



INTERREG III A Projet n° 179 (ex n° 046)

RiskYdrogé

“Risques hydrogéologiques en montagne : parades et surveillance »

Activité 4. Systèmes d'instrumentation Inventaire des méthodes et systèmes d'instrumentation

Partenaires et financeurs :



Région autonome Vallée d'Aoste
Assessorat du territoire,
de l'environnement et des ouvrages publics
Regione autonoma Valle d'Aosta
Assessorato del territorio,
ambiente e opere pubbliche



CANTON DU VALAIS
KANTON WALLIS



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

En collaboration avec :



Pôle Grenoblois
Risques Naturels



SOMMAIRE

1. PREAMBULE	4
2. DEFINITIONS PREALABLES	5
2.1. Auscultation	5
2.2. Mise en observation	5
2.3. Suivi	6
2.4. Surveillance.....	6
2.5. Détection	7
3. CONCEPTION GENERALE – MODELE DE SURVEILLANCE	7
3.1. Définition des objectifs	7
3.2. Formalisation, adaptation du projet de surveillance au site	8
3.3. Définition d'un cahier des charges	8
3.4. Points principaux d'un cahier des charges	8
3.4.1. Objectifs du projet.....	9
3.4.2. Durée du projet.....	9
3.4.3. Exploitation La gestion des données.....	9
3.4.4. Moyens et méthodes.....	11
3.4.5. Les contraintes	12
3.4.6. Les coûts	14
3.5. Modèle de surveillance	15
4. MODELES D'INTERPRÉTATION - DIAGNOSTIC	16
4.1. Remarque préliminaire.....	16
4.2. Types de modélisation	16
4.2.1. Les modèles géomécaniques	16
4.2.2. Les modèles cinématiques	16
4.3. Période d'initialisation.....	17
4.4. Évolution des modèles – approche de la rupture	17
4.5. Problématique de la prévision – Évaluation prévisionnelle.....	18
4.6. Évaluation des délais de préavis	18
5. MÉTHODES DE "SURVEILLANCE"	19
5.1. Caractéristiques générales.....	19
5.2. Descriptif des méthodes de surveillance.....	20
6. INSTRUMENTATION	26
6.1. Orientations générales vers le choix des instruments adaptés	26
6.2. Description technique des instruments de mesure – Base de données	28
6.2.1. Emissions acoustiques.....	30
6.2.2. Extensométrie.....	31
6.2.3. Géodésie – Topographie	39
6.2.4. Inclinométrie	43
6.2.5. Interférométrie	46
6.2.6. Laser.....	47
6.2.7. Météorologie	48
6.2.8. Photogrammétrie.....	49
6.2.9. Piézométrie.....	50
6.2.10. Pressiométrie.....	52

6.2.11.	Radar ;	53
6.2.12.	Réfléctométrie	54
6.2.13.	Vidéogramétrie.....	55
7.	EXPLOITATION	56
7.1.	Consignes d'exploitation	56
7.2.	Procédures d'auto adaptation.....	57
7.3.	Procédures de diagnostic.....	57
7.4.	Gestion des alertes	57
7.5.	Procédures de liaison avec les autorités.....	58

1. PREAMBULE

En présence d'un type de versant instable ou susceptible de le devenir, menaçant des personnes ou des biens, plusieurs solutions se présentent :

l'évitement ou l'évacuation de la zone dangereuse,

la réalisation de travaux de stabilisation ou de protection,

une troisième possibilité, qui vient parfois en association avec les précédentes, consiste à laisser les choses en l'état et installer un système de surveillance permettant de suivre l'évolution du phénomène. Cette troisième solution est valable pour les sites où il n'est pas possible de diminuer significativement le risque, soit pour des raisons techniques, soit pour des raisons financières. Les mesures de fermeture d'itinéraire, évacuation de populations, etc... seront conditionnées par la détection d'accélération anormales des déplacements laissant supposer le passage en phase de divergence du mécanisme de rupture.

Le présent chapitre a pour objectif de fournir, aux bureaux d'étude, aux maîtres d'ouvrage et aux maîtres d'œuvre confrontés à un problème de surveillance de versant instable des éléments nécessaires et utiles à la définition du système adapté au problème posé.

D'une manière générale, une étude du site (comprenant éventuellement des sondages, des essais *in situ*, etc.), ayant caractérisé une instabilité déclarée ou potentielle, est supposée avoir été réalisée, et la mise sous surveillance du site décidée, dans le cas de mouvements lents, si les mesures de stabilisation ou protection directe des populations ou des biens menacés paraissent impossibles. Dans certains cas, nous pouvons être amenés à équiper en urgence un site instable récemment déclaré, quitte à améliorer et à adapter au mieux le dispositif de surveillance à la suite des études de reconnaissance et de caractérisation de ce site.

Un système de surveillance comporte toute une panoplie de méthodes. Dans ce document l'accent sera principalement mis sur l'instrumentation, mais il ne faut pas perdre de vue que l'inspection visuelle régulière du site (évolution des fissures, apparition de nouvelles fissures, de venues d'eau, etc.) constitue un complément indispensable à la mesure, qui ne peut se réduire à l'interprétation de tableaux ou de graphiques.

La surveillance d'un site fait intervenir différents acteurs dont les rôles respectifs sont les suivants :

- a - le Maître d'Ouvrage de la surveillance (maire de la commune concernée, gestionnaire de l'ouvrage menacé...), décide d'une mise sous surveillance, définit ses objectifs, finance la mise en place et l'exploitation du système ; dans certains cas, ce maître d'ouvrage s'adjoint les services d'un Maître d'Ouvrage chargé d'organiser, mettre en place et exploiter le système de surveillance ;
- b – le géotechnicien spécialiste de stabilité des pentes, qui analyse le phénomène, détermine son évolution potentielle, effectue les mesures ou contrôle leur réalisation, les interprète et définit les seuils d'alerte et prévient le responsable de la sécurité s'il le juge nécessaire ;
- c - les techniciens spécialistes de l'installation du système, de sa maintenance, voire des mesures *in situ* lorsque celles-ci sont très spécifiques ;
- d - les destinataires des messages d'alertes et d'alarmes (experts, administrations, public...) ;
- e - le responsable de la sécurité, qui décide des mesures conservatoires, en général sur avis du géotechnicien, et gère la crise (évacuation, interdiction d'accès, etc...) : il s'agit du représentant de l'autorité de gestion (préfet, maire)

En général, le géotechnicien est le véritable opérateur de la surveillance ; il est lié contractuellement au maître d'ouvrage et assure la tâche définie en (b) ainsi que, éventuellement par sous-traitance à des spécialistes, celle définie en (c).

La mise sous surveillance d'un versant instable ne se réduit pas à l'installation d'appareils sur le site par des techniciens. Il est nécessaires de prendre en compte deux aspects parfois négligés dans une première approche :

- il faut dès l'origine anticiper sur le mode d'exploitation des informations fournies par le système, en particulier la transmission des alertes et la manière de gérer celles-ci : préparation de scénarii d'action formalisés sous la forme d'un plan de secours ;
- la surveillance nécessite de la part du Maître d'Ouvrage la mise en place des moyens nécessaires à assurer le fonctionnement et la pérennité du système (entretien, personnels de permanence, voire d'astreinte, etc.).

2. DEFINITIONS PREALABLES

Le terme "surveillance" , souvent pris au sens large, recouvre des notions différentes par leurs objectifs et leurs implications, telles que l'observation, le suivi, l'auscultation, la surveillance, la détection ... Pour éviter tout risque de confusion, il est nécessaire de d'en clarifier la terminologie. Au cours de ce projet, les définitions suivantes ont été adoptées¹.

2.1. Auscultation

L'auscultation représente l'ensemble des investigations, des méthodes et des moyens mis en œuvre sur un site visant à étudier et caractériser le phénomène et les mécanismes mis en jeu. Cette définition place l'objectif principal de l'auscultation au niveau de l'étude phénoménologique. On notera que les objectifs de gestion de la sécurité en sont exclus bien que certaines données élaborées dans le cadre de l'auscultation soient utilisables pour une surveillance.

Les moyens d'investigation peuvent être complexes, évolutifs, expérimentaux, prioritairement adaptés à la recherche de données pertinentes relatives aux mécanismes mis en jeu. Les méthodes d'analyse et d'interprétation peuvent comporter une part de recherche et de tâtonnement relativement important, sans nuire à l'obtention des objectifs. De même la valorisation des données est faite en temps différé. Toutefois, les délais de production des résultats de ces investigations doivent être compatibles avec la mise en place ou l'activation d'un programme de surveillance, si nécessaire.

2.2. Mise en observation

La mise en observation repose sur la définition de témoins d'observation qualitative ou quantitative s'appuyant sur des indices ou repères naturels, visibles sur des photos ou des schémas multitudes, artificiels et permettant de mettre en évidence l'activité du site à l'échelle de temps humaine.

La mise en observation constitue souvent une étape préparatoire destinée à confirmer la réalité d'un risque à prendre en compte à l'échelle de temps habituelle. Elle peut conduire à justifier un niveau d'investigation supérieur. D'une manière générale elle permet de constituer une "mémoire objective" de l'état du site et de son évolution, dont l'exploitation ultérieure pourra s'avérer particulièrement précieuse.

La mise en observation n'implique pas de notion de périodicité de mesure régulière ou prédéfinie. Celle-ci est dictée par les conditions relatives au site (géologie, évolution, niveau d'activité probable, environnement, acuité du risque.).

¹Il s'agit bien de pathologie
Inventaire piloté par Cete et RAVA

2.3. Suivi

Il s'agit d'un examen périodique du site avec recueil de données qualitatives et quantitatives caractérisant son évolution. Les témoins ou les variables d'évolution peuvent être de même nature que pour la mise en observation, cependant, les moyens mis en œuvre sont à la fois plus importants, plus complets et mieux ciblés car la situation de risque confirmée justifie une prise en compte effective.

Techniquement les méthodes et les moyens mis en œuvre peuvent être proches de ceux correspondant à la surveillance. Ils en diffèrent essentiellement par l'absence de contrainte directe de gestion de la sécurité.

Le suivi impose une fréquence de mesure régulière, éventuellement modulable en fonction des données et des événements, et une exploitation régulière des informations permettant d'actualiser la situation dans des délais compatibles avec une éventuelle mise en œuvre d'un programme de surveillance.

2.4. Surveillance

La surveillance consiste à recueillir de manière automatisée, exploiter et interpréter périodiquement des données qualitatives et quantitatives caractérisant l'état d'un site et son évolution, avec pour objectif la gestion de la sécurité. Cette définition différencie la surveillance des autres notions.

Les méthodes et les moyens mis en œuvre recoupent en grande partie les méthodes et les moyens utilisés dans le cadre du suivi ou de l'auscultation, dès lors que ceux-ci sont compatibles, par leurs caractéristiques techniques et d'exploitation de même qu'avec les contraintes découlant d'un cahier des charges et associées à un objectif de sécurité (nature des informations, performances, fiabilité, délai de mise en œuvre et d'exploitation...). Par ailleurs ces contraintes conduisent à privilégier certaines caractéristiques particulières et à développer ou adapter des méthodes ou des moyens spécifiques.

La surveillance doit prendre en compte les alertes :

- Les alertes techniques qui concernent l'état et le fonctionnement du dispositif de surveillance et identifient une situation de dysfonctionnement ou un besoin de maintenance préventive à court terme (cf. chapitre 7);
- les alertes opérationnelles qui correspondent au dépassement des seuils fixés pour les variables d'alerte du système. Elles correspondent à un (ou plusieurs) scénario d'aggravation possible du risque (cf. chapitre 7).

En fonction des caractéristiques du site, des mécanismes mis en jeu, de leur évolution prévisible, la fréquence et le mode d'acquisition peuvent varier:

- **Mode périodique**
La fréquence des mesures peut être mensuelle à pluri annuelle, le plus souvent déterminée en fonction des facteurs climatiques (cycle saisonnier, fonte des neiges, alternance saison sèche/saison humide). Le mode périodique est applicable aux phénomènes évoluant lentement ou à un stade d'évolution précoce.
- **Mode permanent discontinu**
L'ensemble des moyens de surveillance est toujours opérationnel, actif ou en état de veille. Les données sont recueillies de manière discontinu avec une périodicité variable. Pour une périodicité inférieure à la journée (périodicité horaire et moins) on parle de mode permanent discontinu fréquent.
- **Mode continu**
Les données sont recueillies de manière continue. En revanche leur transmission et leur gestion au sein du système de surveillance sont généralement assurées selon un mode discontinu fréquent. Le mode continu diffère du mode permanent discontinu par l'accès

à la totalité des informations en fonction des temps et le report de l'échantillonnage au stade du traitement (absence de périodes aveugles).

- **Mode temps réel**

Les données acquises sur le site sont transmises et traitées de manière continue par le système de surveillance. Ce dernier produit des informations élaborées interprétables et exploitables dans un processus de gestion de la sécurité. Selon la complexité des phénomènes, la sophistication et l'intégration des systèmes, la nature et le niveau des informations élaborées peuvent être très variables. Dans tous les cas, la phase d'interprétation est déterminante et nécessite l'intervention d'un spécialiste connaissant bien le site et le système. Dans le cas des mouvements de versants de grande ampleur la notion de temps réel doit être prise au sens large. Dans la réalité la complexité et l'extension des réseaux de surveillance imposent des délais de transmission, contrôle et traitement des données relativement importants, auxquels il faut ajouter le temps nécessaire à l'analyse et à l'interprétation des résultats. En conséquence, il s'agit plutôt d'un fonctionnement en mode continu différé à court délai de réponse.

2.5. Détection

Recueil et traitement d'un nombre limité de variables de type logique caractérisant un état associé à des configurations particulières du risque (scénarios de réalisation de l'aléa). L'objectif est essentiellement la reconnaissance immédiate de l'existence d'une situation type, identifiée à une situation de danger particulier prise en compte dans les dispositions d'un plan de secours, et de permettre l'activation de celui-ci.

La détection correspond généralement à un processus automatique (ou largement automatisé) répondant à des scénarios de rupture prédéfinis ne nécessitant aucune interprétation.

3. CONCEPTION GENERALE – MODELE DE SURVEILLANCE

3.1. Définition des objectifs

Quel que soit le niveau considéré, la définition précise et explicite des objectifs d'une stratégie de "surveillance" (au sens large) est indispensable². Les objectifs peuvent varier notablement de même que les contraintes qui en découlent. Les acteurs concernés sont multiples avec des domaines de compétence et de responsabilité divers. Leur implication est variable selon les cas, les enjeux et le degré d'évolution du phénomène. Il s'agit :

- des spécialistes chargés de la "surveillance"
- des experts chargés d'analyser le comportement du site
- des services gestionnaires et décideurs
- des autorités responsables de la sécurité
- des service de secours
- des populations exposées....

L'action cohérente et coordonnée des différents acteurs nécessite une définition claire des objectifs, de leurs modalités d'application, et des contraintes correspondantes. Pour toute action de "surveillance" la rédaction préalable d'un cahier des charges, porté à la connaissance des acteurs concernés s'impose. Le cahier des charges et ses modalités d'application doivent pouvoir être actualisés en fonction de l'évolution du phénomène.

Il est toujours important de bien identifier les domaines d'application et les limites des différents outils mis en œuvre.

² Dans la suite de ce document la notation "surveillance" indique que ce terme est pris au sens large
Inventaire piloté par Cete et RAVA

3.2. Formalisation, adaptation du projet de surveillance au site

La démarche amont doit consister à identifier les différents composants du projet et à les représenter d'un logigramme prenant en compte les critères suivants :

- Les informations à obtenir (nature, qualité) ;
- L'efficacité, la complémentarité et l'interaction des dispositifs ;
- La recherche ou l'évitement de redondances des systèmes ;
- La détection des points critiques dans le planning de réalisation (aléas saisonniers) ;
- La prise en compte des contraintes particulières au site (accessibilité, fourniture d'énergie, moyens de communication) ;
- Les restitutions prévisibles (nombre, qualité) ;
- Etc...

3.3. Définition d'un cahier des charges

Le contenu du cahier des charges doit s'adapter au type de surveillance souhaité. Par exemple , sa ira croissante avec son niveau d'implication dans le plan de secours.

La rédaction du cahier des charges se fait généralement plus de manière empirique qu'à la suite d'une véritable analyse des objectifs, des contraintes et des limites du système,.

Les recherches en matière de conception et d'analyse de la surveillance des grands mouvements de terrain, généralement orientées vers des aspects particuliers (conception de systèmes informatiques, réseaux de télémessure...), restent rares. (**Activité 3 Télésurveillance**). Dans le cas des mouvements de versants de grande ampleur, la complexité du problème justifie une approche globale analogue à celle développée pour la surveillance des sites industriels à risques. Cet axe de recherche reste à développer.

3.4. Points principaux d'un cahier des charges

La conception d'un cahier des charges destiné à la mise en œuvre d'une action de surveillance doit **impérativement** passer par une analyse des besoins d'identifier les contraintes liées à sa réalisation. Un certain nombre d'éléments de réflexion doivent **nécessairement** être pris en considération (Fig. 4.1)

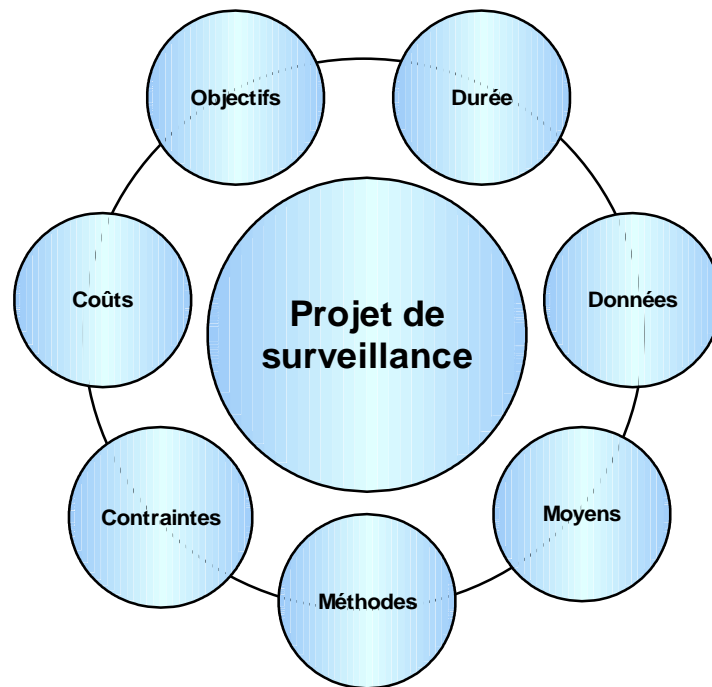


Figure 4. 1. Composantes du cahier des charges d'un projet de surveillance.

3.4.1. Objectifs du projet

Le projet doit être clairement exprimé en distinguant ce qui relève de la surveillance stricto sensu de toute autre notion (auscultation, suivi, etc.). L'objectif général ainsi que les objectifs particuliers seront précisés. En fonction de la durée de l'étude, il conviendra de définir les objectifs de surveillance à court, moyen et long terme.

3.4.2. Durée du projet

La planification et le dimensionnement du projet passent par la prise en compte de la durée effective ou prévisionnelle de la surveillance. En phase travaux, sa durée doit être au moins égale à leur durée. Pour les autres cas il faudra prévoir une durée pouvant être très longue. Ces informations doivent être intégrées, dans la mesure du possible, dans la phase d'analyse des besoins.

3.4.3. Exploitation La gestion des données

La définition d'un projet de surveillance, notamment de longue durée, doit s'accompagner d'une réflexion sur la gestion et la diffusion des données, aussi bien des données entrantes que des informations ou des produits élaborés en retour. Elle doit nécessairement considérer tous les aspects relatifs à l'exploitation des données, à savoir :

L'acquisition :

Cet aspect concerne la nature des données et informations à recueillir ainsi que les délais d'acquisition.

Le **délai d'acquisition** peut être défini comme le temps nécessaire à l'aboutissement de l'ensemble de la procédure permettant l'acquisition et l'enregistrement d'une série de mesures sur site. Ce paramètre varie en fonction de l'activité du site, de la nature des données, de la complexité du

dispositif³ mis en œuvre et de son degré d'intégration. Plusieurs niveaux d'acquisition correspondant à des scénarios de veille ou de crise sont parfois nécessaires. Ils permettent d'optimiser les délais d'acquisition par une *hiérarchisation* des données recueillies et/ou des sites de mesure.

Le traitement : (procédés d'analyse qui rendent les données exploitables)

Les procédures de traitement, d'analyse et de contrôle qualité seront donc définies au préalable.

La production :

La fonction production correspond à la génération des informations et des produits élaborés à partir des données brutes. Elle suppose l'identification des différents types d'informations et de produits à fournir aux utilisateurs. La nature des produits sera précisée en distinguant, d'une part, les produits délivrés en temps réel⁴ de ceux élaborés en temps différé, d'autre part les informations systématiques de celles produites à la demande.

L'archivage :

L'archivage des données brutes et des produits générés doit garantir la pérennité et l'accessibilité des informations sur une durée au moins égale à celle du projet. Le ou les supports de stockage envisagés (p.ex. base de données, fichiers disques, support de masse, etc.) doivent satisfaire à cette exigence.

La diffusion :

La diffusion correspond à la mise à disposition des utilisateurs des données produites par la surveillance. Elle requiert :

- L'identification du ou des supports utilisés pour la distribution des données ;
- La définition du type d'information à transmettre et l'identification des utilisateurs . La pluralité des acteurs impliqués dans la gestion des risques conduit à différencier et à adapter la nature et le format des informations diffusables en fonction de leurs besoins respectifs. En parallèle, les types d'informations susceptibles d'être fournies en retour par les utilisateurs ainsi que leurs éventuels modes de diffusion (nature et phasage des mesures de sécurité, délais de mise en œuvre des dispositions du plan de secours et délais de préavis), doivent être déterminés.;
- La prise en compte du **temps de réponse**, c'est à dire le délai séparant la fin d'une phase d'acquisition de la fourniture des informations traitées aux différents utilisateurs. Ce paramètre inclut les temps de traitement, de contrôle qualité, de formatage et de transmission des données. Il varie en fonction de la complexité du dispositif¹, de l'intégration du système et de la "qualité" des modèles interprétatifs (mais aussi de la nature des aléas et des enjeux). La disponibilité du (ou des) spécialiste(s) chargé(s) de la validation des données et de leur interprétation est à prendre en compte car il convient de distinguer les délais propres aux situations de veille et de crise, qui peuvent nécessiter l'instauration d'astreintes ou de permanences pour les personnes chargées de suivre l'évolution du site instable; Les données diffusées peuvent être utilisées par les spécialistes en charge du suivi du site pour activer un plan de secours ou plus simplement pour évacuer des équipes travaillant sur le site ou à proximité.

³ dispositif : terme pris dans son sens large. Ensemble des méthodes et des moyens mis en œuvre dans une opération de "surveillance"

⁴ temps réel: s'entend comme information produite par un mode de fonctionnement continu différé à court délai de réponse

- Le rafraîchissement des informations à fréquence déterminée.

3.4.4. *Moyens et méthodes*

Les moyens et méthodes mis en œuvre sont le cœur du dispositif de surveillance. La définition précise de ces derniers se fait, aux différents stades du projet (conception, mise en place et actualisation), en collaboration étroite entre les différents acteurs. Si les dispositions techniques globales (méthodes instrumentales) sont généralement convenablement exprimées, en revanche les spécifications techniques détaillées (cf. durée de vie des différents composants) sont rarement précisées ce qui handicape l'évaluation technique précise du dispositif. Cette insuffisance est préjudiciable à la continuité et à la cohérence dans le temps de la "surveillance" (changement d'opérateur, renouvellement de méthodes, réactivation après une période de mise en sommeil du dispositif).

Les moyens :

Sont entendus en termes de moyens, les ressources techniques et humaines nécessaires pour la mise en œuvre de la surveillance.

Les moyens techniques : ils incluent les installations et dispositifs techniques requis par le projet à savoir : l'instrumentation (types de capteurs, stations de mesure, etc.), les équipements de télécommunication, les infrastructures particulières (sur site et hors site) ainsi que les ressources informatiques (machines, outils logiciels, périphériques, etc.). Seront également fournis les éléments permettant d'apprécier l'architecture et la topologie du dispositif de surveillance en précisant les relations entre les différentes composantes : relations éventuelles entre les différents sites de mesures, relations entre les installations techniques (i.e. stations de mesure, terminaux déportés, centre d'exploitation, etc.).

Les moyens humains : ils incluent tous les intervenants impliqués dans le projet ainsi que les informations afférentes, à savoir : type (interne/externe), rôle (exploitation du système, maintenance, administration, expertise, etc.), privilèges d'accès, informations requises et/ou transmises. On veillera également à clairement définir les interactions prévues entre les différents acteurs (p.ex. logigramme organisationnel du projet, logigramme d'exploitation, chaînes d'intervention, etc.).

Les méthodes :

Les méthodes définissent les principes de fonctionnement qui régissent la "surveillance". Il est essentiel que ces procédures aient été clairement identifiées et convenablement prises en compte dès la conception et actualisées en fonction de l'évolution de la situation.

On s'attachera à séparer les procédures d'exploitation proprement dites des procédures d'alerte et/ou d'intervention. En ce qui concerne l'exploitation, il conviendra de distinguer la surveillance courante (veille) des situations de crise pour lesquelles les dispositions, les exigences de mesure et les contraintes sont différentes. Concernant les alertes et interventions, on s'efforcera de préciser : les différents acteurs impliqués pour chaque niveau d'alerte (listes de diffusion) et leurs éventuelles relations (chaîne d'intervention), la ou les procédures d'acquittement des alarmes, la ou les procédures d'activation du ou des plans d'intervention.

Le cahier des charges devra également faire référence, dans la mesure du possible, aux méthodes et/ou modèles d'interprétation des données qui seront mis en œuvre ainsi qu'aux critères d'analyse utilisés. Ce point constitue incontestablement l'un des aspects les plus délicats, dans la mesure où il est généralement difficile de les formuler de manière précise au stade initial d'une opération de "surveillance", sachant que les méthodes et les outils mis en œuvre peuvent et/ou doivent être amenés à évoluer en fonction de l'état de la connaissance du site et de son évolution. Par ailleurs,

cet examen critique est indispensable à une évaluation aussi objective que possible des limites de la surveillance de l'auscultation ou du suivi.

3.4.5. Les contraintes

D'une manière générale, les contraintes regroupent les restrictions, les limites et les exigences requises et/ou induites par la mise en œuvre d'un système. Concernant une action de surveillance, différents types de contraintes sont à prendre en considération et doivent être mises en avant dans le cahier des charges.

Contraintes de sites :

Elles regroupent les contraintes inhérentes à la configuration du ou des sites sous monitoring : topographie, géométrie, accessibilité, infrastructures existantes, nature et vitesse du mouvement, etc. La prise en compte de ces paramètres est indispensable puisqu'ils participent dans une large mesure au dimensionnement du dispositif de surveillance.

Contraintes fonctionnelles (I) : la fiabilité

Elles caractérisent le fonctionnement interne du système. Elles comprennent aussi bien les contraintes humaines afférentes aux utilisateurs du système (opérateurs, usagers) que techniques.

En premier lieu, il convient de préciser les éléments liés aux exigences d'exploitation tels que les systèmes d'astreinte, de permanence ou de maintenance (dispositifs de mesure, ressources informatiques, etc.) à mettre en place.

Le second aspect consiste à s'assurer la sûreté de fonctionnement du système dont un des attributs est la **fiabilité**.

«...La fiabilité correspond à la continuité de service qu'un système doit fournir à ses utilisateurs. Elle peut être également définie comme l'aptitude d'un système à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, de manière répétitive et pendant une période donnée... » (CENA/SDF, 1998).

« Les professionnels de l'informatique considèrent que les systèmes informatiques sont fiables lorsqu'ils sont prévisibles, qu'ils nécessitent une maintenance réduite et qu'ils fonctionnent sans interruption de sorte que leurs utilisateurs peuvent accéder aux ressources dont ils ont besoin en temps voulu. En d'autres termes, la fiabilité est une mesure du nombre d'interruptions critiques survenant lors du temps de fonctionnement d'un programme ou d'un système. Pour les consommateurs lambda, la fiabilité d'un ordinateur correspond à sa capacité à fonctionner comme ils s'y attendent, chaque fois qu'ils veulent l'utiliser... » (© 2005 Microsoft Corporation).

Les objectifs assignés à la surveillance imposent implicitement une contrainte de fiabilité qui fixe les limites de l'obligation de résultat attachée à la gestion de la sécurité. Une mésestimation de ces limites peut entraîner une mésestimation de la fiabilité globale du système qui peut à son tour conduire à une mauvaise évaluation de la situation en période de crise (dysfonctionnement, défaillance, erreur) et à la mise en place d'un dispositif d'une efficacité en partie illusoire ou notablement surestimée.

Le terme de surveillance doit être pris au sens large et concerne l'ensemble des moyens et des méthodes mis en œuvre depuis la collecte des données sur le site jusqu'à l'élaboration et la diffusion vers les utilisateurs d'informations élaborées. L'ensemble du système doit être conçu de manière à autoriser l'identification des sources de dysfonctionnement éventuelles (panne, erreur, mises à jour, manque de reproductibilité,...) et dans la mesure du possible leur évaluation.

Les études de fiabilité, de règle dans le domaine des installations industrielles, des risques technologiques ou encore des systèmes informatiques, sont inexistantes dans le domaine de la surveillance des mouvements de versants. Cette situation peut s'expliquer par le faible nombre de

sites concernés mettant en jeu la sécurité, par les difficultés de formalisation des modèles et des critères d'évaluation, par l'absence de normes et/ou de références pour mesurer la fiabilité et aussi par l'absence de définition de celle-ci. La formation des acteurs principalement impliqués dans l'analyse et la conception de systèmes de surveillances de versants instables n'est sans doute pas étrangère non plus à cet état de fait.

La fiabilité du système intègre celle de ses différentes composantes. Ce faisant, elle sera globalement déterminée par celle du maillon le plus faible. Dans le cas d'un système de télésurveillance, on portera donc une attention toute particulière aux différents éléments qui composent la chaîne d'exploitation des données :

- Collecte des données (in situ ou à distance) ;
- Transmission des données sur le site (terminal déporté) ou à l'extérieur du site (terminal déporté, centre d'exploitation) ;
- Traitement local (contrôle, pilotage, mémorisation) ;
- Traitement des données entrantes (procédures d'échantillonnage, contrôles qualité, validation, filtrage) ;
- Archivage des données en local (terminal déporté) ou à distance (centre d'exploitation) ;
- Analyse des données traitées (robustesse des méthodes et modèles d'interprétation, outils d'aide au diagnostic, gestion des alertes) ;
- Production des informations élaborées (création, contrôle qualité, diffusion, acquittement) ;
- Gestion des actions en retour sur le système (ré interrogation, paramétrage, maintenance)
- Gestion de l'exploitation du système (astreintes, permanences,...) ;
- Supervision du système (contrôle, pilotage, télémaintenance, gestion technique).

Cette liste, établie en prenant comme exemple la structure générale d'un système de télésurveillance de grand versant instable (p.ex. Séchilienne, voir [Activité 3 Télésurveillance](#), Saint Etienne de Tinée, Val Pola), ne prétend pas être exhaustive. Elle permet cependant de mettre en évidence la complexité du problème et la nécessité d'une analyse globale et spécifique à chaque cas d'étude. Cette analyse est évidemment exigeante mais riche d'enseignements voire de surprises. Elle est généralement omise.

Contraintes fonctionnelles (II) : la vulnérabilité

D'une manière générale, la vulnérabilité peut être définie comme toute caractéristique d'un système qui permet à une perturbation, un incident ou à une personne d'entraver son fonctionnement normal et d'en atténuer la disponibilité. La vulnérabilité peut se situer sur le plan technique, des procédures ou de l'exploitation. Elle peut être consécutive à l'existence d'anomalies lors de l'analyse, de la conception, de la réalisation ou de la mise en service du système. Elle peut également être liée à une déficience dans la cohérence ou la consistance du dispositif. D'une manière générale, la vulnérabilité procède de la sécurité du système. A cet égard et par analogie aux systèmes informatiques, on peut distinguer la sécurité-innocuité (safety, en anglais), de la sécurité-confidentialité (security, en anglais), (CENA/SDF, 1998) :

- La sécurité-innocuité vise à se protéger des défaillances, catastrophiques ou non, mais dont les conséquences sont jugées non acceptables vis-à-vis des exigences de fonctionnement du système (p.ex. disponibilité du système, complétudes et validité des données entrantes, qualité des informations produites, etc.) ;
- La sécurité-confidentialité vise à prévenir l'accès aux fonctions et services du système au travers de la mise en place de restrictions d'utilisation (accès réglementé, privilèges

d'accès, etc.). Elle vise notamment à garantir l'intégrité des informations fournies aux utilisateurs.

Dans le cas d'un système de surveillance de versant instable, la perte de données, accidentelle ou liée à l'évolution du site, peut hypothéquer plus ou moins gravement la qualité, la représentativité et la quantité des informations produites ainsi que l'interprétation qui peut en être faite. Les facteurs de risques sont multiples et peuvent concerner les différents éléments du dispositif. Les quelques exemples suivants en donnent une illustration :

- Perte accidentelle d'un pilier de surveillance géodésique ; la conception du canevas d'appui et son exploitation doivent tenir compte de cette situation ;
- Perte de points de mesure dans la zone en mouvement par destruction naturelle liée à l'évolution du site ; la gestion de la maintenance doit permettre d'en limiter les conséquences lorsque c'est possible ;
- Destruction accidentelle d'un équipement important (système d'acquisition, système de transmission, ordinateur local) entraînant une neutralisation partielle ou totale du système pendant une durée variable liée au délai de maintenance ;
- Destruction de fichiers de données ;
- Défaillance du système informatique central ;
- Indisponibilité partielle ou complète du réseau de surveillance liée à des conditions météorologiques exceptionnelles (absence de visibilité, importantes chutes de neige,...) ;
- Indisponibilité (accidentelle) du personnel spécialisé ;
- Mises à jour logicielles entraînant une instabilité temporaire du système informatique.

Comme la fiabilité, l'évaluation de la vulnérabilité nécessite une analyse globale. Elle doit être prise en compte dans la définition générale du dispositif de "surveillance", de ses modalités de fonctionnement et de ses dispositions de maintenance et de sécurité (redondance, maintenance préventive, protections adaptées, solutions de secours,...). Le ou les objectifs visés en terme de vulnérabilité (p.ex. innocuité / confidentialité) doivent être définis au stade du cahier des charges. Les spécifications techniques du dispositif doivent permettre :

- de préciser les caractéristiques techniques des différents composants, leurs conditions de fonctionnement ou leurs modalités de mises en œuvre afin d'atteindre les objectifs de sécurité et de performance fixés ;
- d'évaluer, dans une certaine mesure, la gravité des conséquences potentielles induites par une défaillance éventuelle (i.e. '*criticité*' de la panne ou de l'incident).

Ceci s'applique bien entendu aux différents dispositifs d'instrumentation, mais également à l'architecture générale du système, aux sous-ensembles logiciels, ainsi qu'aux méthodes et aux personnels.

3.4.6. Les coûts

Selon le ou les objectifs recherchés par la surveillance, la question des coûts peut être envisagée en termes de rentabilité (retour sur investissement - ROI) et/ou de coût total du système (TCO).

Par le ROI, on cherchera à déterminer à priori la solution technique optimale pour le projet avant sa mise en place. Posée de cette manière, la question du coût doit prendre en compte les arguments technologiques et métiers ainsi que les éventuels aspects réglementaires et normatifs.

Le TCO exprime quant à lui le coût total du système associé au cycle *investissement – déploiement – exploitation - maintenance* sur une période de temps donnée (p.ex. durée du projet). Exprimé ainsi, les coûts du projet se répartissent en coûts ponctuels et coûts récurrents.

Les coûts ponctuels : ils correspondent aux dépenses de mise en place du projet en intégrant les aspects organisationnels, techniques et humains auxquels on peut éventuellement ajouter les conséquences économiques des incidents ou pannes. Ces coûts regroupent :

- Le **coût des investissements** liés aux équipements de mesure, aux dispositifs de télécommunications, aux ressources informatiques (matérielles et logicielles), aux infrastructures particulières, au personnel, etc. Les coûts d'investissement sont généralement assez bien cernés, bien que dans la plupart des cas de "surveillance" de grands mouvements de versants les moyens mis en œuvre intègrent fréquemment une part plus ou moins importante d'innovation ou de développements dont l'estimation reste aléatoire. Il est à noter, par ailleurs, que les contraintes économiques, toujours très fortes, peuvent conduire à écarter certaines solutions techniques existantes (télémessure, télétransmission, systèmes de traitement), développées dans des domaines d'activité parallèles (secteurs industriel, militaire, etc.), mais jugées trop coûteuses au profit de solutions propriétaires plus économiques mais moins éprouvées et offrant sur le plan technique un moins bon retour sur investissement car ne bénéficiant pas d'une base industrielle, d'un acquis et d'un support technique aussi importants. Il est vrai que l'absence d'analyse d'ensemble des aspects de fiabilité et de vulnérabilité des systèmes en liaison avec les contraintes définies dans les objectifs de surveillance, ne permet pas actuellement de justifier le choix de l'intégration de solutions industrielles perçues à priori comme plus coûteuses sur le plan des investissements ;
- Les **coûts d'intégration et de déploiement** liés à la mise en place et à l'interfaçage des différentes composantes du système, tests y compris ;
- Le **coût des incidents et pannes** liés au remplacement des matériels et/ou des infrastructures défectueuses ou accidentées, au frais de remise en fonction ou de réparation, aux solutions de sécurité complémentaires, etc.

Les coûts récurrents : ces dépenses, reconduites dans le temps, correspondent aux coûts d'exploitation, d'administration, de maintenance et contrôle du dispositif. Les coûts de maintenance et d'exploitation ne sont pas forcément aisés à quantifier. Ils représentent cependant une part importante du coût total du système. Le coût de la maintenance est largement variable selon les cas. D'une manière générale, il croît avec la complexité du système, son extension, son niveau d'intégration, son ancienneté. Il est en revanche inversement proportionnel au temps de réponse et au degré de maturité des techniques mises en œuvre.

En tout état de cause, du fait du nombre relativement limité de sites instables de grande ampleur faisant l'objet d'une action de "surveillance" et en l'absence d'un retour suffisant sur les sites déjà instrumentés, une évaluation précise des coûts effectifs à moyen terme des différentes options envisageables ainsi que la proportion respective de ces différents postes de dépense dans le TCO restent encore difficiles à évaluer.

Référence :

CENA/SDF : Centre d'études de la Navigation Aérienne, Toulouse – Division sûreté de fonctionnement : <http://www.tls.cena.fr/divisions/SDF/>

3.5. Modèle de surveillance

La notion de modèle de "surveillance" découle directement de l'analyse qui précède, relative à la définition d'un cahier des charges. Le modèle de "surveillance" regroupe de manière structurée les éléments relatifs :

- Aux objectifs généraux et spécifiques ;

- À la définition des moyens et méthodes mis en œuvre ;
- À l'architecture du dispositif instrumental et de traitement ;
- À la définition des modalités de fonctionnement ;
- À la définition des méthodes de traitement ;
- À la définition des modèles d'interprétation ;
- À la formalisation des produits élaborés.

Il rappelle par ailleurs les contraintes auxquelles il doit satisfaire et qui doivent être prises en compte au niveau de la phase de conception.

4. MODELES D'INTERPRÉTATION - DIAGNOSTIC

4.1. Remarque préliminaire

Les modèles d'interprétation mis en œuvre dans le cadre des actions de "surveillance" sont évidemment liés aux modèles de comportement et à l'étude des mécanismes dont ils intègrent certaines caractéristiques, en les adaptant à un objectif de traitement systématique orienté vers la mise en évidence de l'état et de l'évolution d'un certain nombre de variables associées au comportement et à l'état de stabilité du site.

Dans le cas de l'auscultation, il est possible de mettre en œuvre une modélisation relativement complexe, étroitement associée aux modèles de comportement. Pour la surveillance par contre, le caractère systématique du traitement et les contraintes liées au temps de réponse, conduisent à privilégier le traitement de séries chronologiques utilisant le temps comme paramètre commun.

4.2. Types de modélisation

Il semble que l'on puisse distinguer deux types principaux de modèles d'interprétation :

4.2.1. Les modèles géomécaniques

Dans ce type de modèle l'identification des mécanismes apparaît suffisamment établie pour permettre la détermination de lois de comportement et de relations entre les variables mesurées (amplitude, vitesse, accélération des déformations et des déplacements), des caractéristiques géomécaniques du milieu et des variables de commande (niveau piézométrique, pression interstitielle, précipitations, vitesse de fonte de la neige,...). Les relations peuvent s'exprimer de manière directe (modèle de calcul de type analyse de stabilité) ou indirecte (modèle de type corrélation).

4.2.2. Les modèles cinématiques

Ce type de modélisation s'appuie essentiellement sur l'analyse des séries chronologiques en cherchant à décrire le comportement du site par des relations entre des variables caractéristiques (amplitude, vitesse, accélération des déplacements et des déformations), le temps et éventuellement des paramètres de commande (piézométrie, pression interstitielle, vitesse de fonte de la neige, pluviométrie, infiltrations). On notera que les mécanismes physiques contrôlant le comportement ne sont pas considérés dans le modèle. Ce type de modèle, généralement désigné sous le terme de "boîte noire" est d'une structure à la fois simple et générale, ne comportant que :

- Une variable d'entrée (le temps) ;
- Des variables de sortie (amplitude, vitesse, accélération des déplacements et des déformations) ;
- Des paramètres de commande (piézométrie, pluviométrie,...).

Le modèle ignore les phénomènes physiques mis en jeu à l'intérieur de la boîte noire, ce qui, d'une certaine manière, permet de s'affranchir de leur formalisation. En contre partie ces mécanismes sont supposés demeurer constants et identiques à eux-mêmes au cours du temps, et en particulier au cours de l'évolution du site. Cette hypothèse comme il sera souligné plus loin, est sans doute justifiée en première approximation, tant que le massif ne subit pas (à l'échelle du site) de modification mécanique importante. Il n'en est plus de même à l'approche de la rupture.

4.3. Période d'initialisation

Qu'ils soient de type géomécanique ou cinématique, les modèles d'interprétation nécessitent un calage. Il est nécessaire pour cela de disposer d'un ensemble suffisamment important de données d'observation et par conséquent, de disposer d'une période d'initialisation suffisante. La durée de cette phase d'initialisation est déterminante pour les modèles chronologiques qui ne permettent pas d'avoir accès au comportement mécanique.

Les mécanismes de rupture sont pratiquement toujours sous la dépendance d'une commande hydraulique. Celle-ci résulte des variations des pressions interstitielles associées aux fluctuations hydrogéologiques liées aux facteurs climatiques. L'alternance de périodes à faible et forte alimentation des massifs (saison sèche, saison humide, enneigement hivernal, fonte des neiges estivale) entraîne généralement, pour le comportement du massif, l'existence d'une composante cyclique annuelle dont l'identification et l'évaluation nécessitent une période d'initialisation couvrant deux cycles annuels au minimum. Cette contrainte générale doit être clairement identifiée dans la définition du cahier des charges.

La période d'initialisation est nécessaire pour permettre la définition d'un comportement de référence du site, parallèlement à la définition d'un état de référence à partir des observations initiales.

On remarquera que d'une manière générale, les difficultés de mise au point et de calage des modèles géomécaniques conduisent également à prévoir une période d'initialisation comparable.

4.4. Évolution des modèles – approche de la rupture

Le développement des mécanismes de rupture progressive au sein d'un versant instable entraîne des modifications internes importantes du massif (développement de la fracturation, dislocation, perte de résistance interne, modification de la perméabilité). Ces modifications peuvent devenir perceptibles sur le calage des modèles et justifier une actualisation de ceux-ci. Ceci conduit à la notion de "modèle glissant"⁵.

L'interprétation des données de "surveillance" peut être effectuée en utilisant le modèle glissant. Cette approche semble logique tant que les modifications apparues au niveau des mécanismes de rupture du massif demeurent limitées et progressives. En effet, dans le cas des modèles cinématiques, la séparation des composantes cycliques et continues nécessite de disposer d'une période homogène couvrant deux cycles annuels. Cette condition est d'autant moins respectée que les modifications intervenues dans le comportement sont plus importantes. Dans ce cas, le comportement apparaît atypique, le calage d'un modèle cinématique devient problématique, voire impossible et dans tous les cas non représentatif.

Des modifications importantes peuvent apparaître à un certain stade de développement de la rupture, entraînant une modification profonde des mécanismes et une transformation radicale du comportement du versant (exemple : Saint Etienne de Tinée en 1987). Ce changement de régime s'accompagne d'une discontinuité dans l'évolution des modèles qui interdit toute extrapolation de la période antérieure. Parallèlement, apparaît une période transitoire pendant laquelle aucune modélisation d'ensemble n'apparaît possible.

⁵ Par analogie avec la notion de moyenne glissante
Inventaire piloté par Cete et RAVA

4.5. Problématique de la prévision – Évaluation prévisionnelle

Il convient de distinguer deux objectifs différents dans la démarche prévisionnelle :

- *Le pronostic de la rupture* : la détermination de la date de la rupture est une question soulevée régulièrement à laquelle il est bien difficile de répondre. L'analyse de certains cas de ruptures catastrophiques conduit à penser que, sous certaines conditions favorables (mécanisme simple, évolution continue, projection à court terme) le pronostic de la date de rupture est sans doute envisageable (exemple La Perrière en Savoie, France-1999). A l'inverse d'autres cas de grands mouvements montrent une modification importante et discontinue de leur évolution (dans le sens de l'aggravation ou de la stabilisation) qui interdit tout pronostic à moyen terme par extrapolation du comportement antérieur (exemples à La Clapière, Gourette en France). Par ailleurs l'intervention de facteurs exceptionnels imprévisibles peut modifier radicalement la cinématique de la rupture et provoquer un changement de régime brutal et imprévisible (passage d'un phénomène lent ou apparemment stabilisé, à un phénomène divergent) conduisant très rapidement à la rupture (exemple : Val Pola, Italie) ;
- *L'évaluation prévisionnelle à court terme* : plus que le pronostic de la date de la rupture (éventuelle), la question la plus importante qui se pose pour la gestion de la sécurité publique est celle de l'évaluation prévisionnelle de la dégradation de la situation, dont dépend le déclenchement des différentes phases du plan de secours dans les délais indispensables à leur application. Il s'agit en fin de compte d'être à même de gérer efficacement la mise en place et le déroulement des différentes dispositions de sécurité prévues, correspondant à un scénario particulier de situation catastrophique identifié. La démarche est dans ce cas inverse de la précédente. Elle repose essentiellement sur la définition des phasages et des délais partiels définis par les contraintes du plan de secours, lequel est complexe compte tenu des multiples dispositions à prendre et de leur application en situation de crise, pour déterminer des délais de préavis partiels auxquels doivent correspondre des niveaux d'évaluation prévisionnelle de la situation future probable du phénomène. Cette démarche repose sur la possibilité d'une prévision glissante de l'évolution probable à court terme du phénomène. Les délais de préavis considérés vont de 24 heures à quelques jours (exemple : plan de secours de Séchilienne). Il est à noter que l'évaluation prévisionnelle de la situation concerne à la fois le phénomène principal (mouvement en masse de la zone en cours de rupture) et les phénomènes secondaires induits susceptibles d'avoir des incidences sur certaines dispositions du plan de secours (exemple : coupure de routes d'accès liée à des éboulements secondaires ou précurseurs, bouchure partielle d'un cours d'eau,...). Ces phénomènes secondaires devront avoir été pris en compte dans l'élaboration du plan de secours et doivent être considérés dans l'évaluation prévisionnelle de la situation. L'évaluation prévisionnelle à court terme repose sur l'application de modèles généralement cinématiques selon le principe des modèles glissants. L'application de modèles géomécaniques est également envisageable sous réserve toutefois d'une maîtrise convenable de la modélisation des mécanismes en jeu à l'approche de la rupture (ce qui n'est généralement pas assuré).

4.6. Évaluation des délais de préavis

Tout d'abord, il est raisonnable d'exclure de cette approche le cas particulier des ruptures catastrophiques induites par un séisme. Dans tous les autres cas, on peut admettre que les paramètres de commande (facteurs de déstabilisation) ont des variations progressives à l'échelle du versant (même si ces variations sont relativement rapides = échelle de la journée à plusieurs jours). A un instant donné le délai de préavis maximum correspond à l'intervalle de temps au-delà duquel

l'évaluation prévisionnelle de la cinématique du phénomène déduite de la configuration actuelle du modèle (modèle glissant), ne permet plus d'exclure un risque de divergence par accélération brutale associée à un changement de régime de la rupture ou des conditions aux limites).

Parmi les variables caractéristiques, la vitesse et l'accélération apparaissent les plus significatives, mais d'autres paramètres sont également à considérer :

- Leur répartition spatiale sur l'ensemble du versant ;
- L'amplitude des déplacements cumulés et leur répartition ;
- La stabilité des conditions aux limites (existence et état des zones de butée ou d'enracinement éventuels, et des limites latérales) ;
- État des variables de commande (piézométrie éventuelle, conditions météorologiques).

Ceci conduit à la nécessité d'établir des scénarios d'évaluation prévisionnelle⁶ intégrant les données cinématiques et la prise en compte des paramètres complémentaires considérés comme des facteurs d'aggravations (ou d'atténuation).

5. MÉTHODES DE "SURVEILLANCE"

L'analyse des différentes méthodes utilisées dans les différents types d'actions de "surveillance" doit être effectuée de manière systématique, suivant une procédure aussi rigoureuse que possible, afin de déterminer de manière objective leur domaine d'application respectif en fonction des objectifs considérés.

5.1. Caractéristiques générales

Il existe actuellement plusieurs méthodes pour la surveillance des versants instables. Certaines coïncident avec des techniques de mesure qui ont désormais fait leurs preuves, étant utilisées et testées depuis longtemps déjà, d'autres par contre sont nées seulement ces dernières années avec le développement de nouvelles techniques de mesure qui ont entraîné le développement et la mise au point de nouveaux instruments pour d'autres applications, comme par exemple le laser scanner terrestre, qui dérive du laser scanner aérien, ou comme la technique d'interférométrie SAR, qui résulte des applications satellitaires. Ces nouvelles méthodes ont révélé un potentiel énorme, car elles élargissent les capacités de mesure en permettant par exemple de déceler en très peu de temps des zones instables dans des zones difficiles d'accès.

Mais souvent elles dépendent de « systèmes globaux », dont la présence et l'efficacité sont escomptées, comme par exemple dans les méthodes topographiques et géodésiques où l'utilisation des stations GPS automatisées dépend de la présence simultanée de quatre satellites. Toujours est-il que l'interaction entre les « nouvelles » et les « vieilles » méthodes de surveillance permet actuellement de suivre une approche graduelle pour examiner la stabilité des pentes : en commençant par un encadrement général, avec des mesures de surface effectuées sur grande échelle, pour arriver à une enquête à échelle locale avec des mesures approfondies pour localiser l'événement et étudier son évolution. On peut ainsi partir d'une analyse de surface pour cerner la zone instable, son extension aréolaire et son interaction avec les zones environnantes, et poursuivre avec une analyse plus ponctuelle avec des mesures effectuées localement, afin de quantifier des éléments comme l'épaisseur de la zone instable, la vitesse de mouvement du glissement de terrain etc. Cette démarche permet de dimensionner un système de surveillance plus scrupuleux et plus efficace, parfois même plus économique.

⁶ L'établissement d'un modèle global semble généralement hors de portée, et apparaît peu réaliste dans une situation de crise. En outre, l'interprétation de ces éléments reposent sur l'analyse du spécialiste compétent du site.

Dans le cadre de la stabilité des pentes, les méthodes de surveillance se différencient par le domaine d'application, c'est-à-dire par les différentes grandeurs physiques que les techniques de mesure sont capables de relever et de surveiller, ainsi que par la gamme des instruments utilisés et la procédure spécifique. Quelques méthodes mettent en jeu plusieurs types d'instruments avec un principe de fonctionnement similaire qui peuvent relever les grandeurs physiques dans des contextes différents : par exemple l'inclinométrie utilise les inclinomètres pour déterminer les rotations de la verticalité profonde et les clinomètres muraux pour les rotations de la verticalité superficielle. Il importe en outre de souligner que certaines grandeurs physiques peuvent être étudiées et surveillées avec des méthodes différentes, tandis que pour d'autres il existe actuellement une seule méthode. Par exemple, l'ampleur des déformations superficielles peut être surveillée par extensométrie, photogrammétrie, géodésie, interférométrie, topographie, laser, radar, vidéométrie; tandis que les variations des pressions interstitielles dans le sous-sol peuvent être déterminées seulement grâce à la piézométrie. Les grandeurs physiques mesurées et analysées en général dans le domaine de la surveillance des versants instables sont :

- Les niveaux piézométriques ;
- Les pressions interstitielles;
- Les pressions totales ;
- Les rotations de la verticalité profonde et superficielle ;
- Les déformations profondes et superficielles ;
- Les forces ou charges ;
- Les émissions acoustiques ;
- La hauteur des précipitations aqueuses et neigeuses ;
- La température ;
- L'humidité ;
- La vitesse du vent.

5.2. Descriptif des méthodes de surveillance

Les différentes méthodes de surveillance existantes sont citées ci-après, par ordre alphabétique, avec une brève description. L'ensemble des éléments analysés pour chaque méthode doit permettre d'établir une évaluation (relative aux domaines de "surveillance" considérés) des points forts et des points faibles aussi objective que possible, et de dégager des orientations suivant lesquelles des progrès seraient éventuellement nécessaires. Cette démarche est par ailleurs formalisée par une base de données (§ 6.2), qui permet de définir pour chaque sous ensemble une grille d'analyse.

La liste ne prétend pas être exhaustive. Elle recouvre cependant l'essentiel des éléments constitutifs de l'instrumentation dans le domaine des mouvements de versants.

Tous les instruments de mesure cités dans les méthodes ci-dessous font l'objet d'une description au paragraphe suivant (§ 6.) Ils sont également implémentés dans la **base de donnée**.

Émissions acoustiques (EA): *Acoustic Emission (AE).*

Méthode basée sur la détection « en temps réel » des émissions acoustiques (EA) générées par les mouvements ou les fracturations à l'intérieur des terrains et des amas rocheux (localisation de sources), pour reconnaître les signes indiquant l'amorce des glissements de terrain et lancer les signaux d'alarme. L'enregistrement des émissions acoustiques s'effectue en distribuant dans les zones intéressées des capteurs appropriés (accéléromètres, géophones, hydrophones) à haute sensibilité capables de capter les signaux générés par les processus de déformation de la roche. Normalement, l'instrumentation consiste en une série de trois ou plusieurs géophones triaxiaux synchronisés, qui captent les vibrations en permanence. Les mesures sont acquises en positionnant un seuil de sensibilité (*trigger*), et quant celui-ci est franchi le système se met en marche et mémorise les données concernant l'événement spécifique.

Domaine d'application: Identification des signes d'amorce des glissements de terrain.

Superposition avec d'autres méthodes: Aucune.

Extensométrie: *Extensometry*.

Ensemble de techniques de surveillance pour mesurer et analyser l'ampleur des déformations de structures géologiques ou artificielles en général. La détermination des déformations tant superficielles que profondes permet d'avoir des indications sur l'existence de mouvements en cours dans le sous-sol. Les mesures de déformation (déplacement) sont toutes basées sur la mesure de la position du point à considérer par rapport à un point, stable ou au moins connu, pris comme repère de référence. Le déplacement du point dans le temps est déduit des variations de sa position par rapport au repère de référence. Dans les systèmes de mesure, le point à considérer et le repère de référence sont physiquement reliés aux instruments au moyen de dispositifs mécaniques. En général, pour obtenir la mesure du déplacement par rapport à un système de coordonnées extérieur à la zone étudiée (corps de l'éboulement), il est nécessaire d'effectuer des levés topographiques afin de vérifier s'il n'y a pas la présence de mouvements liés pouvant intéresser également le point pris comme repère de référence.

Les types d'instruments utilisés avec cette méthode appartiennent à deux grands groupes selon qu'ils mesurent les déformations superficielles ou profondes. En fonction de cette distinction leur schéma d'installation respectif varie nettement, respectivement sur la surface des structures ou en profondeur dans les forages.

Instruments utilisés pour la mesure des déformations superficielles:

- Extensomètres à fil;
- Fissuromètres;
- Déformètres;
- Distomètres;
- Distancemètres orientables.

Instruments utilisés pour la mesure des déformations profondes:

- Extensomètres de forage;
- Tassomètres;
- Extensomètres incrémentiels (ISETH; INCREX)
- Systèmes extensométriques-inclinométriques;
- Systèmes multiparamétriques (DMS).

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles ou profondes.

Superposition avec d'autres méthodes: Photogrammétrie, Géodésie, Interférométrie, Topographie, Laser, Radar.

Géodésie: *Geodesy*.

Science qui étudie la conformation et les dimensions du globe terrestre et en fait la représentation graphique, raison pour laquelle les méthodes géodésiques sont profondément liées aux méthodes topographiques. À l'intérieur de la géodésie on distingue les techniques géodésiques terrestres et spatiales (ou satellitaires). Les mesures géodésiques terrestres sont basées sur la mesure de distances et d'angles au moyen de systèmes optiques ou électromagnétiques. La géodésie satellitaire exploite le système NAVSTAR-GPS (*NAVigation Timing and Ranging – Global Positioning System*). Le système GPS de positionnement d'un point au sol se base sur la mesure des trois distances du point par rapport au moins à quatre satellites de la constellation américaine NAVSTAR dont on connaît les coordonnées; celles-ci sont calculées dans un système de repère global, géocentrique, pour lequel on connaît les coordonnées de quelques stations d'observation des satellites de par le monde.

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Superposition avec d'autres méthodes: Extensométrie, Photogrammétrie, Interférométrie, Topographie, Laser, Radar

Inclinométrie: *Inclinometry*.

Inventaire piloté par Cete et RAVA

Ensemble de techniques de surveillance pour mesurer et analyser les rotations de la verticalité superficielle et profonde de structures géologiques ou artificielles en général, à l'aide de divers types d'instruments (inclinomètres, pendules, clinomètres, tiltmètres, etc.), installés de manières différentes par rapport au terrain naturel. Si l'on dispose de mesures en série temporelle il est possible d'évaluer le type de déplacement et de calculer la vitesse de mouvement ; la précision et la fiabilité des données augmentera proportionnellement à la réduction de la période écoulée entre les différentes lectures effectuées. En particulier, la distribution des déplacements horizontaux avec la profondeur peut être relevée en mesurant à l'aide d'un inclinomètre les rotations par rapport à la verticale d'un tube solidaire avec le sol. Cette mesure s'avère souvent la plus importante dans le surveillance des pentes, car elle permet d'identifier la position du plan de glissement et de contrôler le comportement du versant en vérifiant l'ampleur et la vitesse du mouvement. Les rotations de la verticalité des structures en général peuvent être mesurées également avec d'autres instruments, comme par exemple les pendules, les tiltmètres et les clinomètres. Parmi ces matériels certains, comme les inclinomètres et les pendules, nécessitent des forages pour être installés, d'autres, comme les tiltmètres et les clinomètres, peuvent être fixés directement sur la surface des structures à surveiller. Cette méthode permet donc de suivre les rotations de la verticalité, mais également de remonter facilement aux déplacements grâce à l'intégration numérique, faisant ainsi apparaître les zones en mouvement dans le sous-sol.

Domaine d'application: Surveillance des rotations de la verticalité superficielle et profonde.

Superposition avec d'autres méthodes: Aucune

Interférométrie: *Interferometry.*

La méthode de l'interférométrie appliquée à la stabilité des pentes se développe à travers les systèmes SAR (*Synthetic Aperture Radar*), des systèmes radar qui exploitent la technique de l'antenne à ouverture synthétique et l'effet Doppler: en synthétisant une antenne fictive de grandes dimensions, dite justement ouverture synthétique, et en combinant de façon cohérente les données saisies par le capteur dans les positions occupées par la suite, ils garantissent une résolution élevée également dans la direction azimutale. L'interférométrie SAR est essentiellement une technique basée sur la comparaison de deux images radar d'un même scénario acquises depuis des angles de vue différents. Il peut reconstruire la topographie de la surface du scénario, à des instants différents mais de la même position ainsi que relever les éventuels déplacements qui se produisent dans l'intervalle de temps entre l'acquisition des deux images. À l'intérieur de l'interférométrie on distingue deux techniques de mesure principales: la technique *PSInSAR* et la technique *Ground Based SAR*. Dans la première les images radar sont acquises par satellite, tandis que dans la seconde elles sont acquises au sol. En particulier la technique *PSInSAR* est basée sur l'identification des « diffuseurs permanents » (*Permanent Scatterer – PS*), qui constituent une sorte de « réseau géodésique naturel » défini grâce à une étude statistique des images ; ceci permet de sélectionner un ensemble de points particulièrement adaptés à l'estimation des mouvements du sol, car ces points (PS) préservent l'information de phase dans le temps et malgré les variations de la géométrie d'acquisition.

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Superposition avec d'autres méthodes: Extensométrie, Photogrammétrie, Géodésie, Topographie, Laser, Radar.

Laser:

Le principe fondamental sur lequel se base cette méthode est le calcul du temps de vol (*time-of-flight*) d'une impulsion laser générée par un émetteur réfléchi par la surface frappée et captée par le récepteur installé à bord de l'instrument. Le temps de vol, correspondant à l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'instant d'émission de l'impulsion et celui du retour, permet de déterminer la distance entre l'instrument et le point relevé. Deux types de mesures sont possibles: les mesures ponctuelles (effectuées avec des distancemètres laser, parfois insérés dans des stations

topographiques totales) et les balayages des surfaces effectués au moyen de scanner laser (*Terrestrial Laser Scanning ou TSL*).

Avec un TSL il est possible d'effectuer un mappage des variations morphologiques de la surface étudiée par rapport à une lecture initiale de référence et donc d'évaluer avec continuité spatiale l'ampleur des déplacements et leur distribution aréolaire. Le balayage de la surface relevée permet de reconstruire un modèle numérique tridimensionnel de la surface relevée, constituée par des points définis au moyen de quatre paramètres x, y, z, k . Les trois premières valeurs représentent les coordonnées du point, la quatrième est le « coefficient de réflectivité » lié à la quantité d'énergie restituée par la surface frappée. Ce paramètre permet de distinguer des matériaux différents ou, si les matériaux sont les mêmes, de définir l'état de conservation ou d'altération de la surface relevée.

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Superposition avec d'autres méthodes: Extensométrie, Photogrammétrie, Géodésie, Topographie, Laser, Radar

Météorologie: *Meteorology.*

Science qui étudie l'atmosphère et les phénomènes qui lui sont liés. Dans le domaine de la surveillance des pentes cette science s'applique dans la mesure des principaux paramètres météorologiques: hauteur des précipitations aqueuses et neigeuses, température, humidité, vitesse et direction du vent. Les variations dans le temps de ces paramètres sont détectées avec des instruments spéciaux, qui sont, par rapport aux grandeurs qui viennent d'être citées: pluviomètres et nivomètres, thermomètres, hygromètres, anémomètres et détecteurs de la direction du vent.

Les méthodes météorologiques revêtent une grande importance dans la surveillance des conditions de stabilité des versants, car elles permettent de trouver des corrélations entre les variations des paramètres météorologiques et les variations des grandeurs physiques (pressions intersticielles, rotations de la verticalité profonde, etc.) relevées par les instruments de surveillance *stricto sensu* (piézomètres, inclinomètres, etc.). Par exemple, grâce aux stations météo, les résultats des enregistrements piézométriques et inclinométriques peuvent être corrélés avec les facteurs externes prédisposants comme la pluie, reconnue à l'unanimité comme une des causes les plus courantes de déclenchement des glissements de terrain (variation du degré d'infiltration, avec en conséquence la réduction de la cohésion apparente et la diminution de la résistance au cisaillement), pour tenter de définir les seuils de précipitation critique au déclenchement et les temps de retard.

Domaine d'application: Surveillance de: hauteur des précipitations aqueuses et neigeuses, température, humidité, vitesse et direction du vent.

Superposition avec d'autres méthodes: aucune.

Photogrammétrie: *Photogrammetry.*

Méthode de mesure de l'altimétrie et de la planimétrie d'une surface à l'aide de prise de vues photographiques. Cette méthode interagit donc profondément aussi avec les techniques topographiques, car elle permet de parvenir à des représentations graphiques du terrain sur la base de photographies prises au sol et/ou d'avion. Pour ce qui est de la stabilité des pentes cette méthode est employée pour mesurer les déformations, afin de faire une cartographie des variations morphologiques de la surface étudiée par rapport à un repère initial; la technique permet donc d'évaluer avec une continuité spatiale l'ampleur des déplacements et leur distribution aréolaire. Selon l'emplacement de la station où est posée la caméra de photogrammétrie (analogique ou numérique) on distingue la photogrammétrie terrestre (caméra située au sol, *Ground photogrammetry*), et la photogrammétrie aérienne (caméra montée sur aéronef, *Aerial photogrammetry*).

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Superposition avec d'autres méthodes: Extensométrie, géodésie, interférométrie, topographie, laser, radar, vidéométrie.

Piézométrie: *Piezometry.*

Ensemble de techniques de surveillance pour mesurer et analyser la tendance de la surface piézométrique dans le sous-sol avec des mesures de niveau et/ou de pression dans les forages spécialement instrumentés avec des piézomètres de divers types (à tube ouvert, Casagrande, pneumatiques, électriques).

Les mesures que les divers types de piézomètres effectuent concernent les oscillations du niveau piézométrique et/ou de pression dans les instruments, directement liées aux variations du volume d'eau dans les épaisseurs étudiées. Le domaine d'application de l'instrumentation considérée variera avec l'augmentation de la résolution et de la sensibilité, car la capacité de relever rapidement les variations de volume d'eau de plus en plus petites augmente en conséquence et donc la possibilité d'étudier des terrains avec un coefficient de perméabilité de plus en plus petit.

Avec des mesures périodiques ou réalisées en continu avec des systèmes d'acquisition automatiques il est possible d'évaluer l'évolution de la surface piézométrique dans le temps avec la variation des paramètres météorologiques (hauteur des précipitations) et des autres grandeurs physiques surveillées (déformations superficielles et profondes, etc.).

Domaine d'application: Surveillance des niveaux piézométriques et/ou des pressions interstitielles.

Superposition avec d'autres méthodes: aucune.

Pressiométrie: *Pressiometry.*

Dénomination informelle de la méthode basée sur la mesure des pressions totales exercées par le terrain ou des forces transmises par le terrain à une structure générique. Dans les problèmes de stabilité des pentes, l'enregistrement des pressions totales s'effectue à l'aide d'instruments particuliers appelés cellules de pression, installés directement dans le sol, tandis que l'enregistrement des forces (ou charges) a lieu généralement en installant sur les ouvrages de soutien des cellules de force qui permettent notamment de mesurer la tension des tirants en phase de tension et d'exploitation.

Domaine d'application: Surveillance des pressions totales ou des forces exercées par le terrain.

Superposition avec d'autres méthodes: Aucune.

Radar: *Radar (RADio Detection And Ranging)*

Les radars sont des dispositifs qui fonctionnent par rayonnement d'énergie électromagnétique et analyse de l'énergie rétro-diffusée. Tout objet " cible " (ou zone illuminée) interfère avec l'onde émise et réfléchit une part de cette énergie. L'analyse comparée des signaux émis et rétrodiffusés permet d'extraire des informations en liaison avec la distance radar-cible (temps de vol A/R), les propriétés de rétrodiffusion de la cible et son mouvement radial (effet Doppler). La résolution en distance est directement liée à la largeur de la bande émise (typiquement quelques dizaines de MHz). La longueur d'onde et la taille de l'antenne (réelle ou synthétique) déterminent la résolution des radars imageurs. Les propriétés de rétrodiffusion des surfaces naturelles, notamment la contribution du couvert végétal et la pénétration des ondes dans le sol sont principalement régies par la longueur d'onde (de quelques mètres à quelques mm). Une qualité remarquable des radars est leur capacité de fonctionnement tout-temps.

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Superposition avec d'autres méthodes: Extensométrie, Photogrammétrie, Géodésie, Topographie, Laser, Radar.

Réfectométrie: *Reflectometry.*

Technologie qui utilise les impulsions rectangulaires, développée à l'origine pour relever les interruptions et les défauts le long des lignes de communication ou de transmission des signaux électriques. Sur cette technologie se base le principe de fonctionnement du système TDR (*Time Domain Reflectometry*), qui fait qu'il est réfléchi, si une impulsion électrique est transmise à l'intérieur d'un câble, quand celui-ci rencontre une rupture ou une déformation du câble. De l'analyse de polarité, d'ampleur et de fréquence de l'impulsion réfléchie il est possible de localiser la position de la discontinuité avec une précision élevée. Dans le domaine géotechnique cette

technique de mesure trouve, depuis quelques années, un emploi justement dans la surveillance de la stabilité des pentes.

Domaine d'application: Surveillance de la profondeur des déformations (déformations profondes).

Superposition avec d'autres méthodes: Inclinométrie.

Topographie: *Topography.*

Dans son acception plus générale la topographie est la science qui étudie l'ensemble des méthodes, des procédés et des instrumentations techniques qui permettent de produire une représentation graphique du territoire (levés topographiques).

Grâce à la méthode topographique la détermination des déplacements superficiels est simple en général dans les opérations concrètes car elle s'effectue depuis le terrain naturel et elle permet d'avoir des indications sur l'existence de mouvements en cours dans le sous-sol. Les mesures de déplacement sont toutes basées sur la mesure de la position relative du point à considérer par rapport à un point stable ou au moins connu pris comme repère de référence. Le déplacement du point dans le temps est déduit des variations de sa position par rapport au repère de référence. Le point et le repère de référence peuvent être mis en relation à distance, sans union physique entre eux, par exemple en utilisant des instruments basés sur l'émission et la réception d'ondes de la fréquence appropriée, ou bien mécaniquement. Aux instruments topographiques manuels traditionnels (niveaux, théodolites, stations totales) s'ajoutent aujourd'hui d'autres appareils qui exploitent les développements introduits récemment relativement à l'automatisation de la mesure des distancemètres (théodolite motorisé, système RMS), aux systèmes de positionnement satellitaire GPS (*Global Positioning System*) et à d'autres technologies innovantes (*Laser Scanning, Radar ULB* et *SAR*). Le levé topographique peut donc être réalisé non seulement avec les techniques et les instruments classiques et propres à la topographie, mais aussi avec d'autres méthodes avec lesquelles la topographie interagit profondément (photogrammétrie, géodésie, interférométrie, laser, radar).

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Superposition avec d'autres méthodes: Extensométrie, Photogrammétrie, Géodésie, Interférométrie, Laser, Radar.

Vidéogrammétrie : *videogrametry.*

Cette méthode d'acquisition et de mesure optique tridimensionnelle repose sur les mêmes principes que ceux de la photogrammétrie, l'appareil photographique étant remplacé par une caméra numérique. Des informations de type 2D ou 3D correspondant à des déplacements superficiels de terrains instables peuvent être extraites des images numériques. Après enregistrement des données de différents points de vue, les coordonnées 3D des points sont calculées par triangulation.

Les marqueurs peuvent être artificiels ou naturels (rochers, infractuosités, couleurs, variations d'aspect...). Le traitement des images peut également détecter des chutes de blocs par modification de l'aspect visuel de leur emplacement d'origine.

La précision relative est potentiellement très élevée : $1/100^{\text{ème}}$ de pixel pour le suivi de déplacements de cibles 2D, en 3D elle dépend de la qualité de la triangulation.

Les observations optiques subissent des perturbations liées à l'agitation thermique des couches d'air traversées. Une répétition des mesures et un traitement statistique des résultats permettent d'en réduire les effets perturbateurs.

Le suivi des déformations 2D ou 3D peut être réalisé soit en temps différé soit en temps réel.

Comme la photogrammétrie, cette méthode permet de numériser des surfaces et donc de réaliser des comparaisons et des calculs volumétriques.

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Superposition avec d'autres méthodes: Extensométrie, géodésie, interférométrie, topographie, laser, radar, photogrammétrie.

6. INSTRUMENTATION

Ce paragraphe "instrumentation" (au sens large) considère l'ensemble des outils mis en œuvre dans une action de surveillance = système de mesure, équipements de traitement et outils logiciels.

6.1. Orientations générales vers le choix des instruments adaptés

La même démarche d'analyse structurée que pour les méthodes est appliquée à l'instrumentation. Compte tenu de la complexité des sujets traités, le choix a été fait de se placer délibérément du point de vue de l'utilisateur. Cette démarche correspond à une approche logique, les aspects techniques, quelle que soit leur importance, devant rester subordonnés aux objectifs et aux contraintes de l'application.

Pour définir et concevoir un système de surveillance, il faut dans un premier temps définir les **grandeurs caractéristiques du phénomène**, lesquelles permettent de choisir les instruments les plus appropriés pour les mesurer. Le plus souvent, la compréhension du comportement d'une pente instable, qu'il s'agisse de terrain meuble ou rocheux, n'est pas basée sur un paramètre unique, mais sur les *corrélations* entre les différents paramètres disponibles. Lorsqu'on conçoit le système de surveillance, il est donc bon de prévoir des instruments qui donnent des mesures complémentaires. Par exemple, des valeurs inclinométriques qui indiquent une accélération des vitesses de mouvement d'une pente peuvent être corrélées avec la hausse des valeurs de pression intersticielle. La redondance des mesures permet par ailleurs de vérifier le bon fonctionnement des instruments et de disposer dans tous les cas de mesures significatives, même en cas de rupture d'un capteur.

Une fois identifiées les grandeurs à mesurer, il faut sélectionner l'instrumentation qui convient le mieux à chaque application. Pour ce faire, la classification proposée ici présente toute la gamme des instruments disponibles actuellement sur le marché.

Le **domaine d'application** regroupe des instruments servant au même type de mesure (par ex.: pour la mesure de la déformation superficielle : extensomètres à fil, fissuromètres, GPS, etc.), ce qui permet de les comparer et de préciser leurs avantages et inconvénients respectifs. Pour une grandeur physique déterminée et un contexte donné, le choix de l'instrument le plus adapté se fera en fonction de plusieurs facteurs : installation, configuration, système et modalité de mesure, etc.

Les types d'instruments se déclinent ensuite en sous-types sur la base du **principe de fonctionnement** (par ex.: inclinomètre doté de sonde amovible ou de sonde fixe), qui à leur tour peuvent se différencier en fonction du type de « transducteur/capteur » qu'ils incorporent éventuellement (par ex.: inclinomètre doté de sonde amovible avec: capteurs servo-accélérométriques monoaxiaux, Capteurs potentiométriques biaxiaux, etc.).

Le choix du capteur repose donc sur le double choix du **principe de fonctionnement** et du **type de transducteur** le plus adapté à l'usage que l'on veut en faire. Par exemple, pour une surveillance à long terme des pressions intersticielles dans des terrains argileux, on ne peut recourir qu'à la piézométrie, et habituellement on choisit un « piézomètre à circuit fermé » avec un principe de fonctionnement électrique (« piézomètres électriques ») et un « transducteur à corde vibrante », caractérisé par des temps de réponse brefs et une grande stabilité dans le temps.

Pour opérer ces deux choix successifs, il faut analyser dans le détail les limites intrinsèques des principes de fonctionnement disponibles et les caractérisations métrologiques contenues dans les fiches des principales caractéristiques techniques des capteurs fournies par les fabricants.

Ces caractéristiques peuvent se résumer ainsi:

- *Domaine de mesure*: ensemble des valeurs allant du minimum au maximum (valeur maximum de l'échelle) que l'instrument peut relever. En général c'est la valeur maximum qui est indiquée ;
- *Résolution*: plus petite quantité que l'instrument peut relever. Elle est fonction du domaine de mesure. Souvent on la confond avec la précision. En règle générale, la

résolution est d'une grandeur supérieure à la précision. Elle est généralement exprimée comme un pourcentage par rapport au maximum de l'échelle ;

- *Précision*: indique de combien la mesure fournie par l'instrument s'écarte de la vraie valeur. Dans beaucoup de cas elle est exprimée comme un pourcentage par rapport au maximum de l'échelle avec le signe (+) ;
- *Répétabilité*: Se rapportant à la mesure, elle est souvent plus importante que la précision, car dans beaucoup d'applications elle souligne la différence des mesures plus que leur valeur absolue.

Il convient de préciser ici que les caractéristiques indiquées ci-dessus et reproduites dans les fiches techniques des capteurs sont basées sur des essais d'étalonnage et des tests effectués en laboratoire par les fabricants en conditions contrôlées quant à la température, au milieu, aux modalités d'exécution de l'essai... ; elles ne peuvent être mises en relation avec les conditions réelles de fonctionnement *in situ*, si ce n'est de manière théorique. Ces caractéristiques doivent donc être considérées comme des indications nécessaires, mais pas suffisantes.

D'autres aspects fondamentaux sont à prendre en compte dans le choix des instruments adéquats, tels que:

- *Rapport coût-performances*: La différence de coût entre des instruments de qualité élevée et de qualité inférieure est en général insignifiante si on la compare au coût total d'installation et de gestion d'un système instrumental. Par exemple, installer dans un forage un piézomètre Casagrande coûte 10 à 20 fois le prix du piézomètre. En réalité, les économies qu'on pense faire en utilisant des instruments meilleur marché et moins fiables ne sont qu'apparentes, car en cas de dysfonctionnement il est souvent impossible de les remplacer, avec pour conséquence la perte de données importantes pour la compréhension du phénomène.
- *Vie des instruments*: Les instruments, de même pour leurs accessoires (câbles, protections, etc.), censés servir uniquement pendant la réalisation d'ouvrages de protection (mesures à court terme) sont différents de ceux recommandés pour la surveillance à long terme. Ces fonctionnalités dépendent fortement de la présence ou non de transducteurs et/ou de capteurs, mais aussi du type de composants adoptés par ces derniers. Par exemple, dans de nombreux cas, on utilise des capteurs de type extensométrique ou à corde vibrante : les capteurs extensométriques, basés sur l'utilisation d'un Pont de Wheatstone, sont adaptés pour la surveillance à court terme, alors que les capteurs à corde vibrante sont quant à eux davantage destinés pour les suivis à long terme.
- *Conditions environnementales*: La température, l'humidité, les conditions chimiques des sols influencent le choix des instruments. Par exemple, dans les environnements tropicaux à forte humidité, de simples dispositifs mécaniques fonctionnent mieux que les électriques.
- *Personnel pour suivre l'installation*: Il faut évaluer les capacités et l'expérience du personnel qui doit intervenir sur le site ainsi que la disponibilité en ressources d'appoint locales pour assurer la maintenance et le calibrage des instruments.
- *Modalité d'exécution des mesures*: Elle dépend de la présence ou non de capteurs et/ou transducteurs automatisables. Si ceux-ci ne sont pas présents, les instruments seront soumis exclusivement à des mesures manuelles. Par contre, s'ils sont présents, on pourra prédisposer les appareils pour les mesures automatiques, avec la possibilité de liaison par câble à un système de saisie de données à distance installé en surface, avec enregistrement des données en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire. Il faut ici tenir compte du fait que:
 - Les mesures manuelles nécessitent d'accéder au site où l'instrument est installé et rendent impossible un suivi en temps réel. Ces contraintes limitent le domaine

d'application des « instruments manuels » à une surveillance de type périodique, avec des instruments installés dans des lieux accessibles et avec des garanties pour la sécurité des opérateurs.

- Les instruments automatisés au contraire ne nécessitent pas de personnel pour réaliser les mesures ; ils permettent entre autre de faire des suivis en « temps réel ». Toutefois, étant donnée la présence d'éléments délicats comme les transducteurs et/ou capteurs qui peuvent réclamer des opérations de maintenance, beaucoup d'instruments prévoient également des mesures de contrôle manuelles. L'acquisition des mesures peut se faire également in situ par connexion à des centrales d'acquisition.

En règle générale, l'instrumentation manuelle sera adaptée à des mesures d'auscultation, à des contrôles sporadiques, à la caractérisation du phénomène, à des suivis périodiques ou permanents discontinus; l'instrumentation automatisée, outre ces possibilités, pourra également effectuer des suivis permanents discontinus fréquents, des suivis continus ou en temps réel.

6.2. Description technique des instruments de mesure – Base de données

La liste ci-dessous propose une description synthétique des catégories d'instruments disponibles sur le marché pour telle ou telle mesure. Les informations déterminantes pour le choix du principe de fonctionnement le plus adapté à un site déterminé sont également présentées (par ex. le type de terrain) ; on précise s'il est possible ou non d'automatiser l'instrument, lequel comprend ou non en conséquence des transducteurs en fonction desquels varient les caractéristiques de la mesure (domaine de mesure, résolution, etc.) et la vie de l'instrument (surveillance à court ou à long terme). Il est donc indispensable, comme on l'a déjà mentionné, de consulter les fiches des principales caractéristiques techniques des capteurs fournies par les fabricants avant de choisir un principe de fonctionnement avec un transducteur ou capteur particulier.

Tous les instruments de mesure présentés ci-dessous sont implémentés dans la **base de données** disponible sur le CDRom (version bilingue français – italien). Celle-ci permet de définir une grille d'analyse pour chaque type d'instrument, sur la base des rubriques utilisées ci-dessous pour les descriptions. Cette liste ne prétend pas être exhaustive, cependant elle recouvre l'essentiel des éléments constitutifs de l'instrumentation dans le domaine des mouvements de versants.

La rubrique « Requête » de cette base permet à l'utilisateur de trouver le ou les instruments de mesure les plus adaptés à son problème, en fonction des critères d'entrée suivants :

- Type de méthode (selon définitions du § 5) ;
- Type de fonctionnement ;
- Domaine de surveillance (selon définitions du § 2) ;
- Vitesse estimée d'évolution du phénomène (selon les classes adoptées par Cruden et Varnes, 1994) ;
- Grandeur mesurable ;

Chaque instrument est décrit par ses caractéristiques principales :

- Méthodes auxquelles il se rattache (selon définitions du § 5) ;
- Domaine d'application ;
- Grandeur mesurable ;
- Type de sortie (numérique, analogique, interface spécifique) ;
- Type de fonctionnement (manuel ou automatique) ;
- Nécessité ou non d'une pré-élaboration des données ;
- Caractéristiques techniques du capteur ;
- Influence des conditions environnementales ;

- Type d'alimentation ;
- Vulnérabilité ;
- Points forts et points faibles génériques ;
- Avantages et inconvénients spécifiques ;
- Coût ;
- Autre.

Les quatre premières rubriques de la base (Unités de mesures UDM, Avantages-Inconvénients, Types d'instruments - Principes de fonctionnement - Classement des instruments) permettent à l'utilisateur d'incrémenter la base avec ses propres capteurs.

Enfin, un **glossaire** complet des termes techniques utilisés dans le domaine de l'instrumentation est également disponible sur le CD Rom. Il doit permettre au non spécialiste de lever toute ambiguïté quant au vocabulaire et aux abréviations employés dans les descriptions ci-dessous et dans la base de données.

Les instruments sont classés par méthode, puis, à l'intérieur de chaque méthode, par ordre alphabétique, selon la liste suivante (certains instruments apparaissent dans plusieurs méthodes) :

- 6.2.1. Emissions acoustiques
 - Accéléromètres - Géophones – Hydrophones
- 6.2.2 Extensométrie
 - Distomètres ; Distancemètres orientables ; Extensomètres superficiels (à fil) ; Extensomètres de forage ; Fissuromètres ; Jauge de contrainte ; Jauges de déformation ; Tassomètres ; Systèmes extensométriques-inclinométriques (TRIVEC) ; Systèmes multiparamétriques (DMS)
- 6.2.3 Géodésie – Topographie
 - Niveaux – théodolites – stations totales – théodolite motorisé ; GPS ; Laser scan (TSL) ; RMS ; SAR
- 6.2.4 Inclinométrie
 - Clinomètres ; Inclinomètres ; Pendules ; Tiltmètres ; Systèmes extensométriques-inclinométriques (TRIVEC) ; Systèmes multiparamétriques (DMS)
- 6.2.5. Interférométrie
 - SAR
- 6.2.6. Laser
 - Laser Scan (Terrestrial Scanner Laser, TSL)
- 6.2.7. Météorologie
 - Anémomètres et mesureurs de direction du vent ; Nivomètres ; Nivomètre à rayonnement cosmique (nrc) ; Pluviomètres ; Thermomètres ; Thermo-hygromètres
- 6.2.8. Photogrammétrie
 - Chambres photogrammétriques
- 6.2.9. Piézométrie
 - Piézomètres à circuit ouvert ; Piézomètres à circuit fermé ; Systèmes multiparamétriques (DMS)
- 6.2.10. Pressiométrie
 - Cellules de pression ; Cellules de charge
- 6.2.11. Radar
 - RADAR sol ULB (UWBR, Ultra Wide Band Radar) ; SAR
- 6.2.12. Réflectométrie
 - TDR
- 6.2.13. Vidéogrammétrie
 - Camera vidéo numérique

Classement des instruments par domaine d'application

Déformations superficielles

Distomètres ; Distancemètres orientables ; Extensomètres superficiels (à fil) ; Fissuromètres ; Jauge de contrainte ; Jauges de déformation ; Niveaux – théodolites – stations totales – théodolite motorisé ; GPS ; Laser scan (TSL) ; RMS ; SAR ; RADAR sol ULB (UWBR, Ultra Wide Band Radar) ; Chambres photogrammétriques ; Camera vidéo numérique

Déformations profondes

Extensomètres de forage ; Tassomètres ; Systèmes extensométriques-inclinométriques (TRIVEC) ; TDR ; Systèmes multiparamétriques (DMS)

Rotation de la verticalité superficielle

Tiltmètres ; Clinomètres

Rotation de la verticalité profonde

Inclinomètres ; Pendules ; Systèmes multiparamétriques (DMS)

Niveaux piézométriques

Piézomètres à circuit ouvert ; Piézomètres à circuit fermé ; Systèmes multiparamétriques (DMS)

Pressions et forces

Cellules de pression ; Cellules de charge ; Systèmes multiparamétriques (DMS)

Emissions acoustiques

Accéléromètres - Géophones – Hydrophones

Facteurs météorologiques

Anémomètres et mesureurs de direction du vent ; Nivomètres ; Nivomètre à rayonnement cosmic (nrc) ; Pluviomètres ; Thermomètres ; Thermo-hygromètres

6.2.1. Emissions acoustiques

Géophones – Hydrophones – Accéléromètres

Méthode: Émissions acoustiques (EA).

Domaine d'application: Surveillance des émissions acoustiques.

Configuration et fonctionnement:

Principe : aux phénomènes de rupture ou de glissement des terrains et des roches est toujours associé un relâchement d'énergie, sous la forme de vibrations soniques ou ultrasoniques. Les processus, quoique à une échelle différente, sont en quelque sorte semblables aux processus sismiques. C'est pourquoi dans la littérature on parle souvent de systèmes microsismiques appliqués au suivi des versants, même si dans les mesures proprement microsismiques (MS) le domaine de fréquence qui intéresse est compris en général entre 1Hz et 100-200 Hz, tandis que les émissions acoustiques intéressent en général des fréquences plus élevées, de quelques centaines de Hz à plusieurs kHz.

Mise en œuvre : Le suivi des émissions acoustiques s'effectue en distribuant dans les zones d'étude des capteurs à haute sensibilité, capables de capter les signaux générés par les processus de déformation de la roche : accéléromètres, géophones, hydrophones. L'instrumentation consiste en théorie en une série de trois ou plusieurs géophones triaxiaux synchronisés qui saisissent les vibrations en continu. Les mesures sont acquises en paramétrant un seuil de sensibilité (*trigger*) au-delà duquel le système se met en marche et mémorise les données concernant l'événement spécifique.

Exploitation : Le réseau, conceptuellement analogue à n'importe quel autre réseau de surveillance, doit fournir la mesure des signaux dans le temps (spectre de mesure) pour permettre l'élimination du bruit de fond (filtrage). Comme l'opération est exécutée d'ordinaire au centre de saisie, il est nécessaire de transférer intégralement les signaux, ce qui impose en général un système de transmission (par câble ou radio) et un système d'enregistrement dédié, capables de traiter de grandes quantités de données. Pour réduire ces contraintes, des tentatives

sont en cours pour développer des systèmes de filtrage automatique sur le site et donc d'identification des signaux intéressants ; ceci représenterait une réduction radicale des coûts de transmission.

L'intérêt des réseaux acoustiques vient de leur capacité à fournir des informations étendues et non ponctuelles.

Vitesse du glissement de terrain mesurable et/ou en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994): jusqu'à 5 m/s (Classes 1-2-3-4-5-6-7).

Influence des conditions environnementales: Précipitations, interférences électromagnétiques, vibrations.

Vulnérabilité: Chute de blocs, inondations.

Avantages:

- Capacité à fournir des informations étendues et non ponctuelles ;
- Estimation de la localisation spatiale des sources.

Inconvénients:

- Nécessité d'éliminer les bruits de fond (filtrage) ;
- Systèmes de transmission et d'enregistrement dédiés et capables de gérer une grande quantité de données (coûts élevés) ;
- Fonctionnalité de la technologie dépendant du pouvoir de transmission des matériaux ;
- Limites dans la superficie des réseaux de surveillance.

6.2.2. Extensométrie

Distomètres

Méthode: Extensométrie.

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Configuration et fonctionnement: mécanisme capable de tendre et de bloquer un ruban d'acier centimétré, fixé aux deux points de mesure par des ancrages (plots de mesure ou boulons de convergence fixés sur les parois rocheuses ou sur des supports métalliques scellés dans le terrain). Les variations de distance entre les couples d'ancrages sont mesurées au moyen d'un comparateur centésimal solidaire avec le corps de l'instrument.

La caractéristique fondamentale du distomètre à bande (unique principe de fonctionnement) est sa capacité à maintenir constante la tension du ruban gradué grâce à un dispositif de spécifique. Ce système est indispensable pour empêcher la chaînette de subir des variations qui pourraient influencer la précision des mesures. Le distomètre peut être employé pour des bases de longueur supérieure au mètre, jusqu'à 30m.

Vitesse du glissement de terrain mesurable et/ou en fonction de laquelle l'instrument peut être installé(Cruden & Varnes, 1994): Mouvements jusqu'à 1,6 mm/an (Classes 1-2).

Influence des conditions environnementales: Température et précipitations.

Vulnérabilité: Chute de blocs, animaux et inondations.

Avantages/Inconvénients: Ces instruments sont généralement caractérisés par une installation simple (seulement sur des fractures à bords parallèles) ne nécessitant pas de personnel expert, une rapidité dans l'exécution des mesures, un intervalle de déplacement mesurable en continuité réduit, en général moins de 500 mm. Sur tous ces instruments la mesure des déplacements ne peut se faire que selon une seule composante.

Mode de mesure: Manuelle par lecture des valeurs directement sur le comparateur de déplacement centésimal, analogique ou numérique, solidaire du corps principal de l'instrument.

Distancemètres orientables

1) Distancemètre Orientable LRPC LYON Type Do1 ou Do2 à fil d'invar

Méthode: Extensométrie.

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Configuration et fonctionnement :

La technique consiste à placer entre deux repères implantés dans la structure à surveiller une chaîne de mesure constituée par l'appareil (Distancemètre Orientable type Do1 ou Do2), un fil de mesure (appelé fil maître) et une ou deux rallonges, suivant le cas, permettant de centrer l'appareil dans sa plage de mesure.

L'ensemble du système se présente sous la forme d'un lot complet, comprenant un distancemètre et un jeu de 17 fils et rallonges, le tout logé dans un coffret aluminium de dimensions réduites permettant un portage aisé sur le terrain.

Afin de garantir la pérennité du système, l'ensemble est étalonné régulièrement dans la base d'étalonnage du LRPC de Lyon.

Vitesse mesurable (en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994): Mouvements jusqu'à 1,6 m/an (Classes 1-2-3).

Influence des conditions environnementales: Température et précipitations.

Vulnérabilité: Chute de blocs, animaux, végétation.

Avantages/Inconvénients: installation simple (seulement sur des fractures à bords parallèles), ne nécessitant pas de personnel expert, rapidité dans l'exécution des mesures, matériel tout temps fiable et robuste

Mode de mesure : Manuelle sur un vernier type pied à coulisse . résolution 0.1mm. Précision des mesures jusqu'à 40 mètres maximum : 0.3 mm

2) *Distancemètre Orientable optique type Do 5 du LRPC LYON*

Méthode: Extensométrie.

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Configuration et fonctionnement :

Principe : la mesure consiste à envoyer un faisceau infrarouge sur un prisme rétro-rélecteur et à mesurer le temps de propagation aller-retour. Cet appareil est entièrement compatible avec les distancemètres à fil d'invar et peut leur être substitué dans toutes les configurations de mesures.

Pour garantir la pérennité du système, l'ensemble est étalonné régulièrement dans la base d'étalonnage du LRPC de Lyon.

Vitesse mesurable (en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994): Mouvements jusqu'à 1,8 m/heure (Classes 1-2-3-4-5).

Influence des conditions environnementales: Température et précipitations.

Vulnérabilité: Chute de blocs, végétation et inondations.

Avantages dispositif de mesure léger, peu encombrant et transportable aisément par une personne ; rapidité dans l'exécution des mesures ; installation simple.

Inconvénient: cet appareil ne peut être utilisé que sur des fractures à bords parallèles.

Mode de mesure : Manuelle par lecture des valeurs mesurées directement sur un écran digital. résolution 0.1mm. Mesures possibles jusqu'à 250 mètres maximum. Précision suivant les distances mesurées de 0.3 à 1 mm

Extensomètres superficiels (à fil)

Méthode: Extensométrie.

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Configuration et fonctionnement:

Principe : L'extensomètre à fil (unique principe de fonctionnement) est utilisé pour mesurer le déplacement superficiel entre deux points de mesure, situés des deux côtés d'une fracture. Il peut être installé sur des surfaces orientées de n'importe quelle façon par rapport à l'horizontale.

Il est constitué d'un câble en acier inoxydable ou Invar tendu entre deux ancrages de part et d'autre de la fracture. La tension constante du câble s'obtient avec un tendeur qui permet de maintenir la chaînette du câble dans les limites de quelques centimètres et donc de contenir les possibles erreurs de mesure dans les cas de variations de tension. Le système de tension peut

être constitué par un contrepoids ou par un ressort à tension calibrée. Le schéma de l'instrument prévoit que le câble soit fixé à un support en aval de la fracture, passe par une ou plusieurs poulies de renvoi, et se termine en s'enroulant sur une dernière poulie en amont, dotée du système de tension et ancrée solidement à un autre support.

Le système de mesure (comparateur centésimal, transducteur linéaire ou rotatif) peut être relié au câble ou au contrepoids. Il est composé d'une bague solidaire d'un repère fixe, par exemple le support de la poulie de renvoi et le corps de l'ancrage en amont, à l'intérieur duquel coulisse une jauge repositionnable, qui révèle les mouvements du câble ou du contrepoids auquel elle est fixée. Le déplacement d'un des deux points de mesure sollicite le câble à la traction, rappelant la poulie sur laquelle il est enroulé. Celle-ci se met à tourner, en déroulant la quantité de câble nécessaire pour rétablir la tension d'équilibre, et en actionnant ainsi en proportion le transducteur potentiométrique rotatif, en cas de système automatisé. Une fois atteinte la limite de la course, il est possible de remettre à zéro le transducteur. La précision de l'instrument dépend de celle du transducteur.

Vitesse mesurable, en fonction de laquelle l'instrument peut être utilisé (Cruden & Varnes, 1994)::
Mouvements jusqu'à 13 m/jour (Classes 1-2-3-4) dans les cas où les instruments sont dotés de potentiomètres multitours.

Influence des conditions environnementales: Température, précipitations et vent.

Vulnérabilité: Chute de blocs, animaux et inondations.

Avantages/Inconvénients: installation simple à cheval sur les fractures, que les bords soient parallèles ou non, ne nécessitant pas de personnel spécialisé; rapidité d'exécution des mesures; intervalle de déplacement mesurable important (jusqu'à deux mètres et même plus). Sur tous les instruments la mesure des déplacements se fait selon une composante.

Mode de mesure: Manuelle avec des comparateurs ou automatique avec des transducteurs de déplacement (linéaires ou rotatifs). Il y a alors possibilité d'une liaison par câble à un système de saisie de données à distance installé en surface, avec enregistrement des données en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire; la vérification manuelle indépendante par comparateurs est toujours possible.

Extensomètres de forage

Méthode: Extensométrie.

Domaine d'application: Surveillance des déformations profondes.

Configuration et fonctionnement: Ces instruments permettent de surveiller à des niveaux différents, le long d'un sondage, les mouvements profonds des sols meubles ou rocheux.

Principe: Les mouvements relatifs entre le point d'ancrage et les têtes des tiges de mesure sont relevés à l'aide de transducteurs de déplacement de type mécanique (manuel) ou électrique. Dans le cas des capteurs de type électrique (inductifs, potentiométriques, à corde vibrante, etc.) les lectures automatiques à distance sont possibles.

Il est possible d'équiper les têtes de repère des extensomètres de manière à autoriser des lectures manuelles, parallèlement aux mesures automatiques, ce qui permet la vérification des mesures anormales, le contrôle des dérives de l'instrumentation électrique de même que la continuité des lectures en cas d'endommagement ou de démontage pour entretien du système automatique.

Mise en œuvre: Le forage peut être orienté de façon variée par rapport au terrain naturel. Les extensomètres de forage sont constitués de:

- un ou plusieurs ancrages (bases de mesure) posés à différentes profondeurs à l'intérieur du forage;
- une tête de repère, généralement située à la tête du forage;
- des tiges ou des câbles qui relient les bases de mesure à la tête de repère;
- un tube de protection, qui évite le contact entre les tiges ou les câbles et le matériau tout autour.

Les mouvements relatifs entre le point d'ancrage et les têtes des tiges de mesure sont relevés à l'aide de transducteurs de déplacement de type mécanique ou électrique. Le plus gros inconvénient des premiers (comparateurs) est qu'il faut exécuter les mesures manuellement *in situ* au moyen de systèmes à calibre. Avec les capteurs de type électrique (inductifs, potentiométriques, à corde vibrante, etc.) les lectures automatiques à distance sont possibles. Dans ce cas les têtes de repère des extensomètres peuvent être étudiées de manière à autoriser des lectures avec des instruments mécaniques, parallèlement aux mesures effectuées avec les transducteurs électriques, ce qui présente un triple avantage:

- vérification des mesures anormales relevées avec les systèmes automatiques;
- contrôle des dérives dans le temps de l'instrumentation électrique;
- continuité des lectures également en cas d'endommagement ou de démontage pour entretien du système de mesure automatique.

Types d'extensomètres de forage classés par principe de fonctionnement:

- à fil ;
- à tige ;
- incrémental ISETH ;
- incrémental INCREX.

Selon le principe de fonctionnement adopté les différents extensomètres de forage pourront:

- être installés exclusivement dans des forages verticaux (types à fil, incrémentaux ISETH et INCRX) ;
- autoriser des mesures continues le long de toute la verticale (types à fil, incrémentaux ISETH et INCRX) ou seulement à des niveaux préétablis (types à tige) ;
- être lents dans l'exécution des mesures pour les appareils à contrôle manuel (types incrémentaux ISETH et INCRX) ou rapides pour les types automatiques (types à fil et à tige) ;
- avoir une précision qui est fonction de la profondeur (types à fil, incrémentaux ISETH et INCRX) ;
- nécessiter des phases de pré-traitement des données (incrémentaux ISETH et INCRX).

Vitesse mesurable, en fonction de laquelle l'instrument peut être utilisé (Cruden & Varnes, 1994):: mouvements jusqu'à 1,6 mm/an (Classes 1-2).

Influence des conditions environnementales: Température et chimie des terrains et/ou des fluides.

Vulnérabilité: Chute de blocs et inondations.

Avantages/Inconvénients: installation complexe, nécessitant du personnel qualifié. Pour tous les types d'instruments, la mesure des déplacements (mesure d'une composante) est directe et en points discrets. La précision est fonction de la profondeur.

Mode de mesure: Manuel pour les appareils à tige sans transducteurs et pour les appareils à sonde amovible (incrémentaux ISETH et INCRX). Automatique pour les types à sonde fixe (type à fil) et à tige avec transducteurs de déplacement. Pour ces derniers il y a la possibilité d'une liaison par câble à un système de saisie de données à distance installé en surface, avec enregistrement des données en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire; la vérification manuelle indépendante n'est pas possible pour les types à sonde fixe (type à fil), mais elle l'est pour les types à tige avec transducteurs de déplacement (au moyen de comparateurs).

Fissuromètres

Méthode: Extensométrie.

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Configuration et fonctionnement: instruments généralement constitués d'une barre métallique, dont les extrémités sont ancrées à la roche ou au terrain, qui permettent de mesurer les

déplacements relatifs entre les deux lèvres d'une fracture. Ils peuvent être à fonctionnement mécanique ou électrique, monoaxiaux ou triaxiaux.

Types de fissuromètres classés par principe de fonctionnement:

- linéaire pour fractures à bords parallèles ;
- linéaire pour fractures à bords non parallèles (en V) ;
- mécanique monoaxial ;
- mécanique monoaxial automatisé ;
- mécanique triaxial ;
- mécanique triaxial automatisé ;
- électrique monoaxial ;
- électrique triaxial.

Selon le principe de fonctionnement adopté les différents fissuromètres pourront être installés seulement sur des fractures à bords parallèles ou également sur des fractures angulaires (en V).

Vitesse mesurable, en fonction de laquelle l'instrument peut être utilisé (Cruden & Varnes, 1994)::

Mouvements jusqu'à 1,6 mm/an (Classes 1-2).

Influence des conditions environnementales: Température et précipitations.

Vulnérabilité: Chute de blocs, animaux et inondations.

Avantages: installation simple, ne nécessitent pas le recours à du personnel qualifié, rapidité d'exécution des mesures ; mesure selon 3 composantes, sauf pour les fissuromètres de type linéaire.

Inconvénients : intervalle de déplacement limité à 500mm (spécialement pour les fissuromètres de type linéaire)..

Mode de mesure: Manuelle pour les fissuromètres de type linéaire. Automatique pour les types dotés de transducteurs de déplacement (type monopoint type automatisé à voyant), avec par conséquent la possibilité d'une liaison par câble à un système de saisie de données à distance installé en surface, avec enregistrement en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire. La vérification manuelle indépendante par comparateur reste toujours possible.

Jauge de contrainte (strain gauge)

Méthode: Extensométrie.

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Les barres extensométriques sont utilisées principalement pour mesurer les sollicitations de pieux, fondations, diaphragmes, terres armées, ainsi que pour relever l'ampleur des déformations à l'intérieur de structures en béton ou en acier, telles que piliers, murs de soutènement ou vannes. Elles peuvent servir à évaluer indirectement l'ampleur des phénomènes qui causent les déformations, comme par exemple les mouvements de terrain.

Configuration et fonctionnement:

Principe : Ces instruments se basent sur la biunivocité de la liaison constitutive élastique: tous les matériaux, soumis à un effort linéaire, se déforment proportionnellement à l'effort (Loi de Hook); par conséquent, une fois que l'on connaît la déformation, la zone de la section agissante et ses paramètres élastiques, on peut remonter à la charge agissante.

Mise en œuvre : dans les structures en béton elles sont ancrées à la cage d'armature et noyées dans la coulée, tandis que dans celles en acier elles sont soudées aux éléments qui composent la structure au moyen de systèmes de fixation appropriés.

Types de jauges de contrainte classés par principe de fonctionnement:

- à pont extensométrique ;
- à corde vibrante.

Pour les types à corde vibrante, les cellules de charge ne sont pas adaptées aux mesures dynamiques et n'autorisent pas la compensation de la température et de la flexion (types à corde vibrante).

Vitesse mesurable, en fonction de laquelle l'instrument peut être utilisé (Cruden & Varnes, 1994):: mouvements jusqu'à 16 mm/an (Classes 1 et 2).

Influence des conditions environnementales: Température.

Vulnérabilité: Chute de blocs et inondations.

Avantages: installation simple; aucune nécessité de personnel qualifié; rapidité dans l'exécution des mesures.

Mode de mesure: Le plus souvent automatique par le biais du transducteur, avec la possibilité de liaison par câble à un système de saisie de données à distance installé en surface, avec enregistrement des données en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire.

Jauges de déformation

Méthode: Extensométrie.

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Configuration et fonctionnement: Il existe deux types principaux de déformètres: électrique et mécanique amovible.

Le déformètre électrique possède un corps principal en acier inoxydable, à l'intérieur duquel est installé un transducteur de déplacement linéaire de type potentiométrique. Le cylindre porte-transducteur est soutenu par une plaque de fixation, qui rend l'instrument solidaire d'une des deux parois entre lesquelles on veut surveiller les variations de distance. La plaque supporte également la poulie de renvoi par laquelle passe le câble de connexion entre le transducteur et l'ancrage à l'autre paroi. Les mouvements de fractures ou des éléments de structure (par exemple un arc) sont relevés par le câble: à chaque variation de la distance entre les deux points de mesure correspond une modification de la position de la tige, qui provoque à son tour une variation proportionnelle du signal électrique généré par le transducteur.

Le déformètre amovible se différencie du précédent à la fois par le principe de fonctionnement, non électrique, et par sa configuration. Il est constitué d'un petit boîtier, qui supporte directement le comparateur centésimal, relié au capteur mécanique. À la différence des instruments précédents, le corps principal du transducteur de déformation n'est pas installé de manière permanente à la paroi: à la fin de la mesure il peut être décroché des deux points de mesure ancrés aux parois à surveiller, généralement des repères en acier. La mesure est relevée directement par le comparateur centésimal, disponible aussi bien en version analogique que numérique.

Types de déformètres classés par principe de fonctionnement:

- électrique
- mécanique amovible.

Selon le principe de fonctionnement adopté les différents déformètres pourront enregistrer les déformations en un point unique (type électrique) ou être déplacés sur plusieurs points de mesure (type mécanique amovible).

Vitesse mesurable, en fonction de laquelle l'instrument peut être utilisé (Cruden & Varnes, 1994):Mouvements jusqu'à 1,6 mm/an (Classes 1-2).

Influence des conditions environnementales: Température.

Vulnérabilité: Chute de blocs; inondations pour le type électrique.

Avantages: installation simple (seulement sur des fractures à bords parallèles), aucune nécessité de personnel très qualifié, rapidité d'exécution des mesures,

Inconvénients: intervalle de déplacement mesurable réduit, en général moins de 500 mm (spécialement pour les fissuromètres de type linéaire. Avec tous les types d'instruments la mesure des déplacements se fait selon une seule composante.

Mode de mesure: Toujours manuelle pour le type mécanique amovible. Automatique pour le type électrique, doté de transducteur de déplacement, avec par conséquent la possibilité d'une liaison par câble à un système de saisie de données à distance installé en surface, avec enregistrement en

mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire; sans possibilité de vérification manuelle indépendante.

Tassomètres

Méthode: Extensométrie.

Domaine d'application: Surveillance des déformations profondes.

Leur domaine d'application principal est le suivi des tassements du terrain de fondation des remblais, des remblais eux-mêmes, de tranchées souterraines ou de zones subsidentes. Leur emploi en versant instable est par contre plutôt rare et en tout cas toujours limité à des cas spécifiques. Ils sont donc simplement mentionnés ici à titre d'information.

Configuration et fonctionnement: Les tassomètres mesurent des déplacements verticaux du terrain.

Il existe deux catégories fondamentales de tassomètres :

- monopoint : les tassements sont mesurés en un point donné uniquement
- multipoints : les tassements sont mesurés à plusieurs niveaux le long d'une verticale de sondage.

Types de tassomètres classés par principe de fonctionnement:

- monopoint type à plaque, conçus pour être installés en surface ;
- monopoint type à voyant, conçus pour être installés à l'intérieur de forages;
- monopoint type à voyant automatisé ;
- multipoints.

Selon le principe de fonctionnement adopté les différents tassomètres pourront:

- autoriser des mesures continues le long de toute la verticale (types multipoints avec sonde de tassométrie amovible) ou seulement à des niveaux préétablis.
- être lents dans l'exécution des mesures pour les appareils à contrôle manuel (types multipoints et monopoint non automatisés) ou rapides pour les types automatiques (types monopoint automatisés).
- avoir une précision qui est fonction de la profondeur (types multipoints avec sonde de tassométrie amovible).

Vitesse mesurable, en fonction de laquelle l'instrument peut être utilisé (Cruden & Varnes, 1994): mouvements jusqu'à 1,6 mm/an (Classes 1-2).

Influence des conditions environnementales: Température et chimie des terrains et/ou des fluides.

Vulnérabilité: Chute de blocs et inondations.

Avantages/Inconvénients: installation complexe exclusivement dans des forages verticaux; nécessité de personnel très qualifié et de pré-traitement des données. Dans tous les instruments la mesure des déplacements (mesure d'une composante) est directe et en points discrets.

Mode de mesure: Manuelle pour les types multipoints (sonde de tassométrie amovible) et monopoint non automatisés (nivellements topographiques). Automatique pour les appareils dotés de transducteurs de déplacement (type monopoint automatisé à voyant), avec par conséquent la possibilité d'une liaison par câble à un système de saisie de données à distance installé en surface, avec enregistrement des données en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire; la vérification manuelle indépendante par nivellements topographiques est également possible.

Systèmes extensométriques-inclinométriques (TRIVEC)

Méthode: Extensométrie - Inclinométrie.

Domaine d'application: Surveillance des déformations profondes et des rotations de la verticalité profonde.

Configuration et fonctionnement: La sonde extensométrique type ISETH® peut être équipée avec des capteurs inclinométriques à servo-accéléromètres, permettant ainsi de mesurer également les déformations horizontales (mesures extenso-inclinométriques). Cet instrument, dénommé

sonde type TRIVEC® (principe de fonctionnement unique) permet de déterminer le déplacement entre les valeurs mesurées et la valeur de positionnement (analogues au système ISETH®) selon trois dimensions:

- la composante Z, dont la direction coïncide avec l'axe du trou est mesurée avec la même technique que celle qui est employée dans les systèmes extensométriques incrémentaux (précision de l'ordre de $\pm 0,005$ m/mm);
- les composantes X et Y, qui se trouvent sur deux plans orthogonaux entre eux (dont l'intersection coïncide avec l'axe du trou), sont relevées avec un inclinomètre (précision de l'ordre de $\pm 0,05$ m/mm).

Les bases de mesure et les caractéristiques mécaniques des sondes de mesure sont tout à fait analogues à celles du système ISETH®, à la seule différence près que les forages de sondage doivent être verticaux et réalisés vers le bas. La sonde est positionnée au moyen de tiges qui permettent de faire glisser l'instrument d'une base de mesure à la suivante, de le faire tourner et de l'envoyer en butée contre les deux ancrages annulaires suivants, qui sont munis d'un siège conique. Les couplages « tête sphérique-ancrage conique » assurent le positionnement de la sonde et donc une répétabilité élevée des mesures, d'où une minimisation des erreurs. Comme pour les systèmes extensométriques incrémentaux, les seules mesures autorisées sont celles de type manuel.

Vitesse mesurable, en fonction de laquelle l'instrument peut être utilisé (Cruden & Varnes, 1994): mouvements jusqu'à 1,6 mm/an (Classes 1-2).

Influence des conditions environnementales: Température et chimie des terrains et/ou des fluides.

Vulnérabilité: Chute de blocs et inondations.

Avantages/Inconvénients: installation complexe exclusivement dans des forages verticaux; nécessité de personnel expert, temps d'exécution des mesures élevés, nécessité de pré-traitement des données. Dans tous les instruments la mesure des déplacements (mesure de trois composantes) est directe et en points discrets, tout en permettant des mesures en continu le long de toute la verticale, mais avec une précision dépendant de la profondeur.

Mesure: Exclusivement manuelle par sonde extenso-inclinométrique.

Systèmes multiparamétriques (DMS)

Méthode: Extensométrie-Piézométrie-Inclinométrie.

Domaine d'application: Surveillance des déformations profondes, rotations de la verticalité profonde, pressions neutres, niveaux piézométriques.

Configuration et fonctionnement: Instrument dont l'appareil permet la détection différentielle des grandeurs physiques et mécaniques fondamentales du terrain et des structures en trois dimensions, permettant d'effectuer, avec une seule unité, les mesures suivantes:

- déviation angulaire sur le plan azimutal ;
- extension ou compression sur le plan zénithal ;
- niveau piézométrique;
- variations accélérométriques;
- température.

Cet instrument est habituellement décrit comme système différentiel de stabilité, identifié par le sigle D.M.S. (*Differential Monitoring Stability*) ; il a été présenté en avant-première au 6^{ème} Colloque International FMGM (*Field Measurements in Geomechanics*) qui s'est tenu à Oslo en 2003, mais il compte déjà des applications relatives à des glissements de terrain, des fronts de creusement, des ponts (Giuffredi et al., 2003; Lovisolo et al., 2003; Foligno et al., 2004; Giuffredi et al., 2004).

Le système D.M.S. est une colonne d'enregistrements multiparamétriques logée à l'intérieur d'un forage, composée d'une série d'unités rigides modulaires qui renferment:

- des dispositifs électroniques de gestion des données;
- des dispositifs électroniques de transmission des données;

- divers types de capteurs :
 - inclinométriques;
 - extensométriques;
 - piézométriques;
 - accélérométriques;
 - de température.

Les éléments modulaires sont préconstruits et offrent le grand avantage de pouvoir être assemblés selon diverses modalités directement sur le site d'installation, en fonction des paramètres locaux et des buts du suivi. Tous les éléments modulaires à l'intérieur sont reliés à la batterie du système de surveillance par des jonctions spéciales (joints déformables) qui permettent au matériel de s'adapter aux caractéristiques du forage et aux mouvements du terrain. En fonction des paramètres locaux la colonne de surveillance multiparamétrique peut être « personnalisée » en combinant les capteurs de diverses façons, en choisissant des joints avec des caractéristiques déterminées et en variant l'espacement entre les éléments de surveillance. La résolution spatiale maximum de l'instrument coïncide avec la dimension minimum disponible de l'unité rigide, 0,3 m (résolution standard = 1 m). Tous les capteurs sont interfaçables à la même unité de contrôle.

Vitesse mesurable (en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994): mouvements jusqu'à 1,6 m/an (Classes 1-2-3).

Influence des conditions environnementales: Température, précipitations, chimie des terrains/fluides, interférences électromagnétiques, vibrations.

Vulnérabilité: Chute de blocs, inondations.

Avantages/Inconvénients:

- surveillance multiparamétrique simultanée à l'intérieur du même forage (réduction des coûts) ;
- grande adaptabilité de la colonne de surveillance aux déformations (joints déformables) ;
- possibilité de réhabilitations d'outils avec des inclinomètres fortement déviés et donc non plus mesurables avec les instruments actuellement utilisés ;
- résolution spatiale élevée des mesures ;
- éléments modulaires préconstruits assemblés directement sur le terrain et équipés seulement avec les types de capteurs demandés.

Par contre, le D.M.S. étant utilisé depuis quelques années seulement, il n'a pas encore été signalé dans la littérature récente de défauts ou de défaillances intrinsèques. Quoiqu'il en soit, selon les types de mesures pour lesquelles la colonne de surveillance multiparamétrique a été équipée, les problèmes habituels liés aux capteurs spécifiques utilisés peuvent se manifester (voir: inconvénients dans inclinomètres, extensomètres, piézomètres).

Mesure: Les mesures sont acquises automatiquement par des cartes analogiques-numériques spécifiques à l'intérieur des unités modulaires. Celles-ci transmettent les données en format binaire, en utilisant des protocoles de communication spécifiques, à une unité de contrôle et d'enregistrement gérée par les utilisateurs du réseau au moyen d'un logiciel spécial (GEOMASTER). L'acquisition peut être régulée en continu ou à intervalles prédéfinis. Par l'intermédiaire d'une station fixe munie de liaison téléphonique ou d'une unité mobile dotée de transmission G.S.M. ou G.P.R.S., il est possible d'effectuer à distance le contrôle des stations de surveillance (télécontrôle, téléchargement, archivage, gestion des données), ainsi que le paramétrage des alarmes.

6.2.3. Géodésie – Topographie

Niveaux – théodolites – stations totales – théodolite motorisé

Méthode: Topographie - Géodésie.

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Configuration et fonctionnement: (pour leurs caractéristiques techniques, nous renvoyons aux brochures des produits du commerce) Les mesures sont effectuées en installant des points de référence fixes dans des positions significatives et en effectuant les mesures depuis des repères non intéressés par le mouvement.

La mesure des **déplacements verticaux** est simple et rapide à réaliser avec la technique du nivellement. L'erreur moyenne sur un nivellement d'une longueur de 1000 m a été estimée de l'ordre de 2,5 mm avec l'utilisation d'instruments de précision. Cette technique de mesure se prête en particulier au contrôle d'ouvrages linéaire, comme des routes ou des ouvrages hydrauliques, qui traversent des pentes soumises à des mouvements de terrain.

Pour déterminer le **déplacement** d'un point **dans l'espace** (cas des repères installés sur des versants instables), des instruments de plus grande précision sont nécessaires et les mesures sont plus difficiles à réaliser. Les méthodes les plus courantes, avec un degré de précision progressif, sont les triangulations, les trilatérations et les triangulaterations: cette dernière méthode, pour des distances courtes, est celle qui fournit les meilleurs résultats.

Pour les mesures angulaires, on utilise des *théodolites* avec une sensibilité de lecture qui peut arriver jusqu'à 0,1" et une précision de lecture nominale jusqu'à 0,5". Pour les mesures de distances, on utilise généralement des électro-distancemètres à infrarouges, qui peuvent couvrir des distances de plus de 10 km avec une précision de lecture nominale jusqu'à $1 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6} D$ (où D=distance mesurée en mètres).

Ces techniques topographiques présentent des avantages considérables, liés surtout à la précision des mesures et à leur caractère économique. Il existe toutefois des limites importantes : la possibilité d'exécuter des mesures topographiques est en effet conditionnée par la distance de référence, par la stabilité des repères fixes et des conditions météoclimatiques.

- La distance entre les points de référence et les repères a une limite qui varie selon les instruments utilisés, tant comme valeur absolue qu'en fonction de la précision demandée pour la mesure (qui est inversement proportionnelle à la distance elle-même). Le problème de la distance peut devenir critique si, comme c'est souvent le cas, il n'existe pas à proximité de la pente à surveiller de lieu adapté pour installer le repère de référence. Souvent, dans les grands glissements de terrain, il faut faire référence au versant opposé à celui à surveiller.
- Pour assurer la stabilité des points de référence positionnés à proximité de la zone en mouvement, il est nécessaire de vérifier, par une enquête préalable soignée, que les sites sur lesquels est prévue l'installation ne connaissent pas de phénomènes d'instabilité.
- Les conditions météorologiques enfin peuvent empêcher le déroulement des mesures et, pour certaines catégories d'instruments, en influencer la précision, comme dans le cas des effets induits des variations thermiques sur la couche superficielle du terrain et sur les structures de support des repères.

L'*instrumentation classique* utilisée pour les mesures topographiques est de type manuel, donc non adaptée pour le suivi de phénomènes évoluant rapidement, et peu pratique quand le nombre de points à surveiller est élevé.

Le *théodolite à visée automatique* est un théodolite électronique associé à un EDM à infrarouges. Il est doté d'un moteur pour le mouvement sur le plan horizontal et sur le plan vertical et muni d'un système de pointage automatique qui permet de viser à travers une alidade un certain nombre de références selon une séquence prédéfinie, à des intervalles de temps programmés. L'appareil mesure pour chaque réflecteur la distance, l'angle horizontal par rapport à une orientation de référence et l'angle vertical, afin de calculer les coordonnées planimétriques-altimétriques de chaque point pour en suivre l'évolution dans le temps. Le système est généralement commandé par un ordinateur, qui permet également d'archiver les données.

Ces théodolites automatiques ont été créés pour permettre d'effectuer des levés célorimétriques avec un seul opérateur. Comme ils sont capables, s'ils sont dotés des accessoires nécessaires (prisme réflecteur, émetteur radio ou autre), de suivre un repère en mouvement, ces instruments peuvent être utilisés dans le contrôle continu de versants instables.

Les systèmes actuellement dans le commerce sont généralement réalisés avec les théodolites de classe plus élevée parmi les appareils disponibles dans les catalogues des divers fabricants. Principe de fonctionnement : L'image du spot émis par le collimateur coaxial de l'instrument est réfléchi par le prisme réflecteur installé sur le point visé et relevée par le caméscope CCD incorporé dans l'instrument. Cette image est analysée au moyen d'un logiciel spécial qui en relève l'écart par rapport à la direction de mire. Les déplacements de la lunette sont gérés au moyen de servomoteurs sans fin, tout en conservant la possibilité d'effectuer des mouvements avec les vis sans fin micrométriques spécifiques; la précision de positionnement motorisé est de 1,5".

On peut utiliser comme point de mesure n'importe quel type de réflecteur passif standard ou de microprismes, sans recourir à des prismes spéciaux avec sources lumineuses.

Selon le type d'instrument, la mesure des déplacements a lieu le long d'une seule composante (niveaux) ou de plusieurs (théodolites, stations totales, théodolites motorisés).

Vitesse mesurable (en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994): Mouvements jusqu'à 1,8 m/heure (Classes 1-2-3-4-5) en fonction de la stabilité des références. Pour les instruments manuels les vitesses mesurables sont également fonction de la capacité d'exécution des mesures.

Influence des conditions environnementales: Température, pression, précipitations, vent, humidité, visibilité, lumière, vibrations.

Vulnérabilité: Pour les niveaux, les théodolites et les stations totales : pas de vulnérabilité des instruments, mais des opérateurs (événements pouvant compromettre leur sécurité : chutes de blocs...). Pour le théodolite motorisé : chute de blocs, inondations et animaux.

Avantages/Inconvénients: nécessité de personnel expert, temps d'exécution des mesures longs (sauf pour les théodolites motorisés), nécessité d'intervisibilité entre les points de mesure et les réflecteurs. Ces instruments sont caractérisés par une distance d'utilisation élevée, généralement plus d'1 km, et aucune ambiguïté des mesures, même s'ils nécessitent des phases de pré-traitement des données.

Mesure: Toujours de type manuel par un ou plusieurs opérateurs spécialisés pour les niveaux, les théodolites, les stations totales. Automatiques pour les théodolites motorisés, avec liaison par câble à un système de saisie de données à distance installé en surface, avec enregistrement des données en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire.

GPS

Méthode: Topographie - Géodésie.

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Configuration et fonctionnement: (pour leurs caractéristiques techniques nous renvoyons aux brochures des produits dans le commerce). Le système GPS (*Global Positioning System*) de positionnement d'un point au sol se base sur la mesure de trois distances du point par rapport à au moins quatre satellites de la constellation américaine NAVSTAR dont on connaît les coordonnées; celles-ci sont calculées dans un système de référence global, géocentrique, par rapport auquel sont connues les coordonnées de quelques stations d'observation des satellites réparties dans le monde. Le système se compose de 3 parties:

- section spatiale;
- section de contrôle;
- section utilisateur.

Les applications du GPS sont basées sur deux techniques de mesure différentes:

- « Pseudorange »: méthode basée sur la détermination des distances entre le point au sol et chacun des satellites observés (connues justement comme « pseudorange »), permet de déterminer les coordonnées absolues d'un point de manière instantanée, avec une précision maximale possible de 20 mètres. Plusieurs techniques de traitement différentiel de la mesure permettent d'obtenir des précisions plus élevées, de métriques à sub-métriques. Cette méthode est utilisée dans la navigation, dans les transports et dans toutes les applications qui n'exigent pas une précision plus que métrique, mais elle ne peut être considérée pour des applications topographiques.
- Interférentielle (mesure de phase): cette technique peut être utilisée tant pour des mesures statiques que pour des mesures cinématiques, avec une précision respectivement de quelques centimètres et inférieure au centimètre. Cette précision, sur la base de notre expérience, peut être obtenue sur des distances allant jusqu'à 10 km. Cette technique de mesure permet donc d'exécuter des contrôles topographiques, géodésiques et un traçage précis de trajectoires de véhicules.

Le développement du matériel au fil des années permet d'effectuer aujourd'hui des mesures *GPS en mode automatique*, subdivisée selon deux catégories:

(1) Mesures en temps « quasiment réel », qui comportent:

- l'acquisition et la mémorisation locale, par des stations à distance, de sessions de mesures statiques pré-programmées ;
- le transfert automatique périodique des fichiers enregistrés au Centre de saisie de données ;
- le traitement automatique hors ligne des données en temps « quasiment réel ».

(2) Mesures en temps réel (RTK ou autres logiciels), qui comportent:

- la liaison continue entre les stations à distance et le Centre de saisie de données (intervalle d'acquisition d'environ 15 s) ;
- le traitement en temps réel des données saisies par les stations au Centre de saisie de données.

L'exécution de cette typologie de mesures comporte la mise en œuvre de stations de mesure, qui se composent de :

- récepteur GPS;
- système de transmission des données (GSM ou radio);
- système d'alimentation à panneaux photovoltaïques.

Actuellement, les coûts de réalisation d'un réseau GPS de type automatique sont encore élevés. Ils sont cependant justifiés pour assurer la surveillance de phénomènes qui engendrent des risques pour la population, lorsque les mesures sont difficilement réalisables avec d'autres techniques.

Types de systèmes GPS classés par principe de fonctionnement:

- station amovible : temps d'exécution des mesures longs;
- station fixe.

Vitesse mesurable (en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994): Mouvements jusqu'à 1,8 m/heure (Classes 1-2-3-4-5).

Influence des conditions environnementales: Interférences électromagnétiques et vibrations.

Vulnérabilité: En général chute de blocs et végétation; pour les stations fixes également inondations et animaux.

Avantages/Inconvénients: Ces instruments sont généralement caractérisés par: nécessité de personnel expert, tandis qu'ils ne nécessitent pas d'intervisibilité entre les points de mesure, né d'installation de réflecteurs et/ou de points de repère. Ces instruments sont en outre caractérisés par une distance d'utilisation élevée, généralement plus grande qu'un km, et aucune ambiguïté des mesures même si cependant elles nécessitent des phases de pré-traitement des données. On mesure toujours les trois composantes du déplacement.

Mesure: Toujours de type manuel avec les stations amovibles et automatique avec les stations fixes, avec liaison par câble à un système de saisie de données à distance installé en surface, avec enregistrement des données en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire.

Laser scan (TSL)

Voir rubrique 6.2.6. Laser.

RMS

Méthode: Topographie - Géodésie.

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Configuration et fonctionnement: RMS est l'acronyme de *Remote Monitoring System* (unique principe de fonctionnement) ; dans ce cas spécifique, quand on parle de Laser, on entend distancemètre Laser. Cette technologie a de nombreux domaines d'application, qui vont de la surveillance des pentes en général à celle des ouvrages d'ingénierie et des monuments historiques.

La configuration standard de ce système de surveillance se compose de:

- une station de mesure RMS avec alimentation directe ou par panneau solaire;
- 1 à 3 distancemètres laser connectés à la station de mesure par RS-232;
- un PC pour la gestion à distance du système (modem GSM, radio ou câble RS-485);
- un ou plusieurs réflecteurs si les distances à mesurer sont supérieures à 100m.

Vitesse mesurable (en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994): Mouvements jusqu'à 13 m/mois (Classes 1-2-3-4).

Influence des conditions environnementales: Température, pression, précipitations, humidité, visibilité, lumière, vibrations.

Vulnérabilité: Chute de blocs, végétation, inondations et animaux.

Avantages/Inconvénients: nécessité de personnel expert, intervisibilité entre les points de mesure et installation de réflecteurs et/ou points de référence. Ces instruments sont en outre caractérisés par une bonne distance d'emploi, inférieure toutefois à 1 km, une absence d'ambiguïté en ce qui concerne les mesures, pas de phases de pré-traitement des données. On mesure toujours les trois composantes du déplacement.

Mesure: Toujours de type automatique avec liaison par câble à un système de saisie de données à distance installé en surface, avec enregistrement des données en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire.

SAR

Voir Rubrique 6.2.5 Interférométrie

6.2.4. Inclinométrie

Clinomètres

Méthode: Inclinométrie.

Domaine d'application: Surveillance des rotations de la verticalité superficielle.

Configuration et fonctionnement: Comme pour le tiltmètre, le clinomètre est composé d'un corps principal, où sont logés les capteurs, et d'un support qui permet la fixation de l'instrument au mur. Le corps principal est constitué d'un contenant en acier inoxydable de forme variée, à l'intérieur duquel peuvent être installés des capteurs tant du type servo-accélérométrique que magnéto-résistif, monoaxiaux ou biaxiaux. Le support de matériel métallique peut être principalement de deux types:

- à plateau, où la mesure est ponctuelle et se réfère au point d'ancrage;
- à bulle ou à barre, sur lesquels le clinomètre peut glisser ; il réalise alors des mesures liées à l'orientation du support.

Types de clinomètres classés par principe de fonctionnement:

- à plateau ;
- à barre.

Les clinomètres à plateau pourront être installés seulement sur des surfaces verticales.

Vitesse mesurable (en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994): mouvements jusqu'à 1,6 m/an (Classes 1-2-3).

Influence des conditions environnementales: Température et vibrations.

Vulnérabilité: Chute de blocs et inondations.

Avantages/Inconvénients: Par rapport aux tiltmètres l'instrument est fixé de manière permanente à la surface, il permet donc d'effectuer la surveillance seulement en ce point-là. Cet appareil est caractérisé par: opérations de mesure rapides, installation simple et aucune nécessité de personnel expert, mesure d'une ou deux composantes selon que le capteur est monoaxial ou biaxial.

Mesure: Le plus souvent automatique par capteur, avec possibilité de liaison par câble à un système de saisie de données à distance, installé en surface, avec enregistrement des données en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire.

Inclinomètres.

Méthode: Inclinométrie.

Domaine d'application: Surveillance des rotations de la verticalité profonde.

Configuration et fonctionnement: Les inclinomètres permettent de relever les déplacements, à l'intérieur de forages de sondage spécialement réalisés, selon une direction normale à l'axe du trou. L'instrumentation inclinométrique est essentiellement constituée de quatre éléments:

- le tube « guide », préalablement installé dans le terrain ou dans la roche, muni de quatre évidements grâce auxquels la sonde peut glisser à l'intérieur;
- la sonde, à l'intérieur de laquelle sont logés un ou deux capteurs d'inclinaison;
- le câble de liaison entre la sonde et la centrale de mesure;
- les appareils de mesure.

Les lectures s'effectuent en calant dans le tube la sonde inclinométrique, à l'intérieur de laquelle est présent un système à pendule qui indique la déviation par rapport à la verticale. D'après les valeurs de la pente on peut ensuite remonter à la direction et à la valeur du déplacement horizontal.

En disposant de mesures répétées dans le temps, il est possible d'évaluer le type de déplacement et de calculer la vitesse de mouvement. La précision et la fiabilité augmentent avec la diminution de l'intervalle de temps entre les différentes lectures effectuées.

Ces instruments peuvent être installés dans des forages orientées de manière différente par rapport au terrain naturel (de verticales à sous-horizontales) et équipés avec des capteurs amovibles ou fixes.

Types d'inclinomètres classés par principe de fonctionnement:

- inclinomètres à sonde amovible : permettent d'obtenir pour chaque session de mesure une déformée pour toute la longueur du tube;
- inclinomètres à sonde fixe : les capteurs sont positionnés définitivement à des niveaux préétablis et fournissent des mesures ponctuelles;
- SIA(Système Inclinométrique Automatisé): réunit les principales qualités des inclinomètres respectivement dotés d'une sonde amovible et fixe:
 - possibilité d'étudier de façon continue toute la verticale (le pas des mesures est de 0,5 m) ;
 - récupération possible de la sonde et des capteurs en cas de forte déformation du tube inclinométrique;
 - automatisation complète des mesures et télétransmission des données relevées..

Selon le principe de fonctionnement adopté les différents inclinomètres pourront:

- être installés exclusivement dans des forages verticaux (types à Sonde fixe et SIA).
- permettre des mesures continues le long de toute la verticale (types à sonde amovible et SIA) ou seulement à des niveaux préétablis (types à sonde fixe).
- avoir des temps d'exécution des mesures lents pour les appareils à contrôle manuel (types à sonde amovible) ou rapides pour les types automatiques (types à sonde fixe et SIA).

Vitesse mesurable (en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994): mouvements jusqu'à 16 mm/an (Classes 1 et 2).

Influence des conditions environnementales: Température, chimie des terrains et/ou des fluides et vibrations dans le cas des types à Sonde fixe et SIA.

Vulnérabilité: Chute de blocs et inondations.

Avantages/Inconvénients: installation complexe; nécessité de personnel expert et pré-traitement des données ; mesure des déplacements, selon deux composantes, obtenue par interprétation ; précision fonction de la profondeur.

Mesure: Manuelle pour les types à sonde amovible, automatique pour les types à sonde fixe et SIA. Pour ces derniers il y a la possibilité d'une liaison par câble à un système de saisie de données à distance installé en surface, avec enregistrement des données en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire; tandis que la vérification manuelle indépendante n'est pas possible.

Pendules

Méthode: Inclinométrie.

Domaine d'application: Surveillance des rotations de la verticalité profonde.

Configuration et fonctionnement: Les pendules permettent d'obtenir des mesures de haute précision des mouvements dans le plan vertical de massifs rocheux ou de structures en général (digues en béton, tours, édifices, etc.). Ils sont mis en place dans un forage réalisé dans les structures ou la roche, ou bien installés à l'intérieur d'un tube en acier fixé directement à la structure.

Les systèmes à pendule mesurent les déplacements sur le plan horizontal par rapport à un système d'axes dont le repère est un câble vertical auquel est accroché une masse. Le point d'ancrage du câble peut être localisé au-dessus de la masse oscillante (pendules directs) ou au-dessous (pendules inversés). Dans les deux systèmes, la masse du pendule est plongée dans un bac contenant une huile minérale, afin d'atténuer les vibrations du câble de liaison. Fondamentalement, les deux systèmes se différencient uniquement par leurs possibilités d'application : le pendule inversé peut être installé dans toutes les situations, tandis que le pendule direct est limité aux cas dans lesquels la partie inférieure de l'instrumentation est accessible, c'est-à-dire qu'il exclut les mesures relatives au mouvement du terrain de fondation par rapport à une structure.

Types de pendules classés par principe de fonctionnement:

- direct ;
- direct automatisé ;
- inversé ;
- inversé automatisé.

Selon le principe de fonctionnement adopté les différents pendules pourront avoir des temps d'exécution des mesures lents (appareils à contrôle manuel) ou rapides (types automatiques).

Vitesse du glissement de terrain (Cruden & Varnes, 1994) mesurable et/ou en fonction de laquelle l'instrument peut être installé: mouvements jusqu'à 16 mm/an (Classes 1 et 2).

Influence des conditions environnementales: Température et vibrations.

Vulnérabilité: Inondations.

Avantages/Inconvénients: installation complexe et seulement dans des forages verticaux de diamètre augmenté; nécessité de personnel expert; temps d'exécution des mesures lents pour les appareils à contrôle manuel et rapides pour les types automatiques. Dans tous les types

instruments, la mesure des déplacements (selon deux composantes) est directe et obtenue par points discrets : pas de mesures en continu le long de toute la verticale (des capteurs sont positionnés à des niveaux préétablis) ; la mesure n'est pas fonction de la profondeur.

Mesure: Manuelle et/ou automatique selon l'appareil installé, s'il s'agit d'un simple coordinomètre ou d'un télécoordinomètre. Pour ce second cas, possibilité de liaison par câble à un système de saisie de données à distance installé en surface, avec enregistrement des données en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire; la vérification manuelle indépendante est également possible avec le simple coordinomètre.

Tiltmètres

Méthode: Inclinométrie.

Domaine d'application: Surveillance des rotations de la verticalité superficielle.

Configuration et fonctionnement: Cette catégorie d'instruments permet de mesurer les variations d'inclinaison de surfaces tant verticales qu'horizontales. Le corps principal du tiltmètre est constitué d'un boîtier en acier inoxydable à l'intérieur duquel est monté un capteur de type servo-accélérométrique monoaxial (unique type de principe de fonctionnement et capteur). Une plaque de mesure (ou de vérification) rend solidaire le tiltmètre des surfaces à étudier : c'est un simple plat de métal (acier, bronze, etc.) fixé aux structures avec des tasseaux. L'instrument peut être accroché à la plaque par une des trois des faces du boîtier, selon l'orientation des surfaces d'application.

Vitesse mesurable (en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994): mouvements jusqu'à 1,6 m/an (Classes 1-2-3).

Influence des conditions environnementales: Vibrations.

Vulnérabilité: Chute de blocs.

Avantages/Inconvénients: mesures exclusivement manuelles mais rapides ; possibilité d'installation des surfaces verticales ou horizontales ; possibilité de surveiller plusieurs points de mesure (plaques de vérification) avec un seul tiltmètre ; installation simple et aucune nécessité de personnel expert ; mesure de deux composantes.

Mesure: Manuelle au moyen de liaison électrique du tiltmètre à une centrale de lecture spécifique.

Systèmes extensométriques-inclinométriques (TRIVEC)

Voir rubrique 6.2.2 Extensométrie.

Systèmes multiparamétriques (DMS)

Voir rubrique 6.2.2 Extensométrie.

6.2.5. Interférométrie

SAR

Méthode: Interférométrie-Radar-Topographie - Géodésie.

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Configuration et fonctionnement: Il existe principalement deux techniques, une qui exploite les satellites artificiels (PSInSAR), l'autre basée sur des applications au sol (Ground Based SAR).

Dans **la technique PSInSAR** il n'existe pas d'instrument à proprement parler, ce sont les satellites de l'ESA qui sont exploités. Il s'agit de traiter, au moyen de logiciels et de procédures brevetés, des images radar fournies par l'ESA moyennant paiement, avec production de cartographies représentant la vitesse de déplacement annuelle des diffuseurs permanents (PS) présents dans la zone examinée et de diagrammes temporels du déplacement de chaque PS dans la période examinée. L'application de cette méthode est conditionnée par la disponibilité des données, acquises par les satellites ERS1 et ERS2 de l'ESA de 1992 à décembre 2000, puis par

le satellite ENVISAT, lancé le 1^{er} mars 2002 mais effectivement opérationnel depuis peu de temps seulement.

La **technique *Ground Based SAR*** utilise quant à elle un matériel particulier, formé d'un couple d'antennes de réception/transmission reliées entre elles, déplacé le long d'un rail installé de manière permanente (dans le cas de mesures discontinues répétées) ou temporaire (contrôles continus sur des périodes limitées). Dans le cas de contrôles continus temporaires, qui n'exigent donc pas d'occuper de nouveau le poste de mesure, on peut utiliser des appareils montés sur un véhicule mobile. Ce prototype d'instrument, qui n'est pas encore commercialisé, peut être utilisé en mode discontinu (suivi périodique) ou continu (suivi continu).

Les temps d'exécution des mesures sont longs pour les stations amovibles.

Vitesse mesurable (en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994): Mouvements jusqu'à 16 mm/an (Classes 1 et 2) pour le *PSInSAR*. Jusqu'à 13 m/mois (Classes 1-2-3-4) pour le *Ground Based SAR*.

Influence des conditions environnementales: Pression, précipitations, humidité. Pour le *Ground Based SAR* également vibrations et température.

Vulnérabilité: Seulement pour le *Ground Based SAR* en mode continu: chute de blocs, animaux et inondations.

Avantages/Inconvénients: nécessité de personnel expert ; nécessité d'intervisibilité entre les points de mesure et parfois d'installation de réflecteurs ; distance d'emploi particulièrement élevée, plus d'un km ; ambiguïté des mesures, densité de points mesurables non prévisible ; phases de pré-traitement de données complexes ; mesure de la déformation uniquement le long de la direction de LOS (*Line Of Sight*, direction reliant le capteur à la cible).

Mesure: Toujours de type automatique mais avec la possibilité de transmission des données et/ou contrôle à distance seulement pour *Ground Based SAR*.

6.2.6. Laser

Laser Scan (Terrestrial Scanner Laser, TSL)

Méthode: Laser-Topographie - Géodésie.

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Configuration et fonctionnement: Cette technique est actuellement la plus prometteuse pour l'exécution de levés topographiques rapides et précis, sans avoir à accéder aux zones à lever. La technique peut être appliquée aussi bien depuis le sol que par avion ou hélicoptère.

Le scanner laser peut être comparé à une station totale motorisée, capable de relever automatiquement un nombre de points très élevé sans qu'il soit nécessaire de positionner au préalable des prismes réflecteurs sur la surface à étudier.

Le principe fondamental sur lequel se base la technologie « scanner laser » est le calcul du temps de parcours (*time-of-flight*) d'une impulsion laser générée par un émetteur, réfléchi par la surface frappée et captée par le récepteur installé à bord de l'instrument. Ce temps de parcours aller-retour, permet de déterminer la distance entre l'instrument et le point levé.

L'instrument effectue un balayage extrêmement rapide de la surface levée, en permettant d'en reconstruire un modèle numérique tridimensionnel constitué de points définis au moyen de quatre paramètres : x, y, z (coordonnées du point) et k, « coefficient de réflectivité » lié à la quantité d'énergie restituée par la surface frappée. Ce paramètre permet de distinguer des matériaux différents ou, si les matériaux sont comparables, de définir l'état de conservation ou d'altération de la surface levée. L'intensité de réponse est affichée par une échelle chromatique à laquelle est associée la valeur numérique relative au signal reçu, qui dépend de nombreuses variables, parmi lesquelles:

- Lithologie du matériau;
- Etat de la surface (porosité, degré de fracturation, consistance, etc.) ;
- Humidité superficielle ;

- Orientation du scanner.

Dans la pratique le scanner laser fournit une « quasi photographie » numérique tridimensionnelle.
Vitesse mesurable (en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994): Mouvements jusqu'à 1,8 m/heure (Classes 1-2-3-4-5).

Influence des conditions environnementales: Température, pression, précipitations, humidité, visibilité, lumière, vibrations.

Vulnérabilité: Aucune sauf les événements susceptibles de porter atteinte à la sécurité des opérateurs

Avantages/Inconvénients: Ne nécessite pas de personnel expert ni d'installation de réflecteurs et/ou points de repère ; par contre nécessité d'intervisibilité entre les points de mesure ; distance d'utilisation élevée, au maximum 1 km ; aucune ambiguïté des mesures, mais phases de pré-traitement des données. On mesure toujours les trois composantes du déplacement.

Mesure: Toujours de type manuel par l'intermédiaire d'un seul opérateur.

6.2.7. Météorologie

Anémomètres et mesureurs de direction du vent

Méthode: Météorologie.

Domaine d'application: Surveillance de la vitesse et de la direction du vent.

Configuration et fonctionnement: L'appareil est constitué d'un unique élément en aluminium anodisé et acier inoxydable. La *vitesse* est mesurée au moyen d'un anémomètre à 3 coupes monté sur 2 roulements à bille en acier inoxydable. La vitesse de rotation est relevée au moyen d'un capteur à effet Hall. La *direction* du vent est mesurée avec un système à girouette à sortie potentiométrique, (angles comptés dans le sens horaire).

Influence des conditions environnementales: Aucune.

Nivomètres

Méthode: Météorologie.

Domaine d'application: Surveillance des hauteurs de neige.

Configuration et fonctionnement: Le capteur, constitué d'un mesureur de niveau à ultrasons, est contenu généralement dans un corps en aluminium anodisé. Le fonctionnement est basé sur le système de mesure télémétrique (compensé en température), qui exploite le principe de la réflexion d'impulsions d'ondes ultrasonores.

Influence des conditions environnementales: Température.

Vulnérabilité: Chute de blocs, végétation, inondations.

Nivomètre à rayonnement cosmique (nrc)

Méthode: Météorologie.

Domaine d'application: Surveillance des hauteurs de neige et équivalence eau de la hauteur de neige.

Configuration et fonctionnement: ce capteur, installé en déport sur un bras de fixation, a une gamme de mesure de 0 à 6 m, avec une résolution de l'ordre du cm, une précision supérieure à 0,2 % de la pleine échelle et une erreur sur la dérive thermique inférieure à 0,2 %, sur une plage de température de - 40°C à + 60°C (pour une couche d'air homogène). En l'associant à un capteur de pression atmosphérique et un capteur de température on peut estimer l'équivalence eau de la hauteur de neige.

Influence des conditions environnementales: Aucune.

Vulnérabilité: Chute de blocs, végétation, inondations.

Pluviomètres

Méthode: Météorologie.

Domaine d'application: Surveillance des hauteurs de précipitations.

Configuration et fonctionnement: Le pluviomètre est constitué d'un corps en acier et aluminium ou en matière plastique, subdivisé en deux parties : le cône collecteur et le mécanisme de mesure. Le principe de fonctionnement est à bac basculant (balancier). Le pluviomètre peut être doté d'une résistance reliée à un thermostat réglé automatiquement par une sonde de température, pour faire fondre la neige.

Influence des conditions environnementales: Température, précipitations, vent.

Vulnérabilité: Chute de blocs, végétation, inondations.

Thermomètres

Méthode: Météorologie.

Domaine d'application: Surveillance des températures.

Configuration et fonctionnement: L'instrument permet de relever les variations thermiques par la mesure des variations de tension ou de courant. On utilise généralement une thermorésistance (PT100), composée d'un cylindre en acier à l'intérieur duquel est insérée une résistance au platine variable en fonction de la température. On peut aussi utiliser un capteur constitué par un thermocouple.

La mesure de la température permet de corriger les paramètres sensibles aux variations thermiques et d'évaluer la position de l'isotherme zéro degré.

Influence des conditions environnementales: Aucune.

Vulnérabilité: Chute de blocs, végétation, inondations.

Thermo-hygromètres

Méthode: Météorologie.

Domaine d'application: Surveillance des températures et de l'humidité.

Configuration et fonctionnement: Le thermo-hygromètre a un corps en matière plastique et est doté d'un écran de protection anti radiation pour permettre d'effectuer des mesures de température et d'humidité non influencées par les radiations solaires. L'élément thermosensible est constitué d'une thermorésistance PT100, tandis que l'élément hygrosensible est du type à film conductimétrique.

Influence des conditions environnementales: Aucune.

Vulnérabilité: Chute de blocs, végétation, inondations.

6.2.8. Photogrammétrie

Chambres photogrammétriques

Méthode: Photogrammétrie.

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Configuration et fonctionnement: Seules les propriétés générales de la méthode photogrammétrique sont abordées ici, car les caractéristiques de ce système de mesure dépendent plus de l'application de la méthode que des chambres photogrammétriques utilisées (analogiques ou numériques) ; on renvoie donc aux brochures des produits présents dans le commerce.

Vitesse du glissement de terrain (Cruden & Varnes, 1994) mesurable et/ou en fonction de laquelle l'instrument peut être installé: mouvements jusqu'à 1,6 m/an (Classes 1-2-3).

Influence des conditions environnementales: Visibilité, lumière.

Vulnérabilité: Aucune sauf les événements qui peuvent compromettre la sécurité des opérateurs.

Avantages/Inconvénients: nécessité de personnel expert, temps d'exécution des mesures longs, nécessité d'intervisibilité entre les points de mesure et d'installation de références ; distance d'utilisation élevée, inférieure toutefois à 1 km, aucune ambiguïté des mesures mais nécessité de phases de pré-traitement des données.

Mesure: Toujours de type manuel par un ou plusieurs opérateurs spécialisés pour les niveaux, les théodolites, les stations totales. Automatiques pour les théodolites motorisés, avec liaison par câble à un système de saisie de données à distance installé en surface, avec enregistrement des données en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire.

6.2.9. Piézométrie

Piézomètres à circuit ouvert

Méthode: Piézométrie.

Domaine d'application: Surveillance des niveaux piézométriques.

Configuration et fonctionnement: Ces instruments consistent en général en un élément poreux creux (tube microfissuré ou une cellule filtrante), entouré d'une enveloppe de matériau filtrant, installé dans un forage (terrain meuble ou rocheux) à la profondeur souhaitée. L'eau traverse la couche perméable artificielle, pénètre dans la cellule et remonte dans des tuyaux raccordés à l'unité filtrante. Lorsque le niveau remonté le long de tuyauteries raccordées à l'unité filtrante s'est stabilisé, on peut effectuer la mesure du niveau de la nappe. On peut mesurer la pression interstitielle d'un niveau donné, si le piézomètre est isolé du reste du forage (Piézomètre Casagrande). Les mesures sont effectuées au moyen de phréatimètres, systèmes acoustiques ou transducteurs de niveau insérés dans la canalisation, mais détachés de l'élément filtrant. Ces instruments sont également appelés piézomètres hydrauliques, car ils permettent à l'eau de remonter vers la surface à travers un système de canalisations.

Types de piézomètres classés par principe de fonctionnement:

- Tube ouvert ;
- Tube ouvert automatisé ;
- Casagrande ;
- Casagrande automatisé ;
- Casagrande de forage ;
- Casagrande de forage automatisé.

Selon le principe de fonctionnement adopté les différents piézomètres pourront être:

- adaptés seulement à des terrains perméables (types à tube ouvert) ou également imperméables (types Casagrande et de forage).
- Inadaptés aux sols hétérogènes et massifs rocheux fracturés (types de forage, à installer seulement dans des terrains tendres, mais également par pénétrométrie).
- caractérisés par un temps de réponse bref (types Casagrande) ou long (types à tube ouvert).
- capables de distinguer plusieurs nappes (types Casagrande) ou non (types à tube ouvert)
- exposés à des phénomènes de cavitation (types de forage).

Vitesse mesurable (en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994): mouvements jusqu'à 16 mm/an (Classes 1 et 2).

Influence des conditions environnementales: Pression, précipitations, chimie des terrains et/ou des fluides.

Vulnérabilité: Chute de blocs et inondations.

Avantages/Inconvénients: installation simple; aucune nécessité de personnel expert; rapidité d'exécution des mesures, surtout pour les types automatiques, qui prévoient toujours la possibilité d'effectuer la vérification manuelle indépendante (phréatimètre). Possibilité d'effectuer des tests de perméabilité, l'installation ne requiert pas de forages de sondage augmentés et les mesures ne nécessitent pas de pré-traitements. Pour les types automatisés, plusieurs transducteurs de niveau peuvent être installés dans un forage unique (plusieurs points de mesure à des niveaux différents du terrain naturel).

Mesure: manuelle ou automatique, selon de la présence ou non de transducteurs ; si automatique, possibilité de liaison par câble à un système de saisie de données à distance installé en surface,

avec enregistrement des données en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire.

Piézomètres à circuit fermé

Méthode: Piézométrie.

Domaine d'application: Surveillance des niveaux piézométriques et pressions neutres.

Configuration et fonctionnement: Ces instruments nécessitent de forages de sondage pour leur installation. L'eau, après avoir traversé une couche perméable artificielle, entre dans l'instrument à la profondeur voulue par une cellule piézométrique, sans pouvoir remonter vers le terrain naturel. Dans la cellule piézométrique à fonctionnement électrique, électropneumatique ou pneumatique, est incorporée une caméra miniaturisée étanche à l'eau ; l'eau agit sur un diaphragme en le déformant proportionnellement à la pression qu'elle exerce sur lui (transducteur de pression absolu). Cette configuration de l'instrument permet d'isoler l'unité filtrante, et d'obtenir ainsi une plus grande sensibilité, un temps de réponse moindre aux variations de pression sur le pourtour et la mesure de niveaux piézométriques même au-dessus du niveau auquel s'effectue la lecture.

Types de piézomètres classés par principe de fonctionnement:

- Casagrande fermé ;
- Pneumatique ;
- Electropneumatique ;
- Electrique ;
- électrique de forage ;
- multipoints.

Selon le principe de fonctionnement adopté les différents piézomètres pourront être:

- inadaptés aux terrains incohérents ou massifs rocheux fracturés (types de forage et mutipoints) ;
- à installer seulement dans des terrains tendres, mais également par pénétrométrie (types de forage) ;
- sujets à des phénomènes de cavitation (types de forage) ;
- empêchés dans le déroulement de tests de perméabilité (types électriques, électropneumatiques) ;
- permettre la récupération des transducteurs pour maintenance ou réutilisation (types Casagrande, pneumatiques et multipoints) ou non (types électriques, électropneumatiques et de forage).

Vitesse mesurable (en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994): mouvements jusqu'à 16 mm/an (Classes 1 et 2).

Influence des conditions environnementales: Pression, précipitations et chimique des terrains et/ou des fluides.

Vulnérabilité: Chute de blocs et inondations.

Avantages/Inconvénients: installation simple (à part le type Casagrande fermé); aucune nécessité de personnel expert; rapidité d'exécution des mesures, surtout dans les types automatiques, qui parfois prévoient la possibilité d'effectuer la vérification manuelle indépendante avec le phréatimètre, sauf les piézomètres électriques et électropneumatiques. Ces derniers peuvent être installés également sous des fondations. En outre tous les piézomètres à circuit fermé:

- sont adaptés à des terrains de perméables à imperméables ;
- sont tous hautement sélectifs par rapport à des nappes différentes ;
- ont tous des temps de réponse brefs ;
- permettent d'effectuer des tests de perméabilité ;
- ne requièrent pas de forages de sondage augmentés pour l'installation (sauf le type multipoints) ;
- ne nécessitent pas de pré-traitement des mesures ;

- sont tous automatisés ou automatisables et dans un forage de sondage unique peuvent être installés plusieurs transducteurs de niveau (plusieurs points de mesure à des niveaux différents du terrain naturel).

Mesure: Le plus souvent automatique par transducteur (sauf le Casagrande fermé et le Pneumatique, en tout cas automatisables), avec possibilité de liaison par câble à un système de saisie de données à distance installé en surface, avec enregistrement des données en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire.

Systèmes multiparamétriques (DMS)

Voir Rubrique 6.2.2 Extensométrie

6.2.10. Pressiométrie

Cellules de pression

Méthode: Pressométrie.

Domaine d'application: Surveillance des pressions totales.

Configuration et fonctionnement: Ces instruments sont constitués d'un plateau mince de forme variée enfoui dans le sol. La pression normale exercée par le terrain sur le corps de la cellule est relevée avec diverses méthodes, la plus commune consistant à remplir la cellule de mesure avec un fluide désaéré, puis mesurer la pression du fluide avec un transducteur de pression semblable à celui utilisé pour la mesure des pressions intersticielles.

Types de cellules de pression différents par principe de fonctionnement:

- Hydrauliques ;
- hydrauliques automatisées ;
- à membrane souple automatisée.

Selon le principe de fonctionnement adopté les diverses cellules de pression pourront être:

- à ne pas installer dans le béton (types à membrane souple).
- sujettes à de fréquentes opérations de repressurisation du capteur (types hydrauliques).

Vitesse mesurable (en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994): mouvements jusqu'à 16 mm/an (Classes 1 et 2).

Influence des conditions environnementales: Pression, température, vibrations et chimie des terrains et/ou des fluides.

Vulnérabilité: Chute de blocs et inondations.

Avantages/Inconvénients: installation simple; aucune nécessité de personnel expert; rapidité d'exécution des mesures, surtout pour les types automatiques.

Mesure: Le plus souvent automatique par transducteur (sauf le type hydraulique, qui est en tout cas automatisable), avec possibilité de liaison par câble à un système de saisie de données à distance installé en surface, avec enregistrement des données en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire.

Cellules de charge

Méthode: Pressométrie.

Domaine d'application: Surveillance des forces ou charges.

Configuration et fonctionnement: Utilisées pour mesurer les forces ou les charges transmises par le terrain à une structure. En cas de problèmes de stabilité des pentes, elles sont installées sur les ouvrages de soutènement ; elles permettent en particulier de mesurer la tension des tirants en phase de tension et d'exploitation. Les cellules de charge sont constituées d'un corps d'acier massif instrumenté avec des extensomètres ou des capteurs à corde vibrante. On mesure la déformation du corps de la cellule pour remonter à la charge agissante. Dans ce but on peut également utiliser des cellules hydrauliques, qui adoptent le même principe de fonctionnement que les cellules de pression totale. Il existe deux typologies de cellules de charge toroïdales: électriques et hydrauliques.

Types de cellules de charge différentes par principe de fonctionnement:

- hydraulique;
- hydraulique automatisée;
- électrique.

Selon le principe de fonctionnement adopté les diverses cellules de charge pourront:

- ne pas être récupérables (types électriques).
- ne pas autoriser la compensation des charges excentriques (types hydrauliques).

Vitesse mesurable (en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994): mouvements jusqu'à 16 mm/an (Classes 1 et 2).

Influence des conditions environnementales: Température et vibrations.

Vulnérabilité: Chute de blocs et inondations.

Avantages/Inconvénients: installation simple; aucune nécessité de personnel expert; rapidité dans l'exécution des mesures, surtout dans les types automatiques.

Mesure: Le plus souvent automatique par le biais de transducteur (sauf le type hydraulique, qui en tout cas est automatisable), avec la possibilité de liaison par câble à un système de saisie de données à distance installé en surface, avec enregistrement des données en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire.

6.2.11. Radar :

RADAR sol ULB UWBR Ultra Wide Band Radar

Méthode: Radar-ULB

Domaines d'application:

1. Mesure de distances radiales sur réflecteur ;
2. Mesure des déformations superficielles par décorrélation spectrale ;
3. Télédétection de chute de blocs rocheux.

Configuration et fonctionnement:

Un radar ULB (Ultra-Large-Bande) est un radar doté d'une architecture permettant une très grande largeur de bande d'émission (plus de 30% de la fréquence centrale). Contrairement aux systèmes classiques qui mesurent les échos à une seule longueur d'onde, un radar ULB extrait une information spectrale dense. A l'heure actuelle, il n'existe qu'un instrument opérationnel de ce type, un monotype qui a été conçu et développé spécifiquement pour assurer des mesures de suivi continues et tout-temps sur le site de Séchilienne en France. Il fonctionne dans la bande 18-26 GHz et est installé dans un local à 1200 m du glissement, sur le versant opposé. Il fonctionne en continu depuis janvier 2000.

1. Le mode de fonctionnement de base est la mesure précise de distance radiale sur des marqueurs (trièdres de 35 cm) disposés sur le site : cadence horaire, précision 0.2 mm avec compensation des effets atmosphériques. Les traitements ULB permettent de s'affranchir des ambiguïtés de phase (problème souvent rencontré en phasimétrie). Cette précision est liée au caractère ULB de l'instrument, associé à des traitements spécifiques et à la compensation des effets atmosphériques en utilisant des mesures sur des points fixes. En mode différentiel, (mesure de l'écart de deux réflecteurs proches disposés de part et d'autre d'une faille), la précision peut être améliorée d'un facteur 5.
2. Un autre mode de fonctionnement consiste à exploiter les capacités ULB de l'appareil pour analyser des séquences de réponses spectrales d'une zone de sol nu, et en extraire une mesure statistique des mouvements des éléments rétrodiffusants par des traitements de corrélation dans le domaine spectral. (cette technique diffère des mesures de corrélation faites sur les images SAR dans le domaine spatial). Cette méthode très sensible permet d'observer et de quantifier différents types de modifications de la surface : changements brusques (disparition ou empreinte de chute de blocs), ou lents (déformations régulières de masses boueuses).

3. Une configuration en mode Doppler permet la détection de mouvements dans une zone éclairée : des tests on mis en évidence la détection en quelques secondes de chute de blocs rocheux de 250 kg à 1200m de distance. Cette possibilité permet par exemple la gestion de feux rouges pour protéger une route exposée au pied d'une falaise.

Vitesse mesurable (en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994): Mouvements jusqu'à 5 m/s (Classes 1-2-3-4-5-6-7).

Influence des conditions environnementales: atmosphériques (pression, température, humidité, givrage sur les marqueurs) pour les mesures de distance, présence de végétation pour les mesures de déformation sur sol nu, présence d'objets mobiles (ex : voitures) dans le champ pour la détection de chute de blocs.

Vulnérabilité: chute de blocs, animaux et inondations, foudre.

Avantages/Inconvénients: Moyen tout temps ;. Nécessité de marqueurs passifs sur le site ; Mesure de distance non ambiguë ; Grande sensibilité pour les mesures des déformations de surface sur sol nu ; Caractère multifonction

Mesure: Toujours de type automatique mais avec la possibilité de transmission des données et/ou contrôle à distance.

6.2.12. Réflexométrie

TDR

Méthode: Réflexométrie.

Domaine d'application: Surveillance des déformations profondes.

Configuration et fonctionnement: Cette technologie a été développée à l'origine pour relever les interruptions et les défauts le long de lignes de communication ou de transmission des signaux électriques. Le principe de fonctionnement du système TDR est semblable à celui du radar. Il se base sur la transmission d'une impulsion électrique à l'intérieur d'un câble: quand l'impulsion rencontre une rupture ou une déformation du câble elle est réfléchi. À partir de l'analyse des polarités, de l'ampleur et de la fréquence de l'impulsion réfléchi il est possible de localiser la position de la discontinuité avec une précision élevée. Dans le domaine de la géotechnique, cette technique de mesure est employée depuis quelques années dans la surveillance de la stabilité des pentes. Elle consiste à poser un câble coaxial à l'intérieur de forages verticaux instrumentés ou non. Le système TDR peut être en effet couplé à d'autres instruments: inclinomètres, extensomètres, tiltmètres, piézomètres. En présence de déformations du terrain, le câble se déforme et avec la centrale de mesure il est possible d'identifier le niveau auquel est présente la discontinuité.

Le câble utilisé pour la réalisation des verticales TDR est coaxial du type RG 59/U avec un diamètre externe de 10 millimètres.

Vitesse mesurable (en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994): mouvements jusqu'à 1,6 m/an (Classes 1-2-3).

Influence des conditions environnementales: Température, chimie des terrains/fluides, interférences électromagnétiques.

Vulnérabilité: Inondations.

Avantages/Inconvénients: installation simple; aucune nécessité de personnel expert; temps d'exécution des mesures rapides;

- installation possible soit dans des trous de sondage, instrumentés et non, soit au moyen des appareils pénétrométriques classiques ;
- aucune limite sur la profondeur d'installation dans le trou; la mesure est indépendante de la longueur du câble (jusqu'à 15 km) ;
- adéquation pour les installations difficiles, comme dans des perforations inclinées par rapport à l'horizontale ou isolant les contrôles sous des masses en mouvement ;

- détermination immédiate de la profondeur des déformations; il n'est pas nécessaire de disposer de logiciels supplémentaires pour traiter les données.

Par contre, le système fournit seulement des informations sur les profondeurs auxquelles les déformations se vérifient, sans possibilité de remonter à l'étendue et à la direction des mouvements. Il faut pour cela associer au système TDR d'autres instruments (tiltmètres, inclinomètres)..

Mesure: Mesure manuelle au moyen d'une centrale de lecture portative ou automatisée avec une liaison par câble à un système de saisie de données à distance installé en surface, et enregistrement des données en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire.

6.2.13. Vidéogrammétrie

Camera vidéo numérique

Méthode: Vidéogrammétrie

Domaine d'application: Surveillance des déformations superficielles.

Configuration et fonctionnement: Seules les caractéristiques générales sont abordées ici ; pour leurs caractéristiques techniques, voir les brochures des produits du commerce.

La qualité des images acquises à l'aide d'une caméra numérique dépend principalement des caractéristiques des éléments qui la compose : capteur CCD (*Charge Coupled Device*) / diaphragme / obturateur / optique à géométrie conique.

- Le capteur CCD est caractérisé par la taille de sa matrice et de ses pixels (*Picture Element*). Il peut ajuster sa sensibilité directement en fonction des conditions extérieures (*50 à 800 équivalent ISO*). Une augmentation de la sensibilité (gain) peut provoquer une augmentation sensible du bruit.
- Des optiques plus courantes, moins performantes que celles utilisées en photogrammétrie, peuvent être employées en saisie numérique car les défauts sont modélisables par le calcul.
- La technique de saisie des couleurs est associée à la technologie des capteurs. Le système de représentation RVB (*RGB en anglais*) est le plus utilisé. La couleur est alors associée à un triplet. A chaque pixel correspond une seule des trois valeurs R, V ou B (sous-échantillonnage). Des technologies type Super CCD ou tri-CCD offrent de meilleures performances en terme d'échantillonnage, de rapidité de traitement des images et de rapport signal/bruit.
- Pour la mise en évidence de détails présentant un faible contraste, un rapport signal/bruit élevé est nécessaire. Le type de conversion (*codage sur 8 bits pour une caméra numérique courante*) est aussi prépondérant pour la restitution des niveaux de gris et l'obtention d'une meilleure dynamique de l'image.
- La qualité de l'exploitation des images dépend également de leur netteté et de leur affichage.

Le traitement d'images vidéo numériques nécessite leur compression et leur décompression, à l'aide d'un Codec (*COmpression DECompression*) pouvant causer des dégradations (*formats MPEG ou MJPEG*).

La plupart des caméras enregistrent au format Digital Vidéo (*DV*), associé au format de compression MJPEG.

Types de systèmes vidéogramétriques classés par principe de fonctionnement:

L'exploitation d'images vidéo numériques permet d'en extraire des informations de type 2D ou 3D directes (déplacements), en temps réel ou en temps différé.

- Déplacements 2D : la précision relative est exprimable par rapport au pixel (1/100 par exemple) ou par rapport au champ d'observation (1/10 000 par exemple) . Les mesures sont effectuées dans un plan de déformation (celui de l'image). Si la vitesse d'acquisition

est suffisante, la mise en évidence de vibrations est possible (sur un pont en charge par exemple).

- Déplacements 3D : Plusieurs points de vue sont nécessaires. Un grand nombre de marqueurs naturels sont utilisables, s'ils sont suffisamment contrastés. Sinon, des marqueurs artificiels simples type cibles planes conviennent. Une précision de mesure relative de l'ordre de 2 à 5 mm semble accessible à une distance de l'ordre de 300 à 500 m. La précision obtenue est nettement meilleure à plus faible distance, avec des phénomènes de réfraction moins pénalisants.
- Numérisation de surfaces : Plusieurs points de vue sont nécessaires. La restitution en 3D permet d'obtenir des modèles surfaciques pouvant faire ensuite l'objet de traitements comparatifs (déformations surfaciques, volumétrie..).

Vitesse mesurable (en fonction de laquelle l'instrument peut être installé (Cruden & Varnes, 1994):: Mouvements jusqu'à 5 m/seconde (Classes 1-2-3-4-5-6-7). Les vitesses mesurables sont fonction de la capacité de l'enregistrement des mesures (typiquement 20 images par seconde).

Influence des conditions environnementales: réfraction atmosphérique, position du soleil, visibilité optique, instabilité des supports..

Vulnérabilité: chute de blocs, végétation, absence de protection contre les intempéries ou agressions...

Avantages/Inconvénients: Mesures sans contact de type 2D ou 3D ; Suivi de déplacements rapides ; très bonne précision relative à courte et moyenne distance ; Adaptation à la télésurveillance. Limites liées à la qualité de l'air du point de vue visibilité et réfraction ; Personnel expert requis ; Inter visibilité optique requise entre le capteur et la scène.

Mesure: De type manuel ou automatique, avec liaison par câble à un système de saisie de données à distance, placé en surface, avec enregistrement des données en mémoire ou transmission par satellite, câble, modem, radio, téléphone cellulaire. La transmission des images requiert une liaison à haut débit, alors que la transmission des résultats sous une forme textuelle est très rapide.

7. EXPLOITATION

7.1. Consignes d'exploitation

D'une manière générale, toute action de "surveillance" doit être accompagnée de la définition de consignes d'exploitation. Celles-ci sont très réduites dans le cas de la mise en observation, elles sont par contre essentielles pour la surveillance. Il convient de distinguer deux niveaux de consignes d'exploitations :

- Consignes d'exploitation destinées au service mettant en œuvre l'action de "surveillance" : elle définissent les différentes procédures qui doivent être mises en application dans les différents types de situations susceptibles de se produire du fait de l'évolution du site ou de circonstances extérieures agissant sur le dispositif de "surveillance" ;
- Consignes d'exploitation destinées au service responsable de la sécurité et de la gestion du risque naturel : elles sont, au moins pour l'essentiel, prises en compte dans le plan de secours. Certaines dispositions qu'il n'y a pas lieu de répercuter dans le plan de secours, font l'objet de consignes d'exploitation. C'est le cas en particulier lorsqu'il n'y a pas de plan de secours.

7.2. Procédures d'auto adaptation

Le dispositif de surveillance et son fonctionnement doivent pouvoir être modifiés et adaptés en fonction de l'évolution du site et de circonstances extérieures. Ces modifications peuvent porter sur :

- La fréquence des mesures ;
- La répartition spatiale des capteurs ou des points de mesure ;
- La configuration des cycles d'acquisition ;
- La fréquence du transfert des fichiers de données ;
- La modification des seuils d'alerte ;
- La nature des traitements effectués ;
- ...

La nature et les modalités de ces adaptations doivent faire l'objet d'une analyse détaillée préalable et d'une actualisation. Celles-ci doivent permettre d'identifier un certain nombre de procédures susceptibles d'être mises en œuvre par auto adaptation du système, dans des situations correspondant à des scénarios identifiés.

7.3. Procédures de diagnostic

Il s'agit de mettre en œuvre des modèles d'interprétation et de fournir les informations interprétées permettant une évaluation de la situation par le spécialiste responsable :

- Les variables cinématiques caractéristiques significatives (vitesses, accélérations des déplacements et des déformations en particulier) ;
- Leur répartition spatiale ;
- L'amplitude et la répartition des déplacements cumulés ;
- L'état et l'évolution des conditions aux limites ;
- L'état et l'évolution des variables de commande.

Les procédures de diagnostic sont déclenchées soit de manière automatique à partir de la définition de seuils d'alerte, soit à l'initiative du responsable de l'exploitation du système. En tout état de cause les éléments issus de ces procédures doivent faire l'objet d'une interprétation donnant lieu à une évaluation prévisionnelle de la situation.

7.4. Gestion des alertes

Il convient de distinguer deux types d'alertes et pour chaque type plusieurs niveaux :

Les alertes techniques : celles ci concernent l'état et le fonctionnement du dispositif de "surveillance" et identifient une situation de dysfonctionnement ou un besoin de maintenance préventive à court terme :

Niveau 1 : perte de capacité du dispositif ne mettant pas en cause ses fonctions principales mais nécessitant une intervention de maintenance préventive

Niveau 2 : dysfonctionnement limité entraînant une perte partielle d'information. Intervention nécessaire à court terme

Niveau 3 : défaillance majeure nécessitant une intervention d'urgence.

Les alertes opérationnelles : celles ci correspondent au dépassement des seuils fixés pour les variables d'alerte du système. Elles correspondent à un (ou plusieurs) scénario d'aggravation possible du risque. Les alertes opérationnelles sont également réparties en trois niveaux :

Niveau 1 : ce niveau correspond à un état préparatoire. Il entraîne l'application d'une procédure de vigilance répertoriée dans les consignes d'exploitation et une procédure

d'auto adaptation et contrôle du système. Ce stade correspond à une préalerte des services techniques gestionnaires.

Niveau 2 : ce niveau correspond à une aggravation de la situation détectée antérieurement par une alerte de niveau 1. Il entraîne l'application de procédures de contrôle automatique, l'accroissement de la fréquence des mesures, l'activation des dispositions de permanence, l'exécution de mesures de contrôle sur le site. Ce stade de vigilance renforcée est activé par le Maître d'ouvrage sur proposition de la structure chargée du suivi technique du site. Une expertise extérieure peut éventuellement être mobilisée à ce stade.

Niveau 3 : le niveau 3 est atteint après validation d'une alerte de niveau 2. Les procédures automatiques de contrôle et d'auto adaptation prévues aux consignes d'exploitation sont appliquées. Celles-ci entraînent le passage à l'état de permanence renforcée au centre d'exploitation et sur le site, et l'exécution de mesures de confirmation sur le site. Après confirmation et évaluation de la situation par le spécialiste responsable de la surveillance du site, l'alerte de niveau 3 est transmise aux autorités responsables de la sécurité. L'alerte opération de niveau 3 correspondant soit à l'application de l'état de pré alerte du plan de secours, soit au passage de l'état de pré alerte à l'état d'alerte si l'état de pré alerte avait déjà été activé.

Ce niveau encore appelé niveau de préoccupation sérieuse est décidé par le maître d'Ouvrage au vu de l'évolution des critères de suivi et des avis de la structure chargée du suivi technique du site , le cas échéant de l'avis des experts mobilisés dans la phase précédente

Leur avis sera fondé sur l'analyse du comportement du phénomène, en particulier l'accélération des déformations, le risque d'éboulement d'un grand volume (~1 million de m³) et la concomitance de critères extérieurs (par exemple une crue décennale ou supérieure de la Romanche pour le site de Séchilienne, une alerte météo orange ou rouge...)

Ces types d'alertes doivent faire l'objet d'une gestion très stricte dont les modalités doivent être définies dans les consignes d'exploitation, en particulier pour ce qui concerne les seuils de vitesse critiques et, en fonction du contexte, d'autres critères à prendre en compte isolément ou en association (capteurs concernés, alertes météo, survenance de petits éboulements récurrents, séisme...).

Il va de soit que ces modalités doivent être actualisées en fonction de la situation et de la connaissance du comportement du versant.

7.5. Procédures de liaison avec les autorités

L'identification des destinataires, les procédures de liaison et la nature des informations à transmettre doivent avoir été clairement définies au stade du cahier des charges et répertoriées dans les consignes d'exploitation.

Hors contexte de crise, les éléments du suivi doivent faire l'objet de communications formelles au Maître d'Ouvrage avec une périodicité à adapter au niveau d'activité du site (mensuelle, semestrielle ou annuelle).

En prévision du contexte de crise qui nécessite la diffusion rapide de l'information auprès des services et personnes en charge des listes téléphoniques des personnes en charge seront établies tenues à jour et régulièrement diffusées.