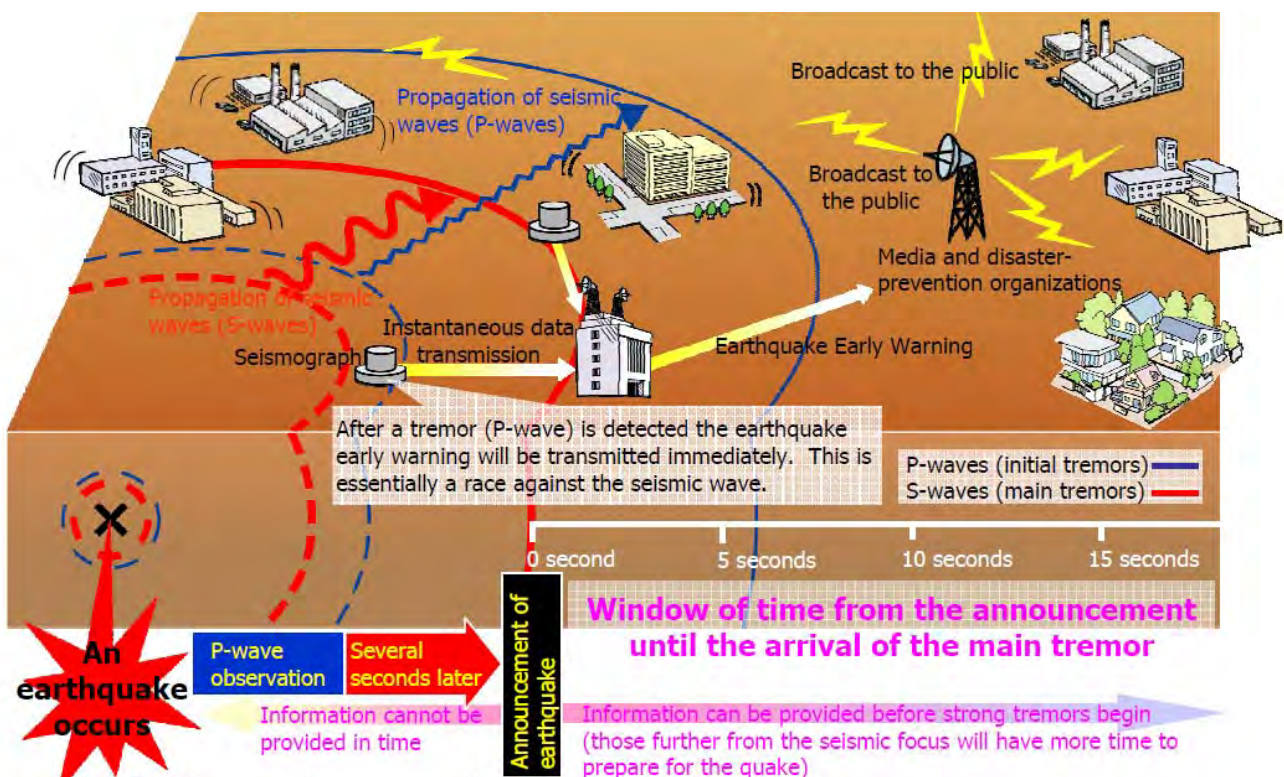


Potentiel de systèmes de monitoring et d'alerte précoce en cas de séisme pour les infrastructures en Suisse



Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement

RÉSONANCE Ingénieurs-Consells SA

21 rue Jacques Grosselin
CH - 1227 CAROUGE (Genève)

Tél. +41 22 301 02 53
Fax +41 22 301 02 70
E-mail resonance@resonance.ch

Carouge, le 22 mai 2014

RT 414/CL/MK

Résumé

Le bureau Résonance Ingénieurs-Conseils SA de Carouge a été mandaté par la centrale de coordination pour la mitigation des séismes de l'Office fédéral de l'environnement pour réaliser une étude concernant le potentiel des systèmes de monitoring et d'alerte précoce en cas de séisme pour les infrastructures en Suisse. Ces systèmes ont pour objectif d'enregistrer les mouvements du sol et/ou d'une structure en cas de séisme ou de donner une alerte précoce peu avant l'arrivée des ondes destructrices d'un séisme.

Le chapitre 2 du présent rapport décrit les principes de fonctionnement des différents systèmes d'alerte précoce et de monitoring sismique, ainsi que leurs avantages et contraintes. Le chapitre 3, quant à lui, présente l'état de la pratique actuelle, sur le plan mondial, tant en matière de recherche qu'en ce qui concerne les systèmes opérationnels. Enfin, le chapitre 3.3 dresse un bilan de l'état actuel de la pratique en Suisse, au niveau du service sismologique suisse (SED), des centrales nucléaires, des barrages, des infrastructures de transports et de la distribution de gaz.

D'une manière générale, le délai pour une alerte précoce est typiquement égal à une à deux secondes en Suisse, ce qui est en général trop court pour prendre des mesures. De ce fait, les systèmes d'alerte précoce apportent peu d'intérêt, sauf pour initier des processus critiques automatiques avant l'arrivée de l'onde destructrice, tels que l'initiation de la chute des barres de combustibles dans le domaine du nucléaire ou par exemple la fermeture automatique de vannes dans la distribution de gaz. Par contre, une alerte dite "rapide", à l'aide d'une carte des mouvements du sol, quelques minutes après un séisme, pourrait être utile, particulièrement pour les chemins de fer, mais également, dans une moindre mesure, pour les axes routiers principaux, afin d'éviter de rouler trop vite dans les zones de dégâts potentiels, ou d'entrer dans des zones potentiellement fortement touchées.

D'autre part, il vaudrait la peine d'approfondir les connaissances dans le domaine du risque lié aux tsunamis lacustres et d'étudier la mise en place d'éventuels systèmes d'alerte en cas de potentiel éboulement latéral ou de glissement sous-lacustre, qui pourrait provoquer un tsunami important.

En ce qui concerne les infrastructures en Suisse, des mesures de prévention, sur le plan de la construction et de l'organisation, apportent, sans aucun doute, un bénéfice nettement plus important que les systèmes d'alerte. En revanche, dans plusieurs domaines, les systèmes de monitoring, avec enregistrement des mouvements du sol, auraient, après un séisme, beaucoup de retombées bénéfiques. De tels enregistrements permettraient d'affiner significativement notre connaissance de la vulnérabilité des différents systèmes d'infrastructures ; ils permettraient de comparer le comportement réel lors d'un séisme avec ce qui aurait été attendu par calcul. Cependant une étude coût-bénéfice serait encore nécessaire pour définir l'utilité de tels systèmes dans une zone de sismicité faible à modérée comme la Suisse.

Zusammenfassung

Im Auftrag der Koordinationsstelle für Erdbebenvorsorge des Bundesamts für Umwelt hat das Büro Résonance Ingénieurs-Conseils SA in Carouge eine Studie durchgeführt, um das Potential von Frühwarnungs- und Monitoringsystemen im Falle eines Erdbebens für Infrastruktursysteme in der Schweiz auszuloten. Die Zielsetzung solcher Systeme besteht darin, die Bewegungen des Bodens und/oder einer Struktur im Falle eines Erdbebens zu messen oder eine Frühwarnung zu geben kurz bevor die zerstörerischen Wellen eines Erdbebens eintreffen.

Im Kapitel 2 dieses Berichtes werden die Funktionsweise der unterschiedlichen Frühwarn- und Monitoringsysteme sowie deren Vor- und Nachteile erläutert. Der aktuelle Stand der Technik weltweit wird in Kapitel 3 aufgezeigt, sowohl im Bereich der Forschung als auch der operationellen Systeme. Unter Punkt 3.3 wird der aktuelle Stand in der Schweiz präsentiert, beim Schweizerischen Erdbebendienst (SED), bei den Kernkraftwerken, den Talsperren, der Transportinfrastruktur und der Gasversorgung.

Im Allgemeinen würde die Vorwarnzeit in der Schweiz nur gerade ein bis zwei Sekunden betragen, was generell zu kurz ist, um Massnahmen zu ergreifen. Somit erbringen Frühwarnsysteme kaum einen Nutzen, ausser um kritische automatische Prozesse zu initiieren, wie etwa das Auslösen des Falls von Brennstäben im nuklearen Bereich oder die automatische Schliessung von Schiebern im Bereich der Gasversorgung. Eine "Schnellwarnung", aufgrund von Erschütterungskarten einige Minuten nach dem Erdbeben, könnte hingegen sinnvoll sein, vor allem für den Schienenverkehr, jedoch auch, in geringerem Ausmass, für den Strassenverkehr, um zu verhindern, dass im potentiellen Schadensraum zu schnell gefahren oder in potentiell stark beschädigte Zonen hineingefahren wird.

Des Weiteren wäre es sinnvoll, die Kenntnisse im Bereich des Risikos von Seesunamis zu vertiefen und den Einsatz von Warnsystemen im Falle von potentiellen Abbrüchen oder von Untersee-Rutschungen zu untersuchen, die zu einem gefährlich starken Seesunami führen könnten.

In Bezug auf die Infrastrukturen in der Schweiz, bringen bauliche und organisatorische präventive Massnahmen weit mehr als Warnsysteme. Hingegen könnten Monitoringsysteme mit Aufnahme der Bodenbewegungen für verschiedene Infrastruktursysteme interessant sein. Solche Aufnahmen würden es erlauben unsere Kenntnisse über die Verletzbarkeit der verschiedenen Infrastruktursysteme stark zu verbessern, da sie einen Vergleich ermöglichen zwischen dem reellen Verhalten während eines Erdbebens und dem, was gemäss Berechnungen zu erwarten gewesen wäre. Allerdings wäre eine Kosten-Nutzen-Analyse notwendig, um die Zweckmässigkeit solcher Systeme in Zonen mit geringer bis mittlerer Erdbebengefährdung wie die Schweiz abzuklären.

Table des matières

1. Introduction.....	5
2. Principes de base et méthodologie	5
2.1 Monitoring sismique	6
2.2 Systèmes d'alerte locaux ("on site").....	7
2.3 Systèmes d'alerte régionaux ou nationaux	8
2.4 Systèmes "hybrides"	10
2.5 Instrumentation	10
3. Review de la pratique actuelle	13
3.1 Etat de la recherche scientifique	13
3.1.1 Principaux axes de recherche	13
3.1.2 Projets de recherche actuels	16
3.2 Situation actuelle à l'international.....	17
3.2.1 Japon.....	18
3.2.2 Mexique.....	19
3.2.3 Turquie.....	21
3.2.4 France	22
3.2.5 Italie.....	25
3.3 Situation actuelle en Suisse	25
3.3.1 Réseau national du Service sismologique suisse (SED).....	25
3.3.2 Système d'alerte précoce pour la distribution de gaz à Bâle.....	29
3.3.3 Monitoring sismique des centrales nucléaires	30
3.3.4 Monitoring sismique des barrages.....	31
3.3.5 Infrastructures de transports.....	32
3.4 Questions sur le plan juridique.....	32
4. Analyse du potentiel des systèmes d'alerte précoce et de monitoring pour les infrastructures en Suisse.....	33
4.1 Délais d'alerte attendus en Suisse	33
4.2 Centres informatiques.....	34
4.3 Distribution d'énergie	35
4.3.1 Énergie électrique	35
4.3.2 Gaz.....	35
4.4 Eau.....	35
4.4.1 Eau potable	35
4.4.2 Eaux usées.....	36
4.5 Systèmes de transport	36
4.5.1 Chemins de fer.....	36
4.5.2 Routes.....	38
4.5.3 Aviation.....	39
4.5.4 Navigation.....	40
4.6 Télécommunication	40
5. Tsunamis lacustres.....	41
6. Conclusions	43

7. Littérature45

1. Introduction

Dans le cadre du programme de mesures de la Confédération pour la mitigation des séismes, le bureau Résonance Ingénieurs-Conseils SA de Carouge a été mandaté par le Département de la Prévention des Dangers de l'OFEV pour réaliser une étude concernant le potentiel des systèmes de monitoring et d'alerte sismique précoce pour les infrastructures en Suisse. Après une présentation des principes de base et méthodologiques, cette étude comprend deux parties principales :

- Review de la pratique actuelle en Suisse et à l'international. Cette partie se base, d'une part, sur une revue de la littérature internationale en la matière et, d'autre part, sur des interviews ciblées en Suisse.
- Analyse du potentiel des systèmes de monitoring et alerte précoce dans les secteurs énergie, eau, transports et communication. Cette analyse porte en particulier sur l'intérêt de systèmes de mise en arrêt rapide d'installations en vue de limiter les dégâts ; l'estimation rapide des dégâts potentiels aux infrastructures ; l'amélioration des connaissances concernant le comportement sismique des éléments d'infrastructures ; l'évacuation de personnes. Des recommandations et / ou propositions d'études d'approfondissement sont également données.

2. Principes de base et méthodologie

Les systèmes dits d'alerte précoce ont pour objectif de donner une alerte précoce, quelques secondes à dizaines de secondes avant l'arrivée des ondes destructrices. Les systèmes les plus simples se limitent au déclenchement d'une telle alerte et n'enregistrent pas les mouvements sismiques, ce qui permet de maintenir leur coût relativement bas.

Même une alerte seulement quelques secondes ou dizaines de secondes avant le mouvement fort a un potentiel important de réduction du nombre de blessés ou de la quantité de dégâts secondaires. Les objectifs sont en particulier : protection rapide des personnes (abris sous une table, évacuations, arrêts et ouverture d'ascenseurs à l'étage le plus proche, etc.), mise en sécurité d'installations industrielles et / ou potentiellement dangereuses (fuites chimiques, etc.), arrêt de circulation (automobiles, trains, aéroports, etc.), alerte des services de secours et hôpitaux, mise en route de groupes électrogènes de secours, arrêts de réacteurs nucléaires, etc.

Les systèmes plus complets, habituellement dénommés systèmes de monitoring sismique, enregistrent les mouvements sismiques. Ils peuvent, ou non, être dotés de la capacité de déclencher une alerte précoce. Dans la version la plus complète, ils ont pour objectif :

- de déclencher une alerte précoce ;
- d'analyser rapidement la situation probable des dégâts, par exemple en élaborant, à l'échelle d'une agglomération, des cartes des mouvements du sol ("shake maps"), afin d'aiguiller les premiers secours quelques minutes seulement après le séisme ;

- de documenter les mouvements du sol pour un contrôle ultérieur des structures ou à des fins de recherche (par exemple recalcul de structures pour les mouvements du sol effectivement subis et comparaison des résultats de calcul avec les dégâts réellement constatés).

La majorité de ces systèmes sont basés sur l'enregistrement du mouvement sismique à l'aide d'instruments de types accélérométriques ou vélocimétriques.

Les principaux types de systèmes développés et utilisés actuellement sont présentés de manière succincte dans les chapitres suivants.

2.1 Monitoring sismique

Le monitoring sismique consiste en l'installation de capteurs permanents ayant pour but d'enregistrer le mouvement, en cas de séisme, soit du sol, soit d'une structure (bâtiment, pont, barrage, etc.), ou les deux à la fois.

L'objectif principal est de pouvoir analyser, après le séisme, le comportement de la structure en question. Pour ne citer qu'un exemple – mais ils sont nombreux à travers le monde – suite au séisme de l'Aquila en Italie, un système de monitoring sans fil a été installé sur un bâtiment en béton armé, afin d'analyser la réponse de la structure durant les répliques sismiques (Picozzi et al., 2010). Une telle étude permet, par exemple, de caractériser l'état d'endommagement de la structure ainsi que son évolution durant les répliques suivant le choc principal.

Un système de monitoring permet aussi éventuellement de pouvoir estimer l'importance des dégâts immédiatement après un séisme et de prendre les mesures nécessaires en fonction (gestion des équipes de secours, arrêt d'une installation, intervention d'une équipe spécialisée, arrêt de la circulation, etc.). De tels systèmes sont installés et testés en de nombreux endroits dans le monde. Murià Vila et al. (2010) présentent le cas d'un immeuble de 18 étages équipé d'un système de monitoring, à Mexico (Figure 2.1). Il s'agit d'un système automatique d'alerte structurale qui envoie un rapport préliminaire sur l'état de la structure et les données principales du séisme, dans les minutes qui suivent l'événement. Un tel système apporte une aide sur l'évaluation et la maintenance du bâtiment concerné, ainsi qu'une aide à la décision (évacuation ou réparation du bâtiment).

Enfin, certains systèmes de monitoring sismique sont couplés directement à une installation de réglage en temps réel, par exemple d'amortisseurs qui ont pour rôle d'atténuer le mouvement sismique de la structure et de diminuer les déplacements relatifs. Des algorithmes spécifiques sont proposés pour le contrôle semi-actif de ces appareils, comme proposé par exemple par De Luliis et al., 2010. De même, Maddaloni et al. (2010) proposent un contrôle semi-actif à l'aide d'amortisseurs magnéto-rhéologiques permettant de limiter les effets d'un séisme sur la base de l'intensité prédite par un système alerte précoce. Une étude de cas est proposée sur un pont en Californie du sud. Une autre application envisagée est celle du contrôle du trafic routier, en cas de séisme, sur un pont comme le pont suspendu sur le Bosphore à Istanbul (Aktas et al., 2010).

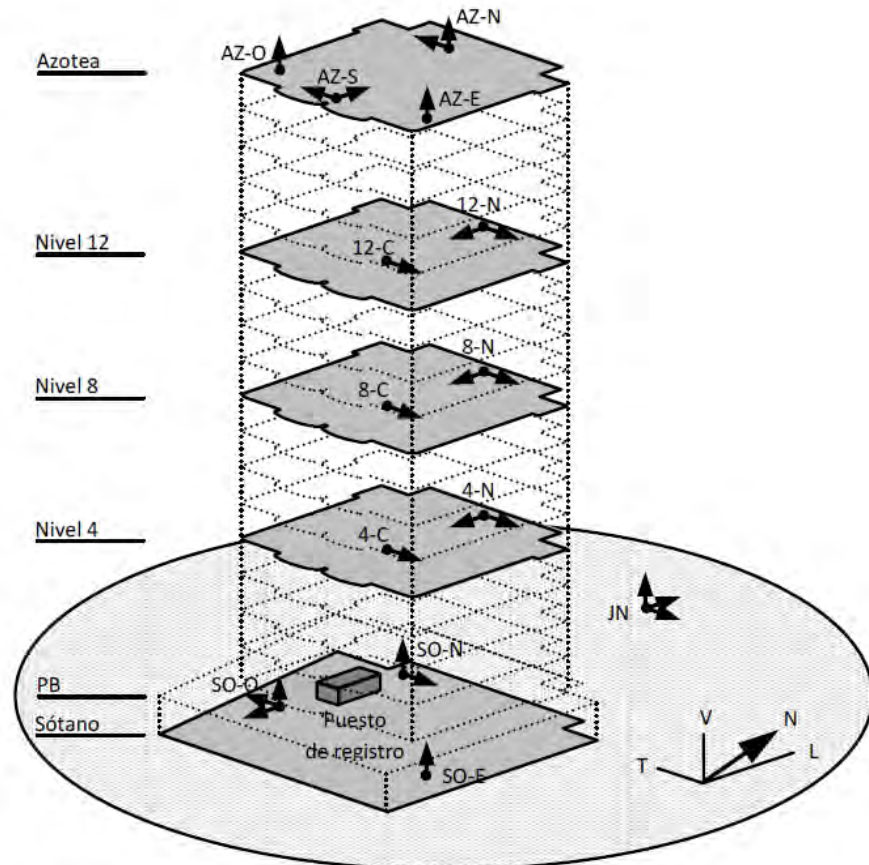


Figure 2.1 : Exemple de monitoring sismique d'un bâtiment de 18 étages à Mexico, à l'aide de capteurs accélérométriques placés en différents points de la structure (Murià Vila et al., 2010).

2.2 Systèmes d'alerte locaux ("on site")

Il s'agit de systèmes d'alerte précoce dédiés à des cibles spécifiques. Le principe de ces systèmes est essentiellement basé sur les éléments suivants :

- une onde P et une onde S sont créées lors de la rupture de la faille à l'origine du séisme ;
- dans le rocher, la vitesse de propagation de l'onde P est plus élevée, de l'ordre d'un facteur de 1.5 environ, que celle de l'onde S ;
- ce n'est que l'onde S qui provoque l'essentiel des dégâts, alors que l'onde P est relativement peu énergétique.

Théoriquement, un seul appareil dit "on-site", c'est-à-dire à proximité du site à protéger, suffirait pour déclencher une alarme précoce. Cependant, afin de pouvoir mieux éviter les fausses alarmes, deux ou trois appareils sont normalement utilisés, et l'alerte n'est donnée que si au moins deux appareils atteignent le seuil d'alerte.

L'approche la plus simple, et toutefois robuste, est de combiner l'amplitude de l'onde P avec une information fréquentielle : si une forte amplitude est associée à un contenu basses fréquences, donc une forte magnitude, alors une alerte doit

être donnée. Un certain nombre de méthodes plus avancées ont également été proposées par différents auteurs. D'une manière générale, ce type de système d'alerte on-site donne un délai de quelques secondes, maximum, avant l'arrivée du mouvement fort (différence entre les vitesses des ondes P et S, moins le temps de calcul et d'activation de l'alerte), la station qui déclenche l'alerte se trouvant à proximité de la cible à protéger. Ce type de système est utilisé ou proposé pour de nombreux cas concrets : mise à l'arrêt automatique d'installations industrielles et/ou potentiellement dangereuses, protection rapide de personnes (s'abriter sous une table), arrêt de trains rapides, activation de feux de circulation, arrêt et ouverture d'ascenseurs à l'étage le plus proche, mise en sécurité d'installations sensibles, etc.

2.3 Systèmes d'alerte régionaux ou nationaux

Les systèmes d'alerte régionaux (ou nationaux) sont basés sur un réseau sismologique de grande envergure, réparti sur le territoire d'une région, souvent d'un pays, avec même une collaboration au-delà des frontières avec les pays voisins. Le principe de ces systèmes est basé sur le fait que les ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière, donc infiniment plus vite que les ondes sismiques. En détectant un séisme le plus près possible de la source, il est donc possible d'alerter les secteurs à protéger par transmission radio, donc de tirer profit du temps de propagation des ondes sismiques, en plus de la seule différence du temps de propagation entre l'onde P et l'onde S. Donc, ces systèmes permettent de pouvoir bénéficier de temps d'alertes plus longs par rapport aux systèmes "on-site". Dans le cas de fortes magnitudes ($M > 6.5$), cette approche peut permettre une alerte des dizaines de secondes avant le mouvement fort dans les régions qui seront soumises à des dégâts.

En revanche, il y aura, pour tout système d'alerte précoce, une zone "aveugle" autour de l'épicentre, dans laquelle aucune alerte ne sera possible. Ceci est dû au temps trop court entre l'arrivée des ondes et le temps nécessaire à la transmission, l'analyse des données et l'envoi de l'alerte.

Le type de détection, à chaque station, d'un système régional est similaire à ceux utilisés sur les systèmes "on-site", avec la détection des ondes P permettant une alerte rapide. Cependant, ces réseaux permettent de combiner les données reçues à plusieurs stations. Ceci apporte une plus grande précision sur la prédiction de la distribution du mouvement sismique dans la région affectée, avec une estimation de la position de l'épicentre et de la magnitude.

La figure 2.2, extraite d'une brochure destinée au public, "About Earthquake Early Warning", Japan Meteorological Agency (2006), montre les grandes lignes du principe des systèmes d'alerte précoce régionaux, telles que décrites plus haut. Il s'agit, en quelque sorte, d'une course entre la propagation des ondes sismiques et le temps nécessaire à l'analyse des données et à la transmission de l'alerte. Le délai d'alerte est composé de la somme des intervalles de temps suivants : le temps de propagation des ondes P aux n stations les plus proches (n = nombre minimum de stations nécessaires pour établir une alerte), la durée d'enregistrement utilisée, l'envoi des données au centre de calcul, la durée de traitement des signaux (localisation, estimation magnitude, etc.), le temps d'envoi de l'alerte (Figure 2.3). Il apparaît ainsi clairement que, dans le cadre de systèmes d'alerte régionaux, la densité du réseau est un facteur primordial d'augmentation du temps disponible entre l'alerte et les mouvements sismiques. En particulier, si des zones sismogènes

sont identifiées comme source potentielle de séismes destructeurs, il est important que le réseau comporte des stations proches de ces zones.

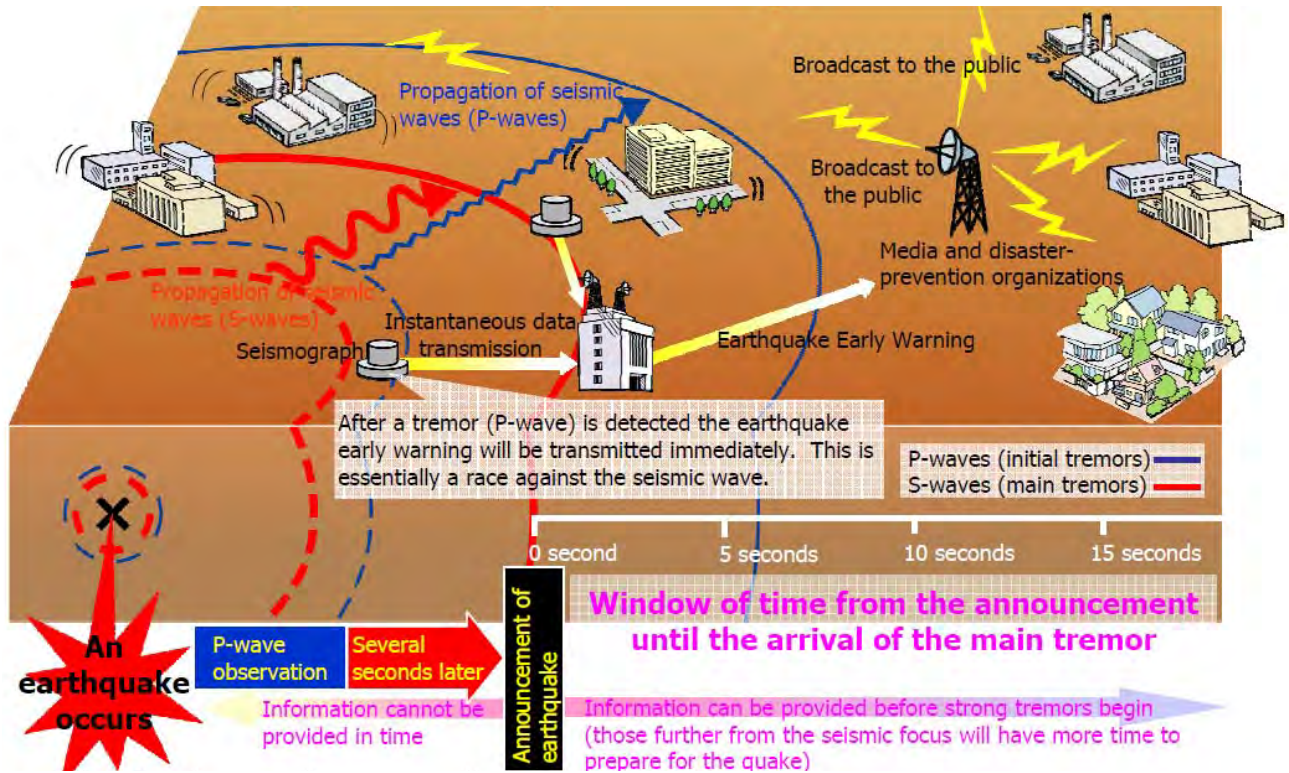


Figure 2.2 : Schéma extrait d'une brochure destinée au public, "About Earthquake Early Warning", Japan Meteorological Agency (2006), montrant les grandes lignes du principe des systèmes alerte précoce régionaux.

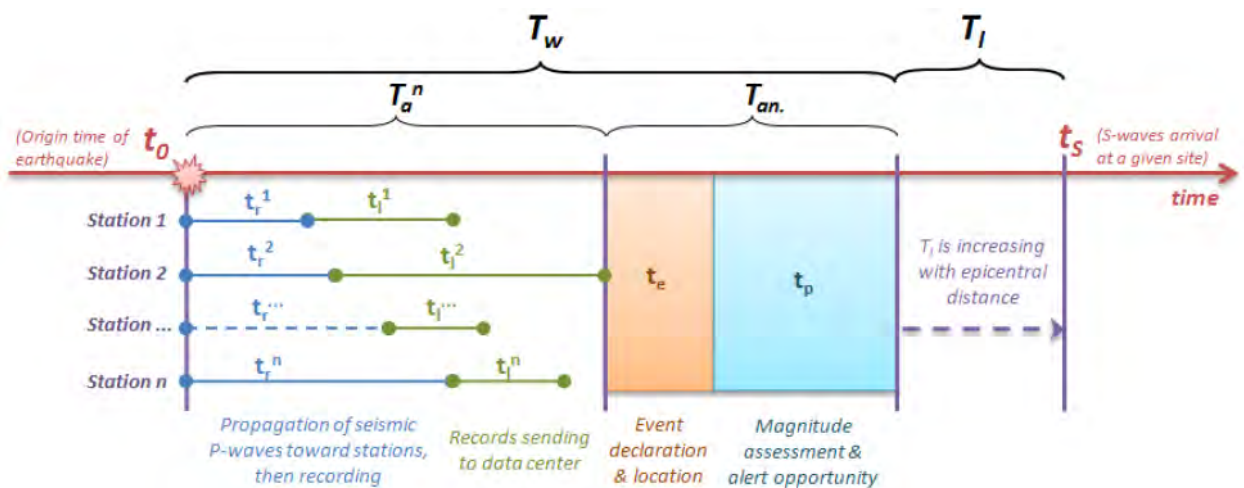


Figure 2.3 : Différentes composantes du temps d'alerte (Auclair et al., 2012).

2.4 Systèmes "hybrides"

Les systèmes dits hybrides fonctionnent comme des systèmes on-site à station unique lorsqu'une seule station a détecté le séisme, puis comme des systèmes régionaux dès que des enregistrements sont disponibles sur plusieurs stations. Ce type de fonctionnement peut avoir l'avantage d'émettre quand même des alertes locales près des stations situées à l'intérieur de la zone "aveugle", à proximité de l'épicentre, tout en gardant la possibilité d'émettre une alerte ciblée vers des zones plus éloignées de dégâts à venir, dès que plusieurs stations ont détecté et analysé les données du séisme.

Ce type de système est en grande évolution actuellement et sera probablement le système privilégié dans les années à venir. Par exemple, Colombelli et al. (2012) présentent une approche intégrant à la fois les systèmes d'alerte précoce régionaux et on-site pour la définition de niveaux d'alerte et l'estimation de la zone de dommages potentiels. A chaque station, les 3 premières secondes de l'onde P sont analysées pour déterminer un niveau d'alerte (fonctionnement de type on-site). En parallèle, un réseau de stations régional fournit la localisation de l'événement et transmet l'information des niveaux d'alerte enregistrés près de la source à des sites plus éloignés, avant l'arrivée de la phase la plus destructive du séisme (système régional). Cette approche a été l'objet d'un test de performances, sur un ensemble de données japonaises, qui a conduit à de très bons résultats quant à la cartographie des dégâts dans les premières secondes après le séisme.

2.5 Instrumentation

La mise en place d'un système d'alerte précoce régional nécessite de disposer d'un réseau sismologique dense, moderne et performant. Beaucoup de pays ne disposent pas d'un tel réseau et doivent donc tout d'abord développer et / ou moderniser leur réseau existant. Cela représente un budget assez conséquent, d'autant plus qu'il est préférable que le réseau soit homogène et conçu dès le départ pour une utilisation en alerte précoce. Actuellement, de tels systèmes sont développés par le milieu scientifique, les instituts en charge des réseaux sismologiques. Au niveau du matériel à proprement parler, de nombreux fournisseurs d'instruments peuvent proposer du matériel répondant aux exigences spécifiques des systèmes d'alerte précoce régionaux.

En Suisse, par exemple, la société GeoSIG propose différents systèmes, qui sont destinés essentiellement à un objectif de réponse rapide lors d'un séisme, plutôt que d'alerte précoce à proprement parler. Des exemples d'applications concrètes de ces systèmes ont pu être installés dans la ville d'Istanbul, la région de San Francisco East Bay et dans le cadre d'un projet d'extraction de gaz et pétrole à Sakhalin. Après le tsunami survenu en Asie du Sud-Est en 2004, GeoSIG a rédigé une note technique dans laquelle est décrit un système d'alerte précoce générique, indiquant en détail toutes les caractéristiques spécifiques nécessaires à chaque niveau du système (GeoSIG, 2005). La figure 2.4 présente un tel système générique.

Dans le domaine des systèmes d'alerte on-site, la situation est assez différente. En effet, alors que les systèmes régionaux sont encore peu développés sur le plan opérationnel, les systèmes on-site sont nettement plus utilisés du fait de leur facilité d'installation et d'utilisation. De nombreuses sociétés se sont ainsi lancées dans la fabrication et la commercialisation de tels systèmes, avec une grande hétérogénéité concernant le sérieux porté à leur conception, selon l'étude menée par

Auclair (2012). Deux sociétés se distinguent nettement par leur sérieux en la matière : il s'agit de la société japonaise System and Data Research (SDR) et de la société allemande Secty Electronics, qui s'appuient toutes deux sur des partenariats avec des organismes de recherche scientifique reconnus (Auclair, 2012).

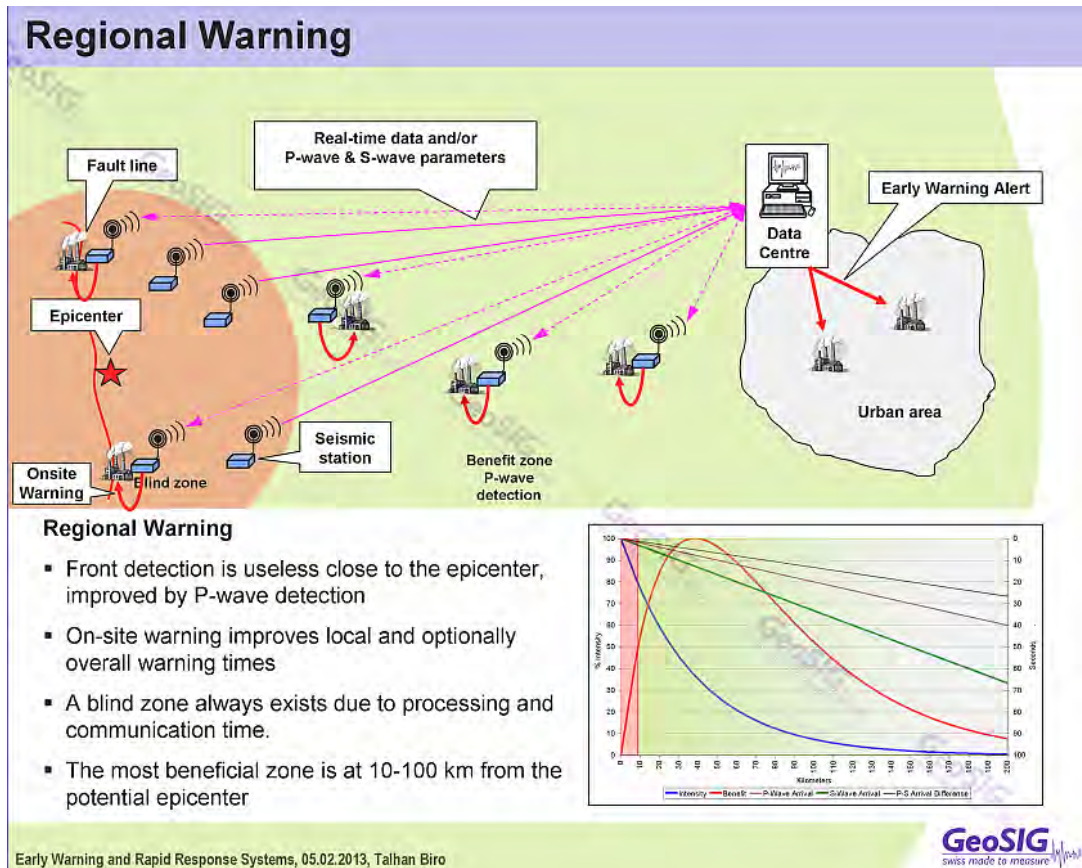


Figure 2.4 : Schéma de fonctionnement d'un système d'alerte précoce régional et de réponse rapide, générique (GeoSIG, 2013).

En particulier, la société SDR (System and Data Research) est connue pour être à l'origine du premier système d'alerte précoce on-site au monde (Nakamura, 1988). Depuis, différents modèles sont largement utilisés au Japon de manière opérationnelle dans de nombreux domaines. Avec plus de 20 ans d'expérience, les systèmes d'alerte précoce on-site de SDR ont pu montrer leur efficacité lors de nombreux séismes destructeurs (Auclair, 2012). Un modèle particulièrement intéressant, développé par la société SDR, est le système d'alerte précoce portable, destiné aux équipes de secours (Figure 2.5). En cas de réplique, le système permet d'alerter chacun des membres de l'équipe d'intervention sur site, équipés de récepteurs spécifiques.

La deuxième société réputée sérieuse en matière de systèmes alerte précoce on-site est la société allemande Secty Electronics, travaillant en étroite collaboration avec le GFZ (GeoForschungsZentrum, Potsdam). Cette société, plus récente et moins connue que SDR, a développé un système d'alerte ainsi que toute une gamme de services complémentaires permettant la diffusion et l'utilisation automatique de l'alerte (fermetures de réseau de gaz, arrêt d'ascenseurs, etc.). En

particulier, c'est le matériel de cette société qui a été mis en place à Bâle, justement dans le cadre d'un système automatisé de fermeture des vannes d'approvisionnement du réseau de distribution de gaz, en cas de fort séisme. Ce système est décrit dans le chapitre 3.3.2.

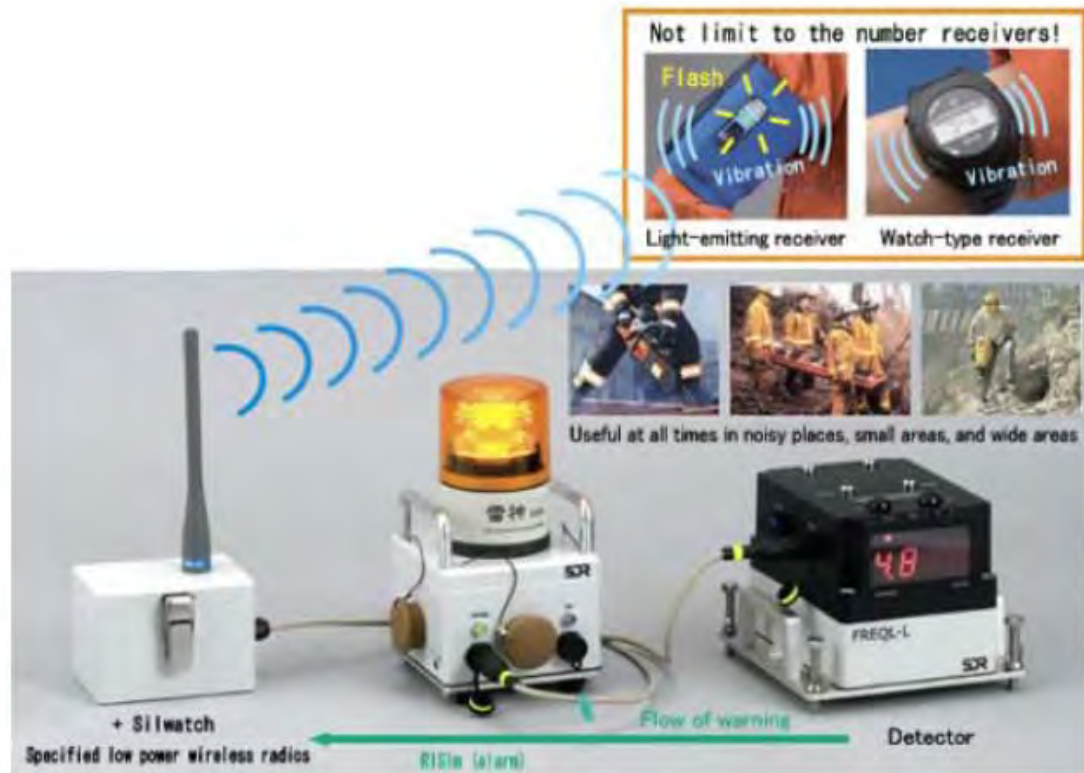


Figure 2.5 : Système d'alerte précoce portable, destiné aux équipes de secours, FREQL-light (source : http://222.146.3.80/english/disaster_09.html), développé par la société SDR.

Dans un registre assez différent de l'instrumentation dédiée aux systèmes d'alerte précoce, Wyss (2012) et Wyss et al. (2013) proposent la mise en place "d'Unités de Protection Sismique" (Earthquake Protection Units, EPU), en tant que système de défense passive, complémentaire à l'alerte sismique en elle-même. Il s'agit, en quelque sorte, d'unités résistantes aux séismes, qui devraient être construites dans chaque bâtiment, dans lesquelles les gens pourraient se réfugier en cas d'alerte sismique. On peut toutefois se demander s'il n'est pas plus raisonnable de concevoir directement l'ensemble du bâtiment de manière à ce qu'il ne s'effondre pas. En effet, même pour les bâtiments existants nécessitant un renforcement, la mise en place de telles unités de protection engendrerait sûrement des coûts importants.

Enfin, même si la plupart des systèmes d'alerte précoce sont basés sur des réseaux de stations sismologiques, certaines études proposent d'utiliser également les réseaux de GPS. En effet, Crowell et al. (2009) décrivent un système prototype testé en Californie du Sud. Ce système utilisant une méthode de positionnement instantané, détermine les principales composantes de la déformation au sein du réseau, envoie des alertes par e-mail si un niveau de déformation limite est

dépassé, estime la position du séisme, et des relations sont en cours de développement pour une estimation de la magnitude (Crowell et al., 2009). Il serait possible de développer dans le futur des systèmes couplés sismomètres et GPS. Les faiblesses d'un système peuvent être compensées par les atouts de l'autre et vice versa. Par exemple, le GPS a comme point faible un faible taux d'échantillonnage et du bruit haute fréquence, par contre il permet une meilleure mesure (car directe) du déplacement.

3. Review de la pratique actuelle

Cela fait un peu plus d'une vingtaine d'années que l'instrumentation et les méthodes nécessaires aux différents systèmes d'alerte précoce ont commencé à être concrètement développées. En particulier, les travaux de Nakamura (1988) au Japon et Espinosa-Aranda (1995) au Mexique ont ouvert la voie à un axe de recherche et de développement en constant essor depuis. C'est essentiellement ces dix dernières années, avec le développement et la modernisation des réseaux sismologiques, que de nombreux systèmes d'alerte précoce ont pu être développés et testés dans le monde. Il serait impossible, dans le cadre de la présente étude, de vouloir en dresser un panorama complet. Les publications de synthèse proposées par Erdik (2006) et Allen et al. (2009) donnent un aperçu général de la situation. Les chapitres suivants s'attachent à développer, au travers de différents exemples, la situation actuelle de la recherche, ainsi que l'état d'avancement des systèmes mis en place à travers le monde et en Suisse.

3.1 Etat de la recherche scientifique

De très nombreux travaux de recherche sont menés à travers le monde dans les multiples domaines qui concernent les systèmes d'alerte précoce. Il n'est de loin pas possible de dresser une liste complète et détaillée de tous ces travaux, dans le cadre de la présente étude. Ce chapitre s'attache donc à mentionner les principaux axes de recherche ainsi que de présenter quelques exemples de projets de recherche en cours.

3.1.1 Principaux axes de recherche

La localisation rapide des séismes constitue un axe de recherche déjà bien avancé et il existe aujourd'hui des méthodes évolutives (localisation raffinée au fur et à mesure des stations qui déclenchent) bien au point. Seul le cas des très gros séismes peut encore poser des problèmes car l'approximation de source ponctuelle, normalement utilisée par ce type de systèmes, n'est plus valable.

En ce qui concerne la détermination rapide de la magnitude, de nombreuses méthodes sont développées au moyen de relations empiriques reliant la magnitude à quelques indicateurs calculés dès les premières secondes du mouvement sismique (premières secondes de l'onde P, puis onde S pour affiner la détermination de la magnitude). D'autres paramètres sont utilisés tels que des paramètres fréquentiels et d'amplitude. Plus de détails à ce sujet peuvent être trouvés dans la synthèse proposée par Allen et al. (2009).

Dans le cadre des alertes sismiques on-site, la situation est plus simple car il n'est pas nécessaire de déterminer la localisation et la magnitude précise, pour se

concentrer sur une estimation de l'agression sismique à venir. Au départ, cette évaluation se faisait uniquement sur l'amplitude des premières secondes de l'onde P, pour déterminer une valeur maximale type PGA, PGV ou PGD. Aujourd'hui, la tendance est de combiner un indicateur d'amplitude avec un indicateur fréquentiel, de manière à implicitement prendre en compte la magnitude. Les systèmes on-site évoluent assez peu aujourd'hui.

Le principal développement observé est celui des systèmes hybrides, combinant une approche on-site au sein d'un réseau d'alerte précoce régional. C'est, par exemple, ce que proposent Zollo et al. (2010) dans le cas de l'Italie, avec une méthode hybride permettant à la fois de définir très rapidement un niveau d'alerte à chaque station et d'évaluer la zone probable d'étendue des dégâts.

Un important développement actuel se base également sur l'utilisation de capteurs accélérométriques de type MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), très bon marché, empruntés à l'industrie de la téléphonie, de l'informatique ou de l'automobile. Ces capteurs permettent d'envisager l'approche d'alerte précoce on-site à un usage individuel. Le projet SOSEWIN se base également sur l'utilisation de tels capteurs pour développer des systèmes très bon marché (voir chapitre 3.2.4 et Fleming et al., 2009). En parallèle à ce développement technologique de capteurs à bas coûts, des améliorations sont également recherchées dans le domaine des communications, de manière à les rendre plus flexibles, en raison de la multiplication du nombre de capteurs.

Iervolino (2011) présente une synthèse des travaux menés avec son équipe en illustrant une possible approche basée sur la performance pour la conception de systèmes d'alerte précoce appliqués au domaine des structures. De nombreux points de recherche sont encore en cours dans l'exploration d'une possible interaction entre early-warning et contrôle structural automatisé. Sur le plan sismologique, Iervolino (2011) a montré que ce sont les équations pour la prédiction des mouvements du sol qui sont la plus grande source d'incertitude pour la prédiction du mouvement sismique en un site, par rapport à la détermination en temps réel des paramètres de source tels que magnitude et localisation. La figure 3.1 montre un exemple de cartographie des délais d'alerte et des actions possibles correspondantes, pour la région de Campania (Italie du Sud). Iervolino (2011) souligne qu'il est important de tenir compte des différentes incertitudes lors de la configuration des systèmes d'alerte précoce.

L'aspect des critères d'émission des alertes est aussi un objet de développement constant. Il s'agit d'un domaine qui fait appel, de plus en plus, aux sciences sociales et économiques. Il s'agit, en effet, d'explicitier la notion d'acceptabilité de l'alerte, des fausses alertes et des alertes manquées, par une éducation des utilisateurs finaux. D'autre part, si la démarche de développement des systèmes d'alerte précoce est partie du milieu scientifique, la tendance actuelle est d'impliquer de plus en plus et de plus en plus tôt les utilisateurs finaux au stade de la conception des systèmes, afin de mieux intégrer leurs besoins. Il est même de plus en plus fréquent que les utilisateurs s'approprient le concept et le développement des systèmes d'alerte précoce.

Parmi les différentes approches développées récemment, ou encore en cours de développement, on peut citer la méthode ElarmS, élaborée et testée en Californie puis au Japon (Allen et al., 2009), pour associer les déclenchements avec les événements détectés, localiser les événements, calculer leur magnitude et prédire

la distribution du mouvement du sol en utilisant des équations de prédiction des mouvements du sol et des correction de site.

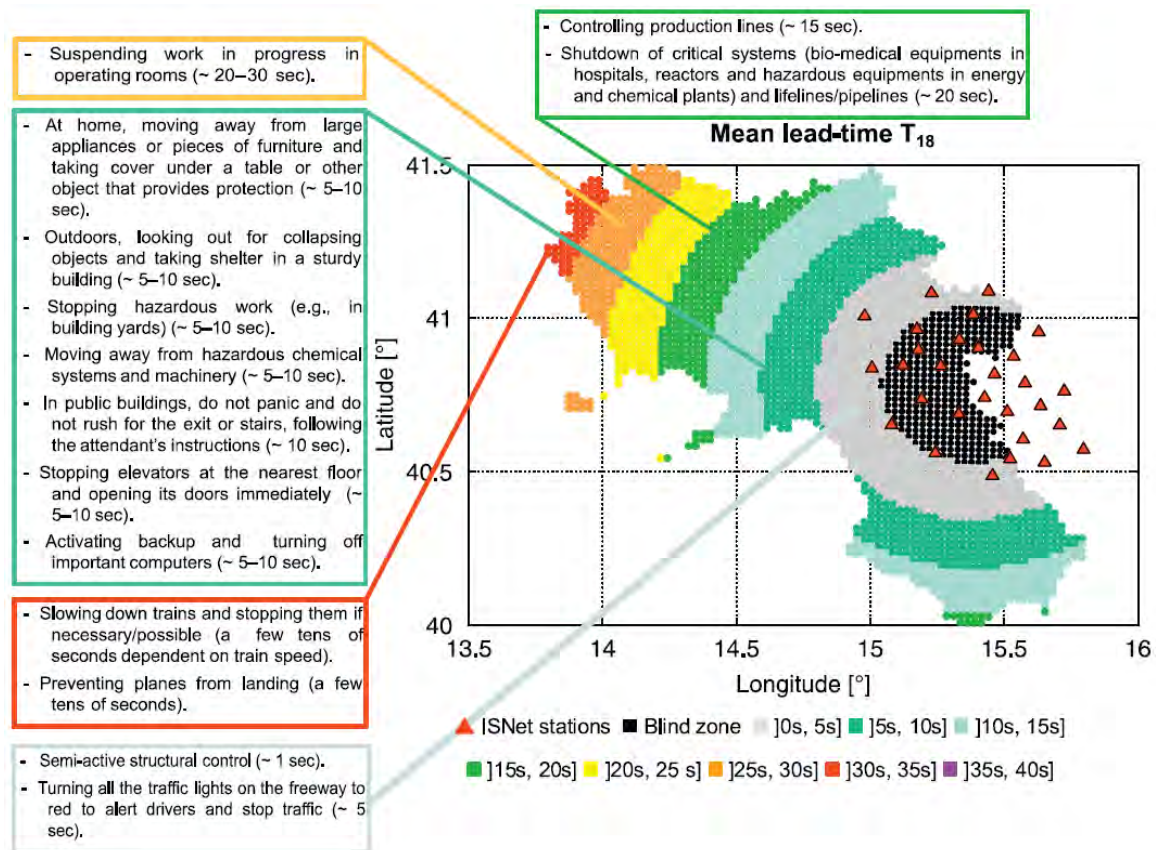


Figure 3.1 : Carte du réseau d'alerte précoce et exemple du délai d'alerte moyen dans la région de Campania (Italie du Sud), avec indications des actions correspondantes pouvant être entreprises (Iervolino, 2011).

Une autre approche est la méthode Virtual Seismologist (Cua et al., 2009), testée en Californie ainsi qu'en Suisse, par le Service sismologique suisse (SED). Cette méthode utilise les pics d'accélération, vitesse et déplacement chaque seconde pour détecter, localiser et estimer la magnitude des séismes. Une approche Bayésienne utilisant des priors, tels que sismicité passée et relation Gutenberg-Richter, est employée pour prédire la probabilité d'une certaine magnitude et position de source. Virtual Seismologist a également développé un schéma sophistiqué de filtrage des faux événements. Le SED travaille actuellement de manière approfondie au développement et à l'amélioration de ces algorithmes.

Une approche probabiliste évolutive d'alerte précoce est également développée et testée en Italie du Sud. Il s'agit du système Presto qui utilise les temps d'arrivée des ondes P ainsi que les informations des stations qui n'ont pas encore déclenché pour identifier en 3D la région dans laquelle pourrait se trouver l'origine du séisme. L'amplitude basse fréquence de l'onde P et de l'onde S sont utilisées pour estimer la magnitude.

Le système PreSEIS est une approche basée sur les réseaux neuronaux utilisant l'amplitude et le temps d'arrivée des ondes P à une puis plusieurs stations pour déterminer la position, la magnitude et les mouvements du séisme. Ce système est testé à Istanbul et en Californie du Sud.

Finalement, le système SOSEWIN (Fleming et al., 2009) est en développement et tests en temps réel à Istanbul (voir chapitre 3.2.3). Il diffère des systèmes précédents par le fait qu'il n'a pas de centre de traitement central des données du réseau. Chaque station combine un capteur, un logiciel de traitement sur site et un système de communication sans fil vers les stations adjacentes. Ensuite, les stations communiquent entre elles et partagent l'information nécessaire à déclencher une éventuelle alerte.

3.1.2 Programmes de recherche actuels

De nombreux projets de recherche, nationaux ou internationaux, ont été menés ces dernières années ou sont actuellement en cours dans le domaine des systèmes d'alerte précoce. Les principaux d'entre eux, parmi ceux menés essentiellement en Europe, sont mentionnés ci-dessous.

En Europe, c'est le projet SAFER (2006-2009) qui a été le premier projet scientifique de grande échelle consacré à ce sujet (www.saferproject.net). De nombreuses avancées ont été faites dans ce cadre ; en particulier, des applications ont pu être réalisées dans les villes d'Athènes, Bucarest, Le Caire, Istanbul et Naples. Dans la continuité du projet SAFER, c'est actuellement le projet REAKT qui est en cours (2011-2014, www.reaktproject.eu). L'objectif est l'amélioration des outils et méthode de mitigation du risque sismique en temps-réel. Le SED est partenaire de ce projet avec plusieurs axes de recherche, en particulier une meilleure caractérisation de la source sismique (différente d'une source ponctuelle) ou la limitation des fausses alertes (pour le domaine du nucléaire par exemple). De nombreux utilisateurs finaux sont impliqués dans ce projet (sites industriels, systèmes de transports, écoles, hôpitaux, centrales nucléaires, etc.) ce qui assure une connexion constante entre le développement et l'utilisateur (voir par exemple Gasparini et al., 2012).

Le projet SISPyR (www.sispyr.eu, 2009-2012), quant à lui, est un projet franco-espagnol dont l'objectif était, en particulier, d'évaluer la faisabilité d'un système d'alerte précoce Pyrénéen (Auclair et al., 2012-a et Auclair et al., 2012-b, voir chapitre 3.2.5 pour plus de détails). De même, le projet ALERT-ES a pour objectif d'étudier la faisabilité d'un système d'alerte précoce pour le Sud de l'Espagne. Le projet germano-turc EDIM (www.cedim.de/EDIM.php) a eu pour objectif le développement du système alerte précoce existant à Istanbul pour l'étendre à la région de Marmara, ainsi que d'améliorer la qualité de l'alerte précoce. En particulier, c'est dans le cadre de ce projet, conjointement avec le projet SAFER, que le système SOSEWIN a été développé (voir chapitre 3.2.3).

Enfin, toujours dans le cadre européen, mentionnons le projet allemand EEWS-transport (2007-2010) visant à développer et tester un système d'alerte précoce pour les infrastructures de transport terrestre (www.EEWS-transport.de).

Il est à noter ici que, dans le cadre des travaux de recherche en matière de systèmes alerte précoce, la Suisse, au travers des équipes travaillant au SED, est particulièrement active et apporte une contribution significative sur le plan

international, bien qu'étant un pays à sismicité modérée. Le SED, avec plusieurs équipes de chercheurs et étudiants en thèse est, ou a été, engagé depuis de nombreuses années dans les programmes de recherche internationaux tels que CISN EEW, SAFER, REAKT, NERA (Clinton et al., 2012). Les algorithmes ainsi développés et leurs améliorations sont testés en Californie et en Suisse. Des systèmes prototypes sont actuellement mis en place dans les centrales nucléaires suisses, dans le cadre de tests et information aux utilisateurs potentiels de ces installations. La figure 3.2 présente les différentes composantes du temps d'alerte et leurs valeurs pour différentes configurations de réseau et algorithmes implémentés, dans le cas de la Suisse (Clinton et al., 2012).

	Travel time from epicenter to n seismic stations	Transmission time for all data to datacenter	Time to process data and get locations	Time to estimate magnitude	Time to send alerts	Total
OT	T_{seis} ÷ algorithm and network density (and distance from eq. sources)	T_{com} ÷ datalogger, communication and acquisition software (network quality and robustness)	T_{loc} ÷ algorithm	T_{mag} ÷ algorithm	T_{alert} ÷ alert software and project specific	
CISN, Switz., EW/VS	3 s – 8 s (4 stns)	2 s - 11 s	< 1 s	~ 3 s	~ 1 s with UD	10 s – 22 s
Switz., SC3	5 s – 10 s (6 stns)	2 s - 4 s	< 1 s	> 40 s (M_L)	N/A	> 40 s
Switz., SC3 & VS → REAKT	3 s – 8 s (6 stns with optimised density)	2 s - 4s	< 1 s	~ 3 s (M_{VS})	~ 1 s with UD	10 s – 17 s

Figure 3.2 : Différentes composantes du temps d'alerte et leurs valeurs pour différentes configurations de réseau et algorithmes implémentés (Clinton et al., 2012).

Enfin, le SED a récemment fait partie d'un groupe d'experts international pour réaliser une étude visant à étudier la faisabilité et recommander la stratégie d'implémentation adéquate pour un système d'alerte précoce en Israël (Allen et al., 2012). Cette étude, très complète et très concrète, va en particulier jusqu'à l'estimation du budget correspondant.

3.2 Situation actuelle au niveau international

En 2009, seulement cinq pays étaient dotés de systèmes d'alerte précoce régionaux opérationnels fournissant de manière effective une alerte à des utilisateurs

(Figure 3.3, Allen et al., 2009). Outre le Japon et le Mexique faisant figure de modèle dans le domaine, il s'agit de Taiwan, la Roumanie et la Turquie.

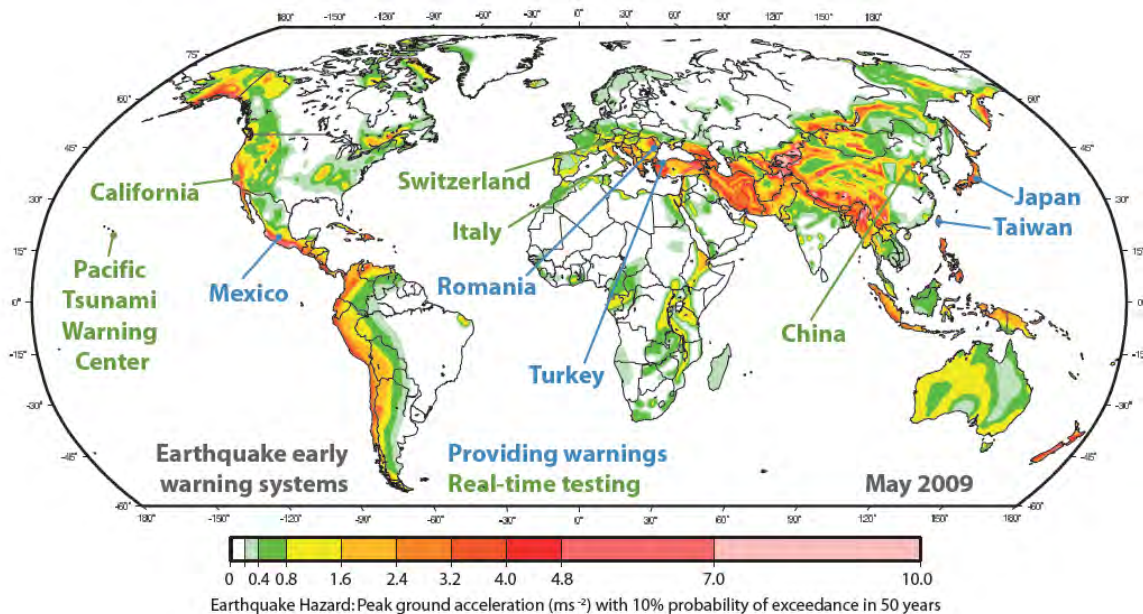


Figure 3.3 : Carte de l'aléa sismique mondial montrant les pays dotés d'un système d'alerte précoce régional opérationnel, délivrant des alertes à un ou plusieurs utilisateurs (en bleu) et ceux dans lesquels des systèmes d'alerte précoce sont en phase de test (en vert). Etat de la situation en 2009 (Allen et al., 2009).

Actuellement, il existe, à travers le monde, une grande quantité d'exemples de systèmes de monitoring ou d'alerte précoce, on-site ou régional, en phase de test ou opérationnels, avec différents objectifs et des méthodes assez variées. Les systèmes d'alerte précoce on-site sont nettement plus répandus que les systèmes régionaux, du fait de leur facilité d'installation et d'utilisation (Auclair, 2012).

Il est impossible, dans le cadre de la présente étude, d'analyser et de présenter tous ces systèmes de manière exhaustive. Cependant, les chapitres suivants essaient d'illustrer la variété des systèmes existants, ou en phase de test, à travers des exemples pris dans différents pays, avec différents contextes sismiques et économiques, dont les pays les plus avancés en la matière, mais également des pays à sismicité modérée.

3.2.1 Japon

Le Japon est certainement le pays le plus avancé en matière d'alerte précoce, sur le plan mondial, tant au niveau de la recherche qu'au niveau opérationnel. Les chemins de fer japonais utilisaient déjà des sismomètres d'alerte dans les années 60, et dès 1982, un système d'alerte précoce à détection frontale permettait de stopper les trains à grande vitesse (Allen et al., 2009). La Japan Meteorological Agency (JMA) a largement densifié, depuis 2005, son réseau de stations sismologiques et a commencé à tester des systèmes régionaux d'alerte précoce

dès 2004. Actuellement, le système opérationnel d'alerte sismique publique se base sur un réseau composé d'environ 1000 stations, réparties avec un espacement constant de 20 km, sur tout le territoire.

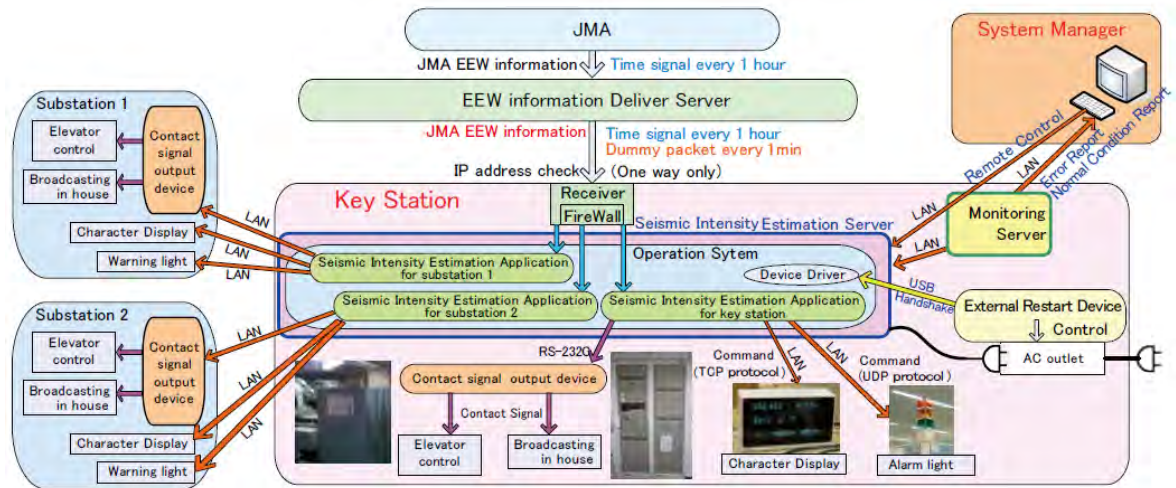


Figure 3.4 : Schéma général de fonctionnement d'un système d'alerte précoce au Japon (Nasu et al., 2010).

La JMA a commencé à envoyer des messages d'alerte effectifs à un nombre limité d'utilisateurs en 2006. En parallèle, elle a mené une très vaste campagne d'information pour éduquer et préparer le public qui a commencé à recevoir des messages d'alerte en 2007 (Allen et al., 2009). Les messages d'alerte sont diffusés par de nombreux moyens : TV, radio, haut-parleurs reliés à un système de communication rapide par satellite, téléphones portables, internet, lignes téléphoniques dédiées, etc., en 2009, on estimait à 21 millions le nombre de personnes pouvant recevoir des alertes sismiques (Kamigaichi et al., 2009).

Le système d'alerte national de la JMA est en constant développement et des travaux de recherche réguliers permettent d'améliorer ses performances. Par exemple, Nasu et al. (2010) ont souligné différents points d'amélioration possibles, tels que les erreurs importantes d'estimation de l'intensité, la maintenance d'un fonctionnement sans faille 24h/24h, la diffusion d'un message d'alerte approprié, etc. Différentes améliorations ont ainsi pu être implémentées dans les systèmes d'alerte précoce on-site ayant fait leurs preuves à plusieurs reprises depuis. La figure 3.4 présente un schéma général de fonctionnement du système qui a pu être testé pour différents types de cibles : une entreprise de construction (pour la sécurité des ouvriers sur chantier), pour l'arrêt des ascenseurs dans un hôtel, un centre commercial, un bâtiment de bureaux, pour un centre de diffusion d'information, etc.

3.2.2 Mexique

Le système d'alerte sismique précoce du Mexique a été développé suite au séisme de 1985 ayant fait 10'000 morts et 30'000 blessés. En 1991, le système a commencé à diffuser des alertes à un petit groupe d'utilisateurs dont 25 écoles et le métro (arrêt des rames à la station la plus proche et blocage des portes en position

ouverte), tandis qu'en 1993 SASMEX est devenu le premier système au monde à diffuser des alertes sismiques publiques (Espinosa-Arando et al., 1995).

La situation à Mexico city est très particulière : la ville se trouve à environ 400 km de la zone épiscopale qui génère de forts séismes et les effets de sites considérables à Mexico city sont responsables de mouvements destructeurs encore à une telle distance. Ainsi, la mise en place d'un système d'alerte précoce permet de diffuser des alertes 40 à 60 secondes avant l'arrivée des ondes S, ce qui est considérable par rapport à la majorité des situations dans le monde, où l'alerte est possible seulement de quelques secondes à quelques dizaines de secondes avant les ondes destructrices. Ainsi, la situation à Mexico city doit être considérée comme une exception dans ce sens.

La figure 3.5 présente un diagramme de fonctionnement du système d'alerte sismique mexicain. Depuis sa création, celui-ci a évolué et été modernisé, en particulier en intégrant un système de transmission par radio au moyen de puissants émetteurs VHF (Espinosa-Arando et al., 2009). Actuellement, le système informe les écoles via des récepteurs radio dédiés, tandis que le public est alerté au moyen des stations commerciales de radio et de TV, par fax, SMS, Internet, haut-parleurs puissants installés dans les lieux publics ainsi qu'au moyen de récepteurs radio spécifiques.

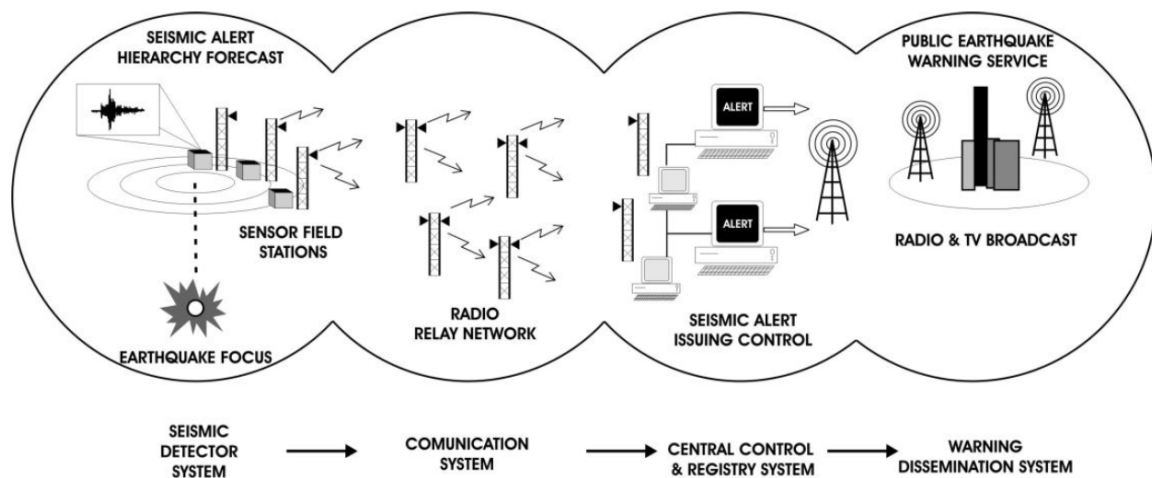


Figure 3.5 : Diagramme de fonctionnement du système d'alerte sismique de Mexico (Espinosa-Arando et al., 2012).

Le système SASMEX est également utilisé pour déclencher des procédures d'enregistrement de monitoring structural pour identifier des dommages potentiels sur des bâtiments instrumentés (Espinosa-Arando et al., 2012).

Suárez et al. (2009) ont mené une évaluation de la performance du système d'alerte mexicain. Cette étude a permis de soulever plusieurs points qui posent actuellement problème dans le fonctionnement du système. L'algorithme utilisé pour estimer la magnitude n'est pas assez précis pour permettre de délivrer deux niveaux d'alerte différents (actuellement alertes dites préventive et publique). Le réseau de stations devrait être complété car il ne couvre pas tous les segments

potentiellement sismogènes de la zone de subduction. Enfin, le nombre d'utilisateurs finaux du système d'alerte est particulièrement bas alors que le potentiel est très élevé. Ce phénomène n'est pas dû à un manque de matériel ou de moyens, Suárez et al. (2009) l'expliquent par un manque total de plan d'intégration du système, d'éducation de la population et d'identification des utilisateurs potentiels. Cet exemple montre que, malgré des performances techniques satisfaisantes, un système d'alerte précoce n'a que peu d'intérêt et d'impact sans une campagne approfondie de sensibilisation et d'information de la population et une stratégie complète d'intégration et d'accompagnement de sa mise en œuvre par les autorités.

3.2.3 Turquie

C'est suite à deux séismes de magnitude supérieure ou égale à 7, sur la faille Nord anatolienne, en 1999, que la décision a été prise de mettre en place un système d'alerte précoce à Istanbul. Deux systèmes ciblés ont été installés, pour un haut immeuble de bureaux et pour une station électrique (Allen et al., 2009). De plus, un système a été installé pour l'ensemble de la ville dans un but d'alerte précoce et de réponse rapide. Une centaine d'instruments a été installée à travers la ville, afin de produire automatiquement une carte du mouvement du sol et d'estimation des dégâts, en cas de séisme. Dix stations accélérométriques sont placées le plus près possible de la faille de Marmara, pour un objectif d'alerte précoce en cas de séisme sur cette faille (Erdik, 2006).

En raison essentiellement du coût des instruments, les réseaux d'alerte précoce régionaux fonctionnent avec un nombre limité de station. Le projet SOSEWIN (Self-Organizing Seismic Early Warning Information Network) constitue une nouvelle approche ayant pour but de fournir à une large communauté un système "low-cost" basé sur les technologies de communication modernes sans fil (Figure 3.6).

Ce système, actuellement en phase de mise au point et test à Istanbul, a les caractéristiques suivantes :

- Chaque unité de mesure ("Sensing Node", SN) est faite à partir de composants "low-cost" (de type MEMS), ce qui ramène son coût à seulement quelques centaines d'euros, contrairement aux milliers ou dizaines de milliers d'euros des stations sismologiques classiques.
- Chaque unité de mesure (SN) inclut le traitement on-site des données, l'analyse préliminaire et la communication des données et d'un message d'alerte précoce.
- La sensibilité réduite de ces instruments low-cost, par rapport à des stations classiques, sera compensée par la densité du réseau qui, dans le futur, devrait atteindre des centaines ou milliers d'instruments, en comparaison de dizaines ou centaines de stations standards dans les réseaux classiques.
- SOSEWIN sera un réseau sans fil décentralisé, auto-organisé. Cette capacité d'auto-organisation permet au réseau de s'adapter à des circonstances changeantes (ajout ou retrait d'instruments, interférences locales dans les communications, perte d'une partie des instruments en raison du séisme, panne de certains instruments, etc.).
- Les instruments pourront aussi être achetés par le publique, ainsi SOSEWIN pourra intégrer des données supplémentaires de la part de personnes privées.

- Finalement, pour la réponse rapide et la gestion de la crise juste après l'événement, plus le réseau est dense et plus les cartes de mouvement et estimation de dégâts seront précises.

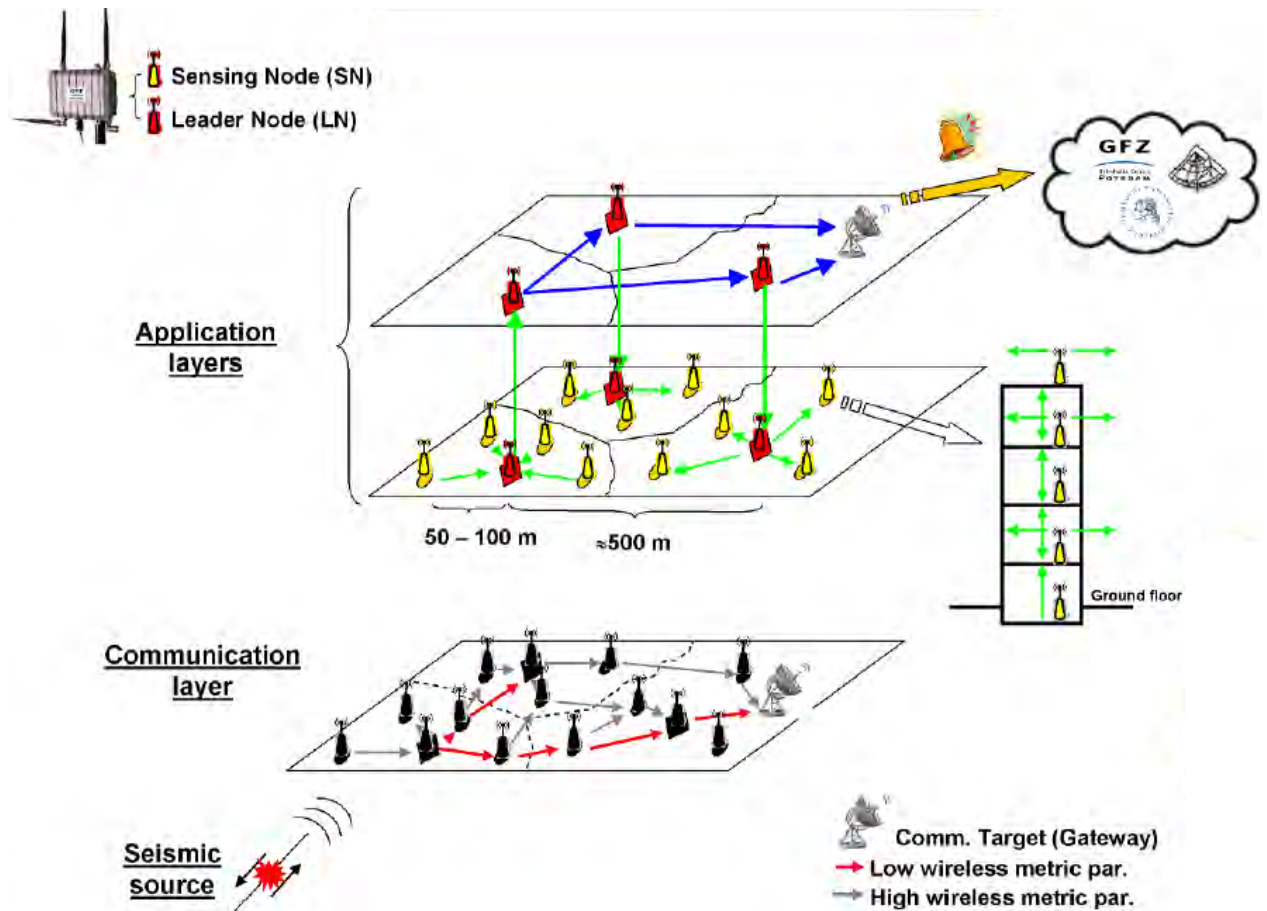


Figure 3.6 : Organisation générale de SOSEWIN. (Fleming et al., 2009). Le "wireless metric parameter" est une mesure de l'efficacité de la communication du réseau. Le réseau est subdivisé en sous-groupes dirigés par un "leader node". Les capteurs peuvent être disposés individuellement ou en séries comme dans l'exemple du bâtiment représenté sur la droite. Les "leader nodes" centralisent l'information qui est envoyée à l'extérieur du réseau.

Le projet SOSEWIN, développé entre autre par l'institut GFZ à Potsdam dans le cadre des projets SAFER et EDIM, semble constituer un outil très prometteur et complémentaire aux systèmes d'alerte précoce régionaux classiques (Fleming et al., 2009).

3.2.4 France

La France ne possède actuellement pas de système d'alerte précoce régional opérationnel. Seuls quelques systèmes de surveillance sismique associés à des plans d'action de mise en sécurité ont été mis en place en France au niveau de certaines installations à enjeux (centrales nucléaires, lignes de train à grande

vitesse, sites industriels). De même, peu de travaux de recherche ont à ce jour été menés concernant la faisabilité d'un système alerte précoce en France (Auclair, 2012).

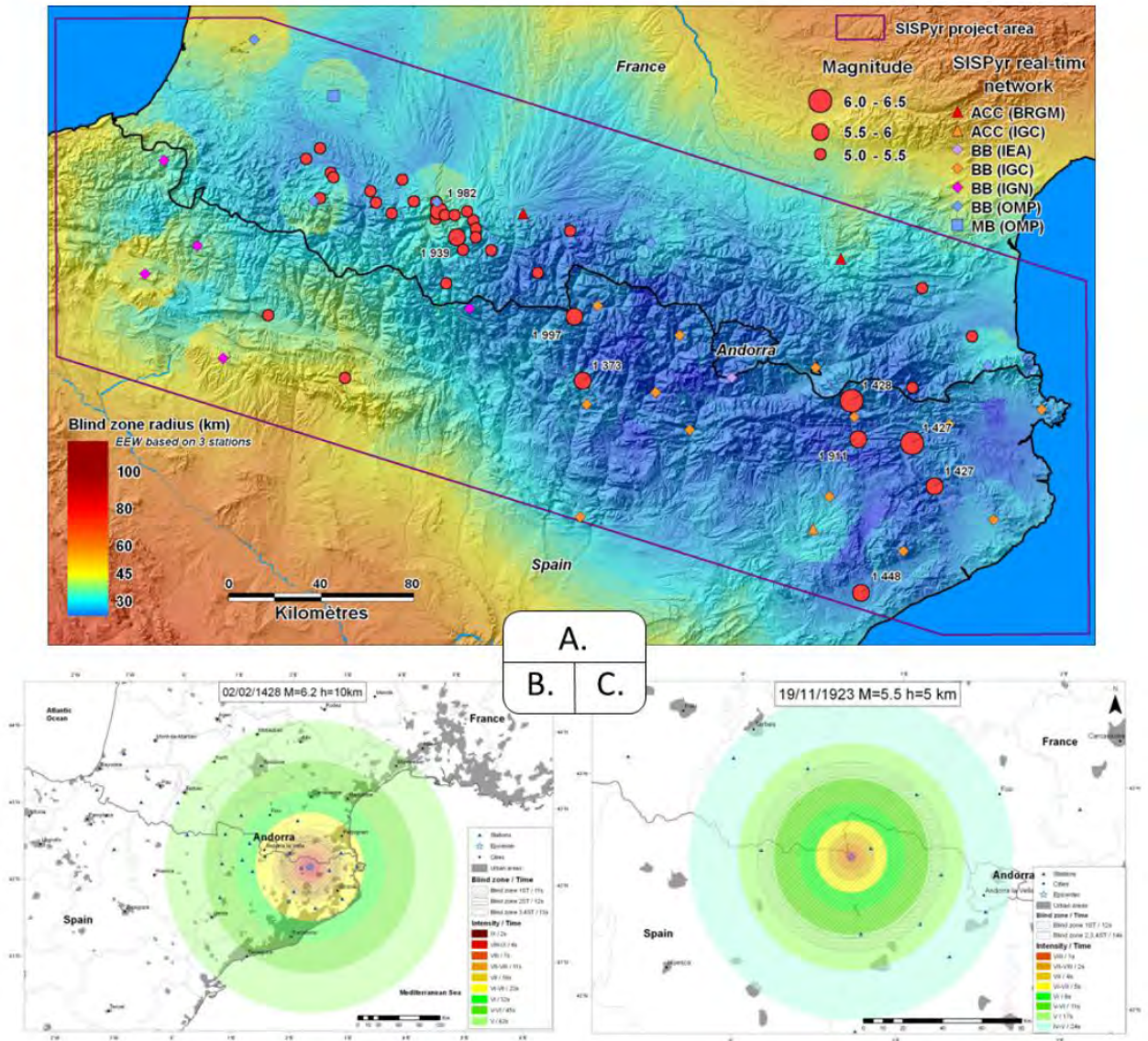


Figure 3.7 : Simulation des performances d'un alerte précoce system pyrénéen basé sur le réseau sismologique SISPy. A) Extension de la zone aveugle en fonction de la position de l'épicentre avec un système utilisant un minimum de 3 stations. Sont également représentés le réseau sismologique SISPy et la sismicité historique. B) Atténuation de l'intensité par rapport à l'extension de la zone aveugle pour le scénario du séisme destructeur M6.5 de 1428. C) Idem pour le scénario du séisme destructeur M5.6 de 1923. (Auclair et al., 2012).

Concernant la France métropolitaine, caractérisée par une sismicité modérée associée à des périodes de retour relativement longues des séismes destructeurs, la seule étude menée est une étude de faisabilité et de valorisation du réseau sismologique existant pour un système d'alerte précoce régional dans les Pyrénées

(Auclair et al., 2012-a et Auclair et al., 2012-b). Dans le cadre de cette étude, des scénarios ont été simulés, pour différents séismes historiques connus. La figure 3.7-B et 3.7-C présente ainsi les résultats obtenus en termes d'extension de la zone aveugle, pour deux séismes de magnitude 6.5 et 5.6, respectivement. La figure 3.7-A, quant à elle, montre qu'un système d'alerte précoce basé sur 3 stations au minimum conduirait à une zone aveugle de 54 km pour 50% des événements passés, et de 63 km pour 80% des événements passés. Cette figure montre également que la surface de la zone aveugle est variable latéralement, en raison de l'inhomogénéité du réseau.

Auclair et al. (2012-a et 2012-b) concluent de l'ensemble des investigations menées qu'en considérant un réseau sismologique amélioré, avec une station tous les 30 km, une alerte précoce ne pourrait être disponible, dans le meilleur des cas, que dans la partie externe de la zone sinistrée (définie comme ayant une intensité supérieure ou égale à VI) et au-delà, pour des événements ayant une magnitude minimale d'environ 5.5. Les simulations effectuées montrent cependant que ce système d'alerte précoce pourrait être tout à fait pertinent dans le cas de séismes majeurs tels que le séisme historique de magnitude 6.5 de 1428. Pour faire face au contexte particulier des Pyrénées, les auteurs suggèrent l'utilisation d'une approche hybride avec une analyse rapide on-site (une seule station) pour alerter rapidement les systèmes les plus critiques, puis une alerte régionale plus précise au fur et à mesure que les stations détectent le séisme.

Une autre étude de faisabilité a été menée par Auclair et Bertil (2009) pour le territoire des Antilles françaises, caractérisé par une sismicité plus importante que celle de la France métropolitaine. Cette étude a montré qu'un système d'alerte précoce régional serait inefficace dans le cas de séismes intra-plaques superficiels, par contre, une alerte d'une dizaine de secondes serait envisageable pour les séismes provenant de la zone de subduction profonde. Cependant, les auteurs soulignent le fait que le réseau existant devrait être largement modernisé et que les enjeux ne sont peut-être pas d'ampleur suffisante pour justifier les coûts associés.

Auclair et al. (2012) dressent le bilan suivant pour les perspectives d'utilisation de systèmes d'alerte précoce pour le territoire français :

- Même si le contexte sismique antillais est clairement plus propice à l'installation d'un tel système, l'évolution rapide des technologies est susceptible de rendre possible la mise en place de systèmes d'alerte pour des régions à sismicité modérée telles les Pyrénées ou les Alpes, où les enjeux sont nombreux.
- L'alerte sismique on-site semble, quant à elle, dès aujourd'hui adaptée au contexte français, où elle semblerait pouvoir répondre à des besoins déjà exprimés par des utilisateurs potentiels, suite à une enquête menée par Auclair et al. (2012).
- Enfin, une perspective intéressante semble exister avec les systèmes d'alerte on-site mobiles, développés au Japon, permettant de protéger les équipes déployées sur le terrain en cas de crise sismique, en France ou plus souvent en mission de soutien à l'étranger.

3.2.5 Italie

Le réseau de la région d'Irpinia (Sud de l'Italie), ISNet, composé de 28 stations couplant vélocimètre et accéléromètre en chaque site, permet de réaliser des localisations et estimation de magnitude en temps réel (Iannaccone et al., 2009). Des cartes du mouvement du sol peuvent également être établies après un séisme.

Zollo et al. (2009) et Iannaccone et al. (2009) présentent une méthodologie originale développée dans le but d'évaluer les capacités d'un système d'alerte précoce, sans devoir attendre des dizaines d'événements rares pour vérifier son fonctionnement. Ce travail est basé sur une large quantité de simulations numériques, intégrant notamment des processus de rupture complexe de grande taille, ainsi que les caractéristiques de la source, les effets de champ proches, etc. Cette méthodologie peut être appliquée à l'évaluation des performances de n'importe quel réseau d'alerte précoce régional. Dans le cas du réseau de la région d'Irpinia, la capacité du réseau à correctement prédire le mouvement fort dépend largement de la distance et de l'azimut par rapport à la faille.

Dans le cadre du réseau ISNet, Satriano et al. (2010) ont développé un ensemble de programmes permettant la détection des séismes en temps réel, la caractérisation des paramètres de source et la prédiction des mouvements sismiques attendus. Cet ensemble de programmes est testé mondialement afin d'améliorer ses performances pour les forts séismes. Des tests sont également menés pour les séismes faibles se produisant dans le réseau ISNet. L'un des développements proposés par les auteurs et celui d'une approche intégrée d'alerte précoce à la fois régional et on-site (approche hybride).

3.3 Situation actuelle en Suisse

3.3.1 Réseau national du Service sismologique suisse (SED)

Le projet "Next Generation Swiss Strong Motion Network", financé par le gouvernement suisse, permet l'installation d'une centaine de nouvelles stations sismologiques large bande 24 bits en champ libre, particulièrement en milieu urbain, d'ici 2018 (Clinton et al., 2010). Ces stations, installées et gérées par le SED, sont caractérisées par une transmission continue des données à des pas d'échantillonnage élevés. Ces stations complètent les trente stations similaires installées auparavant et remplacent les 70 stations de l'ancien réseau installée dans les années 1990. Ainsi, le réseau mouvements forts en Suisse est l'un des plus denses d'Europe mais aussi du monde (Clinton et al., 2010).

La modernisation et la densification du réseau sismologique suisse permet de produire différents résultats lors de la survenue d'un séisme en Suisse. En particulier, le SED produit des cartes de mouvement du sol après chaque séisme ressenti, dans les minutes suivant l'événement ("alerte rapide"). De tels outils peuvent constituer une aide précieuse à la décision rapide pour l'intervention post sismique, l'arrêt d'installations critiques, le contrôle de trafic, trains, tunnels, l'alerte d'hôpitaux, etc. Un autre produit, disponible dans les minutes qui suivent la localisation automatique d'un séisme, est la détermination de la magnitude de moment (Clinton et al., 2010). Il est à noter ici que le système de centralisation et d'analyse des données sismologiques en temps réel est entièrement dupliqué dans deux bâtiments indépendants (actuel bâtiment du SED et ancien site du Honggerberg), pour pallier le cas d'éventuelles coupures de courants, pannes, etc.

Enfin, le SED participe largement aux efforts de développement des systèmes d'alerte précoce en Californie, et les méthodes développées dans cette région sont ensuite appliquées en Suisse (Cua et al., 2009). La densité du réseau de stations et la grande qualité des enregistrements sismiques, actuellement mis en place en Suisse, sont les clés d'un système d'alerte précoce efficace. En Suisse, en raison de la sismicité modérée, un système d'alerte précoce à proprement parlé serait utile et efficace tous les 1000 à 2000 ans (S. Wiemer, SED, 2013, comm. pers.), ainsi un réseau sismologique dense et moderne trouve surtout son intérêt dans la production d'informations, immédiatement après un séisme ressenti, permettant de prendre des mesures rapides dans les domaines de l'intervention, de la prévention de sur-accidents, mise en sécurité d'installations, etc, quelques secondes après l'événement.

Le SED est le seul organisme officiel d'information concernant les séismes en Suisse, c'est également le SED qui a le devoir d'alerte en cas de séisme. Ainsi, S. Wiemer (SED, 2013, comm. pers.) précise qu'il serait logique et nécessaire que la mission d'alerte précoce en Suisse soit confiée au SED. En effet, plutôt que de laisser d'autres organismes ou industries privés mettre en place des systèmes, chacun dans leur coin, sans garantie de qualité, il serait préférable que l'ensemble des stations destinées à un usage de type alerte précoce soient intégrées au réseau national du SED, avec le conseil et le choix d'instruments fiables et de logiciels approuvés et testés par des années de recherche et développement au SED. Ainsi, toujours selon S. Wiemer, chaque organisme ou industriel souhaitant investir pour une meilleure protection ou alerte en cas de séisme pourrait le faire tout en contribuant à l'amélioration du réseau national, qui, à son tour, permettrait l'amélioration des capacités d'alerte locale on-site, par l'usage d'un réseau national complet plutôt que seulement quelques stations installées autour du site en question. Il s'agirait d'une mutualisation des moyens augmentant largement l'efficacité de la détection sismique, pour l'ensemble des partenaires concernés.

Cette idée de S. Wiemer, certes correcte sur le plan théorique, se heurte, dans la pratique, au fait que la contribution d'un industriel au réseau géré par le SED risque de coûter nettement plus cher que l'établissement d'un système on-site d'alerte précoce autonome, tant que ce système ne prévoit pas d'enregistrements (voir chapitre 3.3.2).

L'Office Fédéral de l'Environnement et l'Office Fédéral de la Protection de la Population ont commandé une expertise analysant la signification et l'importance du réseau sismologique de mouvements forts suisse pour la protection de la population (Studer, 2009). L'étude a consisté en l'envoi de questionnaires et la réalisation d'interviews en Suisse et à l'étranger, concernant les cartes de mouvements sismiques et leur potentiel utilisation pour la protection de la population. Aux USA et en Italie, les questions n'ont pu être posées qu'aux promoteurs et développeurs des cartes de mouvements sismiques, aucun contact de non utilisateur n'a pu être obtenu pour le questionner sur l'usage potentiel de ces cartes. Au Canada par contre il existe une communication directe des données de mouvements du sol aux organismes intéressés ou exploitants d'installations sensibles. Ainsi, les données brutes, non interpolées, sont à disposition pour différents types d'analyses, selon les besoins.

En Suisse, en cas d'événement sismique, le premier besoin de la Protection de la Population est une estimation rapide des dommages et de leur répartition. Les cartes actuellement mises à disposition par le SED (voir Figure 3.8 pour un exemple

hypothétique) sont considérées comme utiles pour la prise de mesures immédiates. Des cartes plus détaillées seraient souhaitées par la moitié des cantons.



Figure 3.8 : Exemple de carte de dégâts fournie par le SED quelques minutes après un séisme, état actuel (carte extraite de Studer, 2009).

La plus-value des cartes détaillées planifiées par le SED (Figure 3.9), à l'aide du nouveau réseau de mouvements forts, ne semble pas évidente aux yeux de la Protection de la Population. Selon les réponses des personnes concernées interviewées, des informations directes sur les dégâts aux bâtiments seraient souhaitées. Cependant, cela nécessiterait un effort considérable et resterait de toute manière entaché d'une très grande incertitude. Ainsi, les cartes de mouvement du sol doivent uniquement être utilisées pour la prise de mesures immédiates et non pas pour la planification et la conduite de l'intervention des secours.

Pour ce qui est des CFF, en cas de séisme une observation des voies serait menée, soit "à pied" soit par un train naviguant "à vue". Les CFF ne voient ainsi que peu d'intérêt pour des cartes de mouvements du sol détaillées. Enfin, en ce qui concerne les autres systèmes lifeline tels que ponts, systèmes d'approvisionnement ou d'élimination des déchets, ils sont en général bien construits (Studer, 2009). Les

dégâts dépendent souvent de détails, des cartes de mouvements du sol n'apporteraient pas non plus grand-chose. Par contre, la meilleure solution serait la mise en place d'instruments directement à des emplacements stratégiques. C'est ainsi le cas pour toutes les centrales nucléaires par exemple.

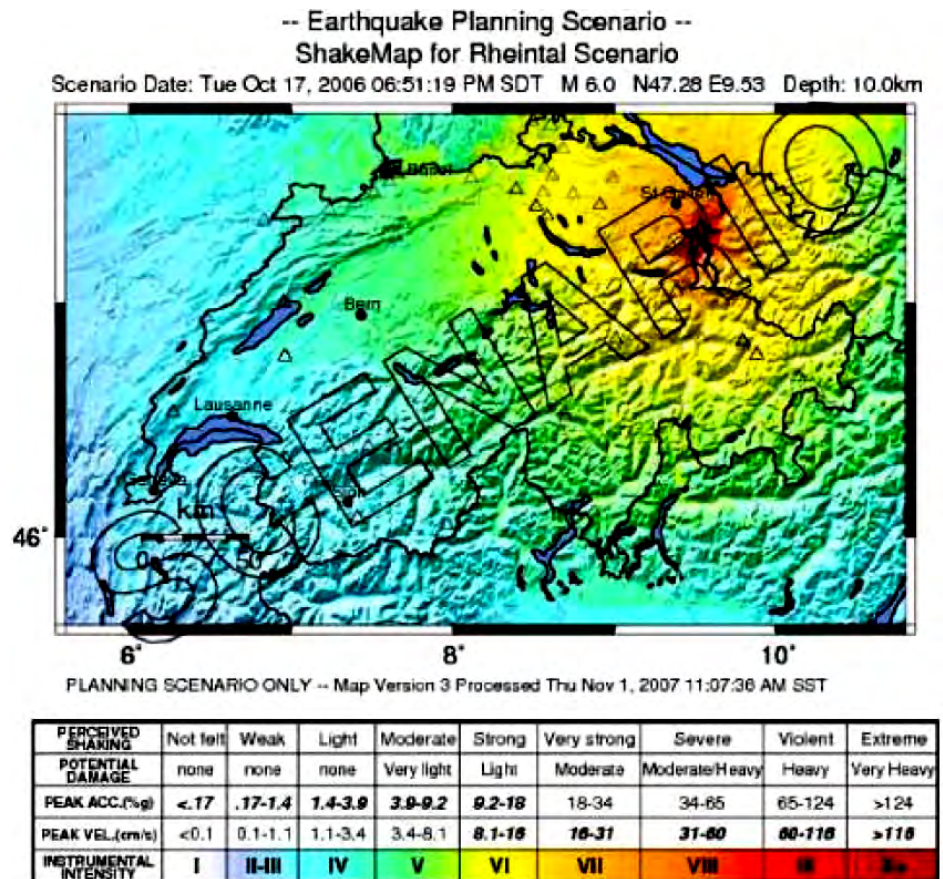


Figure 3.9 : Exemple de carte de dégâts plus détaillée, envisagée pour être fournie par le SED quelques minutes après un séisme, état futur avec le nouveau réseau de mouvements forts (carte extraite de Studer, 2009).

Enfin, selon la Protection de la Population, il serait intéressant de tester si la mise en place d'instruments bon marché, mais en plus grand nombre, ne permettrait pas de mieux répondre à ses besoins. Le coût de l'installation et la maintenance pourrait être à la charge de l'exploitant concerné, et la mise en place, le choix des instruments, le traitement et l'archivage des données assurés par le SED qui mettrait à disposition les informations nécessaires aux organismes concernés. Avec un même budget, un plus grand nombre d'instruments pourrait être installé, suffisant aux besoins de la Protection de la Population.

Concernant la sécurisation du système de communication, qui concerne en particulier le réseau sismologique de mouvements forts du SED, la Confédération a commandé une étude globale visant à une optimisation de l'alerte et de l'alarme en Suisse (OWARNA, 2007). Les conclusions de cette étude, en particulier l'élaboration d'un concept pour garantir l'alimentation électrique de secours et

pour obtenir la redondance des systèmes, doivent être intégrées dans la mise en place du nouveau réseau de mouvements forts du SED.

3.3.2 Système d'alerte précoce pour la distribution de gaz à Bâle

En 2012, les Services Industriels de Bâle (Industrielle Werke Basel, IWB) ont installé un système d'alerte précoce afin de pouvoir, en cas de séisme, interrompre automatiquement l'approvisionnement du réseau de gaz de toute l'agglomération. Il s'agit d'un pur système d'alerte, composé d'appareils de la société allemande Secty Electronics, sans capacité d'enregistrement des mouvements sismiques. Ces appareils détectent les ondes P d'un séisme à l'aide d'un algorithme approprié, tenu secret, avant l'arrivée de l'onde S.

Le réseau de gaz de l'agglomération bâloise est approvisionné à partir des conduites haute pression de la société Gasverbund Mittelland (GVM) par cinq postes de détente et de comptage (PDC). A chaque poste, un réseau local de trois appareils a été installé ; les trois appareils ont été fixés sur trois murs ou blocs en béton différents. Ce réseau local déclenche une alerte dès que deux des trois appareils détectent un séisme. En cas d'alerte, la vanne d'alimentation se ferme immédiatement, sans besoin d'électricité. Ce dispositif avec trois appareils permet, d'une part, d'éviter au mieux les fausses alertes et, d'autre part, de déclencher l'alerte même si l'un des appareils ne fonctionne plus correctement.

Tous les réseaux locaux connaissent l'état des autres réseaux locaux, par liaison radio ainsi que par conduites en fibre-optique. Dès que deux réseaux locaux déclenchent l'alerte, toutes les stations ferment immédiatement leurs vannes d'alimentation.

Le déclenchement d'alerte est actuellement réglé sur le niveau dit de "0.2". Selon la société Secty Electronics, ceci correspond à une intensité macrosismique de l'ordre de VI à VII. Etant donné que le déclenchement est basé sur un algorithme empirique détectant les ondes P, Secty Electronics n'est pas en mesure d'indiquer une corrélation précise avec les caractéristiques des mouvements forts à venir après l'arrivée de l'onde S. Par conséquent, la question qui se pose est de savoir si ce niveau de déclenchement d'alerte est approprié. Y a-t-il un risque que les vannes se ferment automatiquement alors que l'ampleur des dégâts ne nécessiterait pas une telle mesure ?

Basé sur les résultats de tests sur table vibrante ainsi que sur le retour d'expérience d'appareils Secty qui ont déjà fait leurs preuves lors de différents séismes à travers le monde, il peut être conclu que si les vannes se fermaient sans que cela ne soit nécessaire, les dégâts étant trop modestes, la population serait suffisamment effrayée pour que personne ne reproche aux IWB d'avoir inutilement interrompu l'approvisionnement en gaz ; au contraire, tout laisse à penser qu'une telle interruption serait perçue comme rassurante.

La mise en place du système d'alerte précoce, avec cinq réseaux locaux de trois appareils Secty chacun, avec la communication entre les réseaux locaux et la gestion redondante de la fermeture des vannes d'alimentation a coûté, en 2012, moins de 150'000 francs suisses au total.

Le système est en opération depuis un an, sans avoir déclenché de fausse alerte. En revanche, lors de travaux dans un PDC, un appareil a "cru" avoir détecté l'onde

P d'un séisme, mais comme il s'agissait d'un seul appareil, aucune (fausse) alerte n'a été déclenchée.

3.3.3 Monitoring sismique des centrales nucléaires

Il n'existe pas de système d'alerte précoce dans le cadre des centrales nucléaires en Suisse (Zwicky, Basler&Hofmann, 2013, comm. pers.). Les instruments installés dans les centrales nucléaires en Suisse sont actuellement plutôt des systèmes de monitoring sismique qui servent de fournisseurs d'informations pour l'aide à la prise de décisions en cas d'événement sismique (Zwicky, 2013, comm. pers.). Ces instruments sont installés en conformité avec les guidelines réglementaires en la matière (US Nuclear Regulatory Commission, 1997 ; Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, HSK, 1993). Par exemple, Sahgal and Tinic (2005) présentent l'expérience avec l'instrumentation et les enregistrements de séismes réels pour la centrale nucléaire de Beznau. L'instrumentation sismique de la centrale permet d'émettre des alarmes selon lesquelles l'opérateur en charge de la sécurité pourra prendre un certain nombre de mesures de sécurité et / ou alerter son superviseur ou des équipes techniques de réponse d'urgence. Pour qu'un événement soit considéré comme séisme, au minimum deux instruments doivent déclencher, l'un des deux étant installé en champ libre. D'autre part, les données de mouvements sismiques (faibles), enregistrés par les instruments, permettent d'effectuer des analyses des paramètres sol-structure et de mieux quantifier la réponse sismique du site.

A la suite de l'accident nucléaire de Fukushima au Japon, l'Inspection Fédérale de la Sécurité Nucléaire Suisse a demandé aux exploitants des centrales nucléaires suisses de prendre part au "stress-test" commandé par la Commission Européenne (Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, ENSI, 2011). En particulier ce rapport précise que les centrales nucléaires suisses développent conjointement le réseau de stations sismologiques du Service Sismologique Suisse (SED), afin de pouvoir enregistrer des très faibles mouvements dans la région des centrales, ces mouvements ne pouvant pas être mesurés par l'instrumentation des systèmes de monitoring propres aux centrales. Des informations intéressantes peuvent être déduites de ces mesures, concernant les failles actives dans la région des centrales. D'autre part, selon le point de vue exprimé par l'ENSI, les systèmes automatiques d'arrêt d'urgence des réacteurs, déclenchés par l'instrumentation sismique, ont fait leurs preuves lors du séisme de Fukushima au Japon. Actuellement, ce type de déclenchement automatisé n'a pas été mis en place en Suisse. De ce fait, l'ENSI va suivre ce point de manière à étudier la question de savoir si de tels systèmes d'arrêt d'urgence automatique déclenché par l'instrumentation sismique devraient être mis en place sur les centrales nucléaires suisses.

Il est à noter également que le système d'alerte précoce développé par le Service Sismologique Suisse est en cours d'implémentation dans les salles de contrôle des centrales nucléaires suisses dans le cadre d'une phase de test, en tant qu'outil de visualisation, sans pour autant donner lieu à des alarmes (J. Clinton, SED, 2013, communication personnelle). Par ailleurs, P. Zwicky souligne qu'il serait important que les instruments installés en champ libre aux sites des centrales nucléaires suisses fassent partie intégrante du réseau du SED.

Le seul système d'alerte précoce installé dans une centrale nucléaire, dans le monde, est celui de la centrale d'Ignalina en Lituanie (Wieland et al., 2000). Comme indiqué sur le schéma de la figure 3.10, le dispositif est composé de six

stations situées sur un cercle, à 30 km de distance de la centrale, plus une station au site même de la centrale. Chaque station est elle-même composée de trois accéléromètres, distants d'environ 500 m, plus un sismomètre couplé à l'un des trois accéléromètres. Le mouvement du sol est enregistré en continu par chaque instrument et transmis par télémétrie au centre de contrôle de la centrale. L'alarme générée en cas de séisme est utilisée pour l'insertion des barres de contrôle, opération qui ne nécessite que 2,5 s avec le type de réacteur de cette centrale. Or, le temps d'alerte entre l'alarme émise par le système d'alerte précoce et l'arrivée des ondes sismiques est de 4 s, pour un séisme se produisant à plus de 30 km de distance. Ainsi la réaction nucléaire peut être stoppée avant l'arrivée du séisme. Cependant, d'après l'interview menée auprès de P. Zwicky, il s'agissait d'un système pilote qui ne semble pas avoir fonctionné avec succès depuis.

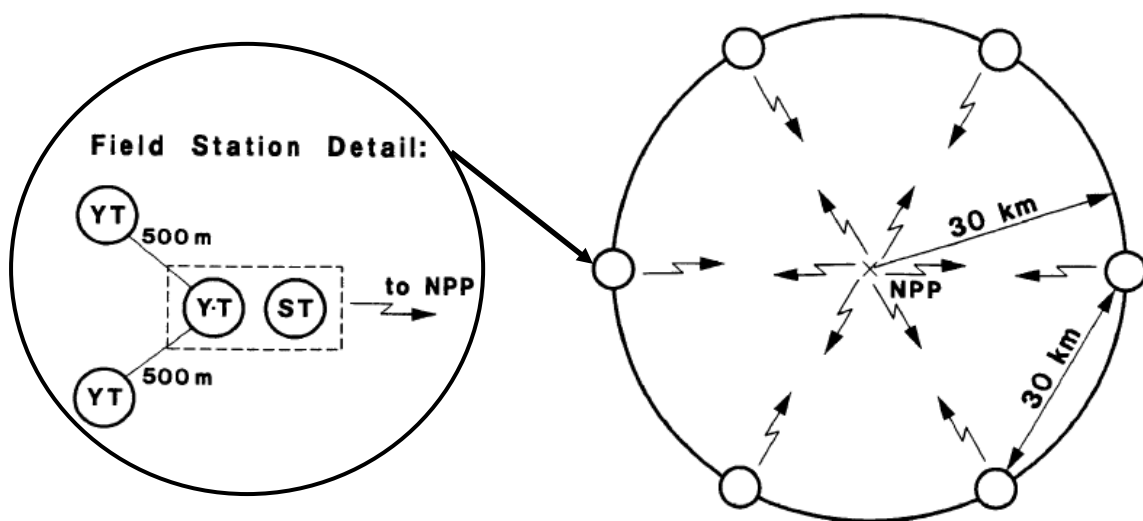


Figure 3.10 : Dispositif du système d'alerte précoce de la centrale nucléaire d'Ignalina. NPP : Nuclear Power Plant, YT : accéléromètre, ST : sismomètre (d'après Wieland et al., 2000).

3.3.4 Monitoring sismique des barrages

En ce qui concerne le réseau d'accélérographes destiné au monitoring sismique des barrages en Suisse, le SED a fait un état des lieux fin 2012, à la demande de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN, Darbre, 2013, comm. pers.). Il résulte de cette étude que le réseau actuel est obsolète, ne fonctionne que partiellement et que les instruments devraient être remplacés au plus vite. La question de la qualité de l'exploitation se pose également pour l'OFEN. Actuellement l'OFEN (Darbre, 2013, comm. pers.) doit faire face à un manque de crédits vis-à-vis des coûts d'investissements pour la mise à jour du réseau (environ 750 kCHF) et d'exploitation (environ 100 kCHF / an).

L'interview menée auprès de G. Darbre, par e-mail, le conduit à proposer les éléments suivants, quant à la pertinence de la mise en place ou la rénovation d'un réseau de monitoring sismique des barrages en Suisse :

- Le premier aspect concerne la recherche dans le domaine du comportement sismique des barrages. Par exemple, les enregistrements effectués à Mauvoisin (en particulier) ainsi qu'à Emosson et Punt-dal-Gall ont permis de valider les

dernières recherches effectuées à Berkeley. Disposer de tels réseaux est précieux. La configuration doit être adaptée aux buts poursuivis et le réseau être d'une certaine ampleur (12 instruments à Mauvoisin, ce qui semble être un minimum). Les coûts d'installation et d'exploitation ne sont pas à charge de l'exploitant du barrage.

- En cas d'intervention après un séisme, la décision de la rapidité d'intervention sur site (inspection) peut être effectuée sur la base des mouvements qui se sont effectivement produits au barrage, plutôt que sur la base d'une estimation de l'intensité au site. Trois instruments suffisent pour cela, avec accès à distance aux données.

3.3.5 Infrastructures de transports

P. Zwicky (Basler&Hofmann) indique que la mise en place d'un système de monitoring sismique avait été recommandée lors d'une ancienne étude sur le dimensionnement sismique de longs tunnels ferroviaires à travers les Alpes suisses (AlpTransit Gotthard et Lötschberg).

3.4 Questions sur le plan juridique

La barrière juridique est certainement aujourd'hui l'un des principaux obstacles au passage en phase opérationnelle de nombreux systèmes d'alerte précoce pilotes, développés dans différents pays (Auclair, 2012). En effet, l'alerte sismique précoce fait face à une absence de cadre réglementaire précisant les droits, les devoirs et les responsabilités de chacun en la matière (scientifiques, opérateurs de télécommunications, utilisateurs, prestataires de services, autorités, etc.). Des questions se posent, par exemple, au sujet de l'égalité du droit d'accès à l'alerte précoce, ainsi que de la responsabilité quant à sa diffusion et à son utilisation. Par exemple :

- l'opérateur du système est-il tenu à une obligation de moyens ou de résultats ?
- comment gérer les incertitudes, les fausses alertes, les alertes manquées ? et comment les diffuser ?
- quels sont les devoirs de chacun en termes de "porter à connaissance" de l'alerte précoce ?

Le cas du Japon est sans doute l'exemple le plus avancé, si ce n'est le seul, en matière de législation dans le domaine de l'alerte sismique précoce. L'article de Kamigaichi et al. (2009) présente des éléments très intéressants à ce sujet. En effet, au Japon, c'est la Japan Meteorological Agency (JMA) qui est officiellement en charge de fournir des alertes sismiques précoces aux autorités, à certains responsables chargés de la sécurité dans différents organismes, ainsi qu'à la population, depuis 2007. En plus des alertes émises directement par la JMA à certains utilisateurs, celle-ci met à disposition des alertes utilisables par des systèmes de notification commerciaux (alarmes individuelles, notification par SMS, etc.). Kamigaichi et al. (2009) précisent que, pour accompagner et encadrer cette nouvelle mission, la JMA a fait amender la "loi sur les services météorologiques" régissant, en particulier, la diffusion d'informations relatives au risque sismique, afin de :

- définir clairement les responsabilités de tous les organismes (JMA et autres) impliqués dans les phases d'émission et de transmission de l'alerte ;
- établir un cahier des charges techniques applicable à tout service commercial de notification d'alertes (uniquement pour les systèmes régionaux, non

applicable aux systèmes on-site). Ainsi, au début de l'année 2009, 54 opérateurs de diffusion d'alertes sismiques précoces étaient certifiés conformes aux standards de la JMA (Kamigaichi et al., 2009).

En Suisse, S. Wiemer (SED, 2013, comm. pers.) précise effectivement qu'il manque un cadre légal pour pouvoir aller de l'avant avec la mise en place de systèmes opérationnels. Le rôle et les devoirs du SED devraient être précisés et clairement définis en la matière, avec, en particulier, le traitement des aspects de validation ou de certification des systèmes si plusieurs organismes, publics ou privés, se trouvent impliqués dans la diffusion d'alertes sismiques précoces en Suisse.

4. Analyse du potentiel des systèmes d'alerte précoce et de monitoring pour les infrastructures en Suisse

Pour la majorité des types d'infrastructures, l'utilité potentielle de systèmes de monitoring sismique et d'alarme précoce en Suisse a été discutée avec une personne compétente dans le domaine de l'infrastructure en question. Les conclusions de ces discussions sont décrites dans le présent chapitre.

A priori, on peut penser que des systèmes de monitoring sismique et d'alarme précoce ont été développés, sur le plan mondial, pour les types d'infrastructures pour lesquels les avantages les plus prometteurs étaient attendus. Pour la Suisse, a priori, tout laisse à penser que les mêmes types d'infrastructures pourraient potentiellement en bénéficier le plus.

D'emblée, il est clair que des systèmes d'enregistrement des mouvements sismiques fourniraient des données extrêmement précieuses en cas de séisme, permettant de mieux comprendre le comportement sismique des systèmes d'infrastructures affectés. L'analyse des dégâts survenus lors d'un séisme – ou l'absence de dégâts – permettrait de tirer des conclusions nettement plus pertinentes si les caractéristiques des mouvements sismiques subis par les structures en question étaient connues. Ceci est valable pour tout type d'infrastructure. De ce fait, cet aspect ne sera plus mentionné dans les sous-chapitres suivants. La question du rapport coût-bénéfice de ces systèmes d'enregistrement en zone de sismicité faible à modérée comme la Suisse doit cependant être posée.

4.1 Délais d'alerte attendus en Suisse

Le potentiel des systèmes d'alerte précoce est, bien évidemment, d'autant plus important que les délais d'alerte sont longs, et ces délais sont d'autant plus longs que le site à protéger par l'alerte est distant du foyer du séisme. Or, en Suisse, l'aléa sismique est dominé par des séismes à des distances épacentrales de l'ordre de 10 à 20 km et une profondeur du foyer entre 5 et 15 km sur le Plateau, et en-dessous de 10 km dans les Alpes (Giardini et al., 2004). Par conséquent, la différence entre les temps de trajet des ondes P et S ne serait, dans la plupart des cas, que de l'ordre de 2 à 3 s (voir chapitres 2.2 et 2.3). En supposant qu'une seconde environ soit nécessaire entre la première arrivée de l'onde P et le déclenchement de l'alerte, un délai de seules 1 à 2 secondes en résulterait.

Dans le Valais, qui est la région avec l'aléa sismique le plus élevé de Suisse, les délais d'alerte attendus dans la plupart des cas seraient même plus courts. En effet,

les scénarii dominant l'aléa sismique correspondent à une distance épacentrale de 5 à 15 km environ, quelle que soit la période de retour considérée, jusqu'à 10'000 ans – même si la distance épacentrale dominante diminue très légèrement pour une période de retour croissante (Giardini et al., 2004). Étant donné que la profondeur médiane, dans cette région, est de l'ordre de 5 km seulement, un scénario caractéristique serait donc un séisme avec une distance épacentrale de 10 km, le foyer étant à 5 km de profondeur. En supposant des vitesses moyennes des ondes P et S, respectivement, de 5 km/s et 3 km/s, la différence entre les temps de trajet des ondes P et S ne serait que de 1.5 s, ce qui mènerait, si une seconde est nécessaire pour déclencher l'alarme, à un délai d'alerte de moins d'une seconde.

Dans la région bâloise ainsi que sur le Plateau, on pourrait se baser plutôt sur une distance épacentrale de 15 km et une profondeur médiane entre 10 et 15 km. En supposant concrètement une profondeur de 12 km, et avec les mêmes hypothèses qu'auparavant, un délai d'alerte de 1.5 s en résulterait. Par conséquent, rares seraient les cas qui mèneraient à des délais d'alerte supérieurs à deux secondes – sauf pour les régions plus éloignées de l'épicentre, avec des mouvements du sol plus faibles.

Lors des interviews avec les personnes compétentes dans leur domaine d'infrastructure respectif, l'hypothèse optimiste d'un délai d'alerte de 2 à 3 s a été retenue.

4.2 Centres informatiques

Quasiment tout système d'infrastructure dépend, de nos jours, du bon fonctionnement d'importants centres informatiques. Par conséquent, la première question qui se pose est de savoir si une alerte précoce permettrait d'éviter, en cas de séisme, des pannes des systèmes informatiques, ou au moins d'en réduire le nombre.

Le processus le plus sensible par rapport aux vibrations est l'écriture de données sur les disques durs ; il s'agit là du seul processus informatique qui implique des éléments mouvants. En cas de fortes vibrations, les disques durs peuvent être endommagés. Il serait donc hautement intéressant de pouvoir stopper tous les processus d'écriture sur les disques durs avant l'arrivée de l'onde S provoquant les vibrations les plus fortes.

Dans cette optique, Monsieur Stefan Kälin, responsable de l'exploitation de l'infrastructure de base auprès de l'Office fédéral de l'informatique et de la télécommunication, a été interviewé le 18 mars 2014. Monsieur Kälin a expliqué que quelques secondes ne suffiraient pas pour stopper les processus d'écriture dans un centre informatique avec des centaines ou milliers de serveurs. Plusieurs dizaines de secondes, voire plusieurs minutes seraient nécessaires pour cela.

4.3 Distribution d'énergie

4.3.1 Énergie électrique

Notre société est devenue extrêmement dépendante de l'énergie électrique. En cas de séisme majeur, la disponibilité de l'énergie électrique est vitale pour pouvoir porter secours aux victimes de façon efficace.

En Suisse, c'est la société Swissgrid qui est responsable pour la distribution de l'énergie électrique à haute tension. C'est pourquoi une discussion a été menée, le 13 janvier 2014, avec un représentant de cette société, à savoir Monsieur Hans-Peter Mölbert, responsable de la sécurité physique auprès de Swissgrid.

Monsieur Mölbert a été très clair : un délai d'alerte de quelques secondes ne suffirait de loin pas pour anticiper, sur le plan de la gestion du réseau, la perte de fonction d'une sous-station ; un délai de plus d'une minute serait nécessaire pour cela. En revanche, une alerte rapide, dans les minutes qui suivent le séisme, est jugée très utile pour la gestion de la crise. Néanmoins, afin de réduire la probabilité d'un "black out", l'accent doit être mis sur la prévention.

4.3.2 Gaz

En 2012, les Services Industriels de Bâle (Industrielle Werke Basel, IWB) ont installé un système d'alerte précoce afin de pouvoir, en cas de séisme majeur, arrêter automatiquement l'approvisionnement en gaz de toute l'agglomération. Ce système est présenté en détail au chapitre 3.3.2 du présent rapport.

Même après la fermeture des vannes auprès de tous les postes de détente et de comptage approvisionnant le réseau local, celui-ci contient encore du gaz pendant une durée qui dépend essentiellement du nombre et de la nature des fuites provoquées par le séisme. En effet, il faut s'attendre à ce que, pendant plusieurs heures, voire une journée entière, du gaz s'échappe encore par les différentes fuites. Par conséquent, il n'est pas important, a priori, que les vannes soient fermées avant ou après la première arrivée des ondes S destructives. Le délai d'alerte extrêmement court (voir point 4.1) n'est donc pas un handicap tant que les liaisons de communication restent opérationnelles pendant les premières secondes du séisme. Les vannes elles-mêmes sont robustes et fonctionnent même en cas de panne d'électricité. Tout laisse à penser que ces conditions sont remplies pour le système d'alerte installé à Bâle.

Ce système serait utile surtout en cas d'un séisme d'une intensité similaire à celle de celui de 1356, avec une période de retour, selon les connaissances actuelles, de l'ordre de 2000 ans. Des séismes d'une telle intensité sont encore plus rares – ou moins probables – dans les zones de sismicité Z1 et Z2. C'est pourquoi, si ce système d'alerte a sans doute sa raison d'être à Bâle, il serait probablement disproportionné d'installer – et de maintenir – un tel système dans les villes des zones de sismicité Z1 et même Z2. Cependant, aucune étude coût-bénéfice systématique n'a été entreprise pour pouvoir définitivement trancher cette question.

4.4 Eau

4.4.1 Eau potable

Le potentiel d'une d'alerte précoce pour le maintien de l'adduction d'eau potable a été discuté, le 4 mars 2014, avec Monsieur Bert Noij des Services Industriels de

Bâle (IWB). Monsieur Noij est, depuis de longues années, le coordinateur des efforts de prévention sismique auprès des IWB.

Une alerte précoce stricto sensu, avec un délai d'alerte d'une ou deux secondes, n'est pas utile. Cependant, une réaction rapide automatisée pourrait être intéressante pour fermer les vannes des tuyaux d'écoulement des réservoirs principaux. En effet, si ces vannes restent ouvertes, il y a le danger que toutes les réserves en eau, stockées dans les réservoirs, s'écoulent par les fuites du réseau. Or, pour la gestion de la crise, ce serait un avantage indéniable de pouvoir retenir un maximum d'eau dans les réservoirs, tout particulièrement si les installations de traitement d'eau potable ont été endommagées. Même si l'eau n'était plus potable après le séisme, à cause d'une éventuelle pollution survenue lors du séisme, elle pourrait être traitée par des stations de purification mobiles, ou toujours être très utile pour la lutte contre le feu.

Comme pour le gaz, un système de réaction rapide automatisée ne serait, bien évidemment, utile que si les liaisons de communication restent opérationnelles pendant les premières secondes du séisme et si les vannes, elles-mêmes, sont robustes et fonctionnent encore après le séisme, même en cas de panne d'électricité. Une fermeture rapide des vannes, en quelques secondes, ne serait, de toute façon, pas possible car elle provoquerait inmanquablement des coups de bélier qui mèneraient à l'éclatement des conduites.

Étant donné que les IWB ont déjà un système d'alerte précoce en place, pour leur réseau de gaz, il semblerait intéressant d'étudier la possibilité d'utiliser l'alarme non seulement pour interrompre l'approvisionnement en gaz, mais également pour fermer les vannes d'écoulement des réservoirs d'eau principaux. Contrairement au réseau de gaz, où *tout* approvisionnement devrait être arrêté, il suffirait, pour assurer une réserve d'eau minimale, que la fermeture des vannes fonctionne pour *quelques-uns* des réservoirs principaux.

Ailleurs en Suisse, un dispositif de fermeture automatique des vannes pourrait éventuellement se justifier pour des villes avec des conditions géotechniques particulièrement délicates, comme à Lucerne par exemple, où des déformations importantes dans le sol pourraient provoquer de nombreuses fuites d'eau. Autrement, pour le niveau d'un séisme avec une période de retour inférieure à 1000 ans, peu de ruptures de conduite d'eau potable sont attendues en Suisse. Cependant, sans analyse coût-bénéfice systématique, il est difficile de se prononcer définitivement.

4.4.2 Eaux usées

L'intérêt d'une alarme précoce pour la gestion des eaux usées a été discuté, le 4 mars 2014, avec Monsieur Heinz Frömelt, directeur de la station d'épuration Prorheno de la ville de Bâle. Aucune utilité n'a pu être identifiée, ni pour une alerte précoce proprement dite, ni pour un système de réaction automatique rapide dans les secondes ou premières minutes qui suivent le séisme.

4.5 Systèmes de transport

4.5.1 Chemins de fer

La question du potentiel d'un système d'alerte précoce se pose évidemment dans le domaine des chemins de fer. En effet, le système d'alerte précoce sans doute le

mieux connu est l'UrEDAS (Urgent Earthquake Detection and Alarm System) qui permet d'arrêter, en particulier, les trains Shinkansen au Japon, système qui a fait ses preuves dans le passé à plusieurs reprises (Nakamura, 2008). Or, cette expérience très positive ne signifie pas automatiquement qu'un potentiel analogue existerait en Suisse du fait que le délai d'alerte est nettement plus court en Suisse que, en règle générale, au Japon (voir chapitre 4.1).

Une vue d'ensemble de la vulnérabilité des infrastructures ferroviaires peut être trouvée dans l'annexe B du rapport Risk&Safety (2010). Cependant, la plupart des dégâts présentés ont été provoqués par des séismes avec des magnitudes plus fortes que celles qui dominent l'aléa sismique en Suisse (voir chapitre 4.1). A noter surtout que les distances de l'épicentre à partir desquelles il n'y aurait plus de dégâts significatifs seraient nettement plus faibles en Suisse. Il est raisonnable de supposer, pour la discussion qui suit, que des dégâts significatifs doivent être attendus jusqu'à des distances de l'ordre de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres.

Une discussion a été menée, le 14 janvier 2014, avec Mme Heike Fischer, Ingénieure spécialiste en construction, des CFF, division infrastructure, Département construction-environnement. Mme Fischer souligne qu'un délai d'alerte typique de quelques secondes seulement est trop court pour pouvoir suffisamment freiner les trains avant l'arrivée de l'onde S destructrice – d'autant plus qu'il serait souhaitable, avant le déclenchement du freinage d'urgence, de calculer où le train se trouverait lors de la phase de mouvement fort du séisme, afin d'éviter, par exemple, qu'il se trouve juste sur un pont qui s'effondre lors du séisme, pont qu'il aurait peut-être encore pu franchir s'il n'avait pas freiné...

En revanche, Mme Fischer pense qu'une alerte rapide, dans les minutes qui suivent le séisme, serait hautement intéressante. L'objectif serait d'éviter que des trains entrent, peu après le séisme, dans les zones de dégâts significatifs. Or, il est bien connu qu'il est extrêmement difficile, après un séisme majeur, de réunir les informations sur l'ampleur des dégâts et leur distribution géographique. Éviter les accidents, les déraillements par exemple, serait particulièrement important pour les trains de voyageurs à vitesse élevée, mais également pour les transports de matières dangereuses.

Dans les régions montagneuses, le problème principal serait probablement le déclenchement d'éboulements et de glissements de terrain. Soit ils emportent des parties de la voie, soit ils se déversent sur la voie. Ces phénomènes ne se développent typiquement que dans les minutes qui suivent le séisme déclencheur. Une alarme, même si elle n'arrive que 30 secondes après le séisme, serait donc toujours utile.

La mise en place d'un dispositif d'alerte rapide nécessiterait essentiellement trois éléments (voir le chapitre 3.3.1 qui décrit les outils disponibles auprès du Service Sismologique Suisse, SED) :

- 1) L'élaboration d'une carte des mouvements du sol probables (en anglais : "shake map") en s'appuyant sur un réseau d'accélérographes large bande couvrant toute la Suisse. Un tel réseau existe ; il est géré par le Service sismologique suisse (SED). Plus ce réseau est dense, plus la fiabilité d'une telle carte est élevée. Il serait donc imaginable que le SED, en concertation avec la Centrale nationale d'alarme (CENAL), mette à disposition des chemins de fer

une carte des mouvements forts quelques minutes après le séisme. Cette idée a déjà été évoquée dans le rapport Risk&Safety (2009).

- 2) Le deuxième élément, de loin pas trivial, consisterait en la "traduction" des amplitudes des mouvements du sol en des consignes d'actions concrètes. Il serait, par exemple, imaginable de prévoir deux zones affectées, l'une avec interdiction d'y rouler (et, par conséquent, d'y entrer), et l'autre avec l'obligation d'y rouler, jusqu'à nouvel ordre, à vitesse fortement réduite. Il serait probablement avantageux, d'un point de vue économique, de définir les limites pour les zones mentionnées non seulement à partir de l'amplitude du mouvement du sol, mais également en fonction de la vulnérabilité présumée des différents secteurs de voie : secteurs en montagne avec des dangers d'éboulement sur les voies accrus, secteurs avec des ponts à faible résistance sismique, ou, au contraire, nouveaux secteurs récemment construits dans le respect des normes parasismiques, etc.
- 3) Le troisième élément serait un système de transmission d'alerte qui fonctionne malgré une interruption de la distribution électrique qui, en règle générale, reste limitée à la zone de dégâts principaux.

Étant donné que l'inspection des voies dans les zones de dégâts nécessitera beaucoup de temps, un tel dispositif permettrait de limiter les risques d'accidents graves sans qu'il soit nécessaire de stopper ou ralentir les trains dans une zone géographique trop étendue.

4.5.2 Routes

Le 4 mars 2014, Monsieur Bernard Gogniat, spécialiste de la gestion des risques et de la sécurité, et Monsieur Reto Siegenthaler, responsable du secteur sécurité opérationnelle, tous les deux de l'Office fédéral des routes (OFROU), ont été brièvement interviewés. De plus, une discussion additionnelle a été menée, le 18 mars 2014, avec Monsieur Philippe Arnold, spécialiste des dangers naturels auprès de l'OFROU, ainsi que, le 21 mars 2014, avec Monsieur Jörg Dreier, directeur de la Centrale de gestion du trafic suisse (VMZ-CH), de l'OFROU également.

Pour le trafic routier, la situation se présente de manière très différente de celle du trafic ferroviaire. Tout d'abord, le réseau routier semble moins vulnérable que le réseau ferroviaire. De plus, les conducteurs des véhicules routiers, dans la plupart des cas, ne sont pas en communication directe avec une centrale qui pourrait les alermer directement. Par conséquent, la transmission d'une alarme devrait se faire soit par auto-radio ou sur les systèmes de navigation, soit par des panneaux d'affichage de la route. Mais même si la transmission de l'alarme était immédiate, une à deux secondes ne suffiraient pas aux chauffeurs pour freiner significativement leur véhicule.

Néanmoins, il serait possible d'avertir les usagers de la route de potentielles situations dangereuses par un système d'alerte rapide automatisé, à l'aide de diffusions par auto-radio et système de navigation. De plus, les panneaux d'affichage routiers, déjà existants sur les routes nationales, pourraient également être utilisés pour donner des alertes – même si leur nombre limité ne permet de loin pas une alerte suffisamment "dense". En effet, même si un pont ne s'effondre pas, des déplacements différentiels importants au niveau des joints de chaussée pourraient représenter un danger sérieux, particulièrement sur les routes nationales avec des vitesses des véhicules relativement élevées.

En montagne, des dispositifs déjà existants aux endroits délicats, pour informer les usagers de la route, pourraient également être utilisés pour avertir de la possibilité d'éboulements et de glissements de terrain. Il serait donc intéressant d'étudier la possibilité d'intégrer une alerte automatisée en cas de séisme majeurs aux dispositifs existants.

Selon Monsieur Dreier, il serait tout-à-fait possible de programmer de telles alertes de façon à ce qu'elles puissent être diffusées quelques minutes après un séisme. Cependant, la mise en place d'un tel dispositif nécessiterait d'étudier auparavant tous les processus qui le composeraient, en détail.

Bien évidemment, le fonctionnement d'une alerte rapide, dans les minutes qui suivent le séisme, ne peut pas être garanti, tout particulièrement en cas de perte d'électricité, alors qu'une telle perte est souvent observée dans les zones de dégâts principaux. Néanmoins, en dehors de cette zone, il est probable que l'électricité reste disponible, et dans ce cas, le système d'alerte permettrait au moins d'avertir les usagers de la route avant qu'ils n'entrent dans la zone des dégâts principaux.

4.5.3 Aviation

Une discussion a été menée avec Monsieur Pascal Hochstrasser (Skyguide), chef des opérations de la tour et de l'approche de Genève, le 19 juin 2013. Selon M. Hochstrasser, la densité du trafic aérien est, de nos jours, telle que les pilotes ne sont pas en mesure de garder les distances de sécurité entre les avions sans l'aide des contrôleurs aériens. La continuité du guidage des avions est donc l'élément clef pour la sécurité aérienne en cas de séisme.

Lors de la discussion, aucun domaine n'a pu être identifié où une alarme quelques secondes avant l'arrivée de l'onde S permettrait d'éviter ou de réduire les dégâts ou désordres potentiels. En revanche, un besoin de prévention a bien été identifié.

M. Hochstrasser a souligné les fortes redondances des systèmes de guidage des avions, avec, parfois, jusqu'à trois, voire quatre systèmes redondants indépendants. L'outil le plus important, voire absolument indispensable, est la radio permettant de rester en contact avec les pilotes des avions. A part deux systèmes de radio totalement indépendants, la tour dispose d'appareils radio portables, avec des batteries toujours chargées. Cependant, malgré le haut degré de redondance, il est à noter que souvent, les systèmes redondants se trouvent dans un seul et unique bâtiment, ce qui signifie que la redondance n'est pas assurée si le bâtiment en question s'effondre.

Les structures porteuses des deux bâtiments principaux, centres névralgiques de Skyguide, situés à Dübendorf et Genève, ont été contrôlées par rapport au séisme. Quant aux tours de contrôle, c'est le vent qui devrait être déterminant pour la résistance des tours à Genève et Zurich, se trouvant en zone sismique Z1. En revanche, pour la tour de Bâle-Mulhouse, en zone sismique Z3a, il ne serait pas un luxe de vérifier la sécurité structurale par rapport au séisme.

Indépendamment des contrôles sismiques des structures porteuses, les questions suivantes doivent, par exemple, se poser :

- Les faux-plafonds des salles de contrôle ne tombent-ils pas sur les contrôleurs aériens ?

- Les principaux outils peuvent-ils être endommagés en tombant de la table, d'une étagère, etc. ? Les appareils radio portables ne chutent-ils pas d'une haute étagère ou ne se trouvent-ils pas dans une armoire qui se renverse et/ou qui est difficilement accessible après un séisme ?
- Les batteries pour l'alimentation sans interruption sont-elles sécurisées contre le renversement ?

4.5.4 Navigation

Personne n'a été interviewé dans les domaines de la navigation fluviale ou lacustre. Il semble évident qu'un système d'alerte précoce n'ait aucune utilité dans ces domaines ; même une alerte rapide, dans les minutes qui suivent le séisme, ne changerait pas grand chose. D'une part, les mouvements de bateaux sont relativement lents et caractérisés par une grande inertie : impossible de changer quoi que ce soit en quelques secondes seulement. D'autre part, les bateaux, au moins ceux en route, ne subissent quasiment pas d'effets lors d'un séisme.

En l'absence de tsunamis, les problèmes principaux sont les déplacements des murs de quais dans les ports, souvent dus à la liquéfaction des sols derrière les quais. Il s'agit là de processus lents qui, a priori, ne mettent pas en danger les bateaux accostés. La situation est bien évidemment très différente si le séisme déclenche un tsunami. Dans ce cas, même de très grands bateaux se trouvant dans un port ou à proximité des rives peuvent être déplacés à l'intérieur des terres et même être détruits.

Le danger de tsunamis, pas seulement par rapport à la navigation, est traité dans le chapitre 5.

4.6 Télécommunication

La dépendance de la télécommunication a fortement augmenté dans notre société ces dernières années. La question se pose donc de savoir si un système d'alerte précoce pourrait être utile pour augmenter la probabilité de disponibilité des télécommunications immédiatement après un séisme.

Le potentiel de tels systèmes pour la télécommunication suisse a donc été discuté avec Monsieur Marcel Von Vivis de la société Swisscom, le 16 janvier 2014. Monsieur Von Vivis était le représentant des réseaux de télécommunication pour l'exercice SEISMO 12, organisé par l'Office fédéral de la protection de la population.

Étant donné que Swisscom possède, avec la société Fastweb, une filiale en Italie, Monsieur Von Vivis a eu l'occasion d'étudier, de très près, l'impact des séismes de L'Aquila (Mw = 6.3, 2009) et d'Emilia Romagna (Mw = 6.1 et 5.8, 2012) sur les installations de télécommunication de Fastweb. L'expérience de ces deux séismes est particulièrement intéressante pour la Suisse du fait que leurs caractéristiques ressemblent beaucoup à ce qui est attendu, environ une fois par siècle, quelque part en Suisse. Monsieur Von Vivis a souligné que les dégâts étaient étonnamment faibles dans les deux cas, bien que les infrastructures dans le domaine des technologies de l'information, et en particulier les disques durs, ne supportent en principe pas les vibrations importantes.

Tant que l'infrastructure de télécommunication n'est pas endommagée, et tant que l'électricité reste disponible, la situation immédiatement après un séisme ressemble à celle vers 23h58 un 31 décembre, quand des centaines de milliers de personnes veulent envoyer leurs vœux par SMS. Le système ne s'effondre pas pour autant, mais, dans cette situation, beaucoup de personnes n'arrivent pas à établir une liaison avec la personne cible ; en effet, il suffit que l'une des deux personnes restent momentanément inatteignable en raison de la surcharge des centrales.

En Suisse, les centrales sont très redondantes. Par conséquent, la perte d'une ou deux centrales ne devrait pas poser trop de problèmes. De plus, il est à noter que les anciennes centrales téléphoniques suisses ont été construites, dans le temps, pour résister aux pressions collatérales dues à l'explosion de bombes à proximité, en cas de conflit armé.

Monsieur Von Vivis ne voit finalement aucune utilité d'un système d'alerte précoce pour la télécommunication en Suisse, d'autant plus que le délai d'alerte serait beaucoup trop court pour interrompre, par exemple, les processus d'écriture sur les disques durs.

5. Tsunamis lacustres

Le danger de tsunamis lacustres en Suisse n'est actuellement pas encore pris en compte. Or, des travaux de recherche récents (Schnellmann et al., 2002 ; Schnellmann et al., 2007 ; Bussmann & Anselmetti, 2010 ; Kremer et al., 2012 ; Kremer et al., 2014) mettent en évidence un risque de tsunamis tout-à-fait réel au bord de plusieurs lacs suisses.

La genèse des tsunamis lacustres est très différente de celles des tsunamis "classiques" en mer. Ces derniers sont la conséquence directe des déplacements verticaux rapides du fond marin, de part et d'autre d'une faille importante, lorsque celle-ci provoque un fort séisme. Les tsunamis lacustres, en revanche, sont la conséquence de grands mouvements de masse ; il s'agit soit d'éboulements ou de glissements de terrain qui se déversent dans le lac (ou sur ses rives peu consolidées), soit de glissements sous-lacustres. Ces mouvements de masse peuvent être, ou non, déclenchés par un séisme.

Schnellmann et al. (2002) et Schnellmann et al. (2007) montrent qu'il y a probablement eu, sur le lac des Quatre Cantons, plusieurs tsunamis les derniers 15'000 ans, avec des hauteurs de vagues jusqu'à 3 m environ. Le dernier tsunami a été la conséquence du séisme de 1601, qui a provoqué de nombreux glissement sous-lacustres ; ce tsunami a ravagé les rives du lac, particulièrement entre Buochs et Beckenried, et a probablement contribué à la destruction de la nouvelle église de Beckenried (Schwarz-Zanetti, 2008).

L'éboulement du Rossberg de 1806, survenu sans qu'il y ait eu un séisme, a provoqué une vague d'une hauteur de l'ordre de 15 m dans le lac de Lauerz. Il est important de noter que les masses rocheuses ne sont pas directement tombées dans le lac, mais sur un marais adjacent au lac, déplaçant latéralement la masse marécageuse vers le lac et créant ainsi le tsunami.

Le lac Léman a connu plusieurs tsunamis dans son histoire. Des récits historiques rapportent un éboulement, dit de Tauredanum, qui est survenu en 563, en amont du delta du Rhône, en un lieu qui n'est pas connu avec précision – sans qu'il y ait mention d'un séisme. Un tsunami aurait dévasté de nombreux villages le long du lac, jusqu'à Genève. Il aurait détruit le pont sur le Rhône ainsi que des moulins à Genève et serait même passé par-dessus les fortifications de l'ancienne ville du bout du lac, pourtant située, à l'époque, un peu en hauteur.

Ce n'est que récemment que des dépôts lacustres importants ont été découverts au fond du lac qui ont pu être identifiés comme le résultat d'un effondrement du delta du Rhône (Kremer et al., 2012). La datation, ainsi que l'absence d'autres récits pour la même période, laissent à penser que cet effondrement a été provoqué par l'éboulement de Tauredanum de 563. Il semble que cet éboulement ne se soit pas directement déversé dans le lac, mais qu'il ait eu lieu en amont du delta, déplaçant horizontalement des masses peu consolidées de façon similaire à ce qui s'est passé au lac de Lauerz. Des simulations numériques ont montré qu'un immense tsunami a dû résulter de cet effondrement du delta (voir figure 5.1), corroborant ainsi les récits historiques. Des hauteurs de vagues de l'ordre de 13 et 8 m ont été calculées pour Lausanne et Genève, respectivement.

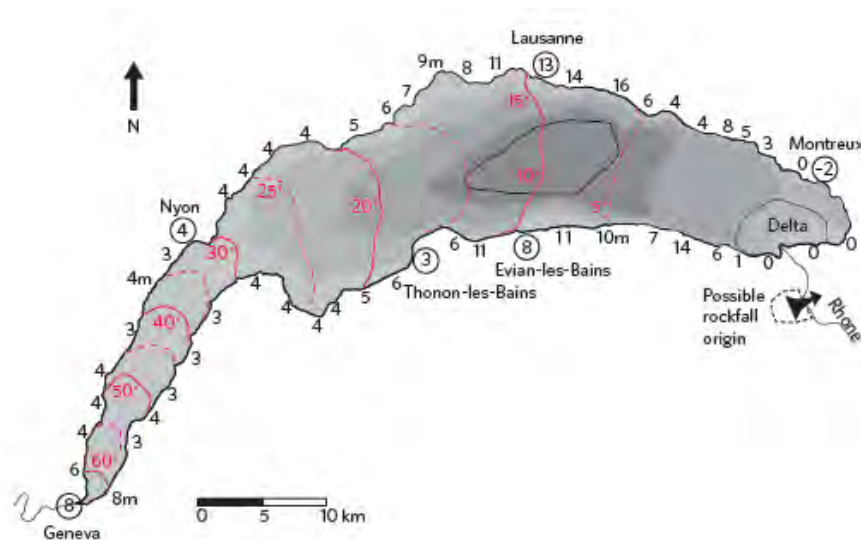


Figure 5.1 : Simulation de la hauteur et de la propagation du tsunami de AD 563 dans le lac Léman (d'après Kremer et al., 2012). La hauteur, en mètres, de la 1^{ère} vague arrivant est notée le long de la rive ; les lignes rouges indiquent le temps d'arrivée, après l'événement déclencheur, du 1^{er} front de vague.

D'autres traces similaires dans le lac permettent de conclure que plusieurs glissements sous-lacustres ont dû provoquer d'autres tsunamis, dans un passé plus lointain. En particulier, Kremer et al. (2014) pensent qu'une interruption, pour 28 ans, de l'occupation des rives du Léman à Preveranges et Morges, à partir de l'année 1758 avant notre ère (datation précise par dendrochronologie), pourrait s'expliquer par la survenue d'un tsunami. En effet, un glissement sous-lacustre du côté de Lausanne a eu lieu à cette période environ, selon une datation au ¹⁴C, moins précise, et ce glissement a dû provoquer un tsunami, selon des simulations

numériques, moins fort que celui de 563, mais toujours d'une hauteur de quelques mètres sur une bonne partie des rives du lac.

La question qui se pose est de savoir s'il faudrait envisager une alerte au tsunami sur le pourtour des lacs suisses, au moins pour ceux qui peuvent subir des glissements sous-lacustres significatifs ou, le long de leurs rives, des éboulements importants. Afin de répondre à cette question, il convient d'estimer le risque d'importantes pertes de vies humaines dues à des tsunamis lacustres.

Prenons l'exemple du lac Léman : les derniers 4'000 ans, au moins deux tsunamis mortels, d'une hauteur de quelques mètres, ont fort probablement ravagé une grande partie des rives du lac. Supposer, pour un lieu donné, une période de retour de trois à quatre mille ans pour un tsunami mortel, d'une hauteur de plusieurs mètres, ne semble donc pas exagéré. Par conséquent, même en supposant qu'une personne vivant directement au bord du lac aurait une probabilité de survie de deux tiers, ce qui semble plutôt optimiste, il en résulterait une mortalité de l'ordre de 10^{-4} par an, dix fois plus que ce qui est toléré par la norme SIA 269/8 par rapport au risque sismique individuel.

Le risque de trouver la mort à cause d'un tsunami semble être du même ordre de grandeur sur les rives du lac des Quatre Cantons (Schnellmann et al., 2002 et 2007).

Comme le montre la figure 5.1, un tsunami arrive sur les rives exposées plusieurs minutes à plusieurs dizaines de minutes après la survenue de l'événement déclencheur, que celui-ci soit lié à un séisme ou non. Cette échelle temporelle permettrait donc, en principe, de diffuser une alerte, pour une grande partie des rives concernées, plusieurs minutes à plusieurs dizaines de minutes avant l'arrivée du tsunami.

Pourtant, mettre en place – et maintenir à long terme – des systèmes d'alertes au tsunami au bord des lacs suisses, et installer des panneaux indiquant les meilleurs axes de fuite, paraît difficilement imaginable. Afin de réduire le risque lié aux tsunamis lacustres, il serait probablement plus approprié de surveiller les pentes potentiellement critiques, dans l'entourage immédiat des lacs, ainsi que les talus sous-lacustres. Même si la surveillance et le traitement de zones en glissement instable est loin d'être simple, et même parfois impossible, il y aurait lieu d'étudier la faisabilité de la mise en place de systèmes d'alerte en cas de menace particulière.

Quoi qu'il en soit, à la lumière des travaux de recherche récents, le risque de tsunami lacustre semble être significativement sous-estimé, à ce jour, par la communauté scientifique et les autorités. Par conséquent, il conviendrait d'étudier la faisabilité de la mise en place de certains dispositifs de surveillance ou d'alerte de façon plus approfondie.

6. Conclusions

Le chapitre 2 du présent rapport décrit les principes de fonctionnement des différents systèmes d'alerte précoce et de monitoring sismique, ainsi que leurs avantages et contraintes. En particulier, ce chapitre présente les systèmes d'alerte locaux, dédiés à des cibles spécifiques, ainsi que les systèmes régionaux ou nationaux, basés sur un réseau sismologique de grande envergure. Enfin, les systèmes dits "hybrides" associent les deux modes de fonctionnement et ont ainsi

l'avantage d'émettre des alertes locales près des stations situées à l'intérieur de la zone "aveugle", à proximité de l'épicentre, tout en gardant la possibilité d'émettre une alerte ciblée vers des zones plus éloignées de dégâts à venir, dès que plusieurs stations ont détecté et analysé les données du séisme. Ce type de système est en grande évolution actuellement et sera probablement le système privilégié dans les années à venir.

Le chapitre 3, quant à lui, présente l'état de la pratique actuelle, sur le plan mondial, tant en matière de recherche qu'en ce qui concerne les systèmes opérationnels. De nombreux travaux de recherche sont menés, depuis une vingtaine d'années, par bon nombre de pays. Il est à noter que la Suisse occupe dans ce domaine une place importante, avec les travaux menés par le SED. Sur le plan opérationnel, les pays les plus avancés en matière de systèmes d'alerte précoce sont le Japon, le Mexique, la Turquie, avec des systèmes effectivement en fonction. La France et l'Italie en sont plus au stade d'études de faisabilité, avec une sismicité plus modérée. Enfin, le chapitre 3.3 dresse un bilan de l'état actuel de la pratique en Suisse, au niveau national (SED), des centrales nucléaires, des barrages, des infrastructures de transports et de la distribution de gaz à Bâle.

D'une manière générale, le délai pour une alerte précoce est nettement trop court en Suisse, typiquement égal à une à deux secondes. De ce fait, les systèmes d'alerte précoce apportent peu d'intérêt, sauf probablement dans le domaine du nucléaire pour initier la chute des barres de combustible avant l'arrivée de l'onde destructrice. Par contre, une alerte dite "rapide", à l'aide d'une carte des mouvements du sol, quelques minutes après un séisme, pourrait être utile, particulièrement pour les chemins de fer, mais également, dans une moindre mesure, pour les axes routiers principaux, afin d'éviter de rouler trop vite dans les zones de dégâts potentiels, ou d'entrer dans des zones potentiellement touchées de façon sérieuse.

D'autre part, il vaudrait la peine d'approfondir les connaissances dans le domaine du risque lié aux tsunamis lacustres de plus près et d'étudier la mise en place d'éventuels systèmes d'alerte en cas de potentiel éboulement latéral ou de glissement sous-lacustre, qui pourrait provoquer un tsunami important.

En ce qui concerne les infrastructures en Suisse, des mesures de prévention, sur le plan de la construction et de l'organisation, apportent, sans aucun doute, un bénéfice nettement plus important que les systèmes d'alerte.

En revanche, dans plusieurs domaines, les systèmes de monitoring, avec enregistrement des mouvements du sol, auraient potentiellement beaucoup de retombées bénéfiques, en cas de séisme. De tels enregistrements permettraient d'affiner significativement notre connaissance de la vulnérabilité des différents systèmes d'infrastructures ; ils permettraient de comparer le comportement réel lors d'un séisme avec ce qui aurait été attendu par calcul. Bien entendu, si de tels instruments sont mis en place, il y aurait également lieu d'étudier la possibilité de leur intégration dans le réseau national de surveillance sismique à des fins d'alerte. Cependant une étude coût-bénéfice serait encore nécessaire pour définir l'utilité de tels systèmes dans une zone de sismicité faible à modérée.

7. Littérature

- Aktas M., H.S. Kuyuk and H. Aslan (2010). Traffic management of Bosphorus suspended bridge, Istanbul information based on earthquake real-time information technology. *Proceedings of the 14th European Conference on Earthquake Engineering*, Ohrid.
- Allen R.M., P. Gasparini, O. Kamigaichi and M. Böse (2009). The status of earthquake early warning around the world: An introductory overview. *Seismological Research Letters*. Vol 80, Number 5, pp. 682-693.
- Allen R. M., G. Bear, J. Clinton, Y. Hamiel, R. Hofstetter, V. Pinsky, A. Ziv and A. Zollo (2012). Earthquake early warning for Israel: Recommended implementation strategy. International advisory committee on earthquake early warning. Report for the Geological Survey of Israel and the Geophysical Institute of Israel, GSI/26/2012, GII 500/676/12.
- Auclair S. and D. Bertil (2009). Systèmes d'alerte sismique : principes et faisabilité aux Antilles françaises. *Rapport final. BRGM/RP-56663-FR*, 87 p., 37 fig., 3 tabl., 1 ann.
- Auclair S. (2012). Veille scientifique sur les systems d'alerte sismique précoce. *Rapport final. BRGM/RP-61391-FR*, 86 p., 21 fig., 3 tabl., 1 ann.
- Auclair S., A. Lemoine, B. Colas, X. Goula, Y. Colom, T. Susagna and J.A. Jara (2012-a). Exploring the feasibility of an early warning system in a moderate seismicity context: case study of Pyrenees. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon*.
- Auclair S., Y. Colom, J.A. Jara, X. Goula and A. Lemoine (2012-b). Feasibility of a Pyrenean earthquake early warning system based on the SISPy network. *Final report - Action 5 - European SYSPYR Interreg IVA Project*.
- Bussmann F. and F.S. Anselmetti (2010). Rossberg landslide history and flood chronology as recorded in Lake Lauerz sediments (Central Switzerland). *Swiss J Geosci*, Vol. 103, pp. 43-59.
- Clinton J., with contribution from G. Cua, M. Fischer, Y. Behr, M.-A. Meier, R. Racine, C. Cauzzi (2012). Optimising a seismic network for Earthquake Early Warning. Présentation at the RELEMR Meeting, Larnaca, 5/6 Nov 2012.
- Clinton J., D. Fäh, P. Zweifel, S. Barman and C. Cauzi (2010). The next generation of strong motion monitoring in Switzerland. *Proceedings of the 14th European Conference on Earthquake Engineering*, Ohrid.
- Colombelli S., O. Amoroso, A. Zollo and H. Kanamori (2012). Test of a Threshold-Based Earthquake Early-Warning Method Using Japanese Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 102, No. 3, pp. 1266-1275, doi: 10.1785/0120110149.
- Crowell B.W., Y. Bock and M. Squibb (2009). Demonstration of earthquake early warning using total displacement waveforms from real-time GPS networks. *Seismological Research Letters*, Volume 80, Number 5, pp. 772-782, doi: 10.1785/gssrl.80.5.772.
- Cua G., M. Fischer, T. Heaton and S. Wiemer (2009). Real-time Performance of the Virtual Seismologist Earthquake Early Warning Algorithm in Southern California. *Seismological Research Letters*, Volume 80, Number 5, pp. 740-747, doi: 10.1785/gssrl.80.5.740.

- De Iuliis M., L. Petti and B. Palazzo (2010). A genetic algorithm for feed-forward control of semi-active devices with an early warning network. *Proceedings of the 14th European Conference on Earthquake Engineering*, Ohrid.
- Erdik M. (2006). Urban earthquake rapid response and early warning systems. *Proceedings of the 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva. Keynote address paper No K4.
- Espinosa-Aranda J.M., A. Jimenez, G. Ibarrola, F. Alcantar, A. Aguilar, M. Inostroza and S. Maldonado (1995). Mexico City Seismic Alert System. *Seismological Research Letters*. Vol 66, pp. 42-52.
- Espinosa-Aranda J.M., A. Cuellar, A. Garcia, G. Ibarrola, R. Islas, S. Maldonado and F.H. Rodriguez (2009). Evolution of the Mexican Seismic Alert System (SASMEX). *Seismological Research Letters*. Vol 80, Number 5, pp. 694-706.
- Espinosa-Aranda J.M., A. Cuéllar, G. Ibarrola, R. Islas, A. Garcia, F.H. Rodriguez and B. Frontana (2012). The Seismic Alert System of Mexico (SASMEX) and their alert signals broadcast results. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon*. Paper no. 1455.
- Fleming K., M. Picozzi, C. Milkereit, F. Kühnlenz, B. Lichtblau, J. Fischer, C. Zulfikar, O. Özel and the SAFER and EDIM working groups (2009). The self-organizing seismic early warning information network (SOSEWIN). *Seismological Research Letters*. Vol 80, Number 5, pp. 755-771.
- Gasparini P., G. Cua and the REAKT WP7 team (2012). Procedures for real-time earthquake risk reduction of industrial plants and infrastructures. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon*. Paper no. 5798.
- GeoSIG (2005). After the tsunami disaster, A proposal for increasing awareness and preparedness against natural disasters. *GeoWatch*, Issue 25.
- Giardini D., S. Wiemer, D. Fäh and N. Deichmann (2004). Seismic Hazard Assessment of Switzerland, 2004. Swiss Seismological Service, Zurich.
- Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, HSK (1993). Seismische Anlageninstrumentierung. Richtlinie für schweizerische Kernanlagen. HSK-R-16/d.
- Iannaccone G., A. Zollo, L. Elia, V. Convertito, C. Satriano, C. Martino, G. Festa, M. Lancieri, A. Bobbio, T. A. Stabile, M. Vassallo, A. Emolo (2009). A prototype system for earthquake early-warning and alert management in southern Italy. *Bull Earthquake Eng*. DOI 10.1007/s10518-009-9131-8.
- Iervolino I (2011). Performance-based earthquake early warning. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 31, pp. 209-222.
- Kamigaichi O., M. Saito, K. Doi, T. Matsumori, S. Tsukada, K. Takeda, T. Shimoyama, K. Nakamura, M. Kiyomoto and Y. Watanabe (2009). Earthquake early warning in Japan: Warning the general public and future prospects. *Seismological Research Letters*. Vol 80, Number 5, pp. 717-726.
- Kremer K., G Simpson and S. Girardclos (2012). Giant Lake Geneva Tsunami in AD 563. *Nature Geoscience* Vol. 5, pp. 756-757.
- Kremer, K., F. Marillier, M. Hilbe, G. Simpson, D. Dupuy, B.J.F. Yrro, A.-M. Rachoud-Schneider, P. Corboud, B. Bellwald, W. Wildi, S. Girardclos (2014). Lake dwellers occupation gap in Lake Geneva (France-Switzerland) possibly explained by an earthquake-mass movement-tsunami event during Early Bronze Age. *Earth and Planetary Science Letters* Vol. 385, pp. 28-39.

- Maddaloni G., N. Caterino and A. Occhiuzzi (2010). Seismic early warning for control of structures with magnetorheological dampers. *Proceedings of the 14th European Conference on Earthquake Engineering*, Ohrid.
- Murià Vila D., B.D. Aldama Sánchez and S. Loera Pizarro (2010). Structural warning for instrumented buildings. *Proceedings of the 14th European Conference on Earthquake Engineering*, Ohrid.
- Nakamura Y. (1988). On the Urgent Earthquake Detection and Alarm System (UrEDAS). *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, VII, pp. 673-678.
- Nakamura Y. (2008). First Actual P-Wave Alarm Systems and Examples of Disaster Prevention by them. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China
- Nasu T., K. Kanda, M. Miyamura, Y. Omika and E. Koide (2010). Advanced approach to site-specific earthquake early warning for facility. *Proceedings of the 14th European Conference on Earthquake Engineering*, Ohrid.
- OWARNA, Direction du Projet (2007). Optimisation de l'alerte et de l'alarme. Rapport final élaboré sur mandat du DDPS du 1er novembre 2005. Office fédéral de la protection de la population OFPP, Centrale nationale d'alarme. N° ID/Vers. 10011333298/01, MS ID/Vers. 1000401, Cote 402-OWA.
- Picozzi M., S. Parolai, C. Milkereit, D. Bindi, J. Zschau, R. Ditommaso, M. Mucciarelli, M.R. Gallipoli, M. Vona and M. Bianca (2010). Structural health monitoring by a wireless accelerometric network: L'Aquila (Italy) seismic sequence, 2009, example. *Proceedings of the 14th European Conference on Earthquake Engineering*, Ohrid.
- Risk&Safety AG (2010). Erdbebensicherheit der Bahninfrastruktur – Vorstudie. Version 1.1. Élaboré pour l'Office fédéral de l'environnement.
- Sahgal S. and S. Tiniç (2005). Experience with seismic instrumentation and real earthquake data at nuclear power plant Beznau Switzerland. *18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Beijing, China, paper SMIRT 18-K17_1.
- Satriano C, L. Elia, C. Martino, M. Lancieri, A. Zollo and G. Iannaccone (2010). PRESTo, the earthquake early warning system for Southern Italy: Concepts, capabilities and future perspectives. *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, doi:10.1016/j.soildyn.2010.06.008.
- Schnellmann M., F.S. Anselmetti, D. Giardini, J.A. McKenzie and S.N. Ward (2002). Prehistoric earthquake history revealed by lacustrine slump deposits. *Geology*, Vol. 30, pp. 1131-1134.
- Schnellmann M., F.S. Anselmetti, D. Giardini and J.A. McKenzie (2006). 15,000 Years of mass-movement history in Lake Lucerne: Implications for seismic and tsunami hazards. *Eclogae geol. Helv.*, Vol. 99, pp. 409-428.
- Schwarz-Zanetti, G. (2008). Das Erdbeben in Unterwalden vom 16. September 1601 und die nachfolgende Flutwelle im Vierwaldstättersee. Dans "Nachbeben", édité par M. Gisler, D. Fäh et D. Giardini, Haupt Verlag, pp. 53-68.
- Studer J. (2009). Bedeutung des Starkbebennetzes für den Bevölkerungsschutz – Expertise. Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS, Bundesamt für Umwelt BAFU, Ident-Nr./Vers. 10011740778/01 Aktenzeichen 210-01.

- Suárez G., D. Novelo and E. Mansilla (2009). Performance evaluation of the Seismic Alert System (SAS) in Mexico City: A seismological and a societal perspective. *Seismological Research Letters*. Vol 80, Number 5, pp. 707-716.
- Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, ENSI (2011). EU Stress Test: Swiss National Report - ENSI review of the operators' reports.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission (1997). Nuclear Power Plant Instrumentation for Earthquakes. Office of Nuclear Regulatory Research. Regulatory Guide 1.12. Revision 2.
- Wieland M., L. Griesser and C. Kuendig (2000). Seismic early warning system for a nuclear power plant. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New-Zealand. Paper n° 1781.
- Wyss M. (2012). The earthquake closet: rendering early-warning useful. *Natural Hazards*, DOI 10.1007/s11069-012-0177-6.
- Wyss M., F. Wenzel and J. Daniell (2013). How useful is early warning and can it be made more effective? in F. Wenzel and J. Zschau (eds.) *Early Warning for Geological Disasters - Scientific Methods and Current Practice*; ISBN: 978-3-642-12232-3, Springer Berlin Heidelberg New York, *in press*.
- Zollo A., G. Iannaccone, M. Lancieri, L. Cantore, V. Convertito, A. Emolo, G. Festa, F. Galovic, M. Vassallo, C. Martino, C. Satriano and P. Gasparini (2009). Earthquake early warning system in southern Italy: Methodologies and performance evaluation. *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L00B07, doi:10.1029/2008GL036689.
- Zollo A., O. Amoroso, M. Lancieri, Y.-M. Wu and H. Kanamori (2010). A threshold-based earthquake early warning using dense accelerometer networks. *Geophys. J. Int.*, vol 183, pp. 963-974. doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04765.x.