



Evaluation rapide des bilans matériels et humains : une aide essentielle à la gestion opérationnelle des crises sismiques

Samuel Auclair, Daniel Monfort, Bastien Colas, Thibaud Langer, Pascal Perrier

► To cite this version:

Samuel Auclair, Daniel Monfort, Bastien Colas, Thibaud Langer, Pascal Perrier. Evaluation rapide des bilans matériels et humains : une aide essentielle à la gestion opérationnelle des crises sismiques. 9ème Colloque National AFPS 2015, Nov 2015, Champs-sur-Marne, France. hal-01243222

HAL Id: hal-01243222

<https://brgm.hal.science/hal-01243222>

Submitted on 14 Dec 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Evaluation rapide des bilans matériels et humains : une aide essentielle à la gestion opérationnelle des crises sismiques

Prompt assessment of material and human losses: a critical assistance to operational management of seismic crisis

Samuel Auclair*, Daniel Monfort*, Bastien Colas, Thibaud Langer****, Pascal Perrier***

* BRGM, 3 avenue C. Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2

s.auclair@brgm.fr

** BRGM, Direction régionale Languedoc-Roussillon, 1039 rue de Pinville, 34000 Montpellier

*** Maintenant à l'Université Montpellier 2, Place Eugène Bataillon, 34000 Montpellier

RÉSUMÉ. L'expérience acquise après séismes ainsi que dans le cadre d'exercices « séisme » de sécurité-civile montre que les gestionnaires de crise ont besoin de disposer d'outils pour identifier rapidement l'ampleur des conséquences occasionnées, y-compris dans le cas d'événements modérés. Aussi, cet article présente une déclinaison française de l'approche américaine simplifiée « PAGER », permettant l'estimation des pertes consécutives à un séisme par le croisement d'une carte d'intensité avec une donnée de population considérée comme un proxy spatialisé des enjeux vulnérables. Enfin, et alors que les outils de réponse rapide existants reposent sur le diptyque mesures instrumentales en provenance des capteurs sismologiques / témoignages macrosismiques individuels recueillis en ligne via des formulaires dédiés, des pistes exploratoires de « crowd-sourcing » sont à l'étude, dans le but d'alimenter les modèles de pertes de données citoyennes complémentaires.

ABSTRACT. Experience of past earthquakes as well as "earthquake" civil-protection's exercises underlines the need for crisis managers to have at their disposal rapid-response tools able to assess consequences caused by earthquakes, even for moderate events. This paper presents a transposition of the American simplified approach "PAGER" for France, allowing the rapid assessment of losses resulting from earthquakes by crossing an intensity map with population considered as a spatialized proxy of vulnerable assets. Finally, while existing rapid response tools are based on the diptych instrumental measurements from seismic sensors / macroseismic individual testimonies collected online via dedicated forms, exploratory tracks of "crowd-sourcing" are under consideration in order to feed the models with additional citizen-based data.

MOTS-CLÉS : Evaluation dommage, gestion de crise, réponse rapide, outil d'aide à la décision, sécurité civile, gestion opérationnelle, risque sismique

KEYWORDS: Loss assessment, crisis management, rapid response, decision support system, civil-protection, operational management, seismic risk

1. Introduction

Lors de la survenue d'un séisme, les autorités en charge de la gestion de crise doivent pouvoir dresser aussi rapidement que possible un « paysage » de la situation dégradée, afin d'entreprendre des actions répondant aux besoins immédiats. Dans ce contexte, les gestionnaires de crise sont - à tous les échelons du dispositif de protection-civile « ORSEC » - en demande « d'outils de réponse rapide » leur permettant de prendre la mesure de la crise en estimant l'ampleur des dommages / pertes / dysfonctionnements. Dans le même temps, les initiatives se multiplient en France visant à la réalisation de cartographies rapides de l'ampleur des secousses sismiques. Si ces cartes peuvent aider les autorités à mieux cerner l'impact potentiel des séismes, elles ne répondent cependant pas pleinement à leurs besoins et demeurent difficilement interprétables par des non-spécialistes. Aussi convient-il d'aller plus loin dans la prise en compte des besoins opérationnels et de fournir aux autorités une évaluation rapide de tendances fiables et sectorisées de bilans matériels et surtout humains, lesquels sont dimensionnant pour la réponse de sécurité civile.

2. Outils de réponse rapide existants en France

A ce jour, la survenue de séismes sur le territoire national donne lieu à la production automatique rapide de plusieurs types de communiqués/cartes permettant de renseigner les autorités au-delà des paramètres focaux des événements évalués par le CEA/LDG et par les observatoires régionaux.

2.1. Estimation rapide de l'intensité macrosismique

Il s'agit principalement d'évaluations rapides de l'intensité macrosismique, qui permettent de qualifier sectoriellement l'ampleur des secousses sismiques :

- A l'échelle de l'ensemble du territoire national, le BCSF produit des cartographies évolutives à partir des témoignages macrosismiques individuels collectés par internet ;

- Aux Antilles françaises, les Observatoires des Antilles (OVSM et OVSG) utilisent une relation d'atténuation en intensité pour produire une évaluation isotrope de l'intensité à partir des paramètres du séisme (Beauducel *et al.*, 2011). ;

- Dans les Pyrénées (Bertil *et al.*, 2012), et prochainement dans le Sud-Est de la France, le logiciel ShakeMaps (Wald *et al.*, 1999) est utilisé pour produire automatiquement des cartographies de l'intensité (et d'autres paramètres tels que le PGA et le PGV) en mêlant à la fois observations macrosismiques et instrumentales, et modèles (d'atténuation et d'effets de site).

Bien que l'évaluation rapide et spatialisée de l'intensité macrosismique soit très utile pour dresser un 1^{er} « paysage de crise », l'expérience montre que des difficultés d'interprétation demeurent pour un public non-spécialiste (Crochet *et al.*, 2015). Par ailleurs, pour aider les autorités à dimensionner leur réponse opérationnelle, il est nécessaire d'aller plus loin et d'évaluer des tendances quant aux bilans potentiels associés à cette agression sismique.

2.2. Modélisation rapide des dommages

Dans les régions pour lesquelles des analyses statistiques de la vulnérabilité du bâti vis-à-vis du risque sismique sont disponibles, il est possible de croiser une carte de l'intensité d'un événement sismique avec une couche d'enjeux (bâtiments) associés à des fonctions de vulnérabilité adaptées, afin de procéder à de véritables modélisations de l'endommagement au bâti, puis d'en déduire des bilans humains en termes de nombre de personnes décédées, gravement blessées, de sans-abris.

Grace au projet ISARD (2003-2006), cette approche est aujourd'hui opérationnelle dans les Pyrénées pour la Catalogne ainsi que pour le département des Pyrénées Orientales (Goula *et al.*, 2008). Utilisant les données sismologiques enregistrées en temps-réel dans la zone, le système ISARD permet ainsi de produire en quelques minutes après l'occurrence d'un séisme une note informative transfrontalière, cohérente et homogène avec l'estimation des dommages au parc immobilier. Alors que le système ISARD est déjà utilisé en Espagne depuis des années par la sécurité-civile de Catalogne, la question de l'opportunité de procéder à la déclinaison opérationnelle de ce démonstrateur scientifique à destination des autorités françaises a fait l'objet d'une étude (Terrier, 2010) qui a mis en évidence l'attente des gestionnaires de crise français pour de tels systèmes de réponse rapide. Pour autant, ce type d'outil est relativement lourd à mettre en œuvre, et nécessite un important travail d'analyse de vulnérabilité du bâti courant qui complexifie son usage à grande échelle telle que celle d'un pays tout entier.

3. Déclinaison de la méthode PAGER pour la France Métropolitaine

Pour les régions non couvertes par des études de vulnérabilité physique du bâti, l'USGS a mis au point une méthodologie simplifiée d'estimation des pertes consécutives à un séisme dénommée PAGER (Earle *et al.*, 2009). Le principe de la méthode PAGER (dans sa version simplifiée) est d'évaluer l'ampleur des conséquences des séismes par le croisement d'une évaluation rapide de l'ampleur des secousses sismiques avec une donnée de population considérée comme un proxy spatialisé des enjeux vulnérables. La logique suivie est donc différente de celle employée par une analyse de type « scénarios de dommages » qui intègre une prise en compte explicite de la vulnérabilité physique des enjeux. Afin d'évaluer l'ampleur des séismes, la méthode PAGER définit, pour chaque pays - ou groupes de pays - dans le monde, des courbes empiriques qui indiquent des taux de pertes (humaines et économiques) en fonction d'un niveau d'agression sismique (degré d'intensité) – (cf. figure 1).

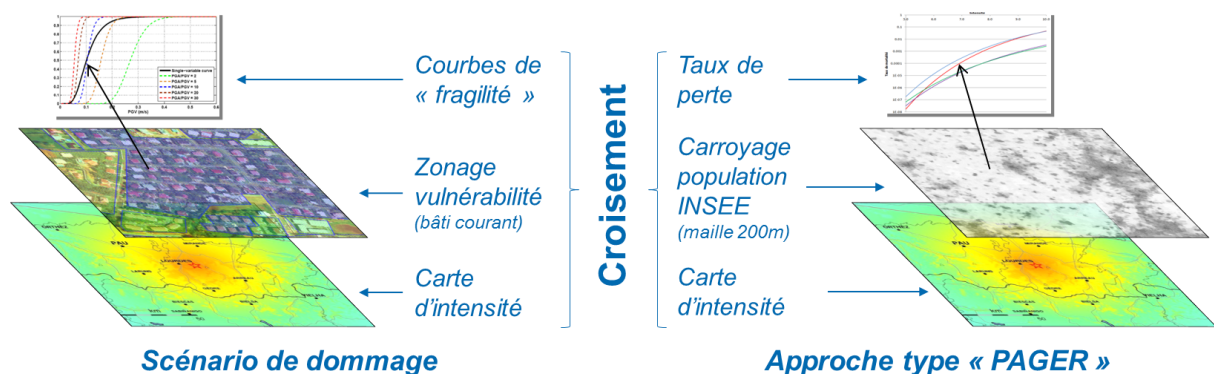


Figure 1. Représentation schématique de la manière dont procéder pour réaliser un scénario de dommage classique par modélisation (à gauche), et pour réaliser une estimation simplifiée selon l'approche PAGER (à droite)

Afin de compléter les outils de réponse rapide existant pour l'ensemble du territoire, nous avons donc procédé à la déclinaison de la méthode PAGER pour la France métropolitaine. Cette transposition française de l'outil vise à fournir des estimations rapide du nombre de décédés et de sans-abris, lesquels sont dimensionnant pour la réponse opérationnelle de la crise.

3.1. Constitution d'un catalogue de données de calage

Pour la calibration des courbes empiriques de pertes utilisées par PAGER, l'USGS utilise un catalogue de séismes indiquant notamment, pour chaque événement, le nombre de personnes décédées, l'ampleur des pertes économiques, ainsi que la population exposée par demi-niveau d'intensité. Si cette approche est adaptée pour les

régions à sismicité élevée pour lesquelles suffisamment de données sont disponibles pour calibrer les courbes sur les seules observations, elle n'est au contraire pas applicable dès lors que l'on souhaite adapter la méthode à un territoire à sismicité modérée tel que celui de la France Métropolitaine. En effet, le faible nombre de séismes destructeurs survenus ces dernières décennies en France et ayant fait des victimes implique un nombre limité d'observations exploitables pour calibrer les modèles.

De ce fait, nous avons adopté une approche mêlant à la fois données observationnelles et modélisées. Pour ce faire, les deux indicateurs retenus comme étant les plus pertinents pour aider la sécurité-civile à dimensionner sa réponse opérationnelle sont d'une part le nombre de personnes décédées (indicateur noté par la suite « DCD »), et d'autre part le nombre de personnes sans-abris (indicateur noté par la suite « NSA »).

3.1.1. Données observationnelles

Avec un bilan d'une unique victime décédée, le séisme d'Arette du 13 août 1967 est le seul séisme meurtrier survenu en France Métropolitaine ces 50 dernières années. Il est cependant intéressant d'examiner le nombre de personnes ayant été exposées au différents niveaux d'intensité sur cette même période. Pour ce faire, nous avons croisé les valeurs d'intensité communale extrapolées à partir de la base de données SISFRANCE (cf. Rey *et al.*, 2015) issues de l'ensemble des séismes ayant généré des intensités supérieures ou égales à VI survenus en Métropole depuis 1960, avec le carroyage de population de l'INSEE (tableau 1). Même si la population de la France a sensiblement évolué au cours du temps depuis 1960, on peut considérer que les résultats ainsi obtenus fournissent des ordres de grandeur relativement fiables.

Intensité	Population exposée	Nb. séismes	Nb. DCD (obs.)	Nb. NSA (obs.)	Taux de mortalité (obs.)	Taux de mortalité (valeur max.)
6	~ 560 000	36	0	?	-	1.8E-06
6.5	~ 180 000	17	0	?	-	5.6E-06
7	~ 55 000	9	0	?	-	1.8E-05
7.5	~ 4 000	3	0	?	-	2.5E-04
8	~ 1 600	1	1	?	6.0E-04	6.0E-04

Tableau 1. Estimation du nombre de personnes exposées depuis 1960 à différents niveaux d'intensité sur le territoire métropolitain. Sont également reportés : le nombre de séismes ayant atteint chaque niveau d'intensité sur la période considérée, le nombre de personnes décédées constatées, et les taux de mortalités calculés.

Le nombre de personnes décédées étant une variable prenant des valeurs discrètes, il est possible d'interpréter une valeur nulle comme représentative de l'intervalle [0 - 1]. Cela revient donc à considérer que même lorsque qu'aucune victime décédée n'est constatée, la probabilité qu'il aurait pu y en avoir une est non-nulle. Il est alors possible de calculer l'intervalle correspondant en termes de « taux de mortalité » :

$$\frac{Nb..DCD_{min}}{Pop.exp osée} \leq v \leq \frac{Nb..DCD_{max}}{Pop.exp osée}, \quad \text{soit : } 0 \leq v \leq \frac{1}{Pop.exp osée} \quad [1]$$

Avec : v le taux de pertes (ici le taux de mortalité)

Les valeurs maximales de taux de mortalité ainsi calculées sont reportées dans le tableau 1, et peuvent être utilisées pour la calibration comme valeurs majorantes. Les observations disponibles relatives aux séismes survenus en France métropolitaine depuis les années 1960 ne fournissent en revanche aucune information utile quant au nombre de sans-abris.

3.1.2. Données modélisées

Au-delà des quelques observations décrites au paragraphe précédent, les évaluations de pertes consécutives à un séisme les plus fines pouvant être réalisées à ce jour reposent sur l'utilisation de modélisations de

l'endommagement physique du bâti par scénario de risque, par exemple en utilisant le logiciel ARMAGEDOM (Sedan *et al.*, 2013). Le recours à ce type de modélisations nécessitant de disposer au préalable de données relatives à la vulnérabilité du bâti et à l'exposition des populations, celui-ci est délicat en période de gestion de crise, et ne permet le plus souvent pas la production rapide (en moins d'une heure) d'estimation de bilans. C'est pour cette raison qu'une approche de type PAGER est particulièrement intéressante, puisque rapide à mettre en œuvre et ne dépendant pas de connaissance a priori du territoire. Dans ce contexte, il a été décidé d'utiliser le logiciel ARMAGEDOM afin de simuler des bilans réalistes de séismes fictifs couvrant tous les niveaux d'intensités entre V et X, et ainsi de calibrer les courbes de taux de pertes.

En pratique, neuf valeurs croissantes d'intensité ont été appliquées sur cinq zones pilotes pour lesquelles le BRGM disposait de données de vulnérabilité du bâti courant. Pour chacune de ces simulations, le logiciel ARMAGEDOM procède à l'estimation de l'endommagement du bâti selon les six classes de dommages de l'EMS-98, puis traduit ces dommages physiques en termes de bilans humains. Concernant l'estimation du nombre de personnes décédées (et blessées), celle-ci est effectuée sur la base des matrices empiriques de Coburn et Spence (2002).

Déterminant pour la gestion de crise, l'estimation du nombre de sans-abris est en revanche plus délicate, tant cette notion est subjective et évolutive dans le temps : en effet, cette notion n'inclue pas uniquement les personnes résidentes dans les bâtiments ayant subi des dommages notables, et intègre aussi une part émotionnelle, avec par exemple des personnes effrayées n'osant plus réintégrer leurs logements pourtant non-endommagés. Nous nous concentrerons pour notre part sur l'estimation du nombre de sans-abris au premier jour du séisme, chiffre qui intègre à la fois des sans-abris « de longue durée » pour lesquels les autorités devront trouver des solutions d'hébergement de long-terme, et « de courte durée » qui pourront rapidement regagner leurs logements ou trouveront d'eux-mêmes des solutions de relogement. Aussi nous sommes nous servi des chiffres communiqués par la protection civile italienne relatives d'une part au niveau d'endommagement du bâti, et d'autre part au nombre de personnes considérées comme sans-abris au premier soir après la survenue des récents séismes italiens de 2009 et 2011 (communications personnelles avec les services de la protection civile italienne), pour établir une correspondance empirique entre niveau de dommage et nombre de sans-abris. On considère ainsi que l'ensemble des personnes indemnes résidant dans des logements endommagés à un niveau D3 ou supérieur (selon l'échelle EMS98) doit être relogé, ainsi qu'une portion des résidents de bâtiments en niveau de dommage D2 qui représente les résidents de bâtiments pouvant rapidement être réintégrés après le séisme. Cette portion des résidents en D2, qui intègre à la fois une part émotionnelle des sans-abris (liée à la peur de rentrer chez soi) et une part contextuelle ou environnementale (ex. un bâtiment peu endommagé situé dans un périmètre globalement endommagé ne pourra pas être réintégré), est supposée croissante avec l'intensité :

$$NSA(I) = a(I) * R_{D2+} - R_{D3,D4,D5} - (R_{vict.}) \quad [2]$$

Avec : NSA(I) le nombre total de personnes sans-abris au sein de l'isoséiste d'intensité I, R_{Dx} le nombre de personnes résidant dans des bâtiments endommagés avec un niveau de dommage DX au sein de la zone d'intensité I, $R_{vict.}$ le nombre de victimes (décédées ou blessées), et a un coefficient empirique fonction de l'intensité I.

3.3. Calibration des courbes empiriques de pertes

A l'instar de l'approche PAGER, les taux de perte parmi la population (dans notre cas : mortalité ou sans-abris) sont supposés suivre une loi de distribution normale en fonction de l'intensité (Jaiswal *et al.*, 2009) :

$$v(I) = \phi \left[\frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{I}{\theta} \right) \right] \quad [3]$$

Avec : $v(I)$ le taux de perte (mortalité ou sans-abris) parmi la population exposée à un niveau d'intensité I , Φ la fonction de distribution normale standard cumulée, θ et β les paramètres empiriques caractérisant la forme de la distribution

La méthode de régression proposée par Jaiswal *et al.* (2009) - et décrite en détail dans leur rapport - a donc été suivie afin de déterminer les coefficients de la loi normale les plus adaptés à la France pour l'estimation des décédés et des sans-abris (cf. tableau 2). Le modèle de perte ainsi obtenu pour la France pour l'estimation du nombre de décédés est compris entre les modèles PAGER de l'USGS définis d'une part pour l'Europe du Nord (zone à laquelle l'USGS associe la France), et d'autre part pour l'Italie. Ainsi, alors qu'il est très proche du modèle PAGER donné pour la France pour les faibles intensités, notre modèle indique-t-il des taux de mortalité plus importants pour les intensités les plus hautes, se rapprochant en cela du modèle italien (cf. figure 2).

	DCD	NSA
β	0.18 (0.24)	0.15
θ	13.86 (18.63)	8.82

Tableau 2. Coefficients empiriques des modèles de perte obtenus par minimisation de la fonction d'erreur à partir du catalogue de données synthétiques. Pour l'item « DCD », les valeurs obtenues par l'USGS pour l'Europe du Nord (dont la France) sont indiquées en italique entre parenthèses pour comparaison

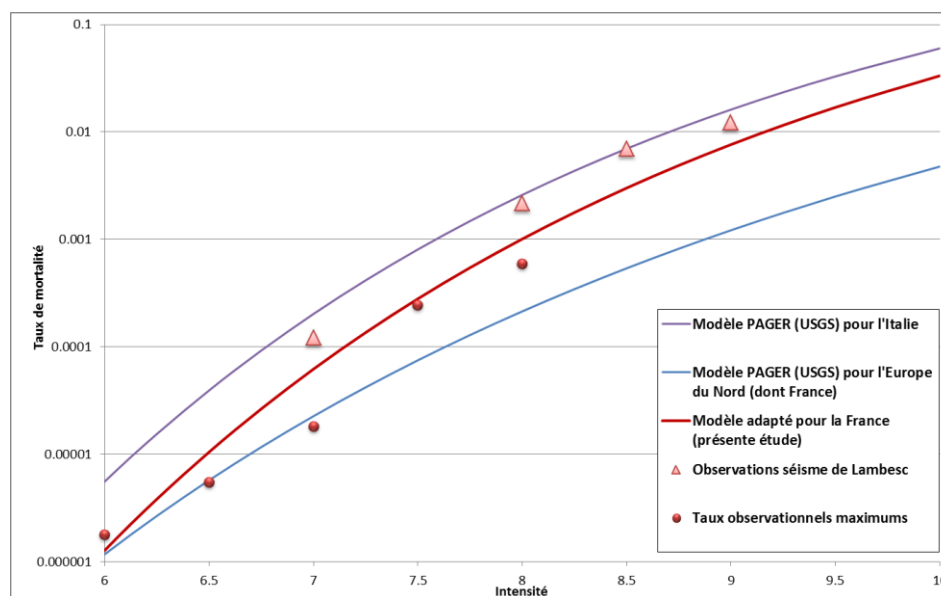


Figure 2. Représentation des taux de mortalités observés (points) et calculés (courbes) selon l'approche PAGER.

3.3.1. Confrontation des modèles empiriques à des données observationnelles

Le séisme de Lambesc du 11 juin 1909 a été le plus destructeur du XX^e siècle en France métropolitaine. D'après les sources documentaires contemporaines du séisme recensées dans la base de données SISFRANCE, le bilan humain total de ce séisme s'élève à 48 personnes décédées. L'examen de ces sources documentaires ont permis de localiser ces 48 victimes dans les différentes localités de la zone épicentrale, lesquelles étant également associées à une valeur d'intensité macrosismique (échelle MSK). Grâce à la base de données de l'EHESS (<http://cassini.ehess.fr/>), la population résidante en 1909 a par ailleurs pu être retrouvée pour chacune de ces localités, permettant ainsi de calculer un taux de mortalité par niveau d'intensité (cf. tableau 3).

Intensité MSK	Population en 1909	Nb. décès	Taux mortalité (σ/σ)
IX	1 156	14	12.1
VIII-IX	3 899	27	6.9
VIII	1 841	4	2.2
VII-VIII	-	-	-
VII	24 795	3	0.1
VI-VII	47 278	0	-
VI	~600 000	0	-

Tableau 3. Répartition des victimes décédées lors du séisme de Lambesc en fonction de l'intensité, et calcul du taux de mortalité rapporté à la population résidante en 1909.

Ces ratios de mortalité peuvent directement être comparés avec ceux issus de la calibration réalisée pour la France et présentés au paragraphe précédent (figure 2). Comme l'on pourrait s'y attendre de manière intuitive du fait de la baisse de la vulnérabilité moyenne du bâti depuis 1909, les ratios empiriques déduits du séisme de Lambesc sont sensiblement plus importants que ceux suggérés par la courbe calibrée pour la France, correspondant à un facteur de 2.0 ± 0.3 . Pour autant, les ratios ainsi obtenus suivent de manière très régulière le modèle établi pour la France, ce qui tend à nous conforter dans sa validité. A contrario, les valeurs obtenues pour ce séisme ne suivent pas du tout le modèle PAGER défini par l'USGS pour la France (modèle de l'Europe du Nord), dont elles s'écartent en moyenne d'un facteur 10.

Séisme		Nombre de sans-abris		
		Estimé	Observé	Notes
Barcelonnette (France) 2014		~ 20	< 50	Evacuation de quelques maisons au niveau de trois communes
Céphalonie (Grèce) 2014		~ 3 000	1000 à 10 000	« des milliers de personnes ont passé la nuit dehors par peur des répliques »
Emilie-Romagne (Italie) 2012	20 mai	~ 8 000	5 300	Population assistée lors des premières 48h selon la protection civile italienne
	29 mai	~ 10 000	15 000	
Lorca (Espagne) 2011		~ 3 500	3 000 à 60 000	60 000 personnes dans la rue la première nuit, c'est à dire, presque toute la ville (Santamaria <i>et al.</i> 2012) Capacité des premiers camps pour abriter entre 10 000 et 20 000 personnes. La presse parle elle de 3 000 personnes dont les logements sont inhabitables.
L'Aquila (Italie) 2009		~ 13 500	28 000	Population assistée lors des premières 48h selon la protection civile italienne

Tableau 4. Comparaison entre le nombre de sans-abris estimé par le modèle empirique de pertes présenté dans cette étude et le nombre de sans-abris observé pour quatre séismes européens récents.

De la même manière que pour les victimes décédées, nous avons cherché à analyser les données relatives aux sans-abris disponibles pour un certain nombre de séismes récents survenus en Europe (L'Aquila 2009, Lorca 2011, Emilie-Romagne 2012, Kefalonia 2014). A la différence du comptage des victimes décédées qui est objectif et donc généralement très précis, le comptage des sans-abris est au contraire très difficile à établir pour la double raison que la notion de sans-abris est à la fois émotionnelle et évolutive dans le temps. De ce fait, il est très difficile d'obtenir des données fiables et homogènes relatives aux séismes passés, et l'on dispose le plus souvent que de données agrégées par grandes zones géographique ou par lieu d'hébergement. Ainsi, pour le séisme de l'Aquila, la protection civile italienne a par exemple publié des courbes figurant l'évolution temporelle du nombre de personnes hébergées par camp : impossible dans ces conditions de rapporter un niveau d'agression

sismique à un nombre de sans-abris. A défaut de pouvoir comparer les « taux de pertes », il est cependant possible de comparer les bilans globaux par séismes entre, d'une part les bilans observés, et d'autre part ceux obtenus à l'aide de notre modèle empirique. Présentés dans le tableau 4, les résultats ainsi obtenus fournissent des ordres de grandeur globalement cohérents avec les bilans observés, et ce aussi bien pour des séismes d'impact modéré tels que celui de Barcelonnette du 7 avril 2014, que d'impact beaucoup plus importants.

3.3.2. Application des modèles empiriques aux principaux séismes métropolitains survenus depuis 1960

Les modèles d'estimation rapide des pertes tels que ceux en objet de la présente étude visent in-fine à être utilisés par les gestionnaires de crise pour disposer de grandes tendances quant à l'ampleur de la catastrophe. D'un point de vue pratique, il s'agit pour les services en charge de la sécurité-civile de dimensionner au mieux leur réponse opérationnelle, notamment en activant le plus rapidement possible des demandes de renforts adaptés à l'ampleur du séisme (i.e. moyens départementaux suffisants, ou au contraire nécessité d'un soutien zonal, national voire international). Dès lors, il ne fait pas sens pour ces utilisateurs d'avoir une estimation fine du nombre de personnes décédées et de sans-abris, mais bien d'obtenir des ordres de grandeur. En ce sens, le mode de représentation retenu par l'USGS de représenter les résultats de leurs évaluations selon des classes logarithmiques (0 à 1, 1 à 10, etc.) répond de manière pragmatique à cette attente.

Afin de tester la robustesse de nos modèles pour l'évaluation rapide des bilans humains consécutifs à la survenue de séismes sur le territoire métropolitain, la sismicité française survenue depuis les années 1960 a été analysée en déterminant, pour chaque séisme de magnitude M_w supérieure ou égale à 4.0 selon le catalogue SiHex (Cara *et al.*, 2015 ; soit 46 séismes), la population exposée par niveau d'intensité en considérant une interpolation des valeurs d'intensité fournies par la base de données SISFRANCE (cf. Rey *et al.*, 2015), puis en appliquant les taux de pertes déterminés dans la présente étude. Les événements le plus marquants de la période couverte 1960-2014 ont été analysés avec une attention particulière, et les résultats des estimations réalisées avec notre modèle ont été confrontés aux bilans réels tels qu'estimés qu'indiqués par les sources documentaires contemporaines disponibles dans la base de données SISFRANCE (cf. tableau 5). Il apparaît que les ordres de grandeurs des bilans obtenus par l'application de nos modèles de pertes sont globalement cohérents avec les bilans constatés consécutivement aux séismes métropolitains survenus depuis les années 60, et ce tant pour l'estimation du nombre de personnes décédées que pour le nombre de sans-abris.

Séisme	Mw SI-HEX	Nombre de décédés		Nombre de sans-abris	
		Estimé	Observé	Estimé	Observé
St-Dié, 2003	4.9	0	0	205	La presse évoque quelques bâtiments évacués par précaution le jour même, dont un centre de vacances : <u>probablement une centaine de sans-abris</u>
Epagny, 1996	4.9	2	0	2380	-
St-Paul de Fenouillet, 1996	4.7	0	0	38	-
Ile d'Oléron, 1972	5	1	0	1324	Sources documentaires faisant état de plusieurs dizaines de maisons lézardées ou sinistrées : <u>probablement plusieurs centaines de sans-abris</u>
Arette, 1967	5.2	2	1	1019	340 immeubles déclarés irréparables et 2283 endommagés (Rothe 1972) : <u>probablement plusieurs milliers de sans-abris</u>

Tableau 5. Comparaison entre le nombre de décédés et de sans-abris estimé par le modèle empirique de pertes présentés dans cette étude et observés pour quelques-uns des principaux séismes survenus en France métropolitaine depuis les années 60.

4. Vers la prise en compte de nouvelles sources de données

Alors que les outils de réponse rapide après séisme reposent le plus souvent sur les seules mesures réalisées à partir de capteurs sismologiques traditionnels, la possibilité offerte par l'outil ©ShakeMap de pouvoir intégrer dans l'analyse des données citoyennes qualifiant l'intensité macrosismique est particulièrement intéressante. Pour autant, ces données provenant de témoignages individuels recueillis sur internet via des questionnaires macrosismiques mis en ligne sur des sites institutionnels (en France par le BCSF), elles demeurent souvent insuffisantes pour couvrir de manière suffisamment rapide et homogène la zone affectée par le séisme.

Aussi, deux pistes s'annoncent aujourd'hui particulièrement prometteuses. La première concerne la mise en place de réseaux « citoyens » de surveillance sismique reposant sur l'usage des capteurs accélérométriques issus de la micro-électronique, à l'instar du réseau QCN (Quake Catcher Network) développé par l'université de Stanford (Cochran *et al.*, 2009). De très faible coût comparativement aux équipements professionnels et de plus en plus performants, ces capteurs embarqués dans les Smartphones, consoles de jeux ou autres PC-portables ou qui peuvent aussi se brancher en port-USB peuvent en effet venir utilement compléter les mesures traditionnelles pour mieux calibrer la réalisation des ShakeMaps (Lawrence *et al.*, 2014).

Par ailleurs, les réseaux sociaux constituent également une source d'information très intéressante. Très populaire et disposant d'un nombre croissant d'utilisateurs en France, le réseau de microblogging Twitter a notamment démontré sa capacité à diffuser de premières informations extrêmement rapidement suite à la survenue de séismes. En particulier, l'afflux de messages échangés (ou « crowdsourcing ») sur la notion de séisme est un excellent indicateur permettant de détecter automatiquement les séismes dès lors qu'ils sont suffisamment bien ressentis par la population, et ce plus rapidement que les réseaux sismologiques dédiés. Par ailleurs, le géoréférencement de certains tweets ainsi que la mention textuelle de lieux semble pouvoir permettre d'évaluer en quelques minutes seulement l'aire de perception des secousses sismiques. En France, de premières analyses de ce type ont été conduites avec succès sur les données échangées dans les minutes après la survenue du séisme de Barcelonnette du 7 avril 2014 (Marçot *et al.*, 2014). A l'instar de la méthodologie de détection sismique proposée par l'USGS et utilisée par son système TED (Tweet Earthquake Dispatch – cf. Earle *et al.*, 2011), de telles analyses rapides pourraient à court terme permettre de mieux calibrer les ShakeMaps.

5. Bilan et perspectives

L'évaluation rapide des bilans matériels et humains potentiels consécutifs à la survenue de séismes est un enjeu important pour les autorités en charge de la gestion de crise. Il s'agit pour eux de pouvoir disposer au plus vite de tendances fiables quant à l'ampleur de la crise, plutôt que d'estimations fines nécessitant une synthèse nécessairement longue de remontées d'informations en provenance du terrain. En cela, la méthodologie simplifiée du modèle « PAGER » semble parfaitement adaptée, et répond pragmatiquement aux besoins opérationnels. La calibration de ce modèle pour la France métropolitaine pour l'estimation rapide du nombre de décédés et de sans-abris présentée dans cette étude montre de bons résultats, et laisse entrevoir la possibilité d'établir des communiqués rapides adaptés aux services de la protection civile. La fiabilité de ces modèles demeure cependant en grande partie contrôlée par la capacité à évaluer rapidement l'ampleur des secousses sismiques, l'incertitude liée à l'estimation de l'intensité macrosismique pouvant en effet conduire à fausser de manière significative l'estimation des bilans. Cela plaide pour la généralisation à l'ensemble du territoire français du système de cartographie rapide *ShakeMaps* de l'USGS. En outre, la prise en compte de nouvelles typologies de données de « crowdsourcing » offre également des perspectives intéressantes pour améliorer la fiabilité de ces systèmes de réponse rapide.

6. Bibliographie

- Beauducel F., Bazin S., Bengoubou-Valérius M., *et al.*, « Empirical model for rapid macroseismic intensities prediction in Guadeloupe and Martinique », *C.R.Geoscience*, vol. 343, n°11–12, 2011, p. 717–728
- Bertil D., Roviro J., Jara J.A., Susagna T., Nus E., Goula X., Colas B., Dumont G., Cabanas L., Anton R., Calvet M., « ShakeMap implementation for Pyrenees in France-Spain border: regional adaptation and earthquake rapid response process », *Proc. of the 15th WCEE*, 2011, paper n° 2078.
- BRGM, EDF, IRSN, « Base de données SISFRANCE – www.sisfrance.net », dernier accès juin 2014.
- Cara M., Cansi Y., Schlupp A. *et al.*, « SI-Hex: a new catalogue of instrumental seismicity for metropolitan France. », *Bull. Soc. géol. France*, vol. 186, n°1, 2015, p. 3-19.
- Coburn A.W., Spence R.J.S. « Earthquake Protection », John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2nd edition, 2002.
- Cochran E.S., Lawrence J.F., Christensen C., Jakka R.S., « The Quake-Catcher Network; citizen science expanding seismic horizons », *Seismol. Res. Lett.*, Vol. 80, 2009, p 26–30.
- Crochet E., Auclair S., Bes de Berc S., Rey J., Sedan O., Winter T., « Les exercices RICHTER : outils de préparation des acteurs de la gestion de crise à la survenue de séismes de grande ampleur », *Proc. of the 9th AFPS General Assembly*, 2015.
- Earle P., Bowden D.C., Guy M., « Twitter Earthquake Detection: Earthquake Monitoring in a Social World. », *Annals of Geophysics*, vol. 54, n°6, 2011, p.708-715.
- Earle P.S., Wald D.J., Jaiswal K.S., Allen T.I., Marano K.D., Hotovec A.J., Hearne M.G., Fee J.M. « Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response (PAGER): A system for rapidly determining the impact of global earthquakes worldwide. » U.S. Geological Survey Open-File Report, 2009, n°1131
- Goula X., Dominique P., Colas B., Jara J.A., Roca A., Winter T., « Seismic rapid response system in the Eastern Pyrenees. » *Proc. of the 14th WCEE*, 2008, Beijing, China.
- Jaiswal K.S., Wald D. J., Hearne M., « Estimating casualties for large worldwide earthquakes using an empirical approach. » U.S. Geological Survey Open-File Report, 2009, n°1136.
- Lawrence J. F., Cochran E.S., Chung A., Kaiser A., *et al.*, « Rapid earthquake characterization using MEMS accelerometers and volunteer hosts following the M 7.2 Darfield, New Zealand, earthquake », *Bull. Seismol. Soc. Am.* Vol. 104, n°1, 2014, p184–192.
- Marçot N., Verrhiest-Leblanc G., Auclair S., Fontaine M., De Michele M., Raucoules D., Fissier L., Genois J-L., « Séisme de l'Ubaye du 7 avril 2014 - Rapport de retour d'expérience. », Rapport BRGM/RP-63789-FR, 2014.
- Rey J., Auclair S., Douglas J., Montfort D., « Etablissement d'une base de données des intensités historiques extrapolées pour toutes les communes françaises », *Proc. of the 9th AFPS General Assembly*, 2015.
- Rothe J.P., « La sismicité de la France de 1961 à 1970 », *Annales 1972 de l'Inst. de physique du globe de Strasbourg*, 1972, tome 9 – géophysique.
- Santamaria G.P., Gonzalez Lopez S., Alguacil L., « Análisis de Consecuencias y Actuaciones de Protección Civil en el Terremoto de Lorca (Murcia): Pre-Emergencia, Emergencia y Post-Emergencia. », *Física de la Tierra*, Vol. 24, 2012, p 343-362.
- Sedan O., Negulescu C., Terrier M., Roulle A., Winter T., Bertil D., « ARMAGEDOM – A tool for seismic risk assessment illustrated with applications », *Journal of Earthquake Engineering*, 2013, vol. 17, n° 2.
- Terrier M., Colas B., « ISARD : du démonstrateur vers une déclinaison opérationnelle. », Rapport BRGM n°RP-59169-FR, 2010.
- Wald D.J., Quitoriano V., Heaton T.H., Kanamori H., Scrivner C.W., Worden B.C., « TriNet "ShakeMaps": Rapid generation of peak ground-motion and intensity maps for earthquakes in southern California », *Earthquake Spectra*, vol. 15, n°3, 1999, p. 537-556.