

Le versant instable des « Ruines » de Séchilienne

Point sur l'activité du phénomène et présentation du nouveau dispositif de gestion de la télésurveillance

Jean-Paul DURANTHON
Laurent EFFENDIANTZ

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Lyon

RÉSUMÉ

Le versant rocheux instable des « Ruines » de Séchilienne est situé à une vingtaine de kilomètres à l'est de Grenoble. Les vitesses de déplacement de la partie la plus rapide du mouvement, mesurées depuis 1985, sont toujours en augmentation. Sur le terrain, des tassements de plusieurs mètres ont été constatés en partie supérieure du panneau instable et la fissuration progresse sur ses marges ouest. Une évolution récente de la sensibilité du phénomène aux conditions hydrométéorologiques a également été mise en évidence. L'activité de ces phénomènes est décrite ; l'outil informatique développé pour la gestion en temps réel de l'ensemble des dispositifs de télésurveillance déployés sur le site est ensuite présenté.

DOMAINE : Géotechnique et risques naturels.

ABSTRACT

*THE UNSTABLE « RUINES DE SÉCHILIENNE » SLOPE.
STATE OF THE SITE ACTIVITY AND PRESENTATION
OF THE NEW REMOTE-MONITORING MANAGEMENT SYSTEM*

The unstable rocky slope is located about twenty kilometres east of the city of Grenoble. The displacement rate in the most rapid area have been regularly increasing since 1985. On site, subsidence of several meters has been observed on the upper part of the unstable rock mass and cracking opening has been progressing on its western edge. A recent evolution in the phenomenon sensitivity to the hydro meteorological conditions has been detected too. The activity of these phenomena is described herein. The computer tool developed for the real time management of the entire set of the remote-sensing devices implemented on site will also be presented.

FIELD: Geotechnical engineering and natural hazards.

INTRODUCTION

Dix-huit ans après la prise en considération du versant instable des « Ruines » de Séchilienne, le phénomène est toujours très actif. La connaissance de l'aléa a largement progressé, tant au niveau du modèle géologique et structural du massif que de l'approche des mécanismes en jeu. Après un bref rappel du contexte, cet article fait le point sur le diagnostic des volumes en mouvement, les évolutions récentes du phénomène ainsi que sur la stratégie et les moyens du suivi. La seconde partie de l'article traite du nouveau logiciel de télésurveillance utilisé sur le site.

POINT SUR LA CONNAISSANCE ET L'ÉVOLUTION DU MOUVEMENT DE VERSANT

Rappel sur l'émergence du phénomène

Éboulements sur la RN 91

Le pied du versant des « Ruines » de Séchilienne n'a pas connu de phénomène d'obturation naturelle du lit de la Romanche, à l'instar d'autres secteurs de la vallée entre le XVII^e siècle et le XX^e siècle. L'examen des archives a cependant mis en évidence des chutes récurrentes de gros blocs à la fré-

quence approximative d'une fois par siècle. Dès 1980, quelques chutes de blocs avaient attiré l'attention sur le secteur et conduit à préconiser des mesures de protection de la route prenant la forme d'un léger remodelage du pied de la pente. Au cours de l'hiver 1985, une manifestation inhabituelle de chute de blocs rocheux atteignant la RN 91 a été observée au droit d'un couloir d'éboulis marquant la limite est de la zone des « Ruines ». Ces éboulements, par leur volume et leur répétition, dépassaient la capacité du cordon de remblai de protection antérieurement mis en place dans ce secteur. La reconnaissance de la zone de départ a rapidement montré qu'il ne s'agissait pas d'un processus banal d'altération superficielle des escarpements rocheux dominant la route. Dès le mois de mars 1985, les constatations effectuées dans le versant ont conduit à mettre immédiatement en place une surveillance permanente avec possibilité d'interrompre la circulation au moyen de feux rouges. Ce dispositif a été amélioré en juillet 1985 par l'installation d'un mur en blocs de béton préfabriqués couronné de filets détecteurs.

Mesures conservatoires

La nécessité de mettre la RN 91 hors d'atteinte des chutes de blocs et de garantir la permanence de l'écoulement des eaux de la Romanche en cas d'éboulement en grande masse ont conduit à réaliser en 1986 les travaux suivants :

- creusement d'un chenal de dérivation de la Romanche côté sud de la vallée sur 1 200 m de longueur. En amont, l'origine de ce chenal est occulté par une digue fusible de manière à dévier la Romanche en cas d'obstruction du lit mineur par l'éboulement ;
- construction d'un itinéraire de déviation de la RN 91, d'une longueur totale de 1 400 m, sur la rive gauche du chenal de dérivation ;
- construction de deux ouvrages provisoires de franchissement de la Romanche, pérennisés depuis ;
- construction d'un merlon destiné à limiter l'étendue du cône d'éboulis dans la plaine. Ce choix a en fait résulté plus de l'opportunité de création d'une zone de dépôt pour les matériaux extraits lors du creusement du chenal que de la réalisation d'une véritable digue de protection impossible à planter à cet endroit, compte tenu de l'exiguïté de la vallée.

En 1997, une opération d'expropriation et d'évacuation des 94 habitations du lotissement de l'Île Falcon situé en face du Mont-Sec en fond de vallée a été lancée en application de la loi Barnier (indemnisation préventive). Parallèlement à ces actions conservatoires, des études géologiques ont été entreprises et le versant a été progressivement équipé de dispositifs de mesure permettant d'assurer une surveillance continue des mouvements.

Indépendamment des reconnaissances de surface, l'évaluation du phénomène a été complétée en perçant une galerie de reconnaissance de 240 m de longueur (implantée à la cote 710, à environ 150 m à l'ouest de la zone la plus active) pour valider les hypothèses de comportement mécanique du massif et tenter de localiser la surface de rupture arrière du volume en mouvement. Seul le premier objectif a pu être atteint.

En 1999-2000, une galerie de reconnaissance géologique et de dérivation hydraulique de la Romanche, longue de deux kilomètres, a été creusée au lieu-dit Montfalcon sous le versant opposé au site des « Ruines » [1]. Cette galerie peut évacuer un débit de 50 mètres cubes par seconde.

Cadre géologique et structural

Contexte régional

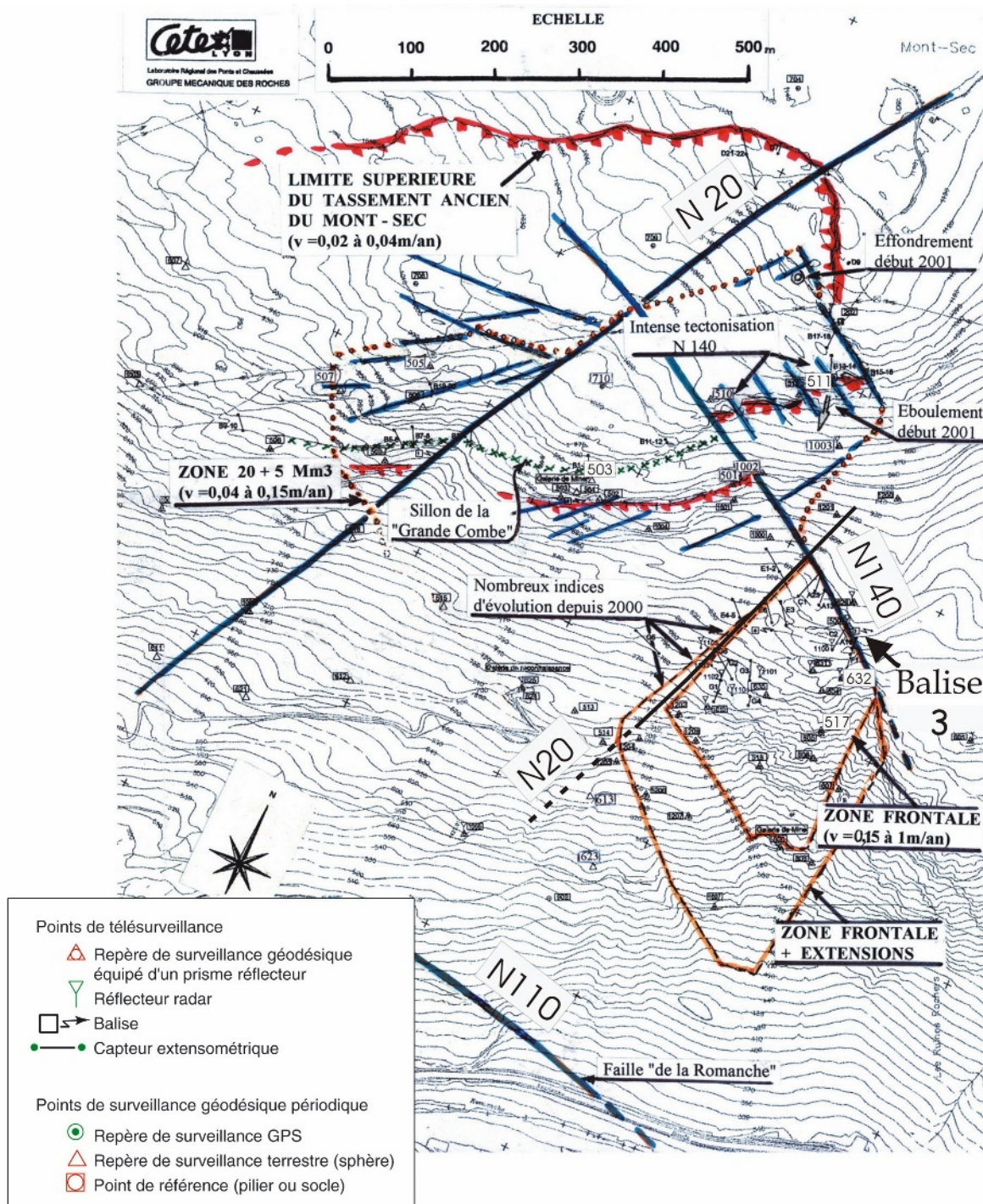
Géologiquement, le site se trouve dans le rameau externe de la chaîne du massif cristallin de Belle-donne ou « série satinée » constituée de micaschistes résultant du métamorphisme d'une ancienne formation sédimentaire flyschöide grésopélique. Deux accidents majeurs de direction N20E encadrent cette unité : à l'est, le synclinal médian et à l'ouest l'accident de Vizille.

L'histoire tectonique régionale complexe a laissé une empreinte forte sur le massif du Mont-Sec. Les études conduites antérieurement [2-4] ont montré que les déformations acquises et les mouvements actuels étaient largement commandés par les éléments structuraux hérités de cette histoire.

Particularités du site

Très succinctement, on distingue :

- une phase de déformation vraisemblablement antécarbonifère responsable de la foliation principale SoS1 subverticale et perpendiculaire au versant ;
- le champ de fractures pseudo-concentriques du Mont-Sec (ovale du Mont-Sec) associées à la genèse d'un grand pli d'axe nord-sud vraisemblablement lié à la mise en place d'un champ filonien à plomb-zinc lors d'une phase de déformation tardihercynienne ;
- un système de décrochements conjugués N20-50E et N120-140E (Fig. 1) correspondant à la remobilisation alpine d'accidents hercyniens.



■ Fig. 1

Le site des « Ruines » : principaux éléments structuraux, délimitation des secteurs à comportement homogène.

La tectonique alpine se traduit également dans le secteur de Séchilienne par de véritables « shear-zones » associées à des phénomènes d'anastomoses verticales. Le couloir des « Ruines » est localisé sur une telle structure. Des accidents alpins chevauchants soulignés par des plans lustrés et des films graphiteux ont également été mis en évidence en rive gauche de la Romanche dans la galerie de reconnaissance creusée sous Montfalcon.

Des compartiments en lanières orientées N70 affectent la partie supérieure de la zone instable. Leur orientation coïncide avec celle du rebord sud-est de l'ovale du Mont-Sec.

Un accident tectonique décrochant d'importance régionale (N110E, à rattacher à la famille N120-140E) passe au pied du couloir des « Ruines ». L'hypothèse d'un rejeu néotectonique de cet accident a été avancée sans toutefois qu'une incidence directe sur la dynamique des mouvements actuels ait pu être démontrée.

Instrumentation du site

Le site a été progressivement équipé depuis 1985 (cf. Fig. 1). Les 36 sphères de géodésie classique, les 16 repères GPS, les 33 extensomètres automatiques et les 49 extensomètres manuels installés pendant les premières années [5] ont été complétés en 1997 par une dizaine de points de géodésie classique. Depuis 1996, une station de géodésie automatique localisée sur le versant opposé aux « Ruines », en rive gauche de la Romanche sur le promontoire de Montfalcon, permet de suivre en continu (une mesure par heure) 47 réflecteurs répartis sur le site à l'aide d'un distancemètre interféromètre laser. Huit nouveaux repères ont été rajoutés à ce dispositif au printemps 2001 de manière à contrôler l'évolution latérale de la zone la plus active. Un certain nombre des réflecteurs de géodésie automatique sont associés aux sphères de géodésie classique, ce qui offre l'avantage d'une certaine continuité (par extrapolation) de l'information donnée avec celle des campagnes annuelles de géodésie classique. Six capteurs extensométriques supplémentaires rattachés à une nouvelle balise radio (n°5) ont été installés en 2000 en limite ouest de la zone la plus active après que le repère géodésique 1 010 ait décelé depuis 1998 une forte évolution du secteur.

À titre exploratoire, 6 nouveaux réflecteurs de géodésie automatique ont été installés en mai 2001 dans le prolongement latéral et aval du secteur en limite ouest de la zone la plus active. En 1998, 2 inclinomètres de silice ont été installés dans la galerie de reconnaissance de la cote 710.

Un radar terrestre de distancemétrie micro-onde développé par l'ONERA [6] est opérationnel sur le site depuis 1999. Cet appareil, implanté sur le promontoire de Montfalcon, permet de compléter avec une excellente précision (meilleure que le millimètre) le suivi de la géodésie automatique en apportant une capacité de mesure en continu pendant les périodes météorologiques défavorables (brouillard, précipitations).

Une station météorologique (pluvio-nivomètre) a été installée en 1993 à la cote 1 100 au-dessus du Mont-Sec.

Modèle de déformation du versant

Inadéquation des modèles classiques

Les données structurales et la cinématique des mouvements observés conduisent à écarter l'hypothèse d'un glissement d'ensemble de la partie supérieure du versant et à retenir plutôt l'hypothèse d'un mécanisme de rupture interne du massif entraînant une importante dilatance dans le haut du versant [3, 7].

Les raisons en sont :

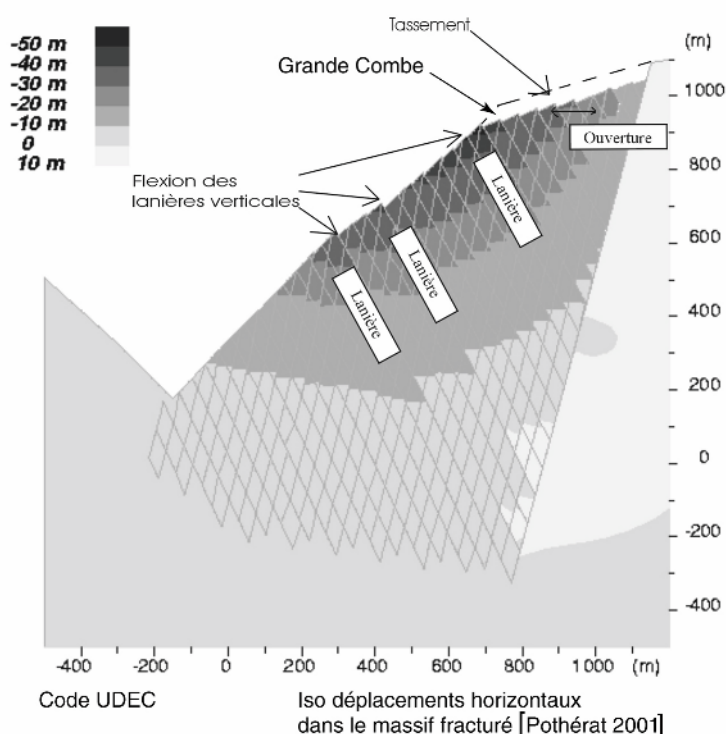
- la faible inclinaison des vecteurs déplacements, inférieure à la pente du versant, qui n'est pas compatible avec un mécanisme de glissement ;
- l'amplification constatée des déplacements du bas vers le haut du versant, qui est compatible avec un mécanisme de flexion des lanières N70E décrites dans le paragraphe « Nouveau dispositif de gestion de la télésurveillance : GeSSRI » accompagné du tassement vertical des parties hautes des secteurs actifs avec formation de contre-pentes ;
- l'absence d'indices permettant de conclure à l'individualisation d'une surface de rupture en partie basse du versant. L'apparition de ce type de désordres signifierait le passage à un mécanisme de glissement avec une forte probabilité de divergence brutale.

Proposition d'un modèle adapté au versant des « Ruines »

L'auscultation en nivellement et extensométrie et les observations réalisées dans la galerie de reconnaissance creusée à la cote 710 ont permis de mettre en évidence un mouvement de basculement de blocs élémentaires pluridécamétriques représentatif du mécanisme de rupture du versant. Des simulations numériques ont pu être construites à partir de ces données afin d'analyser le comportement du versant sous différents types de sollicitations (charges et décharges glaciaires essentiellement).

Le modèle de simulation par éléments distincts utilisé par J.-M. Vengon [8] a reproduit un comportement global du versant compatible avec la morphologie réelle du site : tassement de la zone supérieure, dénivelées en escaliers plus ou moins marquées, flexion des lanières délimitées par les discontinuités parallèles au versant. Le modèle testé à l'échelle de l'ensemble du versant se vérifie également sur les secteurs particulièrement actifs comme la zone frontale. Ce modèle, repris par Pothérat *et al.* [4] en introduisant les fractures principales identifiées sur le schéma structural, a permis de simuler une évolution réaliste du versant tout à fait représentative du modelé topographique réel, tant en ce qui concerne les hauteurs des regards aval des falaises (limites arrières des zones de tassement) que les hauteurs des contre-pentes (Grande Combe notamment ; Fig. 2).

Les manifestations actuelles d'instabilité sont à considérer comme des phénomènes d'évolution gravitaire du versant (au sens large, cela incluant les sollicitations hydrauliques associées au transit des eaux infiltrées) s'inscrivant dans le prolongement des phases de creusement, charges et décharges glaciaires.



■ Fig. 2

Exemple de déformation sans surface de rupture obtenue par la méthode de simulation par éléments distincts.

Qualification de l'aléa d'éroulement. Éventualité du déclenchement du phénomène

Délimitation et zonage du phénomène

L'analyse des mouvements mis en évidence par la surveillance géodésique a permis, en première approche, de circonscrire plusieurs domaines sur le versant sud du Mont-Sec (*cf.* Fig. 1) :

➤ l'ensemble de ce qui bouge de manière significative : ce secteur, qui concerne une grande partie du versant sud du Mont-Sec, est limité à sa partie supérieure par d'importants

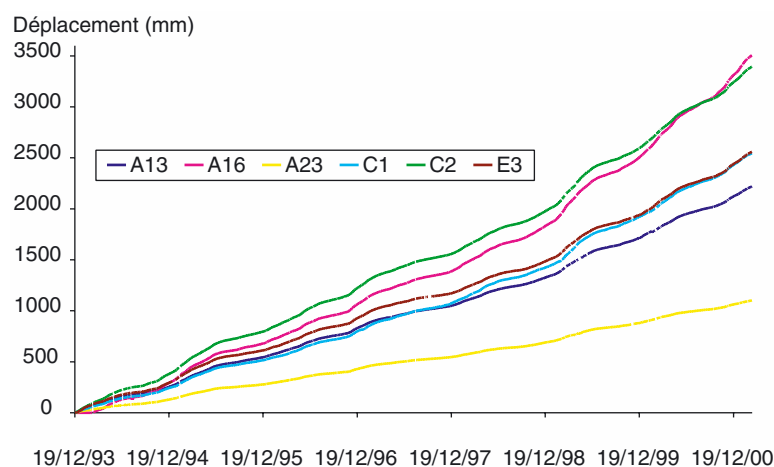
escarpements en falaises marquant la limite d'extension du tassement ancien du Mont-Sec. Avec des mouvements compris entre 2 et 4 cm/an et d'une superficie de 70 ha, l'intégralité de ce domaine d'un volume estimé à 100 hm³ n'apparaît pas susceptible d'être pris en compte pour un scénario d'éboulement ;

➤ le secteur où les déplacements sont supérieurs à 15 cm/an : ce sous-ensemble, situé au coin sud-est de l'ensemble précédent, est désigné comme la « zone frontale » ou « zone la plus active ». Il est bordé à l'est par le couloir d'éboulis des Ruines. Le volume encadré par ces limites a été estimé à 3,2 hm³ en place [9], soit un éboulis de 4 hm³. Après l'écroulement de ce panneau, il est vraisemblable que se produiraient des régressions sous forme d'extensions latérales ou d'évolutions de la cicatrice par événements successifs (essentiellement vers l'Ouest et dans une moindre mesure vers l'Est). Cela pourrait intéresser un volume supplémentaire en place de 4 hm³ portant le volume éboulé total à 9 hm³. Le délai significatif, pendant lequel l'éboulement de la zone frontale est susceptible de se produire, a été estimé être du domaine du court terme, soit entre un et dix ans [7] ;

➤ une zone intermédiaire où les déplacements sont de 4 à 15 cm/an. : cette zone correspond dans sa partie haute au rebord sud-est du tassement ancien du Mont-Sec bien marqué dans la topographie par des falaises en saillie dans le versant. Au Nord-Est, ce rebord est largement affecté par les répliques de l'accident décrochant N140E qui contribuent à son affaiblissement mécanique. Au Sud, ce rebord est incorporé structurellement dans l'encoignure constituée par les deux accidents N140E et N20E qui ont une valeur structurante à l'échelle du site, ce qui paraît donner sa cohérence cinématique au secteur. Le volume correspondant à cette zone a été évalué à 20 hm³, auxquels sont à rajouter 5 hm³ correspondant à l'entraînement ou à l'éboulement précurseur de ce qui constitue actuellement la zone la plus active. Le délai d'occurrence probable de l'écroulement de ce secteur apparaît comme très improbable à court terme et peu probable à moyen terme (10 à 30 ans) ; ce pronostic serait à revoir en cas de réalisation de l'écroulement de la zone frontale.

Critère de simultanéité de la rupture

La dynamique d'ensemble de la zone frontale est examinée ci-après à travers l'évolution des déplacements enregistrés par les capteurs extensométriques de la balise 3 qui équipent la partie supérieure de la zone frontale. La figure 3 montre que les évolutions s'effectuent de façon homogène, ce qui rend plausible un éboulement quasi simultané de la zone frontale.



■ Fig. 3

Capteurs extensométriques rattachés à la balise 3. Évolution des déplacements depuis 1993.

Critère de rapidité de la rupture de la zone frontale

Selon le modèle de rupture interne proposé, les zones basses, quasi immobiles à l'échelle du site, accumulent des contraintes qui pourraient être à l'origine d'une libération brutale d'énergie par individualisation d'une surface de rupture (qui n'a pas actuellement été identifiée sur le terrain). Cette hypothèse de divergence rapide est confortée par la prise en compte des données de terrain suivantes :

- intensité des déplacements beaucoup plus forte dans la partie supérieure qu'à la base ;
- présence d'indices de report progressif des contraintes sur la marge ouest de la zone frontale (fissures latérales en échelons) ;
- faible purge naturelle et progressive de la partie supérieure par rapport au déplacement global du terrain vers la vallée.

Ce scénario de rupture brutale n'est pas exclusif d'autres évolutions sous forme d'écroulements successifs de la partie supérieure bien que les évolutions actuelles du phénomène n'aillent pas dans ce sens.

La localisation en altitude d'une éventuelle surface de rupture dans le versant est également très importante (environ 250 m au-dessus du fond de vallée pour la base de la zone frontale) et conditionne l'énergie potentielle de l'éboulement.

Critère de volume (classe de l'éboulement)

Dans un schéma d'éboulement de blocs jusqu'à quelques dizaines, voire quelques centaines de milliers de mètres cubes, la dynamique de l'éboulement peut être considérée comme la somme d'événements unitaires dont la simulation est du domaine des logiciels de trajectographie courants. Dans cette hypothèse, l'éboulement progressif de la partie frontale du versant instable des « Ruines » se traduirait au pire par une obstruction du lit mineur de la Romanche, dont le cours utiliserait alors le chenal de dérivation construit en 1986. Le volume global de la zone frontale, avec 3,2 hm³ en place, dépasse largement ce scénario.

Un logiciel de simulation d'éboulement en grande masse, fondé sur un modèle incrémental permettant d'effectuer des simulations et des évaluations de l'extension et de la géométrie des barrages d'éboulements associés aux écroulements, est en cours de mise au point à l'initiative du Centre d'études techniques de l'équipement (CETE) de Lyon. Cet outil devrait permettre de réaliser des simulations dans des délais compatibles avec une gestion de crise.

Évolution du phénomène

Historique sur la base de l'étude des photos aériennes disponibles

Depuis 1937, date à partir de laquelle on dispose de photos aériennes du site (1937, 1948, 1956, 1970, 1981, 1984, 1986, 1993, 2000) et, de façon plus prononcée, à partir de 1970, on a pu constater une évolution de la partie haute du couloir des « Ruines » et une extension des couloirs d'éboulements associés.

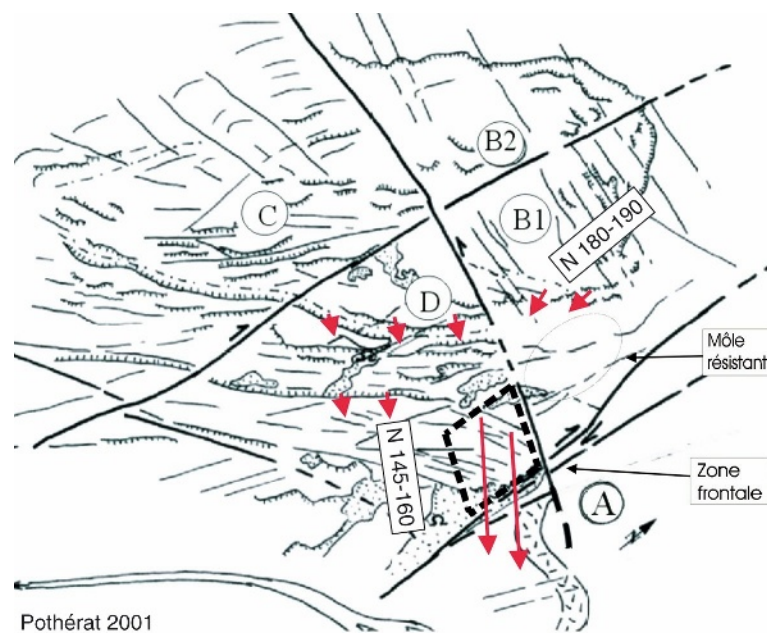
Analyse des données géodésiques et topométriques depuis 1985

Géodésie classique

Le système de suivi par géodésie classique est fondé sur la mesure annuelle (en x, y, z) de repères répartis sur l'ensemble du versant des « Ruines » (Fig. 4) [10,11]. Les données des campagnes annuelles de géodésie classique permettent d'accéder à la compréhension cinématique (3D) du phénomène.

Les mouvements du versant s'effectuent selon deux directions (cf. Fig. 4) :

- la direction générale orientée vers le N145 à 160, sensiblement perpendiculaire aux lanières N70 ;
- une direction orientée vers le N180 à 190, spécifique au rebord sud-est de l'ancien tassement du Mont-Sec.



■ Fig. 4

Auscultations géodésiques annuelles. Orientation des vecteurs déplacements (x,y) en fonction du contexte structural.

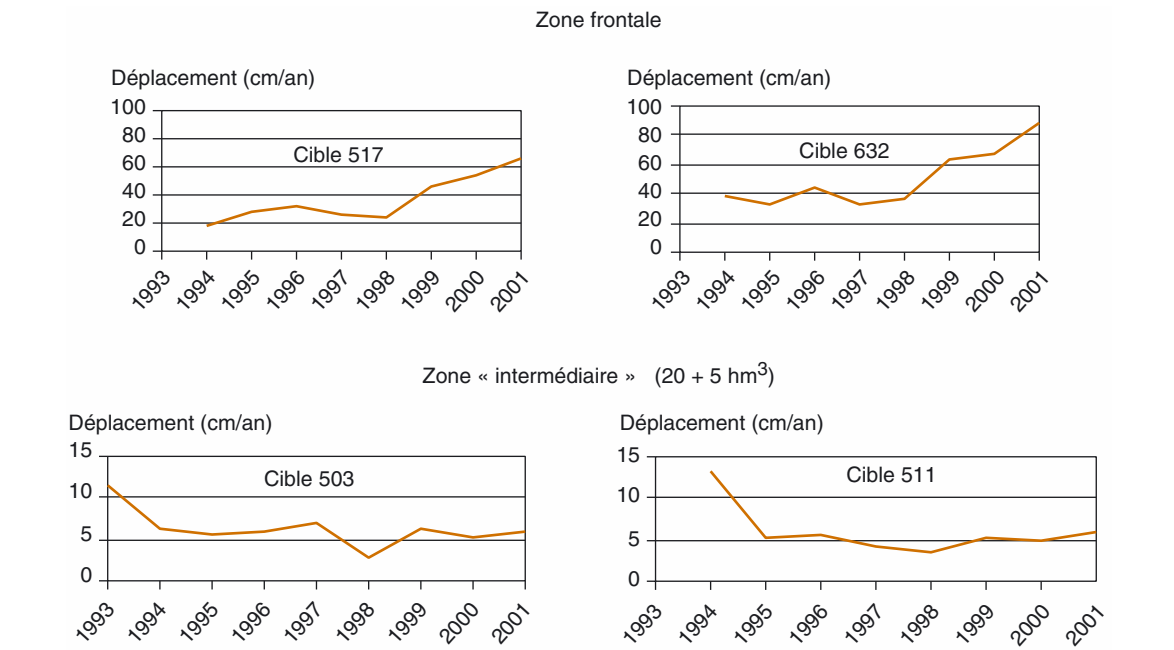
Deux éléments sont susceptibles d'expliquer cette particularité :

- une fracturation N110-140, particulièrement exprimée à ce niveau, venant perturber le schéma général de déformation associé aux lanières N70 ;
- la présence en contrebas du rebord d'un secteur en faux plat où les mouvements sont très faibles, ce môle résistant étant susceptible de jouer localement comme un déviateur ;
- les données de la géodésie et l'analyse structurale ont permis d'individualiser plusieurs domaines à comportement homogène. On constate une divergence de comportement de plus en plus marquée entre la zone frontale et la zone intermédiaire (Fig. 5).

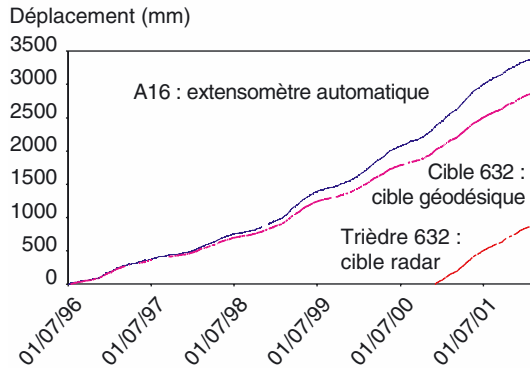
Dispositifs de mesure automatique

L'analyse suivante, qui concerne l'évolution de la zone frontale, a été conduite à partir des données de l'extensométrie automatique, technique plus spécialement adaptée au suivi de l'ouverture des zones fissurées. Les données de la géodésie et du radar, bien que plus représentatives des mouvements absolus des versants, sont en cohérence étroite avec celles de l'extensométrie (Fig. 6).

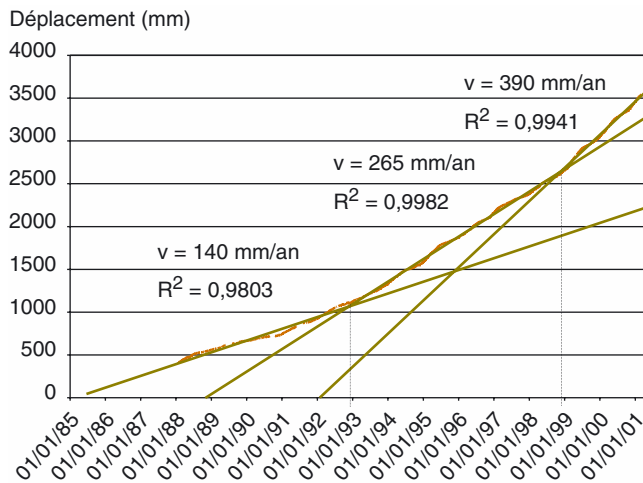
Les mesures d'ouverture de zones fissurées ont toujours montré depuis l'origine des mesures une accélération significative (vitesse multipliée par 1,5 à 2) au cours des périodes hivernales (hiver + printemps), suivie de phases de ralentissement estivales. Les gammes de vitesses enregistrées en 2001 dans la partie supérieure de la zone frontale sont de 5 à 10 cm/mois en période saisonnière rapide, et 2,5 à 5 cm/mois en période saisonnière lente. On peut remarquer que cette variation cyclique des vitesses, qui confirme l'hypothèse de l'existence d'un mécanisme profond lié aux conditions hydrauliques du massif, perturbe par ailleurs la perception instantanée des variations et des tendances de la cinétique du phénomène. L'analyse des déplacements sur une longue période permet de faire abstraction des phénomènes cycliques saisonniers. Actuellement, la tendance à long terme est caractérisée par des accélérations progressives séparées par des paliers de vitesse de plusieurs années (Fig. 7). La confirmation de cette évolution pourrait aboutir à la divergence du phénomène. La dernière accélération significative date de l'hiver 1998-1999, avec des vitesses moyennes en augmentation de 20 à 30 % par rapport au précédent palier. Cette activité corrélée à une pluviométrie exceptionnelle ne s'est pas démentie depuis.



■ **Fig. 5**
 Auscultations géodésiques annuelles. Évolution des vitesses de déplacement (x,y,z) des cibles 517, 632, 503 et 511 (repérées sur la figure 11).



■ **Fig. 6**
 Évolution comparée des mesures extensométriques, géodésiques (depuis juillet 1996) et par radar (depuis juillet 2001) de trois capteurs proches localisés en limite supérieure est de la zone frontale entre juillet 1996 et janvier 2002.



■ **Fig. 7**
 Application de la régression linéaire aux déplacements du capteur extensométrique A13 (on dispose avec ce capteur d'une continuité des mesures depuis 1985).

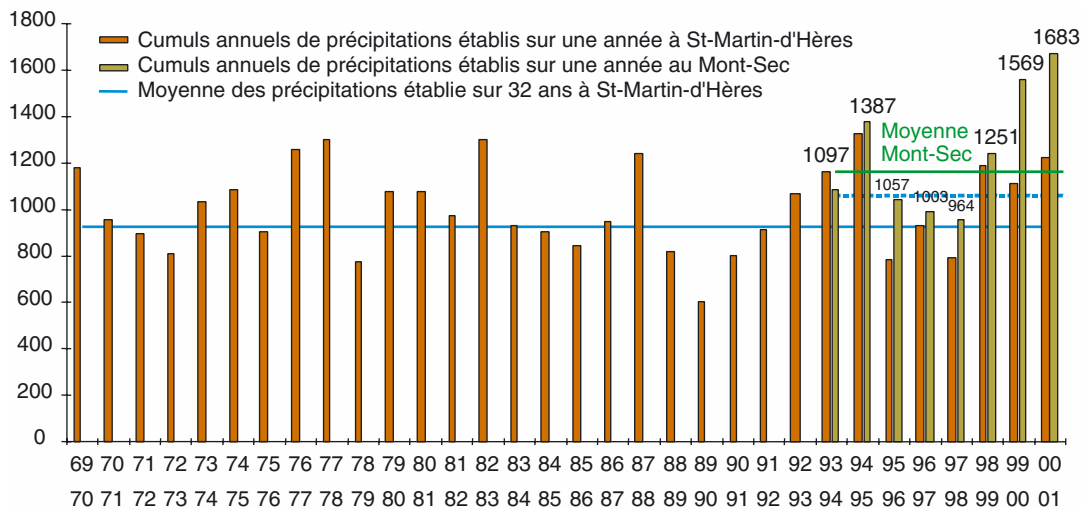
Corrélations des mouvements du versant avec les données hydrométéorologiques

Le contexte hydrométéorologique du site est schématisé sur la figure 8. Les données de la station météo du Mont-Sec n'étant disponibles que depuis 1993 (date d'installation), il a été fait référence à la station météo la plus proche (Saint-Martin-d'Hères) pour définir une moyenne de référence (calculée sur 30 ans).

On constate sur la dernière décennie que les années 1994-1995, 1999-2000 et, tout particulièrement 2000-2001, se singularisent par des précipitations très importantes [11].

Avant l'hiver 1998-1999, les corrélations vitesses du mouvement/infiltrations d'eau dans le massif nécessitaient la prise en compte d'un effet réservoir du terrain. Il en résultait un déclenchement différé des accélérations par rapport aux événements hydrométéorologiques (Fig. 9). Depuis 1999 (Fig. 10), il a été constaté que les accélérations intervenaient désormais de manière quasi instantanée (quelques heures de délais) après les épisodes d'infiltration significatifs (> 20 mm/24 h) et cela, indépendamment du contexte saisonnier.

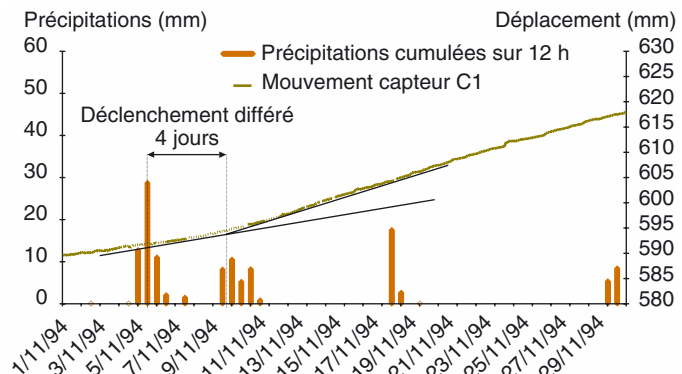
Dans une optique de contrôle de l'évolution du phénomène, il faut garder à l'esprit que ce type de données est très dépendant des conditions d'implantation des capteurs (panneaux profonds, blocs superficiels, etc.).

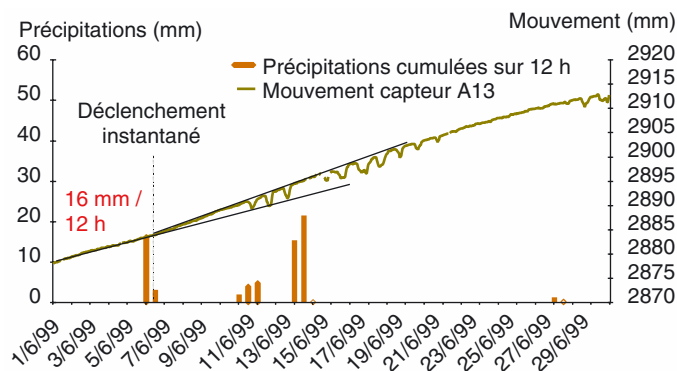


■ Fig. 8

Cumuls annuels de précipitations. Détermination de la moyenne de référence. Les années prises en compte sont des années « hydrométéorologiques » (du 1^{er} juin au 31 mai) pour s'affranchir des phénomènes de rétention nivale.

■ Fig. 9
Analyse des déclenchements d'accélération en fonction de la pluviométrie. Évolution du comportement du phénomène (avant l'hiver 1998-1999).





■ **Fig. 10**
 Analyse des déclenchements d'accélération
 en fonction de la pluviométrie.
 Évolution du comportement du phénomène
 (depuis l'hiver 1998-1999).

Analyse des observations de terrain. Évolution des contours de l'aléa

Depuis le début de l'hiver 2000-2001, il convient de signaler une fréquence et une importance inhabituelle des événements superficiels affectant le versant.

L'évolution qui affecte tout particulièrement le sud-ouest de la zone frontale (Fig. 1 et 11) correspond à un élargissement de la base de la partie la plus active sous la forme d'une progression « en échelons » des fissures latérales (NS en partie supérieure évoluant à N20 en descendant). Cela est confirmé par les données des capteurs de déplacement. Le schéma de progression de la fissuration en échelons peut être interprété au niveau mécanique comme un report des efforts sur des points voisins après concentration des contraintes sur des points de blocage et endommagement de ceux-ci. Par ailleurs, les ouvertures de fractures et les effondrements de type entonnoirs se développent dans la zone intermédiaire.

39

Stratégie opérationnelle de suivi

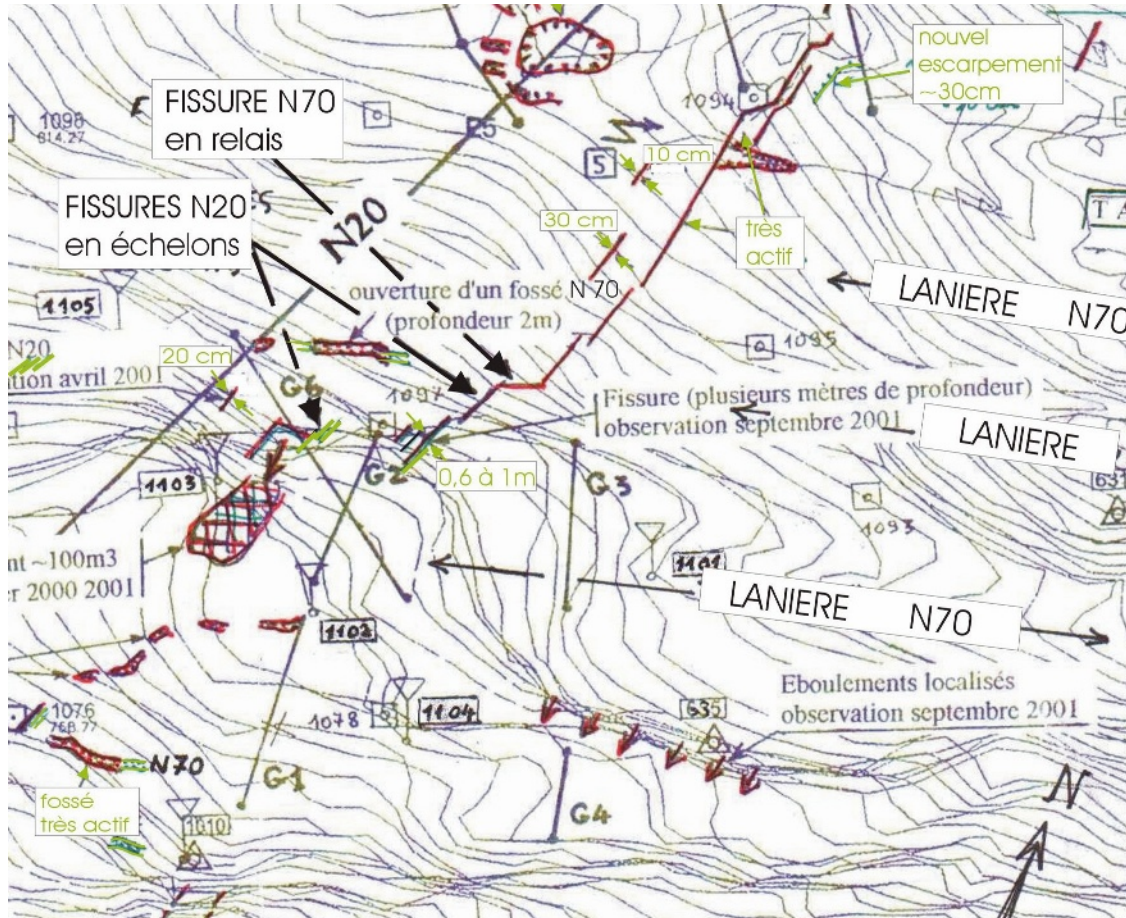
Le suivi opérationnel du mouvement (Fig. 12) implique que l'on soit confronté à une demande d'interprétation « prédictive » des données de la télésurveillance. Les remarques énoncées ci-après montrent bien la nécessité d'une grande prudence dans cette analyse, qui ne peut faire l'économie d'une prise en compte globale, pondérée et constamment réactualisée des différents types de données disponibles.

La prise en compte des contextes de vitesse saisonnière, de l'activité hydrométéorologique et de l'évolution des indices de terrain constitue un préalable indispensable à l'interprétation des mesures, chacun de ces paramètres pouvant s'avérer déterminant.

Les comparaisons et corrélations doivent être effectuées à l'intérieur de domaines homogènes (zone frontale, zone intermédiaire, etc.), ce qui suppose une réactualisation permanente et critique des contours au fur et à mesure de l'évolution du mouvement. L'hypothèse d'une individualisation de lobes à comportements indépendants à l'intérieur des zones actuellement considérées comme homogènes ne peut être écartée.

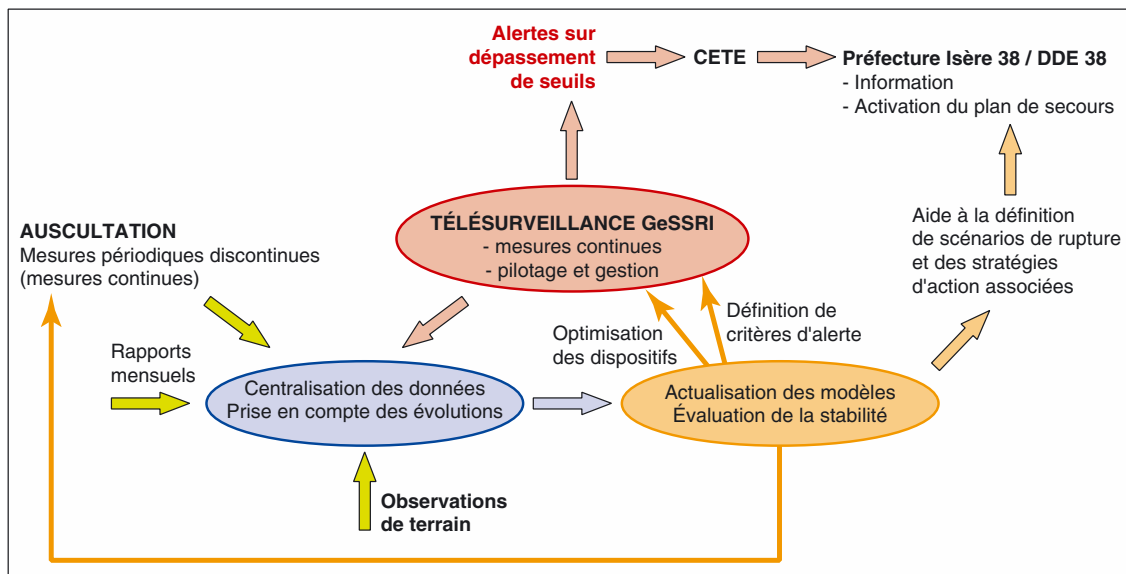
Par référence au modèle de rupture interne retenu (cf. paragraphe « Qualification de l'aléa d'écroulement. Éventualité de déclenchement du phénomène »), l'appréciation de la dynamique du phénomène doit être effectuée en considérant l'implantation des points de référence. Dans un secteur considéré, un capteur situé plus haut dans le mouvement possède actuellement une dynamique supérieure à celle d'un capteur situé vers la base. Toute évolution de ce « gradient » pourrait être interprétée comme un changement du régime de déformation susceptible de conduire à l'individualisation d'une surface de rupture basale et une divergence rapide du mouvement.

Une accélération prononcée du mouvement d'un seul capteur n'est le plus souvent révélatrice que d'une évolution superficielle localisée. Ce type d'événement ne doit toutefois pas être négligé car il peut être un signe précurseur d'une crise plus globale.



■ Fig. 11

Plan de détail du secteur ouest de la zone frontale (cf. fig. 1). Observations de terrain. Évolutions récentes (depuis 2000).



■ Fig. 12

Schéma d'organisation du suivi du site.

D'une manière générale, la divergence du phénomène ne pourrait intervenir sans une période préalable de mise en vitesse, période d'autant plus brève que l'on se situe déjà dans un contexte de vitesse initiale forte (par référence aux cycles saisonniers).

Au fur et à mesure de la progression de la connaissance du phénomène et de la crédibilité d'une hypothèse de crise, le dispositif de télésurveillance a été renforcé pour répondre à la préoccupation constante d'assurer la continuité et la qualité de l'information sur l'évolution du phénomène.

Les améliorations ont essentiellement porté sur :

- la redondance dans les dispositifs de mesures, d'acquisition et de transmission ;
- la diversification des techniques appliquées à chacune de ces fonctions, autant que possible ;
- la mise au point d'un outil robuste de gestion de l'ensemble des dispositifs de télésurveillance.

Le passage en contexte de pré-crise, puis de crise font l'objet de procédures affichées dans le plan de secours.

NOUVEAU DISPOSITIF DE GESTION DE LA TÉLÉSURVEILLANCE : GESSRI

Les exigences spécifiques à la gestion du site instable des « Ruines » de Séchilienne ont justifié, depuis l'origine de sa mise sous surveillance, le recours à des développements logiciels importants, réalisés au CETE de Lyon. La quantité et la variété des dispositifs d'acquisition mis en œuvre sur le terrain (bases extensométriques, cibles géodésiques, trièdres radar, sondes de température, etc.) ont progressivement fait émerger le besoin d'un outil capable d'assurer une gestion fiable de l'ensemble des fonctions de la télésurveillance.

La notion de gestion de proximité, avec deux terminaux de site déportés implantés à proximité immédiate du versant instrumenté (Les Thiébauds et Montfalcon), et la notion de gestion à distance, avec le centre d'exploitation de Bron, se sont très tôt imposées à travers l'expérience de la télésurveillance et ont été reprises dans l'architecture d'un nouvel outil : GeSSRI (Gestion de la Surveillance des Sites Rocheux Instables).

Sont particulièrement concernés :

- au niveau de la gestion de proximité, le pilotage des acquisitions (paramétrage des capteurs, pas d'acquisition, contrôle des systèmes) et la redirection des informations vers le centre d'exploitation (pilotage et sécurisation des liaisons) ;
- au niveau de la gestion à distance, la mise à disposition des données (archivage, mise en forme « accessible ») et la délivrance automatique d'alertes sur dépassement de seuils à destination de la structure technique chargée du suivi du site.

Pour ce qui concerne l'extensométrie, le contexte vaste et escarpé du versant ne permettant pas des liaisons filaires, une alimentation en énergie autonome de type photovoltaïque et des transmissions radio vers un terminal de site par balises de faible puissance disposées en relais ont été utilisées. Ce point particulier est symptomatique des difficultés et des particularités qui ont dû être reprises dans la conception de GeSSRI. La démarche ayant abouti au nouvel outil de gestion de la télésurveillance est développée ci-après.

Audit du logiciel télé (version 1988)

En 1999, il a été fait appel à un consultant extérieur afin de faire le point sur les produits développés en interne au CETE (sous SMART et EXCEL) depuis 1988 dans le cadre de la télésurveillance du site des « Ruines » de Séchilienne. Il s'agissait d'une démarche préventive destinée à prendre en compte l'évolution des supports logiciels (systèmes d'exploitation) intervenue depuis les choix initiaux et envisager l'opportunité d'un nouvel outil.

Évaluation de l'existant/propositions

L'analyse des systèmes existants a permis de faire ressortir les éléments suivants :

- faible traçabilité ainsi que faiblesses au niveau de la confidentialité dues au manque de sécurisation des services de télémaintenance,

- absence de solution de secours pour les transmissions d'informations,
- système non évolutif, du fait de l'utilisation de MS-DOS, et induisant d'énormes contraintes de fonctionnement (fenêtrage) par rapport aux systèmes d'exploitation actuels.

Les faiblesses détectées ont conduit à préconiser une refonte de la totalité du dispositif sur la base des options ci-après :

- redéveloppement de l'application à partir de langages et de logiciels standards, fournis par des éditeurs importants, de façon à assurer une meilleure pérennité et une plus grande facilité de maintenance ;
- recours à des techniques de programmation et des architectures de systèmes d'information plus modernes pour apporter une plus grande souplesse d'utilisation et une plus grande fiabilité au niveau des transmissions d'information ;
- utilisation d'un système d'exploitation sécurisé pour permettre d'augmenter la traçabilité et de préserver les données confidentielles.

L'ensemble des fonctionnalités du système est schématisé sur la figure 13.

Dans le système de surveillance à mettre en place, deux types de traitements ont été distingués : les commandes et traitements automatiques, qui ne nécessitent pas d'intervention humaine, et les traitements non automatiques. Indépendamment de ces aspects « structure du produit », un soin particulier a été apporté à la sécurisation de l'acheminement des données vers l'utilisateur final.

Les commandes et traitements automatiques sont les suivantes :

- acquisition des données,
- détection des alertes,
- traitement des alertes,
- mise à jour des données entre les machines,
- mise en forme des états et tableaux utilisés quotidiennement dans le cadre de la surveillance en contexte normal d'évolution du phénomène ou en contexte de crise, en cohérence avec les postures du plan de secours : vigilance renforcée, préoccupations sérieuses et danger imminent, etc.

Les traitements non automatiques sont les suivants :

- analyses et études ponctuelles effectuées sur les données,
- demandes particulières, etc.

Les différentes configurations offertes par les techniques de transmission actuelles ont été envisagées afin d'assurer la meilleure sécurité d'acheminement des données entre les terminaux de site et le centre d'exploitation :

- liaison RTC (ligne téléphonique courante) ou RNIS (Réseau Numérique à Intégration de Service),
- liaison RTC ou RNIS doublée (procédé MULTILINK),
- liaison RNIS avec routeurs,
- liaison spécialisée (support réseau assuré par routeurs).

La première configuration a été choisie en raison de son coût modéré. L'existence de deux terminaux de site distincts, et donc de deux liaisons indépendantes vers le centre d'exploitation, permet de compenser le plus faible niveau de fiabilité associé à cette technique.

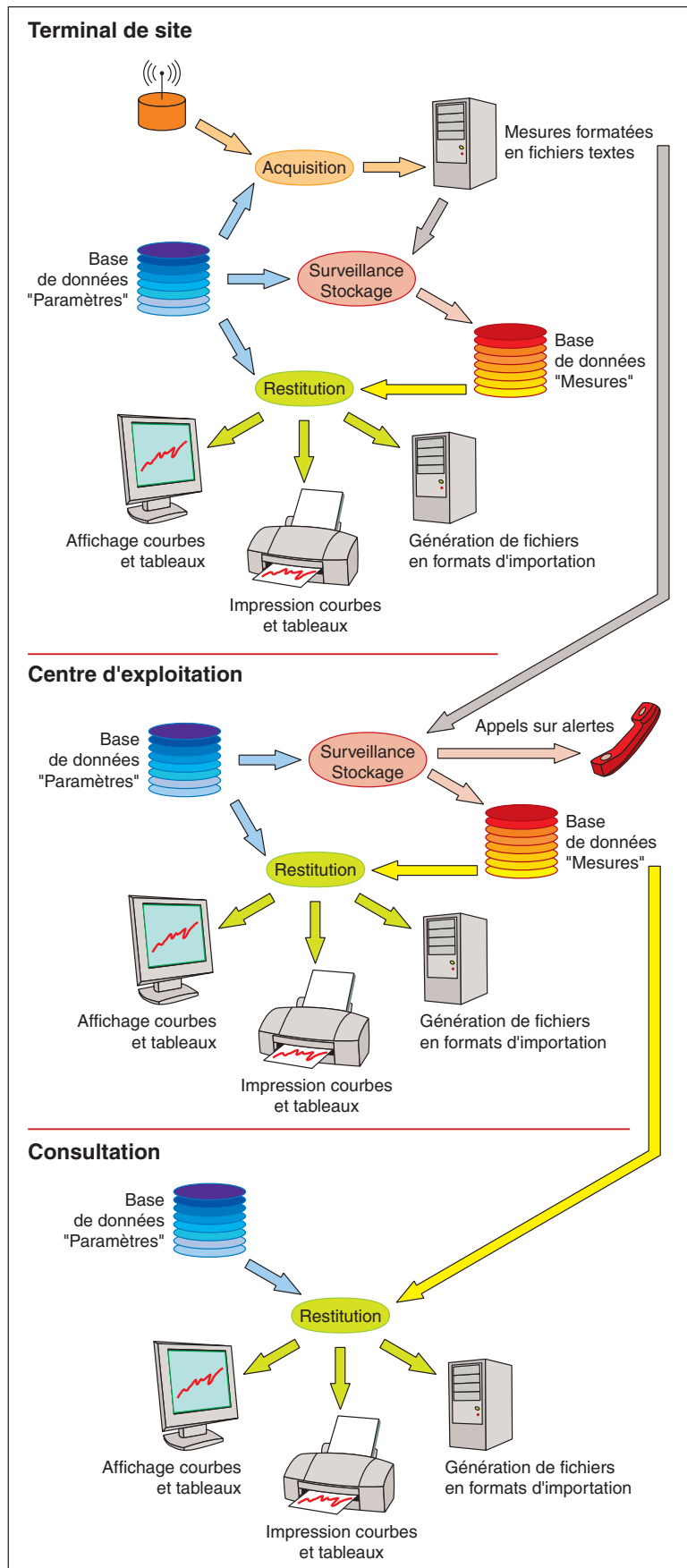
Quel que soit le type de liaison retenue entre le terminal de site (TS) et le centre d'exploitation (CE), on peut leur ajouter une connexion RAS* afin d'offrir un accès à des postes nomades. Cette option a été retenue et les responsables de permanence peuvent ainsi, à partir de n'importe quel accès au RTC, accéder à la base de données du CE et obtenir les courbes et les graphes comme s'ils étaient connectés au réseau local.

Propositions pour un nouvel outil

À partir de l'expérience acquise, deux grandes familles de produits ont été envisagées pour développer un nouvel outil :

- les options de programmation « totale » à partir de langages de programmation,
 - les options consistant à utiliser, voire adapter, un produit intégré disponible dans le commerce.
- Les produits suivants ont été examinés : OpenView (HP), LabView (National Instruments), Soldata (Soldata Eicosol), Panorama (Codra – Europ Supervision).

* Cf. lexique à la fin de l'article.



■ Fig. 13
Architecture du système de télésurveillance.

Option retenue : GeSSRI

Compte tenu des conclusions de l'audit et du fait que les trois techniques de surveillance du site (extensométrie, radar, géodésie) sont réparties sur deux sites distants ne permettant pas l'installation d'une structure en réseau conventionnelle, il était évident qu'il fallait :

- un noyau commun à ces trois applications,
- une gestion en réseau permettant la mise en commun des données,
- une forte garantie de pérennité des outils logiciels utilisés.

Le logiciel Panorama [12], qui répondait tout à fait à ces critères, a été retenu pour la création de l'outil GeSSRI (Gestion de la Surveillance des Sites Rocheux Instables) actuellement opérationnel sur le site de Séchilienne. En effet, Panorama, qui est un produit assez proche de LabView, comporte une interface de programmation visuelle, des pilotes pour de nombreux bus industriels, des ouvertures vers d'autres programmes grâce aux méthodes de communication couramment utilisées et d'autres spécifiques à la gestion de procédés industriels. Il dispose *a priori* de tous les modules nécessaires à la supervision du site de Séchilienne, y compris la gestion des contraintes, et les modules sont riches en fonctionnalités donnant la preuve de la maturité du produit (développé par le Centre d'études atomiques (CEA) depuis 1988, disponible sur plates-formes 32 bits depuis 1997). En ce qui concerne l'intégration des données issues de l'extensométrie automatique, plusieurs solutions existent, dont le développement d'un « driver » spécifique et la lecture dans une base de données. La pérennité de ce superviseur est assurée à travers le partenariat développé pour sa diffusion entre le CEA et Microsoft. Les nombreuses installations de supervision dans les domaines stratégiques tels que les dispositifs de surveillance et de conduite de sites militaires ou nucléaires sont la meilleure garantie de fiabilité.

Ces solutions, modernes en termes de fiabilité, pérennité et évolution du produit, présentent toutefois quelques particularités qui doivent être mentionnées :

- mise en œuvre encore confidentielle nécessitant l'acquisition de connaissances spécifiques de la part des exploitants ;
- nécessité d'acquiescer une licence d'exploitation pour chaque application installée, contrepartie de l'abandon du concept de logiciel « propriétaire ».

Le module Mistral (Module Interactif de Surveillance et de Traitement des Alarmes) de Panorama ne sachant gérer que des alarmes vers un télécopieur, pager, mini-messages,... mais pas de message vocal, l'implémentation du logiciel Alert [13], distribué par Micromédia, pour la transmission des alarmes par le réseau téléphonique (RTC ou GSM) a été retenu pour les mêmes critères de diffusion et de fiabilité que Panorama.

Structure et fonctionnalités du logiciel Panorama

Le logiciel Panorama assure en multitâches des fonctions aussi critiques et exigeantes que l'acquisition des données, le traitement des dépôts sous forme d'alarmes et l'archivage pour la traçabilité. Les spécificités techniques qui ont conduit à retenir ce logiciel sont décrites ci-après.

Structure

Le superviseur est structuré en plusieurs programmes autonomes dont chacun traite une fonction importante de la supervision. Cette architecture multi-modulaire autorise de plus une évolution rapide et fiable du système puisque chaque programme est décrit indépendamment des autres. Tous ces modules sont clients ou serveurs de la base de données dynamique de Panorama, Gesvar, le gestionnaire de variables. Il détient en temps réel toutes les valeurs des variables en cours de traitement par les programmes de Panorama. Gesvar travaille en mode de questionnement cyclique avec les « drivers » de communication et ses modules satellites.

Panorama utilise jusqu'à cinq liens de communications dynamiques dont quatre normalisés par Microsoft (DDE, DLL, Messagerie Windows et ODBC). Seul le lien ODBC (Open Data Base Connectivity) est utilisé dans cette application. Ce lien permet d'alimenter les tables des systèmes de bases de données relationnelles (SGDBR) avec des alarmes ou les événements gérés par la supervision.

Fonctionnalités

Le superviseur propose une interface homme-machine qui permet à l'opérateur de visualiser l'état du système. La supervision peut effectuer des traitements complémentaires de deuxième niveau en

interaction avec l'opérateur et son procédé ou de générer des informations supplémentaires. Cependant, ces modules de traitement n'ont pas pour objectif de remplacer les traitements de premier niveau effectués dans les automates ou les régulateurs. Le non-fonctionnement du poste de supervision ne doit en aucun cas provoquer de problèmes nuisibles à l'installation.

La fonction d'archivage mémorise dans le temps le comportement d'une installation et les données de production à travers l'archivage de tout ou partie des paramètres. Chaque variable peut ainsi être stockée ou non afin de pouvoir être analysée ultérieurement. Cependant, la conservation d'un nombre important d'archives (dus à un grand nombre de variables ou à une période de temps très longue) peut aboutir à des fichiers d'historique de taille conséquente. Cela est évitable avec Panorama grâce aux possibilités d'archivage intelligent qui aboutissent à une organisation structurée des données sauvegardées.

Le module Pegase fournit des fonctions de dépouillement utiles à la compréhension des données stockées. Il s'utilise pendant la supervision ou hors supervision.

Le logiciel Panorama est structuré pour fonctionner dans des architectures multipostes déclinables en utilisation monoposte. Cela permet d'assurer une mise en réseau automatique des postes. Chaque poste peut devenir un poste client ou serveur des autres postes. La base de données en temps réel de Panorama, Gesvar, est une base de données répartie.

Logiciel Alert

Alert détecte les dysfonctionnements du système et les franchissements de seuils. Il gère les dysfonctionnements et transmet les messages sur téléphone fixe ou mobile (mini-messages GSM, radiomessagerie, télécopieur, message électronique, minitel, navigateur internet).

Surveillance des applications et de leur environnement

Pour surveiller une application, Alert contrôle l'état des variables internes de l'application qui ont été définies dans sa liste de surveillance, par rapport à des conditions événementielles paramétrables. Un événement peut être déclaré comme alarme, avec un niveau de priorité et un groupe d'astreinte affecté. L'acquittement d'une alarme requiert toujours l'intervention d'un opérateur. Son activation et sa désactivation ainsi que son acquittement sont enregistrés dans l'historique des alarmes.

Alert peut contrôler le fonctionnement de l'interface avec l'application surveillée et déclencher une alarme si l'application ne répond plus. Les liaisons peuvent être rétablies automatiquement lorsque l'application est lancée. L'application surveillée peut aussi être relancée automatiquement par Alert en cas de détection de fermeture accidentelle. Alert peut être installé sur deux postes interconnectés en réseau ; les deux postes se surveillent alors mutuellement et, si le poste actif n'est plus capable de remplir ses fonctions (PC ou systèmes d'appel hors service), l'autre poste prend automatiquement la relève, sans délai et sans aucune perte d'informations.

Traitement des événements et des alarmes

Lorsqu'un événement est détecté (activation ou désactivation), l'information est enregistrée dans le journal des événements. Le message alphanumérique associé peut être formaté à cet instant, avec possibilité d'inclure des informations contextuelles (état courant de variables). Il est ensuite synthétisé (l'option de synthèse vocale a été retenue pour GeSSRI).

Au déclenchement d'une alarme, cette dernière est enregistrée dans la table des alarmes, avec toutes les informations contextuelles associées. Si l'option d'appel est validée pour l'alarme, les opérateurs à alerter sont sélectionnés en fonction du planning du groupe d'astreinte associé à l'alarme. En cas d'échec ou de non-acquittement de l'appel dans un délai paramétrable, l'appel est réitéré vers l'opérateur, au même numéro, puis vers son numéro de repli et enfin vers un opérateur de repli, si l'opérateur principal ne peut pas être joint. Lorsqu'un opérateur est alerté au moyen d'un média unidirectionnel (téléphone cellulaire, beep ou radio messenger), il doit signifier explicitement qu'il a pris en compte l'appel et qu'il n'est donc plus nécessaire de poursuivre le cycle d'appel en ce qui le concerne. L'acquittement d'alarme correspond à la prise en compte du problème par l'opérateur. Cet acquittement peut être effectué localement, ou à distance par téléphone (sur option) ou par Minitel (via Visual Access).

Gestion et organisation

La gestion des opérateurs, déclarations, hiérarchisation, constitution des groupes de permanences, d'astreintes et de repli, ainsi que les plannings sont également pris en compte par le logiciel. Toutes les fonctions de consignation (historiques, statistiques, journaux) sont également prises en compte et suivies par une main courante électronique.

Alert intègre un serveur vocal pour gérer le dialogue avec les correspondants téléphoniques. À chaque connexion, le serveur vocal accueille l'opérateur appelé ou appelant par un message d'accueil préenregistré et l'identifie en retour par le code opérateur entré sur le clavier du téléphone. Le serveur vocal propose ensuite l'écoute des messages d'alarme ou de service, l'acquiescement sélectif des alarmes (individuellement ou par groupe), l'enregistrement d'un rapport vocal, le basculement en Minitel ou la demande de rappel (contre-appel forcé sur option).

Alert est capable de prendre en charge complètement une application de contrôle à distance en lançant automatiquement cette application sur requête d'un opérateur appelant.

Application au site de Séchillienne. Principe et architecture du système GeSSRI

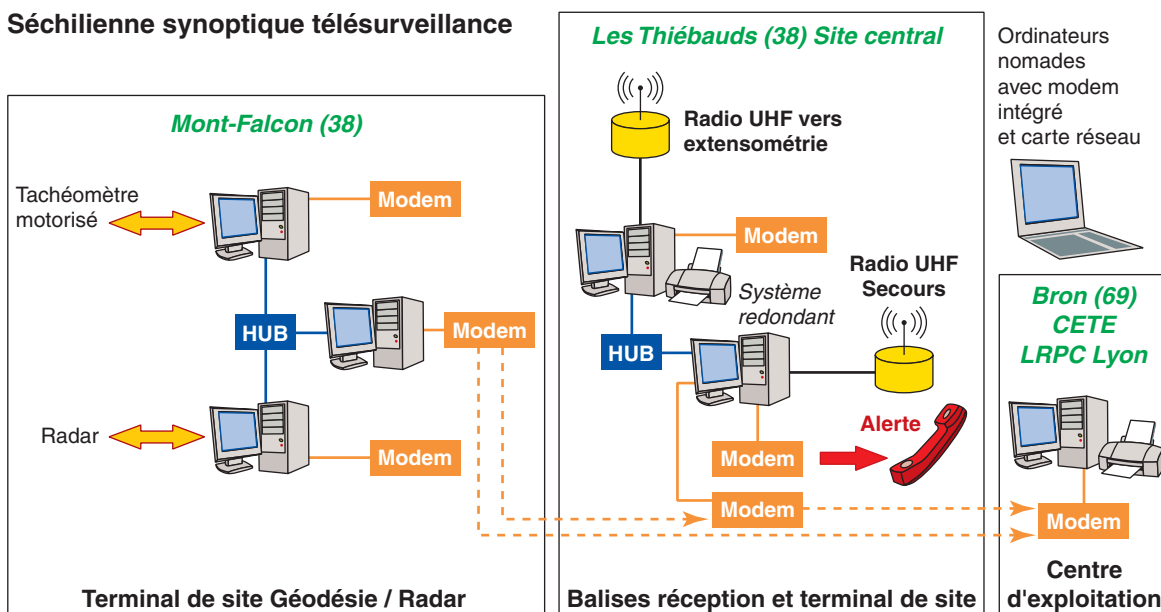
GeSSRI a permis de regrouper la supervision de l'ensemble des dispositifs dans un seul outil.

L'installation d'une structure en réseau conventionnelle n'était pas envisageable car les trois techniques de surveillance sont réparties sur deux sites distants :

- les Thiébauds pour l'extensométrie,
- Montfalcon pour la géodésie automatique et le radar.

Il s'avérait donc nécessaire de créer un noyau commun aux trois dispositifs de mesure et d'implémenter une gestion en réseau commune. Le serveur (module maître) est implanté sur le site des Thiébauds (Fig. 14). Il est équipé de deux PC redondants (fiabilité) et interroge les applications (extensométrie, géodésie, radar) pour centraliser les données et les transmettre via un modem RTC vers le centre d'exploitation du CETE de Lyon et à la demande vers les ordinateurs « nomades » (permanence de suivi). En cas de crise, le serveur du terminal de site des Thiébauds permet d'effectuer toutes les manipulations nécessaires permettant de suivre les évolutions des données et des prévisions en temps réel sur toute l'installation (Thiébauds et Montfalcon) ; il s'agit alors d'un véritable basculement du centre d'exploitation du CETE de Lyon sur le site des Thiébauds.

Séchillienne synoptique télésurveillance



■ Fig. 14

Schéma de la structure mise en place.

Pour la communication entre le site des Thiébauds et le site de Montfalcon, après avoir envisagé une solution utilisant la radio qui garantissait qu'en période de crise le support restait disponible, il a été décidé pour des raisons budgétaires d'utiliser des modems sur RTC.

Afin de pouvoir uniformiser les données issues des logiciels Panorama et Alert, celles-ci sont prises en compte, au travers d'un développement spécifique réalisé sous Delphi, pour chacune des trois sources de surveillance, mises en forme sous BD Access puis déclarées sous SQL Panorama. Cette méthode permet d'archiver les données réelles et calculées, de créer des courbes de prévision et d'évolution, afin de prévenir avec quelques heures ou quelques jours d'avance une accélération des mouvements laissant supposer l'imminence d'un effondrement en masse et d'en prévenir les effets.

Le terminal de site de Montfalcon piloté par GeSSRI est programmé pour passer automatiquement en mode autonome, en cas de défaut du serveur des Thiébauds, et envoie dans ce cas les données issues de la géodésie automatique et du radar, via un modem RTC, au centre d'exploitation des massifs rocheux instables du CETE de Lyon. Il faut noter que, sur le site de Montfalcon, l'application « extensométrie » a été supprimée de GeSSRI. Les modules déportés de la géodésie automatique et du radar peuvent également travailler en mode autonome en cas de défaillance du terminal de site de Montfalcon. Le même schéma est également appliqué pour le paramétrage à distance (seuil de prévision, graphes, etc.) et la télémaintenance.

Les alarmes supervisées sont de plusieurs types :

- alarme d'évolution entre deux mesures sur un même capteur, d'après un seuil défini et paramétrable ;
- alarme de prévision : en fonction d'une période de référence (période connue de 24 à 72 heures), on peut prédire par une régression linéaire l'évolution « normale » pour les prochaines heures. Une alarme est déclenchée dès que l'on s'écarte de cette tendance ;
- alarme si le serveur principal est hors service (HS) et que le serveur de secours a pris la main ;
- alarme sur défaut de matériel : radio HS ou acquisition de mesures HS.

Les alarmes vocales (via RTC) sont transmises aux techniciens de permanence ou d'astreinte qui ont des consignes à respecter en fonction de l'alarme reçue.

CONCLUSIONS

Le mouvement de Séchilienne continue d'évoluer en intensité et en extension. Depuis la dernière accélération intervenue pendant l'hiver 1998-1999, la zone frontale se confirme comme le secteur susceptible d'évoluer vers une divergence à court terme. En plus de la progression des tassements et des fissurations du terrain, l'extension de la marge ouest de ce secteur est en nette évolution. Il s'avère que les déplacements sont de plus en plus sensibles aux conditions hydrométéorologiques.

Afin de conserver la maîtrise du suivi du phénomène, le dispositif de télésurveillance fait l'objet d'adaptations régulières. Cela passe par la redondance et la diversification des techniques mises en œuvre sur le site. La gestion de l'ensemble de ces matériels est désormais supervisée par un outil informatique unique spécialement adapté aux particularités du site et intégré à la stratégie opérationnelle du suivi.

LEXIQUE

ARAMIS : logiciel d'interrogation et de transmission hertzienne des données issues de l'extensométrie

BD : base de données

CE : centre d'exploitation

CEA : centre d'études atomiques

DDE : Dynamic Data Exchange

DELPHI : logiciel de développement distribué par BORLAND

DLL : Dynamic Link Libraries

DOS : Disk Operating System (système d'exploitation de Microsoft)

GeSSRI : gestion de la surveillance des sites rocheux instables

GSM : Global System Mobile

MODEM : modulateur/demodulateur

NT : système d'exploitation de Microsoft
ODBC : Open Data Base Connectivity
OLE : Object Linking and Embedding (technique Microsoft)
PcANYWHERE : logiciel de télémaintenance distribué par Symantec
RAS : Remote Access Service (protocole Microsoft)
RNIS : réseau numérique à intégration de service
Routeur : matériel informatique permettant d'acheminer des données entre serveurs à travers des réseaux interconnectés
RTC : réseau téléphonique commuté
SQL : Structured Query Language
TCP/IP et NET BIOS : protocole de transmission
TS : terminal de site

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] CAUQUOT C., EFFENDIANTZ L., GUILLOT S., *Galerie hydraulique et de reconnaissance géologique de Séchilienne. Rapport géologique*, CETE de Lyon, LRPC Rhône-Alpes, Université Lyon I, CNRS, Laboratoire de dynamique de la lithosphère, **2000**.
- [2] ANTOINE P., CAMPOROTA P., GIRAUD A., ROCHET L., La menace d'écroulement aux Ruines de Séchilienne, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **150-151**, **1987**, pp. 55-64.
- [3] ROCHET L., GIRAUD A., ANTOINE P., ÉVRARD H., La déformation du versant sud du Mont-Sec dans le secteur des « Ruines » de Séchilienne (Isère), *Bull. Ass. Int. Géol. de l'Ing.*, **50**, octobre **1994**.
- [4] POTHÉRAT P., ALFONSI P., Les mouvements de versant de Séchilienne (Isère). Prise en compte de l'héritage structural pour leur simulation numérique, *Rev. Fran. Géotech.*, **95/96**, 2e/3e trimestres **2001**, pp. 117-131.
- [5] ÉVRARD H., GOUIN T., BENOIT A., DURANTHON J.-P., Séchilienne Risques majeurs d'éboulement en masse. Point sur la surveillance du site, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **165**, **1990**, pp. 7-16.
- [6] LEMAITRE F., DURANTHON J.-P., EFFENDIANTZ L., *Mise en œuvre opérationnelle d'un système radar de surveillance*, Comité de recherche et développement du LCPC, **2002**.
- [7] PANET M., BONNARD C., LUNARDI P., PRESBITERO M., *Expertise relative aux risques d'éboulement du versant des « Ruines » de Séchilienne*, Rapport du collège d'experts, décembre **2000**.
- [8] VENGEON J.-M., *Déformation et rupture des versants en terrain métamorphique anisotrope. Apport de l'étude des « Ruines » de Séchilienne*, Thèse de l'université J. Fourier, Grenoble I, **1998**.
- [9] ROCHET L., *Zone instable des « Ruines » de Séchilienne. Étude du risque d'éboulement en grande masse Modélisation*, CETE de Lyon, Rapport LRPC Rhône Alpes, avril **2001**.
- [10] DURANTHON J.-P., EFFENDIANTZ L., MEMIER M., PREVITALI H., Apport des méthodes topographiques et topométriques au suivi du versant rocheux instable des « Ruines » de Séchilienne, *Rev. X Y Z*, **94**, 1^{er} trimestre **2003**.
- [11] EFFENDIANTZ L., DURANTHON J.-P., *Risque majeur d'éboulement des Ruines de Séchilienne. Point des mesures de suivi et de surveillance du site de 1985 au 31 mars 2002*, CETE de Lyon, LRPC Rhône-Alpes, avril **2002**.
- [12] PANORAMA : www.getpanorama.net et www.your-webvision.com.
- [13] ALERT : www.micromedia-int.com