

# **RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES DISPOSITIFS D'ALERTE APPLIQUES AUX INSTABILITES DE PENTE FEEDBACK ON EARLY WARNIG SYSTEMS FOR LANDSLIDES**

Stella COCCIA<sup>1</sup>, Emmanuelle KLEIN<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*Ineris, Nancy, France*

**RÉSUMÉ** – Avec le changement climatique et l'urbanisation croissante de territoires à risque, le développement des dispositifs d'alerte a beaucoup progressé. Ils sont maintenant déployés à l'échelle locale et/ou territoriale et intègrent un ensemble d'outils et de processus complexes. Le retour d'expérience souligne la nécessité de faire évoluer les pratiques pour améliorer leur efficacité et obtenir une meilleure adhésion de la population.

**ABSTRACT** – With climate change and the growing urbanization of areas at risk, the development of early warning systems has progressed considerably. Now, they are deployed at local and/or regional scale and integrate a set of complex tools and processes. Feedback underlines the need to develop practices to improve their efficiency and obtain better support from the population.

## **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. On constate que de nombreux mouvements de pente récents qui ont occasionné des pertes humaines et économiques importantes, sont survenus à la suite d'événements climatiques dits extrêmes qui se caractérisent par des pluies intenses 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.

Cet article présente un retour d'expérience sur ces dispositifs d'alerte. 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. Il débute par quelques éléments de contexte sur les dispositifs d'alerte et leurs composantes fondamentales pour bien cadrer le propos. Il est à noter que les dispositifs scientifiques d'observation (par exemple OMIV en France) ou les systèmes de surveillance qui ne couvrent pas la question de la capacité de réponse ne sont pas couverts par cette synthèse. L'article s'intéresse ensuite à l'échelle de mise en œuvre qui peut être locale ou territoriale, voire parfois les deux puisque sur certains territoires les deux types de dispositifs coexistent. Il se termine par des considérations relatives à l'efficacité et à la synergie entre dispositifs et approches, ainsi que les pistes actuelles de développement et éléments de progrès à considérer dans un avenir proche.

## 2. Généralités sur les dispositifs d'alerte

### 2.1 Les quatre éléments fondateurs

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 et du soutien de la part des instances gouvernementales et des institutions internationales (Revêt, 2009 ; Alfieri et al., 2012). 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.

Le Tableau 1 illustre l'évolution de l'approche déployée dans le cas de mouvements de pente, entre 2007, période à laquelle la principale difficulté est la définition des seuils d'alerte adéquats (Di Biagio & Kjekstad, 2007) et 2013 qui place la population exposée au rang d'acteur de la prévention du risque (Intrieri et al., 2013).

Tableau 1. Comparaison entre la définition donnée par le UNISDR (2006a et b en vert) 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 (modifié à partir de Piciullo et al, 2018)

UNISDR (2006)	Di Biagio & Kjekstad (2007)	Bell et al. (2009)	Intrieri et al. (2013)	Calvello et al. (2015)	Fathani et al. (2016)	Calvello (2017)
	Connaissance de l'aléa		Planification	Prise de décision	Connaissance de l'aléa	Composantes du modèle du mouvement de pente (Surveillance, météo, géo-caractérisation et instabilité)
Système de surveillance et alerte	Surveillance	Surveillance	Surveillance	Surveillance	Surveillance et alerte	
	Analyse et prévision	Modélisation	Prévision	Modélisation		
	Alerte			Alerte		Composantes du modèle d'alerte (Critères d'alerte et alerte)
Diffusion et communication	Mise en œuvre				Diffusion et communication	Composantes du système d'alerte (Dissémination de l'alerte, communication & éducation, implication de la communauté et plan d'urgence)
Capacité de réponse	Plan d'urgence			Plan d'urgence	Capacité de réponse	
		Education	Education			

## **2.2 L'échelle locale et l'échelle territoriale**

L'échelle dite locale (Thiebes et al., 2012; Piciullo et al., 2018 et Pecoraro et al., 2018 ; etc.) est celle d'un versant sur lequel une seule typologie de mouvement de pente est rencontrée. Elle repose alors principalement sur la collecte en quasi-temps réel et l'expertise des grandeurs physiques les plus pertinentes pour appréhender l'évolution du site, ainsi que sur les facteurs déclenchants extérieurs. Le choix précis des instruments, de leur nombre, de leur positionnement, etc. est défini selon les conditions de chaque site, y compris en termes d'enjeux, de contraintes techniques environnementales et de moyens financiers.

L'échelle dite régionale (Thiebes et al., 2012; 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 à l'aide de pluviomètres automatiques et radars météorologiques ; elle 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.

Les dispositifs locaux (28) et territoriaux (24) opérationnels selon la littérature sont présentés sur la Figure 1.

## **2.3 Seuils et zones d'alerte**

L'une des 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 un changement d'état 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. 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).

Un ou plusieurs seuils peuvent être utilisés pour établir un *niveau d'alerte*. 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 constate dans la pratique que le nombre de niveaux d'alerte est très variable d'un dispositif à l'autre.

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

## **2.4 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, un exemple est donné en Figure 2. Il est plus ou moins complexe selon l'échelle de mise en œuvre du dispositif et des enjeux.

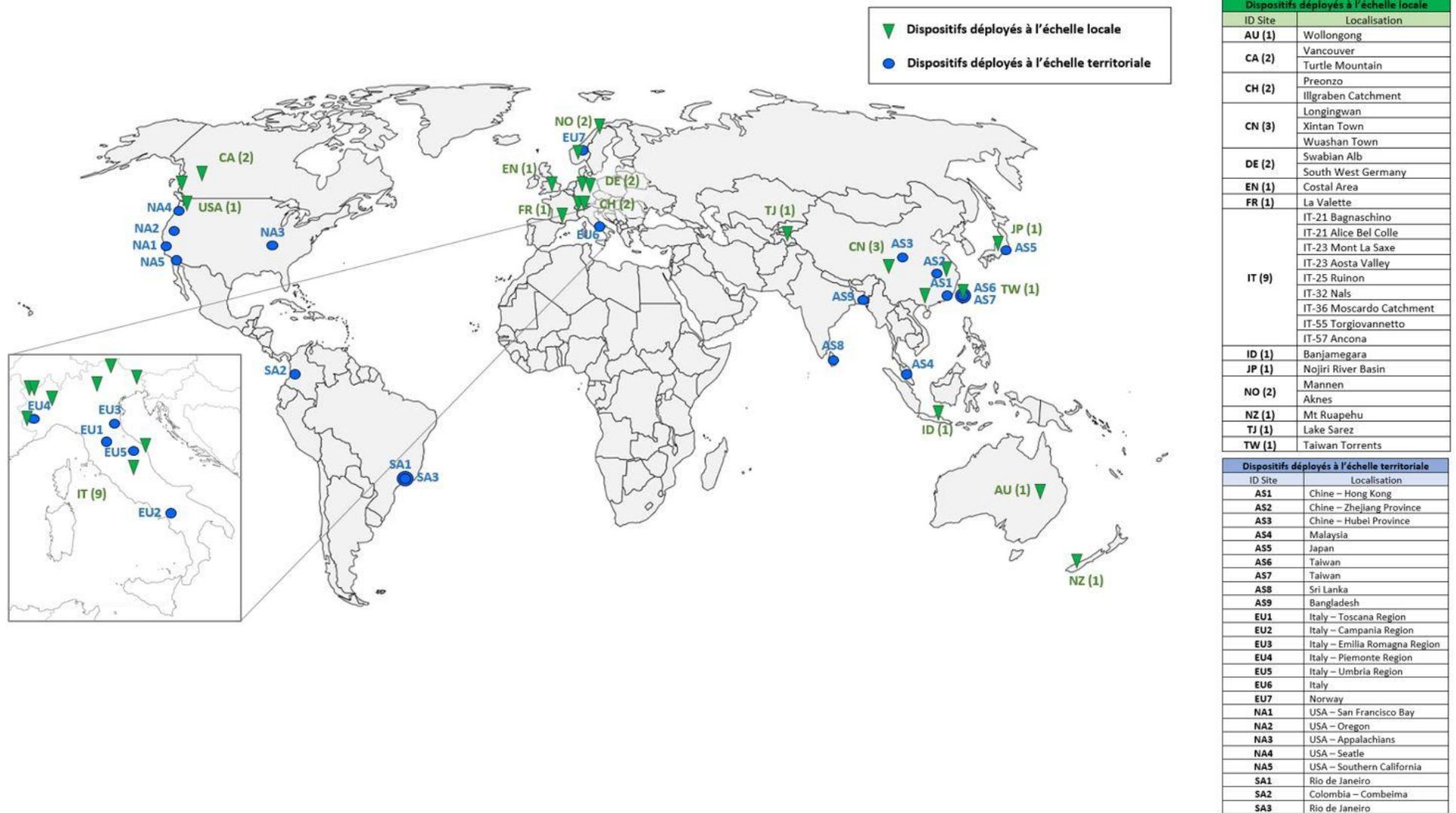


Figure 1. Cartographie des dispositifs d'alerte à l'échelle locale (28) et territoriale (24, modifiée à partir des cartographies de Pecoraro et al., 2018 et Piciullo et al., 2018).

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, qui rendent la distribution des tâches administratives et le déclenchement des plans d'urgence plus simple et immédiat.

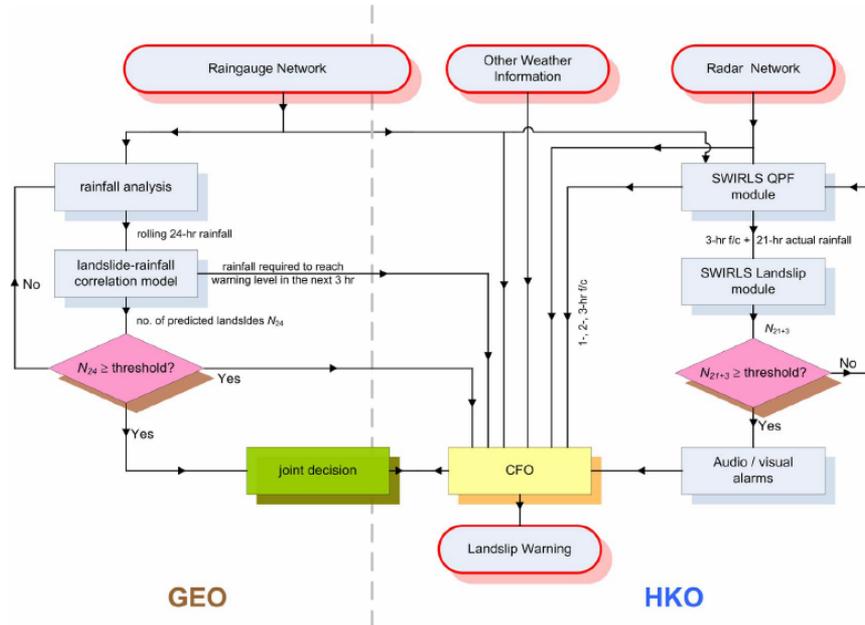


Figure 2. Exemple d'algorithme décisionnel et organisationnel. Dispositif d'alerte d'Hong-Kong et synergie entre les services GEO et HKO (Cheung et al., 2006).

### 3. La difficile évaluation de l'efficacité des dispositifs d'alerte

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 ;
- des *fausses alertes* conduisant à engager des mesures d'urgence sans que l'instabilité attendue ne se produise.

La question de l'efficacité d'un dispositif d'alerte est donc centrale. Elle peut être décrite comme la capacité à prévoir l'occurrence d'un aléa en temps utile et à déclencher les réponses adéquates. Toutefois, la mesure de la performance des dispositifs d'alerte est dans la pratique difficile, en tous les cas elle reste techno-centrée. L'alerte relève pourtant quasi-systématiquement d'une décision humaine de la part d'un expert ou d'un décideur non-expert, comme par exemple en France d'un préfet. De même, la capacité de réponse et l'engagement des populations ne sont que très rarement pris en compte dans les schémas d'évaluation de l'efficacité.

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 exposée. 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 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 ; etc.), dont l'objectif est de favoriser l'attitude et l'implication des populations exposées.

#### **4. Les enjeux actuels**

##### **4.1 Synergie et coexistence entre dispositifs :**

On observe que 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 (Klein et Coccia, 2020) : 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 qui permet aussi d'envisager une vision globale, multi-aléas voire multirisques (par exemple intégrant la problématique crue - inondation, avalanche et mouvements de pentes). Elle présente l'avantage d'également mieux impliquer les populations exposées.

Cette démarche globale peut certes 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.

##### **4.2 L'alliance entre la technologie et l'expertise humaine**

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. Les exemples tirés de la littérature montrent qu'il peut s'accompagner d'innovations majeures pour faire face par exemple aux conditions de terrain et aux contraintes de fonctionnement.

Le développement d'algorithmes d'intelligence artificielle par exemple semble ouvrir de nouvelles perspectives pour la prévision d'alerte. Ce domaine est en forte évolution avec

des résultats déjà positifs 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, d'autant que contrairement à d'autres types de risques naturels elle n'est pas évidente. En effet, la spécificité des dispositifs d'alerte appliqués aux pentes instables et mouvements de terrains en général, est qu'il s'agit de dispositifs diffus et peu visibles, puisque très localisés et pour certains d'une durée limitée à quelques années. Contrairement aux dispositifs pour les risques sismiques, crues ou tempêtes qui ont un caractère récurrent sur un même territoire.

## 5. Conclusions

Techniquement et scientifiquement les conditions de déploiement des dispositifs d'alerte appliqués aux instabilités de pentes induites par la pluie sont maîtrisées. 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 méthodes diffèrent 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, et ce à tous les niveaux. La culture du Rex est également trop peu développée, alors que celui-ci est extrêmement bénéfique comme dans le domaine industriel par exemple.

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 présente 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 à s'organiser au niveau international.

## **6. Références bibliographiques**

- 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.
- 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. *Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 364, 2167– 2182.
- 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.
- 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.
- Di Biagio, E. & Kjekstad, O. (2007). Early Warning, Instrumentation and Monitoring Landslides. 2nd Regional Training Course, RECLAIM II, 29th January - 3rd February 2007.
- Garcia, L. C. (2011). Mountain risk management: integrated people centred early warning system as a risk reduction strategy, Northern Italy. PhD Thesis.
- 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. & Coccia S. (2020). Les dispositifs d'alerte appliqués aux instabilités de pente : concepts, retour d'expérience et perspectives. Rapport Ineris, Ineris-179215-644273.
- 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.
- Pecoraro, G., Calvello, M., Piciullo, L. (2018). Monitoring strategies for local landslide early warning systems. *Landslides*, DOI 10.1007/s10346-018-1068-z.
- Revet, S. (2009). Les organisations internationales et la gestion des risques et des catastrophes "naturels". *Etudes du CERI*, 2009, pp.1-30.
- 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.
- White, I.D., Mottershead, D.N. and Harrison, J.J. (1996). *Environmental systems*, 2nd edn, Chapman & Hall, London.