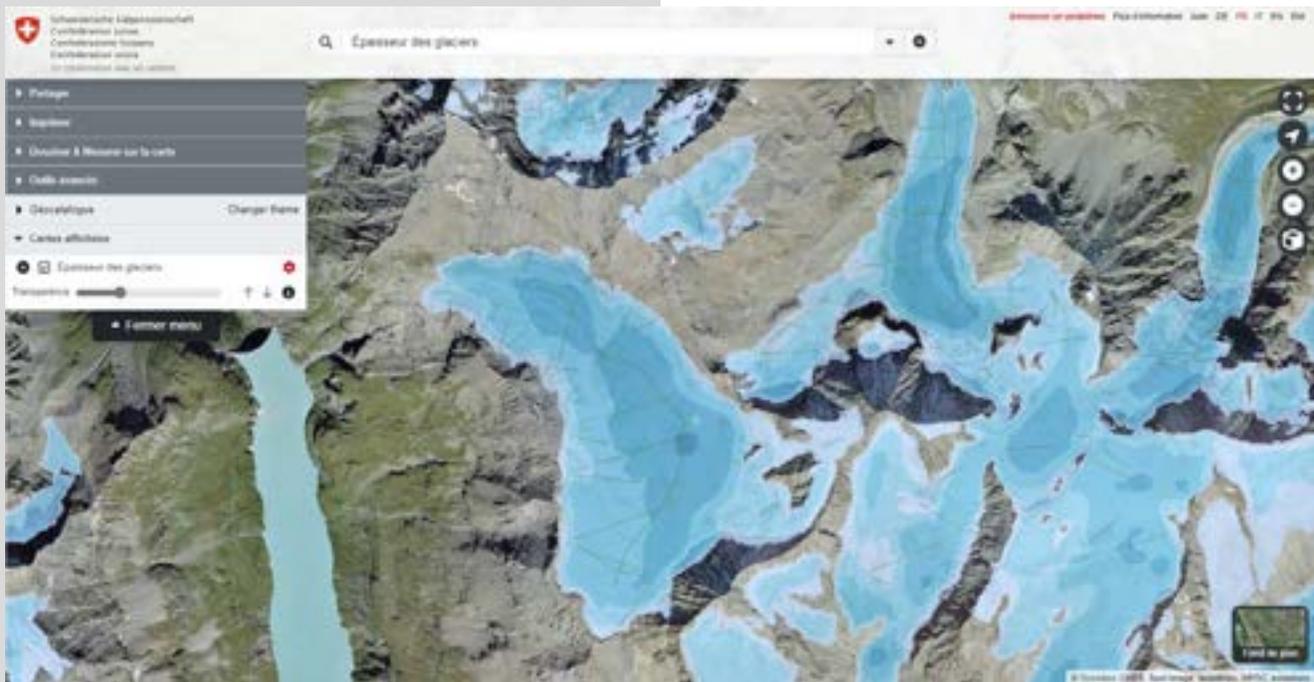


Figure 7 – Extrait de la couche Epaisseur des glaciers sur le guichet cartographique national : [map.geo.admin.ch](http://map.geo.admin.ch)

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 georadars pour en faciliter leur mise en œuvre sur le terrain. Des exemples récents de georadars 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

# HEIG-VD : INTÉGRATION DU PROGRAMME PIBS AU SEIN DE LA FILIÈRE GÉNIE TERRITORIAL

*Un nouveau bassin de recrutement pour notre profession*

Dans le numéro 28 de la Gazette, nous vous présentons le nouveau Bachelor of sciences en Génie territorial à la HEIG-VD<sup>6</sup>.

Dans le cadre de cette ouverture, nous avons demandé à intégrer le programme PiBS de la Confédération, ce qui a été accepté cet été.

Dans cet article, nous souhaitons apporter un éclairage sur le programme, sur la filière Génie territorial et sur la mise en place du PiBS.

## Qu'est ce que le programme PiBS

Traditionnellement, les titulaires d'une maturité gymnasiale souhaitant intégrer une HES doivent réaliser un stage de 42 semaines avant de commencer leurs études en bachelor (article 25, al. 1, let. b de la LEHE<sup>7</sup>). Cette condition n'est pas toujours simple à réaliser, aussi bien pour les bureaux qui forment déjà des apprentis et qui n'ont pas toujours le temps ni le personnel pour les former, que pour les futurs étudiants qui n'ont pas de compétences professionnelles techniques à apporter aux entreprises.

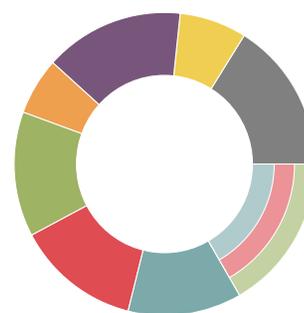
La confédération a lancé le programme PiBS (Praxisorientierte Bachelorstudiengänge, bachelor intégrant la pratique) pour lutter contre la pénurie de personnel qualifié dans les domaines MINT (professions du domaine

des mathématiques, de l'informatique, des sciences naturelles et de la technique). Ce programme permet d'intégrer le stage directement dans la formation, et n'est plus une condition préalable. Ces étudiants doivent néanmoins avoir conclu un contrat de formation avec une entreprise pour une durée de 4 ans. Un parcours PiBS dure 4 ans, contre 3 ans pour le cursus standard.

## Filière Génie territorial

La filière Génie territorial est composée d'un tronc commun de 150 crédits ECTS (soit l'équivalent de 5 semestres), et de 30 crédits ECTS d'option (soit l'équivalent d'une semestre). Le schéma 1 permet de voir comment sont réparties les compétences de cette formation.

**Cours communs**  
**150 ECTS**



**Option**  
**30 ECTS**

Figure 1 – Compétences développées dans la filière bachelor en Génie territorial

● *Bases de l'ingénierie* : les mathématiques, la physique, et l'informatique

6. Gazette N°28 : Bachelor of science HES-SO en Génie Territorial : du nouveau à la HEIG-VD, disponible en ligne : [https://igso.ch/wp-content/uploads/2024/01/Gazette-Numero28\\_.pdf](https://igso.ch/wp-content/uploads/2024/01/Gazette-Numero28_.pdf)

7. LEHE : article 25, al. 1, let. b <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2014/691/fr>

- *Compétences sociales* : Stratégie de communication de projet, Communication graphique et marketing, ainsi que porto-folio et valorisation personnelle
- *Projets territoriaux* : Conduite de projets et travail collaboratif, pratique du projet territorial, d'environnement, d'espaces naturels et de paysage.
- *Bases légales, politiques et institutions* : Droit général (public, privé, administratif et des sociétés), institutions et politiques des territoires suisses, droit de l'aménagement, de l'environnement et des constructions
- *Acquisition, traitements et valorisation des géodonnées* :
  - Topométrie, lasergrammétrie, géodésie, GNSS et photogrammétrie
  - SIG, modélisation 3D, BIM et Geovisualiation
  - Méthodes d'estimation et de compensation
  - Systèmes cadastraux
  - Machine Learning
- *Aménagement du territoire* :
  - Outils, instruments fonciers et opérations foncières
  - Marchés publics et économie des projets
  - Gestion des collectivités publiques
  - Méthodes d'analyse pour le diagnostic territorial
  - Développement des espaces ruraux, dynamiques agricoles et de montagne
- *Infrastructures et enjeux climatiques* :
  - Dangers naturels et climat
  - Géotechnique et mécanique des sols
  - Aménagements hydrauliques et gestion des cours d'eau
  - Hydrologie et écoulements souterrain
  - Circularité et durabilité matériaux et recyclage

Les trois options de la filière Génie territorial sont les suivantes :

- Géomatique et maîtrise foncière
- Aménagement du territoire
- Infrastructures et enjeux climatiques

Le choix se fait à la fin du troisième semestre.

## Programme PiBS dans la filière Génie territorial

### Aspects contractuels du mode PiBS

L'accueil d'un étudiant PiBS requiert 2 éléments contractuels :

- *Contrat de coopération* : qui permet de fixer les droits et obligations dans la relation entre l'entreprise formatrice et la HEIG-VD. Celui-ci est établi, une seule fois, lors de la mise en place du 1<sup>er</sup> contrat.
- *Contrat de formation* : qui fixe les droits et les obligations dans la relation entre l'entreprise formatrice et la/le stagiaire. Celui-ci doit être établi pour chaque stagiaire

Le contrat de formation doit être signé avant la rentrée scolaire de l'étudiant (mi-septembre). Sans celui-ci, l'étudiant ne peut pas intégrer la formation PiBS ni commencer ses études.

### Répartition des périodes de stage dans la formation

La confédération a laissé de la souplesse dans la mise en place du programme PiBS dans les filières de formation. Pour la filière Génie territorial, nous avons choisi l'organisation présentée dans la figure 2. Voici la répartition des périodes en entreprise :

- 6 à 8 semaines à la fin de la 1<sup>ère</sup> année
- 63 semaines à la fin de la 2<sup>nd</sup> année (de juillet année N à septembre année N+1, vacances incluses )
- le Travail de Bachelor, qui peut être fait en entreprise, avec une thématique

définie conjointement entre l'école, l'étudiant.e et l'entreprise.

Cette configuration présente plusieurs avantages :

- tous les étudiants de la filière suivent les mêmes enseignements : il n'y a pas d'enseignements spécifiques pour les étudiants ayant un CFC et une maturité professionnelle, ni pour les gymnasiens. Cela permet une collaboration entre les étudiants, les premiers pouvant faire partager leurs expériences professionnelles tandis que les second peuvent aider les

premiers dans les matières plus théoriques

- intégrer une entreprise après une première année d'études permet de découvrir le monde de l'entreprise et de s'intégrer dans l'entreprise
- réaliser une période en immersion de 63 semaines à la fin de la seconde année et en troisième année permet à l'étudiant de mettre en pratique toutes les compétences acquises et de faire bénéficier à l'entreprise des outils appris durant les études.



Figure 2 – Répartition des périodes à la HES et en entreprise dans le cadre d'une formation PiBS

A la fin de la première année, les étudiants ont des compétences dans les domaines suivants :

- Sciences de l'ingénierie : mathématiques, statistique, physique et informatique
- Techniques de l'ingénieur : géomatique et géodonnées, gestion des eaux, systèmes d'information géographique, sols et roches, transports et mobilité
- Gestion des territoires : enjeux territoriaux, droits, institutions et politiques des territoires suisses

La seconde année consiste à approfondir les contenus de 1ère année, ainsi que d'ajouter les contenus suivants :

- techniques d'acquisitions de

géodonnées, méthodes d'estimation, géodesie et GNSS,

- économie territoriale
- dangers naturels et gestion intégrée de l'eau.
- droits réels et maîtrise foncière, diagnostics territoriaux, dynamiques environnementales et climatiques.
- stratégie de communication, négociation avec les parties prenantes, travail en équipe pluridisciplinaires ainsi que gestion du changement

### Aspects salariaux

Il n'y a pas d'obligation de versement de salaire pour les étudiants PiBS. Cela ne fait pas (encore ?) partie des conventions collectives.

8. Page 3, bachelor intégrant la pratique, disponible à cette adresse <https://www.epa.admin.ch/dam/epa/fr/>

Cependant, la Confédération a intégré ce profil dans leur grille de salaires<sup>8</sup> ainsi que le canton de Vaud<sup>9</sup>. La fourchette salariale mensuelle est comprise entre 1000 et 2500 CHF, en fonction de l'année où le stage est réalisé.

## Objectifs du stage

L'expérience dans une entreprise permet aux stagiaires de se faire une idée concrète de l'univers professionnel. Les stagiaires apprennent à connaître le monde du travail grâce à des exemples tirés de la pratique. Ils prennent conscience de l'importance de travailler en étant orienté vers des objectifs, de manière efficiente et durable. Les thématiques abordées durant le stage ne sont pas imposées : cela dépend de la configuration des entreprises. Certaines sont plus orientées vers la mensuration techniques, d'autres vers les systèmes d'information géographiques, dans l'aménagement du territoire, dans la mensuration officielle, ou encore dans la construction et les dangers naturels. L'objectif du stage est également de pouvoir appliquer les connaissances acquises durant la formation dans le travail quotidien. L'esprit d'équipe et la volonté de coopération sont essentiels (compétence sociale) et doivent également être mises en application durant le stage.

## Conclusion

Ce nouveau mode de formation présente de nombreux avantages, dont l'augmentation du bassin de recrutement, et donc de nos diplômés pouvant alimenter le milieu professionnel, tout en limitant les inconvénients, en proposant aux entreprises des étudiants ayant une base solide avant

de faire leur stage.

**Bertrand CANNELLE**, Professeur, responsable des filières *Génie territorial* et *Géomatique*, HEIG-VD



## Liens utiles

### programme PiBS HEIG-VD

<https://heig-vd.ch/formation/bachelor/admission/ingenierie/pibs/enseignement/>

### filière Génie territorial, page HEIG-VD

<https://heig-vd.ch/formation/bachelor/genie-territorial/>

### filière Génie territorial, page HES-SO

<https://www.hes-so.ch/bachelor/genie-territorial>

## 5 à 7 concernant le programme PiBS dans la filière Génie territorial

Un événement spécifique est organisé à la HEIG-VD afin de pouvoir vous présenter le dispositif et répondre à vos questions :

**Date** : jeudi 30 janvier

**Heure** : 17h30 à 19h30

**Lieu** : HEIG-VD, route de Cheseaux 1, 1401 Yverdon-les-Bains

Pour des raisons d'organisation, nous vous laissons vous inscrire via ce lien :

<https://heig.ch/Ekqxj>

Un apéritif dinatoire sera servi à l'issue de cette présentation.

dokumente/themen/lohnsystem/lohntabelle-2024.pdf

9. LPers art. 2, RLPers art. 155, [https://www.vd.ch/fileadmin/user\\_upload/themes/etat\\_droit/personnel\\_etat/fichiers\\_pdf/directives/02.05\\_Formation\\_Bachelor\\_HES\\_int%C3%A9grant\\_la\\_pratique.pdf](https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/etat_droit/personnel_etat/fichiers_pdf/directives/02.05_Formation_Bachelor_HES_int%C3%A9grant_la_pratique.pdf)