



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 179215 - 644273 - v2.0

22/01/2020

Les dispositifs d'alerte appliqués aux instabilités de pente : concepts, retours d'expérience et perspectives

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toutes autres modifications qui y seraient apportées. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Ce rapport a fait l'objet d'une relecture avisée par Mme Margaret HERBAUX (Chargée de mission mouvements de terrain, Direction générale de la prévention des risques SRNH/BRNT) et M. Laurent DUBOIS (Chef de l'Unité Risque Géologiques, CEREMA Centre-Est), experts dans le domaine de la surveillance des mouvements de terrain. Ils sont remerciés pour leurs observations et remarques pertinentes qui ont contribué à améliorer le présent rapport.

Nom de la Direction en charge du rapport : Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol

Rédaction : KLEIN Emmanuelle et COCCIA Stella

Vérification : DAUPLEY XAVIER

Approbation : BIGARRE PASCAL - le 22/01/2020

Liste des personnes ayant participé à l'étude : -

Table des matières

1	Introduction	6
2	Eléments de contexte	7
2.1	Les mouvements de pente	7
2.2	Mouvement de grande ampleur et risque majeur	7
2.3	Généralités sur les dispositifs d'alerte	8
2.4	Les 4 éléments fondamentaux des dispositifs d'alerte	8
2.5	L'application aux mouvements de pente	9
2.6	Echelle locale et échelle territoriale	9
2.7	Eléments sur la politique de prévention des risques naturels majeurs	10
2.7.1	En France	10
2.7.2	En Italie	11
2.8	Ailleurs en Europe	11
3	Les dispositifs d'alerte au niveau mondial	11
3.1	Aperçu général	11
3.2	Les capteurs utilisés	13
3.3	Seuils, niveaux et zones d'alerte	14
3.3.1	La définition des seuils	14
3.3.2	Les niveaux et zones d'alerte	15
3.4	L'organisation et la gestion de l'alerte	16
3.4.1	L'algorithme décisionnel et organisationnel	16
3.4.2	La communication et la dissémination de l'alerte	16
3.4.3	La capacité de réponse	16
3.5	Les performances de ces dispositifs	17
3.5.1	Alertes manquées et fausses alertes	17
3.5.2	L'évaluation de l'efficacité	17
3.6	Eléments de coûts	18
4	Focus sur quelques dispositifs emblématiques	19
4.1	Dispositifs locaux : L'exemple de Séchilienne en France	19
4.2	Dispositifs locaux : Le cas d'Ancône en Italie	22
4.3	Dispositifs à l'échelle territoriale : le cas de Hong Kong	25
4.4	Dispositifs à l'échelle territoriale : le cas de la Norvège	27
5	Synthèse & Discussion	30
5.1	Perspectives technologiques	30
5.2	Efficacité et parties prenantes	30
5.3	Synergie et coexistence entre dispositifs	31
5.4	REX Français : bilan et propositions	32
6	Conclusions	32
7	Remerciements	33
8	Références	33

Résumé

Dans certains contextes, la seule solution pour prévenir le risque d'instabilité de pente induit par les précipitations repose sur la mise en œuvre de dispositifs d'alerte. Leur but est d'émettre des alertes au moment opportun, pour permettre d'agir et garantir la sécurité publique. Ces dispositifs sont généralement complexes et déployés selon des conditions et des moyens ciblés, adaptés au site, au phénomène redouté ainsi qu'aux enjeux et aux populations exposées. Les plus anciens remontent à la fin des années 1970 et ont pour la plupart été mis en œuvre après une catastrophe majeure, généralement sous l'égide de services ou d'agences gouvernementaux.

Avec le changement climatique et l'urbanisation croissante de territoires à risque, leur développement a progressé au cours des dernières décennies. D'abord aléa centré, ces dispositifs sont aujourd'hui davantage tournés vers les populations exposées, la capacité de réponse étant considérée par beaucoup comme la clé de leur efficacité.

Les dispositifs d'alerte appliqués aux instabilités de pente induites par les précipitations peuvent être déployés à deux échelles : locale ou territoriale. A l'échelle locale d'une seule instabilité, ils reposent principalement sur l'acquisition et l'expertise en temps réel de données qualitatives permettant d'appréhender l'évolution de l'aléa. A l'échelle territoriale, le territoire étant selon les cas une ville, une région ou même un pays, les dispositifs d'alerte peuvent couvrir plusieurs typologies d'instabilités à la fois et reposent principalement sur la surveillance des conditions météorologiques couplées à des modèles probabilistes d'instabilité. Parfois, ces deux types de dispositifs coexistent sur un même territoire, ce qui nécessite une répartition claire, cohérente et transparente des responsabilités entre les différentes parties prenantes.

Les exemples tirés de la littérature montrent que la synergie entre les dispositifs, y compris sur un même territoire, est encore trop peu développée du fait souvent de l'absence de cadre de coordination globale. La compétition entre les équipes voire les solutions techniques, ou encore la crainte de communiquer sur les fausses alertes et les alertes manquées nuisent aussi à la synergie entre les dispositifs d'alerte et au partage de connaissance entre pairs. Cela peut pénaliser le déploiement d'approches méthodologiques ou d'outils technologiques et empêcher l'émergence de standards communs. Un élément de progrès consisterait donc à développer et généraliser le retour d'expérience en s'inspirant de démarches ou cadre d'actions déjà existants dans d'autres domaines, comme le domaine industriel par exemple, ou encore dans le contexte d'autres aléas naturels.

Ce rapport se termine par quelques considérations sur la nécessité de développer une véritable culture du risque au sein de la société civile, portée par une forte volonté politique, pour entre autres faciliter l'intégration et l'acceptation des dispositifs d'alerte. Enfin, quelques recommandations applicables au contexte de la prévention des risques naturels majeurs en France sont également formulées.

Mots-clés

Mouvements de pente, alerte précoce, risque, gestion, changement climatique.

Territoire

France, Europe, Monde.

Abstract

In some contexts, the only solution to prevent slope instability risk induced by precipitation is the implementation of early warning systems. Their purpose is to issue alerts at the right time, to act and to guarantee public safety. These systems are generally complex and deployed according to targeted conditions and means. They are optimized to each site and each phenomenon and adapted to the populations at risk. The oldest dates to the late 1970s and most of them were implemented after a major disaster, usually under the aegis of public agencies.

With climate change and the increasing urbanization of territories at risk, their development has progressed in recent decades. At the beginning, these systems were focused on hazard. They are now more oriented towards exposed populations because the ability to respond is considered by many to be the key to their effectiveness.

Early warning systems applied to slope instabilities induced by precipitation can be deployed on two scales: local or territorial. At the local level of a single instability, they are mainly based on in real time processes that include acquisition and expertise of qualitative data to understand hazard evolution. At the territorial level, the territory being, depending on the case, a city, a region or even a country, the early warning systems can cover simultaneously several typologies of instabilities. They are then mainly based on the monitoring of meteorological conditions coupled with probabilistic models of instability. Sometimes, local and territorial systems coexist on the same territory, which requires a clear, consistent and transparent responsibilities distribution between the different stakeholders.

The examples from the literature show that the synergy between systems coexisting on the same territory suffers from the lack of a global coordination framework. Competition between teams or even technical solutions, or the fear of communicating about false or missed alerts also adversely affects the synergy between systems and the sharing of knowledge between peers. It also penalizes the deployment of methodological approaches or technological tools and prevents the appearance of common standards. One element of progress would then consist in developing and generalizing feedback. One easy way would be to draw inspiration from approaches already existing in other domains, such as the industrial field, or in the context of other natural hazards.

This report ends with some reflections on the need to develop an appropriate risk culture within civil society to facilitate the integration and acceptance of early warning systems requires. Some recommendations applicable to the context of the prevention of major natural risks in France are also formulated.

Keywords

Slope instability, early warning system, risk, management, climate change.

Territory

France, Europe, World.

1 Introduction

Indépendamment des effets du changement climatique, on observe au niveau mondial une vulnérabilité croissante de nos sociétés aux risques naturels (par exemple en Haïti en 2010, au Japon en 2011 et 2016, au Népal en 2015, ou encore en Suisse en 2017). Cette vulnérabilité croissante s'explique notamment du fait de la dynamique démographique et de l'urbanisation croissante de territoires à risque.

Parmi les événements naturels dommageables (source : catnat.net), les séismes et les mouvements de terrain représentent ~15% des pertes économiques et humaines mondiales et les mouvements de pente y contribuant à hauteur de 17%. Par ailleurs, on constate que de nombreux mouvements de pente récents qui ont occasionné des pertes humaines et économiques importantes (Yin et al., 2009), sont survenus à la suite d'événements climatiques dits extrêmes. Ces événements se caractérisent par des pluies diluviennes et parfois de longue durée.

Dans certains contextes, typiquement en présence de mouvement de grande ampleur ou de risque majeur, la seule solution pour prévenir le risque d'instabilité de pente repose sur la mise en œuvre de dispositifs d'alerte. Leur but est d'émettre des informations précises d'alerte, au moment opportun, pour permettre d'agir et de réduire les dommages et les pertes. Généralement, cette mesure de mitigation du risque est menée selon des conditions et des moyens ciblés, adaptés au site, au phénomène redouté et ainsi qu'aux enjeux et aux populations exposées.

Les dispositifs les plus documentés sont à l'heure actuelle ceux qui sont dédiés aux instabilités induites par les précipitations.

Ce rapport, réalisé dans le cadre de la mission d'appui de l'Ineris aux pouvoirs publics, a pour objectif d'établir une synthèse bibliographique et un retour d'expérience international des dispositifs d'alerte appliqués aux mouvements de pentes induits par les précipitations. Il s'appuie sur la littérature scientifique disponible ainsi que sur les informations collectées lors d'échanges avec des opérateurs en charge de la gestion de dispositifs d'alerte opérationnels en Europe.

Pour bien situer le cadre de cette étude, ce rapport débute par quelques éléments de contexte sur les dispositifs d'alerte et leurs composantes fondamentales. Nous verrons ainsi que depuis la fin des années 1970, période à laquelle les premiers dispositifs ont été déployés, les contours de ces dispositifs ont évolué. Un dispositif d'alerte est à ce jour un ensemble d'outils et de processus intégrés qui inclut la sensibilisation et la préparation des populations à l'action. Les dispositifs scientifiques d'observation (par exemple l'OMIV en France) ne sont donc pas couverts par cette étude, ni les systèmes de surveillance qui ne couvrent pas la question de la capacité de réponse. Cette distinction et cette approche rejoignent celle proposée par Guzzetti et al. (2019).

Un dispositif d'alerte peut être déployé à l'échelle d'un versant ou à l'échelle d'un territoire, selon des approches différentes. Nous verrons qu'il n'existe pas de dispositifs complètement automatisés ; l'expertise humaine étant toujours un facteur fondamental pour garantir le bon fonctionnement de ces dispositifs. Parfois les dispositifs locaux et régionaux coexistent sur un même territoire, ce qui peut conduire à des difficultés en l'absence de cadre global de coordination. Un focus sur quatre dispositifs emblématiques, ceux des Ruines de Séchilienne en France et d'Ancône en Italie, à l'échelle locale, et ceux de Norvège et de Hong-Kong en Chine, à l'échelle territoriale, permettra d'illustrer les conditions et cadres dans lesquels ces différents dispositifs sont opérés.

En fin de rapport, les questions relatives à l'efficacité et aux synergies entre dispositifs et approches sont évoquées, ainsi que les pistes actuelles de développement. Celles-ci sont d'ordre technologique avec, par exemple l'apport espéré de techniques d'apprentissage par intelligence artificielle en appui à l'expertise humaine et aux modèles de prévisions basés sur la physique des phénomènes en jeu. Des réflexions autour de l'évaluation et de l'amélioration de l'efficacité des dispositifs sont également proposées. Ce rapport se termine par quelques recommandations applicables au contexte de la prévention des risques naturels majeurs en France.

2 Eléments de contexte

2.1 Les mouvements de pente

Les mouvements de pente regroupent plusieurs typologies d'instabilités qui se différencient selon la nature des matériaux mis en jeu, les volumes mobilisés, le mécanisme d'évolution et la cinétique.

Il existe différentes classifications dans la littérature (Varnes (1978), Flageollet (1988) ou encore Dikau et al, (1996a)), qu'il n'apparaît pas utile de présenter ici, la plus connue étant sans doute celle de Varnes.

Du point de vue de l'analyse et de la mitigation du risque, l'élément déterminant est la vitesse de déplacement. En effet, la vitesse intervient directement dans l'appréciation du niveau de vulnérabilité. Cette dernière augmente avec la vitesse de déplacement. En d'autres mots, les mouvements de pente rapides occasionnent davantage de victimes que les mouvements lents à volumes en jeu égaux (Maquaire, 2002). Les conséquences des mouvements rapides sont, par ailleurs, d'autant plus destructrices que les volumes mobilisés sont importants.

Les vitesses de déplacement peuvent être estimées et mesurées plus ou moins précisément. Sept classes de vitesse (de extrêmement lent à extrêmement rapide, de moins de 16 mm/an à plus de 5 m/sec) ont été proposées par Cruden et Varnes (1996). A chaque classe correspond différents types d'impacts en termes de vies humaines ou de dégâts aux constructions. La classe 1 est celle caractérisée par des mouvements imperceptibles par l'être humain qui ne sont remarqués que grâce à la surveillance instrumentale. La classe 7 correspond à la catastrophe majeure.

2.2 Mouvement de grande ampleur et risque majeur

L'existence d'un risque naturel majeur apparaît par croisement d'un aléa naturel et de la vulnérabilité du territoire, c'est-à-dire de l'ensemble des personnes et des biens pouvant être affectés par le phénomène naturel en jeu.

Il se caractérise par une faible fréquence d'occurrence et par son énorme gravité, dont les effets peuvent mettre en jeu un grand nombre de personnes, occasionnent des dommages importants et dépassent les capacités de réaction des instances directement concernées.

Deux types de mesures, structurelles et non-structurelles, sont généralement mises en œuvre pour réduire le risque, comme illustré en Figure 1. Le choix se fait, au cas par cas, selon la faisabilité technique ou encore des budgets alloués.

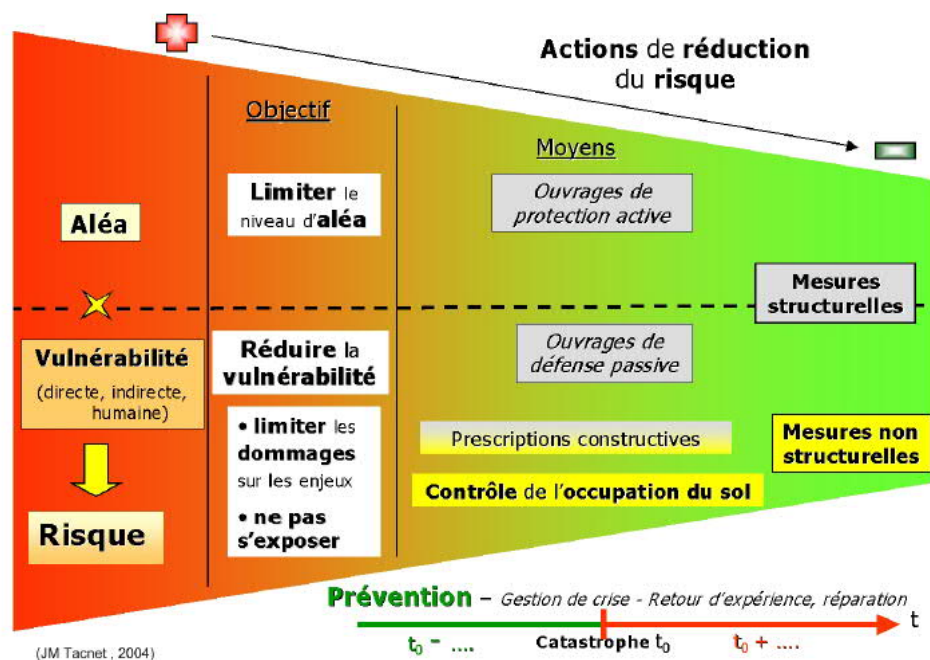


Figure 1 : notion de risque et mesures de réduction, d'après Tacnet, 2004.

Les mesures structurelles correspondent à la mise en place d'ouvrages de protection, qui visent à limiter de manière active l'intensité du phénomène (aléa) en agissant sur les causes du phénomène ou en limitant les conséquences ou effets sur les enjeux dans le cadre de stratégies passives.

Les mesures non structurelles comprennent les prescriptions constructives, le contrôle de l'occupation du sol et le déploiement de dispositifs d'alerte (Tacnet, 2004 et Fell et al., 2015).

2.3 Généralités sur les dispositifs d'alerte

Les premiers développements autour des dispositifs d'alerte dans le domaine des risques naturels remontent aux années 1970 et l'on estime aujourd'hui que leur mise en œuvre a permis de diminuer significativement le nombre de victimes de mouvements de terrains.

Conçus d'abord comme des outils aléas centrés, ils apparaissent aujourd'hui comme une solution efficace de réduction du risque, car davantage tournés vers les populations exposées. Ils bénéficient de ce fait d'une attention croissante de la part des instances gouvernementales et des institutions internationales.

Ainsi, dès les années 2000, la Commission Européenne entreprend de soutenir le développement des dispositifs d'alerte appliqués aux risques naturels (Alfieri et al., 2012). L'objectif est alors d'améliorer la prévention, l'état de préparation, la protection, la réponse aux désastres naturels et de promouvoir la recherche et l'acceptation des mesures de prévention des risques naturels dans la société.

En 2005, l'organisation des Nations Unies lance un cadre d'actions 2005-2015, via l'UNISDR¹, visant notamment à la mise en place d'un « système global d'alerte précoce pour l'ensemble des menaces naturelles » (Revet, 2009). En 2009, l'UNISDR propose de définir les dispositifs d'alerte comme suit : « *ils sont l'ensemble des compétences nécessaires pour produire et diffuser des informations d'alerte en temps opportun et significatif pour permettre à des individus, des communautés et des structures menacés par un danger de se préparer et d'agir de manière appropriée et en temps suffisant pour réduire la possibilité de dommages ou de perte* ».

Le soutien des institutions internationales s'accompagne par ailleurs du lancement de deux plateformes d'information :

1. l'une par l'UNISDR¹ dédiée à la promotion et au développement de ces dispositifs accessible via <http://www.unisdr.org/2006/ppew/> ;
2. l'autre par l'UNESCO² qui recense les dispositifs d'alerte précoce pour les risques naturels <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/special-themes/disaster-risk-reduction/geohazard-risk-reduction/early-warning-systems/>.

2.4 Les 4 éléments fondamentaux des dispositifs d'alerte

Selon les principes portés par les Nations Unies, un dispositif d'alerte précoce est efficace s'il conduit à une réaction adaptée de la population exposée. Pour ce faire, il doit être basé sur les quatre éléments fondateurs suivants, étroitement liés entre eux (UNISDR, 2006a et 2006b ; Basher et al., 2006, etc.) :

- la bonne connaissance du risque : qui nécessite à la fois une bonne connaissance de l'aléa et de la vulnérabilité ;
- la surveillance et l'alerte : qui requiert d'identifier précisément les paramètres à suivre d'un point de vue instrumental, et d'estimer avec la plus grande finesse possible leurs évolutions pour permettre la définition de seuils d'alerte compatibles avec des mesures de réduction de risque ;
- la dissémination et la communication auprès des populations exposées : qui se fait par des canaux d'information adaptés et selon des modalités connues et comprises par tous. Elles supposent également un bon niveau de préparation en amont de l'alerte ;
- la capacité de réponse : qui repose sur la construction et la mise en œuvre de plans de réponse / urgence régulièrement testés en termes de pertinence / faisabilité et admis par l'ensemble des parties prenantes, y compris les autorités.

¹ United Nations Office for Disaster Risk Reduction

² Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture

Notons qu'avec le cadre d'Actions de Sendai 2015-2030, l'ONU³ entend mettre davantage encore l'accent sur la prévention, la gestion et la réduction des risques de catastrophe plutôt que sur la gestion des catastrophes une fois celles-ci survenues. En ce sens, l'amélioration de la compréhension de tous, des facteurs de risques de catastrophe, est considérée comme un point clé de la réduction du risque.

2.5 L'application aux mouvements de pente

La Figure 2 illustre l'évolution de l'approche déployée dans le cas de mouvements de pente, entre 2007 et 2013. En 2007, les dispositifs d'alerte étaient aléa centré et la principale difficulté identifiée dans leur mise en œuvre était la définition des seuils d'alerte adéquats (Di Biagio & Kjekstad, 2007). En 2013, l'approche s'est orientée vers une meilleure implication de l'ensemble des parties prenantes, notamment la population exposée (Intrieri et al., 2013) qui est placée au rang d'acteur de la prévention du risque.

Cette évolution d'approche, pour le cas spécifique des mouvements de pente, est donc bien en adéquation avec les considérations d'ordre général présentées dans la section précédente. Elle a été possible du fait notamment des évolutions technologiques au cours des dernières décennies, du retour d'expérience et d'analyses de cas menées dans quelques pays. Par exemple, en Italie du nord (à Valtellina di Tirano) des études menées dans le cadre du projet européen « Risques en Montagne » (Garcia, 2011 ; Garcia et al., 2012) ont montré que l'élément clef pour réduire l'impact des mouvements de pentes et des risques naturels en général dans la société est bien la capacité de réponse, c'est-à-dire la préparation de la société à bien répondre, via l'éducation et l'information.

UNISDR (2006)	Di Biagio and Kjekstad (2007)	Bell et al. (2009)	Intrieri et al. (2013)	Calvello et al. (2015)	Fathani et al. (2016)	Calvello (2017)
Risk knowledge			Planning	Decision making	Risk knowledge	Components of landslide model (part of warning model and warning system)
Monitoring and warning service	Monitoring Analysis and forecasting Warning	Monitoring Modelling	Monitoring Forecasting	Monitoring Modelling Warning	Monitoring and Warning	Components of warning model (part of warning system)
Dissemination and communication		Implementation			Dissemination and communication	Other components of warning system
Response capability	Emergency plan			Emergency plan	Response capability	
			Education	Education		

Figure 2 : comparaison entre la définition donnée par le UNISDR (2006) pour tous les risques naturels et les différents schémas proposés dans la littérature, pour les mouvements de pente, organisée en termes de similitudes et différences (modifiée à partir de Piciullo et al, 2018).

2.6 Echelle locale et échelle territoriale

Dans le cas de mouvements de grande ampleur, les dispositifs d'alerte sont généralement déployés à l'échelle locale, et reposent principalement sur la collecte en quasi-temps réel des grandeurs physiques les plus pertinentes pour appréhender l'évolution du site, ainsi que les facteurs déclenchants extérieurs.

L'échelle dite locale (Thiebes, 2011 ; Thiebes et al., 2012 ; Calvello et al., 2015b, 2016 ; Thiebes et Glade, 2016, Piciullo et al, 2018 et Pecoraro et al., 2018) s'applique donc à l'échelle d'un versant sur lequel une seule typologie de mouvement de pente est rencontrée.

L'échelle dite régionale (Thiebes, 2011 ; Thiebes et al., 2012 ; Calvello et al., 2015b, 2016 ; Thiebes et Glade, 2016, etc.) ou territoriale (Piciullo et al., 2018) s'applique à une région, à une municipalité, ou même à un pays. Elle peut de ce fait couvrir plusieurs typologies d'instabilités à la fois (Cloutier et al., 2015). L'approche mise en œuvre repose alors principalement sur la surveillance météorologique et consiste à estimer la probabilité d'occurrence des mouvements de pente.

Le dispositif d'alerte territorial permettra, donc, difficilement d'identifier le(s) versant(s) précis où se produira la rupture (Thiebes et Glade, 2016).

³ Organisation des Nations Unies

2.7 Eléments sur la politique de prévention des risques naturels majeurs

2.7.1 En France

En France, la politique de prévention des risques naturels repose sur un cadre législatif en évolution, dont les principales dispositions ont été prises à la suite de catastrophes majeures.

Les jalons marquants de cette évolution sont présentés en Figure 3. Le premier intervient avec la loi de 1982 qui instaure les plans d'exposition aux risques (PER) et qui crée le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles. Le second correspond à la loi de février 1995 qui remplace les PER par des PPR (plans de prévention des risques) plus flexibles et qui instaure le fonds de prévention des risques naturels majeurs (FPRNM), ou fonds Barnier, pour renforcer et unifier l'action de prévention. En juillet 1987 ensuite, l'article L 125-2 du code de l'environnement impose le droit des citoyens à être informés sur les risques majeurs auxquels ils sont exposés et sur les mesures de sauvegarde qui les concernent. En juillet 2003 enfin, la loi sur les risques technologiques se traduit aussi par des effets dans le domaine des risques naturels.

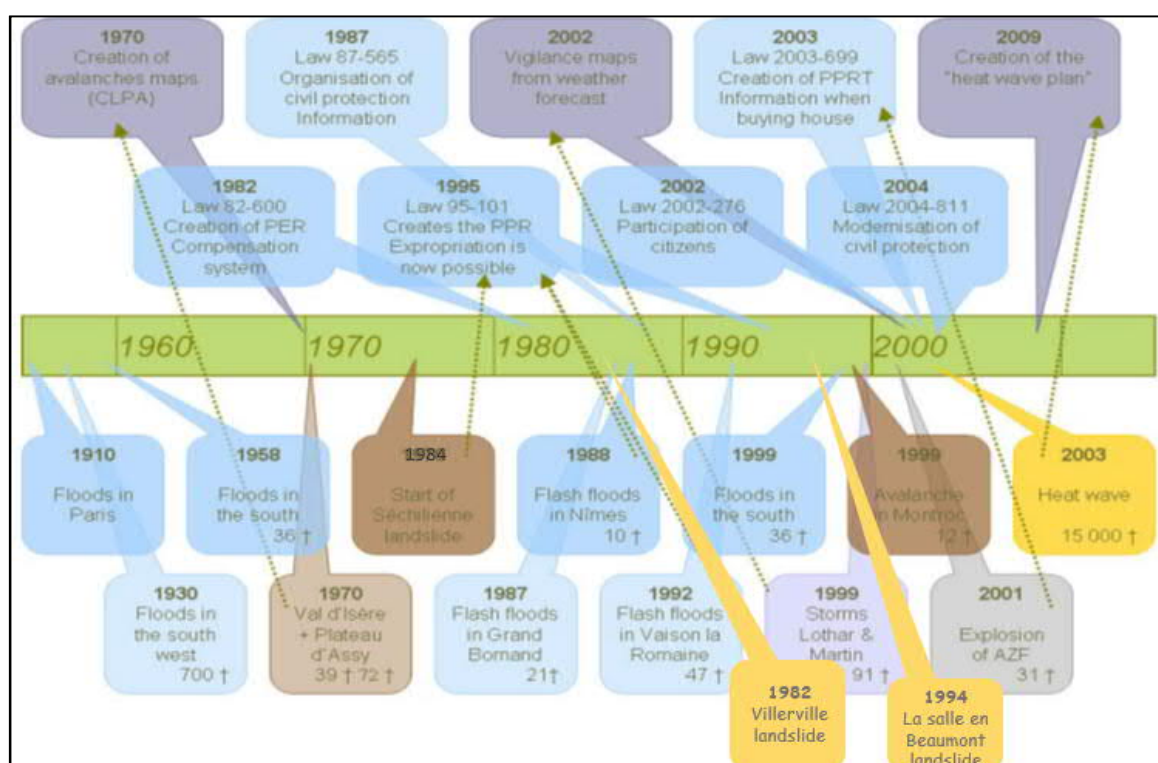


Figure 3 : évolution du cadre législatif en France, entre 1960 et 2010 (source : projet FP7 Safeland).

La mise en œuvre de cette politique de prévention des risques naturels repose aujourd'hui encore sur une organisation centralisée et sur une compétence partagée, impliquant l'Etat et ses services déconcentrés, les collectivités territoriales et les citoyens.

Face à un risque majeur de mouvement de terrain de grande ampleur, l'action de l'Etat comprend l'organisation de la surveillance et l'alerte. L'Etat participe ainsi, par l'intervention de ses services ou au travers de subventions accordées aux collectivités locales, au déploiement et à la gestion de dispositifs d'alerte. Ces dispositifs constituent généralement une solution temporaire de maîtrise du risque, visant à garantir la sécurité des personnes le temps que des dispositions pérennes soient prises (expropriation des populations exposées, réalisation de confortement, ouvrage de protection, etc.).

Parmi les différents glissements de terrain et éboulements, on recense aujourd'hui en France, quatre mouvements de terrain majeurs actifs : Roquebillière, Combelouvière, celui des Ruines de Séchillienne (présenté en section 4.1), et celui de La Clapière (Trielli, 2014). Les deux derniers ont fait l'objet d'études et de travaux financés dans le cadre du fonds Barnier (cf. article 38 de la loi de finances rectificative de

1997). Ils ont également bénéficié de financement DGPR⁴ (Bop 181 et subvention dans la cadre de la programmation nationale des opérateurs de l'État).

2.7.2 En Italie

La situation en Italie est très différente de celle de la France du fait de son contexte géomorphologique et géologique, propice aux instabilités de pente et de versant.

Les premiers éléments de cadrage réglementaire sont de ce fait apparus très tôt, dès 1904 et n'ont cessé de se renforcer au cours du siècle passé, souvent à la suite, d'événements catastrophiques. Ce cadre législatif a été marqué en 1982 par la création du Département de la Protection Civile Nationale (DPCN), puis s'est orienté vers une approche intégrée du risque d'inondation et du risque de mouvements de terrain. Retenons aussi que depuis le début des années 2000, l'organisation centralisée a laissé la place à une gouvernance à plusieurs échelles qui reconnaît la contribution d'un grand nombre de parties prenantes.

Cette politique de prévention des risques et son organisation ont conduit au développement de dispositifs d'alerte à différentes échelles (à l'échelle communale, provinciale, ou encore régionale), sous l'autorité de différentes instances. Ainsi, l'Italie compte aujourd'hui 21 dispositifs d'alerte parmi lesquels ceux d'Emilie Romagne (Berti et al., 2012 ; Lagomarsino et al., 2013), du Piedmont (Tiranti et Rabuffetti, 2010), de Campanie (DPGR n. 299/2005), de Toscane (lois régionales DGR n. 895/2013 et DGR n. 395/2015), d'Ombrie (loi régionale DGR n. 2312/2007, Ponziani et al., 2013 ; Francesco, 2010) ou encore de Sicile (loi régionale DPRS n. 626/2014), etc.

Cette situation a conduit le DPCN, à éditer en 2016, un guide opérationnel⁵ visant à harmoniser les niveaux de criticité et d'alerte, ainsi que les messages d'alerte. Ils sont maintenant caractérisés par des codes couleurs (jaune, orange et rouge) et pour chacun de ces niveaux, l'événement associé et le scénario de risque sont décrits. Aucun élément de cadrage quant à la définition de seuil ou de critère d'alerte n'a en revanche été fixé. Chaque instance est donc libre de faire ses propres choix sur la base de la connaissance du phénomène et de l'expertise acquise.

2.8 Ailleurs en Europe

D'une manière générale, on observe que les pays les plus exposés sont les plus avancés en matière de législation et d'organisation, mais globalement beaucoup reste à faire. Les avancées dans les politiques nationales de gestion des risques naturels interviennent malheureusement généralement à la suite d'événements traumatisants. La Norvège fait en ce sens cas d'école, car certaines dispositions, comme l'installation du dispositif prototype d'alerte sur le site Åknes, ont été prises sous la pression répétée des populations et des médias.

3 Les dispositifs d'alerte au niveau mondial

3.1 Aperçu général

La Figure 4 présente une cartographie non exhaustive des dispositifs d'alerte déployés à l'échelle territoriale établie par Piciullo et al. (2018) sur la base de la littérature scientifique disponible. La moitié d'entre eux a été déployée à la suite d'un événement catastrophique consécutif à des pluies intenses (voir les rectangles rouges dans la Figure 4). On relève également que selon les cas, les zones couvertes sont de dimensions très variables : les dispositifs couvrent aussi bien une région (12 dispositifs), une grande métropole (6 dispositifs), ou un pays (5 dispositifs nationaux). A cette échelle également, les typologies d'instabilités sont variées et concernent aussi des instabilités de pentes artificielles comme par exemple au Sri Lanka, au Bangladesh et à Hong Kong.

La Figure 5 présente une cartographie de dispositifs à l'échelle locale établie par Pecoraro et al. (2018), également sur la base de la littérature scientifique disponible. On retiendra que la typologie de l'aléa

⁴ Direction Générale de la Prévention des Risques

⁵ Voir http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_prov.wp?request_locale=it&contentId=LEG56184

surveillé n'est pas toujours connue, mais dans la plupart des cas il s'agit de pentes naturelles, et souvent de glissements superficiels et de coulées de boue à vitesse rapide (Cruden et Varnes, 1998).

Pour certains, ces dispositifs constituent une suite à des projets de recherche. La transition s'opère lorsque la connaissance de l'aléa est satisfaisante et que les conditions et modalités d'alerte sont parfaitement maîtrisées par les experts. Citons par exemple, les travaux conduits en 2007 dans le cadre du projet allemand ILEWS (Integrative Landslide Early Warning Systems), dont l'objectif principal était le développement et l'implémentation d'une nouvelle conception des dispositifs intégrant davantage la composante humaine (Bell et al., 2008 ; Thiebes et al., 2012).

De ces cartographies, l'on constate que l'Italie apparaît comme un cas tout à fait singulier, puisque le dispositif d'alerte national (qui s'appelle le SANF⁶) coexiste avec des dispositifs régionaux, intégrant eux-mêmes des dispositifs locaux appliqués à l'échelle d'un seul et unique versant (voir aussi section 2.7.2).

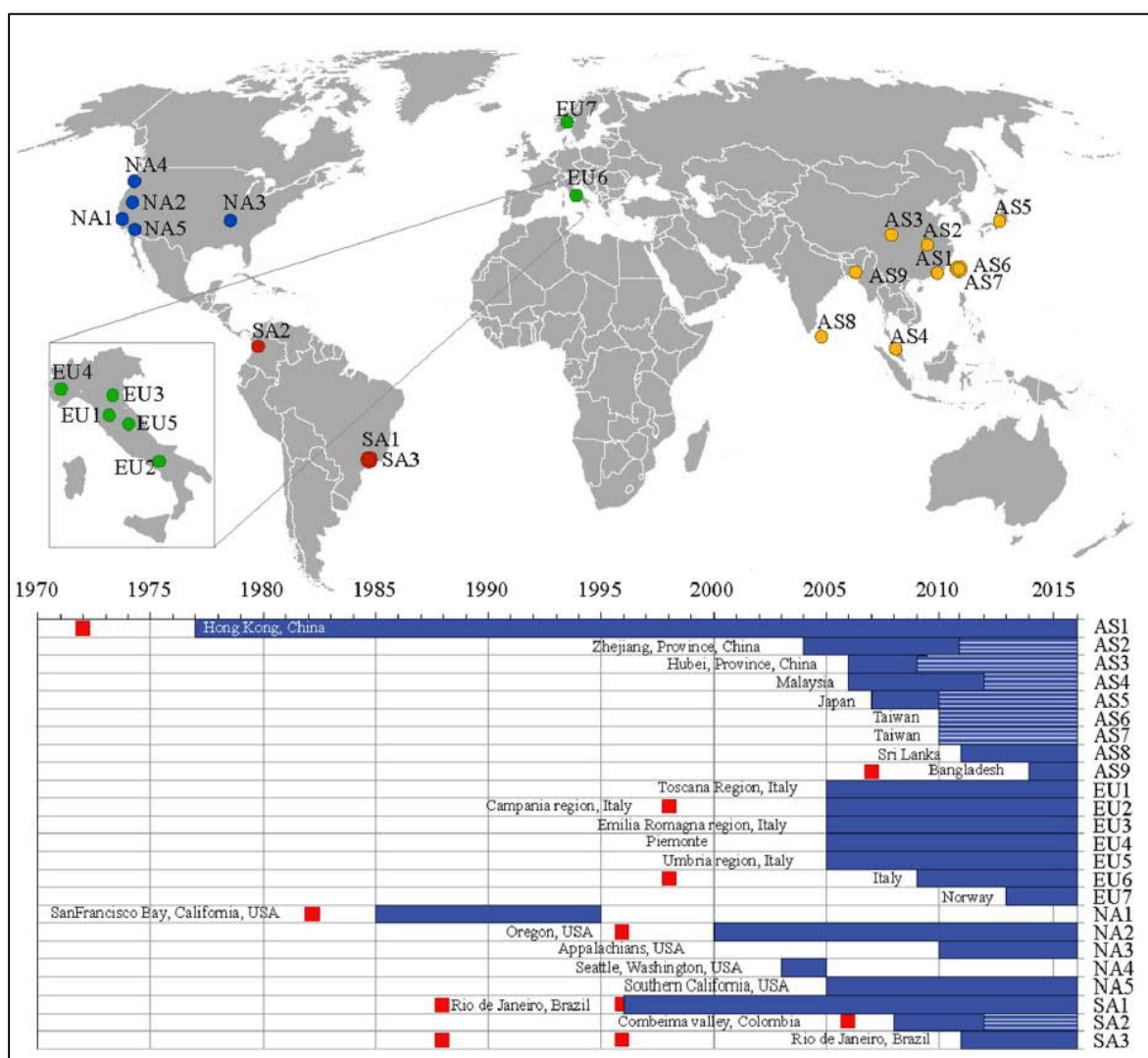


Figure 4 : en haut, cartographie des dispositifs déployés à l'échelle territoriale ; en bas, informations sur le fonctionnement (les rectangles rouges indiquent les dispositifs nés à la suite d'une catastrophe, la date de la catastrophe correspond à la position du rectangle (d'après Piciullo et al., 2018)).

⁶ Sistema d'allertamento Nazionale per la previsione di frane indotte dalla pioggia in Italia (Dispositif d'alerte national pour la prévision des mouvements de pentes induits par la pluie en Italie) <http://sanf.irpi.cnr.it/>

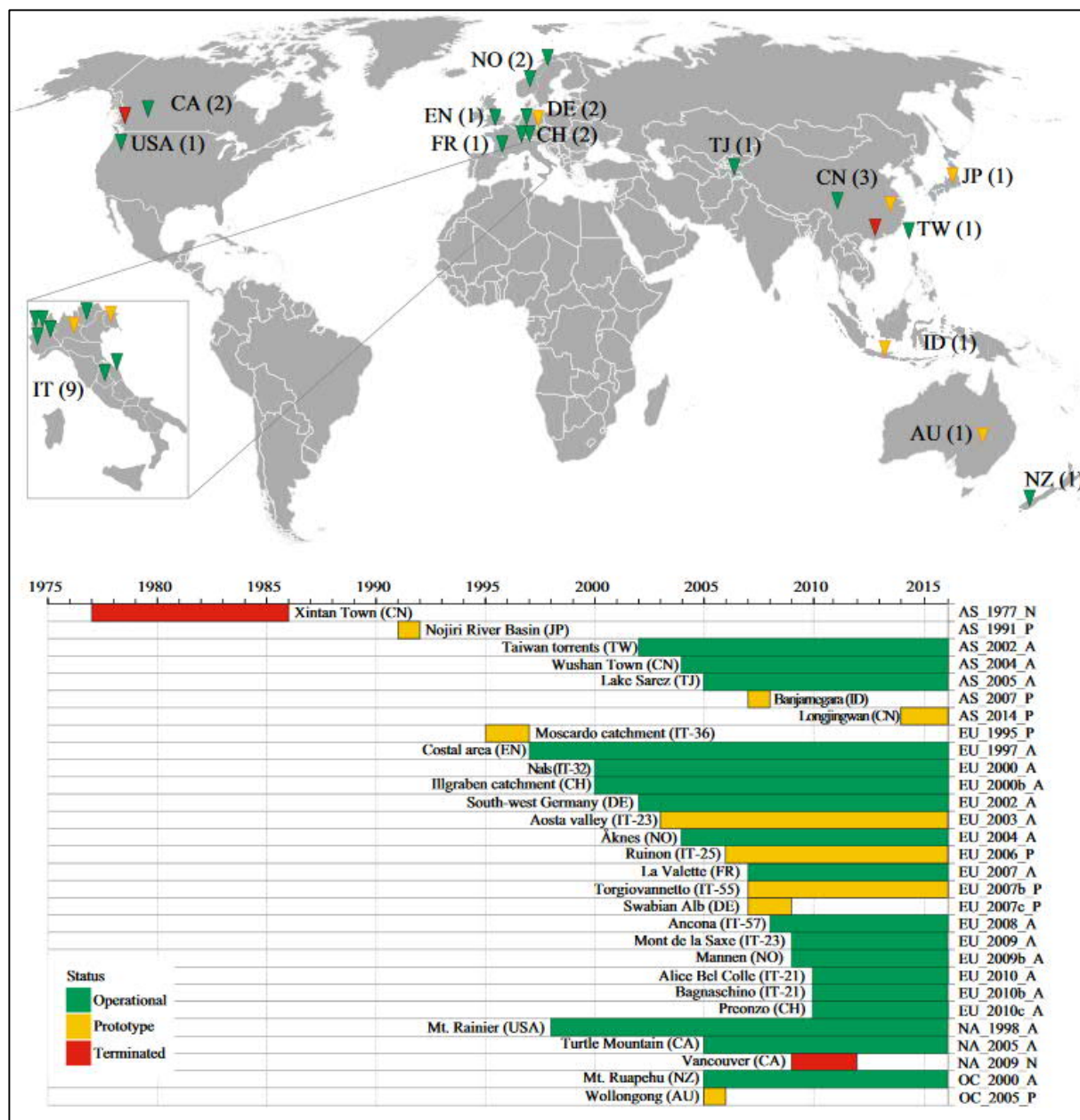


Figure 5 : en haut, cartographie des dispositifs d'alerte déployés à l'échelle locale ; en bas, état d'activité des dispositifs (d'après Pecoraro et al., 2018).

3.2 Les capteurs utilisés

A l'échelle locale, il est aujourd'hui courant de déployer des systèmes de surveillance multi-paramètres pour suivre de manière combinée l'ensemble des interactions physiques susceptibles de précéder et déclencher le phénomène redouté (Ornstein et al., 2007, Klein et al., 2013, Klein et al., 2014, etc.). Le choix précis des instruments, de leur nombre, de leur positionnement, etc. est à définir selon les conditions de chaque site, y compris en termes d'enjeux, de contraintes techniques environnementales et de moyens financiers. Cela étant, les variables mesurées sont généralement de deux types (Ifsttar et Cerema, 2016) :

- les grandeurs qui permettent de caractériser les mouvements, comme les déplacements en translation ou en rotation, les vitesses ou accélérations et ainsi que les déformations ;
- les variables d'influence, comme les variables météorologiques et hydrologiques (précipitations, températures etc.), variables hydrogéologiques (niveaux piézométriques, pressions interstitielles,

succion, etc.) et vibrations externes anthropiques (tirs de carrière) ou naturelles (séismes). Ces variables ne traduisent pas directement l'activité du versant et le choix de les mesurer dépend de la connaissance du comportement du site. Bien évaluées, elles sont utiles à la gestion du risque.

La Figure 6 présente les types de capteurs selon les paramètres à mesurer. Les principes de mesure de ces différents capteurs sont présentés à la fois dans Bouffier et al. (2016) et dans le Guide technique Ifsttar et Cerema (2016).

Grandeurs physiques	Capteurs	Applications
Déplacement et déformation	Fissuromètre, Extensomètre, Mire à vernier	Ouverture d'une fissure entre deux blocs
	Distancemètre	Distance d'un point par rapport à un point de référence
	Pendule inverse	Déplacement transversal de la surface par rapport à une zone scellée en fond de trou
	Fibre optique	Déformations réparties sur un grand linéaire
	Tachéomètre	Position relative d'un point dans l'espace
	GPS	Positions relative et absolue d'un point
	RADAR	Distance d'une multitude de points par rapport à un point de référence
	Scanner laser	Position d'une multitude de points
Rotation	Clinomètre (dont nivelle)	Rotation par rapport à l'horizontale
	Inclinomètre	Rotation par rapport à la verticale
Vibration	Vélocimètre / Accéléromètre	Vitesse / Accélération particulière
	Géophone	Vitesse particulière
Précipitation	Pluviomètre	Hauteur de pluie
	Nivomètre	Hauteur de neige
Hauteur d'eau	Limnigraphe	Hauteur d'eau dans un cours d'eau
	Piézomètre	Hauteur de la nappe
Pression interstitielle	Capteur de pressions interstitielles	Pressions interstitielles
Débit	Débitmètre	Débit d'un cours d'eau ou d'un drain
Température	Sonde de température	Température

Figure 6 : grandeurs physiques mesurées et capteurs associés pour la surveillance opérationnelle d'un versant instable (source Guide technique Ifsttar et Cerema, 2016).

A l'échelle territoriale, les pluviomètres automatiques sont les capteurs les plus utilisés (Piciullo et al., 2018), néanmoins beaucoup de dispositifs intègrent des radars météorologiques, notamment dans les pays asiatiques touchés par les moussons et les typhons (comme au Japon et Hong Kong).

3.3 Seuils, niveaux et zones d'alerte

3.3.1 La définition des seuils

L'une des principales difficultés dans la mise en œuvre de dispositifs d'alerte concerne la définition des seuils, un seuil correspondant à la limite à partir de laquelle un processus se manifeste ou qu'un changement d'état ne s'opère (White et al., 1996). C'est une étape critique puisque l'intérêt est de détecter une situation à risque tout en minimisant les fausses alertes.

La définition d'un seuil repose à la fois sur la fiabilité des mesures collectées et sur la capacité à prévoir à quel moment ce seuil sera atteint. De ce fait, elle doit tenir compte du retour d'expérience et de la bonne connaissance de l'aléa en jeu. Surtout, elle doit reposer sur des algorithmes et des procédures standard connus et reconnus par tous. Le but est d'assurer l'objectivité et la reproductibilité de la méthode proposée pour que la mise à jour périodique des seuils soit facile et rapide (Segoni et al., 2018).

Pour les mouvements de pente induits par les précipitations, les seuils de pluie peuvent être déterminés à l'échelle locale ou régionale (dans ce cas on parle aussi de seuil global) de façon empirique (statistique ou historique) ou déterministe (basé sur des modèles physiques qui prennent en compte des modèles d'infiltration).

Les seuils empiriques sont les moins compliqués à déterminer et pour cette raison les plus utilisés (Guzzetti et al., 2017). Leur détermination nécessite principalement l'historique des précipitations sur des périodes de l'ordre de 15 à 90 jours. Deux paramètres sont généralement considérés : l'intensité de pluie, qui est la quantité de pluie accumulée pendant une période de temps et le taux de pluie sur une période qui généralement est mesuré en millimètres par heure. Dans ce cas, on parle de seuil de type Intensité-durée (ID) introduit par Caine (1980). Une étude conduite par Guzzetti et al. (2007) présente différentes façons de calculer les seuils empiriques de type Intensité-durée pour différents types de mouvements de pentes et pour 52 zones en Europe. Certains de ces seuils, ainsi calculés, ont été intégrés aux dispositifs d'alerte présentés en Figure 4. C'est le cas pour 14 des 22 dispositifs présentés.

A l'échelle locale, les mesures de pluie sont généralement couplées aux mesures de déplacements, qui caractérisent l'évolution de l'aléa (Pecoraro et al., 2018). Le critère considéré comme le plus significatif est celui basé sur la vitesse de déplacement, dérivée de la mesure de déplacement sur une période de temps à préciser (heure, jour). L'accélération des déplacements en revanche est plus difficile à calculer et n'est pas toujours représentative d'une évolution qui peut être critique (Maquaire, 2002).

Notons qu'à l'échelle locale, il est conseillé d'utiliser la pluie efficace ou la pression interstitielle plutôt que les précipitations brutes quand cela est possible, car elles rendent mieux compte de l'infiltration des eaux de pluie dans les terrains. Cela nécessite cependant d'avoir à disposition un modèle hydrogéologique et un suivi piézométrique.

D'autres informations peuvent être aussi couplées aux seuils choisis, comme par exemple les cartes de susceptibilité, les inventaires de mouvements de pente, les relevés de terrain, etc.

3.3.2 Les niveaux et zones d'alerte

Un ou plusieurs seuils peuvent être utilisés pour établir un niveau d'alerte et il existe au minimum 2 niveaux d'alerte pour couvrir les situations qui dépassent le cadre normal : la situation de vigilance et la situation de danger imminent. On parle, communément d'alarme comme dernier niveau de l'alerte. En d'autres mots, l'alarme annonce un danger imminent et elle entraîne l'activation de mesures d'urgence.

On constate dans la pratique que le nombre de niveaux d'alerte est très variable d'un dispositif à l'autre. Sur la base de la littérature disponible (cf. Figure 7), on peut considérer qu'à l'échelle locale, il existe au plus 6 niveaux d'alerte et que les dispositifs les plus courants comprennent 2 à 3 niveaux d'alerte. Ils visent principalement à permuter d'un niveau de risque de faible à élevé voire très élevé, et donc de l'état « pas d'alarme » à « alarme »,

A l'échelle territoriale, seulement 3 dispositifs sur 22 se contentent de 2 niveaux d'alerte. C'est par exemple le cas pour les favelas de Rio de Janeiro, où ces 2 niveaux résultent d'un choix culturel : ils ont pour but de ne pas compliquer la compréhension de l'alerte dans un contexte social peu développé.

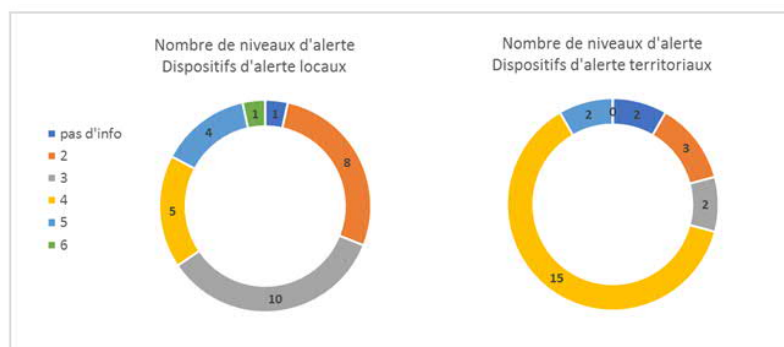


Figure 7 : nombre de niveaux d'alerte définis à l'échelle locale et territoriale (à partir de Pecoraro et al., 2018 et Piciullo et al., 2018).

Une majorité des dispositifs territoriaux comporte aujourd'hui 4 niveaux d'alerte (15 sur 24 dispositifs). Ils sont généralement associés à des probabilités d'occurrence de l'aléa et conduisent à l'activation de différents plans d'urgence selon la zone impactée.

A l'échelle territoriale, les niveaux d'alerte peuvent par ailleurs être associés à deux types de zone d'alerte (Piciullo et al., 2018) : les zones fixes et les zones variables. La zone d'alerte dite fixe est celle qui respecte des limites géographiques et qui n'évolue pas dans le temps. Une zone variable est une zone composée d'un regroupement de différentes unités territoriales pour lesquelles, pour un événement donné, le niveau d'alerte peut être le même.

On observe toutefois que la plupart des dispositifs se basent sur des zones fixes (20 sur les 24 dispositifs), qui rendent la distribution des tâches administratives et le déclenchement des plans d'urgence plus simple et immédiat. Seulement deux dispositifs, celui de la province de Zhejiang (Chine) et celui de la Norvège (cf. section 4.4) ont défini des zones variables

3.4 L'organisation et la gestion de l'alerte

3.4.1 L'algorithme décisionnel et organisationnel

La gestion d'un dispositif d'alerte impose l'élaboration d'un algorithme décisionnel et organisationnel qui décrit toutes les informations sur le nombre de niveaux d'alerte, leurs modalités d'activation et les suites à donner dans des délais précis. Il décrit également les acteurs en charge de la gestion du dispositif et s'appuie pour cela sur des procédures de partage d'informations et de prise de décision, ainsi que sur une description exhaustive des rôles et des responsabilités des acteurs concernés.

L'algorithme décisionnel et organisationnel est de ce fait propre à chaque dispositif. Il est plus ou moins complexe selon l'échelle de mise en œuvre du dispositif et des enjeux. Des exemples sont présentés dans le chapitre 4 de ce rapport, consacrés à quelques dispositifs emblématiques.

3.4.2 La communication et la dissémination de l'alerte

On observe de fortes disparités des pratiques pour ce qui concerne les dispositifs appliqués à l'échelle locale. Pour la plupart d'entre eux la dissémination de l'alerte vers les populations exposées est quasi-immédiate, tandis que dans d'autres cas les premiers destinataires sont des experts ou des entités en charge de la gestion du site (comme le Préfet ou le Maire en France) qui vont décider de la diffusion de l'alerte. L'alerte est donc, dans certains cas, temporisée le temps que des vérifications ou levées de doute soient faites par les experts, et le cas échéant émise de manière différée.

Pour les dispositifs territoriaux, l'alerte repose prioritairement sur l'expertise humaine car elle est toujours émise par un organe central / décisionnaire qui s'est vu confié une mission de protection et de sécurité civile (par exemple l'USGS⁷ aux Etats-Unis, la Protection Civile en Italie).

Les messages d'alerte vers la population dits « messages étudiés » (Glatron, 2008), sont préparés en amont, avec du vocabulaire compréhensible par le plus grand nombre. Ces messages (produits sous différentes formes, écrite, orale, électronique, visuelle, etc.) sont toujours le produit d'une concertation entre les institutions et les scientifiques et la stratégie de communication est différente selon la gravité ou le niveau d'alerte.

Ils sont relayés pour la plupart du temps via les médias et les technologies de l'internet. La communication digitale, via les réseaux sociaux, monte clairement en puissance ce qui conduit aussi à de nouvelles pratiques. Elle s'accompagne d'un engagement actif de la population, qui relaye, commente, voire alimente largement l'information qui circule par les réseaux sociaux.

3.4.3 La capacité de réponse

Comme on l'a vu précédemment (cf. section 2.4), la capacité de réponse est l'une des quatre composantes importantes des dispositifs d'alerte. Elle comprend la sensibilisation et la préparation des populations exposées aux actions à mener en cas d'alerte pour limiter les conséquences dommageables des risques et nuisances.

⁷ United States Geological Survey

Cette composante est malheureusement souvent peu décrite dans la littérature scientifique et dans le retour d'expérience opérationnel, et ce même pour les dispositifs les plus récents qui devraient en toute logique être tournés vers les personnes. Ceci s'explique en partie par le fait que la capacité de réponse se construit de façon différente selon le niveau culturel et social de la population, ce qui n'est pas simple. L'enjeu est de minimiser les incompréhensions autour des messages émis afin de ne pas perturber la perception du risque, et entraîner une collaboration insuffisante voire même l'inaction des populations (Garcia, 2011).

Ce sont aujourd'hui les pays d'Asie qui progressent le plus sur ce sujet. Le Sri Lanka, le Bangladesh et l'Indonésie (dispositif en phase de prototype), par exemple, ont beaucoup investi dans la capacité de réponse. Citons aussi la ville de Rio de Janeiro qui a aussi mis un place un vaste programme d'éducation adapté au niveau culturel et éducatif de tous, y compris des habitants des favelas. Ce type d'approche s'inspire d'études menées pour intégrer des modèles socio-cognitifs dans la gestion du risque (Paton, 2003; Lindell et Perry, 2012 et Glatron, 2008), dont l'objectif est de favoriser l'attitude et l'implication des populations exposées.

3.5 Les performances de ces dispositifs

3.5.1 Alertes manquées et fausses alertes

Indépendamment de l'échelle du dispositif, celui-ci doit être apte à générer des alertes crédibles pour éviter les situations pouvant conduire à :

- des alertes manquées où les actions de réduction du risque ne sont pas lancées alors que l'aléa se déclenche ;
- ou à de fausses alertes qui conduisent à engager des mesures d'urgence sans que l'instabilité attendue ne se produise.

Ces deux situations peuvent en effet induire des problématiques économiques, juridiques et sociales importantes. Par exemple, la population peut ne plus croire au dispositif et en cas d'alarme avérée ne pas ou plus réagir avec les mêmes délais de réponse. Wilson (2004) observe en outre que les alertes manquées peuvent également être vécues comme un manquement au devoir par les acteurs en charge de la gestion du risque, ce qui est également problématique.

Il est admis que la crédibilité de l'alerte peut être améliorée soit par la production d'alerte fusionnée, c'est-à-dire basée sur une combinaison de seuils (comme par exemple intensité de pluie et vitesse de déplacement), soit par la confrontation de mesures identiques par redondance matérielle de capteurs ou par redondance analytique à partir de capteurs complémentaires. Ces aspects liés à la redondance sont aujourd'hui bien intégrés dans les dispositifs locaux, comme le soulignent Pecoraro et al. (2018).

Enfin, l'intervention systématique d'un expert est considérée par beaucoup comme fondamentale pour éviter la plupart des fausses alertes. De ce fait, l'automatisation intégrale des dispositifs d'alerte apparaît difficile.

3.5.2 L'évaluation de l'efficacité

La question de l'efficacité d'un dispositif d'alerte opérationnel est centrale. Elle peut être décrite comme la capacité à prévoir l'occurrence d'un aléa en temps utile et à déclencher les réponses adéquates.

La mesure de la performance de ces dispositifs est dans la pratique difficile à évaluer, car elle fait appel à l'expertise humaine ainsi qu'à des critères techniques, administratifs ou encore sociaux. De plus, il n'y a pour l'instant pas de standards partagés par tous (Sättele et al., 2015a ; Sättele et al., 2016 ; Segoni et al., 2016 ; Piciullo et Calvella, 2016 ; etc.).

L'efficacité des dispositifs territoriaux est souvent estimée de façon statistique, selon la matrice illustrée en Figure 8 de laquelle peuvent être issus différents index.

	Pas de Menace	Menace
Alerte	Faux Positif (FP) ->fausse alerte	Vrai Positif (TP) ->vraie alerte
Pas d'Alerte	Vrai négatif (TN) -> pas d'alerte	Faux négatif (FN) ->alerte manquée

Figure 8 : matrice de confusion 2x2 classique.

A Hong Kong, l'efficacité du dispositif évaluée sur la période 2001-2005 (Cheung et al., 2006) a par exemple permis de confirmer que la majorité des alertes émises étaient justifiées, aucune n'était manquée tandis que le taux de fausses alertes était qualifié de faible. L'efficacité de ce dispositif a aussi été estimée qualitativement sur la base de la réduction d'accidents mortels depuis la mise en œuvre du dispositif (cf. section 4.3).

Des études statistiques ont aussi été réalisées pour des dispositifs italiens (i.e. Martelloni et al., 2012). Sur la période 2008 – 2010 par exemple, le taux d'alertes justifiées du dispositif d'Emilie Romagne était de 84% et le taux d'alertes manquées de l'ordre de 30%. Pour la Californie du Sud la performance du dispositif a été estimée sur la période 2005/2006, quand 39 alertes ont été déclenchées, dont 11 ont vraiment donné lieu à des coulées de boue (Restrepo et al., 2009). Pour le dispositif des favelas de Rio il n'y a pas eu d'étude approfondie sur la correspondance entre alertes et occurrence d'instabilités. Cependant, il a été remarqué que la période 2011/2012 a été caractérisée par un grand nombre de fausses alertes (Calvello et al., 2014).

Une approche statistique plus approfondie a récemment été proposée par Calvello et Piciullo (2016) pour mieux rendre compte de l'efficacité aux dispositifs territoriaux. Cette approche, dite EduMap (pour Event, Duration Matrix, Performance), repose sur le calcul d'une matrice de durée reliant plusieurs paramètres ; elle tient compte à la fois de l'occurrence simultanée de plusieurs instabilités dans une zone d'alerte, de la durée et du niveau d'alerte émis par rapport à la densité spatiale des glissements de terrain dans la zone d'alerte et de la prise en compte d'incertitude dans les modèles de prévisions.

On notera que cette approche approfondie, ainsi que l'approche simplifiée présentée ci-avant restent techno-centrées, puisque la capacité de réponse n'est pas prise en compte.

3.6 Eléments de coûts

Les dispositifs d'alerte sont considérés par beaucoup comme une bonne alternative aux mesures structurelles de mitigation de risque, car elle présente souvent l'avantage d'être moins coûteuse au regard notamment de travaux de confortements souvent conséquents à réaliser, voire pour certains difficilement réalisables.

L'exemple du dispositif d'Ancône (cf. détails en section 4.2) en est une illustration. Son coût a été estimé à 3,3 millions d'euros, il comprend le dispositif d'alerte en tant que tel, ainsi que sa gestion et sa maintenance durant 10 ans de fonctionnement (communication S. Cardellini, Municipalité d'Ancône). Ce montant est à comparer aux coûts de mesures de confortement estimés à 60 millions d'euros, dont la faisabilité technique n'est pas garantie compte tenu de la configuration urbaine et industrielle de la ville.

Plus généralement, on observe que l'apparition sur le marché de capteurs à bas coût (dits *low cost*) et l'évolution des technologies a clairement permis la réduction des coûts de mise en œuvre et favorisé le développement des dispositifs d'alerte.

On considère ainsi aujourd'hui que la maintenance technique et le coût des personnels impliqués dans la gestion d'un dispositif représentent le principal poste de dépenses.

4 Focus sur quelques dispositifs emblématiques

4.1 Dispositifs locaux : L'exemple de Séchilienne en France

Eléments contextuels

Le versant des Ruines de Séchilienne se situe dans le massif de Belledonne, à une vingtaine de kilomètres au sud-est de Grenoble, dans le département de l'Isère (38). Le mouvement de terrain concerne le versant sud du Mont Sec qui surplombait l'ancienne route RN 91 (actuelle RD1091), reliant Grenoble à Briançon, et qui borde la rivière de la Romanche en aval du village de Séchilienne (Figure 9).

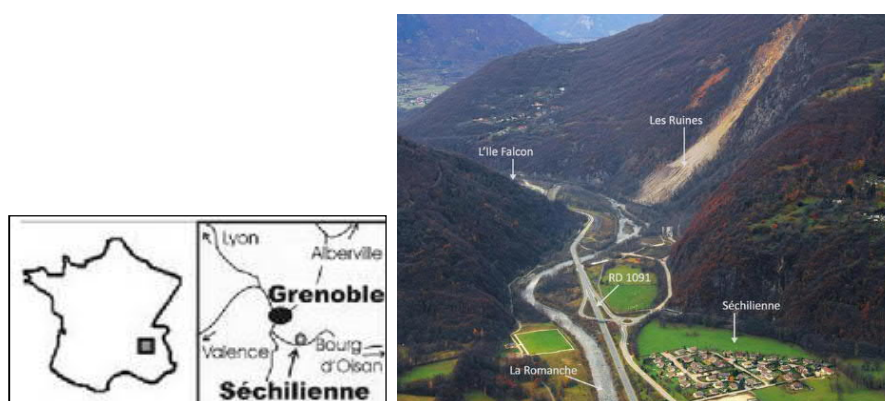


Figure 9 : (à gauche) la localisation du village de Séchilienne ; (à droite) les Ruines de Séchilienne et la vallée de la Romanche vues depuis les hauteurs de la commune de Saint-Barthélemy-de-Séchilienne © S. Gominet, photothèque Irma.

C'est un site sur lequel des chutes de blocs ont été observées dès 1726 (Lenoir, 2010). Le phénomène s'est accéléré au cours années 1960 à 1980, conduisant à une attention particulière et croissante de l'Etat. Dès 1984, le site fait l'objet d'investigations techniques et scientifiques dont les résultats ont permis de faire une première évaluation de l'aléa géologique et hydraulique (i.e. Antoine et al., 1987 ; Alfonsi, 1997 et Lefort, 1998) et d'identifier les nombreux enjeux et leur vulnérabilité. L'aléa géologique était alors fondé sur l'hypothèse d'un effondrement en masse, avec un volume mobilisé de quelques millions de m³.

Rapidement, dès 1985, le site est placé sous surveillance opérationnelle par le CETE⁸ de Lyon, à la demande de l'Etat, tandis que différentes mesures de protection sont envisagées. Il est notamment proposé de construire un merlon de protection susceptible d'arrêter les blocs d'un éboulement d'un volume total de 1 million de m³ (construit en 1986 en même temps que la première déviation de la route) et d'exproprier préventivement, selon la loi du 2 février 1995, les habitants d'une centaine de maisons de la zone de l'Île-Falcon (Figure 9).

On retiendra que l'évaluation de l'aléa géologique a évolué au fil des expertises et des réflexions du collège d'experts constitué en 1999 à la demande de la DGPR⁴, collège qui deviendra permanent en 2004 (Einhorn, 2010). De même, plusieurs études techniques ont été menées sur les parades routières et hydrauliques entre 2005 et 2010 (Einhorn, 2010). Leur mise en œuvre et le déplacement des populations exposées (progressivement entre 1997 et 2011) a permis la réduction du risque et en conséquence un allègement du dispositif d'alerte à partir de 2016.

Les éléments présentés dans la suite sont, donc, pour certains obsolètes à la date d'édition du présent rapport.

⁸ CETE : Centre d'Études Techniques de l'Équipement aujourd'hui appelé Cerema : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Composantes du dispositif d'alerte

La surveillance du mouvement de versant de Séchillienne reposait au départ sur des mesures manuelles, extensométriques et géodésiques. Le système a par la suite été partiellement automatisé, puis enrichi de mesures complémentaires (Panet, 2000). Précisons simplement que la périodicité des mesures extensométriques (tous les ans) et géodésiques (tous les 3 ans) manuelles a été allégée en 2016 et 2019. Ces mesures se poursuivent pour permettre de valider les mesures automatiques et de contrôler les déformations en surface dans certaines zones moins actives du mouvement de versant.

In fine, la surveillance a reposé sur un ensemble de 5 systèmes automatisés de mesures comprenant 27 bases extensométriques (ouverture de grandes fractures), 54 repères pour la distancemétrie laser et 40 repères pour la distancemétrie radar depuis le versant opposé (Pothérat et al, 2009, Duranthon et al., 2003), un système GPS temps réel (constitué d'une antenne mobile et une antenne fixe) et une station météorologique (pluviomètre / nivomètre, capteur de mesure de la hauteur de neige accumulée l'hiver).

De nombreuses autres observations ont également été conduites sur le site. On peut citer par exemple, celles réalisées par l'OMIV⁹, avec la réalisation de mesures de polarisation spontanée en surface et dans la galerie de reconnaissance dès 2005, l'écoute microsismique à partir de mai 2007, l'amélioration de la connaissance du contexte hydrogéologique et les tests croisés de nouveaux dispositifs de mesures (actions toujours en cours). Citons également la contribution de l'Ineris, entre 2009 et 2016, aux investigations menées pour appréhender les mécanismes en jeu en profondeur à partir d'un système expérimental d'observation multi-paramètres (géodésique, géotechnique et microsismique), dont le bilan¹⁰ a été publié en 2017 (Coccia et al., 2017).

Seuils et niveaux d'alerte

Deux niveaux d'alerte (pré-alerte et alerte), basé sur quatre critères principaux associés à la vitesse de déplacement, l'occurrence et le volume d'éboulements ainsi que l'occurrence de fortes pluies (combinée à la situation de vigilance ou alerte météorologique) et l'occurrence d'un séisme de magnitude ≥ 4 à proximité du site sont définis dans le PSS¹¹ de 2013.

La pré-alerte se décompose en 2 phases :

- La vigilance de 1er niveau, lorsque au moins un des quatre des critères est rempli ;
- La vigilance renforcée, atteinte lorsqu'il y a persistance des d'éboulements ou lorsque la vitesse de déplacement dépasse des seuils supérieurs à ceux définis pour activer la vigilance de 1^{er} niveau.

L'alerte se décompose également en 2 phases :

- La phase de préoccupations sérieuses, activée par le Préfet, après l'analyse par les experts techniques du comportement du phénomène, notamment l'accélération des déformations, un risque potentiel d'éboulement de grand volume, ou encore l'annonce d'une crue décennale de la Romanche en pied de versant ou d'une situation de vigilance ou alerte météorologique.
- La phase de danger imminent, également activée par le Préfet, lorsque l'éboulement majeur est pronostiqué dans un délai très court (environ 36 h).

La sortie de chaque phase, avant retour au mode nominal, pouvait être décidée par le Préfet sur avis des experts techniques. Une 5^{ème} phase, correspondant à l'éboulement majeur constaté était également prévue.

⁹ <https://omiv.osug.fr/SECHILIENNE/index.html>

¹⁰ <https://www.ineris.fr/fr/bilan-mise-oeuvre-expertise-dispositif-telesurveillance-experimentale-versant-ruines-sechillienne-38>

¹¹ Plan de Secours Spécialisé

Préalerte ou Alerte Situation d'accélération du phénomène ou événement particulier sans notion de délai et d'événement majeur. Cette phase est réversible. vigilance de 1 ^{er} niveau : suivi CETE DE LYON au vu des critères d'activation sur site vigilance renforcée : suivi CETE DE LYON / experts - échanges PREFET	De la PRÉALERTE à l'ALERTE PRÉOCCUPATIONS SÉRIEUSES Situation : tous éléments pouvant indiquer le passage à une logique de divergence, de non réversibilité du comportement de la zone des 3 millions de mètres cubes. Les données disponibles sur l'évolution du mouvement font craindre que le délai avant la rupture passe à moins de 72 heures. Décision : préfet au vu des critères de suivi et des avis du CETE DE LYON*** et des experts	ALERTE DANGER IMMINENT OU EBOULEMENT(S) MAJEUR(S) Situation : une divergence rapide du phénomène est possible. Le pronostic du déclenchement de l'éboulement : 36h Le cas d'un éboulement instantané est improbable mais néanmoins considéré. Décision : préfet au vu des critères de suivi et des avis du CETE DE LYON*** et des experts
---	---	--

Figure 10 : extrait du tableau de synthèse des actions principales du PSS. Séchilienne (source PSS, 2013).

Organisation et gestion de l'alerte

Le dispositif d'alerte de Séchilienne était structuré autour des principaux acteurs présentés dans le tableau ci-après.

Tableau 1 : désignation et rôle des parties prenantes du dispositif d'alerte de Séchilienne et valable à l'échelle nationale en France.

Acteurs de l'alerte	Rôles Principaux
L'expert technique (bureau d'étude ou agence)	Gestion du système de surveillance (collecte, analyse et interprétation des données, maintenance etc.). Détection des anomalies et déclenchement des alertes auprès des services de l'Etat concernés et du Préfet. Appui technique au Préfet.
Le Préfet	Elaboration et porté à connaissance des documents d'informations sur les risques. Transmission de l'alerte, coordination des services de l'Etat relativement aux mesures de sauvegarde et aux opérations de secours.
Le Maire et les collectivités territoriales	Contribution à l'information préventive sur les risques et à l'éducation des populations exposées, y compris l'élaboration de plans communaux de sauvegarde. Mise en œuvre des moyens d'informations, d'alerte et des opérations de sauvegarde. Assistance à l'organisation des secours en lien avec le Préfet et les services compétents de l'Etat.
Les Médias (Transmetteurs)	Relais des alertes et informations, amélioration de la conscience de la catastrophe.
Gestionnaires de réseaux publics	Maintien / restauration des fonctions permettant la satisfaction des besoins prioritaires (eau, électricité etc.).
Citoyens et acteurs locaux	Application des consignes relatives à l'alerte.

Aspects sociaux, bilan et retour d'expérience

D'un point de vue sociétal, la gestion du risque de Séchilienne a suscité, du moins durant les années 80 – 90, beaucoup d'interrogations et d'inquiétudes de la part des riverains. Ce contexte combiné à l'apprentissage du mouvement du versant explique le délai entre le démarrage de la surveillance opérationnelle par le CETE⁸ en 1985, et la mise au point des premières mesures d'urgence (gestion du trafic sur l'ancienne route en 1985 et 1986, construction de la première déviation routière en 1986, gestion de l'urbanisme au fond de la vallée en 1988) et la validation du premier PSS en 1993.

Plusieurs exercices de secours ont par ailleurs été organisés pour valider les PSS successifs, tester la bonne coordination des acteurs impliqués et valider les procédures organisationnelles et décisionnelles de certaines phases. En 2005, à la suite de la diffusion du PSS 2003, trois exercices de simulation de crise ont été organisés, les deux premiers pour les élus et les agents et le dernier avec la population du Hameau du Grand Serre. En 2012, un exercice de secours a concerné en plus les établissements scolaires du secteur qui ont déclenché leur PPMS (confinement des élèves vis-à-vis du risque "poussières"). A titre d'exemple, le compte-rendu de l'exercice de déclenchement du PSS de novembre 2005 est disponible sur le site web de la préfecture de l'Isère¹².

¹² <http://www.isere.gouv.fr/Politiques-publiques/Risques/Risques-naturels/Ruines-de-Sechilienne>

De même, les comptes rendus de réunion de la commission CLAIRS (commission locale d'analyse et d'information sur le risque Séchilienne) entre 2005 et 2011 sont disponibles sur le site web de la préfecture. Ils relatent les principales évolutions du site et les échanges autour de la mise en œuvre des parades.

S'agissant de l'évolution du site, trois périodes ou situations particulières ont été rencontrées (communication L. Dubois, Cerema⁸) :

1. En novembre 2006, l'analyse des données des capteurs avait permis un pronostic fiable de la date d'occurrence d'un éboulement de 35 000 m³, remplissant le critère 2.2 de la phase 2. Cet éboulement n'a pas été suivi par d'autres éboulements significatifs et n'a pas engendré un déclenchement formalisé du PSS (les géologues du CETE⁸ de Lyon étaient sur place le jour de l'éboulement) ;
2. En mars 2009, la vitesse d'ouverture des principales fractures délimitant la zone frontale a été comprise entre 12 cm/mois et 17 cm/mois pour les extensomètres A13, A16, C2 et E3 (contre 10 cm/mois à 14 cm/mois en février 2009), soit une augmentation de + 21 % à + 28 %, qui reste très limitée compte-tenu de l'augmentation des apports en eau de + 63 %, de 134 mm en février 2009 à 218 mm en mars 2009). Les vitesses sont restées inférieures aux seuils du critère 1.1 de la phase 1 (1,0 cm/j à 1,5 cm/j selon les capteurs). La phase 1 n'a par conséquent pas été déclenchée ;
3. A l'automne 2012, une accélération des déplacements en surface est constatée, ainsi que l'ouverture de fractures et l'occurrence de chutes de pierres. Le mois de décembre 2012 notamment a été le plus rapide : la vitesse d'ouverture des principales fractures délimitant la zone frontale a été comprise entre 35 cm/mois et 52 cm/mois pour les extensomètres A13, A16, C2 et E3. Les vitesses sont restées la plupart du temps inférieures aux seuils du critère 1.1 de la phase 1 (2,1 cm/j à 3,1 cm/j selon les capteurs), jamais 3 capteurs parmi les 7 suivis n'ont présenté des vitesses supérieures aux seuils du critère 1.1 en même temps. La phase 1 du PSS n'a par conséquent pas été déclenchée.

Ces situations n'ont pas fait l'objet de communication particulière par la suite. Plus largement, il n'existe pas de documentation de synthèse sur le cas de Séchilienne car il n'y a jamais eu de déclenchement formalisé de la phase 1. Ainsi, les seuils glissants n'ont jamais été revus car ils n'ont jamais été mis en défaut ; les seuils des critères de vitesse 1.1 et 2.1 sont cependant réactualisés automatiquement tous les ans le 1er juillet.

Quelques éléments de coût

La mise en œuvre du dispositif de surveillance et d'alerte de Séchilienne a nécessité le développement de moyens particuliers d'acquisition et de gestion des données de surveillance. Les principaux développements ont été conduits ou supervisés par le CETE⁸ de Lyon. Citons par exemple le développement en 1999 du radar par l'ONERA et en 2000 du logiciel GeSSRI (Gestion de la Surveillance des Sites Rocheux Instables). Le coût de développement associé n'est pas connu.

En 2004, le budget annuel de fonctionnement de la surveillance était estimé à 600 k€ HT/an (Durville et al, 2010). Ce budget de fonctionnement avec uniquement des mesures géodésiques automatiques s'établit aujourd'hui à 100 k€ HT / an. Le budget de fonctionnement d'une année avec campagne de mesures géodésiques classiques et automatiques s'établit à 135 k€ HT. Ce budget de fonctionnement comprend la maintenance du tachéomètre automatique, des capteurs, l'entretien des chemins d'accès, la maintenance des logiciels et des ordinateurs, la maintenance des bâtiments et des groupes électrogènes, les abonnements d'électricité et de téléphone. La maintenance du radar ULB et de ses logiciels coûtait en plus 30 k€ HT /an.

Enfin, le coût des travaux pour les parades hydrauliques était estimé à 24,6 millions d'euros (cf. compte rendu de la commission CLAIRS de 29 juin 2011), ceux pour la déviation routière à 26,3 millions d'euros (cf. compte rendu de délibération du département de l'Isère de 2007).

4.2 Dispositifs locaux : Le cas d'Ancône en Italie

Éléments contextuels

La nuit du 12 décembre 1982, la ville d'Ancône en Italie a subi un glissement de terrain (Figure 11) de 220 hectares (environ 11% de la zone urbaine de la ville touchée), heureusement sans victimes, mais 3661 personnes ont été évacuées et 500 personnes ont perdu leur travail. Les routes, la voie ferrée et

les canalisations d'eau et de gaz ont été endommagées et 208 maisons détruites ou endommagées (Cardellini and Osimani, 2008). Le mouvement s'est manifesté 10 ans après un séisme fort (magnitude 4,7), qui avait séparé une partie de la future zone d'instabilité en plusieurs compartiments, et à la suite de six jours de pluie intense avec une intensité moyenne de 30 mm/jour, correspondant à une période de retour de moins de 10 ans. L'hypothèse la plus probable pour le déclenchement est l'infiltration de cette pluie, facilitée par une longue période de sécheresse qui avait créé des fissures importantes (Uzielli et al, 2015). Plus tard, des corrélations claires ont été retrouvées pour des instabilités limitées, survenues en 2008, 2010 et 2011, entre pluie cumulée et déplacements (Baroň et al., 2012).

L'instabilité de pente d'Ancône est un mouvement de versant profond et complexe avec quatre surfaces de glissements entre 30 et 110 m de profondeur (Figure 11). Tout le versant est en condition d'instabilité (facteur de sécurité proche de 1). Les facteurs de déclenchement sont la pluie pour la partie haute du Mont Montagnolo (Figure 11b) et la présence de failles directes pour la partie basse du glissement.

Toutefois, après la catastrophe de 1982 des études de reconnaissance géologique et des travaux scientifiques ont été menés parallèlement à des interventions pour restaurer la vie quotidienne. Les résultats avaient montré que les travaux de stabilisation et de consolidation n'étaient pas possibles, tant au niveau des coûts (environ 60 millions d'euros) qu'en raison d'un impact environnemental trop important. A la suite de ce constat, une loi régionale (L.R. n.5 du 03/04/2002) a été promulguée, définissant le besoin d'installer un dispositif d'alerte permanent.

Composantes du dispositif d'alerte

L'installation du dispositif d'alerte local a débuté en 2006, à l'initiative de la municipalité d'Ancône, qui a également travaillé à l'élaboration d'un plan d'urgence. Ces actions ont été accompagnées d'une importante politique de communication préventive auprès de la population.

Ce dispositif, installé dans sa totalité en 2009, comprend une instrumentation multi-paramètres : 33 inclinomètres, 34 stations GPS, 8 stations totales et 3 DMS - Differential Monitoring of Stability (colonnes pour la surveillance géotechnique, comprenant piézomètre, thermomètre et inclinomètre) dans trois forages de 100 m de profondeur.

Le coût total de ce système de surveillance a été évalué à 1,5 millions d'euros.

Le centre de gestion du dispositif est situé dans un local de la mairie d'Ancône, il est géré par le géologue en chef de la mairie en tant que directeur technique.

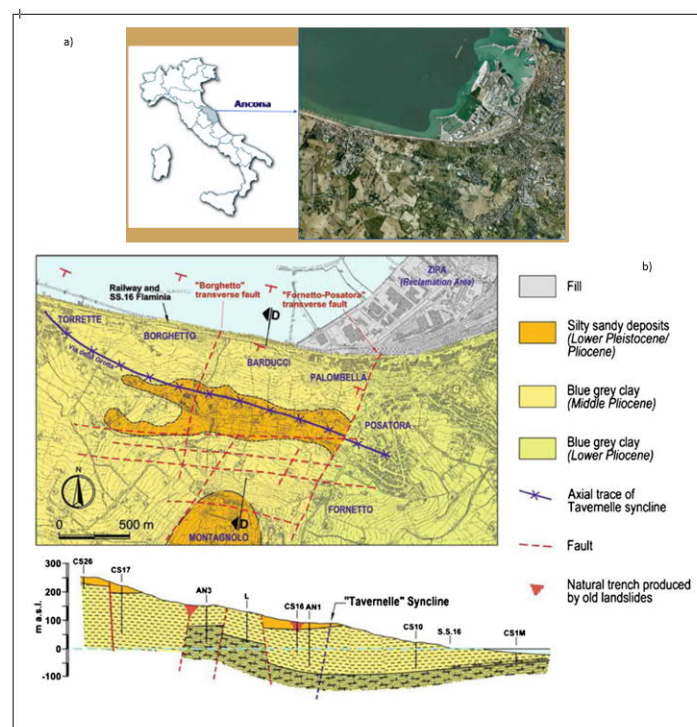


Figure 11 : a) localisation du glissement, b) géologie d'après la communication de S. Cardellini, Municipalité d'Ancône.

Seuils et niveaux d'alerte

Les seuils choisis pour donner l'alerte sont de type multi-paramètres, ils sont basés sur la hauteur de pluie (sur 3, 5 et 20 jours consécutifs), le niveau piézométrique aux trois stations DMS et les déplacements superficiels (Figure 12).

Ces seuils sont couplés avec d'autres informations provenant des relevés sur le terrain (présence de fissures, affaissement, etc.). Tous ensemble, ils donnent lieu à 5 niveaux d'alerte (Figure 12) : attention, alerte précoce, alerte, alarme précoce et alarme.

INDICATORS/ INFORMATION	CAREFULNESS	PRE-ALERT	ALERT	PRE-WARNING	WARNING
SEGNALAZIONI	new on road surface fissures	on road surface fissures in development with openings > 5 cm and steps	subsidence of roads, detachment and marginal crevasses on land	cracks on houses; cracking noise	Very evident movements of homes and land
RAIN	rain for most consecutive of 3 days rain > 90 mm in 3 days (hold for 20 days)		rain for most consecutive of 5 days rain > 120 mm in 5 days (hold for 20 days)	rain for most consecutive of 6 days rain > 180 mm in 6 days (hold for 20 days)	
GPS			displacement of 1 house (validated by the first measures to tca and inspection)	displacement of 2 houses in the same area (validated by the first measures to TCA and inspection)	displacement of more than 2 houses in the same area (validated by inspection)
TCA			displacement of 1 house (validated by the first measures to tca and inspection)	displacement of 2 houses in the same area (validated by the first measures to TCA and inspection)	displacement of more than 2 houses in the same area (validated by inspection)
NIVEL			2mm displacement (validated by inspection)	4 mm displacement (validated by inspection)	8 mm displacement (validated by inspection)
DMS	piezometric dms1 > 7 m dms3 > 5 m	piezometric : dms1 > 5 m dms3 > 4 m	inclinometers: displacement of 6 mm in 1 day (validated)	inclinometers: displacement of 6 mm in 3 h (validated)	inclinometers: displacement of 6 mm in 1h (validated)

Figure 12 : les différents niveaux d'alerte et les seuils associés pour chaque type de capteur (algorithme décisionnel) qui compose le système de surveillance permanent (d'après Cardellini, 2016).

Organisation et gestion de l'alerte

Les autorités impliquées activement dans la gestion des différents niveaux d'alerte et criticité sont : le maire en tant que responsable de la protection civile communal, la protection civile régionale et le directeur technique du centre de gestion du dispositif qui informe le maire sur les niveaux de criticité atteints.

Le suivi des données et le déclenchement des alertes sont assurés par une équipe de permanence, composée de techniciens, géologues et ingénieurs mobilisables 7j/7.

L'algorithme décisionnel repose sur une vérification et une interprétation systématique des alarmes détectées (les experts techniques se déplacent pour valider/ invalider les alertes). En cas d'alerte validée, le directeur technique du centre de gestion du dispositif décide du niveau d'alerte, des actions de communications et de l'activation du plan d'urgence en accord avec la Protection civile.

Aspects sociaux, bilan et retour d'expérience

La municipalité d'Ancône a mis en œuvre d'importantes actions d'information et de formation auprès de la population dès le début de l'installation du dispositif de surveillance avec l'objectif d'accroître la résilience de la population en l'habituant à cohabiter / coexister activement « *convivenza attiva* » avec l'instabilité de pente.

Ces actions d'information menées vers tous les âges, des écoles aux maisons de retraite, ont permis à la municipalité d'Ancône de remporter le prix international « *Sasakawa¹³ Award for Disaster Reduction* » en 2011. Le UNISDR¹ est en charge de l'attribution de ce prix.

Par ailleurs, il est important de souligner qu'à ce jour, aucune fausse alerte n'a été émise grâce au

¹³ Voir <https://www.unisdr.org/we/campaign/sasakawa>

travail systématique de vérification de dépassements de seuils par l'équipe de permanence. Cela contribue à renforcer la confiance de la population dans le dispositif d'alerte.

4.3 Dispositifs à l'échelle territoriale : le cas de Hong Kong

Éléments contextuels

Deux facteurs rendent la métropole de Hong Kong très exposée au risque d'instabilités de pentes induites par la pluie : sa géomorphologie, plus du 70 % du territoire est vallonnée et son climat marqué par des moussons et des typhons.

De nombreuses instabilités de pente naturelles et anthropiques se sont produites dans l'histoire de Hong Kong, causant la mort de plus de 470 personnes depuis 1947 (Choi et Cheung, 2013). L'occurrence en 1972 d'événements tragiques dans les quartiers de Po Shan et de Sau Mau Ping (67 et 71 décès respectivement), et puis en 1976 d'un autre glissement de terrain mortel à Sau Mau Ping (avec 18 décès) a conduit les autorités locales à engager d'importantes mesures pour réduire les risques.

En 1977, le programme LPM (*Landslip Preventive Measure*) est lancé pour cartographier et sécuriser lorsque cela est possible l'ensemble des pentes instables du territoire ou a minima contenir les débris et coulées. Le coût de ce programme a été évalué à 14 milliards de dollars, il s'achèvera en 2010.

A la fin des années 1970 également, le service de contrôle géotechnique (GEO) est créé avec l'objectif de mettre en œuvre un dispositif d'alerte régional (LWS, Landslip Warning System¹⁴). Depuis 1984, ce dispositif est géré conjointement par le GEO¹⁵ et par le HKO¹⁶ et il s'intègre maintenant dans un dispositif global géré par le HKO¹⁶ et couvrant tous les types de désastres induits par le climat. Cette évolution fait suite aux projections des évolutions climatiques à Hong Kong, qui prédisent une augmentation des températures en journée et nuit, une augmentation de l'intensité moyenne de pluie et de la fréquence d'événements extrêmes, élévation du niveau de la mer, changements du trait de côte et augmentation des orages à la suite des cyclones.

Composantes du dispositif d'alerte

Le dispositif d'alerte de Hong Kong comprend un dense réseau de pluviomètres automatiques (environ 120 stations de mesure, soit 1 tous les 4 km² en moyenne), dont les mesures sont suivies en temps réel et couplées avec celles obtenues par des radars météorologiques du HKO.

Il repose sur une discrétisation du territoire (environ 1000 km²) en mailles relativement fine (Yu et al., 2004 et Cheung et al., 2006). Pour chaque maille un modèle de corrélation est lancé entre la fréquence des instabilités de pente et le ruissellement maximal (connu pour chaque type d'instabilité) sur 24 h (Figure 13). Les prévisions de pluie sur 1, 2 et 3 heures, fournies par le KHO, sont utilisées pour décider si le critère d'alerte est atteint ou pas (Cheung et al., 2006).

Pour supporter le LWS, un système de prévisions météorologiques à très court terme, baptisé SWIRLS¹⁷, a été développé pour analyser en continu les échos des radars météorologiques entre deux mesures successives et calculer la direction et la vitesse de déplacement des zones de pluie (Figure 13).

Seuils et niveaux d'alerte

Comme évoqué ci-avant, le critère d'alerte est basé sur la corrélation entre ruissellement (l'écoulement des pluies 24 heures/24) et fréquence d'instabilités de pentes dans la maille touchée. Il intègre les dernières données météorologiques disponibles, ainsi que les prévisions de précipitations à court terme.

Depuis la fin des années 1990, le GEO calcule et intègre aussi au LWS un index de glissement potentiel LPI (*Landslide Potential Index*). Cet index est utilisé pour décrire la gravité d'un épisode pluvieux et son potentiel à provoquer des glissements de terrain. Il n'a pas de valeur prédictive et l'index est calé sur les épisodes les plus sévères des 30 dernières années.

¹⁴ Voir http://hkss.cedd.gov.hk/hkss/eng/landslip_info.aspx

¹⁵ GEO, Geotechnical Engineering Office

¹⁶ HKO, Observatoire de Hong Kong, voir <http://www.weather.gov.hk/contente.htm>

¹⁷ SWIRLS, Short-range Warning of Intense Rainstorms in Localized Systems

Il y a *in fine* deux niveaux d'alerte : pas de danger ou danger.

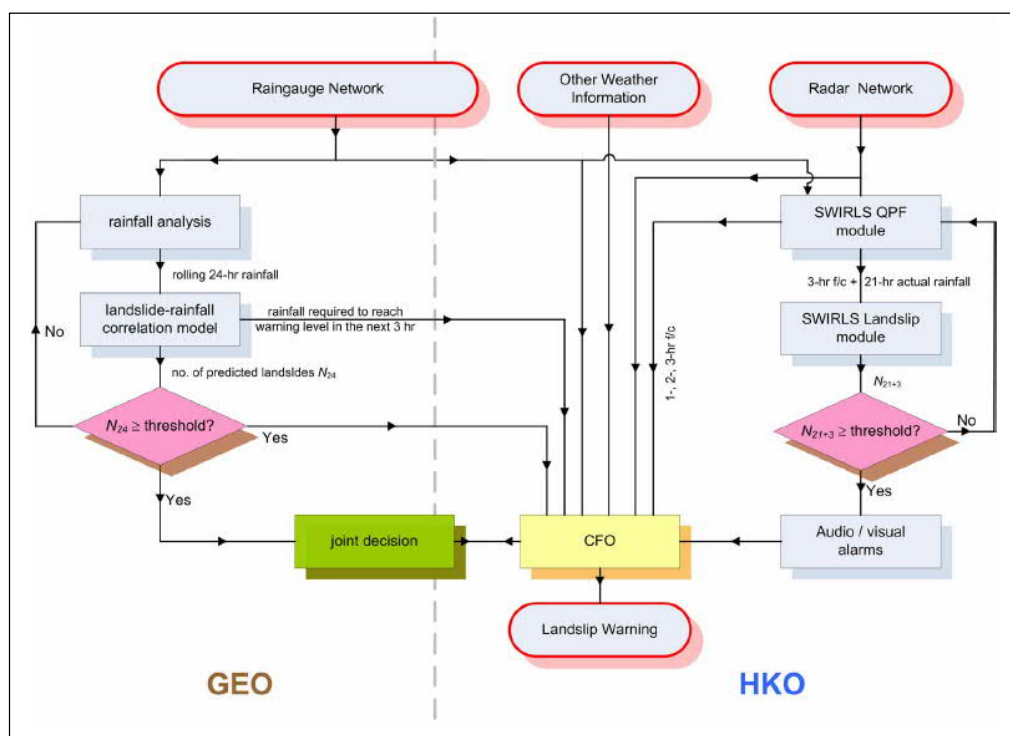


Figure 13 : algorithme décisionnel et organisationnel du dispositif d'alerte d'Hong-Kong et synergie entre les services GEO et HKO (Cheung et al., 2006).

Organisation et gestion de l'alerte

La décision d'émettre ou annuler une alerte est prise conjointement par le GEO et le HKO (cf. Figure 13). L'alerte est émise sous la forme de bulletin via les media (radio et télévision) et via un site internet dédié¹⁴. Depuis 2010, les alertes sont également relayées via une application dédiée, MyObservatory¹⁸. Le nombre de visiteurs quotidien excède 100 millions – soit plus de 14 pages consultées en moyenne par jour et par personne, pour une population totale de 7,2 millions d'habitants.

Aspects sociaux, bilan et retour d'expérience

Le dispositif d'alerte de Hong Kong est le plus ancien des dispositifs. Il est considéré aujourd'hui comme une référence mondiale du point de vue technologique et du point de vue de la préparation de la capacité de réponse.

Le système SWIRLS a notamment bénéficié d'une reconnaissance internationale lors des Jeux olympiques de 2008 à Beijing et de l'Exposition universelle de 2010 à Shanghai.

Ces bons résultats ont été rendus possibles grâce aux innovations portées par le GEO et le HKO, ainsi que par l'ensemble des moyens mis en œuvre pour éduquer la population.

Les GEO et HKO assurent régulièrement la vérification et la révision des critères d'émission et d'annulation de l'alerte pour tenir compte des limites technologiques et des évolutions de comportements des pentes instables (e.g. des modèles). Ni la méthodologie de révision ni les statistiques ne sont accessibles en ligne. Cependant, il semble que les fausses alarmes soient aujourd'hui attribuées principalement à des artefacts liés aux mesures radar (effet de topographie, précipitations sous la couche de balayage du radar, etc.). Elles peuvent également résulter des incertitudes sur les prévisions d'évolution des zones de pluie.

On comptabilise toujours chaque année quelques centaines de mouvements de terrain induits par la pluie ou des événements climatiques extrêmes. En 2017, 157 mouvements de pente ont été constatés,

¹⁸ Voir www.hko.gov.hk/myobservatory_e.htm

dans un contexte de précipitation annuelle en légère hausse (+7%) par rapport aux années précédentes.

Enfin, soulignons que le nombre de décès a été sensiblement réduit depuis la mise en œuvre du dispositif d'alerte (Figure 14) et le déroulement du programme LPM.

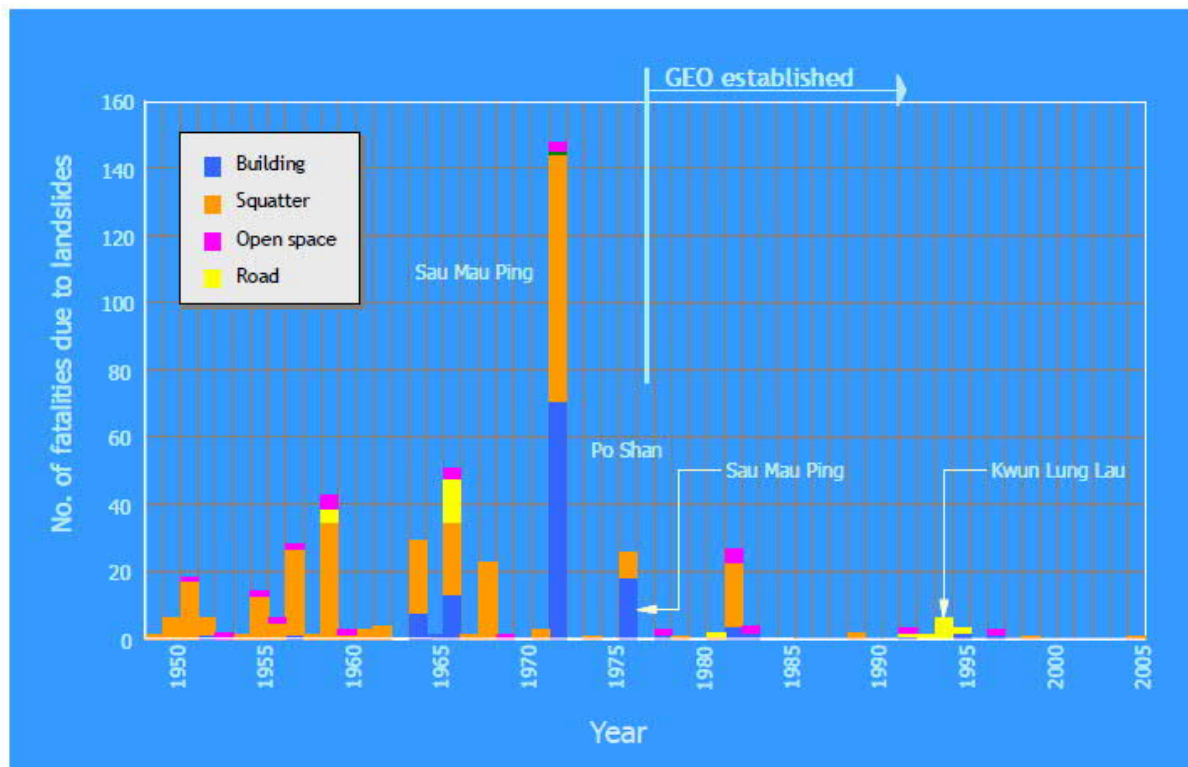


Figure 14 : histogramme du nombre de décès dus aux instabilités de pente, de 1950 à 2005 (Cheung et al, 2006). La mise en place du dispositif d'alerte est consécutive au dernier événement catastrophique de Sau Mau Ping en 1976.

4.4 Dispositifs à l'échelle territoriale : le cas de la Norvège

Éléments contextuels

La Norvège s'est dotée en 1989 d'un dispositif national d'alerte pour les inondations, géré par l'opérateur public NVE¹⁹, sous la tutelle du Ministère du Pétrole et de l'Energie. Ce dispositif a servi de base, entre 2009 et 2012, à la construction d'un dispositif national d'alerte appliqué aux mouvements de pente induits par la pluie et la fonte des neiges. Il a été déclaré opérationnel à l'échelle nationale en octobre 2013.

Ce dispositif national d'alerte pour les mouvements de pente est géré par le NVE en collaboration avec d'autres services de l'état : le Service Météorologique Norvégien²⁰, l'organisme en charge de la gestion des infrastructures routières²¹ et celui en charge des infrastructures ferroviaires²².

Il existe de très fortes synergies entre les services concernés (Krøgli et al., 2018) puisque la gestion du dispositif appliqué aux mouvements de pente nécessite des données et des prévisions hydrogéologiques et météorologiques également utilisées ou produites pour la prévention du risque d'inondation.

¹⁹ NVE : Norwegian Water resources and Energy

²⁰ MET : Norwegian meteorological Institute

²¹ NPRA : Norwegian public road administration

²² Bane NOR : Norwegian national rail administration

Notons enfin que ce dispositif national d'alerte appliqué aux mouvements de pente a intégré 4 dispositifs locaux : ceux de Åknes, Mannen, Hegguraksla et Jettan. Celui de Åknes est sans doute le plus connu d'entre eux. Ces dispositifs étaient au stade de prototype avant leur intégration dans le dispositif d'alerte national.

Composantes du dispositif d'alerte

Le dispositif intègre en temps réel les mesures de plus de 70 piézomètres et 400 stations météorologiques réparties sur le territoire selon son accessibilité. Ces mesures alimentent les modèles de prévision météorologiques à court terme (+ 66h) et long terme (+ 9j).

Ces données météorologiques prévisionnelles, sont ensuite utilisées pour établir des prévisions hydrogéologiques à l'échelle nationale, sur la base d'un maillage de 1 km x 1 km en simulant par exemple, la fonte des neiges, le ruissellement ou encore le gel. Selon les modèles (Beldring et al., 2003 ; Colleuille et al., 2010) et les données de calage disponibles, des interprétations sont faites en termes de charge / décharge de nappes, d'infiltration des eaux dans les terrains, ou encore de hauteur d'accumulation de neige, etc.

Les données météorologiques et hydrogéologiques prévisionnelles sont ensuite croisées avec une base de données 65 000 instabilités, élaborée en 2001 et qui regroupe toutes les typologies de mouvement de pente.

Les seuils et niveaux d'alerte, enfin, reposent sur des modèles de prévision d'occurrence d'instabilité construits à partir de données historiques (cf. ci-après).

Seuils et niveaux d'alerte

Les seuils d'alerte ne sont pas du type intensité-durée de pluie, comme cela est souvent le cas (cf. section 3.3.1), mais sont dérivés d'études statistiques menées en combinant des données hydrométéorologiques historiques et des données d'instabilités (Colleuille et al., 2010 et Krøgli et al., 2018). Celles-ci ont conduit à privilégier deux paramètres pour la définition des critères d'alerte (Devoli et al., 2018) :

- l'apport relatif en eau, exprimé en pourcentage de l'approvisionnement annuel en eau pendant la période de référence 1981-2010, et qui résulte de la fonte simulée des neiges et des précipitations interpolées ;
- le degré de saturation en eau du sol qui décrit le ratio entre la teneur actuelle en eau du sol par rapport à la teneur maximale en eau du sol pendant la même période de référence.

Les seuils d'alerte enfin, sont définis de manière statistique par le NVE (Figure 15), à l'échelle nationale et à l'échelle régionale (2 régions principales, l'Est et l'Ouest de la Norvège) de manière à prendre en compte les différences régionales climatiques et topographiques (Boje et al., 2017). Des cartes de susceptibilité d'occurrence d'instabilité sont également émises quotidiennement.

Toutes ces informations sont utilisées à des fins de communication envers la population sur la base de 4 niveaux d'alerte (faible, modéré, élevé, très élevé) auquel sont associés un code couleur (respectivement vert, jaune, orange, rouge, voir Devoli et al., 2014).

Organisation et gestion de l'alerte

Le dispositif repose sur des zones d'alerte variables. Elles peuvent correspondre à un petit nombre de communes ou à plusieurs régions administratives, selon les conditions et les prévisions hydrométéorologiques.

L'alerte est donnée par le NVE, selon la chaîne d'informations en Figure 16. Elle est relayée par différents canaux, vers les administrations locales, régionales, les médias, etc. Le site internet <http://www.varsom.no/en/> est aussi l'outil privilégié de communication et d'information.

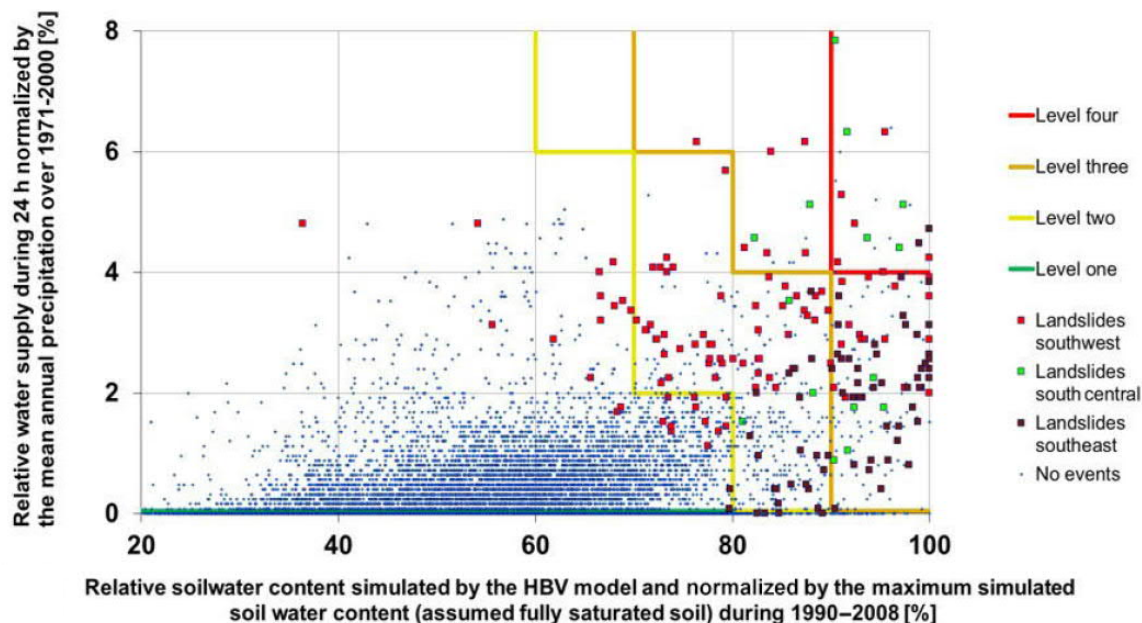


Figure 15 : les quatre seuils d'alerte matérialisés par les lignes verte, jaune orange et rouge. Les points bleus les jours sans instabilités et les points colorés les jours avec occurrence d'instabilité selon le secteur géographique (Devoli et al., 2018).

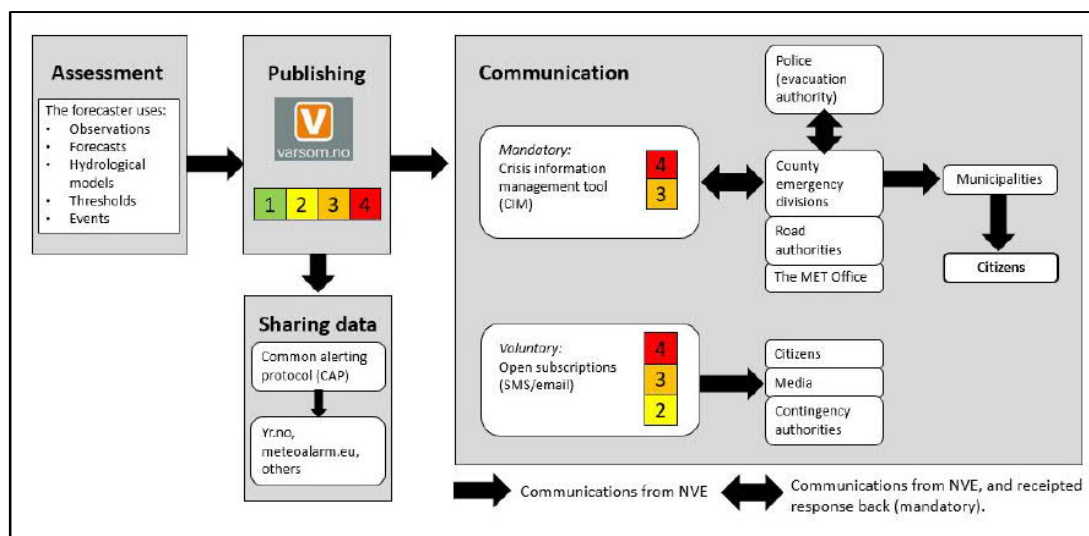


Figure 16 : la chaine d'information de l'alerte en Norvège (Krøgli et al., 2018).

Aspects sociaux, bilan et retour d'expérience

Par souci de clarté pour la population, les alertes relatives aux instabilités de pentes utilisent le même référentiel (même code couleur et désignation) que celui utilisé pour les inondations et les avalanches. Toutes sont relayées selon les mêmes canaux d'informations.

La notion de capacité de réponse relative à ce dispositif d'alerte est peu décrite dans la littérature, mais l'on sait de la littérature que du point de vue de la réglementation norvégienne, il appartient aux communes d'élaborer et de mettre en œuvre des mesures et des plans d'urgence. Le NVE¹⁹ considère que beaucoup reste à faire en la matière, le dispositif étant opérationnel à l'échelle nationale depuis seulement quelques années. Le NVE mène de ce fait des enquêtes auprès des utilisateurs directs (les maires, autorités locales, etc.) dans le but d'élaborer des campagnes d'informations en adéquation avec les attentes du public et des communes.

S'agissant du retour d'expérience et de l'efficacité du dispositif d'alerte, quelques éléments ont été produits récemment par le NVE (Krøgli et al., 2018 ; Devoli et al., 2018). L'une des études évalue l'efficacité du dispositif sur la base des alertes émises en termes de pertinence et d'adéquation du niveau d'alarme diffusé pour la période 2013 - 2017. Elle révèle que le taux de fausses alarmes est au maximum de 5% et celui des alarmes manquées (non émises) au maximum de 2,2%. En période de pluie ou de fonte des neiges soutenue, ces taux sont légèrement moins bons, de 14,5% et 5,8% respectivement.

L'on retient de ces études que l'efficacité du dispositif ainsi que la définition même des seuils d'alarmes restent étroitement liées aux observations sur le terrain et au nombre d'événements (instabilités) rapportés, qui alimentent la base de données d'instabilités nationales. Ces observations sont clairement entachées de biais, certes difficiles à quantifier puisqu'elles reposent pour beaucoup sur la base du volontariat, les témoins étant invités à saisir des informations sur un site dédié²³.

5 Synthèse & Discussion

5.1 Perspectives technologiques

D'un point de vue scientifique et technique, le déploiement d'un dispositif d'alerte nécessite un haut niveau de connaissance et d'expertise et doit être conduit avec rigueur et méthode. Comme on a pu le voir précédemment, il s'accompagne généralement de nombreuses innovations pour faire face aux conditions de terrain et aux contraintes de fonctionnement. Certaines innovations restent spécifiques à un site et ne sont pas transposées à d'autres cas d'études, tandis que d'autres ont vocation à se généraliser largement.

C'est le cas par exemple des solutions de monitoring multi-paramètres intégrées, permettant l'acquisition de données physiques à partir d'une multitude et d'une variété de capteurs répartis sur le terrain. Elles ont été rendues possibles par les développements technologiques récents réalisés dans de nombreux domaines (miniaturisation de composants, faible consommation d'énergie, internet, 4G, outils de géoréférencement, data mining, etc.). Les méthodes numériques de gestion et traitement de données, et de modélisation de phénomènes complexes ont également beaucoup progressé au cours des dernières décennies et permettent aujourd'hui d'émettre avec une certaine efficacité les alertes.

Le développement d'algorithmes d'intelligence artificielle s'inscrit aussi dans ce sens et ouvre de nouvelles perspectives pour la prévision d'alerte. Ce domaine est en forte évolution actuellement avec des résultats positifs déjà pour la prévision de crues et d'inondations, pour lesquelles les processus en jeu et la dynamique sont maîtrisés depuis longtemps. On peut imaginer que des avancées sont aussi possibles dans le cas de phénomènes complexes d'instabilités de grandes dimensions ou d'échelles sous réserve de collecter et combiner des données massives, ce qui laisse certains experts perplexes. En effet la collecte et le traitement de données massives nécessitent d'importants moyens sur le terrain pour l'acquisition, sur la durée, des données, et en laboratoire pour leur archivage, gestion et traitement. La mise en œuvre de ces techniques d'apprentissages nécessite de ce fait aussi une implication croissante de *data scientists* au côté des experts des phénomènes en jeu et des autres parties prenantes, ce qui compliquera sans doute davantage encore la gestion des dispositifs d'alerte. Enfin, la question de la transposition de ces approches de site à site suscite aussi des interrogations.

Enfin, une autre priorité qui ne fait pas débat dans la communauté scientifique concerne l'amélioration des prévisions météorologiques pour mieux quantifier et anticiper les apports en eau. Le lancement du 1^{er} satellite dédié à la mesure des vents sur toute la Terre, en 2018, le satellite européen Aeolus, devrait permettre d'ici une dizaine d'années environ des progrès significatifs en matière de prévision météorologique.

5.2 Efficacité et parties prenantes

Dans les exemples précédemment présentés, l'alerte relève quasi-systématiquement d'une décision humaine de la part d'un expert ou d'un décideur non-expert, comme par exemple en France un préfet

²³ <http://www.regobs.no/>

(voir Tableau 1).

Ce cas de figure est adapté pour les dispositifs locaux et il est alors de la responsabilité des experts d'aider les décideurs à prendre la bonne décision. La décision revient en revanche systématiquement aux experts pour les dispositifs territoriaux, à charge pour eux ensuite de relayer les informations adéquates aux différentes parties prenantes.

S'agissant de l'efficacité des dispositifs d'alerte, celle-ci est, comme on l'a vu jusqu'à présent, principalement évaluée et analysée d'un point de vue technique. Ni la capacité de réponse ni l'engagement des populations ne sont prises dans les schémas d'évaluation de l'efficacité.

Cet engagement des populations peut prendre différentes formes, dont la remontée de témoignages, au travers de portails web accessibles par tous, comme en Norvège, pour alimenter les bases de données de mouvements de terrains. Ces témoignages, certes subjectifs puisque produits par des non-spécialistes et ne relevant pas d'un recensement exhaustif, concourent à l'amélioration des modèles de prédiction et donc *in fine* aussi à l'amélioration de l'efficacité des dispositifs.

La préparation à l'alerte dans le cas de dispositif appliqué aux mouvements de pente n'inclut par ailleurs que très rarement la conduite d'exercice. La littérature n'en fait pas état en tous les cas. Le retour d'expérience dans d'autres domaines (exercice Richter par exemple) montre pourtant que la conduite d'exercice permet de maintenir un bon niveau d'information des populations exposées et favorise aussi leur engagement. Il permet également, sur la base des leçons tirées, de proposer et élaborer des pistes d'amélioration visant à réduire la vulnérabilité des populations.

5.3 Synergie et coexistence entre dispositifs

La synergie entre les dispositifs d'alerte est globalement peu développée. Ce constat est valable pour des territoires sur lesquels coexistent des dispositifs locaux et régionaux comme en Italie par exemple. Les difficultés rencontrées sont nombreuses. Elles portent d'abord sur la répartition des responsabilités entre les différents intervenants et les interactions entre les gestionnaires des dispositifs. Les dispositifs sont souvent élaborés indépendamment les uns des autres, sans souci de cohérence et avec des technologies et des outils qui ne facilitent pas la collaboration. La coexistence de dispositifs multi-niveaux avec différents opérateurs et acteurs a aussi tendance à brouiller la perception des populations concernées. Les actions de communication vers les populations ne sont pas toujours concertées, ni sur la forme, ni sur le contenu. La répartition des rôles et responsabilités de chacun n'est donc pas toujours bien comprise et dans le contexte où les principaux acteurs se parlent peu la situation peine à évoluer. Pire, le manque de synergie entre les acteurs est souvent manifeste, ce qui a pour effet de décrédibiliser toute la chaîne opérationnelle et décisionnelle.

Il existe cependant des exceptions, et dans ce domaine les approches adoptées à Hong Kong ou en Norvège font souvent référence. Dans ces deux cas, la répartition des tâches et des responsabilités a été définie avec beaucoup de cohérence et de moyens ; elle s'inscrit dans une démarche globale qui favorise la coordination entre les services et la mutualisation des moyens de prévention et d'alerte. Cette stratégie permet également d'envisager une vision globale, multi-aléas voire multirisques (par exemple intégrant la problématique crue - inondation, avalanche et mouvements de pentes). Cette approche a l'avantage également de permettre une plus grande implication des populations exposées.

Elle peut néanmoins être difficile à déployer en raison de découpages administratifs et opérationnels des territoires. En Allemagne, par exemple l'organisation fédérale rend difficile la coordination des différents services publics et privés intervenant dans la prévention et la gestion des risques majeurs.

Enfin, on peut regretter le manque de d'efforts de diffusion et partage de connaissances dans le domaine. Les experts et centres de gestion et d'alerte n'ont souvent pas suffisamment les moyens ni le soutien pour valoriser largement leur travail auprès de leurs pairs. Cela explique, par exemple, l'absence de mention au dispositif d'alerte de Séchillienne dans la revue internationale des dispositifs locaux (voir section 3.1). Plus généralement, ce manque de synergie concerne toutes les composantes d'un dispositif d'alerte : de la production de la mesure au retour d'expérience de situations à risques. Les choses commencent néanmoins à changer. Une étude conjointe conduite entre les dispositifs de la Norvège et du Piedmont en Italie (Devoli et al., 2018) à la suite du cyclone Vb en mai 2013, qui avait touché successivement l'Italie et la Norvège, illustre ce changement.

5.4 REX Français : bilan et propositions

L'expérience française se limite aux dispositifs d'alerte locaux déployés dans le contexte de risques naturels majeurs. Les cas sont peu nombreux, et le dispositif le plus documenté est celui de Séchilienne, présenté en section 4.1, pour lequel des moyens importants ont été déployés entre 1986 et 2016. Les informations disponibles dans la littérature et en ligne sont principalement d'ordre technique et organisationnel tandis que les performances et l'efficacité du dispositif ne sont jamais réellement évoquées. On se limite à considérer que le dispositif a pleinement rempli sa fonction puisqu'il a permis de maîtriser le risque durant plusieurs décennies, le temps de mettre en œuvre différentes mesures de réduction de la vulnérabilité.

On peut ainsi regretter l'absence de documentation de synthèse alors que le site a connu 3 périodes marquantes en termes d'évolution (cf. section 4.1). De même, l'efficacité des mesures de préparation envers les populations exposées n'a jamais vraiment été considérée, hormis durant les projets Riskydrogeo²⁴ et ANR SLAMS²⁵.

Rappelons que la spécificité des dispositifs d'alerte sur les pentes instables et mouvements de terrains, en général, est qu'il s'agit contrairement aux risques sismiques, crues ou tempêtes, à caractère récurrent sur un même territoire, de dispositifs diffus et peu visibles, puisque très localisés et pour certains d'une durée limitée à quelques années.

Un élément de progrès dans la stratégie de gestion des risques naturels de mouvements de terrains par la surveillance et l'alerte consisterait donc à mettre en place un dispositif centralisé de capitalisation de données et de partage d'expérience sur les projets d'observation et de surveillance instrumentale menés au fil du temps à travers le territoire, pour le compte des collectivités, des aménageurs et autres gestionnaires de surveillance. La conception d'un tel dispositif pourrait être initiée, dans un premier temps, au travers d'un groupe de travail composé d'experts du réseau scientifique et technique, avant de s'élargir à des acteurs de l'administration territoriale, du monde académique, des bureaux d'étude et des gestionnaires de risques naturels de mouvements de terrain.

Un fil conducteur pourrait être celui de développer une capacité à suivre, sélectionner, centraliser et partager de manière ouverte des cas de référence de dispositifs d'alerte locaux sur risques naturels de mouvements de terrains à l'échelle nationale, européenne, voire internationale, projets souvent peu visibles, incluant les données documentaires et instrumentales jugées d'intérêt ainsi qu'un retour d'expérience technologique, scientifique et organisationnel-humain le plus enrichissant possible sur les projets aboutis.

Rappelons ici que la bancarisation intelligente, documentée de dispositifs de surveillance et d'alerte et partagée par les communautés scientifiques et organismes d'expertise est déjà organisée de manière structurée pour le risque sismique à l'échelle européenne et internationale.

Ceci pourrait être discuté dans le cadre du groupe de travail « stratégie de suivis des mouvements de terrains » piloté par la DGPR⁴ dont l'objectif est de définir une doctrine explicitant les critères retenus pour la mise en place (ou la poursuite) d'un suivi de site et de ce qui relève juridiquement de la responsabilité des services de l'État pour chaque niveau (régional, départemental) et, des collectivités territoriales. Les travaux lancés en 2019 dans le cadre du projet national C2ROP²⁶ sur la classification des systèmes de surveillance des éboulements jusqu'à 1000 m³ constituent une autre piste intéressante pour alimenter la démarche.

6 Conclusions

Techniquement et scientifiquement, les conditions de déploiement des dispositifs d'alerte appliqués aux instabilités de pentes induites par la pluie sont maîtrisées, comme l'illustrent les différents exemples présentés dans ce rapport. Ces dispositifs peuvent être locaux, et donc appliqués à un versant complexe de grande ampleur, ou territoriaux pour couvrir plusieurs typologies d'instabilités. Si les moyens et

²⁴ voir <http://www.risknat.org/projets/riskydrogeo/riskydrogeo.html>

²⁵ voir https://anr.fr/fileadmin/user_upload/documents/aap/2009/finance/risknat-financement-2009.pdf

²⁶ <https://www.c2rop.fr/>

méthodes différent selon l'échelle d'étude, la gestion de ces dispositifs s'appuie toujours sur un algorithme organisationnel et décisionnel basé sur l'expertise. Celui-ci décrit toutes les informations sur le nombre de niveaux d'alerte, leurs modalités d'activation et les suites à donner dans des délais précis.

Les pistes technologiques pour améliorer encore l'acquisition, le traitement et la gestion des données et améliorer les prévisions sont nombreuses et sans doute prometteuses. Leur mise en application opérationnelle se traduit par une technicité accrue des dispositifs, et une implication nécessairement croissante de *data scientists*. Le travail d'intégration et d'acceptation des nouvelles technologies, souvent complexes, par les utilisateurs et parties prenantes des dispositifs d'alerte doit donc être renforcé, et ce dès maintenant. En effet, de nombreux dispositifs, y compris certains récemment déployés comme aux Etats-Unis, sont encore basés sur une approche *top-down* qui voit la population exposée en toute fin de processus, c'est-à-dire en simple receveuse d'informations. Or pour être efficaces, les dispositifs d'alertes doivent être développés autour d'une véritable culture du risque et portés par une forte volonté politique. Ils doivent aussi s'ancrer durablement dans la société civile.

Par ailleurs, l'ensemble des acteurs impliqués dans la gestion de dispositifs d'alerte gagnerait à échanger davantage entre pairs. Il y a trop peu de coopération entre les gestionnaires de dispositif d'alerte, ce à tous les niveaux. La culture du retour d'expérience est trop peu développée, alors qu'il est extrêmement bénéfique comme cela a pu être démontré dans le domaine industriel par exemple. Il l'est d'autant plus que les cas dans lesquels des mouvements catastrophiques de grandes ampleurs se produisent sont relativement peu nombreux comparativement à d'autres phénomènes récurrents.

De ce fait, il n'existe pas encore de standards ou de bases communes pour déployer et gérer un dispositif d'alerte, ni mesurer son efficacité. La synergie entre différents dispositifs d'alertes déployés sur un même territoire ou frontaliers, couvrant éventuellement d'autres aléas géologiques ou hydro-climatiques, est également souvent encore négligée. Mais avec la prise de conscience collective des défis que présentent l'adaptation au changement climatique et la mise à disposition de nouvelles données instrumentales acquises les pratiques évoluent. Il est probable que d'ici à quelques années la plupart des pays se sera dotée de dispositifs d'alerte multirisques à grande échelle avec une réglementation uniforme au moins à l'échelle européenne. De même, la bancarisation intelligente, documentée de dispositifs de surveillance et d'alerte et partagée par les communautés scientifiques et organismes d'expertise devrait rapidement commencer s'organiser au niveau international.

7 Remerciements

Ce rapport s'appuie sur des rencontres et des échanges avec plusieurs experts en charge de la conception et de la gestion de dispositifs opérationnels pour les mouvements de pente induits par la pluie en Europe et ailleurs.

Nos remerciements s'adressent en particulier à MM. L. Piciullo (chercheur de l'université de Salerne), S. Segoni (chercheur de l'université de Florence), S. Cardellini (responsable technique dispositif d'Ancône), Mme G. Devoli (chercheur au sein de l'équipe technique du dispositif de Norvège), M. Stähli (WSL - Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research) et M. H. Marui de l'université de Nigata.

8 Références

- Alfieri, L., Salamon, P., Pappenberger, F., Wetterhall, F., and Thielen, J. (2012). Operational early warning systems for water-related hazards in Europe, *Environ. Sci. Policy*, 21, 35–49, 2012a.
- Alfonsi, P. (1997). Relations entre les paramètres hydrologiques et la vitesse des glissements de terrain, exemples de la Clapière et de Séchillienne (France), *Revue Française de Géotechnique*, 79, pp. 3-12.
- Antoine P., Camporota P., Giraud A. et Rochet L.(1987.) La menace d'écroulement aux Ruines de Séchillienne (Isère)., *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n°150-151, 55-64.
- Basher, R., Page, J., Woo, J., Davies, M.L., Synolakis, C.E., Farnsworth, A.F., Steacey, S. (2006). Global early warning systems for natural hazards: systematic and people-centred. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 364, 2167–2182.

Baroň, I., Supper, R., Ottowitz, D. (2012). Report on evaluation of mass movement indicators. Safeland deliverable D4.6. Geological Survey of Austria. Vienna, 382 p.

Beldring, S., Engeland, K., Roald, L.A., Selthun, N.R., Voks, A. (2003). Estimation of parameters in a distributed precipitation-runoff model for Norway. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 7, 304–316. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-7-304-2003>.

Bell, R., Thiebes, B., Glade, T., Vinogradov, R., Kuhlmann, H., Schauerte, W., Burghaus, S., Krummel, H., Janik, M., and Paulsen, H. (2008). The technical concept within the Integrative Landslide Early Warning System (ILEWS), landslides and engineered slopes, from the past to the future, *Proceedings of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes*, 30 June–4 July 2008, Xi'an, China, 1083–1088.

Berti, M., Martina, M. L. V., Franceschini, S., Pignone, A., Simoni, A., and Pizziolo, M. (2012). Probabilistic rainfall thresholds for landslide occurrence using a Bayesian approach, *Journal of geophysical research*, 117, F04006, doi:10.1029/2012JF002367, 2012.

Beldring, S., Engeland, K., Roald, L. A., Sælthun, N. R., and Voksø, A. (2003). Estimation of parameters in a distributed precipitationrunoff model for Norway, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 7, 304–316, <https://doi.org/10.5194/hess-7-304-2003>, 2003.

Boje, S. (2017). Hydrometeorologiske terskel for Jordskredfare på Sørlandet og Østlandet, NVE report 64, available at: http://publikasjoner.nve.no/rapport/2017/rapport2017_64.pdf (last access:20 November 2017), 2017 (in Norwegian).

Bouffier, C., Bennani, M., Franck, C. (2016). Guide de surveillance des cavités souterraines d'origine anthropique. Ineris.

Caine, N. (1980) The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annal* 62A:23–27

Calvello, M., d'Orsi, R., Piciullo, L., Paes, N. M., Magalhaes, M. A., Coelho, R., and Lacerda, W. A. (2014). The community-based alert and alarm system for rainfall induced landslides in Rio de Janeiro, Brazil, in: *Engineering Geology for Society and Territory "Landslide Processes"*, Proc. XII Int. IAEG Congress, Torino, Italy, 2, 653–657, doi:10.1007/978-3-319-09057-3_109.

Calvello, M., d'Orsi, R. N., Piciullo, L., Paes, N., Magalhaes, M., and Lacerda, W. A. (2015) The Rio de Janeiro early warning system for rainfall-induced landslides: analysis of performance for the years 2010–2013, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 12, 3–15, 2015. Calvello M, d'Orsi RN, Piciullo L, Paes N, Magalhaes MA, Lacerda WA (2015b). The Rio de Janeiro early warning system for rainfall-induced landslides: analysis of performance for the years 2010 – 2013. *Int J Disast Risk Reduc* 12:3–15. doi:10.1016/j.ijdr.2014.10.005.

Calvello, M. and Piciullo, L. (2016). Assessing the performance of regional landslide early warning models: the EDuMaP method. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 16, 103–122, 2016. www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/16/103/2016/doi:10.5194/nhess-16-103-2016.

Cardellini, S., Osimani, P. (2008) Living with landslide: the Ancona case history and early warning system. *Proc. First World Landslide Forum*, Tokyo, pp 473–476.

Cheung, P.Y., Wong, M. C. and Yeung, H. Y. (2006). Application of Rainstorm Nowcast to Real-time Warning of Landslide Hazards in Hong Kong, in: *WMO PWS, Workshop on Warnings of Real-Time Hazards by Using Nowcasting Technology*, Sydney, Australia, 9-13 October 2006.

Choi K.Y., R.W.M. Cheung (2013). Landslide disaster prevention and mitigation through works in Hong Kong. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 5 (2013) 354–365.

Cloutier, C., Agliardi, F., Crosta, G., Frattini, P., Froese, C., Jaboyedoff, M., ... Marui, H. (2015). The First International Workshop on Warning Criteria for Active Slides: technical issues, problems and solutions for managing early warning systems. *Landslides*, 12, 205–212.

Colleuille, H., Haugen, L.E., Beldring, S. (2010). A forecast analysis tool for extreme hydrological conditions in Norway. Poster presented in Sixth world FRIEND conference in 2010. Flow Regime and International Experiment and Network Data.

Coccia, S., Klein, E., Franck, C. (2017). Bilan de mise en oeuvre et d'expertise du dispositif de télé surveillance expérimentale du versant des Ruines de Séchilienne (38). Rapport Ineris.

- Cruden, D.M., Varnes, D.J. (1996). Landslide Types and Processes: Chapter 3 in Turner, A.K, and Schuster, R.L., (Editors) 1996: Landslides - Investigation and mitigation. Special Report 247, Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press Washington D. C, 1996, pp 36–75.
- Devoli, G., Tiranti, D., Cremonini, R., I., Sund, Boje, S. (2018). Comparison of landslide forecasting services in Piedmont (Italy) and Norway, illustrated by events in late spring 2013. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 1351–1372, 2018, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1351-2018>.
- Devoli, G, Kleivane, I., Sund, M., Orthe, N-K., Ekker, R., Johnsen, E., Colleuille, H. (2014). Landslide early warning system and web tools for real-time scenarios and for distribution of warning messages in Norway, in: Engineering Geology for Society and Territory “Landslide Processes”, Proc. XII International IAEG Congress, Torino, Italy, 625–629, doi:10.1007/978-3-319-09057-3_104.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., Ibsen, M.-L. Eds. (1996). *Landslide Recognition: Identification, Movement and Causes*. Wiley, Chichester, 251 pp.
- Di Biagio, E. & Kjekstad, O. (2007). Early Warning, Instrumentation and Monitoring Landslides. 2nd Regional Training Course, RECLAIM II, 29th January - 3rd February 2007.
- Duranthon, J.P., Effendiantz, L., Memier, M., Previtali, I. (2003). Apport des méthodes topographiques et topométriques au suivi du versant rocheux instable des ruines de Séchillienne. *Rev. XYZ* 94, 31–38.
- Einhorn B. (2010). Atelier transversal «Le risque de Séchillienne, socio-histoire et problématique de gestion», Grenoble, 3 décembre 2010.
- Fell, R., Ho, K.K.S., Lacasse, S., Leroi, E. (2005). A framework for landslide risk assessment and management. In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (Eds.), *Landslide Risk Management*. Taylor and Francis, London, pp. 3-26.
- Flageollet, J. C. (1988). *Les mouvements de terrain et leur prévention*. Paris, Masson, 224p.
- Francesco, P. (2010). An integrated approach for the real-time monitoring of a high risk landslide by a regional civil protection office, (May 2015).
- Garcia, L. C. (2011). Mountain risk management: integrated people centred early warning system as a risk reduction strategy, Northern Italy. PhD Thesis.
- Garcia, C. (2012). Designing and implementing more effective integrated early warning systems in mountain areas : a case study from Northern Italy. *Journal of Alpine Research* 100-1/2012.
- Glatron, S. et Beck, E., (2008). Evaluation of socio-spatial vulnerability of citydwellers and analysis of risk perception: industrial and seismic risks in Mulhouse. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8: 1029-1040.
- Guzzetti, F., Gariano S. L., Peruccacci S., Brunetti M. T., Marchesini I., Rossi M., Melillo M. (2019). Geographical landslide early warning systems. *Earth-Science Reviews* 200 (2020) 102973.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics* 98 (3-4), 239-267.
- Guzzetti, F. (2017). Challenges for operational forecasting and early warning of rainfall induced landslides. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 19, EGU2017-6029-1, 2017 EGU General Assembly 2017.
- Hyogo Framework for Action 2005–2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters, World Conference on Disaster Reduction 18–22 January 2005, Kobe, Hyogo, Japan, 22 pp., 2005.
- Ifsttar et Cerema, *Surveillance des pentes et des falaises instables, Conception et mise en oeuvre des dispositifs de mesure - Acquisition et traitement de l'information*. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2016. Techniques et méthodes, guide technique, GTI1, 172 pages, numéro ISBN 978-2-85782-710-8.
- Intrieri, E., Gigli, G., Casagli, N., and Nadim, F. (2013). Brief communication “Landslide Early Warning System: toolbox and general concepts”. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 13, 85–90, doi:10.5194/nhess-13-85-2013.

Klein E., Durenne A., Gueniffey Y. (2013). L'analyse statistique de données appliquée à la surveillance multi-paramètres de versants instables. Journées 'Aléa Gravitaire' 2013, 17-18 septembre 2013, Grenoble.

Klein E., Gueniffey Y., Coccia S., Bigarre P. (2014). Dynamique de mouvements de versant : mécanismes de déformation complexes et analyse de données multi-paramètres. Rock Slope Stability Symposium, 2014.

Krøgli K., I., Devoli G., Colleuille H., Sund M., Boje S., Engen I., K. (2017). The Norwegian forecasting and warning service for rainfall and snowmelt induced landslides. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., <https://doi.org/10.5194/nhess-2017-426>.

Lagomarsino, D., Segoni, S., Fanti, R., and Catani, F. (2013). Updating and tuning a regional-scale landslide early warning system. Landslides, 10, 91–97.

Lefort, P. (1998) "Ruines de Séchilienne et risques d'inondation – Synthèse des connaissances", Rapport (INPG Entreprise) pour la DDE de l'Isère, janvier 1998.

Lindell, M., K., and Perry R., W. (2012). The Protective Action Decision Model: Theoretical Modifications and Additional Evidence. Risk Analysis, Vol. 32, No. 4, 2012.

Maquaire, O. (2002). Aléas géomorphologiques (mouvements de terrain) – processus, fonctionnement, cartographie. HDR Thesis.

Martelloni, G., Segoni, S., Fanti, R., Catani, F. (2012). Rainfall thresholds for the forecasting of landslide occurrence at regional scale. Landslides 9 (4), 485–495. <http://dx.doi.org/10.1007/s10346-011-0308-2>.

Panet, M., Bonnard, C., Lunardi, P., Presbitero, M. (2000). "Expertise relative aux risques d'éboulement du versant des ruines de Séchilienne", Rapport du collège d'experts, remis au Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, daté du 4 décembre, 24 p. (Rapport dit aussi « Rapport Panet I »).

Paton, D. (2003). "Disaster preparedness: a social-cognitive perspective", Disaster Prevention and Management: An International Journal, Vol. 12 Issue: 3, pp.210-216, <https://doi.org/10.1108/09653560310480686>

Piciullo, L., Cepeda, J., Calvello, M. (2018). Territorial early warning systems for weather-induced landslides. Earth science reviews 179 (2018) 228-247..

Pothérat, P., Effendiantz, L. (2009). Néotectonique et grands mouvements de versant. Le cas de Séchilienne (Isère, France), Bulletin of Engineering Geology and Environment, 2009, pp 567-577.

Pecoraro, G., Calvello, M., Piciullo, L. (2018). Monitoring strategies for local landslide early warning systems. Landslides, DOI 10.1007/s10346-018-1068-z.

Ponziani, F., Berni, N., Stelluti, M., Zauri, R., Pandolfo, C., Brocca, L., Tamagnini, C. (2013). Landwarn: An operative early warning system for landslides forecasting based on rainfall thresholds and soil moisture. In Landslide Science and Practice: Early Warning, Instrumentation and Monitoring (Vol. 2, pp. 627–634).

Revet, S. (2009). Les organisations internationales et la gestion des risques et des catastrophes "naturels". Etudes du CERI, 2009, pp.1-30.

Restrepo, P., Cannon, S.H., Laber, J., Jorgensen, D.P., Werner, K. (2009). NOAA/USGS demonstration flash-flood and debris-flow early-warning system for recently burned areas in Southern California, USA. In: 7th International Conference on Geomorphology. Australia, July 2009.

Sättele, M., Bründl, M., and Straub, D. (2015). Reliability and effectiveness of warning systems for natural hazards: concept and application to debris flow warning, Rel. Eng. Syst. Safety, 142, 192–202, 2015a.

Sättele, M., Krautblatter, M., Bründl, M., and Straub, D. (2015). Forecasting rock slope failure: How reliable and effective are warning systems? Landslides, 605, 1–14, 2015b.

Sättele, M., Bründl, M., and Straub, D. (2016). Quantifying the effectiveness of early warning systems for natural hazards. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 16, 149–166, 2016
www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/16/149/2016/

- Segoni, S., Battistini, A., Rossi, G., Rosi, A., Lagomarsino, D., Catani, F., Moretti, S., and Casagli, N. (2015). Technical Note: An operational landslide early warning system at regional scale based on space–time-variable rainfall thresholds, *Natural Hazards Earth System Sciences*, 15, 853–861, doi:10.5194/nhess-15-853-2015.
- Segoni, S., Rosi, A., Lagomarsino D., Fanti R., Casagli, N. (2016). The impact of rainfall time series with different length in a landslide warning system, in the framework of changing precipitation trends. *Geoenvironmental Disasters* (2016) 3:21 DOI 10.1186/s40677-016-0057-6.
- Segoni, S., Piciullo L., Gariano S. L. (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides*, DOI 10.1007/s10346-018-0966-4.
- Stähli M., Sättele M., Huggel C., McARDell B.W., Lehmann P., Van Herwijnen A., Berne A., Schleiss M., Ferrari A., Kos A., Or D, Springman S.M. (2015). Monitoring and prediction in early warning systems for rapid mass movements. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 15:905–917. doi:10.5194/nhess-15-905-2015.
- Tacnet, J.-M. (2004). Prevention and information related to flood risk management - elements of comparison between systems in France, England and Wales. Technical report, Cemagref -Engref - Environment Agency.
- Tiranti, D., & Rabuffetti, D. (2010). Estimation of rainfall thresholds triggering shallow landslides for an operational warning system implementation landslide for an operational warning system, (December). <http://doi.org/10.1007/s10346-010-0198-8>.
- Thiebes, B. and Glade, T. (2016). Landslide early warning systems – fundamental concepts and innovative application, in: *Landslides and Engineered Slopes: Experience, Theory and Practice*, edited by: Aversa, S., Cascini, L., Picarelli, L., and Scavia, C., *Proceedings of the 12th International Symposium on Landslides*, Napoli, Italy, 12–19 June 2016, CRC Press, 1903–1911.
- Thiebes, B. (2011). Landslide analysis and early warning—local and regional case study in the Swabian Alb, Germany. Dissertation. University of Vienna, Austria.
- Thiebes, B., Glade, T., Bell, R. (2012). Landslide analysis and integrative early warning-local and regional case studies. In: Eberhardt E (ed) *Landslides and engineered slopes: protecting society through improved understanding*. Taylor & Francis Group, London, pp. 1915-1921.
- UNISDR, (2006a). Global Survey of Early Warning Systems. UN/ISDR, 56 p.
- UNISDR, (2006b). Compendium of Early Warning Systems, EWC III, Third National Conference on Early Warning. UN/ISDR, Bonn, Germany, 47 p.
- UNISDR, (2009). ISDR: Terminology [online]. <http://www.unisdr.org/eng/library/lib-terminology-eng%20home.htm> [Accessed:15 September 2010] US Army Corps of Engineers, 2003.
- Uzielli, M., Catani F., Tofani, V., Casagli N. (2015). Risk analysis for the Ancona landslide—I: characterization of landslide kinematics. *Landslides* (2015) 12:69–82 DOI 10.1007/s10346-014-0474-0.
- Varnes, D.J., (1978). Slope movement types and processes. In Schuster, R.L and Krizek, R.J. (Editors) 1978: *Landslides Analysis and control*. Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington, 11-33.
- White, I.D., Mottershead, D.N. and Harrison, J.J. (1996). *Environmental systems*, 2nd edn, Chapman & Hall, London.
- Wilson, R.C. (2004). The rise and fall of a debris-flow warning system for the San Francisco Bay Region, California. In: *Landslide Hazard and Risk*, edited by: Glade T, Anderson M, Crozier MJ. Wiley, New York, pp 493–516. <https://doi.org/10.1002/9780470012659.ch17>.
- Yin, Y. P., Pan, G. T., Liu, Y. P. (2009). Great Wenchuan earthquake: seismogeology and landslide hazards. Geological press, Beijing, pp. 61-126.
- Yu, Y.F., Lam, J., Siu, C.K., Pun, W.K. (2004). Recent advance in Landslip Warning System, in: *Recent Advances in Geotechnical Engineering*, Proceedings of the Twenty-fourth Geotechnical Division Annual Seminar. Institution of Engineers, Hong Kong, 139–147.

