

Systèmes d'alerte précoce pour les aléas naturels et environnementaux : virage ou mirage technologique ?

Early warning systems for natural and environmental hazards: technological shift or mirage?

David Didier, Pascal Bernatchez et Dany Dumont

Volume 30, numéro 2, 2017

Reçu le 14 décembre 2016, accepté le 3 juillet 2017

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1042922ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/1042922ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Didier, D., Bernatchez, P. & Dumont, D. (2017). Systèmes d'alerte précoce pour les aléas naturels et environnementaux : virage ou mirage technologique ? *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 30(2), 115–146. <https://doi.org/10.7202/1042922ar>

Résumé de l'article

Les systèmes d'alerte précoce sont un moyen de réduction des risques naturels. Bien qu'ils soient appliqués depuis plusieurs décennies pour la plupart des aléas, notamment pour les aléas hydrométéorologiques et géologiques, ils sont généralement inefficaces. Le Québec est sujet à une multitude d'aléas hydrométéorologiques (verglas, déluge, submersion, érosion, etc.), certaines occurrences dans les dernières décennies ont mené à un questionnement des acteurs quant à l'efficacité de réponse des systèmes en place. Grâce à une revue exhaustive de la littérature, cet article fait ressortir les conditions qui permettent l'opérationnalisation efficace des systèmes d'alerte précoce, en les positionnant dans le contexte d'une gestion de risque. Elle synthétise également les facteurs qui contraignent son fonctionnement et souligne certains critères de réussite. Plusieurs facteurs techniques, administratifs et sociaux influencent leur fonctionnement alors que la principale contrainte à leur efficacité réside dans la communication de l'alerte et dans la réponse non appropriée qui y fait suite. Mettre en opération un système d'alerte précoce efficace demande une approche holistique en opposition aux systèmes de communication linéaire basés sur la technologie qui voit la population à la fin du processus. Si l'intérêt des systèmes d'alerte précoce est de diminuer le risque encouru par une population, amoindrir sa vulnérabilité exige que le type de système soit adapté au contexte local. Joindre les connaissances scientifiques au savoir local peut contribuer à cibler les besoins réels et faciliter la transmission des connaissances pour l'ensemble des acteurs. Cette collaboration peut se réaliser grâce à un suivi environnemental. Pour diminuer la vulnérabilité, un retour d'expérience des communautés vers le système semble nécessaire.

SYSTÈMES D'ALERTE PRÉCOCE POUR LES ALÉAS NATURELS ET ENVIRONNEMENTAUX : VIRAGE OU MIRAGE TECHNOLOGIQUE?

Early warning systems for natural and environmental hazards: technological shift or mirage?

DAVID DIDIER¹*, PASCAL BERNATCHEZ¹, DANY DUMONT²

¹Université du Québec à Rimouski, Département de Biologie, Chimie et Géographie, Laboratoire de dynamique et gestion intégrée des zones côtières, Québec-Océan, Centre d'études nordiques, 300, allée des Ursulines, Rimouski, Québec G5L 3A1, Canada

²Université du Québec à Rimouski, Institut des sciences de la mer de Rimouski, Québec-Océan, 310, allée des Ursulines, Rimouski, Québec G5L 3A1, Canada

Reçu le 14 décembre 2016, accepté le 3 juillet 2017

RÉSUMÉ

Les systèmes d'alerte précoce sont un moyen de réduction des risques naturels. Bien qu'ils soient appliqués depuis plusieurs décennies pour la plupart des aléas, notamment pour les aléas hydrométéorologiques et géologiques, ils sont généralement inefficaces. Le Québec est sujet à une multitude d'aléas hydrométéorologiques (verglas, déluge, submersion, érosion, etc.), certaines occurrences dans les dernières décennies ont mené à un questionnement des acteurs quant à l'efficacité de réponse des systèmes en place. Grâce à une revue exhaustive de la littérature, cet article fait ressortir les conditions qui permettent l'opérationnalisation efficace des systèmes d'alerte précoce, en les positionnant dans le contexte d'une gestion de risque. Elle synthétise également les facteurs qui contraignent son fonctionnement et souligne certains critères de réussite. Plusieurs facteurs techniques, administratifs et sociaux influencent leur fonctionnement alors que la principale

contrainte à leur efficacité réside dans la communication de l'alerte et dans la réponse non appropriée qui y fait suite. Mettre en opération un système d'alerte précoce efficace demande une approche holistique en opposition aux systèmes de communication linéaire basés sur la technologie qui voit la population à la fin du processus. Si l'intérêt des systèmes d'alerte précoce est de diminuer le risque encouru par une population, amoindrir sa vulnérabilité exige que le type de système soit adapté au contexte local. Joindre les connaissances scientifiques au savoir local peut contribuer à cibler les besoins réels et faciliter la transmission des connaissances pour l'ensemble des acteurs. Cette collaboration peut se réaliser grâce à un suivi environnemental. Pour diminuer la vulnérabilité, un retour d'expérience des communautés vers le système semble nécessaire.

Mots-clés : *Systèmes d'alerte précoce, aléas naturels, changements environnementaux, vulnérabilité, gestion des risques.*

ABSTRACT

Early warning systems (EWS) are methods implemented in natural risk management. For many decades, they have been applied to all kinds of hazards, especially water-related and geological ones, but are rarely effective. In the last few decades, the Province of Quebec was hit by many water-related hazards (ice storms, inland and coastal flooding, coastal erosion, etc.). A lot of questions arose from stakeholders about the effectiveness of the response capacity of current systems. This paper underlines the main conditions that contribute to making EWS effective within a risk management approach using an exhaustive literature review. It further states key factors and constraints to their success and failures. Many factors, such as technical, administrative, and sociological, influence their operation. The alert communication and its non-appropriate response is the main constraint to an EWS success. To bring out the main contributors of an effective EWS in a risk management context, this document synthesises their constraints and underlines some success criteria. The operation of an effective EWS requires a holistic approach instead of simple linear communication networks solely based on technology, which generally forget to integrate the community into the entire process. While the main goal of an EWS is to minimize the risk affecting a population, lowering its vulnerability necessitates a locally adapted system. Moreover, linking scientific to traditional knowledge can contribute to focusing on real and concrete societal needs, and facilitates knowledge sharing among stakeholders. Such a collaboration can be accomplished through environmental monitoring. Ultimately, feedbacks from communities into the system are imperative to reduce vulnerabilities to natural hazards.

Key Words: *Early warning systems, natural hazards, environmental changes, vulnerability, risk management.*

1. INTRODUCTION

Depuis plusieurs décennies, des centaines de milliers de personnes ont été atteintes annuellement par une catastrophe naturelle (BASHER, 2006; GOLNARAGHI, 2012), résultat d'une augmentation de la fréquence des aléas naturels et environnementaux sur les populations vulnérables, et d'une croissance de l'exposition des enjeux face à ces aléas (CARDONA *et al.*, 2012). Malgré une hausse générale des coûts associés à l'occurrence des désastres (GOLNARAGHI, 2012; HALLEGATE, 2012; McSHARRY, 2014) estimés en moyenne à 169,7 milliards de dollars (\$US) par année dans la dernière décennie (GUHA-SAPIR *et al.*, 2016), la mise en place de systèmes d'alerte précoce (SAP) dans certaines approches de gestion des risques a permis de diminuer le nombre de

personnes atteintes (FAKHRUDDIN et CHIVAKIDAKARN, 2014; HAQUE *et al.*, 2012; UNISDR, 2006b).

Un SAP permet la cueillette d'informations sur une circonstance ou un aléa potentiellement dangereux, et permet une préparation anticipée pour réduire le risque (BASHER, 2006). Son but est de maximiser le nombre de personnes qui prennent une action appropriée à temps pour être en sécurité (LANDIS, 2003). Il vise à protéger des vies, mais aussi les infrastructures et l'environnement (BOWMAN *et al.*, 2014). Le SAP se définit comme un « ensemble de capacités nécessaires pour générer et diffuser des informations significatives d'alerte en temps opportun pour permettre à des individus, des communautés et des organisations menacés par un aléa de se préparer et d'agir de façon appropriée et en temps suffisant pour réduire la possibilité de dommages ou de pertes » (UNISDR, 2009). En théorie, il est mis en place dans la plupart des pays et pour la plupart des aléas naturels hydrométéorologiques et géologiques (GRASSO, 2014; UNEP, 2012; UNISDR, 2006a).

Si un certain succès des SAP apparaît dans la littérature grâce à l'apport des technologies de pointe qui permettent un suivi de plus en plus précis des processus (COOLS *et al.*, 2016; OMM, 2010), la plupart des pays en développement et plusieurs pays développés ne possèdent que peu ou pas de systèmes aux capacités opérationnelles à la hauteur des attentes théoriques. Comme le dit GLANTZ (2004) « il n'y a pas de SAP parfait, sauf sur papier ». Dans les faits, près d'un cinquième de la population mondiale n'a pas accès à l'électricité (IEA, 2015), d'où la difficulté à promouvoir un SAP basé uniquement sur la technologie. La vulnérabilité des populations et de leur environnement, pouvant être définie comme étant l'ensemble des caractéristiques, circonstances et propensions à l'endommagement des communautés, la rendant susceptible de subir les effets d'un danger (LÉONE *et al.*, 1996; UNISDR, 2009), n'est donc pas toujours réduite. Ce sont surtout des problèmes de communication limitant la diffusion de l'information entre les composantes du SAP et les personnes à risque qui sont en cause (BAUDOIN *et al.*, 2014; SORENSEN, 2000). Ces contraintes remettent en question l'application habituellement technocentée des systèmes d'alerte, bien que l'inefficacité de ces approches soit une évidence depuis les années 90 (MILETI et SORENSEN, 1990). Elles soulèvent également des interrogations quant à la façon absolue de rendre ces systèmes opérationnels et efficaces afin de diminuer la vulnérabilité des populations face aux aléas naturels et environnementaux. Est-il opérationnellement possible de rendre les SAP totalement efficaces ?

L'objectif de cet article est de dresser un portrait des facteurs influençant l'efficacité des SAP pour la gestion des risques naturels et environnementaux à partir d'une revue des principaux travaux scientifiques et publications d'organismes

internationaux portant sur l'implantation des SAP. De plus, ce travail est justifié dans un contexte où les gouvernements sont interpellés par l'efficacité des systèmes en place et que la recherche est vue comme un moyen essentiel pour faire avancer les connaissances sur les pratiques de sécurité civile, sur les risques naturels et aussi sur les technologies associées aux SAP (GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 2014). Les SAP font l'objet depuis les années 40 des tumultes des paradigmes dominants de la gestion des risques (MANYENA, 2012). Ce travail positionne dans un premier temps (section 2) les SAP dans leur contexte et soulève les questionnements actuels sur leur application. La section 3 présente le fonctionnement des SAP ainsi que les contraintes à leur efficacité pour réduire la vulnérabilité tant du point de vue des composantes technologiques et sociales que des approches de mise en opération. Les principaux moyens de quantification de l'efficacité des SAP ainsi que les paramètres et contraintes qui l'affectent sont explicités. Enfin, en section 4, les enseignements tirés de cette revue de littérature sur l'utilisation des SAP dans divers contextes sociopolitiques et géographiques et pour une variété d'aléas permettent de proposer un modèle conceptuel pour diminuer la vulnérabilité des populations et de l'environnement à l'aide d'un SAP dans un contexte de changements environnementaux et à l'ère des conventions internationales prônant des approches participatives (WAHLSTRÖM, 2015).

2. ÉVOLUTION DES SYSTÈMES D'ALERTE PRÉCOCE

Selon l'UNISDR (2009), un aléa naturel est un « processus ou phénomène naturel qui peut causer des pertes de vies humaines, des blessures ou d'autres effets sur la santé, des dommages aux biens, la perte de moyens de subsistance et de services, des perturbations socio-économiques, ou des dommages à l'environnement ». L'UNISDR intègre les aléas environnementaux, naturels et technologiques au sein de la même classification (Tableau 1). Dans un contexte de SAP, la cinétique du processus (KOUADIO et DOUVINET, 2015; UNISDR, 2015) divise les aléas en deux classes : soudains et lents (Tableau 1). Diffuser une alerte qui permet à une personne de fuir doit tenir compte de la vitesse de développement de l'aléa, et ce paramètre est essentiel à l'efficacité d'un SAP qui implique des actions humaines (ZOMMERS et SINGH, 2014).

Dans les années 1940, les catastrophes étaient vues comme des événements « naturels limités aux forces de la nature » (QUENAULT, 2015). Questionnant les idées dominantes et aléa-centrées à propos des désastres, WHITE (1945) instaure

une vision *socionaturelle* des risques, accusant les humains de stagner en zones inondables. Son travail est précurseur de l'actuelle Stratégie internationale de réduction des désastres sous l'égide des Nations Unies (UNISDR). L'auteur mentionne déjà à l'époque que les habitants d'une plaine inondable se doivent de recevoir une alerte aussi rapide que possible afin d'évacuer ou d'apporter des mesures de précautions (WHITE, 1945).

Pour McLUCKIE (1970), l'alerte sert surtout à la préparation avant sinistre pour les personnes et les communautés, suggérant « que l'aspect important d'une alerte réside dans ses composantes sociales et humaines, plutôt que dans un quelconque élément technologique ou d'ingénierie ». FOSTER (1980) ajoute que la technologie et la coopération des acteurs forment un système complexe de prise de décision à l'œuvre avant la détection de la menace, mais qui ne se termine qu'une fois les actions entreprises par les gens vulnérables. Ceci peut se réaliser, selon WALKER (1989), par un réseau de communication qui fournit le message au bon moment : or, comme s'interroge l'auteur, « qui devrait informer qui pour faire quoi? »

Dans les années 1970 et 1980, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (ONUAA) a largement contribué à l'essor et la reconnaissance des besoins en SAP, surtout pour les crises alimentaires (CAMPBELL, 1990; ENTEN, 2010). En 1989, l'ONU adopte une résolution portant sur la Décennie internationale pour la prévention des catastrophes naturelles 1990-1999 (DIPCN). Ce cadre d'action a comme premier objectif d'atténuer les impacts des catastrophes naturelles, entre autres en se dotant de SAP (NATIONS UNIES, 1989). Reconnaissant d'emblée la vulnérabilité des populations, notamment celles des pays en développement, cette assemblée générale de l'ONU ouvre plutôt la porte à une décennie résolument technocentrée, comme le souligne explicitement chacun des cinq objectifs du cadre d'actions. La DIPCN vise à diminuer les impacts des désastres en « veillant particulièrement à aider les pays en développement à évaluer les dégâts possibles en cas de catastrophe » tout en les aidant à se doter « de structures résistantes aux catastrophes » (objectif 1), en « mettant au point des orientations et stratégies appropriées pour appliquer les connaissances scientifiques et techniques actuelles » (objectif 2), en « encourageant les initiatives scientifiques et techniques » (objectif 3), en « diffusant des informations sur les techniques » (objectif 4), et en faisant la promotion de « programmes d'assistance techniques et de transfert de technologies » (objectif 5) (NATIONS UNIES, 1989). Sous l'ère de la DIPCN des Nations Unies, c'est grâce à de l'aide extérieure qu'est souhaité le développement des communautés vulnérables.

Comme le remarquent TOZIER DE LA POTERIE et BAUDOIN (2015) dans une analyse de la Stratégie de Yokohama de 1994, qui était la première Conférence

Tableau 1. Principaux aléas naturels et environnementaux qui affectent les populations et leur environnement en fonction de la cinétique du processus.

Table 1. Principal types of natural and environmental hazards affecting populations and their environment based on their kinetics.

Cinétique de l'eau	Aléas	Impacts potentiels sur l'environnement, les populations et les infrastructures
Rapide/soudain	Déversements pétroliers	Rejet de produits toxiques dans l'environnement
	Accidents chimiques et nucléaires	Contamination des eaux Contamination des écosystèmes
	Géologiques	
	- Séismes	Fuite de gaz et de produits toxiques Débris de bâtiments, mélange des matériaux dangereux Contamination indirecte par rupture des structures d'épuration d'eaux usées Rupture d'oléoducs et contamination subséquente
	- Mouvements de terrain	Dompage au cadre bâti, aux habitats et fonctions du territoire Contamination du sol et des eaux de surface
	- Tsunami	Apport de déchets solides, débris, matériaux dangereux et substances toxiques Contamination directe des sols et de l'eau Destruction des terres et des bâtiments, salinisation des sols et de l'eau Contamination indirecte par rupture des structures d'épuration d'eaux usées Contamination des eaux côtières et pélagiques
	- Éruption volcanique	Pollution de l'air et influence du climat mondial Destruction des terres et du bétail
	Feux de forêt	Perte de biodiversité et d'habitats sensibles Destruction du cadre bâti, et pollution de l'air
	Hydrométéorologiques (sauf sécheresse)	Destruction du cadre bâti
	- Inondations	Débordement des conduites d'eau usée Écoulement de produits toxiques (routes, fermes, usines)
	- Tempêtes	Débris dangereux en milieux habités
	- Ouragans	Contamination des eaux de surface et des sols Perte des sols organiques sous l'influence de l'écoulement
	Lente	Qualité de l'air (pollution)
Sécheresse, désertification		Destruction des habitats
Variabilités climatiques		Altérations du climat et des écosystèmes
- Érosion côtière		Perte de biodiversité
- Usage des terres, etc.		Perte de territoire côtier et destruction du cadre bâti

mondiale pour la prévention des catastrophes naturelles des Nations Unies, on voit dans la DIPCN l'approche d'une gouvernance par l'État d'une gestion de risque centralisée faisant la promotion de SAP conceptualisés et implémentés par l'État. Cet État se base sur le savoir des scientifiques afin d'émettre des alertes qu'ils contrôlent. DURAGE *et al.* (2013) témoignent de ce type d'approche pour les alertes aux tornades en mentionnant que Sécurité publique Canada, dans sa Stratégie nationale d'atténuation des catastrophes, fait la promotion des connaissances scientifiques et des meilleures pratiques d'ingénierie afin de promouvoir l'atténuation des aléas. Par contre, même si la préparation face à l'événement vise à diminuer le risque encouru par les populations, celles-ci sont exclues du processus de préparation. Dans un tel cas, les connaissances scientifiques et du risque ne sont pas transmises à toutes les parties prenantes. Ce processus n'est pas viable dans les pays où les populations sont les plus vulnérables, où les SAP

sont souvent appliqués de façon décentralisée ou entièrement par les communautés (UNISDR, 2006a), c'est-à-dire opérés au niveau local et non gouvernemental (VILLAGRAN DE LÉON *et al.*, 2006).

Les débats autour de la prévention des désastres demeurent d'actualité après des décennies de travaux portant sur la conceptualisation des SAP (Tableau 2). Leur mise en opération semble difficile pour tous les types d'aléas en raison d'une « implémentation coincée » (ZIA et WAGNER, 2015) entre un mécanisme de gouvernance provenant des autorités vers les communautés (*top-down*) et une vision centrée vers la communauté promulguant de plus en plus l'approche participative (*bottom-up*). Le SAP technocentré, aléa-centré, de type *top-down* et basé uniquement sur des modèles et des données scientifiques, a été dominant jusqu'au début des années 2000 alors que plusieurs aléas importants, comme le

Tableau 2. Certaines contributions majeures à l'avancement des connaissances et à la conceptualisation des systèmes d'alerte précoce (SAP).
Table 2. Some major contributions to the advancement of knowledge on early warning systems (EWS) and their conceptualization.

Année	Contributions majeures marquant l'évolution des SAP	Avancement des connaissances
1970	Disaster Research Centre - The warning in disaster situation: a selective analysis. (McLUCKIE, 1970)	Déclare que l'alerte est un <i>processus</i> qui est le produit d'un <i>système</i> : ce système est un <i>appel à l'action</i> .
1975	FAO - Création du Système mondial d'information et d'alerte précoce sur l'alimentation et l'agriculture (SMIAR)	Fournir à la communauté internationale des alertes sur les ressources en nourriture via un SAP.
1980	Disaster planning: the preservation of life and property. Chapter 6. Designing warning systems. (FOSTER, 1980)	Établissement du SAP idéal en 16 étapes: de la détection à la transmission du message.
1989	The purpose of early warning systems and the nature of information. (WALKER, 1989)	Identification des éléments qui forment un SAP efficace : détection, alerte, diffusion, préparation.
1989	Assemblée Générale des Nations Unies - Décennie Internationale pour la Prévention des Catastrophes Naturelles (DIPCN)	Objectif de réduire les pertes de vies, dommages aux propriétés, perturbations sociales et à l'économie, grâce à des SAP et des structures résistantes.
1990	Communication of emergency public warnings. (MILETI et SORENSEN, 1990)	État de l'art sur 200 articles en sciences sociales portant sur la communication des alertes.
1994	Nations Unies - Stratégie de Yokohama pour un monde plus sûr (1 ^{er} cadre d'action)	Établit le SAP comme un principe et que son efficacité dépend de l'évaluation des risques ($R = V \times A$).
2000	Hazard warning systems: review of 20 years of progress. (SORENSEN, 2000)	État de l'art sur les SAP des 20 dernières années: vies de sauvées grâce aux alertes, mais dommages toujours importants (besoins de prévisions).
2003	Usable Science 8: Early Warning Systems: Do's and Don'ts. (GLANTZ, 2003)	Rapport d'atelier sur les approches à faire et ne pas faire pour s'assurer d'un SAP efficace.
2004	OXFAM - Weathering the storm: Lessons in risk reduction from Cuba. (THOMPSON et GAVIRIA, 2004)	Aperçu du modèle cubain de réduction des risques de désastre basé sur la communauté et son succès dû à son SAP national.
2005	UNISDR - Cadre d'Action de Hyogo 2005-2015 (2 ^e cadre d'action)	Mentionne que les SAP sont une des cinq priorités d'action pour réduire la vulnérabilité des populations.
2006	Global early warning systems for natural hazards: systematic and people-centred. (BASHER, 2006)	Plaidoyer en faveur des SAP orientés vers les gens (composantes technologiques et sociales).
2006	UNISDR - Global Survey for Early Warning Systems	Souligne les progrès parcourus (scientifiques et technologiques) mais les échecs au niveau social.
2006	UNISDR - EWC III. Développement de systèmes d'alerte précoce : Une liste de contrôle	Proposition d'une liste d'éléments à considérer pour concevoir un SAP.
2009	Croix-Rouge - World Disasters Report 2009	Présentation de mesures d'actions rapides suite à une alerte précoce : promotion des approches centrées vers les gens et basées sur la communauté.
2010	OMM - Directives sur les systèmes d'alerte précoce et l'application des prévisions immédiates et des alertes	Recommandations pour des SAP opérationnels par les services météorologiques, considérant leur expérience.
2011	UNISDR - Cost and benefits analysis of early warning systems. (ROGERS et TSIRKUNOV, 2011)	Discussion sur les coûts-bénéfices des SAP, sur les problèmes liés aux fausses alarmes et aux décisions.
2012	UNEP - Early warning systems: State-of-art analysis and future directions	État de l'art sur les SAP, leurs faiblesses, et les critères pour assurer un SAP multi-aléas.
2012	Banque Mondiale - A cost effective solution to reduce disaster losses in developing countries. (HALLEGATE, 2012)	Démonstration de l'avantage économique d'utiliser les SAP comme moyen de réduction des désastres.
2012	UNEP - Climate warning system feasibility report. (ZOMMERS, 2012)	Examine la possibilité de faire un SAP global pour les changements climatiques (vision à long-terme).
2013	UNU-EHS - Alert and warning frameworks in the context of early warning systems. (VILLAGRAN DE LEON <i>et al.</i> , 2013)	Proposition de cadres de travail pour des SAP et pour différents aléas.
2014	UNU-EHS - Early warning systems and livelihood resilience. (BAUDOIN <i>et al.</i> , 2014)	Promotion de SAP axés vers les gens pour améliorer la résilience des communautés face aux aléas.
2015	UNISDR - Cadre d'Action de Sendai pour la Réduction des Risques de Catastrophes 2015-2030 (3 ^e cadre d'action)	Fait des SAP un de ses six objectifs : « Augmenter substantiellement la disponibilité et l'accessibilité des systèmes d'alerte précoce multi-aléas ».
2015	UNISDR - CREWS Initiative, lors de la COP21	Développement d'un fond géré par la Banque Mondiale afin de

tsunami d'Asie du Sud-Est de 2004, se sont transformés en désastres en raison de manques de communications dans le système d'alerte (GARCIA et FEARNLEY, 2012; McADDOO *et al.*, 2006). Ainsi, c'est seulement depuis le Cadre d'action de Hyogo 2005-2015 (CAH) établi par les Nations Unies qu'une véritable transition s'établit, celle-ci visant une réduction de la vulnérabilité et une préparation face aux aléas. Les systèmes d'alerte centrés vers les personnes et les communautés forment alors le cœur de la proposition des Nations Unies. Selon GOLNARAGHI (2012), le CAH aurait changé la direction du paradigme de réduction des risques de désastres en établissant, grâce à la proposition d'un cadre de travail pour l'implémentation des SAP globaux pour tous les aléas, la prévention et la préparation comme principaux moteurs de la gestion des risques. Un SAP basé sur une approche misant sur la réduction de la vulnérabilité nécessite de bien définir ce concept complexe, utilisé par différentes disciplines et dans divers champs d'application dont la définition porte parfois à confusion (PAUL et ROUTRAY, 2013; FÜSSEL et KLEIN, 2006; ADGER, 2006).

De manière générale, la vulnérabilité se définit par la probabilité que les communautés ou les personnes souffrent des effets négatifs des aléas (BOWMAN *et al.*, 2014). Elle est influencée par plusieurs facteurs sociaux, technologiques ou décisionnels (SOULÉ, 2011). Le GIEC (2012) mentionne que « les personnes et les populations sont plus ou moins exposées et vulnérables selon les inégalités exprimées par le niveau de richesse et d'instruction, les handicaps éventuels ou l'état de santé, ainsi que selon le sexe, l'âge, la classe et d'autres particularités sociales et culturelles ». La vulnérabilité est généralement qualifiée par ses caractéristiques socio-économico-politiques et le contexte socio-spatial (vulnérabilité sociale), la répartition et l'organisation du cadre bâti (vulnérabilité physique) ainsi que la sensibilité biophysique de l'écosystème (vulnérabilité naturelle ou écologique ou biophysique selon les auteurs) (CUTTER, 1996; CUTTER et EMRICH, 2006; SZLAFSZTEIN et STERR, 2007). La composante psychologique est très importante, mais souvent sous-estimée (ex. stress post-traumatique et rétablissement) (SURJAN *et al.*, 2016). La vulnérabilité dépend aussi de la capacité d'adaptation (ADGER, 2006), mais aussi de la capacité de réponse aux aléas (GALLOPIN, 2006). La capacité d'adaptation intègre l'ensemble des stratégies d'adaptation tant à l'échelle locale que nationale ainsi que les réponses faces aux aléas et les ajustements postsinistres mis en place pour augmenter la résilience de l'écosociosystème (DOLAN et WALKER, 2003). La vulnérabilité peut donc s'exprimer comme étant la fonction de l'exposition E , de la sensibilité S (degré d'exposition) et de la capacité d'adaptation D du système humain à s'ajuster aux aléas ou changements sous la forme $V = F[E(D), S(D)]$ (HOGARTH *et al.* (2014) ou bien $V = F[E, S] /$ capacité d'adaptation.

Pour être efficace et diminuer la vulnérabilité, le SAP doit ainsi agir sur l'exposition et/ou la sensibilité en considérant la capacité adaptative du système en place au fur et à mesure que le système dynamique s'ajuste dans le temps. Cependant, en raison du grand nombre de facteurs à considérer, la vulnérabilité demeure souvent théorique et difficile à intégrer de manière opérationnelle (HINKEL, 2011).

En mars 2015, le Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe 2015-2030 (CAS) établit comme l'un de ses sept objectifs mondiaux l'accès des populations aux SAP (UNISDR, 2015). WAHLSTRÖM (2015) considère le CAS comme une transition historique depuis une gestion des désastres vers une gestion des risques de désastre. Le nouveau cadre est cependant largement critiqué sous différents angles. BRICEÑO (2015) mentionne que si les problèmes de financement soulevés dans le CAS étaient résolus avec les moyens proposés, c'est-à-dire avec un focus sur la gestion de crise, le financement irait au mauvais endroit pour les mauvaises raisons, c'est-à-dire vers l'aléa et l'urgence plutôt qu'à la vulnérabilité. Dans le même ordre d'idées, ZIA et WAGNER (2015) critiquent le manque de mesures concrètes pour instaurer un SAP participatif, soulignant que des programmes de financements opérés et dirigés par des donateurs ne changeraient pas la tendance à la hausse des désastres. Ce problème a déjà été soulevé dans les années 1970 lors de l'instauration d'un SAP pour les famines du Sahel (ENTEN, 2010). Afin de démontrer qu'il existe encore une promotion de concepts très technocentrés dans les programmes de l'UNISDR, GLANTZ (2015) recense 19 fois le terme « technologie » dans le CAS alors qu'il n'apparaît que cinq fois dans le CAH (le cadre précédent). Par ailleurs, dans le CAS, la compréhension de la vulnérabilité est mentionnée comme une étape cruciale préalable à la réduction des risques, surtout dans un contexte de changements climatiques qui perturbent le développement à court, moyen, et long termes (UNISDR, 2015). KELMAN (2015) déplore cependant que les changements climatiques n'y soient intégrés que par leur lien avec les aléas et non avec la vulnérabilité. QUENAULT (2015) y critique même le focus sur la résilience au détriment de la vulnérabilité, argumentant que le fardeau du désastre revient aux populations touchées. La résilience fait référence ici à la capacité des gens à recouvrer leur situation d'origine, à reconstruire en mieux (UNISDR, 2015).

Malgré ces critiques, la 4^e priorité du CAS met en valeur le processus de SAP et souhaite « améliorer la préparation pour une intervention efficace » (UNISDR, 2015). En dépit des dilemmes épistémologiques continuels, – les façons de faire continueront d'être analysées et critiquées (GLANTZ, 2015; KELMAN et GLANTZ, 2015) –, un consensus semble exister sur une méthode d'implantation de type *bottom-up*. Un SAP n'est efficace que s'il est orienté sur la personne ou la communauté (BASHER, 2006; CHOO, 2009; COOLS *et al.*, 2016; GOLNARAGHI, 2012; HAERENS *et al.*, 2012; JIN et

LIN, 2011; KELMAN et GLANTZ, 2014; SENE, 2016; UNISDR, 2006a; VILLAGRAN DE LEÓN *et al.*, 2006; ZOMMERS, 2012). Or, comme il en sera question dans les prochaines sections, le rôle des acteurs est présentement plutôt mince dans la conception et le fonctionnement du SAP et leur efficacité est en retour très variable d'un cas à l'autre.

3. CONCEPTS FONDAMENTAUX ET OPÉRATIONNELS

3.1 Le fonctionnement des systèmes d'alerte précoce

Le SAP est généralement formé de quatre sous-systèmes intégrés indépendamment du type d'aléa (COOLS *et al.*, 2016; NEUSSNER, 2015; GARCIA et FEARNLEY, 2012) : 1) connaissance du risque, 2) suivi, prévision et alerte, 3) communication de l'alerte, 4) capacité de réponse (UNISDR, 2006a). Cette section présente les principales composantes d'un tel système idéalisé par les Nations Unies et la communauté scientifique.

BASHER (2006) explique que les quatre composantes fondamentales (Figure 1) ne sont pas ancrées dans un processus linéaire. Le SAP n'est pas simplement une alerte, c'est-à-dire un message transmis sur un aléa en évolution (WMO, 2006), mais bien un système hôte d'échanges permanents et d'interactions dynamiques (ARNOLD et WADE, 2015). Pour permettre de soutenir un tel système opérationnel à long terme, un engagement politique et des institutions fortes soutenues par le public est nécessaire (BASHER, 2006). Ainsi, chaque élément

du SAP possède des fonctions précises devant être effectuées continuellement avec la participation de tous les acteurs. Même si certaines variabilités existent dans la structure employée par les auteurs, la majorité d'entre eux adhèrent au concept des quatre composantes (Tableau 3) (VILLAGRAN DE LEÓN *et al.*, 2013).

3.1.1 Connaissance du risque

La *connaissance du risque* constitue l'appréciation de la vulnérabilité et des aléas qui affectent les personnes et éléments vulnérables. Cette tâche *présinistre* est généralement réalisée par des institutions spécifiques afin de fournir les renseignements aux gouvernements, au public et à la communauté internationale (NEUSSNER, 2015). INTRIERI *et al.* (2013) nomment cette étape le design du système, puisqu'elle planifie et caractérise la structure du système complexe. En plus de recenser les paramètres sur les aléas (ex. intensité, fréquence, probabilité et répartition spatiale), l'analyse de la vulnérabilité des communautés est réalisée. L'ensemble forme l'évaluation du risque et les connaissances de base. La cartographie des aléas fait partie de cet aspect. Dans le cadre d'un SAP pour les géorisques, GHOSH *et al.* (2012) ont par exemple extrait des facteurs causaux à partir de cartes thématiques afin d'identifier automatiquement des niveaux de risques pour différents aléas à surveiller. Pour les glissements de terrain, cette étape sert par exemple à la caractérisation des géo-indicateurs, comme les contextes géologique et météorologique qui peuvent mener à un mouvement (CALVELLO *et al.*, 2015; INTRIERI *et al.*, 2013). De préférence, les cartes de risque devraient être réalisées par des scientifiques tant des sciences naturelles que sociales, avec la participation active des citoyens (IMAMURA, 2009). Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM, 2010), une gestion du risque efficace fournit l'information gratuitement

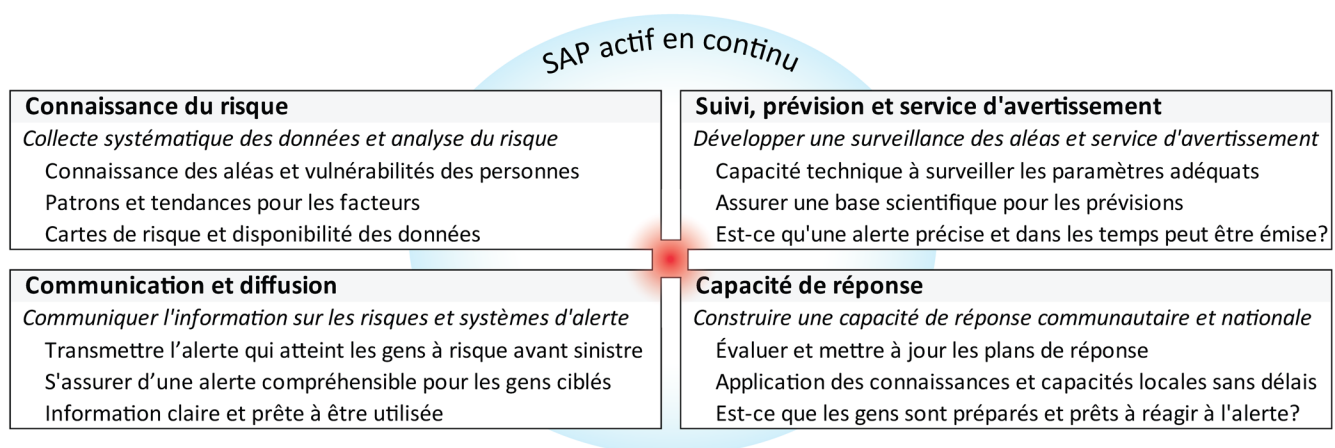


Figure 1. Composantes intégrées d'un système d'alerte centré vers les gens où l'information circule entre toutes les composantes continuellement (cercle central rouge). Adapté de BASHER (2006), KELMAN et GLANTZ (2014), UNISDR (2006a) et WEI CHOO (2009).

Integrated components of a people-centered EWS, where information continuously flows between each component (red circle). Adapted from BASHER (2006), KELMAN and GLANTZ (2014), UNISDR (2006a) and WEI CHOO (2009).

Tableau 3. Aspects fondamentaux et opérationnels des systèmes d'alerte précoce (SAP) selon certains auteurs.
Table 3. Fundamental and operational aspects of early warning systems (EWS) according to some authors.

Aspects fondamentaux et opérationnels d'un SAP	Auteurs
Collecte et analyse des données sur l'aléa, décision et diffusion des avertissements, réponses aux avertissements et retours sur les avertissements.	McLUCKIE (1970)
Deux composantes : détection du danger et mesures pour changer le cours de l'action. Opération en 16 étapes de base.	FOSTER (1980)
Détection, évaluation, prédiction de l'aléa; construction de la prévision et de l'alerte; diffusion de l'alerte; création de la préparation et des réponses d'atténuation efficaces.	WALKER (1989)
Une structure en trois sous-systèmes intégrés via des interactions : Détection - Gestion - Réponse.	MILETI et SORENSEN (1990)
Détection du danger, diffusion de l'information aux gens à risque (décisions/actions).	SORENSEN (2000)
Système de suivi - Réseau de communication - Dissémination.	SEIBOLD (2003)
Capteurs, installations de communication, centres d'opération informatisés.	SCHMIDT (2003)
Le succès systématique du SAP cubain: Information - Alerte - Alarme - Réponse/rétablissement.	THOMPSON et GAVIRIA (2004)
Les SAP en quatre stades de développement: 1. Prescience: observation qualitative du processus, 2. Systèmes <i>ad hoc</i> basés sur la science: focus sur un aléa, 3. Systématique <i>end-to-end</i> : de l'expert au citoyen, 4. SAP intégré : liens et interactions de l'alerte à la réponse.	BASHER (2006)
Approche centrée humaine : connaissance du risque, surveillance et service d'alerte, diffusion de l'information et communication, capacité de réponse.	VILLAGRAN DE LÉON <i>et al.</i> (2006), BASHER (2006), CHOO (2009), UNISDR (2006), JIN et LIN (2011), UNEP (2012), GOLNARAGHI (2012), ZOMMERS (2012), KELMAN et GLANTZ (2014), COOLS <i>et al.</i> (2016)
Équipements de détection, modèles associant le signal à la menace, personnel/procédures d'interprétation, d'évaluation et d'alerte, l'alerte menant à des mesures pour contrer le danger.	EINSTEIN et SOUSA (2007)
Dissémination de l'alerte, production de l'avertissement, traitement de l'information, suivi et collecte de données.	MEISSEN (2008)
Analyse du risque, suivi, prédiction (localisation, intensité), communication de l'alerte aux autorités/citoyens à risque, réponse au désastre.	UNEP (2012)
Conception - Suivi - Prévision - Éducation	INTRIERI <i>et al.</i> (2013)
Trois types de SAP : Alarme - Alerte - Prévision	SÄTTELE <i>et al.</i> (2016)
Composés de trois parties : Suivi - Interprétation - Diffusion	SÄTTELE <i>et al.</i> (2016)

pour tous sur tous les risques potentiels. Ces informations sont également cruciales en mode *postsinistre* afin de permettre aux personnes touchées ainsi qu'à l'aide d'urgence de gérer la crise.

3.1.2 Suivi, prévision et alerte

La surveillance continue des aléas, préalable à l'alerte, est aussi nécessaire. Elle englobe le *suivi*, la *prévision* ainsi qu'un *service d'avertissement*. L'utilisation du terme « suivi » est légitime ici : une fois que le mode d'acquisition des connaissances est en route et que les critères d'alerte sont sélectionnés (INTRIERI

et al., 2013), le système de surveillance passe de la recherche au mode opérationnel. Il s'agit de la base scientifique du SAP qui permet de détecter l'aléa (VILLAGRAN DE LÉON *et al.*, 2006). Cet élément est donc très spécifique à chaque aléa en fonction de leurs précurseurs (NEUSSNER, 2015). Il requiert un support technologique important, notamment des types de capteurs adaptés au processus (Tableau 4), souvent non accessibles aux personnes non spécialistes qui prennent les décisions sur les alertes. Ces instruments, souvent en interconnexions via Internet, acquièrent des données en

Tableau 4. Exemples de technologies utilisées dans la détection des précurseurs des aléas rapides.
Table 4. *Examples of some fast onset hazard detection technologies.*

Aléa	Précurseurs	Technologies de détection et prévision	Modes de transmission	Auteurs
Séismes (secondes)	Magnitude, localisation de l'épicentre, distance hypocentrale, accélération maximale au sol	Réseaux de capteurs sismiques (accéléromètres), simulation des ondes P et S (<i>P/S-wave</i>), GPS	Radio (GPRS), SMS, opérateurs, alarmes, arrêt automatique de transport en commun, cellulaires, Internet, cartes	SATRIANO <i>et al.</i> (2011), VILLAGRÁN DE LEÓN <i>et al.</i> (2013), GRASSO (2014), PICOZZI <i>et al.</i> (2015), BEHR <i>et al.</i> (2015), CAUZZI <i>et al.</i> (2016)
Feux de forêt (secondes)	Ignition et feu, routes et habitations, vent, température, humidité, jours sans pluie	Observateurs, patrouilles aériennes, satellites, indices spectraux, indices d'intensité des précurseurs, données historiques, modèles statistiques, tours d'observation	Cartes de risques, échelles d'intensité, cartes de concentrations des particules au sol, animations web	YAO <i>et al.</i> (2013), WANG <i>et al.</i> (2015), SMITH <i>et al.</i> (2016)
Tornades (secondes - minutes)	Masses d'air, température de l'air	Radars Doppler, modèles numériques, satellites, observateurs sur le terrain	Twitter, #hashtags, médias (radio, télévision, Internet)	DURAGE <i>et al.</i> (2013), CHATFIELD et BRAJAWIDAGDA (2014)
Éruptions (secondes - heures)	Déformation, sismicité, émission de gaz, masses d'air	Modèles probabilistes, DGPS, tiltmètres, séismomètres, barographe, radars Doppler, modèles atmosphériques	Sirènes, Internet, téléphones, cartes de vulnérabilité (informations sur la santé humaine)	LEONARD <i>et al.</i> (2008), SAMARASUNDERA <i>et al.</i> (2014), ROHMER et LOSCHETTER (2016)
Mouvements de terrain (secondes - jours)	Précipitations, température, pente du versant, ouverture de faille, volume de matériel, précurseurs acoustiques	Radars, pluviomètres, sismomètres, piézomètres, tensiomètres, clinomètres, modèles physiques/numériques (météo/hydrologiques), stations météorologiques, cartes thématiques	Géophones, modem, cellulaires (SMS), sirènes, lumières dignotantes	GAUTHIER <i>et al.</i> (2012), GOSH <i>et al.</i> (2012), INTRIERI <i>et al.</i> (2013), SÄTTELE <i>et al.</i> (2015), STÄHLI <i>et al.</i> (2015)
Tsunamis (minutes - heures)	Déformation de la croûte terrestre, niveau d'eau	Simulations de propagation, GPS, bouées et marégraphes, observations <i>in situ</i>	Médias sociaux (Twitter, Facebook, blogs, forums, Flickr), cellulaires et téléphones, sirènes, verbal	McADOO <i>et al.</i> (2006), SOULÉ (2011), CHATFIELD et BRAJAWIDAGDA (2013)
Inondations fluviales (heures - jours)	Précipitations, profondeur d'eau	Radars météorologiques, réseaux de pluviomètres, modèles numériques d'ensemble et d'inondation hydrodynamique, observateurs sur le terrain, images satellites	Internet : cartes d'inondations, bulletins, niveaux d'alerte, atlas des cartes papier, radio	HANDMER (2000), SAMIMI <i>et al.</i> (2012), ALFIERI <i>et al.</i> (2012), MUSTAFA <i>et al.</i> (2015), COOLS <i>et al.</i> (2016)
Tempêtes et cyclones Submersion (jours)	Hauteurs des vagues, niveau d'eau, vitesse et direction du vent, élévation de la côte, pression atmosphérique	Capteurs de vagues et de niveau d'eau, DGPS, LiDAR, modèles atmosphériques, modèles de vague (SWAN, Xbeach, etc.), modèles océaniques (ADCIRC, etc.), modèles de prévision des cyclones	Cartes de risque ou de franchissement, Internet, Google Map, mégaphone, verbal, cellulaires (SMS)	HAERENS <i>et al.</i> (2012), PEYRUSAUBES (2012), SUH <i>et al.</i> (2015), HORN (2015)
Déversements pétroliers	Déversement marin, côtier ou terrestre, suivi des pipelines : séismes, failles, pression dans le tuyau, fuites	Imagerie satellitaire active : radars à synthèse d'ouverture (ASAP/SAP), LiDAR, imagerie satellitaire passive (visible et thermique), observateurs, classifications par opérateur, plans de contingence (préparation), capteurs d'hydrocarbures, de vibrations et température dans des bouées	Déversements : services satellitaires, produits de réponse rapide (ex. MODIS [format prêt à l'emploi]), modem, SMS, courriels; pipelines : SMS, courriels, signaux lumineux et sonores	BREKKE et SOLDBERG (2005), LEIFER <i>et al.</i> (2012), FERRARO <i>et al.</i> (2012), LIU et ZHU (2013), BULYCHEVA <i>et al.</i> (2014), IVSHINA <i>et al.</i> (2015), MORONI <i>et al.</i> (2015), LIU <i>et al.</i> (2015)
Accidents chimiques et nucléaires	Facteurs météorologiques (vent, direction, turbulence, ennuagement, etc.), propriétés physicochimiques de l'eau et polluants, topographie	Modèles numériques atmosphériques (OMM) (prédictions des mouvements des contaminants et radioactivité), modèles de qualité de l'eau	Médias sociaux, courriel, Internet, cellulaires, Google Earth	UNEP (2012), HOU <i>et al.</i> (2014), WANG <i>et al.</i> (2015), BEAN <i>et al.</i> (2016)

temps réel et permettent au système de distinguer l'évènement dangereux du bruit présent dans les données (SÄTTELE *et al.*, 2015). Des modèles de prévisions sont également utilisés afin de prédire l'évolution des phénomènes dans le temps (OMM, 2010). Sur les côtes de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, le Service météorologique d'Environnement Canada et Pêches et Océans Canada émettent conjointement des avertissements de risque de déferlement de vagues et de débordement côtier lors de prévisions d'ondes de tempête. Ces alertes publiques sont communiquées sur le site internet d'Environnement Canada et sont acheminées aux différentes organisations de sécurité civile. Un centre des opérations gouvernementales opéré par le ministère de la Sécurité publique du Québec permet de surveiller en continu les différents risques et d'informer et d'alerter les intervenants concernés. Plusieurs technologies sont également utilisées afin de communiquer entre les diverses composantes du système (Tableau 4), mais lors de la diffusion publique, certaines voies spécifiques doivent être sélectionnées afin de fournir un message homogène (GLANTZ, 2004).

3.1.3 Communication de l'alerte

Une fois le danger détecté, une alerte doit être *communiquée* et *diffusée* aux personnes concernées, soit les professionnels en charge des décisions et les personnes à risque (NEUSSNER, 2015). Le message doit être clair, compréhensible, utile, et doit se rendre aux personnes vulnérables (VILLAGRAN DE LÉON *et al.*, 2006). Le réseau de communication s'étend sur tous les paliers de gouvernance communautaire, régionale, nationale et internationale, mais l'alerte doit atteindre toutes les personnes, et rapidement (NEUSSNER, 2015). Les médias ont souvent un rôle important à jouer dans la diffusion publique de l'information, notamment s'ils sont associés directement au SAP via une entente spécifique de diffusion (GLANTZ, 2004). Par exemple, le Système national d'alerte au public de Sécurité publique Canada fonctionne par une entente de partenariat public-privé avec le Conseil de la radiodiffusion et des télécommunications canadiennes (CRTC), et les alertes sont émises par Pelmorex Communications Inc. par voies médiatiques (SÉCURITÉ PUBLIQUE CANADA, 2015). Comme le mentionne GLANTZ (2004), les médias peuvent devenir un allier puissant d'un SAP s'ils communiquent une information de qualité utile aux personnes. Par contre, ils peuvent avoir tendance à forger l'opinion publique en jouant en boucle les mêmes informations sans s'adapter à l'évolution de l'aléa, en répandant des rumeurs hors contexte, et en rapportant l'incident de façon souvent plus intense que le fait réel (EWART et McLEAN, 2015). En retour, ceci peut amoindrir la crédibilité du système (GLANTZ, 2004).

Plusieurs moyens officiels de communication existent et peuvent être planifiés dans la conception du SAP (Tableau 4). Les médias sociaux, comme Twitter et Facebook, sont de plus en plus utilisés en mode *postsinistre* (SIMON *et al.*, 2015). Certaines utilisations pendant la phase de préparation, comme

dans le cas de séismes générant un tsunami, ont montré que ces moyens sont également efficaces pour fournir une alerte dans les temps nécessaires à la sécurité des personnes (CHATFIELD et BRAJAWIDAGDA, 2013). Certains considèrent aujourd'hui les téléphones mobiles comme une technique efficace pour atteindre individuellement les gens vulnérables avec un message approprié sur un vaste territoire (BEAN *et al.*, 2016; GHOSH *et al.*, 2012). Les messages textes (SMS) sont notamment utilisés pour alerter la population lors de cyclones (PEYRUSAUBES, 2016). Par contre, le message livré individuellement n'est certainement pas une panacée, puisque plusieurs facteurs influencent la diffusion du message. Dans le cas d'un séisme, où le temps qui sépare la détection de la réception du message est crucial et où la réponse doit être instantanée, des alarmes sonores ou visuelles sont encore utilisées dans les lieux publics comme les écoles (PICOZZI *et al.*, 2015).

Le temps n'est pas toujours le facteur limitant (NEUSSNER, 2015). Le contexte sociopolitique est aussi important à considérer dans le choix des moyens de diffusion. Par exemple, dans certaines régions de l'Inde, des amendes sont imposées aux femmes prises en train d'utiliser un téléphone mobile (SEAGER, 2014), limitant grandement l'efficacité d'une approche par message texte. En effet, le sexe (ou le genre) est un des facteurs majeurs qui influence la vulnérabilité en favorisant l'exclusion sociale (MUSTAFA *et al.*, 2015; SEAGER, 2014). Ce facteur influence également le SAP. Le CAH reconnaît que les « femmes et les hommes [...] accèdent de façon différente à l'information en situation de catastrophe » (UNISDR, 2006b). Dans plusieurs pays, les communications et les technologies sont généralement masculinisées, et un manque d'intérêt ou une interdiction d'accès aux technologies fait en sorte que les femmes utilisent peu Internet, le téléphone ou même la radio (SEAGER, 2014). Certains groupes de citoyens sont donc plus difficiles à atteindre que d'autres, même avec les technologies de pointe. Les gens les plus vulnérables accèdent difficilement aux technologies de diffusion comme Internet ou les téléphones mobiles (SEAGER, 2014). L'éventail des technologies existantes (Tableau 4) semble donc insuffisant pour diminuer la vulnérabilité des personnes. Le Cadre d'action de Sendai (CAS) conseille de « prendre des mesures adéquates de renforcement des capacités pour donner aux femmes les moyens de se préparer » (UNISDR, 2015, p. 23). Cependant, aucune mesure n'y est proposée.

Comme pour la détection et le suivi de l'aléa, la phase de communication requiert d'être adaptée au type d'aléa et de personne. Le message doit être compris par ceux qui le reçoivent. Plusieurs facteurs sociaux influencent la communication, comme la langue de diffusion qui doit être adaptée au contexte local (MEISSEN, 2008; MERCER *et al.*, 2010), le nombre de caractères pour les messages par écrit (BEAN *et al.*, 2016) et le choix du médium de diffusion pour les personnes sourdes

ou aveugles (SCOTT, 2003). Par exemple, dans le cas du typhon Haiyan du 8 novembre 2013, qui a causé la mort de plus de 6 000 personnes aux Philippines (29 000 blessés, 1 800 disparus) (SAVAGE *et al.*, 2015), JIBIKI *et al.* (2016) concluent que la mauvaise interprétation des termes est en cause. Bien que 98,3 % des habitants avaient reçu l'avertissement du typhon s'approchant des côtes, la plupart n'avaient pas compris le sens du terme *storm surge* (onde de tempête). La tempête tropicale avait pourtant été considérée comme un « typhon » le 5 novembre et de « super typhon » le 6 novembre par les autorités alors que déjà des unités d'urgence étaient en place afin de répondre aux alertes (SANTIAGO *et al.*, 2016). Dans ce cas, ce n'est pas la technologie de communication qui a fait défaut, mais bien la façon de diffuser le message et les termes utilisés (JIBIKI *et al.*, 2016). Ainsi, les problèmes de communication sont nombreux lors de la mise en place d'un SAP et justifient de considérer tant les aspects sociaux que techniques lors de sa conception.

3.1.4 La capacité de réponse

La *capacité de réponse* est l'élément qui assure que l'alerte soit reçue et qu'une réponse appropriée soit planifiée et mise en œuvre. Pour certains, il s'agit de critères techniques qui se doivent d'être constamment respectés, comme des mesures d'évacuation, des services d'urgence et des stocks de provisions localisés à des endroits précis (NEUSSNER, 2015). Pour INTRIERI *et al.* (2013), la réponse est synonyme d'éducation de la communauté, en augmentant la perception publique sur les risques et en éduquant sur les comportements à adopter pour prévenir les dommages ou les pertes (ex. en réagissant à des fausses alarmes). Cette façon d'aborder l'implication de la population est cependant un exemple d'une approche qui, malgré son intérêt d'impliquer la communauté, demeure typiquement une structure verticale qui achemine les connaissances du haut (autorité, scientifiques, etc.) vers le bas (personnes vulnérables) (Figure 2). Un des moyens de contrer cette tendance, selon la Fédération internationale de la CROIX-ROUGE (2009), est d'abord de s'assurer d'une compréhension du risque et de ce que constitue ce risque dans la communauté, et de comprendre les mesures de réponses appropriées face à ces risques. Il existe des méthodes structurales, comme la construction d'ouvrages de protection, et non structurales, comme le changement de comportement ou d'activités d'une communauté (RELF *et al.*, 2015). La réponse face à une alerte peut donc inclure le savoir local (ALESSA *et al.*, 2016) dans des actions stratégiques qui rendent la communauté résiliente (BAUDOIN *et al.*, 2014; QUENAULT, 2015). La résilience est ici la capacité du système à absorber le choc et à se rétablir pour atteindre sa structure et son fonctionnement d'origine (MANYENA, 2012).

Dans plusieurs cas, le système d'alerte se limite à la détection, la prévision et la réponse (Tableau 3). Dans le cas des déversements pétroliers, par exemple, la télédétection mène souvent à des réponses structurales pour contenir les fuites

terrestres ou marines (IVSHINA *et al.*, 2015). Les étapes de gestion de risque y sont peu présentes, et la population est exclue du SAP. L'implication de la communauté peut se réaliser à travers des rétroactions suite aux alertes, mais d'un point de vue opérationnel, c'est souvent l'élément manquant du système. Il y a en effet peu de transfert d'information depuis la communauté vers les services d'urgence et les autorités, et donc peu de retours d'expériences, ce qui ici diminue l'efficacité du système (UNISDR, 2006a).

Cette section a montré que la théorie sur les SAP peut se transférer en mode opérationnel. Cependant, malgré l'intérêt de l'approche centrée vers les gens, rendre opérationnel un SAP consiste surtout à acheminer l'alerte de façon linéaire entre quatre phases (Figure 2). Les communications permettent les interactions entre le suivi des précurseurs, la prévision/prédiction de l'événement, la déclaration/diffusion de l'alerte, et la réponse (VILLAGRAN DE LÉON *et al.*, 2013), cette dernière étant généralement assumée. L'évaluation du risque semble exclue du volet opérationnel (UNEP, 2012). Or, comme la stabilité de l'ensemble du système repose sur la force de son lien le plus faible (NEUSSNER, 2015), l'évaluation du risque doit systématiquement être effectuée afin de fournir les connaissances de base sur les problèmes soulevés par la communauté vulnérable et les aléas (OMM, 2010). Enfin, l'ensemble de ces composantes forme parfois un système complet de gestion des risques au sein des gouvernements. Au Québec par exemple, la Politique québécoise de sécurité civile 2014-2024 intègre sensiblement ces fondements dans quatre de ses cinq orientations qui visent à améliorer la résilience de la population face aux catastrophes (GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 2014) : améliorer la connaissance des risques, accroître le partage d'information et le développement des compétences, recourir en priorité à la prévention, renforcer la capacité de réponse. La 5^e orientation souhaite principalement une concertation des acteurs pour améliorer continuellement le système québécois de sécurité civile.

3.2 Facteurs de vulnérabilité ou contraintes à l'efficacité des SAP : monopole, exclusion et cloisonnement

Dans les pays en développement, ZIA et WAGNER (2015) estiment qu'un des principaux facteurs de vulnérabilité, en plus de la pauvreté, réside dans la mauvaise gestion des risques et de l'environnement à long terme dus à un manque de bonne gouvernance. Par exemple, selon le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD, 2014), l'amélioration des conditions sociales dans les pays en conflits n'est pas toujours l'objectif qui prime, mais souvent des politiques d'exclusion qui font perdurer les instabilités. Les conflits internes ou entre états inhibent une reprise résiliente après un choc en nuisant à l'harmonie et la cohésion sociale (PNUD, 2014). Selon l'organisation internationale, « les grandes réalisations dans des

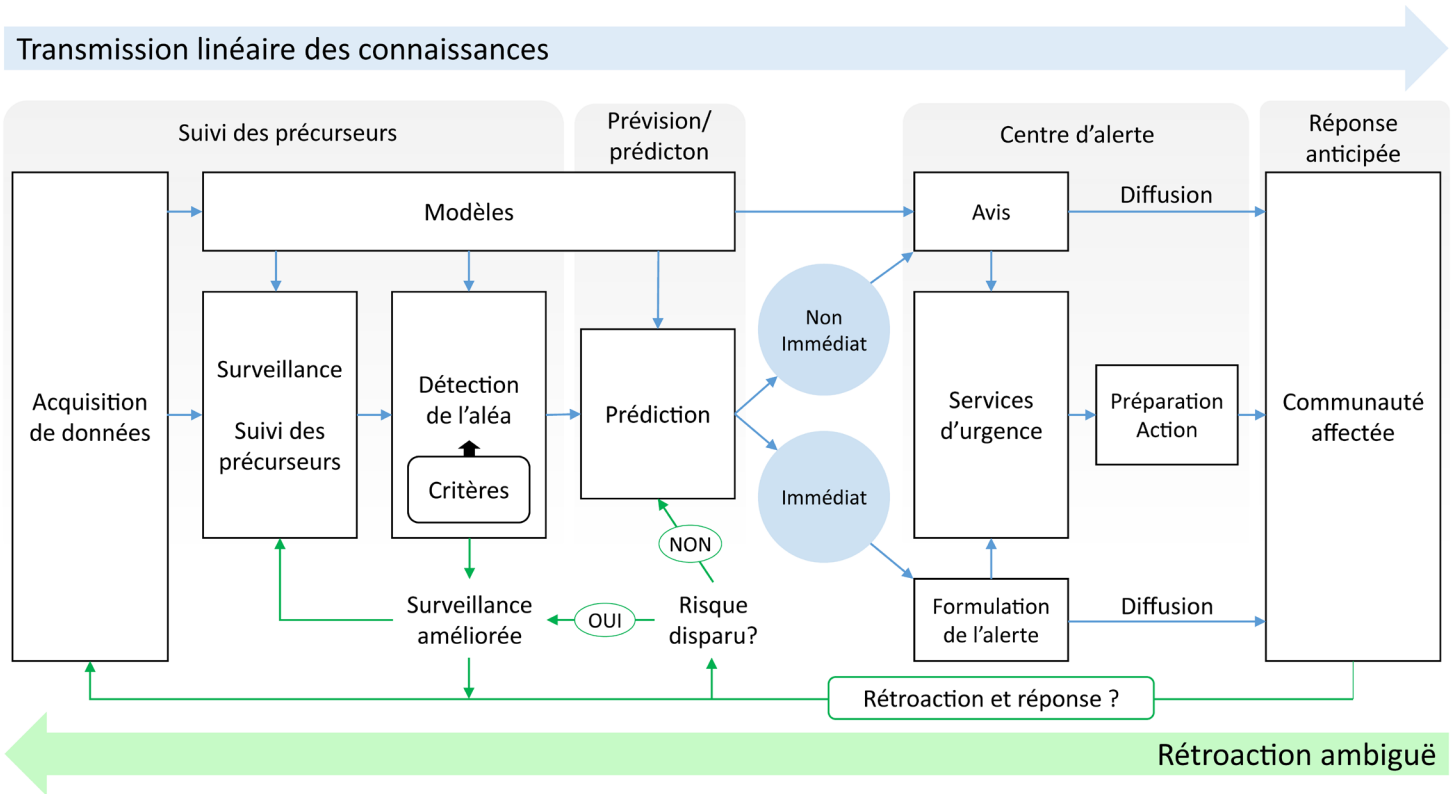


Figure 2. Schéma conceptuel du systèmes d'alerte précoce (SAP) opérationnel. Adapté de ZILLMAN (2003), FOSTER (1980) et VILLAGRAN DE LÉON *et al.* (2006).

*Operational early warning systems (EWS) conceptual scheme. Adapted from ZILLMAN (2003), FOSTER (1980) and VILLAGRAN DE LÉON *et al.* (2006).*

domaines critiques du développement humain [...] peuvent être rapidement minées par une catastrophe naturelle », car celle-ci exacerbe les conflits, les vols, la violence, la corruption, et également les dommages sur l'environnement. Les désastres peuvent exacerber la vulnérabilité des personnes, ce qui en retour influence leur réponse à l'alerte. C'est le cas par exemple au Pakistan alors que les inondations peuvent laisser place à une instabilité politique (HASAN et ZAIDI, 2012). Aux États-Unis, HARVILLE *et al.* (2011) ont montré que le stress subi par les personnes suite à l'ouragan Katrina en août 2005 à La Nouvelle-Orléans a engendré une augmentation des conflits et de l'utilisation de la violence pour les régler.

L'approche *top-down* (Figure 2) représente le fonctionnement d'une organisation monolithique centralisée (FAKHRUDDIN et CHIVAKIDAKARN, 2014). Souvent, la bureaucratie ralentit le processus de communication global entre toutes les étapes, ce qui altère son rôle d'information des citoyens (MUSTAFA *et al.*, 2015). HANDMER (2000) compare cette linéarité à un monopole de la distribution des messages. Les gens ne font partie du système qu'à la fin du processus, après que le cheminement de l'information ait rencontré plusieurs contraintes dans le processus de SAP, tant dans les aspects techniques que sociaux. Même lorsque des

citoyens sont impliqués dans des activités de volontariat au sein du SAP, les autorités peuvent voir les volontaires comme des représentants de tous les citoyens, et ces derniers deviennent exclus du processus (GARCÍA, 2012).

La conception linéaire impose des défis importants dans les milieux où la technologie n'est pas encore intégrée à toutes les sphères de la société. L'exemple typique est le cas de Sumatra où les différents groupes ethniques peuvent être affectés à divers degrés par un même aléa sur un petit territoire. Lors du tsunami de 2004 en Asie, 170 000 personnes ont péri dans les communautés côtières de Sumatra, Aceh et Minangkabau (GAILLARD *et al.*, 2008). Sur une île voisine, Simeulue, les connaissances locales traditionnelles sont si importantes que le nombre de décès a été limité à 44 résidents. Plusieurs vies ont été sauvées grâce à un système d'alerte très simple, soit la reconnaissance des précurseurs du tsunami (*tremor* - retrait de la mer - vague) (KELMAN et GLANTZ, 2014) et la diffusion du terme *smong* au sein des résidents. Il s'agit du nom local donné au phénomène et qui est transmis depuis des générations (McADOO *et al.*, 2006). Un SAP peu technique, centré vers la personne et implanté localement, peut être efficace.

Comment peut-on être certain qu'une réponse parviendra à la communauté si celle-ci n'est pas impliquée continuellement dans le fonctionnement du système? Même si le fonctionnement du SAP opérationnel (Figure 2) comporte une influence de la communauté à travers sa réponse postsinistre (rétroaction), il est difficile d'évaluer une réponse si les gens sont personnellement affectés par le désastre. Les gens décédés ou disparus ne donnent malheureusement pas de rétroaction active dans le système (JIBIKI *et al.*, 2016). La réponse de la communauté est donc ambiguë ou incertaine dans l'approche *top-down*. De plus, comme le SAP voit sa réussite principalement basée sur la capacité de réponse face à l'aléa et à entreprendre des actions pour recevoir le message et à agir en conséquence, la perception des gens vis-à-vis du risque n'est pas à négliger (GLANTZ, 2004). La perception se définit comme étant un jugement intuitif des risques par les non-professionnels de la gestion des risques (SLOVIC, 1987) et peut être complexe à évaluer. Généralement, la capacité d'une personne à réagir est faible si sa perception du risque est faible. Si au contraire la personne se considère peu préparée, il y a plus de chance qu'elle mette en œuvre des stratégies de préparation à l'opposée d'une personne trop optimiste qui se considère non vulnérable (GARCIA et FEARNLEY, 2012). La confiance envers le SAP et entre les acteurs (COOLS *et al.*, 2016) est un facteur déterminant qui justifie d'intégrer les personnes dans le fonctionnement du SAP. Un faible niveau de confiance peut augmenter la vulnérabilité et limiter les actions, comme l'évacuation (GARCIA et FEARNLEY, 2012). Le niveau de confiance envers le SAP dépend de la projection de son image et de son succès auprès du public (COOLS *et al.*, 2012). Par exemple, un vocabulaire adapté (OLIVEIRA *et al.*, 2015) et des sources locales crédibles (BAUDOIN *et al.*, 2014; OMM, 2010) facilitent l'établissement de la confiance. La confiance des gens est également fonction de l'efficacité du système à générer de bonnes ou de fausses alarmes, ce qui en retour influence l'efficacité, car le manque de succès affecte directement sa performance via la réponse des personnes et les bénéfices qu'il génère (HALLEGATE, 2012). En ce sens, de multiples fausses alarmes peuvent décourager les gens à évacuer (syndrome de *cry-wolf*), comme ce fût le cas lors de l'ouragan Katrina à La Nouvelle-Orléans (2005), où l'évacuation a été lente en raison de deux évacuations non nécessaires en 1998 et 2004 (HALLEGATE, 2012).

Les sciences sociales considèrent nécessaire d'adopter une approche participative qui intègre la communauté dès la conception du SAP pour coordonner les communications entre les autorités et les habitants (COOLS *et al.*, 2012). L'approche participative est mentionnée dans le CAH et dans le CAS, qui ne proposent malheureusement pas de méthodes pour impliquer directement les communautés (BAUDOIN *et al.*, 2014). ARIAS *et al.* (2016) ont mis en place une méthode participative de gestion de risque d'inondation et glissements de terrain dans 80 municipalités de Colombie en intégrant les connaissances

scientifiques, techniques, et populaires. Grâce à l'inclusion des gouvernements, des communautés et des institutions en charge des risques, ils ont élaboré un réseau social qui étudie les changements à long terme de l'environnement et qui est prêt à détecter les dangers. Dans leur étude, la science catalyse les actions des acteurs, permet un suivi environnemental, mais ne dicte pas le fonctionnement (ARIAS *et al.*, 2016).

Généralement, le cloisonnement existe entre les boîtes scientifiques, législatives et de gestion des risques (GARCÍA, 2012). La plupart des auteurs se concentrent alors sur certains éléments opérationnels selon leur spécialité, ce qui peut se refléter dans les publications scientifiques s'intéressant davantage aux volets techniques des SAP, comme l'étude de l'aléa (ALFIERI *et al.*, 2012; BREKKE et SOLBERG, 2005; SUH *et al.*, 2015) ou la diffusion de l'information grâce aux nouvelles technologies (BEAN *et al.*, 2016; CHATFIELD et BRAJAWIDAGDA, 2014, 2013; HANDMER, 2000; JIBIKI *et al.*, 2016).

Certaines études s'intéressent également à la réponse à l'alerte, notamment dans le cas d'inondations fluviales (COOLS *et al.*, 2016; MUSTAFA *et al.*, 2015), de tornades (SIMMONS et SUTTER, 2009), de mouvements de terrain (GARCIA et FEARNLEY, 2012), ou de séismes (PICOZZI *et al.*, 2015). Pour ces auteurs, le rôle des citoyens est crucial pour compléter avec succès le processus d'alerte, bien plus que la technologie en soit. Un exemple d'intégration des citoyens peut être via la mesure des précurseurs, comme la mesure *in situ* de niveaux d'eau (COOLS *et al.*, 2016), et le suivi des risques. Il peut s'agir de l'implication égale de tous les genres et de la reconnaissance de leur rôle spécifique et responsabilités dans le processus d'alerte et de réponse (MUSTAFA *et al.*, 2015). Dans le cas des risques côtiers, ALHMOUDI et AZIZ (2015) se sont intéressés à la vulnérabilité des populations côtières du monde arabe face à la submersion et concluent qu'il existe un réel besoin de joindre les connaissances traditionnelles à la science afin de diminuer la vulnérabilité. SOULÉ (2011) abonde dans le même sens en démontrant que le Chili, même avec sa forte culture des risques sismiques, n'a pas été en mesure de lancer une alerte au tsunami en février 2010, en raison de problèmes de communication au sein même de la communauté scientifique. C'est ce que l'auteur nomme la *vulnérabilité scientifique*, qui serait due notamment à un manque de coopération entre les chercheurs en raison du financement compétitif. Joindre la science aux connaissances du milieu peut permettre d'éviter le cloisonnement des disciplines.

Dans les SAP pour les déversements de pétrole ou produits toxiques, la réponse est cruciale afin de limiter l'étendue de la fuite. IVSHINA *et al.* (2015) considèrent que les *stratégies de réponse* englobent tant la phase de *prévention* que la réponse à la fuite. Cependant, on peut se questionner sur la signification du terme « prévention », car si, comme le mentionnent

les auteurs, la « stratégie de réponse pour les déversements terrestres est de prévenir que le matériel répandu » atteint l'eau, il semble que la prévention soit relativement tardive. Dans les faits, les auteurs utilisent la télédétection pour suivre la répartition spatiale des nappes (FERRARO *et al.*, 2012; LEIFER *et al.*, 2012; LIU et ZHU, 2013; SOLBERG, 2012) et la contention ou bioremédiation après sinistre (JERNELV, 2010). En Europe, l'utilisation des satellites, surtout des radars à synthèse d'ouverture, est opérationnelle et est intégrée dans les systèmes nationaux et régionaux de surveillance des déversements de pétrole (GRASSO, 2014), tout comme pour les eaux canadiennes (FERRARO *et al.*, 2012). Les méthodes de prévention sont minimalistes, et consistent surtout en des plans de contingences, c'est-à-dire des plans qui dictent aux travailleurs quoi faire avant, pendant et après sinistre pour s'attaquer à la variété de fuites (YANG SI-ZHONG *et al.*, 2010). Sur les plateformes pétrolières, la prévention se fait généralement lors des étapes d'exploration et de production par des mesures de contention du matériel polluant, d'entretien des équipements et d'observation de l'environnement (IVSHINA *et al.*, 2015). Par ailleurs, les modèles numériques de simulations des trajectoires possibles d'écoulement de nappes de pétroles en mer semblent de plus en plus utilisés (BARKER, 2011; BOURGAULT *et al.*, 2014) non seulement en support à la réponse, mais aussi pour aider la prise de décision et l'éducation au risque (BOUFADEL et GENG, 2014). D'ailleurs, dans ces systèmes d'alerte, on fait également état d'un changement de paradigme pour transférer la recherche fondamentale en télédétection vers une approche plus opérationnelle qui serait utile pour la prévention de déversements majeurs (LEIFER *et al.*, 2012). L'objectif serait de rendre opérationnel en mode *précatastroph*e un système profondément ancré dans un concept *postcatastroph*e (IVSHINA *et al.*, 2015) basé sur le développement de mesures d'interventions après déversements.

Enfin, comme le mentionne SEIBOLD (2003), « la sécurité est un idéal commun, mais le risque ne peut être complètement éliminé ». Les aléas lents, comme la désertification, les sécheresses, et la qualité de l'air, souvent sous l'influence des changements climatiques, nécessitent des améliorations d'ordre technologique et exigent des suivis systématiques et réguliers (GRASSO, 2014). La principale barrière à ces SAP est le financement à long terme, qui est limité par l'éphémérité des engagements politiques, les coûts associés aux fausses alarmes et à l'inaction, et enfin par l'adoption de SAP coûteux, trop techniques et mal adaptés au contexte social (GLANTZ, 2004).

Le financement n'est toutefois pas le seul élément contraignant l'efficacité des SAP et qui pourrait être amélioré (Tableau 5). Les Nations Unies soulèvent plusieurs autres manquements à tous les aspects des SAP (UNISDR, 2006a). Pour faire suite à un séminaire portant sur les SAP pour les mouvements de terrain, CLOUTIER *et al.* (2014) mentionnent que les SAP sont avancés technologiquement, mais qu'ils

devraient être limités à des cas spécifiques où les contremesures ne sont pas adaptées. Ce dernier point est un élément important qui corrobore malheureusement les conclusions de SOULÉ (2011) : les scientifiques ne sont pas toujours disposés à implémenter un SAP en première approche de réduction des risques, sous l'influence de plusieurs facteurs. L'incertitude de la prévision et l'inquiétude face aux conséquences du déclenchement de fausses alarmes ou de ne pas détecter l'aléa soulèvent des questions sur la responsabilité des scientifiques et d'éventuelles poursuites au niveau légal (CLOUTIER *et al.*, 2014), comme ce fût le cas en Italie où sept personnes en charge de la gestion des risques ont été reconnues responsables du décès de 29 personnes (SCOLOBIG *et al.*, 2014).

Les facteurs qui influencent les SAP sont nombreux. Le nombre de définitions et d'acteurs impliqués dans la conception des SAP est si élevé qu'il est impossible d'établir un portrait complet sur les SAP (ZOMMERS, 2012). Cette section a tout de même présenté l'évolution de leur conception, structuré leur fonctionnement, et soulevé les contraintes principales qui freinent leur efficacité. Pour éviter le monopole de la diffusion de l'information, le cloisonnement de la recherche, et l'exclusion des communautés, typiques des SAP avec une approche *top-down*, il semble évident que les SAP doivent être une intégration dynamique de ses composantes et être centrés vers les besoins de la communauté. Cette intégration est gage d'efficacité. Ainsi, l'efficacité du SAP dépend de la performance des composantes techniques de détection, de prédiction et de communication, mais aussi de la capacité de réponse des gens affectés et des agences impliquées (ZILLMAN, 2003). Cette réponse est modelée par les diverses dimensions de la vulnérabilité et la perception de la communauté.

3.3 Mesures d'efficacité des SAP

Comment définir l'efficacité du SAP considérant la multitude de paramètres qui l'influencent? Rappelons d'abord que le SAP vise à diminuer le risque, qui est fonction de la vulnérabilité des personnes (SURJAN *et al.*, 2016; WISNER et UITTO, 2009). Selon le CAS, « dans tous les pays, le degré d'exposition des personnes et des biens augmente plus vite que le rythme auquel il est possible de réduire leur vulnérabilité » (UNISDR, 2015). Mathématiquement, le risque peut prendre la forme suivante (WISNER *et al.*, 2004; EINSTEIN et SOUSA, 2007; SÄTTELE *et al.*, 2016) :

$$R = P[A]VC \quad (1)$$

où le risque R est fonction de la probabilité d'occurrence de l'aléa $P[A]$ de la vulnérabilité V , incluant l'exposition, et de la valeur C de l'objet exposé (EINSTEIN et SOUSA, 2007; MEDINA-CETINA et NADIM, 2008). En mode opérationnel, le système d'alerte précoce modifie le risque R

Tableau 5. Principales contraintes à l'efficacité des systèmes d'alerte précoce (SAP).
Table 5. Principal constraints to early warning systems (EWS) effectiveness.

Barrières à l'efficacité des systèmes d'alerte précoce	Auteurs
Le lien entre les sphères <i>science/décideur/public</i> n'est pas solide La capacité de réponse est altérée : manque de ressources Besoins de meilleure gouvernance, politique et responsabilités La confiance envers la science doit être maintenue	ALUSA (2003)
Problèmes de communication au sein des systèmes fonctionnels	SYNOLAKIS <i>et al.</i> (2005)
Temps de réponse suffisant: communication défectueuse Difficulté d'acheminer une communication aux échelles internationale, régionale, et surtout locale Prévisions incertaines à petite échelle Imprécisions des médias qui diffusent en continu l'information sur les règles à suivre Manque d'assignation de responsabilité claire pour tous les paliers Résistance sociale face à l'évacuation, et dépendance sur les voisins Les chaînes d'aléas: les SAP et les plans peu adaptés à de multiples aléas sur un même secteur	EINSTEIN et SOUSA (2007)
L'hésitation, la retenue de l'alerte, et les messages contradictoires Pannes de courant affectant les lignes téléphoniques, cellulaires, Internet, radios et télévisions Incapacité à fournir une réponse adéquate Structure organisationnelle faible Interférence des rôles dans le système Incapacité à comprendre la signification des données	SOULÉ (2011)
Cloisonnement entre recherche scientifique, législation et gestion de risque Transfert de responsabilités entre les acteurs Marginalisation ou automarginalisation du rôle des citoyens	GARCIA (2012)
Problèmes de communication entre les scientifiques et la communauté	BAUDOIN <i>et al.</i> (2014)
Présence d'incertitudes dans les données et questionnements sur leur diffusion Rôles et responsabilités des scientifiques pas assez précisés	CLOUTIER <i>et al.</i> (2014)
L'impact économique de l'engagement, surtout à long terme, est élevé	BOWMAN <i>et al.</i> (2014)
Pouvoir des institutions judiciaires et exécutives faible Conflit entre certains pays : division des terres (ex. Inde et Pakistan)	ZIA et WAGNER (2015)
Disponibilité des données La dépendance à un opérateur pour diffuser l'alerte Communiquer l'information aux communautés demeure complexe : signal cellulaire peu fiable	COOLS <i>et al.</i> (2016)

en interagissant sur la vulnérabilité (SÄTTELE *et al.*, 2016). En apportant de l'information pour modifier la vulnérabilité des personnes, le SAP modifie la vulnérabilité originale V qui devient V' . La résultante R' (le risque avec l'effet du SAP) est donnée par :

$$\begin{aligned}
 R' = & P[A]P[W|A]V'C \\
 & + P[A]P[\neg W|A]V'C \\
 & + (1 - P[A])P[W|\neg A]C_F \\
 & + C_W
 \end{aligned} \quad (2)$$

Dans l'équation 2, la fiabilité du système est intégrée en considérant la probabilité qu'une alarme (ici W pour *warning*) se déclenche en cas d'occurrence de l'aléa $P[W|A]$ (succès), la probabilité qu'une alarme échoue lors de l'aléa $P[\neg W|A]$ (échec), et la probabilité qu'une fausse alarme se produise $P[W|\neg A]$ (échec). Le coût d'opération du système, ou sa

valeur en termes d'investissements peut également être ajoutée sous la forme C_W . Une modification de la vulnérabilité V' grâce au SAP est adoptée uniquement en cas de succès. SÄTTELE *et al.* (2015) mentionnent que si le délai est court (ex. en termes de secondes), c'est-à-dire que si le temps nécessaire pour engendrer une réponse implique une réaction immédiate, il est difficile de diminuer la vulnérabilité. Dans le cas où le SAP permet une préparation à l'avance, par exemple en intervenant par des mesures d'évacuation de la zone à risque, il s'agit d'une diminution de la vulnérabilité (EINSTEIN et SOUSA, 2007). La diminution de la vulnérabilité est donc une question de temps : par manque de temps (court terme), une alerte influence l'exposition et permet de réagir rapidement; avec assez de temps (moyen/long terme), un SAP permet une préparation en mode proactif (HOGARTH *et al.*, 2014). Cet élément justifie donc la nécessité d'impliquer les quatre composantes fondamentales du SAP. Omettre une composante peut augmenter le délai de transmission, et rendre le système inefficace. Considérant les

équations de EINSTEIN et SOUSA (2007) et de SÄTTELE *et al.* (2016), l'efficacité du SAP (Eff) est ainsi donnée par $Eff = 1 - R'/R$. Il s'agit ici de son efficacité à diminuer le risque, soit de la réduction relative du risque grâce à l'effet du SAP sur la vulnérabilité.

L'équation 2 présente une notion fondamentalement importante des SAP basée sur la théorie de détection des signaux (BROOKS, 2004) : les fausses alarmes. Dans l'équation 2, un coût C_w est associé à l'implantation du SAP, mais il existe aussi un coût économique et social C_f en réponse aux fausses alertes, comme la diminution de production et le manque de confiance dans le système (BOUWER *et al.*, 2014; ROGERS et TSIRKUNOV, 2011). Avec le temps, certains systèmes techniques peuvent être négligés (ex. manque de financement et de visibilité, conflits militaires, etc.), ce qui provoque une dégradation et ampute l'efficacité (HALLEGATE *et al.*, 2012). Un manque de clarté dans les prises de décisions peut également mener à la diffusion d'une alerte non nécessaire (*faux positif*) (Figure 3a) ou d'une alerte manquée alors qu'elle aurait dû être diffusée (*faux négatif*) (GARCIA et FEARNLEY, 2012). Un SAP qui émet uniquement des alertes justifiées a une probabilité de détection (POD) de 100 % (SÄTTELE *et al.*, 2016; SIMMONS et SUTTER, 2009). Cependant, en pratique, cet élément est impossible en raison de plusieurs facteurs qui engendrent de l'incertitude (CHOO, 2009). Par conséquent, un compromis doit être établi afin de maximiser les réponses malgré la présence de fausses alertes (Figure 3b). Une fausse alerte peut diminuer les futurs taux de réponse et donc diminuer l'efficacité (PATÉ-CORNELL, 1986; SIMMONS et SUTTER, 2009). La probabilité de détection est donc couramment mise en relation avec la probabilité de fausse alerte (BROOKS, 2004; CALVELLO *et al.*, 2015; CHOO, 2009; PATÉ-CORNELL, 1986; SÄTTELE *et al.*, 2016; SIMMONS et SUTTER, 2009), ce qui permet d'établir un indice de la performance du SAP basé sur le compromis. Des seuils critiques de décision sont par convention établis pour permettre une détection et une alerte, et ces seuils peuvent être modifiés en fonction de la variable à prioriser (CHOO, 2009; WAIDYANATHA, 2010). Des arbres décisionnels (EINSTEIN et SOUSA, 2007; RHEINBERGER, 2013) et des réseaux bayésiens (MEDINA-CETINA et NADIM, 2008; STURNY et BRUNDLE, 2014) peuvent être utilisés pour identifier les règles de décisions pour le choix du compromis (SÄTTELE *et al.*, 2016). Les réseaux bayésiens permettent de représenter les liens causaux entre les variables des composantes automatisées en termes probabilistes, ce qui permet d'évaluer quantitativement l'efficacité du système (SÄTTELE *et al.*, 2016). Des règles logiques, le raisonnement verbal, la logique floue, et les réseaux de neurones artificiels peuvent également être utilisés pour améliorer les techniques de distribution des messages (SENE, 2016).

Les fausses alarmes permettent de quantifier l'efficacité. Par exemple, en évaluant les fausses alarmes aux tornades aux États-Unis, SIMMONS et SUTTER (2009) concluent que le nombre de pertes humaines est corrélé avec l'augmentation du ratio de fausses alertes puisque celles-ci influencent à long terme la crédibilité du SAP dans la communauté. De plus, les fausses alertes augmentent les coûts associés aux réponses mises en place (CHOO, 2009). Lors de l'établissement du seuil sur une des courbes définies au préalable par le type de système (ex. une meilleure précision des instruments permet une meilleure détection), le principe est de minimiser les fausses alarmes, ce qui diminue la probabilité de détection et augmente le risque (Figure 3b). La décision finale est donc critique puisque si l'intérêt est d'augmenter la détection tout en minimisant les fausses alertes, un choix doit être réalisé entre 1) l'acceptation d'un certain risque pour les personnes, mais également des coûts moins élevés, et 2) l'établissement d'un seuil lâche qui augmente la détection, mais qui engendre également des fausses alarmes, impliquant une diminution de la crédibilité du SAP à long terme et des coûts plus élevés (CHOO, 2009). Pour cette raison, l'analyse coûts-bénéfices peut être utilisée pour déterminer le choix du SAP ou les seuils d'alerte (HALLEGATE, 2012). En pratique, le choix final du seuil est souvent réalisé par des experts qui favorisent le principe de précaution (RHEINBERGER, 2013). Ceci permet de sauver des vies tout en favorisant des décisions de surprotection à des coûts très élevés, par exemple la fermeture prématurée de routes menant à des stations de ski suite à des alertes d'avalanches (RHEINBERGER, 2013).

L'humain fait toujours des erreurs, surtout cognitives, qui font en sorte que la décision qui est prise n'est pas nécessairement appuyée par les données techniques du système (BAYRAK, 2011). Pour établir un portrait complet de l'efficacité du SAP, l'humain doit faire partie de l'évaluation (approche holistique) (SÄTTELE *et al.*, 2016), ce qui n'est pas toujours le cas dans les études portant spécifiquement sur l'efficacité (Tableau 6). Une quantification des décisions humaines ou de leurs succès peut être réalisée par des métriques sur le comportement qui affecte la vigilance des opérateurs (BAYRAK, 2011), la vitesse à laquelle la décision est prise, la validité des modèles appliqués par les opérateurs, et la qualité de leur décision sur l'évitement des dommages (SÄTTELE *et al.*, 2016). Malheureusement, la quantification de l'efficacité se concentre surtout sur les éléments automatisés des SAP (Tableau 6) (SÄTTELE *et al.*, 2016). Dans ce contexte, il est légitime de supposer que sous l'ère du CAS, qui adopte une tendance très technocentrée (GLANTZ, 2015), que même une détection de 100 % des aléas ne produira pas une action appropriée chez 100 % des gens affectés.

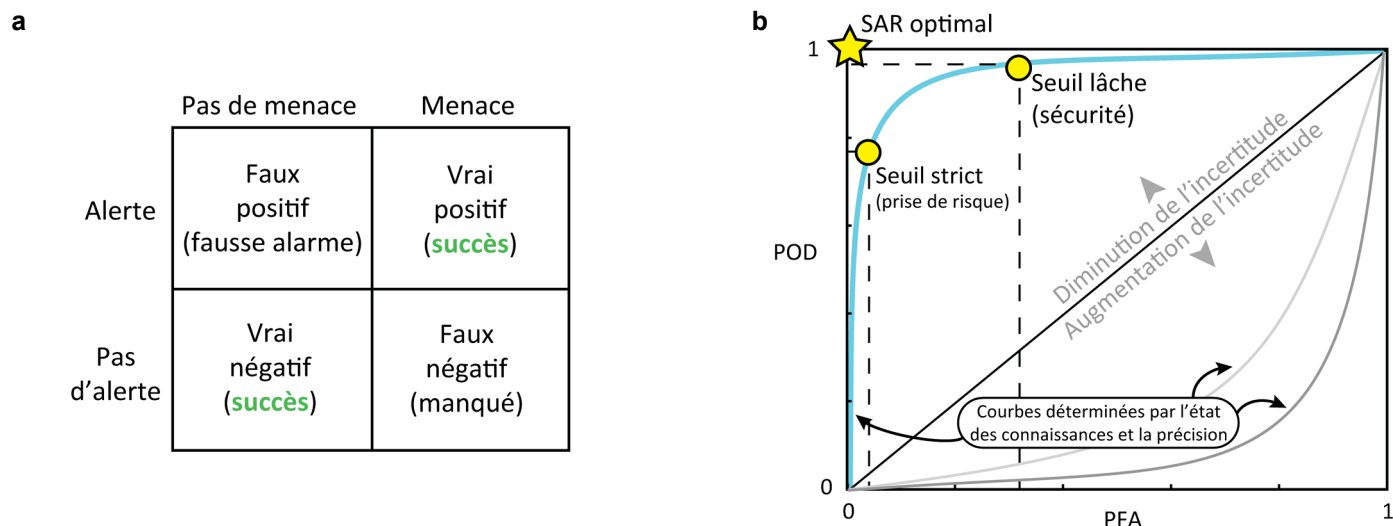


Figure 3. Matrice des scénarios possibles causés par les fausses alertes (a) et relation entre une probabilité de détection (POD) et de fausses alarmes (PFA) afin de déterminer un seuil de déclenchement de l'alerte (b).

Possible false alarms induced scenarios matrix (a) and relation between the probability of detection (POD) and of false alarms (PFA) to identify an alert threshold and trigger (b).

Tableau 6. Procédures utilisées pour analyser l'efficacité des systèmes d'alerte précoce (SAP) et de leurs composantes opérationnelles.
Table 6. Effectiveness assessment procedures for early warning systems (EWS) and their operational components.

Évaluation de l'efficacité (ou de la performance) d'un système d'alerte	Composante visée	Auteurs
Méthode de détection du compromis entre une réponse efficace (dans les temps) et les taux de fausses alertes.	Détection du signal Performance globale	PATÉ-CORNELL (1986)
Analyse coûts-bénéfices axées sur l'analyse de performance grâce à cinq paramètres : fréquence, précision, réponse, prévention, coûts des dommages.	Avertissement Diffusion de l'alerte	MEISSEN (2008)
Faisabilité technique à réduire le risque/analyse coûts-efficacité entre les mesures de mitigation.	Gestion de risque	BRÜNDL <i>et al.</i> (2009)
Analyse de métriques de performance technique, humaine, organisationnelle.	Surveillance Opérateurs humains	BAYRAK (2011)
Application de la théorie de détection des signaux pour évaluer la performance.	Détection du signal Performance globale	RHEINBERGER (2013)
Utilisation d'un réseau bayésien pour évaluer la fiabilité technique et analyse hypothétique pour quantifier la décision de l'opérateur.	Détection du signal Décision	SÄTTELE <i>et al.</i> (2015)
Analyse de la fiabilité (réseau Bayésien : probabilité de détection et fausse alarme) des portions automatisées et non-automatisées du système global (analyse semi-quantitatives et quantitatives des décisions humaines).	Détection Interprétation Décision Dissémination	SÄTTELE <i>et al.</i> (2016)
Évaluation de la performance d'un SAP libre accès et portable (PRESTo) et de son succès de détection des ondes sur des enregistrements et des simulations : le délai d'action et la zone aveugle sont les paramètres évalués.	Surveillance Cartographie temps réel	PICOZZI <i>et al.</i> (2015b)
Comparaison des modèles de corrélation entre les précipitations et les glissements de terrain, et les précipitations et les alertes.	Surveillance Détection	CALVELLO et PICIULLO (2016)

4. DES SYSTÈMES ADAPTÉS POUR DIMINUER LA VULNÉRABILITÉ ET LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

En regard des éléments soulevés précédemment, il apparaît que les SAP ne sont efficaces que s'ils répondent à certaines conditions (Tableau 7). KELMAN et GLANTZ (2014) résument en sept éléments les conditions nécessaires : transparence, intégration, flexibilité, continuité, faible délai de transmission, capacité humaine, déclencheur. La *transparence* exige que tous les acteurs impliqués connaissent l'information. Un SAP doit être *intégré* dans la population, et *flexible* afin de s'ajuster à d'autres vulnérabilités et/ou aléas. Il doit être *continuellement opérationnel* au sein de la communauté, et acheminer l'alerte *dans les temps* nécessaires à la réaction des gens vulnérables. Il doit intégrer une *expertise humaine* qui est en mesure de poser les actions appropriées suite à l'alerte et pendant la préparation. Enfin, le SAP *déclenche* une alarme ou des avis en fonction des caractéristiques de l'aléa qu'il évalue, et signale les gens lorsque celui-ci est dissipé. À la lumière de ces éléments qui résument les premières sections de ce travail, plusieurs recommandations (Tableau 7) peuvent permettre d'améliorer l'efficacité du système à diminuer la vulnérabilité des populations ainsi que l'impact des aléas sur l'environnement. Les SAP doivent donc faire partie d'un véritable développement d'une culture du risque et s'ancrer dans les quatre dimensions de la sécurité civile, soit la prévention des sinistres, la préparation, l'intervention et le rétablissement (GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 2014).

Cette section présente une discussion en faveur de trois considérations intégratrices des recommandations des auteurs. Ces critères semblent être actuellement l'avenue à prendre pour mettre en opération des systèmes d'alerte :

1. Le SAP doit être adapté à son contexte local pour réussir à amoindrir la vulnérabilité à long terme. La communauté doit être l'acteur principal du système. Un SAP efficace mène à la sécurité des personnes, peu importe son mode de fonctionnement (COOLS *et al.*, 2016).
2. L'intégration doit passer par une communication entre tous les acteurs, particulièrement entre les scientifiques et la communauté. Elle permet un suivi environnemental (ALUSA, 2003), et potentiellement une diminution des délais d'avertissement (MUSTAFA *et al.*, 2015).
3. Enfin, une boucle de rétroaction semble nécessaire pour impliquer un flux d'information cyclique permanent et pour briser la linéarité et la vision technocentrée (MATVEEVA, 2006).

Sur la base de cette revue de littérature, nous proposons un modèle conceptuel des composantes devant faire

partie d'un SAP intégré (Figure 4). En plus des quatre composantes généralement reconnues pour les SAP (MILETI et SORENSON, 1990), nous proposons d'intégrer les composantes de capacité d'adaptation et de retour d'expérience qui mènent à la mise en place de mesures d'adaptation pour augmenter la résilience de l'écosystème.

4.1 Adapter les systèmes d'alerte précoce au contexte local

L'opération habituelle des SAP se déroule à travers les étapes d'évaluation des risques, de définition de seuils de détection, de la diffusion d'une alerte lorsqu'un seuil est franchi, et d'une réponse de la part de ceux qui reçoivent le message. Ce cheminement linéaire pose le problème suivant : il suppose que les gens traitent l'alerte conséquemment à l'ampleur de la menace et qu'ils vont agir en ce sens (LEONARD *et al.*, 2008). Cependant, le message est interprété de diverses façons par différentes personnes, ce qui fait en sorte que l'interprétation du message face à un même phénomène varie (McLUCKIE, 1970).

L'approche *top-down* et l'approche *bottom-up* doivent cesser d'être mises en opposition et plutôt s'inscrire dans un processus bidirectionnel d'échanges entre les différents acteurs et les différentes échelles de gouvernance (local, régional, national). Cette combinaison permet de bénéficier d'un retour de situation depuis les services d'urgence sur le terrain ou directement par les citoyens, ce qui améliore les prévisions subséquentes (OMM, 2010), et s'assure que le public est conscient du risque, connaît les réponses appropriées à l'alerte, et retransmet l'information (rétroaction) au personnel d'urgence (CROIX-ROUGE, 2009). C'est le cas par exemple des services météorologiques comme l'OMM qui émettent des prévisions à divulgation publique (VILLAGRAN DE LÉON *et al.*, 2013). Ces informations sont nécessaires pour se préparer face aux ouragans, et peuvent conjointement être utilisées par des SAP nationaux centrés vers les gens. Le SAP pour les cyclones du Bangladesh se base sur les données de l'OMM pour émettre les avertissements à des volontaires sur le terrain qui diffusent l'information avec des mégaphones et entament l'évacuation vers les abris (LENTON, 2013). C'est ce qui a permis, conjointement à la construction de 1 700 abris (HAQUE *et al.*, 2012), de diminuer considérablement le nombre de morts entre le cyclone de 1991 (67 000 morts) et celui de 2007 (cyclone Sidr, 3 400 morts) (NADIRUZZAMAN et WRATHALL, 2015). Dans un tel cas, l'amélioration des capacités de réponse et d'adaptation permet au SAP d'être plus efficace.

Le système *top-down* a l'avantage d'évaluer quantitativement le succès du transfert d'information entre chaque composante du système dans sa portion automatisée (SÄTTELE *et al.*, 2016; SÄTTELE *et al.*, 2012). Ceci permet, comme pour toute autre

Tableau 7. Recommandations générales pour améliorer l'efficacité des systèmes d'alerte précoce (SAP) issues de la littérature scientifique.
Table 7. General recommendations underlined in scientific works to enhance early warning systems (EWS) effectiveness.

Composante affectée	Recommandations générales pour améliorer l'efficacité des SAP	Auteurs
Toutes	Améliorer la fiabilité des signaux Augmenter les temps de réponse Améliorer les plans d'urgence Posséder les quatre éléments clés Inclure une composante d'évaluation post-alerte Doit faire partie d'une approche de gestion de risque Doit fournir l'alerte sans délai, et permettre au message d'engendrer la réaction face à la menace Jonctions des modèles de prévisions avec les plans d'évacuation et la protection des propriétés Le SAP doit prendre en considération la menace sur l'environnement	PATÉ-CORNELL (1986) WALKER (1989) EINSTEIN et SOUSA (2007)
Science Politique Décisionnel	Améliorer les bases de données pour la recherche Augmenter la résolution spatio-temporelle des suivis Évaluation raffinée des probabilités d'occurrence d'un aléa/désastre Améliorer la préparation, la formulation et la réponse Intégrer toutes les parties prenantes S'assurer d'une compréhension généralisée entre acteurs, entre les scientifiques et le citoyen, entre les scientifiques de tout horizon Instaurer une éducation continue sur les risques	ALUSA (2003) IMAMURA (2009)
Communauté	Normes de construction adaptées au contexte local Construire une culture du risque Impliquer les bénéficiaires du système (communauté au centre) Ajouter une boucle de rétroaction depuis la communauté vers le système Impliquer la participation de la communauté Prendre en compte le savoir local dans la collecte de donnée Le système peut fournir des bénéfices pour l'adaptation	SOULÉ (2014) BAUDOIN <i>et al.</i> (2014) COOLS <i>et al.</i> (2016)

mesure prévisionnelle de la gestion des risques, d'améliorer l'efficacité de la détection et de la diffusion de l'information (meilleur succès), notamment en effectuant des analyses de sensibilité afin d'évaluer à quel point l'incertitude dans toutes les étapes du processus affecte les actions préconisées et les bénéfices associés (COUGHLAN DE PEREZ *et al.*, 2015; SÄTTELE *et al.*, 2015; STURNY et BRUNDLE, 2014).

Les approches participatives sont associées à des méthodes de diffusion de l'information plus simples et adaptées au milieu (ex. gong, drapeaux, cloches, sirènes, etc.), et sont souvent plus efficaces (BUCKLE, 2012). Elles adaptent le SAP au contexte local en incluant la communauté dans le processus de recherche, dans la conception du SAP avec les divers paliers de gouvernance, et en offrant la parole à tous, quelle que soit leur situation de précarité (LE DE *et al.*, 2014). Elles permettent d'outiller les communautés en connaissances diverses et de s'approprier le système afin de l'approprier avec plus d'*empowerment* (JOHNSTON *et al.*, 2005). Bien qu'ayant une portée très large de la gestion des risques, dans le domaine du SAP, l'*empowerment* permet d'accéder à l'information et à la technologie qui diffuse l'information (NADIRUZZAMAN

et WRATHALL, 2015), et par conséquent, de diminuer la vulnérabilité. Cet élément corrobore exactement le 7^e objectif que l'UNISDR propose dans le CAS, lequel souhaite « augmenter substantiellement la disponibilité et l'accessibilité des systèmes d'alerte précoce » (UNISDR, 2015, p. 36).

Un SAP doit être adapté à la communauté cible, et doit être aussi simple que possible (COOLS *et al.*, 2016; INTRIERI *et al.*, 2013). BUCKLE (2012) estime que pour modifier la vision technocentrée qui se demande continuellement comment acheminer une information le plus efficacement possible pour aider les gens à entreprendre une action, il faut plutôt se demander : « qu'a-t-on besoin pour déplacer les gens en lieu sûr? Quels systèmes et informations sont requis [...]? ». La réponse représentera forcément des besoins de la communauté (WMO, 2006), même si un SAP ne peut pas répondre à tous les besoins (GLANTZ, 2004). À cet égard, les SAP traditionnels, comme le signal donné par le terme *smong* aux Philippines, peuvent être des SAP très efficaces (GAILLARD *et al.*, 2008; McADOO *et al.*, 2006). Reconnaître le comportement animal avant un désastre est un exemple typique de connaissances locales qui pourraient bénéficier à un SAP. ZOMMERS

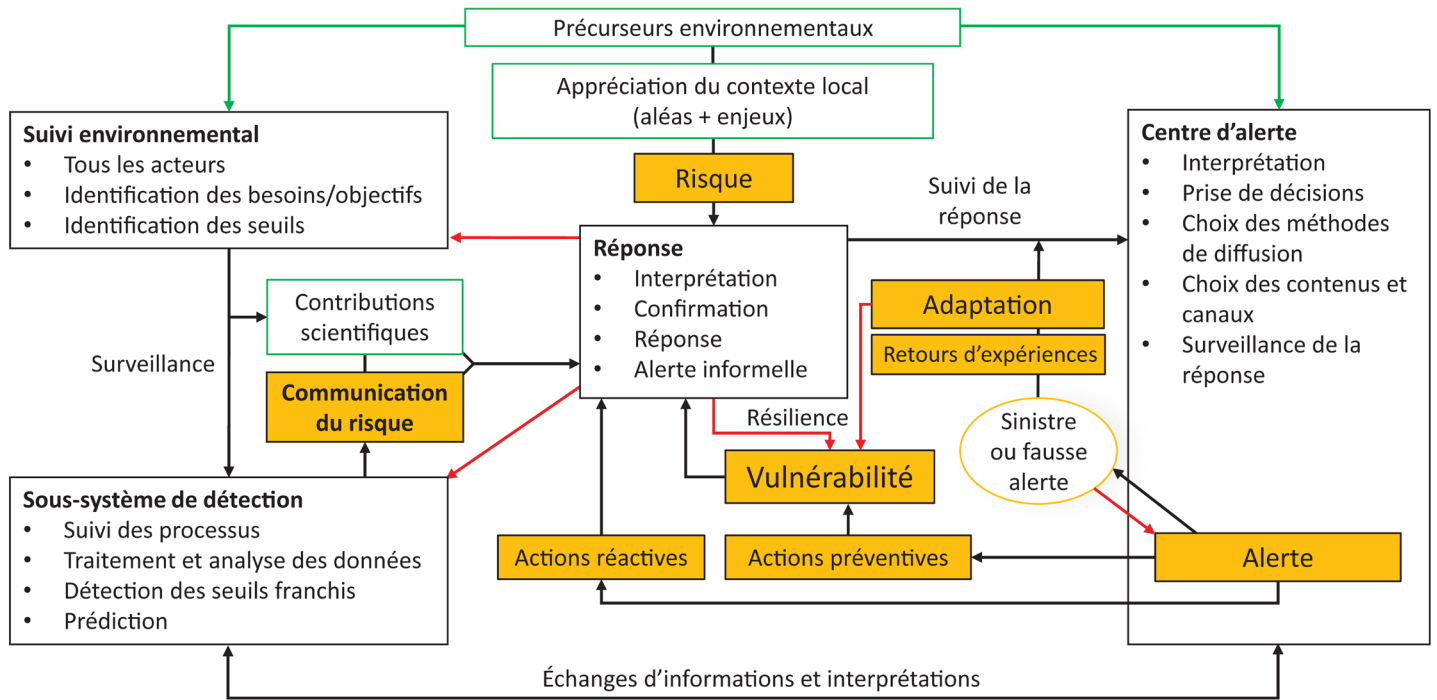


Figure 4. Composantes générales d'un système d'alerte précoce (SAP) intégré incluant un suivi environnemental comme base pour la collaboration, des rétroactions entre les communautés, les acteurs et les éléments vulnérables (flèches rouges) et un lien direct entre les scientifiques et les communautés. La flèche bidirectionnelle verte représente le caractère intégrateur de la gestion environnementale, puisque le suivi des précurseurs permet d'adapter les prises de décisions et agit sur la détermination du risque. Adapté de MILETI et SORENSEN (1990).
General component of an integrated early warning systems (EWS), including an environmental monitoring as a collaborative platform, feedbacks between communities, stakeholders and vulnerable elements (red arrows), and a direct link between scientists and communities. The green bidirectional arrow shows the integrated behavior of the environmental management, since a continuous monitoring enables a good decision making and acts on risk determination. Adapted from MILETI and SORENSEN (1990)

(2014) relève que des bio-indicateurs, comme des plantes pour les métaux lourds, les coraux pour la salinisation des écosystèmes marins, les arbres pour les sécheresses et les insectes/araignées pour les feux de forêt sont tous représentatifs de changements qui surviennent dans l'environnement et donc indicateurs d'aléas lents (ex. changements climatiques) ou rapides (ex. feux, crues). Un SAP peut également bénéficier des connaissances des communautés autochtones en considérant les relations avec la nature, les pratiques communautaires et institutionnelles, et les connaissances intergénérationnelles des communautés autochtones (MERCER *et al.*, 2010). En plus d'améliorer l'efficacité du SAP, ces connaissances généralement communiquées de bouches à oreilles augmentent l'acceptabilité sociale (PAUL et ROUSTRAY, 2013). Les auteurs ont montré que les habitants côtiers au Bangladesh étaient en mesure (54,4 % des répondants) de prévoir l'arrivée du cyclone Sidr en 2007 grâce à l'observation du comportement animal (oiseaux se déplaçant dans les terres, fourmis grimant aux toits, crabes cherchant les hauteurs, abeilles formant des essaims dans le ciel, etc.) (PAUL et ROUSTRAY, 2013).

Le choix de la dictature cubaine d'instaurer un SAP basé sur les besoins de la communauté montre que la préparation est la solution, lorsque le coût des dommages de l'ouragan Ike en

2008 atteignait 30 milliards \$US aux États-Unis et seulement 1,5 milliard \$US à Cuba (CROIX-ROUGE, 2009). En raison d'une bonne préparation, d'une connaissance et d'une perception élevée du risque, la population cubaine bénéficie du temps nécessaire aux évacuations lorsque l'alerte est donnée (THOMPSON et GAVIRIA, 2004). Même s'il est critiqué par certains (ex. AGUIRRE, 2005) pour son fonctionnement sous régime autoritaire (ex. les résidents peuvent être forcés à évacuer), il n'en demeure pas moins que l'objectif de sécurité est atteint et que le système est efficace pour diminuer la vulnérabilité (GLANTZ, 2004; KELMAN et GLANTZ, 2014; THOMPSON et GAVIRIA, 2004).

Généralement, l'implication égale de tous les acteurs peut poser problème : fortes attentes des autorités envers la communauté et vice-versa, chacun ayant ses propres attentes envers les performances du SAP (HANDMER, 2000; WMO, 2006); favoritisme de certains membres d'une communauté à accéder au pouvoir des regroupements citoyens, exclusion de certains individus du processus (NADIRUZZAMAN et WRATHALL, 2015), détournements de fonds d'aide à des fins politiques (GLANTZ et KELMAN, 2013), lenteur administrative des autorités (SOULÉ, 2011), etc. Ces problèmes motivent le prochain point. Un des moyens soulignés

par certains auteurs (ALESSA *et al.*, 2015; CLOUTIER *et al.*, 2014; GARCIA et FEARNLEY, 2012; MICHOU *et al.*, 2013; SOULÉ, 2011; STÄHLI *et al.*, 2015) est de permettre aux scientifiques de jouer un rôle plus important dans le SAP, et pas uniquement celui de fournisseur de données dans un système *top-down* (BASHER, 2006).

4.2 Joindre science et connaissances populaires par la gestion environnementale

En 2004, en plus des sept éléments mentionnés à la section 4, Glantz proposait un huitième critère pour s'assurer d'un SAP efficace : il doit être *apolitique*. L'auteur mentionnait qu'il est difficile de séparer la politique du SAP (GLANTZ, 2004) afin de demeurer neutre dans l'atteinte des objectifs. MATVEEVA (2006) va plus loin et considère que le SAP apolitique est un mythe. À la question « qui doit avertir qui pour faire quoi? », l'auteure répond que de toute évidence « les positions politiques influencent l'alerte » et « déterminent également si l'alerte sera entendue par les gouvernements ». Cependant, les financements pour les SAP sont surtout accordés en mode d'urgence en réponse à un désastre (sauvetage, assistance, reconstruction, etc.) (TATHAM *et al.*, 2012). En ce sens, les politiques d'austérité appliquées dans les pays développés ne concentrent pas leur budget sur la préparation face aux risques (ZOMMERS et SINGH, 2014). Le contexte politique financier est instable et souvent inéquitable (85 % des financements de réduction des risques de désastres [RDD] ont été accordés à seulement 30 pays entre 1991-2010, alors que les 118 autres récoltent 15 %) (KELLETT et CARAVANNI, 2013). Il semble qu'une des voies pour promouvoir une diminution de la vulnérabilité des populations et de leur environnement de façon équitable entre les pays est de s'assurer que ceux-ci bénéficient d'une information de qualité et mise à disposition du public sans passer par des instances gouvernementales ou des autorités bureaucratiques. À cet égard, ZOMMERS (2012) suggère de déléguer les SAP à des agences privées ou des organisations non gouvernementales.

Dans un SAP efficace, tous les acteurs ont des responsabilités pour acquérir des connaissances sur l'environnement et les aléas (MILETI et SORENSEN, 1990). Ceci implique une reconnaissance des rôles de chaque acteur, incluant celui des gouvernements (LANDIS, 2003), et surtout un rapprochement de la science, du citoyen et des services d'urgence (GARCIA et FEARNLEY, 2012; SOULÉ, 2011). Ce rapprochement peut se réaliser à travers un suivi de l'environnement. Une mauvaise gestion de l'environnement augmente la vulnérabilité en augmentant l'exposition des personnes et de leurs biens, ce qu'a montré le tsunami de décembre 2004 en Thaïlande, où les mangroves transformées en pénécultures n'ont pu atténuer l'énergie de la vague qui a causé des dommages importants (SRINIVAS et NAKAGAWA, 2008). Les communautés

habitant derrière les zones toujours sous couvert végétal ont subi moins de dommages, ce qui a également été remarqué par TATHAM *et al.* (2012) au Bangladesh en 2007. Le maintien des services écologiques des écosystèmes peut donc réduire les risques.

Des rencontres entre les scientifiques et les communautés permettent d'augmenter la confiance envers la science (MICHOU *et al.*, 2013) et institutionnaliser des dialogues réguliers entre gestionnaires, fonctionnaires et scientifiques permet de renforcer les liens entre les acteurs (STÄHLI *et al.*, 2015; ZSCHAU et KUPPERS, 2003). Dans un système technocentré, le scientifique émet une prévision, qui peut être relayée par des opérateurs non scientifiques (ex. médias, services d'urgence, etc.), et une alerte est potentiellement diffusée au citoyen. Si ce dernier répond de façon inappropriée, le problème de communication se situe entre le scientifique et le citoyen (IMAMURA, 2009). Avec l'aide d'une terminologie appropriée (GARCIA et FEARNLEY, 2012), il est possible d'acheminer l'information directement vers le citoyen avec un délai de transmission minimale. Pour réaliser cette tâche, le partage de données en libre accès (*open source*), ou encore les protocoles d'alerte commune (PAC) (UNEP, 2012), peuvent être une avenue possible, ce qui donne le moyen d'offrir l'information gratuitement pour tous comme souhaité par l'OMM (2010). Mais ce partage dépend du degré de liberté offert par les autorités en place (ex. État libéral versus autoritaire) (MATVEEVA, 2006). Notons que la technologie de l'information n'est pas nécessairement la solution la plus acceptable dans les conditions de forte vulnérabilité, mais que dans certains cas, les cellulaires ont montré leur efficacité supérieure pour atteindre le plus de gens (BEAN *et al.*, 2016; KOUADIO et DOUVINET, 2015). Dans tous les cas, les acteurs doivent formuler une méthode et choisir une voie privilégiée de diffusion de l'information qui inspire la confiance et l'acceptabilité sociale selon les besoins (BUCKLE, 2012).

Puisque le financement des projets de R&D est généralement effectué vers les projets de SAP (KELLETT et CARAVANI, 2013), il serait légitime de profiter d'une partie de ces investissements pour engendrer une reconstruction et une décontamination de l'environnement (REIBLE *et al.*, 2006). Joindre les connaissances locales aux projets scientifiques permet aussi de s'assurer que le financement n'est pas uniquement associé à la réponse postdésastre, mais aussi dans des mesures de conservation des services écosystémiques (comme la reforestation en zones littorales), dans le suivi de l'environnement (ARIAS *et al.*, 2016), et dans l'adaptation face aux changements climatiques (ALESSA *et al.*, 2015; GARCIA et FEARNLEY, 2012). Ainsi, joindre ces deux éléments permet d'augmenter les connaissances générales avant l'impact d'un désastre (SOULÉ, 2011), et de rendre la science utile (GLANTZ, 2004). Un réseau de suivi se concentre autant sur l'intégration des composantes scientifiques et techniques

(ex. instruments de mesure, installation, opération) que sur le volet social incluant la perception des gens sur les aléas qui agissent sur leur territoire (ARIAS *et al.*, 2016; COOLS *et al.*, 2016). La concertation de tous les acteurs dans la gestion environnementale, dans l'identification des vulnérabilités, dans le suivi des aléas et de la détection de leurs changements, leur permet d'accroître leur perception et leur rôle dans l'occurrence des risques socionaturels (ARIAS *et al.*, 2016; LEONARD *et al.*, 2008). En retour, cette concertation diminue tant leur vulnérabilité que les impacts des aléas sur l'environnement (ARIAS *et al.*, 2016).

L'implication des scientifiques s'accompagne toutefois de certains questionnements. Les scientifiques n'ont pas tous les mêmes priorités (IMAMURA, 2009) et ne s'intéressent pas toujours au volet opérationnel de leurs recherches (GARCIA et FEARNLEY, 2012). CLOUTIER *et al.* (2014) s'interrogent sur la responsabilité scientifique derrière la prévision, la fausse alerte, l'incertitude des données, et la prévision manquée. Les auteurs proposent de partager les conséquences, comme le coût d'une fausse alerte. En effet, il existe une perception négative de la science par le public, car la science est complexe, et le public peut la voir comme étant stérile, réductionniste, fermée et arbitraire (BOWMAN *et al.*, 2014). Mettre en place un SAP est sans doute l'opportunité de renverser cette perception, d'entamer un dialogue et de favoriser la transdisciplinarité.

La fausse alarme est vue comme un impact négatif. Il faut plutôt la traiter comme un résultat en soi qui permet d'améliorer le SAP pour le futur (WALKER, 1989). Actuellement, il semble difficile pour le public d'accepter l'incertitude, surtout si l'argumentaire derrière celle-ci est purement logique (ex. l'incertitude est certaine, par conséquent la fausse alarme est possible) (BOWMAN *et al.*, 2014). Les gens percevront tous de façons différentes les résultats scientifiques, surtout si une incertitude y est associée; et une incertitude y est toujours associée (CHOO, 2009; HALLEGATE, 2012). En ce sens, BOWMAN *et al.* (2014) suggèrent que le moyen de générer une confiance du public envers la science serait peut-être de s'approprier, en tant que scientifiques, des arguments basés non seulement sur des données, mais également sur l'éthique. Comme dans toute situation de danger, la personne qui possède l'information susceptible de causer du mal à une autre personne a une obligation morale de lui fournir cette information (BOWMAN *et al.*, 2014). Ainsi, GLANTZ et KELMAN (2013) abondent en ce sens et soutiennent que quiconque « détient le pouvoir d'agir » pour éviter le danger a « l'obligation légale, morale et politique de le faire ». En effet, l'éthique en science et en environnement prend souvent la forme du principe de précaution, qui maintient que douter de la présence d'un risque efface tout doute quant à l'action de prévenir pour diminuer ses impacts (BOWMAN *et al.*, 2014). Ces arguments montrent qu'il est moralement obligatoire pour les scientifiques de fournir l'information au public. Enfin, un

SAP complètement dirigé par des intérêts scientifiques n'est pas la solution. Ce type de système *ad hoc* n'est qu'un volet d'un système plus intégré, et ultimement concentré vers le risque, la vulnérabilité et l'aléa (BASHER, 2006). Le système ne doit pas seulement diffuser l'information dans un seul sens, mais bien depuis la communauté vers les autorités et la science, une approche bidirectionnelle.

4.3 La rétroaction positive : l'alerte précoce comme véritable système intégré

Lors de la prise de décision sur le lancement d'une alerte, ZILLMAN (2003) propose de diffuser l'alerte si le danger est immédiat, mais aussi d'annoncer des avis d'information dans le cas contraire. Cette étape permet de s'assurer d'un continuum de communications dans le temps, en dehors des épisodes extrêmes souvent dans la mire des scientifiques (BURNINGHAM *et al.*, 2008). Le processus linéaire favorise l'étude de l'extrême, abandonnant les vulnérabilités de tous les jours et souvent incrémentielles, qui affectent les gens (MANYENA, 2012). Or, réduire la vulnérabilité doit se réaliser avant la matérialisation d'un désastre, grâce à une collaboration continue entre tous les acteurs, mais également par un retour d'expérience de la part des gens qui subissent le désastre. Cette composante d'auto-évaluation permet au SAP d'améliorer son efficacité (WALKER, 1989), mais bien que présente dans la plupart des SAP sur papier (Figure 2), est rarement appliquée (BAUDOIN *et al.*, 2014). De plus, le retour d'expérience devrait se faire aussi dans le cas de fausses alertes pour maintenir notamment la confiance de la population envers le SAP.

En intégrant la communauté à la science et aux décisions, le système de type *top-down* s'approprie la véritable sémantique du terme « système » et devient un SAP *end-to-end-to-end* (BAUDOIN *et al.*, 2014; KELMAN et GLANTZ, 2014; OMM, 2010) (Figure 4). Ce processus permet de penser après le désastre et avant le prochain. Il embrasse la notion de résilience : ce qui revient à « une approche proactive de long terme par retour d'expérience et d'adaptation pour mieux prévenir les futures crises » (QUENAULT, 2015). Il permet non seulement d'évaluer les risques, de détecter une menace, d'acheminer une alerte, et d'entreprendre des actions sécuritaires, il ouvre aussi la porte à la diminution de la vulnérabilité et à une augmentation de la résilience des communautés (BAUDOIN *et al.*, 2014).

Comme le montre NEUSSNER (2015) avec le cas des typhons aux Philippines, les alertes dans le système *top-down* sont envoyées depuis des centres d'opérations vers les villages. Il n'y a cependant pas de rétroactions possibles, car il n'y a pas de structure qui permet ce flux inversé. Il en résulte alors une intégration improductive des leçons tirées (UNISDR, 2006a). Dans une étude comparative entre les impacts causés par un tsunami en Californie et à Hawaï en

1964, ANDERSON (1969) conclut que les dommages recensés sur l'île sont largement inférieurs en raison, surtout, des rétroactions du public en général et des experts sur leurs expériences vécues lors de précédentes alertes aux tsunamis. Ainsi, la rétroaction permet d'accumuler des recommandations et de collectivement reconnaître le besoin de changement dans le système (ANDERSON, 1969), ce qui permet, à long terme, de « reconstruire mieux » pour diminuer la vulnérabilité (UNISDR, 2015).

5. CONCLUSION

Les SAP ne sont pas tous efficaces. Les aspects techniques sont bien étudiés et compris. Ils démontrent des fortes capacités de prédictions, et peuvent détecter et envoyer des alertes en temps quasi réels sur divers dispositifs de haute technologie ou simplement traditionnels. Mais la technologie ne doit pas être considérée comme le cœur du SAP si l'objectif est une diminution de la vulnérabilité. Les éléments soulevés montrent qu'au contraire, les acteurs d'un SAP efficace doivent concentrer leurs efforts sur la collaboration pour améliorer les prises de décisions qui mènent à des réponses concertées.

Ce travail a présenté le mode opérationnel des SAP dans la réduction des risques de désastres. Les SAP sont appliqués depuis plusieurs décennies pour permettre aux populations vulnérables d'entamer des actions pouvant les sauver face à un aléa, ou leur permettre d'agir pour sauvegarder leurs biens ou l'environnement. Depuis leur promotion par les Nations Unies dans les années 1990, la méthode habituellement appliquée de SAP consiste en un cheminement d'une information depuis la détection d'une menace vers le citoyen. Dans ces systèmes cependant, le citoyen agit presque uniquement comme receveur d'information, alors que la technologie permet de détecter la menace et agit comme vecteur d'information. L'efficacité de ce processus peut être quantifiée grâce à l'évaluation des rapports entre les bonnes détections et les fausses alertes. Un choix judicieux de SAP en fonction des budgets disponibles peut reposer sur ces analyses qui permettent de choisir les seuils d'alerte, tout en intégrant les incertitudes associées aux technologies. Cependant, la connaissance des risques et la capacité de réponse des communautés sont généralement exclues du mode opérationnel. Pour cette raison, dans plusieurs cas, il est difficile de garantir une efficacité. La technologie ne doit donc pas être considérée comme le cœur du SAP si l'objectif est une diminution de la vulnérabilité. Les SAP actuels qui diminuent la vulnérabilité des populations sont des réussites collaboratives entre plusieurs acteurs sous l'influence d'une communauté informée.

Pour diminuer la vulnérabilité des populations face aux aléas, le SAP intervient en offrant suffisamment de temps aux gens pour se préparer et pour agir dans le but d'être en sécurité. En agissant en mode préventif, il peut augmenter la résilience et la capacité d'adaptation d'une communauté dans son environnement, ce qui permet au système dynamique de s'adapter aux nouvelles situations suite à des désastres. Les changements climatiques modifient les fréquences et intensités des événements sévères, et les gouvernements doivent adapter leurs plans de gestion de risque et les systèmes d'alerte à ces incertitudes. Ainsi, ce travail fait ressortir trois éléments qui font intervenir l'ensemble des acteurs de cette gestion. D'abord, pour fonctionner efficacement, un SAP doit être adapté aux besoins de la communauté, répondre à ses attentes, utiliser le savoir local autant que la science et bénéficier de retours d'expériences pour rendre plus efficace la préparation à de futurs aléas. Ceci peut commencer et se concrétiser par des rencontres inter et multisectorielles. Ensuite, le SAP est une opportunité pour les scientifiques de rendre leurs recherches appliquées dans les communautés, et une occasion de démocratiser la science pour la rendre utile aux yeux de tous. Les spécialistes des différents domaines d'études des sciences sociales et naturelles devraient voir le SAP comme un système holistique. C'est l'occasion d'entamer des projets en fonction des besoins réels soulevés par les gens qui vivent dans des environnements sensibles et souvent influencés par les changements climatiques, et non uniquement à partir des intérêts de recherche. Cette approche participative peut se mettre en place par un suivi et une gestion durable de l'environnement, ce qui en retour peut y réduire les impacts des aléas. Enfin, un SAP ne peut être efficace que si les communications y circulent librement et mènent à des réponses concertées. Une rétroaction de la part des communautés vers le système permet de bénéficier des retours d'expériences et catalyse des actions de préparation. Ces éléments semblent requis pour éviter un mirage technologique, pour réussir un rebond vers l'avant.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier Christian Larouche, Philippe Juneau et Serge Suanez, ainsi que les évaluateurs et éditeurs pour leurs commentaires sur la synthèse.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADGER, W.N. (2006). Vulnerability. *Glob. Environ. Change*, 16, 268-281.
- AGUIRRE, B.E. (2005). Cuba's disaster management model: Should it be emulated? *Int. J. Mass Emerg. Disasters*, 23, 55-71.
- ALESSA, L., A. KLISKEY, J. GAMBLE, M. FIDEL, G. BEAUJEAN et J. GOSZ (2016). The role of indigenous science and local knowledge in integrated observing systems: Moving toward adaptive capacity indices and early warning systems. *Sustain. Sci.*, 11 (1), 91-102.
- ALFIERI, L., P. SALAMON, F. PAPPENBERGER, F. WETTERHALL et J. THIELEN (2012). Operational early warning systems for water-related hazards in Europe. *Environ. Sci. Policy*, 21, 35-49.
- ALHMOUDI, A. et Z. AZIZ (2015). Integrated elements of early warning systems to enhance disaster resilience in the Arab region. *J. Geodesy Geomatics Eng.*, 2 (2), 73-81.
- ALUSA, A. (2003). Scientific contributions to effective early warning in an environmental context. Dans : *Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction*. ZSCHAU, J. et A.N. KÜPPERS (Éditeurs), Springer, Berlin, Allemagne, Chap. 1.4., pp. 27-32.
- ANDERSON, W.A. (1969). Disaster warning and communication processes in two communities. *J. Commun.*, 19 (2), 92-104.
- ARIAS, P.A., J.C. VILLEGAS, J. MACHADO, A.M. SERNA, L.M. VIDAL, C. VIEIRA, C.A. CADAVID, S.C. VIEIRA, J.E. ANGEL, et Ó.A. MEJÍA (2016). Reducing social vulnerability to environmental change: building trust through social collaboration on environmental monitoring. *Weather Clim. Soc.*, 8 (1), 57-66.
- ARNOLD, R.D. et J.P. WADE (2015). A definition of systems thinking: A systems approach. *Procedia Comput. Sci.*, 44, 669-678.
- BARKER, C.H. (2011). A statistical outlook for the deepwater horizon oil spill. Dans : *Monitoring and Modeling the Deepwater Horizon Oil Spill: A Record-Breaking Enterprise*. LIU, Y., A. MACFADYEN, Z.-G. Ji et R.H. WEISBERG (Éditeurs), Geophysical Monograph Series, Vol. 195, American Geophysical Union, Washington DC, États-Unis, pp. 237-244.
- BASHER, R. (2006). Global early warning systems for natural hazards: Systematic and people-centred. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 364 (1845), 2167-2182.
- BAUDOIN, M., S. HENLY-SHEPARD, N. FERNANDO, A. SITATI et Z. ZOMMERS (2014). *Early warning systems and livelihood resilience: Exploring opportunities for community participation*. UNU-EHS Working Paper Series No. 1, United Nations University Institute of Environment and Human Security (UNU-EHS), Bonn, Allemagne, 18 p.
- BAYRAK, T. (2011). Performance evaluation of disaster monitoring systems. *Nat. Hazards*, 58 (3), 1193-1208.
- BEAN, H., B.F. LIU, S. MADDEN, J. SUTTON, M.M. WOOD et D.S. MILETI (2016). Disaster warnings in your pocket: How audiences interpret mobile alerts for an unfamiliar hazard. *J. Contingencies Crisis Manage.*, 24 (3), 136-147.
- BECERRA, S. (2012). Vulnérabilité, risques et environnement : l'itinéraire chaotique d'un paradigme sociologique contemporain. *VertigO - la Revue Électronique en Sciences de l'Environnement*, 12 (1).
- BEHR, Y., J.F. CLINTON, C. CAUZZI, K. JÓNSDÓTTIR, C.G. MARIUS, J. SALICHON et E. SOKOS (2016). The Virtual Seismologist in SeisComp3: A New Implementation Strategy for Earthquake Early Warning Algorithms. *Seismol. Res. Lett.*, 87(2A), 363-373.
- BOUFADEL, M.C. et X. GENG (2014). A new paradigm in oil spill modeling for decision making? *Environ. Res. Lett.*, 9 (8), 81001.
- BOURGAULT, D., F. CYR, D. DUMONT et A. CARTER (2014). Numerical simulations of the spread of floating passive tracer released at the Old Harry prospect. *Environ. Res. Lett.*, 9 (5), 54001.
- BOUWER, L.M., E. PAPYRAKIS, J. POUSSIN, C. FURTSCHHELLER et A.H. THIEKEN (2014). The costing of measures for natural hazard mitigation in Europe. *Nat. Hazards Rev.*, 15 (4), 4014010.
- BOWMAN, K., J. RICE et A. WARNER (2014). The ethics of early warning systems for climate change. Dans : *Reducing Disaster: Early Warning Systems for Climate Change*. SINGH, A. et Z. ZOMMERS (Éditeurs), Springer, Dordrecht, Pays-Bas, pp. 283-304.

- BREKKE, C. et A.H.S. SOLBERG (2005). Oil spill detection by satellite remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, 95 (1), 1-13.
- BRICEÑO, S. (2015). What to expect after Sendai: Looking forward to more effective disaster risk reduction. *Int. J. Disaster Risk Sci.*, 6 (2), 202-204.
- BROOKS, H.E. (2004). Tornado-warning performance in the past and future: A perspective from signal detection theory. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 85 (6), 837-843.
- BUCKLE, P. (2012). Preparedness, warning and evacuation. Dans : *The Routledge Handbook of Hazards and Disaster Risk Reduction*. WISNER, B., J.C. GAILLARD et I. KELMAN (Éditeurs), Routledge, New York, NY, États-Unis, Chap. 41, pp. 493-516.
- BULYCHEVA, E., I. KUZMENKO et V. SIVKOV (2014). Annual sea surface oil pollution of the south-eastern part of the Baltic Sea by satellite data for 2006-2013. *Baltica* 27, 9-14.
- BURNINGHAM, K., J. FIELDING et D. THRUSH (2008). "It'll never happen to me": Understanding public awareness of local flood risk. *Disasters*, 32 (2), 216-238.
- CALVELLO, M., R.N. D'ORSI, L. PICIULLO, N. PAES, M. MAGALHAES et W.A. LACERDA (2015). The Rio de Janeiro early warning system for rainfall-induced landslides: Analysis of performance for the years 2010-2013. *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, 12, 3-15.
- CAMPBELL, D.J. (1990). Community-based strategies for coping with food scarcity: A role in African famine early-warning systems. *GeoJournal*, 20 (3), 231-241.
- CARDONA, O.D., M.K. VAN AALST, J. BIRKMAN, M. FORDHAM, G. MCGREGOR, R. PEREZ, R.S. PULWARTY, E.L.F. SCHIPPER et B.T. SINH (2012). Determinants of risk : Exposure and vulnerability. Dans : *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. FIELD, C.B., V. BARROS, T.F. STOCKER, D. QIN, D.J. DOKKEN, K.L. EBI, M.D. ASTRANDREA, K.J. MACH, G.K. PLATTNER, S.K. ALLEN, M. TIGNOR et P.M. MIDGLEY (Éditeurs), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis, pp. 65-108.
- CAUZZI, C., Y. BEHR, J. CLINTON, L. ELIA et A. ZOLLO (2016). An open-source earthquake early warning display. *Seismol. Res. Lett.* 87, 1-6.
- CHATFIELD, A.T. et U. BRAJAWIDAGDA (2013). Twitter early tsunami warning system: A case study in Indonesia's natural disaster management. *46th Hawaii International Conference on System Sciences*, IEEE Computer Society, 7 au 10 janvier, Wailea, Maui, États-Unis, Compte rendu, pp. 2050-2060.
- CHATFIELD, A.T. et U. BRAJAWIDAGDA (2014). Crowdsourcing hazardous weather reports from citizens via twittersphere under the short warning lead times of EF5 intensity tornado conditions. *47th Hawaii International Conference on System Sciences*, IEEE Computer Society, 6 au 9 janvier, Waikoloa, Hawaï, États-Unis, Compte rendu, pp. 2231-2241.
- CHOO, C.W. (2009). Information use and early warning effectiveness: Perspectives and prospects. *J. Am. Soc. Inf. Sci. Tec.*, 60 (5), 1071-1082.
- CLOUTIER, C., F. AGLIARDI, G.B. CROSTA, P. RATTINI, C. FROESE, M. JABOYEDOFF, J. LOCAT, C. MICHOUUD et H. MARUI (2014). The First International Workshop on warning criteria for active slides: technical issues, problems and solutions for managing early warning systems. *Landslides*, 12 (1), 205-212.
- COOLS, J., D. INNOCENTI et S. O'BRIEN (2016). Lessons from flood early warning systems. *Environ. Sci. Policy*, 58, 117-122.
- COOLS, J., P. VANDERKIMPEN, G. EL AFANDI, A. ABDELKHALEK, S. FOCKEDEY, M. EL SAMMANY, G. ABDALLAH, M. EL BIHERY, W. BAUWENS et M. HUYGENS (2012). An early warning system for flash floods in hyper-arid Egypt. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12 (2), 443-457.
- COUGHLAN DE PEREZ, E., B. VAN DEN HURK, M.K. VAN AALST, B. JONGMAN, T. KLOSE et P. SUAREZ (2015). Forecast-based financing: An approach for catalyzing humanitarian action based on extreme weather and climate forecasts. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15 (4), 895-904.
- CROIX-ROUGE (2009). *World Disasters Report 2009: Focus on Early Warning, Early Action*. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, Genève, Suisse, 204 p.
- CUTTER, S.L. (1996). Vulnerability to environmental hazards. *Prog. Hum. Geogr.*, 20, 529-539.

- CUTTER, S.L. (2006). Moral hazard, social catastrophe: The changing face of vulnerability along the hurricane coasts. *Ann. Am. Acad. Pol. Soc. Sci.*, 604, 102-112.
- DOLAN, A.H. et I.J. WALKER (2003). Understanding vulnerability of coastal communities to climate change related risks. *J. Coastal Res.*, 39, 1317-1342.
- DURAGE, S.W., S.C. WIRASINGHE et J. RUWANPURA (2013). Comparison of the Canadian and US tornado detection and warning systems. *Nat. Hazards*, 66 (1), 117-137.
- EINSTEIN, H.H. et R. SOUSA (2007). Warning systems for natural threats. *Georisk*, 1 (1), 3-20.
- ENTEN, F. (2010). Du bon usage des systèmes d'alerte précoce en régime autoritaire. *Politique Africaine*, 119 (3), 43-62.
- EWART, J. et H. MCLEAN (2015). Ducking for cover in the "blame game": News framing of the findings of two reports into the 2010-11 Queensland floods. *Disasters*, 39 (1), 166-184.
- FAKHRUDDIN, S.H.M. et Y. CHIVAKIDAKARN (2014). A case study for early warning and disaster management in Thailand. *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, 9, 159-180.
- FERRARO, G., O. TRIESCHMANN, M. PERKOVIC et D. TARCHI (2012). Confidence levels in the detection of oil spills from satellite imagery: From research to the operational use. *SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XII*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 26 au 27 septembre, Edinburgh, Royaume-Uni, Compte rendu, pp. 85360G-1- 85360G-11.
- FOSTER, H.D. (1980). *Disaster Planning*. Springer, New York, NY, États-Unis, 276 p.
- FÜSSEL, H.M. et R.J.T. KLEIN (2006). Climate change vulnerability assessments: an evolution of conceptual thinking. *Clim. Change*, 75, 301-329.
- GAILLARD, J.C., E. CLAVÉ, O. VIBERT, D. AZHARI, J.C. DENAIN, Y. EFENDI, D. GRANCHER, C.C. LIAMSON, D.R. SAPI et R. SETIAWAN (2008). Ethnic groups' response to the 26 December 2004 earthquake and tsunami in Aceh, Indonesia. *Nat. Hazards*, 47 (1), 17-38.
- GALLOPÍN, G.C. (2006). Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Glob. Environ. Chang.* 16, 293-303.
- GARCÍA, C. (2012). Concevoir et mettre en place un système d'alerte précoce intégré plus efficace dans les zones de montagnes : une étude de cas en Italie du Nord. *Rev. Géogr. Alpine*, 1(100-1), 1-11.
- GARCIA, C. et C.J. FEARNLEY (2012). Evaluating critical links in early warning systems for natural hazards. *Environ. Hazards*, 11 (2), 123-137.
- GAUTHIER, F., B. HÉTU et N. BERGERON (2012). Analyses statistiques des conditions climatiques propices aux chutes de blocs de glace dans les corridors routiers du nord de la Gaspésie, Québec, Canada. *Can. Geotech. J.*, 49, 1408-1426.
- GHOSH, J.K., D. BHATTACHARYA, N.K. SAMADHIYA et P. BOCCARDO (2012). A generalized geo-hazard warning system. *Nat. Hazards*, 64 (2), 1273-1289.
- GLANTZ, M.H. (2004). GLANTZ, M.H. (2004). *Usable Science 8: Early Warning Systems: Do's and Don'ts: Workshop Report*. Diane Publishing Company, Darby, PA, États-Unis, 77 p.
- GLANTZ, M.H. (2015). The letter and the spirit of the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction (a.k.a. HFA2). *Int. J. Disaster Risk Sci.*, 6 (2), 205-206.
- GLANTZ, M.H. et I. KELMAN (2013). Thoughts on dealing with climate change... as if the future matters. *Int. J. Disaster Risk Sci.*, 4 (1), 1-8.
- GOLNARAGHI, M. (2012). An Overview: Building a global knowledge base of lessons learned from good practices in multi-hazard early warning systems. Dans : *Institutional Partnerships in Multi-Hazard Early Warning Systems*. GOLNARAGHI, M. (Éditeur). Springer, Berlin, Allemagne, Chap. 1, pp. 1-8.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC (2014). *Politique québécoise de sécurité civile 2014-2024*. Ministère de la Sécurité publique, Bibliothèque et Archives nationales du Québec, Québec, Canada, 92 p.
- GRASSO, V.F. (2014). The state of early warning systems. Dans : *Reducing Disaster: Early Warning Systems for Climate Change*. SINGH, A. et Z. ZOMMERS (Éditeurs), Springer, Dordrecht, Pays-Bas, Chap. 6, pp. 109-125.

- GROUPÉ D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT (GIEC) (2012). Summary for policymakers. Dans : *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. FIELD, C.B., V. BARROS, T.F. STOCKER, D. QIN, D.J. DOKKEN, K.L. EBI, M.D. MASTRANDREA, K.J. MACH, G.K. PLATTNER, S.K. ALLEN, M. TIGNOR et P.M. MIDGLEY, (Éditeurs), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis, pp. 65-108.
- GUHA-SAPIR, D., P. HOYOIS et R. BELOW (2016). *Annual Disaster Statistical Review 2015: The Numbers and Trends*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Bruxelles, Belgique, 59 p.
- HAERENS, P., P. CIAVOLA, Ó. FERREIRA, A. VAN DONGEREN, M. VAN KONINGSVELD et A. BOLLE (2012). Online operational early warning system prototypes to forecast coastal storm impact (CEWS). *Coast. Eng. Proc.*, 1 (33).
- HALLEGATE, S. (2012). *A cost effective solution to reduce disaster Losses in developing countries: Hydro-meteorological services, early warning, and evacuation*. World Bank, Policy Research Working Paper 6058, Washington DC, États-Unis, 20 p.
- HANDMER, J. (2000). Are flood warnings futile? Risk communication in emergencies. *Australas. J. Disaster Trauma Stud.*, 2000 (2), 1-14.
- HAQUE, U., M. HASHIZUME, K.N. KOLIVRAS, H.J. OVERGAARD, B. DAS et T. YAMAMOTO (2012). Reduced death rates from cyclones in Bangladesh: What more needs to be done? *B. World Health Organ.*, 90 (2), 150-156.
- HARVILLE, E.W., C.A. TAYLOR, H. TESFAI, X. XIONG et P. BUEKENS (2011). Experience of Hurricane Katrina and reported intimate partner violence. *J. Interpers. Violence*, 26 (4), 833-845.
- HASAN, S.S.U. et S.S.Z. ZAIDI (2012). Flooded economy of Pakistan. *J. Dev. Agr. Econ.*, 4 (13), 331-338.
- HOGARTH, J.R., D. CAMPBELL et J. WANDEL (2014). Assessing human vulnerability to climate change from an evolutionary perspective. Dans : *Reducing Disaster: Early Warning Systems for Climate Change*. SINGH, A. et Z. ZOMMERS (Éditeurs), Springer, Dordrecht, Pays-Bas, pp. 63-87.
- HORN, D.P. (2015). Storm surge warning, mitigation, and adaptation. Dans : *Coastal and Marine Hazards, Risks, and Disasters*. SHRODER, J., J. ELLIS et D. SHERMAN (Éditeurs), Elsevier, Pays-Bas, Chap. 6., pp. 153-180.
- HOU, D., X. GE, P. HUANG, G. ZHANG et H. LOAICIGA (2014). A real-time, dynamic early-warning model based on uncertainty analysis and risk assessment for sudden water pollution accidents. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 21, 8878-8892.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (2015). *World Energy Outlook 2015*. IEA, Paris, France, 8 p.
- IMAMURA, F. (2009). Dissemination of information and evacuation procedures in the 2004-2007 tsunamis, including the 2004 Indian Ocean. *J. Earthq. Tsunami*, 3 (2), 59-65.
- INTRIERI, E., G. GIGLI, N. CASAGLI et F. NADIM (2013). Brief communication "Landslide early warning system: toolbox and general concepts." *Nat. Hazards Earth Sys. Sci.*, 13 (1), 85-90.
- IVSHINA, I.B., M.S. KUYUKINA, A.V. KRIVORUCHKO, A.A. ELKIN, S.O. MAKAROV, C.J. CUNNINGHAM, T.A. PESHKUR, R.M. ATLAS et J.C. PHILP (2015). Oil spill problems and sustainable response strategies through new technologies. *Environ. Sci-Proc. Imp.*, 17 (7), 1201-19.
- JERNELV, A. (2010). The threats from oil spills: Now, then, and in the future. *Ambio*, 39, 353-366.
- JIBIKI, Y., S. KURE, M. KURI et Y. ONO (2016). Analysis of early warning systems: The case of super-typhoon Haiyan. *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, 15, 24-28.
- JIN, D. et J. LIN (2011). Managing tsunamis through early warning systems: A multidisciplinary approach. *Ocean Coastal Manage.*, 54 (2), 189-199.
- JOHNSTON, D., D. PATON, G.L. CRAWFORD, K. RONAN, B. HOUGHTON et P. BÜRGELT (2005). Measuring tsunami preparedness in coastal Washington, United States. *Nat. Hazards*, 2005 (35), 173-184.
- KELLETT, J. et A. CARAVANI (2013). *Financing disaster risk reduction: A 20 year story of international aid*. Global Facility for Disaster Reduction and Recovery, Washington DC, États-Unis, 60 p.
- KELMAN, I. (2015). Climate change and the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction. *Int. J. Disaster Risk Sci.*, 6 (2), 117-127.

- KELMAN, I. et M.H. GLANTZ (2014). Early warning systems defined. Dans : *Reducing Disaster: Early Warning Systems for Climate Change*. SINGH, A. et Z. ZOMMERS (Éditeurs), Springer, Dordrecht, Pays-Bas, pp. 89-108.
- KELMAN, I. et M.H. GLANTZ (2015). Analyzing the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction. *Int. J. Disaster Risk Sci.*, 6 (2), 105-106.
- KOUADIO, J.S. et J. DOUVINET (2015). Les smartphones peuvent-ils aider à une meilleure remontée des données en cas de crue rapide pour améliorer les systèmes d'alerte? *Bull. Soc. Géogr. Liège*, 64, 57-68.
- LANDIS, R.C. (2003). Public communication of early warnings: Role of the government. Dans : *Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction*. ZSCHAU, J. et A.N. KÜPPERS (Éditeurs), Springer, Berlin, Allemagne, Chap. 2.2., pp. 71-72.
- LE DE, L., J.C. GAILLARD et W. FRIESEN (2014). Academics doing participatory disaster research: How participatory is it? *Environ. Hazard.*, 14 (1), 1-15.
- LEIFER, I., W.J. LEHR, D. SIMECEK-BEATTY, E. BRADLEY, R. CLARK, P. DENNISON, Y. HU, S. MATHESON, C.E. JONES', B. HOLT, M. REIF, D.A. ROBERTS, R. SVEJKOVSKY, G. SWAYNE et J. WOZENCRAFT (2012). State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill. *Remote Sens. Environ.*, 124, 185-209.
- LENTON, T.M. (2013). What early warning systems are there for environmental shocks? *Environ. Sci. Policy*, 27, S60-S75.
- LEONARD, G.S., D.M. JOHNSTON, D. PATON, A. CHRISTIANSON, J. BECKER et H. KEYS (2008). Developing effective warning systems: Ongoing research at Ruapehu volcano, New Zealand. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 172 (3-4), 199-215.
- LÉONE, F., J.-P. ASTÉ et E. LEROI (1996). L'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrains : pour une meilleure quantification du risque. *Rev. Geogr. Alpine*, 84 (1), 35-46.
- LIU, J. et S.F. ZHU (2013). Primary studies on the offshore oil spill detection system using the satellite remote sensing technology developed by China National Offshore Oil Corporation. *Appl. Mech. Mater.*, 316-317, 580-585.
- LIU, W., W. HOU et W. ZHANG (2015). Design of safety monitoring and early warning system for buried pipeline crossing fault. *5th International Conference on Civil Engineering and Transportation*, ICCET, 13 au 14 avril, Paris, France, Compte rendu, pp. 317-321.
- MANYENA, S.B. (2012). Disaster and development paradigms: Too close for comfort? *Dev. Policy Rev.*, 30 (3), 327-345.
- MATVEEVA, A. (2006). *Early warning and early response: Conceptual and empirical dilemmas*. Global Partnership for the Prevention of Armed Conflict, European Centre for Conflict Prevention, La Haye, Pays-Bas, 66 p.
- MCADOO, B.G., L. DENGLER, G. PRASETYA et V. TITOV (2006). Smong: How an oral history saved thousands on Indonesia's Simeulue Island during the December 2004 and March 2005 tsunamis. *Earthq. Spectra*, 22 (3), 661-669.
- MCLUCKIE, B.F. (1970). *The warning system in disaster situations: A selective analysis*. Report series 9. University of Delaware Disaster Research Center, Newark, DE, États-Unis, 68 p.
- MCSHARRY, P. (2014). The role of scientific modelling and insurance in providing innovative solutions for managing the risk of natural disasters. Dans : *Reducing Disaster: Early Warning Systems for Climate Change*. SINGH, A. et Z. ZOMMERS (Éditeurs), Springer, Dordrecht, Pays-Bas, Chap. 17, pp. 325-338.
- MEDINA-CETINA, Z. et F. NADIM (2008). Stochastic design of an early warning system. *Georisk*, 2 (4), 223-236.
- MEISSEN, U. (2008). Increasing the effectiveness of early warning via context-aware alerting. *5th International ISCRAM Conference*, ISCRAM, 4 au 7 mai, Washington, DC, États-Unis, Compte rendu, pp. 431-440.
- MERCER, J., I. KELMAN, L. TARANIS et S. SUCHET-PEARSON (2010). Framework for integrating indigenous and scientific knowledge for disaster risk reduction. *Disasters*, 34 (1), 214-239.
- MICHOUD, C., S. BAZIN, L.H. BLIKRA, M.H. DERRON et M. JABOYEDOFF (2013). Experiences from site-specific landslide early warning systems. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13 (10), 2659-2673.

- MILETI, D.S. et J.H. SORENSSEN (1990). *Communication of emergency public warning. A social science perspective and state-of-the-art assessment*. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, États-Unis, 166 p.
- MORONI, D., G. PIERI, O. SALVETTI, M. TAMPUCCI, C. DOMENICI et A. TONACCI (2015). Sensorized buoy for oil spill early detection. *OCEANS 2015 - Genova.*, IEEE Xplore, pp. 1-5.
- MUSTAFA, D., G. GIOLI, S. QAZI, R. WARAICH, A. REHMAN et R. ZAHOOR (2015). Gendering flood early warning systems: The case of Pakistan. *Environ. Hazards*, 14 (4), 318-328.
- NADIRUZZAMAN, M. et D. WRATHALL (2015). Participatory exclusion - Cyclone Sidr and its aftermath. *Geoforum*, 64, 196-204.
- NATIONS UNIES (1989). International decade for natural disaster reduction. *85th Plenary Meeting, UN General Assembly*, 22 décembre, A/RES/44/236, New York, NY, États-Unis, 6 p.
- NEUSSNER, O. (2015). Early warning - Some recent developments. *Planet@Risk*, 3 (1), 24-32.
- OLIVEIRA, C.S., F. MOTA DE SÁ, M. LOPES, M.A. FERREIRA et I. PAIS (2015). Early warning systems: Feasibility and end-users point of view. *Pure Appl. Geophys.*, 172 (9), 2353-2370.
- ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE (OMM) (2010). *Guidelines on early warning systems and application of nowcasting and warning operations*. OMM, Genève, Suisse, 22 p.
- PATÉ-CORNELL, M.E. (1986). Warning systems in risk management. *Risk Anal.*, 6 (2), 223-34.
- PAUL, S.K. (2013). Vulnerability concepts and its application in various fields: a review on geographical perspective. *J. Life Earth Sci.*, 8, 63-81.
- PAUL, S.K. et J.K. ROURAY (2013). An analysis of the causes of non-responses to cyclone warnings and the use of indigenous knowledge for cyclone forecasting in Bangladesh. Dans : *Climate Change and Disaster Risk Management*. LEAL FILHO, W. (Éditeur), Climate Change Management, Springer, Berlin, Allemagne, Chap. 2, pp. 15-39.
- PEYRUSAUBES, D. (2012). La gestion du risque cyclonique à Madagascar : retour sur l'épisode "Giovanna", *Physio-Géo*, 10 (1), 153-169.
- PICOZZI, M., A. EMOLO, C. MARTINO, A. ZOLLO, N. MIRANDA, G. VERDERAME et T. BOXBERGER (2015). Earthquake early warning system for schools: A feasibility study in southern Italy. *Seismol. Res. Lett.*, 86 (2A), 398-412.
- PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR LE DÉVELOPPEMENT (PNUD) (2014). *Pérenniser le progrès humain : réduire les vulnérabilités et renforcer la résilience*. Rapport sur le développement humain 2014, PNUD, New York, NY, États-Unis, 259 p.
- QUENAULT, B. (2015). De Hyōgo à Sendai, la résilience comme impératif d'adaptation aux risques de catastrophe : nouvelle valeur universelle ou gouvernement par la catastrophe ? *Développement Durable et Territoires*, 6 (3), 49-79.
- REIBLE, D.D., C.N. HAAS, J.H. PARDUE et W.J. WALSH (2006). Toxic and contaminant concerns generated by Hurricane Katrina. *J. Environ. Eng.*, 132 (6), 565-566.
- RELF, G., J.M. KENDRA, R.M. SCHWARTZ, D.J. LEATHERS et D.F. LEVIA (2015). Slushflows: science and planning considerations for an expanding hazard. *Nat. Hazards*, 78 (1), 333-354.
- RHEINBERGER, C.M. (2013). Learning from the past: Statistical performance measures for avalanche warning services. *Nat. Hazards*, 65 (3), 1519-1533.
- ROGERS, D. et V. TSIRKUNOV (2011). *Costs and benefits of early warning systems*. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, ISDR, World Bank, Genève, Suisse, 16 p.
- ROHMER, J. et A. LOSCHETTER (2016). Anticipating abrupt shifts in temporal evolution of probability of eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 316, 50-55.
- SAMARASUNDERA, E., A. HANSELL, D. LEIBOVICI, C.J. HORWELL, S. ANAND et C. OPPENHEIMER (2014). Geological hazards: From early warning systems to public health toolkits. *Health Place*, 30, 116-119.
- SAMIMI, C., A.H. FINKB et H. PAETH (2012). The 2007 flood in the Sahel: Causes, characteristics and its presentation in the media and FEWS NET. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 313-325.

- SANTIAGO, J.S.S., W.S. MANUELA, M.L.L. TAN, S.K. SANÉZ et A.Z.U. TONG (2016). Of timelines and timeliness: lessons from Typhoon Haiyan in early disaster response. *Disasters*, 40 (4), 644-667.
- SATRIANO, C., Y.M. WU, A. ZOLLO et H. KANAMORI (2011). Earthquake early warning: Concepts, methods and physical grounds. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 31, 106-118.
- SÄTTELE, M., M. BRÜNDL et D. STRAUB (2012). Classification of warning systems for natural hazards. *10th International Probabilistic Workshop*. 15 au 16 novembre, University of Stuttgart, Stuttgart, Allemagne, Compte rendu, pp. 1-14.
- SÄTTELE, M., M. BRÜNDL et D. STRAUB (2015). Reliability and effectiveness of early warning systems for natural hazards: Concept and application to debris flow warning. *Reliab. Eng. Syst. Safe.*, 142 (7), 192-202.
- SÄTTELE, M., M. BRÜNDL et D. STRAUB (2016). Quantifying the effectiveness of early warning systems for natural hazards. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16 (1), 149-166.
- SAVAGE, E., M. CHRISTIAN, S. SMITH et D. PANNELL (2015). The Canadian Armed Forces medical response to Typhoon Haiyan. *Can. J. Surg.*, 58 (3), S146-S152.
- SCHMIDT, H.S. (2003). Technical requirements for early warning systems. Dans : *Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction*. ZSCHAU, J. et A.N. KÜPPERS (Éditeurs). Springer, Berlin, Allemagne, Chap. 10.1., pp. 817-821.
- SCOLOBIG, A., R. MECHLER, N. KOMENDANTOVA, L. WEI, D. SCHROTER et A. PATT (2014). Co-Production of scientific advice and decision making under uncertainty: Lessons from the 2009 L'Aquila Earthquake, Italy. *Planet@Risk*, 2 (2), 71-76.
- SCOTT, J.C. (2003). Disaster early warning and individuals with special needs: In aggregate, the underserved represent a significant portion of society. Dans : *Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction*. ZSCHAU, J. et A.N. KÜPPERS (Éditeurs). Springer, Berlin, Allemagne, Chap. 2.5., pp. 82-83.
- SEAGER, J. (2014). Disasters are gendered: What's new? Dans : *Reducing Disaster: Early Warning Systems for Climate Change*. SINGH, A. et Z. ZOMMERS (Éditeurs), Springer, Dordrecht, Pays-Bas, Chap. 14, pp. 265-281.
- SÉCURITÉ PUBLIQUE CANADA (2015). Système national d'alertes au public. <http://www.securitepublique.gc.ca/cnt/mrgnc-mngmnt/mrgnc-prprdnss/ntnl-pblc-lrtng-sstm-fr.asp> (consultation le 12 décembre 2016).
- SEIBOLD, E. (2003). Natural disasters and early warning. Dans : *Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction*. ZSCHAU, J. et A.N. KÜPPERS (Éditeurs), Springer, Berlin, Allemagne, pp. 3-10.
- SENE, K. (2016). Forecast Interpretation. Dans : *Hydrometeorology*. SENE, K. (Éditeur). Springer International Publishing, Chap. 7, pp. 209-233.
- SMITH, A.M.S., C.A. KOLDEN, T.B. PAVEGLIO, M.A. COCHRANE, D.M. BOWMAN, M.A. MORITZ, A.D. KLISKEY, L. ALESSA, A.T. HUDAK, C.M. HOFFMAN, J.A. LUTZ, L.P. QUEEN, S.J. GOETZ, P.E. HIGUERA, L. BOSCHETTI, M. FLANNIGAN, K.M. YEDINAK, A.C. WATTS, E.K. STRAND, J.W. VAN WAGTENDONK, J.W. ANDERSON, B.J. STOCKS et J.T. ABATZOGLOU (2016). The Science of Firescapes: Achieving fire-resilient communities. *Bioscience*, 66, 130-146.
- SIMMONS, K.M. et D. SUTTER (2009). False alarms, tornado warnings, and tornado casualties. *Weather Clim. Soc.*, 1 (1), 38-53.
- SIMON, T., A. GOLDBERG et B. ADINI (2015). Socializing in emergencies - A review of the use of social media in emergency situations. *Int. J. Inform. Manage.*, 35 (5), 609-619.
- SLOVIC, P. (1987). Perception of risk. *Science*, 236 (4799), 280-285.
- SOLBERG, A.H.S. (2012). Remote sensing of ocean oil-spill pollution. *Proceedings of the IEEE*, 100 (10), 2931-2945.
- SORENSEN, J.H. (2000). Hazard warning systems: review of 20 years of progress. *Nat. Hazards Rev.*, 1 (2), 119-125.
- SOULÉ, B. (2011). Post-crisis analysis of an ineffective tsunami alert: The case of 27 February 2010 Maule earthquake (Chile). *Disasters*, 38 (2), 375-397.
- SRINIVAS, H. et Y. NAKAGAWA (2008). Environmental implications for disaster preparedness: Lessons learnt from the Indian Ocean tsunami. *J. Environ. Manage.*, 89 (1), 4-13.

- STÄHLI, M., M. SÄTTELE, C. HUGGEL, B. W. MCARDELL, P. LEHMANN, A. VAN HERWIJNEN, A. BERNE, M. SCHLEISS, A. FERRARI, A. KOS, D. OR et S.M. SPRINGMAN (2015). Monitoring and prediction in early warning systems for rapid mass movements. *Nat. Hazards Earth Sys. Sci.*, 15 (4), 905-917.
- STURNY, R.A. et M. BRUNDLE (2014). Bayesian networks for assessing the reliability of a glacier lake warning system in Switzerland. *INTERPRAEVENT International Symposium*, 25 au 28 novembre, Nara, Japon, Compte rendu, 9 p.
- SUH, S.W., H.Y. LEE, H.J. KIM et J.G. FLEMING (2015). An efficient early warning system for typhoon storm surge based on time-varying advisories by coupled ADCIRC and SWAN. *Ocean Dynam.*, 65 (5), 617-646.
- SURJAN, A., S. KUDO et J.I. UITTO (2016). Risk and vulnerability. Dans: *Sustainable Development and Disaster Risk Reduction*. UITTO, J.I. et R. SHAW (Éditeurs). Springer, Japon, Chap. 3, pp. 37-55.
- SYNOLAKIS, C.E., E. OKAL et E. BERNARD (2005). The Megatsunami of December 26, 2004. *The Bridge, Natl. Acad. Eng.*, 35(2), 26-35.
- SZLAFSZTEIN, C. et H. STERR (2007). A GIS-based vulnerability assessment of coastal natural hazards, state of Pará, Brazil. *J. Coast. Conserv.*, 11, 53-66.
- TATHAM, P., R. OLORUNTOBA et K. SPENS (2012). Cyclone preparedness and response: An analysis of lessons identified using an adapted military planning framework. *Disasters*, 36 (1), 54-82.
- THOMPSON, M. et I. GAVIRIA (2004). *Cuba: Weathering the storm: Lessons in risk reduction from Cuba*. Oxfam America, Boston, MA, États-Unis, 64 p.
- TOZIER DE LA POTERIE, A., et M.A. BAUDOIN (2015). From Yokohama to Sendai: Approaches to participation in international disaster risk reduction frameworks. *Int. J. Disaster Risk Sci.*, 6 (2), 128-139.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM (UNEP) (2012). *Early warning systems: State-of-art analysis and future directions*. DEWA, UNEP, Nairobi, Kenya, 63 p.
- UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (UNISDR) (2006a). Développement de système d'alerte précoce: une liste de contrôle. *EWC III, Troisième conférence internationale sur les systèmes d'alerte précoce*. UNISDR, 27 au 29 mars, Bonn, Allemagne, 10 p.
- UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (UNISDR) (2006b). *Global survey of early warning systems*. UNISDR, Genève, Suisse, 46 p.
- UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (UNISDR) (2009). *Terminologie pour la prévention des risques de catastrophe*. UNISDR, Genève, Suisse, 34 p.
- UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (UNISDR) (2015). *Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe 2015-2030*. UNISDR, Genève, Suisse, 35 p.
- VILLAGRAN DE LÉON, J.C., I. PRUESSEN et H. BREEDLOVE (2013). *Alert and warning framework in the context of early warning systems. A comparative review*. UNU-EHS, Intersections, Vol. 12, 87 p.
- VILLAGRAN DE LEÓN, J.C., J. BOGARDI, S. DANNENMANN et R. BASHER (2006). Early warning systems in the context of disaster risk management. *Entwicklung & Ländlicher Raum*, 2, 23-25.
- WAHLSTRÖM, M. (2015). New Sendai framework strengthens focus on reducing disaster risk. *Int. J. Disaster Risk Sci.*, 6 (2), 200-201.
- WAIDYANATHA, N. (2010). Towards a typology of integrated functional early warning systems. *Int. J. Crit. Infr.*, 6 (1), 31-51.
- WALKER, P. (1989). *Famine Early Warning Systems: Victims and Destitution*. Earthscan Publications, London, Grande-Bretagne, 196 p.
- WANG, Y., W. ZHANG, B.A. ENGEL, H. PENG, L. THELLER, Y. SHI et S. HU (2015). A fast mobile early warning system for water quality emergency risk in ungauged river basins. *Environ. Model. Softw.*, 73, 76-89.
- WHITE, G.F. (1945). *Human adjustment to floods. A geographical approach to the flood protection problem in the United States*. University of Chicago, Chicago, IL, États-Unis, 225 p.

- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO) (2006). *Social aspects and stakeholder involvement in integrated flood management*. WMO, Associated Programme on Flood Management, Genève, Suisse, 80 p.
- WISNER, B., P. BLAIKIE, T. CANNON et I. DAVIS (2004). *At risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters*. Routledge, New York, NY, États-Unis, 496 p.
- WISNER, B. et J. UITTO (2009). Life on the edge: Urban social vulnerability and decentralized, citizen-based disaster risk reduction in four large cities of the Pacific rim. Dans: *Facing Global Environmental Change*. Springer-Verlag, Berlin, Allemagne, Chap. 13, pp. 215-231.
- YANG SI-ZHONG, S.Z., H.J. JIN, S.P. YU, Y.C. CHEN, J.Q. HAO et Z.Y. ZHAI (2010). Environmental hazards and contingency plans along the proposed China-Russia oil pipeline route, Northeastern China. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 64 (3), 271-278.
- ZIA, A. et C.H. WAGNER (2015). Mainstreaming early warning systems in development and planning processes: Multilevel implementation of Sendai framework in Indus and Sahel. *Int. J. Disaster Risk Sci.*, 6 (2), 189-199.
- ZILLMAN, J.W. (2003). Meteorological and hydrological early warning systems. Dans: *Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction*. ZSCHAU, J. et A.N. KÜPPERS (Éditeurs). Springer, Berlin, Allemagne, Chap. 4.2., pp. 135-164.
- ZOMMERS, Z. (2012). *Climate early warning system feasibility report: Early warning systems and hazard prediction*. United Nations Environment Programme (UNEP), University of Oxford, 60 p.
- ZOMMERS, Z. (2014). "Follow the spiders": Ecosystems as early warnings. Dans : *Reducing Disaster: Early Warning Systems for Climate Change*. SINGH, A. et Z. ZOMMERS (Éditeurs), Springer, Dordrecht, Pays-Bas, Chap. 18, pp. 339-353.
- ZOMMERS, Z. et A. SINGH (2014). Introduction. Dans : *Reducing Disaster: Early Warning Systems for Climate Change*. SINGH, A. et Z. ZOMMERS (Éditeurs), Springer, Dordrecht, Pays-Bas, Chap. 1, pp. 1-19.
- ZSCHAU, J. et A.N. KUPPERS (2003). *Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction*. Springer, Berlin, Allemagne, 834 p.