PROPOSITION DE STAGE M2

EVALUATION DU POTENTIEL DE L'INTERFEROMETRIE RADAR POUR LE SUIVI ET LA CARACTERISATION DES GLISSEMENTS DE TERRAIN EN MONTAGNE

SOCIETE ALPINE DE GEOTECHNIQUE
2, rue de la Condamine – B.P. 17 - 38610 GIERES
☎ 04.76.44.75.72

	Ind.	Date	Commentaires	Établi par	Vérifié par	Approuvé par
	A	19/10/2027	Établissement du document	P. Meyer	H. Cadet	C. Mingrat

1. INFORMATIONS GENERALES

- Stage de Master M2, plutôt orienté recherche
- **Durée et période du stage** : 6 mois/ printemps-été 2027
- **Lieu du stage** : SAGE-Gières principalement avec des échanges mensuels à ISTerre. Déplacements ponctuels sur le terrain prévus pour les mesures.
- **Encadrement** : Pauline Meyer (SAGE) et Marie-Pierre Doin (ISTerre).

2. INTRODUCTION / ÉTAT DE L'ART

La montagne est un des environnements les plus touchés par le réchauffement climatique. La hausse des températures a pour effet d'accentuer la fréquence et l'intensité des risques naturels. Ces phénomènes entraînent une évolution des aléas en modifiant notamment la répartition spatiale et temporelle des processus gravitaires. Des zones considérées jusqu'à présent comme des zones stables peuvent alors être déstabilisées par la fonte du pergélisol, des phénomènes d'érosion accrus ou la modification du régime des précipitations (pluies extrêmes plus fréquentes et plus intenses). Ces événements menacent ainsi la sécurité des populations, les habitations, les infrastructures (routes, voies ferrées, stations de ski) ainsi que l'économie locale des régions de montagne.

L'identification des zones sujettes aux glissements de terrain et l'évaluation de l'impact du réchauffement climatique sur ces aléas sont essentielles pour un aménagement durable du territoire à l'échelle locale, régionale et nationale. L'enjeu est donc de mettre en place une surveillance systématique à haute résolution et à haute fréquence des pentes et zones instables qu'elles soient connues ou non pour obtenir une caractérisation des déplacements.

Dans ce contexte, l'imagerie satellitaire représente une solution intéressante pour la surveillance des glissements de terrain. En effet, elle offre une large couverture spatiale et permet de suivre des zones à l'échelle globale d'un versant comme des zones plus ciblées. Les acquisitions d'image peuvent être régulières avec des temps de revisite qui sont de plus en plus courts allant jusqu'à une image par jour pour une même zone, permettant ainsi un suivi quasi continu des mouvements. Plus particulièrement, la méthode d'interférométrie radar permet de détecter des déplacements millimétriques et centimétriques en se basant sur la différence de phase entre deux images prise à des temps différents. La qualité des mesures dépend notamment de la cohérence interférométrique, qui caractérise la stabilité du signal radar entre deux acquisitions. La combinaison de plusieurs interférogrammes permet de construire des séries temporelles de déplacement, afin de suivre l'évolution des mouvements et d'estimer leur vitesse au cours du temps. Ces séries temporelles permettent ainsi d'identifier les variations d'activité d'un glissement de terrain, notamment les phases d'accélération ou les variations saisonnières.

L'utilisation de l'interférométrie radar présente un fort potentiel pour la détection et le suivi des glissements de terrain. Cependant, plusieurs questions se posent :

- **Les contraintes du milieu montagnard :** comment prendre en compte la neige, la végétation et les fortes variations de relief ? Quelles méthodes et quels paramètres utiliser selon les caractéristiques du terrain ?
- **La mesure des déplacements :** quelles sont les possibilités et les limites des différentes méthodes satellitaires InSAR pour caractériser et mesurer les déplacements du terrain ?
- **La validation des résultats :** comment vérifier la fiabilité des déplacements mesurés par satellite ? La comparaison aux mesures réalisées sur le terrain est très rarement réalisée dans ce contexte.

Le sujet de stage se concentrera sur les problématiques liées à des glissements de terrain argileux et des zones en permafrost à l'aide de la méthode d'interférométrie radar (InSAR). Pour cela, nous travaillerons en collaboration avec Marie-Pierre Doin, directrice de recherche CNRS à l'université Grenoble Alpes, rattachée à l'ISTerre (Institut des Sciences de la Terre) à Grenoble. En effet, ses recherches portent principalement sur l'utilisation et le traitement d'images satellites afin de caractériser les déplacements du sol dans des contextes divers, tel que des séismes, des failles tectoniques, des glissements de terrains, etc.

3. PROBLEMATIQUE ET DEROULEMENT PREVISIONNEL

Le travail envisagé dans le cadre de ce stage sera orienté sur les glissements de terrain dans les matériaux argileux et dans les zones de permafrost. Le travail consistera dans un premier temps à évaluer le potentiel des données d'interférométrie radar pour le suivi et la caractérisation des instabilités gravitaires en montagne.

Afin d'optimiser le potentiel de l'interférométrie radar (InSAR) pour la caractérisation des instabilités gravitaires, le stagiaire aura plusieurs missions :

- Réaliser un état des lieux des données d'interférométrie radar disponibles et leurs caractéristiques sur les zones cibles (interférogrammes bruts ou traités, cohérence, séries temporelles de déplacement) et faire l'inventaire des techniques et méthodes possibles du traitement de données d'interférométrie radar pour le suivi des instabilités gravitaires
- Analyser et traiter les données selon certaines méthodes et techniques choisies pour évaluer leur potentiel et leur limitation en fonction du type de zone cible et des données disponibles ;
- Comparer et valider les résultats de déplacements obtenus à l'aide de l'InSAR avec des mesures in-situ (GPS, extensomètre, inclinomètre) et d'autres mesures de déplacement (LIDAR, corrélation d'images) sur une zone cible ;
- Synthétiser les résultats obtenus pour établir des protocoles de traitement par type de zone cible ;

Le travail de stage peut être découpé en plusieurs phases :

PHASE 01. Étude bibliographique

- Se familiariser avec l'imagerie satellitaire radar et la méthode d'interférométrie radar (bibliographie et exemples) ;
- Prendre connaissance des problématiques liées à la méthode de traitement utilisée, à l'environnement de montagne, aux glissements de terrain (perte de cohérence déroulement, vitesses de déplacement, etc.).

PHASE 02. Analyse et traitement des données InSAR

- Etudier et analyser les données disponibles pour chaque site cible : interférogrammes bruts déjà calculés (à 6 jours, 12 jours, 1 mois, 3 mois et 1 an) via les services FLATSIM et FAST-SAR, des séries temporelles déjà traitées via la solution FITS-fr (produite à l'échelle de la France), des cartes de cohérence, etc.
- Au besoin des interférogrammes pourront être calculés à l'aide du service en ligne GDM-SAR-in accessible via FormaTerre
- Effectuer plusieurs tests sur les données des terrains cibles afin de définir la/les technique(s) la/les plus optimale(s) pour un suivi du glissement selon les caractéristiques du terrain cible (géométrie, étendue spatiale, vitesse de déplacement, végétation, etc …)

PHASE 03. Validation et comparaison des mesures pour un terrain cible

- Pour un site défini dont le suivi par série temporelle est possible, comparer les résultats de déplacements obtenus avec des mesures in-situ (GPS, extensomètre, inclinomètre) ou autres données de déplacement (corrélation de MNT ou d'image optique) ;
- Pour les sites/épisodes ayant des taux de déformation plus importants, évaluer l'apport des interférogrammes enroulés et de la cohérence, en comparaison aux observations de terrain (périodes d'activation, vitesses).
- Synthétiser les résultats obtenus en fonction des caractéristiques des différents types d'objets pour savoir quelle est l'approche la plus appropriée

4. PROFIL / QUALITES REQUISES

- Etudiant recherchant un stage en M2, avec une formation en traitement des données et/ou géomatique
- Attrait pour la géophysique, le traitement et l'analyse de données ;
- Intérêt pour les risques naturels, les mouvements de terrain et les processus de déformation des versants ;
- Connaissances/goût pour le code informatique (langage Python) ;
- Connaissance de base en télédétection et en interférométrie radar serait un plus ;
- Rigueur et curiosité (conduite en autonomie de nombreuses acquisitions, comparaison de données) ;
- Capacités bibliographiques (articles scientifiques à lire) ;
- Capacité à s'intégrer dans une équipe de travail et dans un bureau d'études.

5. APPORT DU STAGE POUR LE CANDIDAT

- Travail concret
- Bonne connaissance des enjeux et concepts associés à l'acquisition et au traitement d'images satellitaires par interférométrie radar ;
- Expérience pratique dans le traitement d'interférométrie radar et l'analyse de données satellitaires ;
- Se familiariser avec une démarche scientifique allant du traitement des données à la validation et à la synthèse des résultats ;
- Possibilité d'aller éventuellement sur le terrain avec les équipes techniques (en lien avec la validation de la méthode) ;
- Travail dans un bureau d'études dynamique, spécialisé en géotechnique alpine et dans un laboratoire de recherche sur les Sciences de la Terre ;
- Selon résultats et contexte économique, possibilités de prolongation (cf. stagiaires antérieurs).

6. CONTACT/QUESTIONS

Prendre contact avec :

- Pauline MEYER, Dr. Ing. Télédétection, p.meyer@sage-ingenierie.com
- recrutement@sage-ingenierie.com

Avec CV et quelques lignes pour expliquer la motivation pour ce stage.

Les candidat.e.s sélectionnés seront reçus par la suite pour entretien en visio/présentiel.

7. ADMINISTRATIF

- Gratification mensuelle calculée sur la base du minimum légal en vigueur (montant minimum légal, https://www.service-public.fr/simulateur/calcul/gratification-stagiaire) .
- Titres-restaurant.
- Prise en charge de 50 % des abonnements aux transports en commun éligibles.

8. PRESENTATION DE LA SAGE

Un bureau d'études indépendant, ancré dans les géosciences et les territoires de montagne

Fondée en **1981 par Pierre Desvarreux et Sharock Azimi**, SAGE Ingénierie (Société Alpine de Géotechnique) est un bureau d'études indépendant spécialisé en géologie, géotechnique, géophysique et ingénierie des risques naturels.

Depuis plus de 45 ans, l'entreprise développe une expertise reconnue dans l'étude des terrains complexes et des environnements de montagne. Son approche associe **observation naturaliste, compréhension des phénomènes géologiques, investigations de terrain, modélisation et ingénierie**, afin de répondre à des problématiques techniques et scientifiques souvent singulières.

SAGE Ingénierie compte aujourd'hui environ **90 collaborateurs**, répartis entre son siège social de **Gières (Isère)** et six agences implantées à Sallanches, Romans-sur-Isère, Béziers, Millau, Pau et Toulouse. Ses équipes pluridisciplinaires réunissent des ingénieurs, géologues, géophysiciens, docteurs et chercheurs, techniciens de terrain et de laboratoire, spécialistes de l'instrumentation et de l'imagerie, ainsi que des fonctions supports.

Des domaines d'expertise complémentaires

Les activités de SAGE Ingénierie s'organisent autour de trois grands domaines :

- **Risques naturels :** étude et surveillance des glissements de terrain, chutes de blocs, éboulements et autres instabilités de versants ; caractérisation des aléas ; conception et maîtrise d'œuvre de solutions de prévention, de confortement et de protection.
- **Aménagements et infrastructures de montagne :** études géologiques et géotechniques pour les remontées mécaniques, pistes, retenues d'altitude et ouvrages associés, dans des environnements présentant des contraintes géologiques, géomorphologiques et climatiques spécifiques.
- **Géotechnique, génie civil et travaux publics :** études et dimensionnement d'ouvrages d'art, fondations, soutènements, terrassements, infrastructures de transport, digues et barrages.

Ces activités s'appuient sur des compétences transversales en reconnaissances géophysiques, instrumentation et auscultation, télédétection, imagerie par drone, photogrammétrie et LiDAR, ainsi qu'en mécanique des sols et des roches en laboratoire.

La recherche et l'innovation au cœur de notre activité

Depuis sa création, SAGE Ingénierie entretient une forte culture de recherche appliquée, historiquement liée à l'étude des glissements de terrain et à la compréhension des mécanismes d'instabilité des versants.

Au fil des années, cette activité s'est élargie à de nombreuses problématiques scientifiques et techniques : mouvements gravitaires, chutes de blocs, évolution des terrains en contexte de changement climatique, pergélisol, caractérisation géophysique du sous-sol, instrumentation et suivi temporel des instabilités.

Nos travaux de recherche et développement portent notamment sur :

- **La compréhension et la modélisation des phénomènes naturels**, en particulier les mouvements de terrain et les instabilités gravitaires.
- **Le développement et l'amélioration de méthodes de reconnaissance et de caractérisation du sous-sol**, notamment par les approches géophysiques et l'analyse conjointe de différentes données.
- **L'exploitation de nouvelles technologies d'observation et de mesure**, telles que la télédétection satellitaire, l'interférométrie radar (InSAR), le LiDAR, la photogrammétrie et l'instrumentation.
- **Le développement d'outils numériques et de méthodes de calcul**, appliqués notamment à la modélisation des chutes de blocs, à l'inversion géophysique 2D/3D et à l'analyse des données de terrain.

Cette activité de R&D est conduite sur fonds propres ou dans le cadre de projets collaboratifs et de programmes de recherche nationaux et européens, en partenariat avec des laboratoires et organismes scientifiques. Elle s'appuie notamment sur des collaborations avec **ISTerre – Université Grenoble Alpes, l'université de Strasbourg ou encore le CNRS**.

Notre particularité réside dans le lien étroit entre **recherche scientifique et applications opérationnelles** : les problématiques étudiées émergent fréquemment des observations de terrain et des besoins de nos projets d'ingénierie. Inversement, les méthodes et outils développés ont vocation à enrichir les pratiques de nos équipes et à améliorer la connaissance, la prévention et la gestion des risques naturels.

Rejoindre SAGE pour un stage de recherche

Réaliser un stage de recherche chez SAGE Ingénierie, c'est évoluer à l'interface entre **recherche académique et ingénierie appliquée**, au contact d'ingénieurs et de docteurs spécialisés.

C'est aussi bénéficier d'un environnement pluridisciplinaire, accéder à des données et à des sites d'étude réels, participer au développement de méthodes innovantes et contribuer à des travaux susceptibles d'avoir des applications concrètes dans nos métiers.

Selon les sujets, les résultats obtenus et les perspectives de recherche, certains stages peuvent également ouvrir la voie à une poursuite en **thèse CIFRE**, en partenariat avec un laboratoire académique.