

GUIDE TECHNOLOGIQUE



POUR LA SURVEILLANCE DES DANGERS NATURELS GRAVITAIRES



Tous droits réservés

© 2022 GEOPREVENT AG, 2ième édition

Sur l'initiative des Chemins de fer fédéraux suisses.

Crédits photos :

GEOPREVENT des systèmes actifs

Forme de citation suggérée :

GEOPREVENT (2022) : Systèmes de surveillance des risques naturels gravitaires, Zurich, Suisse

APERÇU

1	Introduction aux systèmes de surveillance	7
1.1	Types de système	8
1.2	Modes de fonctionnement	9
1.3	Configuration d'un système de surveillance	10
1.4	Composante du système	11
2	Naturgefahrenprozesse	13
2.1	Avalanches	14
2.2	Instabilités rocheuses / chutes de pierres	16
2.3	Instabilités rocheuses / chutes de pierres	18
2.4	Laves torrentielles	20
2.5	Glissements de terrain	22
3	Technologies	25
3.1	Analyse de déformation : une comparaison technologique	26
3.2	Radar	28
3.2.1	Géoradar interférométrique (GB-InSAR)	29
3.2.2	Radar d'avalanches	30
3.2.3	Radar de chutes de pierres	31
3.2.4	Radar de personnes	32
3.2.5	Radar de niveau d'eau	33
3.3	Lidar – Laser scanner terrestre	34
3.4	Optique – Caméra de déformation	35
3.5	Autres	36
3.5.2	Géophones et sismomètres und Seismische Sensoren	37
3.5.3	Ligne de déclenchement	38
3.5.4	GNSS (GPS)	39
3.5.5	Capteurs de mouvement combinés	40
4	Annexe	41
	Symboles	41

INTRODUCTION

Ce guide technologique donne un aperçu des systèmes de surveillance électronique des risques naturels gravitaires et peut fournir des conseils pour sélectionner les systèmes les mieux adaptés. Nous utilisons le terme "système de surveillance" pour décrire l'équipement technique destiné à divers usages, allant de la surveillance à long terme de paramètres caractéristiques, la détection précoce d'un événement imminent ou la détection d'événements en temps réel avec déclenchement d'actions automatiques¹. Ce guide est divisé en trois parties :

1 INTRODUCTION AUX SYSTÈMES DE SURVEILLANCE

Nous distinguons deux types de systèmes de surveillance : Les systèmes d'avertissement et les systèmes d'alarme. Dans la première partie, nous présentons ces différents types de systèmes, leurs applications idéales, les variables qu'ils mesurent et certaines technologies communes. Nous présentons et ensuite, expliquons le rôle joué par les différentes composantes d'un système de surveillance, notamment les capteurs, les composantes d'avertissement et d'alarme (par exemple, les sirènes, les barrières), ainsi que la visualisation des mesures sur une plateforme en ligne.

2 DÉTECTION DES DANGERS NATURELS

Les risques naturels gravitaires comprennent les inondations, les avalanches de neige et de glace, ainsi que les glissements de terrain (qui comprennent à leur tour les chutes de pierres, les avalanches de pierres, les laves torrentielles ou coulées de débris et les instabilités de pente plus lentes). Le type de système de surveillance dépend fortement du danger naturel considéré. Les systèmes d'avertissement et d'alarme peuvent également être combinés si nécessaire, par exemple, lorsque différents dangers naturels peuvent se produire simultanément. Par exemple, un système complet peut inclure la surveillance d'une paroi rocheuse instable (système d'avertissement) ainsi qu'un système d'alarme pour les laves torrentielles situées plus bas, comme c'est le cas du système de surveillance de Bondo.

Dans la deuxième partie, nous présentons et comparons différentes options technologiques pour détecter au mieux les différents types de dangers. Les technologies diffèrent non seulement dans leur mode de fonctionnement, mais dans l'étendue de la zone de mesure, la précision des mesures ou la disponibilité (par exemple, l'influence des conditions météorologiques). Le choix des technologies correspond aux méthodes actuellement utilisées dans la surveillance des risques naturels et n'est pas exhaustive.

3 TECHNOLOGIES

Dans la troisième partie, les différentes technologies de la deuxième partie sont présentées de manière plus détaillée, des projets de référence sont énumérés et des liens vers des informations complémentaires sont fournis. Différentes technologies peuvent se compléter dans le cadre d'un projet global, ou d'autres technologies peuvent être ajoutées à un système de surveillance existant si la situation de danger change. La sélection des technologies présentées n'est pas non plus exhaustive.

¹ conformément à la définition des systèmes de surveillance et de prévention donnée par

- BAFU (2015). Vollzugshilfe Schutz vor Massenbewegungsgefahren
- Sättele M., Bründl M. (2015) Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Bevölkerungsschutz/BABS, Bern



1 INTRODUCTION AUX SYSTÈMES DE SURVEILLANCE

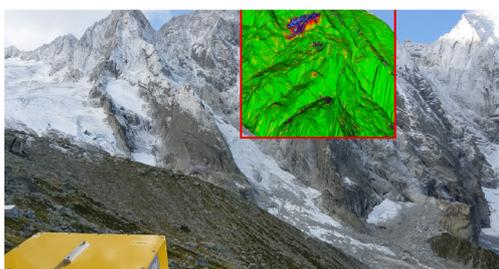


Caméra de déformation, Suisse

1.1 TYPES DE SYSTÈMES

Il est possible de distinguer deux types de systèmes de surveillance : les systèmes d'avertissement et les systèmes d'alarme. Un système d'avertissement fournit des informations aux décideurs sur un processus potentiellement dangereux, afin qu'ils puissent prendre des décisions en toute connaissance de cause et prendre des mesures si nécessaire (comme le déclenchement d'une évacuation). Un système d'alarme est conçu pour déclencher une action (comme la fermeture d'une route) sans intervention humaine si un danger est détecté et qu'il n'y a pas de temps pour évaluer les options.

	 SYSTÈME D'AVERTISSEMENT	 SYSTÈME D'ALARME
BUT	Mesure des signes précurseurs d'un événement	Détection automatique d'un événement
DÉLAI	Heures – semaines	Secondes – minutes
ACTIONS	Interprétation des résultats par des experts. Les mesures possibles sont déclenchées "manuellement" (par exemple, en cas d'évacuation)	Actions immédiates et automatiques, par exemple: fermeture de routes, de voies ferrées ou évacuation (d'un chantier par exemple)
UTILISATION	Les processus naturels qui se développent lentement (par ex. mouvement de parois rocheuses, glissements de terrain)	Les processus naturels qui se déclenchent rapidement (p. ex. avalanches, laves torrentielles)
VARIABLES MESURÉES	Déformation, précipitations, épaisseur de la neige, niveau d'eau, température, activité (par exemple, chutes de pierres, avalanches), vibrations	Déformation, vitesse, pression, débit, niveau d'eau, vibration
TECHNOLOGIES	<ul style="list-style-type: none"> • Géoradar interférométrique • Caméra de déformation • Extensomètre • Dispositifs de mesure de la pression, de l'inclinaison • Capteurs de mouvement, GPS • Stations météo 	<ul style="list-style-type: none"> • Radar d'avalanche • Radar de chutes de pierres • Radar personnel • Mesures de niveau • Lignes de déclenchement
EXEMPLES	<ul style="list-style-type: none"> • Surveillance permanente des roches Piz Cengalo, Bondo • Surveillance du glissement de terrain de Moosfluh, Région d'Aletsch 	<ul style="list-style-type: none"> • Radar d'avalanche avec fermeture automatique de la route, Zermatt • Système d'alarme de laves torrentielles, Spreitgraben



Radar interférométrique installé au Piz Cengalo (Bondo)



Radar d'avalanches avec fermeture de route automatique

1.2 MODES DE FONCTIONNEMENT

Il existe différents modes de fonctionnement d'un système de surveillance :

1. **Exploitation continue, à long terme**, pour des dangers permanents (aigus ou latents)
2. **Exploitation continue et à court terme** pour des risques temporaires (par exemple, les chantiers de construction)
3. **Exploitation périodique et temporaire** pour des mesures individuelles (par exemple, sur une base annuelle)

Le choix du mode de fonctionnement dépend largement du type de risque naturel, de la technologie de surveillance choisie et de la zone à risque. Le suivi d'un problème aigu nécessite des mesures fréquentes, quelles que soient les conditions de visibilité (jour/nuit, météo). Pour les processus lents, actuellement non critiques, des mesures occasionnelles peuvent être suffisantes, l'intervalle de mesure pouvant varier de quotidien à annuel, selon les besoins.

EXIGENCES OPÉRATIONNELLES

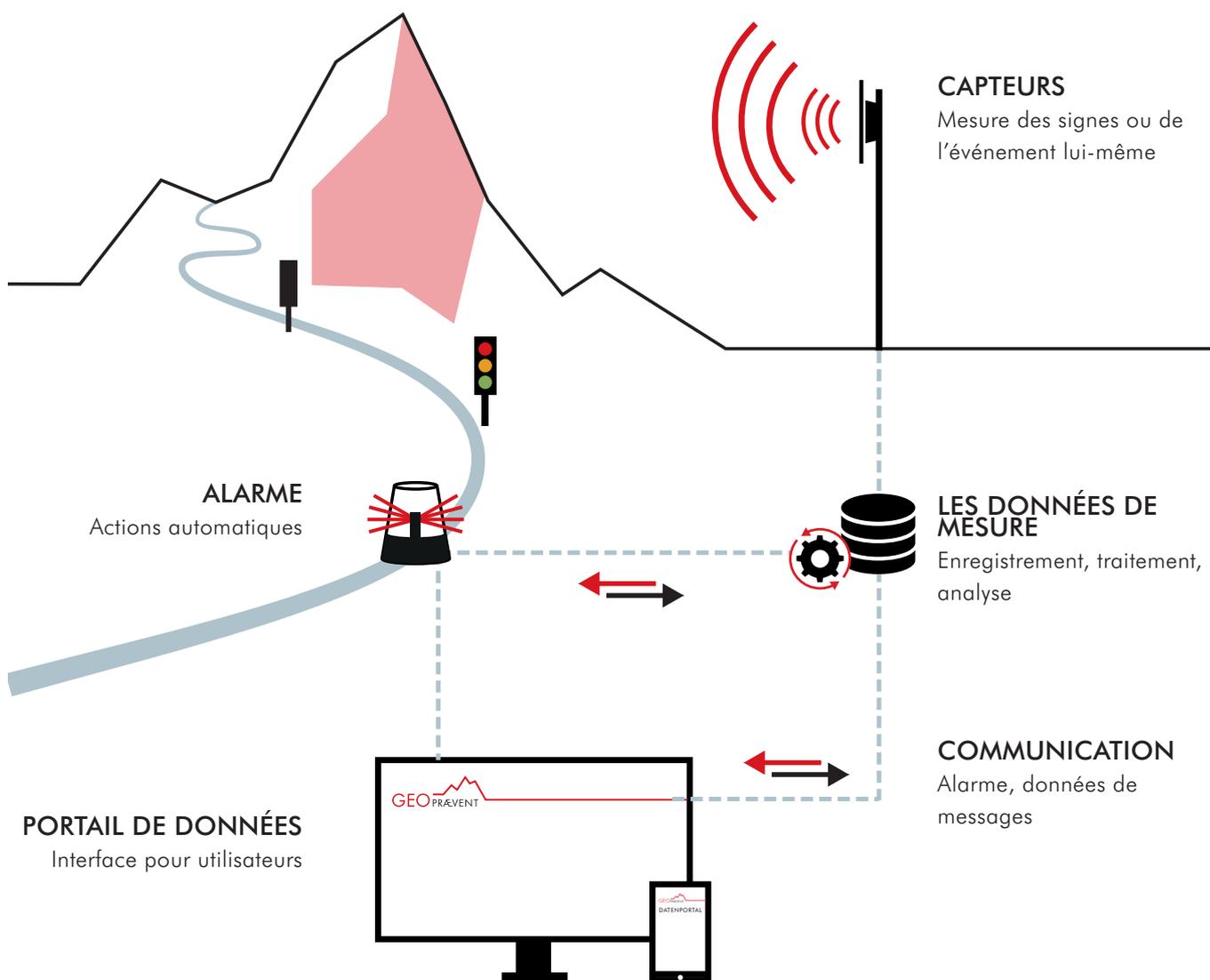
Les installations fonctionnant de manière continue ont d'autres exigences techniques que les systèmes utilisés périodiquement. Avant tout, la technologie de surveillance choisie doit être automatisable, c'est-à-dire que la mesure, l'analyse et la transmission des données se déroulent indépendamment et que l'utilisateur peut récupérer les données en ligne via le portail de données. En outre, une alimentation électrique autonome et si une haute fiabilité est requise, les composants du système doivent être redondants. Les systèmes d'alarme doivent être opérationnels à tout moment et donc fonctionner en continu. Les systèmes d'avertissement peuvent être utilisés en continu, à long terme, temporairement ou de manière périodique.

	CONTINU LONG TERME	CONTINU COURT TERME	PÉRIODIQUE TEMPORAIRE
TYPE DE SYSTÈME			
ANALYSE, TRANSMISSION ET PRÉSENTATION DES DONNÉES	Procédures de sélection et d'évaluation automatisées, transmission des données en continu avec webcams, visualisation des données sur le portail en ligne	Procédures de sélection et d'évaluation automatisées, transmission des données en continu avec webcams, visualisation des données sur le portail en ligne	Sélection manuelle et analyses, pas de consultation des données mesurées via le portail de données, rapport de mesures optionnel
UTILISATION	Mode de fonctionnement le plus fréquent des systèmes de surveillance	Dans le cas d'un danger aigu et temporaire, le plus souvent avec avertissement	Seulement pour des processus lents et non critiques
EXEMPLES	Radar d'avalanche ou de chutes de pierres pour protection permanente de routes ou de voies ferrées	Mesures de radar interférométrique pour la sécurisation de travaux de déblaiement ou d'un chantier	Mesure laser ou de radar interférométrique annuelle pour détecter des instabilités rocheuses

1.3 CONFIGURATION D'UN SYSTÈME DE SURVEILLANCE

Un système de surveillance est toujours une solution technique comprenant différentes composantes. Les capteurs mesurent les variables physiques principales du processus à surveiller (par exemple, la déformation de la surface en mm/jour ou le niveau d'eau de la rivière en m). Le collecteur de données numérise les valeurs mesurées, les enregistre et effectue des calculs. S'il s'agit d'un système d'alarme, le collecteur de données détecte un événement et déclenche l'alarme (par exemple, feux de circulation/barrières) et informe les personnes responsables par SMS, e-mail, radio, etc. Pour tous nos systèmes de surveillance mesurant en continu, toutes les données de mesure, les images et les analyses sont transférées sur le portail en ligne, dont l'accès est protégé par un mot de passe. En outre, les éléments du système tels que les barrières ou les caméras peuvent être commandés à distance. Un autre élément important d'un système de surveillance est la communication, que ce soit pour la transmission du signal d'alarme ou des données de mesure ou pour le contrôle à distance des éléments du système. En fonction des conditions locales, l'alimentation électrique de l'ensemble du système doit être autonome.

Pour une surveillance permanente et fiable des risques naturels, les différentes composantes doivent également résister aux conditions difficiles de la haute montagne, passer des tests de système rigoureux et être dotés de plusieurs niveaux de redondance (notamment dans le cas des systèmes d'alarme).



1.4 COMPOSANTE DU SYSTÈME



CAPTEURS

Une variété de capteurs est disponible. Le choix dépend du processus, des conditions locales et des exigences des clients. Exemples :

- Mesures locales : mesure de fissure, radar de niveau, géophones, GPS, capteurs de mouvement, jauges de force.
- Mesures à distance : interférométrie radar, caméra de déformation, radar d'avalanche, radar de chutes de pierres.



TRAITEMENT DES DONNÉES

Numérisation des données de mesure, calculs, déclenchement d'alarmes. Utilisation en fonction de

- La capacité de calcul / stockage requise
- La fréquence de mesure
- La consommation électrique
- Du processus d'alarme
- Des exigences environnementales (étanchéité, basses températures etc.)



ALARME

Fermeture automatique des routes, des chemins de fer ou évacuation des chantiers de construction.

- Feux de circulation/barrières pour les routes
- Sirènes pour les chantiers de construction
- Radios avec écouteurs pour les environnements bruyants (p. ex. pelle mécanique)
- Information par SMS, e-mail, appels automatiques (services prioritaires)
- Autres interfaces (transfert d'alarme)



PORTAL DE DONNÉES

Plateforme en ligne protégée par un mot de passe pour un accès des utilisateurs via un PC, un smartphone ou une tablette.

Fonctionnalité (selon le système) :

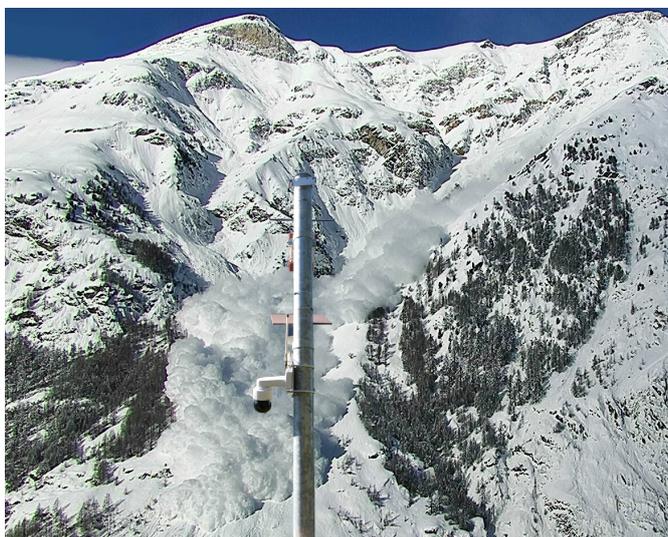
- Affichage des valeurs mesurées (séries chronologiques)
- Analyses des déformations sur un modèle altimétrique
- Carte interactive avec affichage des événements (par exemple pour les avalanches)
- Vues en direct, archives d'images des caméras
- Contrôle à distance des barrières/caméras



COMMUNICATION

Transmission de données entre capteurs, collecteur de données, alarme et serveur.

- Canaux de communication possibles : GSM (réseau mobile), WiFi, fibre optique, radio, LoRaWAN (Long Range Wide Area Network, selon le capteur).
- Pour des raisons de redondance, nous recommandons d'utiliser deux canaux de communication indépendants pour les alarmes
- Possibilité de systèmes radio propres (directionnels)



Radar d'avalanches de Zermatt, Suisse



2 DETECTION DE DANGERS NATURELS

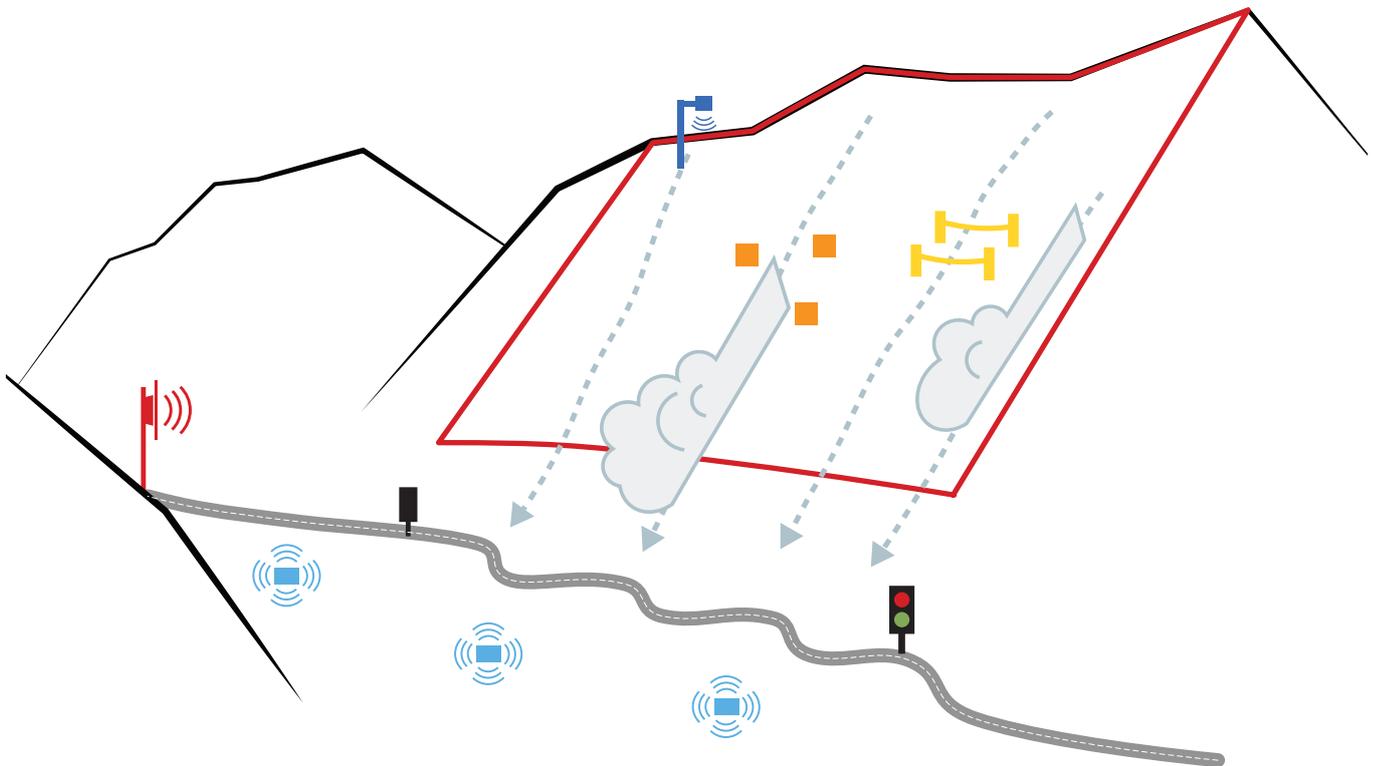


Chutes de pierres Brienz/Brinzauls (Suisse), avalanche à Ningunsaw au Canada, laves torrentielles à Parghera et glissement de la Moosfluh (Suisse)

2.1 AVALANCHES



Les avalanches sont des phénomènes soudains et peuvent être difficiles à prévoir. Un système d'alarme avec détection automatique d'une avalanche permet de détecter une avalanche le plus tôt possible (c'est-à-dire en hauteur) et de fermer immédiatement les tronçons de route et les voies ferrées menacés ou d'évacuer les chantiers. En outre, la détection automatique des avalanches permet de vérifier le succès du déclenchement artificiel des avalanches, notamment dans l'obscurité et par mauvais temps. Il existe différentes méthodes de détection qui peuvent être utilisées en fonction de l'application et des exigences du système d'alarme.



RADAR D'AVALANCHE

Un radar Doppler détecte les mouvements de masses de neige dans toute la pente d'avalanche.



GÉOPHONE / SISMOGRAPHE

Mesure de vibrations. Les avalanches sont détectées par les vibrations produites.



LIGNE DE DÉCLENCHEMENT

L'avalanche déclenche une ligne en passant et une alarme est lancée.



INFRASON

L'avalanche génère des infrasons, qui sont détectés par des capteurs situés dans la vallée.



HAUTEUR DE NEIGE

Détection en cas de diminution soudaine de l'épaisseur de la neige.

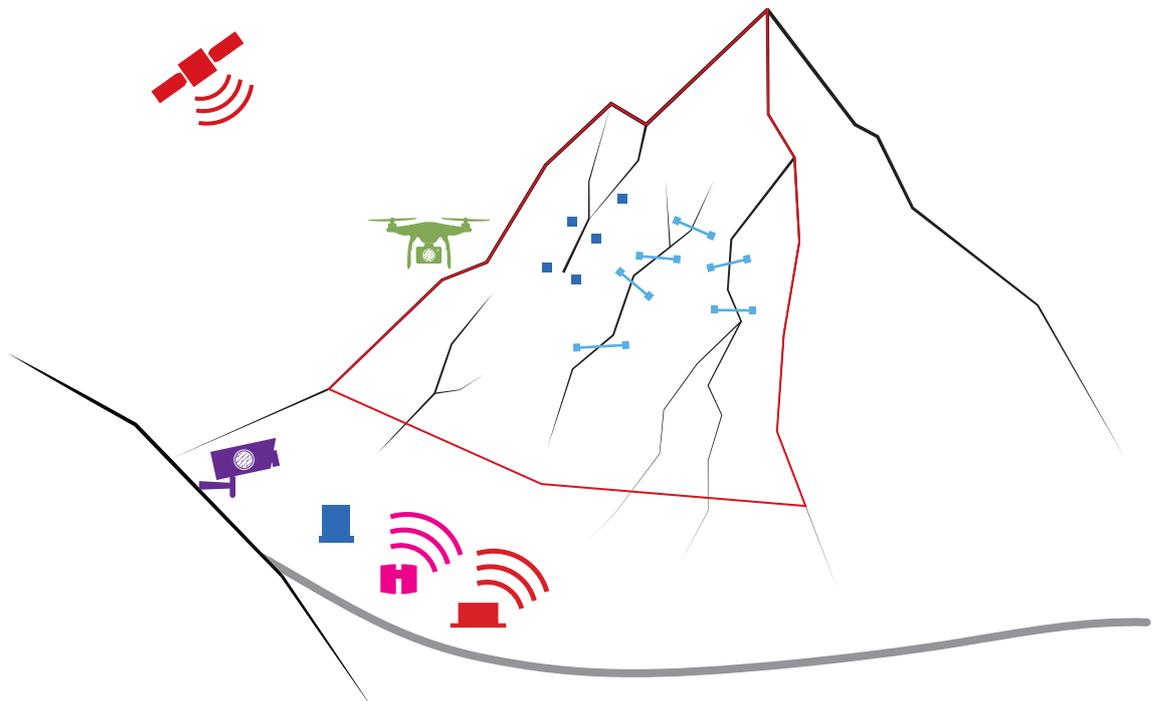
	 RADAR D'AVALANCHE	 GÉOPHONE / SISMOGRAPHE	 LIGNE DE DÉCLENCHEMENT
TYPE	Mesure à distance en 2D	Mesure ponctuelle	Mesure ponctuelle
PROPRIÉTÉS	Large étendue, suivi et cartographie des avalanches	Une avalanche à la fois, principalement pour des avalanches locales	Einfach, kostengünstig, für einzelne Lawinenzüge
ZONE DE MESURES	Plusieurs avalanches simultanées avec un radar Distance : 5 km Couverture : 10 km ²	Plusieurs géophones par couloir d'avalanche, larges zones pour les réseaux sismiques	Plusieurs lignes par coulée
INFLUENCE DE LA MÉTÉO	Par tous les temps	Par tous les temps	Par tous les temps
LIMITES	<ul style="list-style-type: none"> La zone de coulée doit être visible depuis la position du radar 	<ul style="list-style-type: none"> D'importantes quantités de neige peuvent atténuer les signaux Perturbation par d'autres signaux (tremblement de terre) 	<ul style="list-style-type: none"> Des arbres et des animaux peuvent causer des fausses alarmes Les lignes doivent être remplacées après chaque événement
SYSTÈME D'ALARME	Possible	Possible	Possible

	 INFRASON	 HAUTEUR DE NEIGE
TYPE	Mesure à distance en 2D	Mesure ponctuelle
PROPRIÉTÉS	Large étendue, pour la surveillance d'activité	Donne la hauteur de la fissure
ZONE DE MESURES	En cas de tempête (vent), la sensibilité est réduite	Mesure locale à un endroit d'une coulée
INFLUENCE DE LA MÉTÉO	Le vent réduit la sensibilité du capteur	Cela dépend du capteur, la mesure peut être difficile en cas de tempête ou de brouillard
LIMITES	<ul style="list-style-type: none"> Toutes les avalanches ne produisent pas assez d'infrasons (avalanches de neige mouillée) Conditions météo 	<ul style="list-style-type: none"> Mesure ponctuelle Peu d'informations pour détecter les avalanches et sur leur taille
SYSTÈME D'ALARME	Non recommandé	Non recommandé

2.2 INSTABILITÉS ROCHEUSES / CHUTES DE PIERRES



Lors de la surveillance de zones rocheuses, une distinction est faite entre les processus lents et rapides. Les processus lents sont compris comme l'accélération de zones instables sur une longue période (heures - années), tandis que les processus rapides sont des ruptures soudaines et les chutes de pierres associées. Cette section traite des différentes méthodes de détection des zones instables dans les grandes parois rocheuses et de leur surveillance à long terme. La surveillance peut être permanente (pour les instabilités aiguës) ou périodique (pour les problèmes non urgents). La surveillance à distance permet d'étudier de grandes zones à une distance sûre, tandis que les mesures locales fournissent des informations ponctuelles sur l'instabilité.



GÉORADAR INTERFÉROM.

Balayage de la paroi rocheuse avec un radar interférométrique pour détecter des déformations. Terrestre ou par satellite.



LIDAR TERRESTRE

Balayage de la surface de la roche avec un laser pour détecter les déformations.



CAMÉRA DE DÉFORMATION

Analyse automatisée d'images basée sur des photographies à haute résolution pour détecter les déformations.



STATION TOTALE

Mesure ponctuelle d'une position définie sur la base d'un faisceau lumineux réfléchi.



MESURE DE FISSURES

Mesure ponctuelle de la largeur d'une fissure en surface (téléjaugeur) ou de mouvements rocheux plus profonds (extensomètre).



TECHNOLOGIE FUTURES : Les mesures mobiles et flexibles à l'aide de drones deviennent de plus en plus courantes pour diverses technologies (caméras, lidar, radar). Toutefois, des analyses automatiques fiables sont encore en cours de développement et ne sont pas encore prêtes pour le marché.

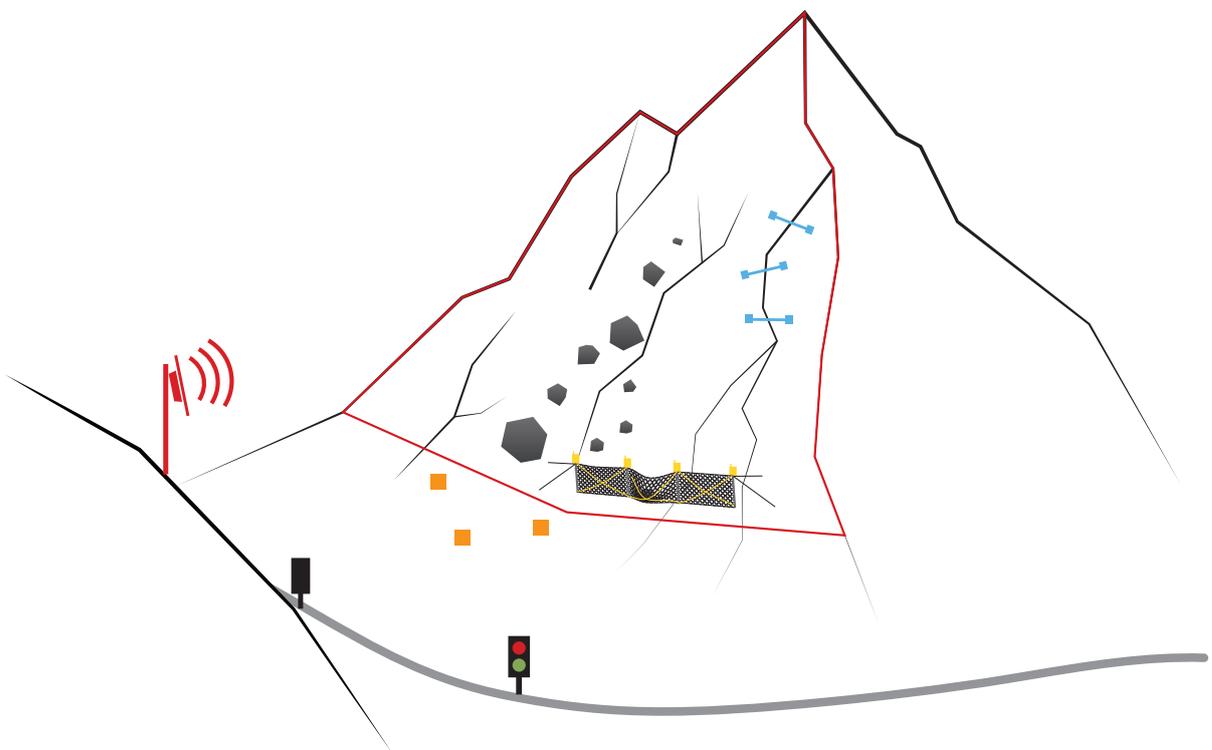
	 GÉORADAR INTERFÉROM.	 GÉORADAR (SATELLITE)	 LIDAR TERRESTRE
TYPE	Mesure à distance, 2D	Mesure à distance, 2D	Mesure à distance, 3D
PRÉCISION*	Sub-mm	mm–cm	Quelques cm
ZONE DE MESURE	Distance : jusqu'à 5 km Couverture : quelques km ²	Versants ouest / est (exposition nord / sud non accessibles)	Distance : jusqu'à 4 km Couverture : quelques km ²
DISPONIBILITÉ DU SYSTÈME	Toujours (brouillard, pluie, neige, jour / nuit)	Dépend de la couverture du satellite et de la fréquence de passage, mesures avec des données historiques possibles	Seulement lors de bonnes conditions météo (ni brouillard, pluie ou neige), installation rapide
EXPLOITATION	Continu / périodique	Périodique	Périodique
LIMITES	<ul style="list-style-type: none"> • Végétation • Neige • Réflexions (sur des filets de protection par exemple) 	<ul style="list-style-type: none"> • Couverture souvent problématique • Fréquence de passage top peu élevée pour la surveillance de problèmes aigus • Neige 	<ul style="list-style-type: none"> • Automatisation des analyses et mesures en continu difficiles • Neige
	 CAMÉRA DE DÉFORMATION	 STATION TOTALE	 MESURE DE FISSURES
TYPE	Mesure à distance, 2D	Mesure ponctuelle et à distance	Mesure ponctuelle et locale
PRÉCISION*	Quelques cm	Quelques cm	Sub-mm
ZONE DE MESURE	Distance : jusqu'à 5 km Couverture : quelques km ²	Distance : quelques km Couverture : quelques km ²	Dépend des besoins et du nombre d'instrument
DISPONIBILITÉ DU SYSTÈME	Seulement par bonne visibilité (temps clair, jour), installation rapide	Seulement par temps clair (beau temps, jour / nuit)	Toujours (brouillard, pluie, neige, jour / nuit)
EXPLOITATION	Continu / périodique	Continu / périodique	Continu / périodique
LIMITES	<ul style="list-style-type: none"> • Un contraste suffisant est nécessaire pour l'analyse • Neige • Inapproprié pour des instabilités aiguës 	<ul style="list-style-type: none"> • Relevé ponctuel • Installation de miroirs dans des régions instables • Mesure éventuellement impossible lorsque les mouvements sont importants • Neige 	<ul style="list-style-type: none"> • Relevé ponctuel • Installation dans la zone de danger • Capteurs peuvent être détruits par une déformation trop importante ou par une chute de pierres

* de la mesure de déformation. Dépend de la distance à laquelle la mesure est effectuée.

2.3 INSTABILITÉS ROCHEUSES / CHUTES DE PIERRES



Cette section traite de la surveillance de zones rocheuses ayant une évolution rapide. Grâce à un système d'alarme de chutes de pierres, les voies de circulation menacées peuvent être fermées en temps réel ou les chantiers évacués. La détection automatique de chutes de pierres est également utilisée pour surveiller l'activité d'une zone instable. La condition préalable de base pour un système d'alarme est un délai d'avertissement suffisant entre la détection de l'événement et l'impact dans la zone menacée, par exemple un terrain déversé avec une route. Les combinaisons de solutions de surveillance des processus lents et rapides sont utiles dans certains cas. En outre, les systèmes de protection peuvent être équipés de capteurs permettant d'évaluer leur état et d'avertir en cas d'impact.



RADAR DE CHUTES DE PIERRES

Un radar Doppler balaye la zone en continu et détecte des blocs en mouvement.



CAPTEUR SISMIQUE

Capteur sismique reconnaissant la chute de pierres par les vibrations produites.



CAPTEUR COMBINÉ

Surveillance des conditions des filets de protection avec un capteur combiné (vibration et inclinaison) et des cordes de déclenchement.

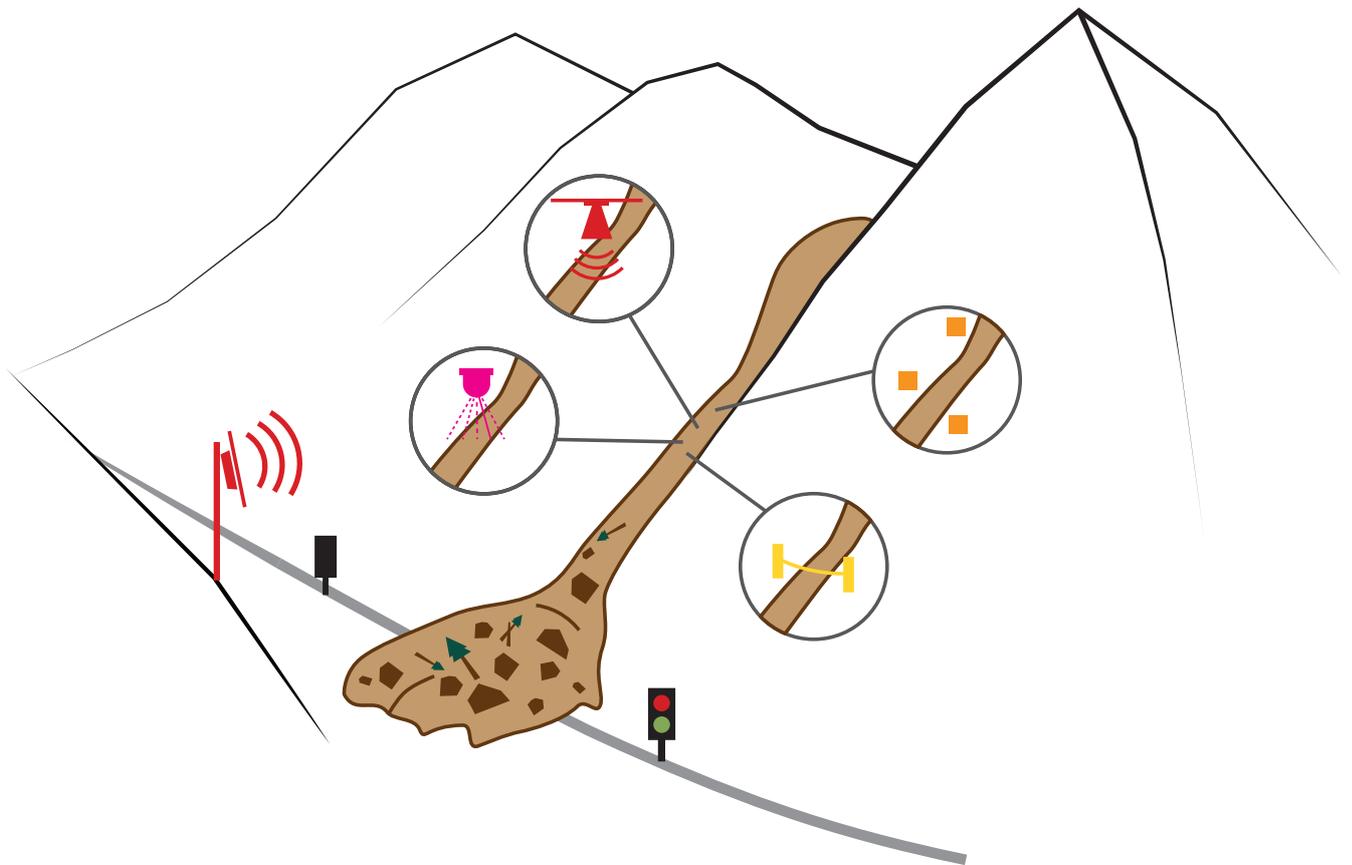
	 RADAR DE CHUTES DE PIERRES	 CAPTEUR SISMIQUE	 CAPTEUR COMBINÉ
TYPE	Mesure à distance, 2D	Mesure locale et ponctuelle	Mesure locale et ponctuelle
PROPRIÉTÉS	Localisation, suivi et cartographie de l'événement	Grosse couverture, pas de connexion visuelle nécessaire	Détection d'un impact dans un filet de protection, aperçu de l'état des filets
SENSIBILITÉ	Jusqu'à 0.1 m ³ à 100 m, 1 m ³ à 1 km	Moins qu'un radar, dépend de la situation*	Les petits événements ne sont détectés que par le capteur de vibrations, les événements plus importants déclenchent les cordes de déclenchement
ZONE DE MESURES	Distance : jusqu'à 4 km Couverture : plusieurs km ²	Distance : jusqu'à 20 km, dépend de la situation	Idéalement, un capteur combiné par pilier, et deux cordes de déclenchement par filet
INFLUENCE DE LA MÉTÉO	Fonctionne par tous les temps	Fonctionne par tous les temps	Fonctionne par tous les temps
LIMITES	<ul style="list-style-type: none"> • La zone doit être visible depuis la position du radar • Réflexions (sur les filets de protection) 	<ul style="list-style-type: none"> • Beaucoup de facteurs de perturbation potentiels (hélicoptère etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> • Le cordon doit être réparé manuellement après l'événement • Fausses alarmes dues à la neige ou d'autres objets
SYSTÈME D'ALARME	Utilisable	Non recommandé	Utilisable
SURVEILLANCE D'ACTIVITÉS	Utilisable	Utilisable	Utilisable

* dépend du type de sol, de la distance, du capteur utilisé et de la taille de l'événement.

2.4 LAVES TORRENTIELLES



Les laves torrentielles sont des processus généralement très rapides et nécessitant l'utilisation d'un système d'alarme avec des actions automatiques, comme la fermeture d'une route ou le déclenchement d'alarmes sur des chantiers et leur évacuation. Il existe différentes méthodes pour détecter des laves torrentielles, dont la plupart sont des solutions installées à l'intérieur ou au-dessus du lit du cours d'eau. Une lave torrentielle est un flux de boue, de matériaux rocheux et d'eau dont la surface est souvent turbulente et mal définie, ce qui rend les mesures difficiles. Pour la mesure à distance, le radar de lave torrentielle est approprié s'il y a une bonne visibilité dans le canal et s'il peut couvrir de grandes zones avec un seul capteur.



RADAR DE NIVEAU

Mesure de la distance par rapport au lit du canal. Détection lors de l'augmentation rapide du niveau d'eau.



GÉOPHONE

Détection de la lave torrentielle à partir des secousses du sol.



LIGNE DE DÉCLENCHEMENT

L'alarme est donnée lorsque la lave torrentielle perturbe la ligne de déclenchement.



LASER

Mesure de niveau ou balayage du profil au laser. La lave torrentielle est détectée en case de changement rapide.



RADAR DE LAVE TORRENTIELLE

Le radar Doppler détecte les mouvements dans le canal à distance et émet une alarme.

	 RADAR DE NIVEAU	 GÉOPHONE	 LIGNE DE DÉCLENCHEMENT
TYPE	Mesure locale et ponctuelle	Mesure locale et ponctuelle	Mesure locale et ponctuelle
PROPRIÉTÉS	Surveillance du niveau d'eau en continu	Capteurs robustes ne nécessitant pas d'accès au canal	Solution simple et bon-marché
ZONE DE MESURE	Au minimum 2 capteurs par canal (redondance). Mesure jusqu'à 50 m de distance	Au minimum 2 géophones par canal (redondance)	Au minimum 2 lignes de déclenchement par canal (redondance)
DISPONIBILITÉ DU SYSTÈME	Indépendant de la météo	Indépendant de la météo	Indépendant de la météo
LIMITES	<ul style="list-style-type: none"> • Vue limitée du canal 	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune information sur le niveau d'eau • Calibration avec événements nécessaire • Signal dépendant du type de lave torrentielle 	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune information sur le niveau d'eau • Remplacement de la ligne après chaque événement
SYSTÈME D'ALARME	Possible	Possible dans la plupart des cas	Possible

	 LASER	 RADAR DE LAVE TORRENTIELLE
TYPE	Mesure locale et ponctuelle	Mesure à distance, 2D
PROPRIÉTÉS	Surveillance en continu du niveau d'eau et du profil du canal	Localisation, suivi et cartographie de lave torrentielle
ZONE DE MESURE	Environ 30 m	Distance : jusqu'à 4 km Couverture : quelques km ²
DISPONIBILITÉ DU SYSTÈME	Indépendant de la météo à courte distance	Indépendant de la météo
LIMITES	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures laser non fiables en cas de pluie ou de brouillard et sur des surfaces turbulentes 	<ul style="list-style-type: none"> • Le canal doit être visible depuis l'emplacement du radar • Fortes réflexions (bâtiments etc.)
SYSTÈME D'ALARME	Utilisation limitée	Possible

REMARQUES

Redondance :

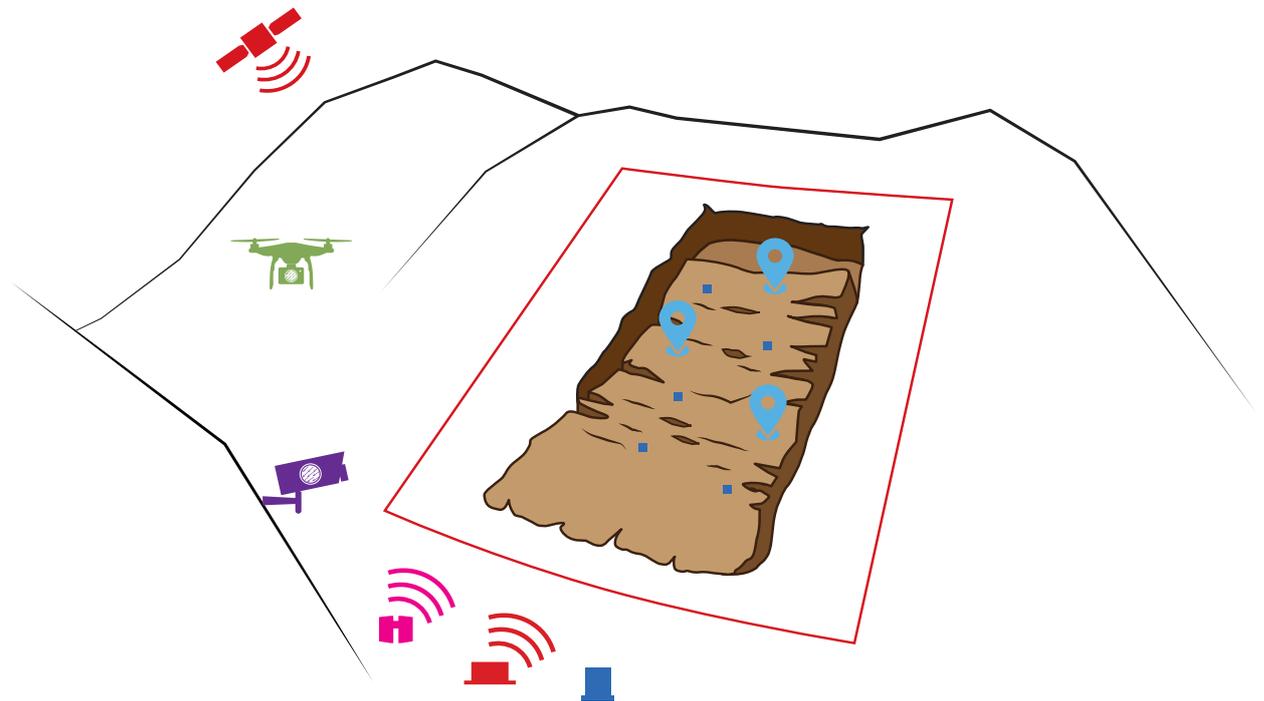
En fonction de la technologie appliquée, nous recommandons d'utiliser plusieurs capteurs pour les raisons suivantes :

- Couverture de l'ensemble du lit de la rivière lit pour les larges zones (par ex. radar de jaugeage, lignes de déclenchement)
- Interférences ; le signal d'un capteur n'est pas suffisamment fiable (par exemple, avec géophones)
- Combinaison de deux capteurs basés sur des technologies différentes et indépendantes

2.5 GLISSEMENTS DE TERRAIN



Les glissements de terrain sont souvent des processus lents qui sont surveillés sur de longues périodes. Un système d'avertissement est souvent le bon choix lorsqu'on s'attend à une accélération soudaine d'un versant en mouvement. Différentes techniques existent : La télédétection avec un radar (GB-InSAR), la photogrammétrie basée sur un véhicule aérien sans pilote (UAV), le lidar ou le GPS. Un avertissement précoce peut être obtenu en définissant des seuils de mouvement. En cas de dépassement, des messages automatiques sont envoyés au personnel responsable.



GÉORADAR INTERFÉROM.

Mesure spatiale des déformations sur une pente avec un radar interférométrique terrestre ou satellitaire.



LIDAR TERRESTRE

Laser de mesure d'un versant de colline pour détecter les déformations.



CAMÉRA DE DÉFORMATION

Détection automatisée de mouvement à partir d'images haute résolution.



STATION TOTALE

Mesure sélective de la position de certains points à l'aide d'un faisceau lumineux réfléchi.



GNSS (GPS)

Point de mesure GPS avec une station de base associée.



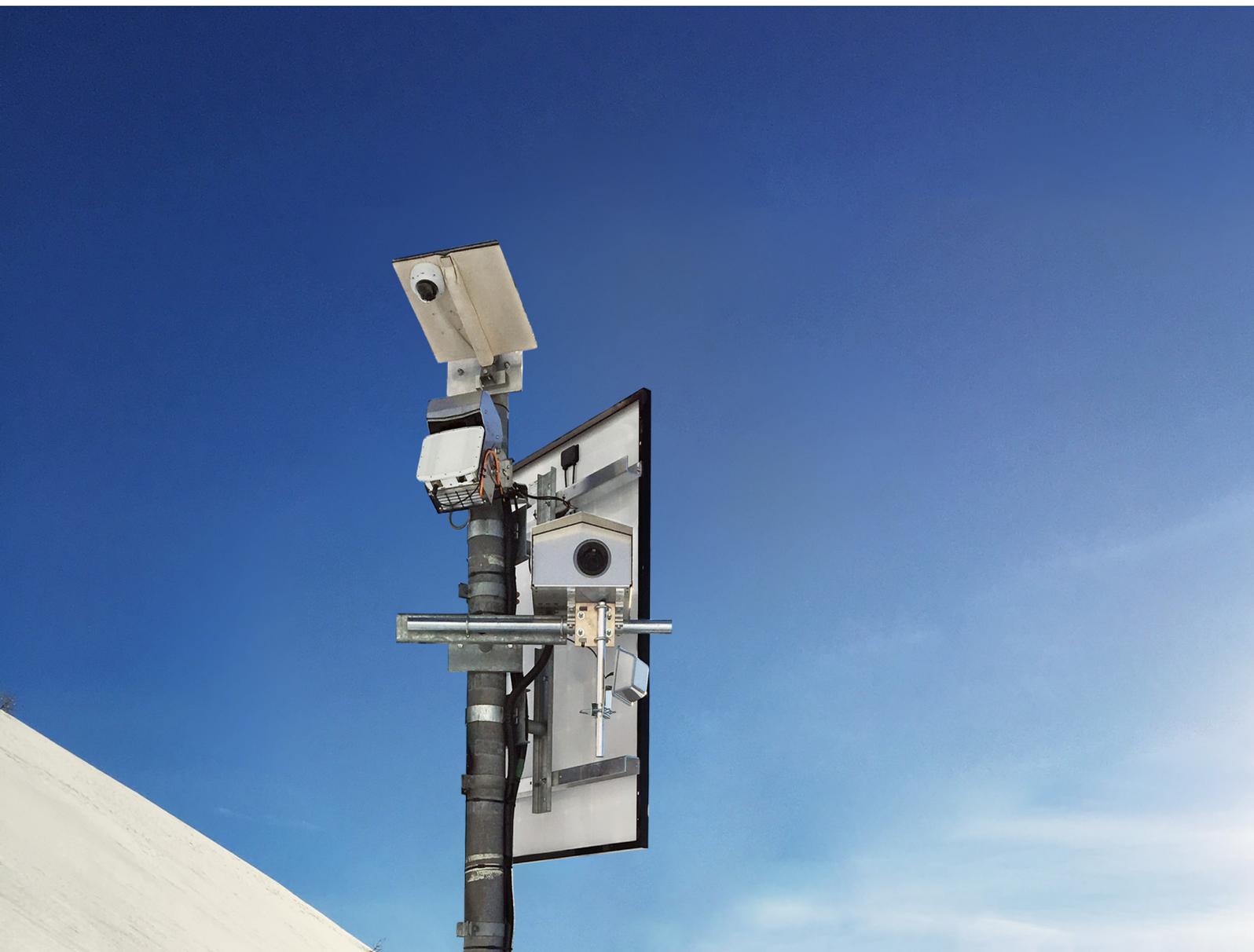
TECHNOLOGIE FUTURES : Les mesures mobiles et flexibles à l'aide de drones deviennent de plus en plus courantes pour diverses technologies (caméras, lidar, radar). Toutefois, des analyses automatiques fiables sont encore en cours de développement et ne sont pas encore prêtes pour le marché.

	 GÉORADAR TERRESTRE	 GÉORADAR (SATELLITE)	 LIDAR TERRESTRE
TYPE	Mesure 2D à distance	Mesure en 2D à distance	Mesure 2D à distance
PRÉCISION*	Sub-mm	mm – cm	Quelques cm
ZONE DE MESURE	Distance : jusqu'à 5 km Couverture : quelques km ²	Grandes surfaces sur des versants est et ouest	Distance : jusqu'à 4 km Couverture : quelques km ²
DISPONIBILITÉ DU SYSTÈME	Toujours (jour / nuit, pluie, neige, brouillard)	Dépend de la fréquence de passage du satellite	Bonnes conditions nécessaires (ni pluie, neige ou brouillard), installation rapide
EXPLOITATION	Continu ou périodique	Périodique	Périodique
LIMITES	<ul style="list-style-type: none"> • Neige • Végétation • Réflexions (par exemple sur des filets de protection) 	<ul style="list-style-type: none"> • Couverture peut être problématique • Fréquence de passage trop longue pour des instabilités rapides • Neige, végétation 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse automatique difficile • Mesures en continu délicates • Neige, végétation
	 CAMÉRA DE DÉFORMATION	 STATION TOTALE	 GNSS (GPS)
TYPE	Mesure 2D à distance	Mesure ponctuelle à distance	Mesure ponctuelle et locale
PRÉCISION*	Quelques cm	Quelques mm	Environ 1 cm
ZONE DE MESURE	Distance : jusqu'à 5 km Couverture : quelques km ²	Distance : quelques km Couverture : quelques km ²	Aussi grande que nécessaire, unités GPS additionnelles nécessaires pour de plus grandes surfaces
DISPONIBILITÉ DU SYSTÈME	Bonne visibilité nécessaire (beau temps, de jour), installation rapide	Visibilité requise (beau temps, jour ou nuit)	Toujours (jour ou nuit, pluie, neige, brouillard)
EXPLOITATION	Continu ou périodique	Continu ou périodique	Continu ou périodique
LIMITES	<ul style="list-style-type: none"> • Contraste important nécessaire • Non approprié pour des instabilités rapides • Neige • Végétation 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure ponctuelle • Accès à la zone en mouvement nécessaire • Neige • Végétation 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure ponctuelle • Accès à la zone en mouvement nécessaire • Transmission du signal peut être délicate dans des vallées étroites

* de la mesure de déformation. Dépend de la distance à la cible.



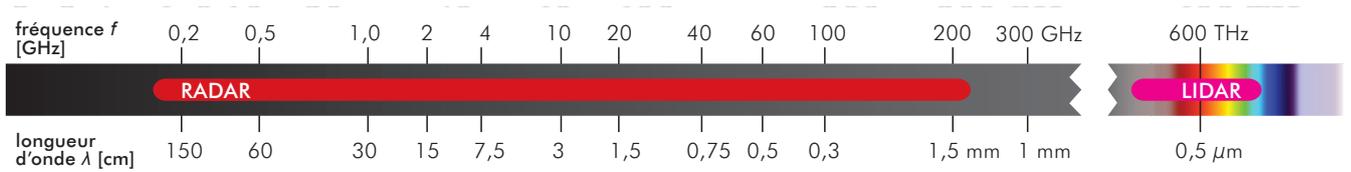
3 TECHNOLOGIES



Radar d'avalanches en autarcie énergétique de Gonda, Suisse

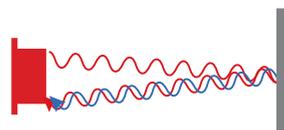
3.1 ANALYSE DE DÉFORMATION : UNE COMPARAISON TECHNOLOGIQUE

Les instruments d'analyse des déformations spatiales permettent d'évaluer à distance les modifications du paysage dans le temps et sur de grandes surfaces. L'analyse est toujours basée sur la comparaison de données acquises à deux moments différents. Le tableau suivant donne un aperçu des techniques les plus courantes (radar, lidar, caméras) pour la surveillance des risques naturels. Toutes ces technologies utilisent des ondes électromagnétiques à différentes fréquences :

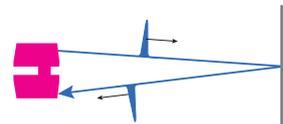


	RADAR INTER-FÉROMÉTRIQUE	LIDAR TERRESTRE	CAMÉRA DE DÉFORMATION
TYPE	Mesure relative à distance et en 2D (3D avec MNT)	Mesure absolue en 3D et à distance	Mesure relative en 2D (3D avec MNT)
f / λ	Micro-ondes (17 GHz)	Infrarouge proche (800–1600 nm)	Lumière visible (380–780 nm)

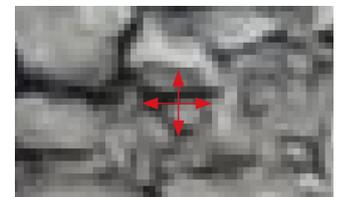
PRINCIPE DE MESURE (SIMPLIFIÉ)



Le radar mesure la phase des micro-ondes réfléchies
 → Mouvement de la cible
 → Deuxième mesure depuis la même position
 → Changement de phase des micro-ondes
 → Comparaison du changement de phase pour calculer la déformation

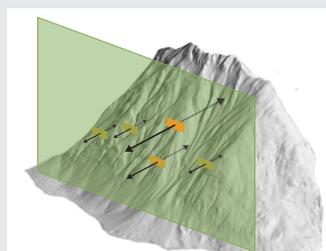


Le lidar mesure le temps de vol d'un pulse laser réfléchi :
 → Distance jusqu'à la cible
 → Géoréférencement, classification, etc.
 → Modèle numérique de terrain / nuage de points
 → Comparaison de deux nuages de points pour calculer la déformation

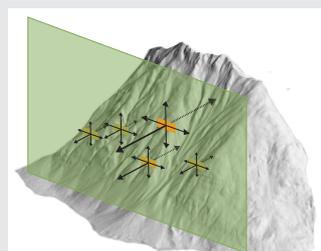


Images à haute résolution (42 mégapixels) d'une face rocheuse ou d'un glacier
 → Comparaison d'images en suivant des groupes de pixels
 → Mesure de déformation basée sur le déplacement de groupes de pixels

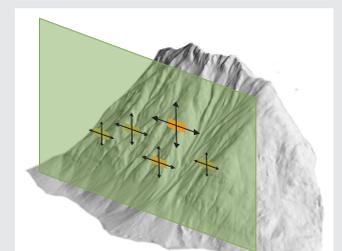
MEASURED DISPLACEMENT



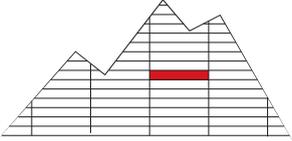
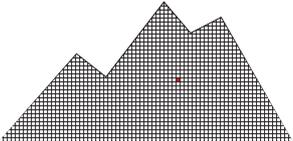
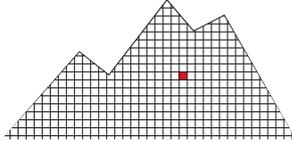
Dans la ligne de mire du radar



Dans la ligne de mire et sur le plan transversal



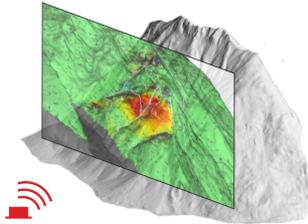
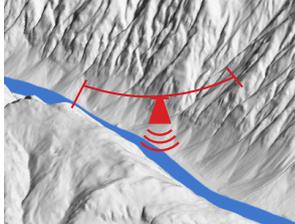
Plan transversal à la ligne de mire

	RADAR INTER-FÉROMÉTRIQUE	LIDAR TERRESTRE	CAMÉRA DE DÉFORMATION
RÉSOLUTION SPATIALE (DISTANCE DE 1 KM, ANGLE DE 45°)*	 1 m x 4,4 m	 ca. 20 cm x 20 cm	 ca. 2 m x 2 m
MÉTÉO			
ATMOSPHÈRE	Les conditions atmosphériques (humidité, pression, température, vent, turbulence, etc.) influencent la propagation des ondes électromagnétiques. En fonction de la longueur d'onde, cet effet peut être plus ou moins prononcé et corrigé.		
	Les changements de conditions atmosphériques peuvent entraîner des erreurs de l'ordre de plusieurs mm. En utilisant des zones stables connues, une correction est en grande partie possible.	En raison de la faible longueur d'onde de l'infrarouge et de la lumière visible (lidar, caméras), les conditions atmosphériques peuvent conduire à des erreurs de l'ordre de plusieurs cm. Ces erreurs peuvent être généralement corrigées par l'utilisation de zones de référence stables, mais entraînent une diminution de la précision des mesures.	
RÉFLÉXION	Excellents résultats sur les glaciers et les surfaces en roche dure. Lorsque les surfaces changent de manière significative (érosion, croissance de la végétation, etc.) la cohérence est perdue et les mesures ne peuvent pas être comparables.	Excellents résultats sur tous les objets solides. Ne peut pas se refléter sur l'eau (= transparent) et la neige (= absorbant).	Tout ce que les yeux humains peuvent voir est visible par la caméra.
PRÉCISION DE L'ANALYSE DE DÉFORMATION*	0,5–2 mm (dans la ligne de mire)	1–10 cm (dans la ligne de mire et le plan transversal)	1–10 cm (dans le plan transversal à la ligne de mire)
UTILISATION SUGGÉRÉE	Pour un usage continu ou périodique, indépendant des conditions météo, pour la surveillance de très petites déformations (mm par jour ou par année), par exemple pour des instabilités critiques.	Pour la détection périodique de changements importants (1–10 cm) sur des longues périodes de temps et pour des estimations de volume. Permet de créer un modèle numérique de terrain (MNT).	Surveillance bon-marché et à long terme d'instabilités non-critiques (lorsque la météo le permet). Détection d'accélération et de changements.

* dans des conditions idéales. La résolution dépend de l'instrument et de la distance ou de l'objectif.

3.2 RADAR

Le terme radar est l'abréviation de « radio détection et télémétrie » (« radio detection and ranging » en Anglais) et fait référence à une variété de techniques de détection et de localisation différentes. Un instrument radar émet des ondes électromagnétiques, qui sont réfléchies par la cible, puis reçues par l'instrument. Les signaux reçus sont ensuite analysés en fonction de différents critères. Comme un radar émet son propre signal, il fonctionne la nuit et par mauvais temps. Trois types de radars sont courants dans la surveillance des risques naturels :

	GÉORADAR INTER-FÉROMÉTRIQUE	RADAR DOPPLER	RADAR DE NIVEAU D'EAU
TYPE	Mesure 2D à distance	Mesure 2D à distance	Mesure locale et ponctuelle
FRÉQUENCE*	17 GHz	10 GHz	24 GHz
PRINCIPE DE MESURE	 <p>Le radar interférométrique mesure la phase de l'onde réfléchi. Les changements de phase entre les mesures indiquent la déformation.</p>	 <p>Cet instrument utilise l'effet Doppler occasionné par des objets en déplacement pour distinguer entre des cibles en mouvement et stationnaires ainsi que pour mesurer leur vitesse et direction.</p>	 <p>Un radar de niveau envoie une courte impulsion radar sur une cible. La distance est calculée à partir du temps de vol.</p>
UTILISATION	Analyse de déformation avec une précision inférieure au millimètre.	Détection automatique de mouvements de masse comme des avalanches, des chutes de pierre, des laves torrentielles ou des personnes. Avec fonction d'alarme.	Détection automatique de laves torrentielles et d'inondations. Avec fonction d'alarme.
PLUS D'INFO	Page 29	Pages 30, 31, 32	Page 33
IMAGE D'EXEMPLE DE STATION	 <p>Radar interférométrique du Piz Cengalo (Bondo), Suisse</p>	 <p>Radar d'avalanches de Gonda, Suisse</p>	 <p>Radar de niveau de Bondo, Suisse</p>

* fréquence (bande) de l'équipement radar que nous utilisons.

3.2.1 GÉORADAR INTERFÉROMÉTRIQUE (GB-InSAR)

Le géoradar interférométrique est utilisé pour la surveillance à grande échelle de parois rocheuses instables, de glaciers ou de pentes de collines. Indépendamment de la visibilité, le géoradar interférométrique peut surveiller de grandes surfaces à une distance sûre, ce qui permet de prévoir à temps d'éventuelles ruptures.

AVANTAGES

- **Mesure à distance à grande échelle et très fiable** de parois rocheuses et de glaciers
- Analyse de déformations avec une **précision inférieure au millimètre**
- **Avertissement précoce** des ruptures de roches et de glace et estimation de la taille / du volume
- Analyse de **déformations lentes** (mm par semaine ou par année)
- Portée jusqu'à **5 km**, couverture > **5 km²**
- **Indépendant du temps** et de la lumière du jour
- Adapté à la montagne
- **Fonctionnement continu** ou périodique (selon l'urgence)
- Installation très rapide
- Pour les opérations continues, toutes les données, les images webcam et les analyses sont accessibles sur notre **portail de données en ligne**

LIMITES

- Les changements dans la végétation ou la neige rendent les mesures difficiles à comparer, les réflecteurs puissants comme les filets de protection sont opaques aux ondes radar
- Seule la composante en ligne de mire de la déformation peut être mesurée
- Le radar mesure les déformations différentielles (relatives) et non les positions absolues

PROJETS DE RÉFÉRENCE

Bondo, Suisse : Surveillance continue du Pizzo Cengalo depuis l'avalanche de 2017 et analyse des déformations lentes (mm sur plusieurs mois). Prédiction précise de plusieurs petits événements.

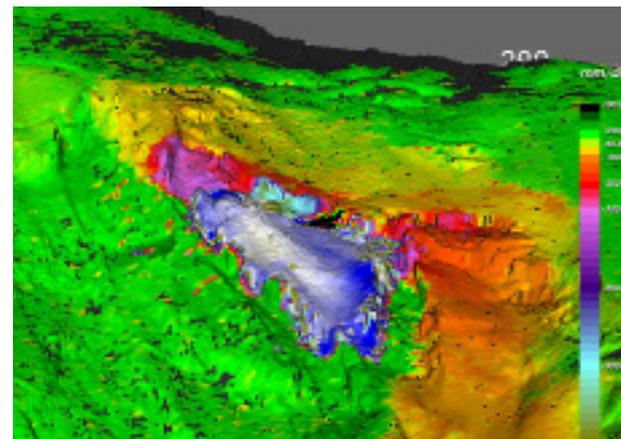
Glacier de Weissmies, Suisse : Le géoradar interférométrique a été installé immédiatement après que la caméra de déformation ait détecté une accélération du glacier. Prédiction précise de l'événement de rupture du 10 septembre 2017.

Preonzo, Suisse : Surveillance temporaire d'une instabilité rocheuse et prédiction précise d'un éboulement important le 15 mai 2012.

Type de système	
Distance	
Météo	
Résolution	
Précision de l'analyse de déformation	 0,5–2 mm
Coûts	\$\$–\$\$\$\$
Pour la surveillance de	



Radar interférométrique du Piz Cengalo (Bondo), Glacier du Weissmies à Saas Fee (tous en Suisse)



3.2.2 RADAR D'AVALANCHES

Le radar d'avalanches détecte et suit les avalanches indépendamment des conditions météorologiques et de la lumière du jour. Le radar balaie en permanence la zone d'avalanche et émet immédiatement une alarme (par exemple, la fermeture d'une route) si un mouvement d'avalanche est détecté.

AVANTAGES

- Technologie de détection unique au monde, très fiable, avec une **large couverture (jusqu'à 10 km²)** et une **grande portée (5 km)**
- Un seul radar peut surveiller **plusieurs couloirs d'avalanche**
- **Indépendant de la météo** et de la lumière du jour
- **Fonction d'alarme automatique en temps réel** (par exemple, fermeture de route avec barrières ou feux de circulation)
- **Réouverture automatique** si l'avalanche n'atteint pas la zone désignée (unique au monde)
- **Sensibilité différente** possible dans les sous-régions (unique)
- **Carte facile à lire** avec les traces d'avalanche, la taille et la vitesse de l'événement, et les photos associées (si la visibilité le permet)
- Accès aux données de toutes les avalanches enregistrées, vue en direct de la zone de danger, commande à distance des éléments d'alarme (barrières, feux de circulation, etc.) par le **portail de données** en ligne de Geoprevent
- Intégration avec **smartphone et tablette**

LIMITES

- Ne peut détecter que les événements qui se trouvent dans le champ de vision du radar et qui ne sont pas obstrués par le terrain ou d'autres éléments
- Taille et durée minimales de l'avalanche (de quelques secondes) nécessaires

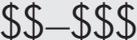
PROJETS DE RÉFÉRENCE

Zermatt, Suisse : Sécurisation de la route d'accès avec fermeture automatique de la route. Opérationnel depuis 2015, premier système de ce type au monde.

Holmbuktura, Norvège : Deux radars surveillent une grande pente à une distance pouvant atteindre 3,5 km et ferment et rouvrent automatiquement la route (depuis 2018).

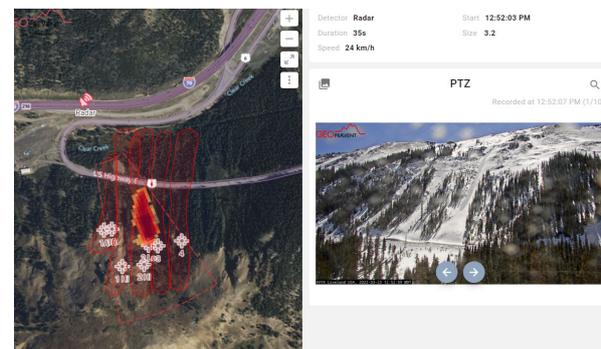
Randa, Suisse : Détection par radar d'avalanches de glace et de neige à une distance de 5 km. Fermeture et réouverture automatiques de la route et de la voie ferrée.

Bear Pass, Canada : Trois stations autonomes sur le plan énergétique (deux stations de détection d'avalanches, une station répéitrice pour la communication).

Type de système	
Distance	
Météo	
Traces d'avalanches	
Coûts	
Pour la surveillance de	



Radar d'avalanches de Zermatt, Suisse (en haut), radar d'avalanches au col de Loveland, Colorado, États-Unis (en bas)



3.2.3 RADAR DE CHUTES DE PIERRES

Le radar d'éboulement peut être utilisé pour surveiller l'activité d'éboulement ou pour émettre automatiquement des alarmes en cas de détection de chutes de pierres. Selon la situation, il peut être utilisé en complément ou en remplacement de mesures de construction.

AVANTAGES

- Détection automatique **des chutes de pierres**
- Portée de plus de **1 km**, couverture de **1 km²**
- **Indépendant de la météo** et de la lumière du jour
- Fonction d'alarme automatique **en temps réel** (par exemple, fermeture d'une route par des barrières ou des feux de signalisation)
- **Carte facile à lire** avec suivi des chutes de pierres, taille et vitesse de l'événement, et des photos associées (si la visibilité le permet)
- Accès aux données de tous les **événements enregistrés**, aux photos prises capturées automatiquement, au contrôle à distance des composants d'alarme (par ex. photos, commande à distance des composants d'alarme (barrières, feux de circulation, etc.) via le **portail de données** de Geoprevent
- Intégration avec **smartphone et tablette**

LIMITES

- Ne peut détecter que les événements qui se trouvent dans le champ de vision du radar et qui ne sont pas obstrués par le terrain ou d'autres éléments
- Une taille minimale d'événement est nécessaire
- La détection de blocs individuels en mouvement est actuellement limitée

PROJETS DE RÉFÉRENCE

Axenstrasse, Suisse : Système complet d'alarme et d'avertissement avec deux radars de chute de pierres et des capteurs sismiques (fusion de capteurs) pour le principal corridor nord-sud avec une moyenne de 16 000 véhicules par jour.

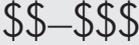
Brinzauls, Suisse : Surveillance d'une zone active d'éboulement avec fermeture et réouverture automatiques des routes. Premier système mondial de ce type.

Bormio, Italie : Détection d'éboulements au niveau du glissement de terrain de Ruinon sur la route de Santa Catarina avec fermeture et réouverture automatique de la route.

PLUS D'INFO

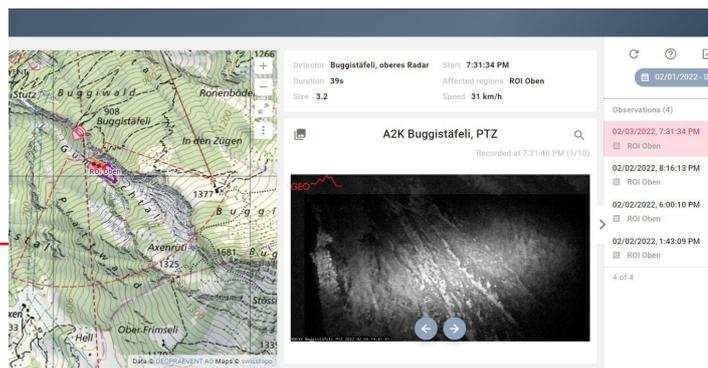
Publication scientifique :

Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection (RocExs 2017), Barcelona, Spanien

Type de système	
Distance	
Météo	
Coûts	
Pour la surveillance de	



Radar de chutes de pierres de Brienz / Brinzauls (en haut), carte des chutes de pierres et photos d'événements du Gumpischthal, Axenstrasse (en bas), Suisse



3.2.4 RADAR DE PERSONNES

Le radar de personnes détecte les personnes en mouvement et est utilisé pour sécuriser des zones étant régulièrement minées afin de déclencher des avalanches artificiellement. De jour comme de nuit, les responsables de la sécurité peuvent utiliser ce système pour s'assurer qu'aucun skieur ou randonneur ne se trouvent dans un périmètre donné.

AVANTAGES

- Détection automatique de personnes à une **distance** de **1 km** dans une **zone** de **1 km²**
- **Mesure indépendante de la météo** et de la lumière du jour.
- **Détection, suivi et cartographie** de tout mouvement dans une zone prédéfinie. Séquences d'images en continu (si les conditions météorologiques le permettent)
- Définition de **zones virtuelles** et **émission automatique d'une alarme** si un mouvement est détecté dans une zone définie (par exemple, sirènes, feux clignotants)
- **Interface de commande en ligne conviviale**, avec accès aux informations sur l'état du système, les derniers mouvements détectés, la situation actuelle, etc.
- Intégration avec **smartphones** et **tablettes**
- **Combinaison** de plusieurs radars pour **maximiser la couverture** et **sécuriser les emplacements névralgiques** possibles
- Suppression automatique des données pour garantir **la protection et la confidentialité des données**

LIMITES

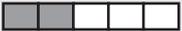
- Ne peut détecter que les événements qui se trouvent dans le champ de vision du radar et qui ne sont pas obstrués par le terrain ou d'autres éléments
- Le radar détecte également les mouvements des animaux, bien que ceux des petits animaux puissent être filtrés pour ne pas déclencher d'alarme

PROJETS DE RÉFÉRENCE

Zermatt, Suisse : Quatre stations avec radar de personnes, caméras et barrières de sécurité. Des alarmes peuvent être déclenchées si les fermetures sont ignorées.

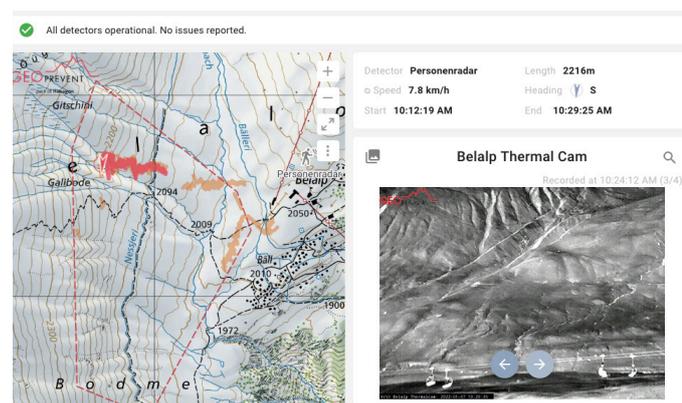
Belalp, Suisse : Système intégré de détection des avalanches et des personnes pour la surveillance de l'avalanche du Grat, qui est fréquemment déclenchée artificiellement.

Val Bever, Suisse : Un radar de détection de personnes est utilisé pour surveiller un itinéraire de ski alpinisme populaire avant les avalanches déclenchées artificiellement.

Type de système	 
Distance	
Météo	  
Coûts	\$\$-\$\$\$
Pour la surveillance de	



Radar de personnes de Zermatt (en haut), radar d'avalanches et de personnes de Belalp (en bas), Suisse



3.2.5 RADAR DE NIVEAU D'EAU

La jauge radar mesure la hauteur du débit d'une rivière ou d'un ruisseau. La montée soudaine du niveau de l'eau (inondation, laves torrentielles) déclenche une alarme et peut entraîner la fermeture d'une voie routière ou déclencher l'évacuation d'un chantier.

AVANTAGES

- **Technique fiable** pour mesurer la hauteur d'écoulement des surfaces turbulentes comme celle de laves torrentielles ou de vagues de crue.
- **Indépendante des conditions météorologiques** et de la lumière du jour
- **Mesure sans contact** qui n'est pas perturbée par l'événement lui-même (généralement monté sous un pont ou suspendu à des câbles tendus sur la rivière)
- Une **alarme** (fermeture de route ou diffusion de messages) est émise si un seuil de hauteur de débit prédéfini est dépassé.
- **Le portail de données en ligne** fournit un accès permanent aux **mesures en temps réel, aux séries chronologiques et aux images des caméras** (selon la visibilité et le système)

LIMITES

- Seuls les événements situés dans le champ de vision du radar peuvent être détectés. Pour surveiller un large lit de rivière et pour des raisons de redondance, nous recommandons l'utilisation de deux jauges radar
- Le capteur peut être directement exposé à un événement majeur et pourrait être endommagé

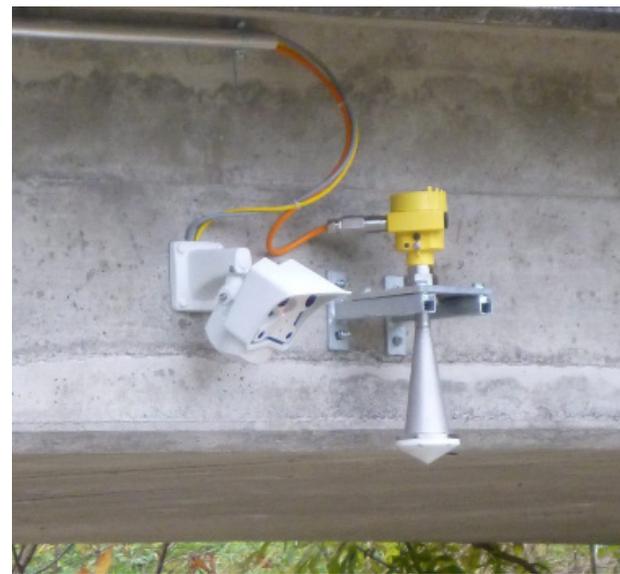
PROJETS DE RÉFÉRENCE

Vallée de Bondasca (Bondo), Suisse : Système d'alarme étendu de laves torrentielles avec un total de quatre jauges radar qui fournissent différents délais d'avertissement pour la fermeture automatique de la route principale de la vallée.

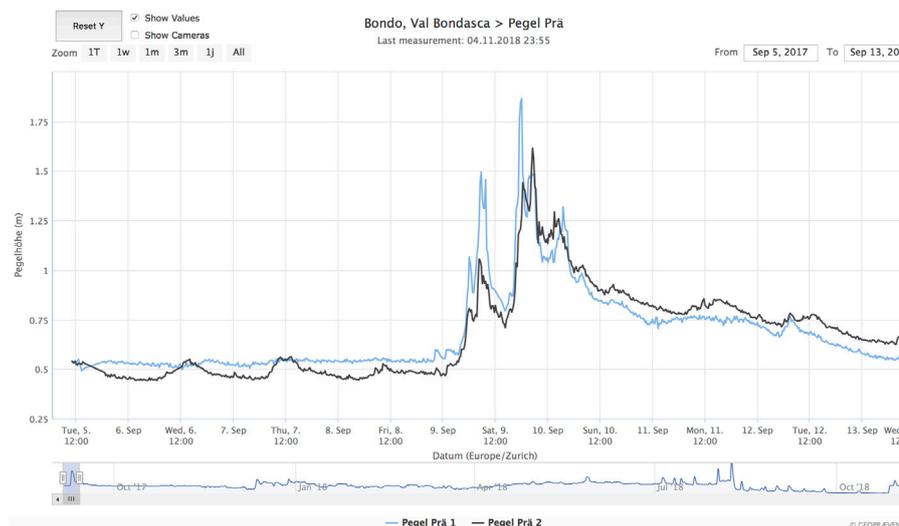
Kazbegi, Géorgie : Vaste système d'alarme pour les laves torrentielles qui protège la route d'accès au poste de contrôle frontalier voisin (frontière Géorgie-Russie).

Spreitgraben, Suisse : Système d'alarme de laves torrentielles étendu qui protège les voyageurs en fermant automatiquement la route du col du Grimsel en cas de laves torrentielles.

Type de système	
Distance	
Météo	
Coûts	
Pour la surveillance de	



Radar de niveau et caméra d'événement de Steinach (en haut), radar de niveau de Bondo (en bas)



3.3 LIDAR – LASER SCANNER TERRESTRE

Le lidar (Anglais : «light detection and ranging») est une méthode optique qui utilise des faisceaux laser pour mesurer les distances et les vitesses. Le lidar utilise des ondes électromagnétiques dans le spectre visible ou proche de l'infrarouge, qui sont beaucoup plus courtes que celles du radar. Il s'agit de la technologie idéale pour les relevés 3D de haute précision sur de grandes surfaces. De plus, les scans lidar peuvent être utilisés pour estimer les déplacements et les volumes.

AVANTAGES

- **Relevé à grande échelle** de parois rocheuses ou de glaciers avec une précision mm et une haute résolution spatiale (min. 0,5 x 0,5 m, selon la distance)
- Base de données pour la création de **modèles numériques de terrain**
- **Estimation du volume** des ruptures de roches et de glace.
- **Indépendant de la lumière du jour**, mais nécessite une bonne météo
- Portée jusqu'à **4 km**, couverture de plusieurs **km²**
- Analyse des déformations pour la détection des **grands déplacements** (1–10 cm et plus)
- La **végétation** peut être filtrée
- **Mesures périodiques** souvent combinées avec un radar interférométrique. Installation très rapide

LIMITES

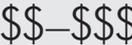
- Le lidar ne détecte que les grands changements (1–10 cm et plus, en fonction de la distance). Voir les détails à la page 26
- Une vue dégagée de la cible est nécessaire (les mesures sont difficiles dans le brouillard, la pluie ou la neige)
- Les résultats dépendent des algorithmes utilisés pour la comparaison des nuages de points

PROJETS DE RÉFÉRENCE

Biasca, Suisse : Mesures périodiques d'une grande paroi rocheuse (combinées à un interférométrique) pour les Chemins de fer fédéraux suisses afin de détecter les déformations et d'estimer les volumes de chutes de pierres.

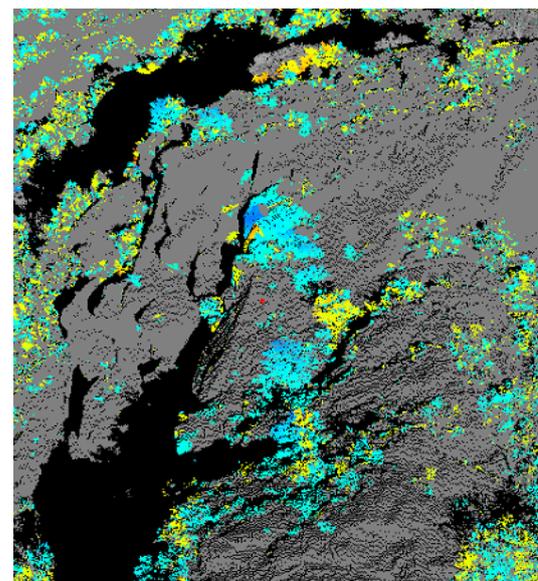
Liechtensteinklamm, Autriche : Mesures périodiques (combinées à un radar interférométrique) de la paroi rocheuse qui a produit l'éboulement de 2017 à Liechtensteinklamm (attraction touristique).

Saulcette, France : Mesures périodiques d'un versant glissant au-dessus d'une voie ferrée de la Société Nationale des Chemins de Fer SNCF. Mesures combinées avec un radar interférométrique.

Type de système	
Distance	
Météo	
Résolution	
Précision de l'analyse de déformation	 1–10 cm
Coûts	
Pour la surveillance de	



Scanner laser de Axenflue (Flüelen), Suisse



3.4 OPTIQUE – CAMÉRA DE DÉFORMATION

La caméra de déformation est une méthode rentable pour surveiller des grandes instabilités à distance. Grâce à l'analyse entièrement automatisée, des déplacements de quelques cm seulement peuvent être détectés.

AVANTAGES

- **Technologie de surveillance rentable** pour détecter les accélérations ou les ralentissements des déplacements
- **Traitement et sélection automatisés** des images grâce à des algorithmes sophistiqués
- **Visualisation des déplacements** par code de couleur
- Visualisation pratique des images avec une **puissante option de zoom**
- **Choix flexible des intervalles d'analyse** (quotidien, tous les deux jours, hebdomadaire, saisonnier)
- L'analyse des déplacements et les images brutes sont toujours disponibles sur le **portail de données en ligne** de Geoprevent
- **Photos haute résolution** pour une analyse manuelle des changements

LIMITES

- Efficace uniquement lorsque la visibilité est bonne (en journée, par beau temps)
- Ne convient pas pour les instabilités critiques
- **Contraste limité** : Une analyse d'image fiable nécessite des images à haut contraste. Pour les applications exigeantes, l'imagerie à grande gamme dynamique peut améliorer le contraste et faciliter l'analyse
- Seule les composantes perpendiculaires à la ligne de mire peuvent être mesurées
- Conditions neigeuses

PROJETS DE RÉFÉRENCE

Glacier de Weissmies, Suisse : La caméra de déformation a détecté l'accélération du glacier suspendu. Le radar interférométrique a ensuite été utilisé pour surveiller l'instabilité critique.

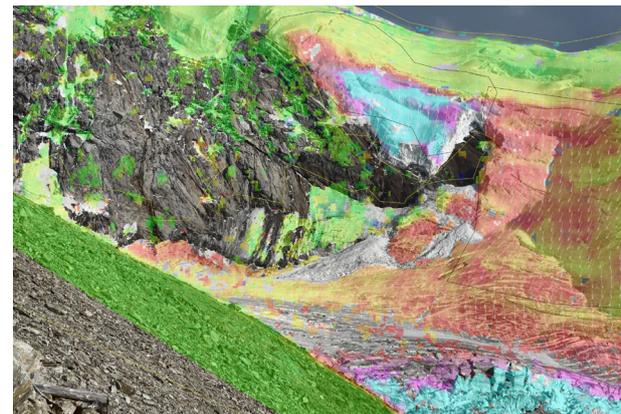
Glissement de terrain de Moosfluh, Suisse : Surveillance d'une grande instabilité de versant dans la région d'Aletsch depuis de l'autre côté de la vallée.

Glacier de Bis, Suisse : Surveillance d'une avalanche de glace dans la partie abrupte du glacier avec trois caméras ainsi qu'un radar d'avalanche et des fonctions d'alarme automatique. Surveillance du glacier suspendu sur le Weisshorn à 4133 m d'altitude.

Type de système	
Distance	
Météo	
Résolution	
Précision de l'analyse de déformation	 1–5 cm
Coûts	
Pour la surveillance de	 



Caméra de déformation du Weisshorn (Randa),
Caméra de déformation de Weissmies (Saas Fee),
Suisse



3.5 AUTRES

3.5.1 MESURE DE FISSURES

Deux types d'instruments peuvent être utilisés pour suivre de près le mouvement de formations rocheuses individuelles : Les téléjaugeurs mesurent la largeur des fissures et les extensomètres mesurent l'expansion et la compression des joints au sein d'une formation rocheuse. Il s'agit dans les deux cas de mesures ponctuelles locales qui nécessitent un accès à la zone à risque.

AVANTAGES

- **Téléjaugeur** : mesure du **mouvement différentiel de surface** entre deux corps rocheux avec une précision de mesure de 0,2–1 mm, en fonction du lieu d'installation, de la largeur de la fissure et du rayonnement solaire (cycle diurne)
- Les **extensomètres** sont placés dans des **trous de forage** et mesurent les **déplacements relatifs** entre la surface et la roche à différentes profondeurs avec une précision d'environ 0,1 mm
- **Mesure indépendante des conditions météorologiques** et de la lumière du jour
- Une **alarme automatique** peut être déclenchée si des seuils de déplacement prédéfinis (relatifs ou absolus) sont dépassés
- Mesure en continu, transmission des données par câble ou radio, accès aux données via le **portail de données en ligne** de Geoprevent

Pour la surveillance à grande échelle des formations rocheuses, nous recommandons le géoradar interférométrique. Les téléjaugeurs sont le complément idéal pour surveiller de près les faiblesses critiques.

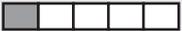
LIMITES

- Les mesures ne représentent le mouvement que dans le voisinage immédiat des téléjaugeurs et uniquement dans la direction où l'instrument est monté
- L'installation nécessite l'accès à des terrains dangereux
- Les instruments peuvent être détruits ou endommagés lors d'événements de rupture et ne sont alors plus disponibles pour surveiller les mouvements ultérieurs dans la zone affectée
- Les instruments eux-mêmes peuvent être exposés à des chutes de pierres et doivent être protégés

PROJETS DE RÉFÉRENCE

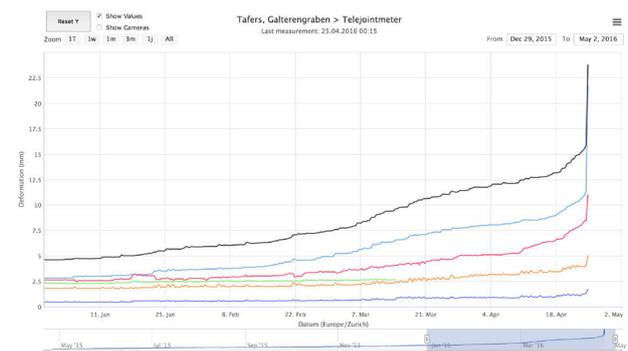
Éboulement de Tifers, Suisse : Surveillance d'une instabilité rocheuse au-dessus d'un bâtiment résidentiel et d'une zone de loisirs. Des mesures précises ont permis l'évacuation des résidents à temps.

Éboulement de Gurtellen, Suisse : Surveillance complète pendant les travaux de stabilisation des roches au-dessus de l'axe nord-sud des Chemins de fer fédéraux suisses.

Type de système	 
Distance	
Météo	
Précision de l'analyse de déformation	 > 10 cm
Coûts	\$\$-\$\$\$\$
Pour la surveillance de	



Téléjaugeur de Limmern (en haut), Téléjaugeur avec rupture de paroi rocheuse à Tifers (en bas), Suisse



3.5.2 GÉOPHONES ET SISMOMÈTRES

Les géophones et les sismomètres détectent les mouvements de masse en se basant sur le mouvement du sol. Les sismomètres sont beaucoup plus sensibles que les géophones. Les deux sont installés localement, et une détection fiable des événements nécessite généralement plusieurs capteurs redondants. Il est possible de faire en sorte que le système émette des alarmes et déclenche des réponses automatiques telles que la diffusion de messages ou la fermeture d'une route.

AVANTAGES

- **Méthode de détection locale et relativement simple** pour les avalanches et les coulées de débris
- **Capteurs robustes** bien adaptés aux environnements montagneux difficiles
- **Indépendant des conditions météorologiques** et de la lumière du jour
- **Fonctions d'alarme automatiques** et en temps réel
- Les **sismomètres** sont plus sensibles que les géophones et peuvent également être utilisés pour **surveiller l'activité des chutes de pierres** à une distance de plusieurs kilomètres
- L'accès aux données sur les mouvements du sol et aux images des caméras est toujours assuré par le **portail de données en ligne** de Geoprevent
- Intégration avec le **smartphone** et la **tablette**

LIMITES

- Les capteurs et les câbles peuvent être endommagés par des avalanches ou des laves torrentielles
- Détection difficile si le seuil de détection n'est pas atteint par des mouvements de masse (par exemple, les anciens dépôts d'avalanches atténuent les signaux)
- Des fausses alarmes causées par d'autres sources de bruit : tremblements de terre, tonnerre, animaux, personnes

PROJETS DE RÉFÉRENCE

Bondo, Suisse : Trois sismomètres servent de système redondant de détection des laves torrentielles dans la vallée de Bondasca. De plus, les sismomètres indiquent l'activité des chutes de pierres du Pizzo Cengalo, plus haut dans la vallée.

Quinto, Suisse : Géophone en complément d'un système de radar d'avalanche : les géophones indiquent jusqu'où l'avalanche s'est écoulée sur la pente inférieure qui n'est pas visible par le radar.

Type de système	
Distance	
Météo	
Traces d'avalanches	
Coûts	\$-\$\$*
Pour la surveillance de	

* dépend du nombre de capteurs installés



Géophone



Capteurs sismiques de Bondo, Suisse

3.5.3 LIGNE DE DÉCLENCHEMENT

Les lignes de déclenchement sont généralement tendues à travers des couloirs ou des lits de rivière et arrachées par des avalanches ou des laves torrentielles. Un point de rupture prédéfini assure une rupture immédiate pour une force donnée, déclenchant une alarme. Les lignes de déclenchement doivent être remplacées après chaque événement.

AVANTAGES

- **Méthode de détection simple et rentable** pour les avalanches et les coulées de débris (entre autres)
- **Indépendante des conditions météorologiques** et de la lumière du jour
- **Fonctions d'alarme** automatiques et en temps réel
- **Plusieurs types disponibles** (cordes, barres métalliques, etc.)

LIMITES

- Nécessite un remplacement après chaque événement
- La détection peut être empêchée parce que...
 - l'événement ne détruit pas la ligne de déclenchement (par exemple, l'ancre au-dessus du canal est aussi arrachée)
 - l'événement détruit la ligne de déclenchement en dehors du point de rupture prédéfini
 - l'événement change de cap et manque la ligne de déclenchement
- Fausse alarme si la ligne est déclenchée par des animaux ou des personnes
- Selon le type de ligne de déclenchement utilisé, l'état des lignes individuelles ne peut pas être vérifié à distance et des inspections régulières sont nécessaires

PROJETS DE RÉFÉRENCE

Bondo, Suisse : Les lignes de déclenchement qui faisaient partie d'un système d'alarme de laves torrentielles installé en 2015 ont détecté la lave torrentielle consécutive à l'avalanche de roches de 2017 sur le Pizzo Cengalo et ont immédiatement fermé les routes de la vallée.

Kazbegi, Géorgie : Système d'alarme de laves torrentielles étendu qui protège la route d'accès au poste de contrôle frontalier voisin (frontière Géorgie-Russie).

Spreitgraben, Suisse : Un vaste système d'alarme pour les coulées de débris protège les voyageurs en fermant automatiquement la route du col du Grimsel en cas de laves torrentielles.

Type de système	
Distance	
Météo	
Traces d'avalanches	
Coûts	
Pour la surveillance de	



Cordelettes de rupture à Bondo (en haut), Suisse et à Kazbegi (en bas), Géorgie



3.5.4 GNSS (GPS)

Les stations GPS différentielles mesurent le mouvement d'une zone instable dans le temps, avec une station montée dans une zone stable comme point de référence. Les instruments GNSS enregistrent les positions dérivées du satellite et les transmettent à nos serveurs pour l'analyse des déplacements.

AVANTAGES

- **Technique simple de surveillance des glissements de terrain** avec une précision d'environ 5 à 10 mm
- **Calcul du déplacement en 3D possible** (avec une précision légèrement inférieure dans la verticale)
- **Indépendant des conditions météorologiques** et de la lumière du jour
- Des **messages d'avertissement** peuvent être envoyés lorsque les seuils de déplacement sont dépassés
- Les séries chronologiques de déplacement de tous les instruments GNSS individuels sont toujours disponibles sur le portail de **données en ligne** de Geoprevent
- Intégration avec les **smartphones** et les **tablettes**

LIMITES

- La mesure s'applique uniquement au déplacement à proximité immédiate de l'instrument
- La précision de la mesure dépend du nombre de satellites visibles
Des vallées étroites, des parois rocheuses ou des arbres à proximité peuvent réduire la précision
- Mesure impossible lorsque les instruments sont recouverts de neige
- La station de référence doit être montée sur un sol stable

PROJETS DE RÉFÉRENCE

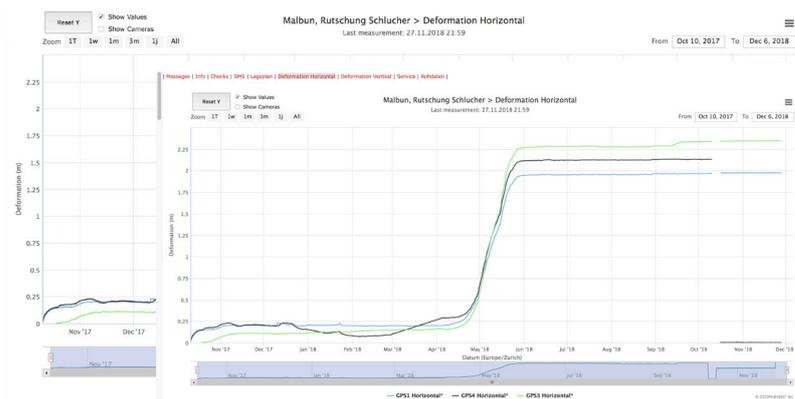
Glissement de terrain de Schlucher, Liechtenstein : Surveillance du glissement de terrain de Schlucher avec trois stations GPS.

Glissement de terrain de Zongling, Chine : Mesure du déplacement du glissement de terrain avec sept GPS et une station de référence.

Type de système	
Distance	
Météo	
Coûts	
Pour la surveillance de	



Station GNSS du glissement de Schlucher (Malbun), Liechtenstein



3.5.5 CAPTEURS DE MOUVEMENT COMBINÉS

Les barrières contre les chutes de pierres et les laves torrentielles n'offrent une protection fiable que si elles sont intactes, ce qui rend leur surveillance essentielle. Des événements peuvent endommager les filets et nuire à leur fonctionnalité, ce qui réduit la protection contre les événements ultérieurs. L'installation de capteurs combinés de vibrations et d'inclinaison sur les barrières fournit des informations précieuses sur leur état actuel. En combinaison avec des lignes de déclenchement, le système peut également être utilisé comme système d'alarme.

AVANTAGES

- **Aperçu permanent de l'état** des différents filets de protection via un portail de données en ligne
- Le capteur combiné **enregistre le moindre changement** de position et transmet les données à la station de réception
- **Combinaison avec une ligne de déclenchement** : une ligne de déclenchement tendue au-dessus du filet augmente la zone à surveiller et détecte les événements importants
- La mesure des vibrations **fournit des indications sur les événements mineurs** pour lesquels la corde de déclenchement n'a pas été tirée
- **Réduction des coûts** d'entretien de la barrière (inspection des sites seulement si nécessaire)
- **Activation automatique de l'alarme** en temps réel
- **Indépendant du temps** et de la lumière du jour
- Installation **facile**, capteurs **robustes et sans entretien**

LIMITATIONEN

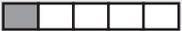
- La ligne de déclenchement doit être réparée après un événement
- Possibilité de fausses alarmes dues à la neige ou à d'autres objets
- Installation dans une zone dangereuse

REFERENZPROJEKTE

Ovella, Suisse : Depuis l'été 2015, plus de 100 capteurs combinés et lignes de déclenchement surveillent plus de 1,2 km de filets de protection du chantier de construction des centrales hydroélectriques de l'Inn près d'Ovella en Engadine.

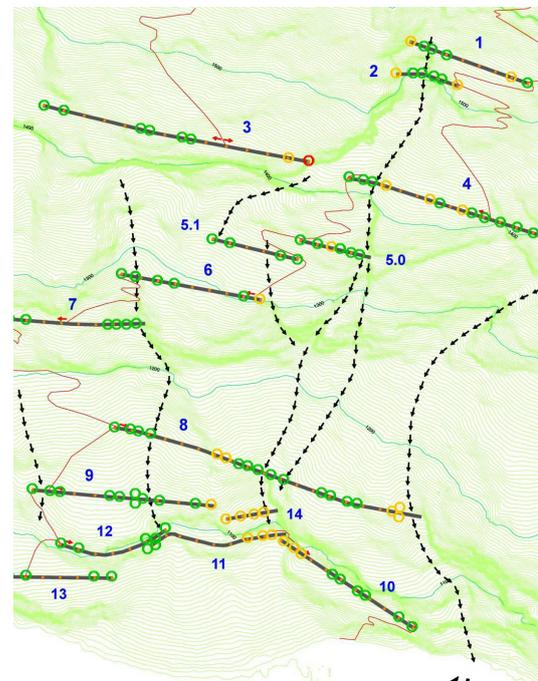
Axenstrasse, Suisse : Surveillance des barrières de protection contre les chutes de pierres au-dessus de l'Axenstrasse : le radar ferme la route en cas de détection d'une chute de pierres. Si les capteurs combinés ne détectent pas d'impact dans les filets de protection, la route est automatiquement ouverte.

Ligne CFF du Gothard, Suisse : Des capteurs combinés surveillent les filets de protection contre les chutes de pierres aux points critiques et protègent les voies des CFF (Chemins de fer fédéraux suisses) à travers les Alpes.

Type de système	 
Distance	
Météo	  
Coûts	
Pour la surveillance de	 

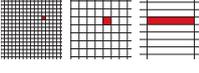


Capteur combiné du chantier de la centrale de l'Inn à Ovella, Autriche

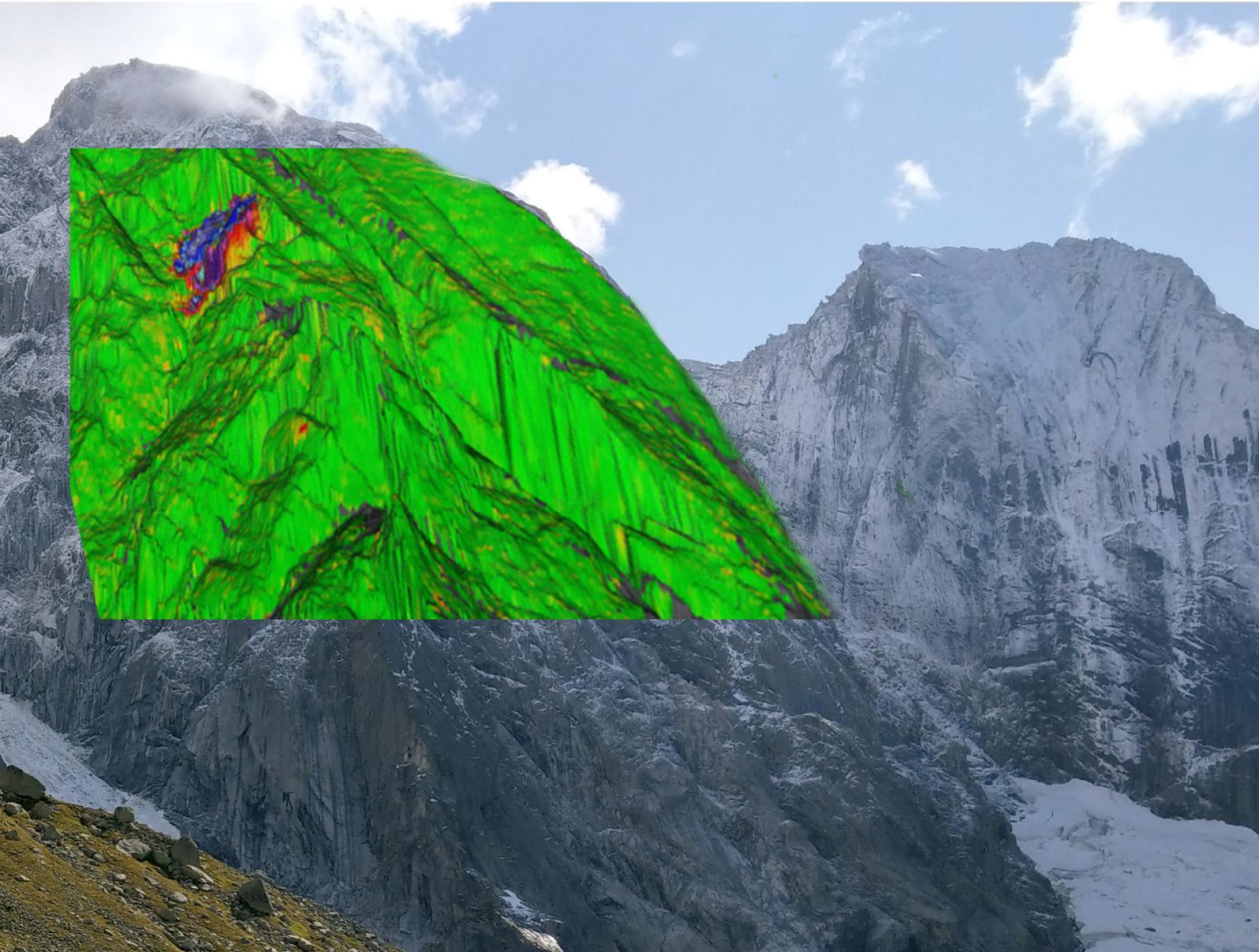


4 ANNEXE

SYMBOLES

	Système d'avertissement		Lidar terrestre
	Système d'alarme		Laser
	Capteurs		Radars d'avalanche Radars de chutes de pierres Radars de lave torrentielle
	Traitement Des Données		Géoradar terrestre
	Alarme		Géoradar (satellite)
	Portail de données		Radars de niveau
	Communication		Géophone Capteur sismique
	Météo (jour / bonnes conditions, nuit, brouillard, neige / pluie)		Ligne de déclenchement
	Résolution		Capteurs de mouvement combinés
	Coûts		Caméra de déformation
	Traces d'avalanches		Station totale
	Avalanches		Hauteur de neige
	Éboulement Chutes de pierres		GNSS (GPS)
	Laves torrentielles		Mesure de fissures
	Glissements de terrain		Infrason
	Inondations		Technologie futures Drones

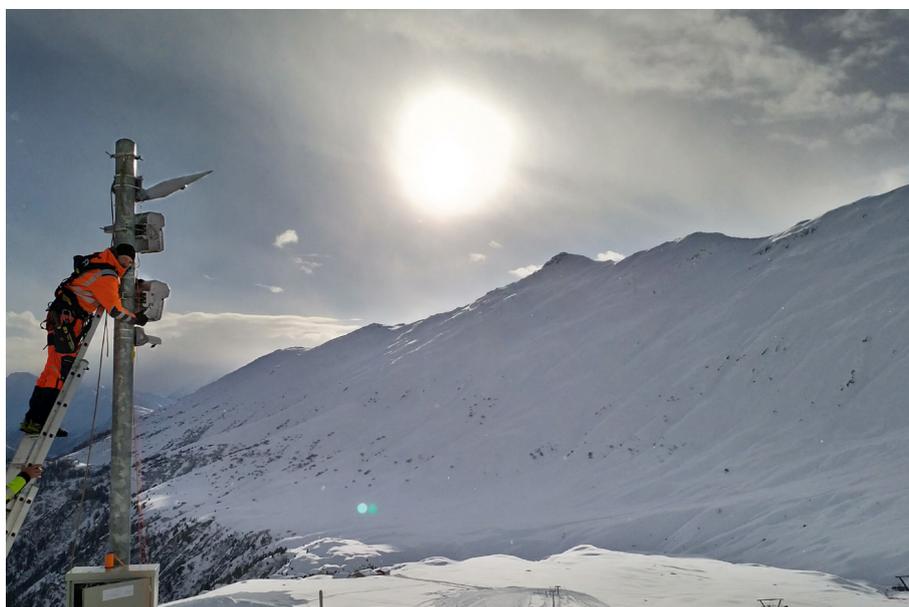




Radar interférométrique installé au Piz Cengalo (Bondo), Suisse

SYSTÈMES D'ALARMES ET D'AVERTISSEMENT POUR LES DANGERS NATURELS

Geoprevent fournit des solutions d'alarme et de surveillance pour un large éventail de risques naturels. Nous surveillons la zone de danger pour mesurer les signes précurseurs d'un événement ou nous détectons l'événement lui-même et déclenchons automatiquement des alarmes. Geoprevent fournit également une technologie permettant de détecter les personnes se trouvant dans la zone dangereuse (par exemple, avant le déclenchement artificiel d'une avalanche).



Radar d'avalanches et de personnes de Belalp, Suisse

GEOPREVENT
Räffelstrasse 28
8045 Zurich
Suisse

Tel. +41 44 419 91 10
info@geoprevent.ch

Plus d'informations : www.geoprevent.com

Suivez-nous sur

