



---

# Pertinence de divers indicateurs de nocivité à augurer des effets des séismes

**Bruno Hernandez**

CEA, DAM, DIF/DASE/SLDG, Centre DIF - Bruyères-le-Châtel, 91297 Arpajon, France

Bruno.hernandez@cea.fr

*RÉSUMÉ. Nous avons développé un outil qui permet, après un événement sismique, de juger rapidement du caractère nocif d'une agression sismique pour peu qu'un signal ait été acquis sur le site d'intérêt. Cet outil permet également de constituer une base d'indicateurs de nocivité sismique pour des études. Afin, d'identifier les indicateurs de nocivité les plus pertinents et de définir les seuils à partir desquels on commence à avoir des dégâts nous utilisons des paramètres de nocivité pour lesquelles nous disposons également de données macrosismiques fiables.*

*ABSTRACT. We developed a tool in order to judge quickly the harmful character of a seismic motion using a ground motion acquired at the site of interest. This tool is also useful for studies. In order to identify the best indicators of harm and the corresponding thresholds at which we begin to have damage, we only used accelerometric parameters for which we also have reliable macroseismic intensities.*

*MOTS-CLÉS : aléa sismique, indicateurs de nocivité, seuil d'apparition des dégâts.*

*KEYWORDS: seismic hazard, indicators of seismic harmfulness, threshold of damage apparition.*

---

## 1. Introduction

Les vibrations du sol générées par un tremblement de terre peuvent être enregistrées avec des stations sismiques. Près de la source, on utilise généralement des accéléromètres qui permettent de mesurer localement le mouvement du sol en fonction du temps sans saturer. Selon leurs caractéristiques en amplitude, durée et fréquence, les ondes sismiques peuvent endommager les ouvrages qu'elles secouent lors de leur passage.

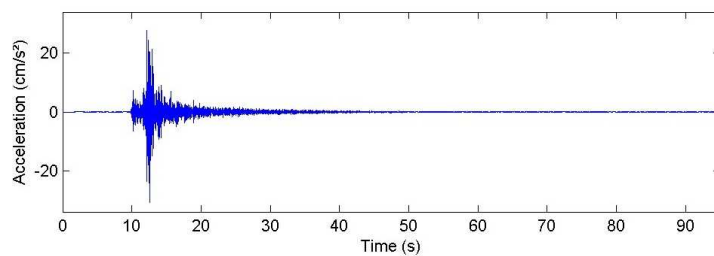
## 2. Principaux indicateurs de nocivité sismique

Pour les ingénieurs, le potentiel endommageant d'un séisme est une question primordiale. En effet, la conception d'un ouvrage nécessite la donnée d'un mouvement sismique, sous forme d'un spectre ou d'un accélérogramme et pose la question de l'évaluation de la nocivité du signal choisi, de sa représentativité ou de son conservatisme vis-à-vis de l'agression sismique susceptible de se produire. La littérature scientifique propose le plus souvent de caractériser la nocivité d'un séisme par des indicateurs sous forme de scalaires obtenus par un traitement plus ou moins complexe du signal sismique. La détermination d'un indicateur de nocivité unique adapté à tous les types de structures paraît sans fondement. Par exemple, l'endommagement des structures fragiles est plutôt contrôlé par le dépassement d'un seuil de sorte que le niveau d'excitation sera un paramètre

opportun pour décrire son potentiel endommageant. A l'inverse, l'endommagement des structures ductiles sera sensible à la durée de la sollicitation.

## 2.1. Représentation temporelle et valeurs maximales associées (PGA, PGV et PGD)

Un accélérogramme  $a(t)$  est une fonction à variations rapides autour de l'accélération nulle dont la durée totale  $D$  peut varier de quelques secondes à plusieurs minutes. Généralement, cette fonction se décompose en un niveau de bruit de fond initial pour lequel les accélérations sont faibles suivi d'une phase forte puis d'une phase modérée et enfin d'un retour progressif à un niveau d'accélération final comparable au niveau initial (Figure 1).



**Figure 1.** L'accélérogramme est la représentation de l'accélération en fonction du temps.

La quantité la plus directe est l'accélération maximale du sol, souvent appelée *PGA* (Peak Ground Acceleration). Sa définition est la suivante :

$$PGA = \underset{t \in [0, D]}{\text{Max}} \left( |a(t)| \right)$$

Le *PGA* a longtemps été, avec la durée, la seule quantité immédiatement accessible à une époque où seuls les enregistrements analogiques étaient disponibles. Le *PGA* a aussi un lien direct avec le spectre de réponse en accélération très largement utilisé en génie parasismique. Pour des séismes destructeurs, le *PGA* est généralement supérieur à  $1 \text{ m/s}^2$ . Cette seule valeur scalaire est très réductrice. Elle est généralement mal corrélée au pouvoir endommageant du signal sismique. Le *PGA* ne donne en effet aucune information ni sur la durée ni sur le contenu spectral de la sollicitation, paramètres essentiels à des calculs parasismiques détaillés. Toutefois des corrélations entre le *PGA* et l'intensité macrosismique sont souvent utilisées, ne serait-ce que pour donner une traduction quantitative simple aux informations issues de la sismicité historique. Les enregistrements montrent que des accélérogrammes de faibles *PGA* peuvent être plus destructeurs que des signaux présentant des accélérations élevées. C'est particulièrement le cas des séismes modérés enregistrés à des distances de l'ordre d'une dizaine de kilomètres qui sont riches en hautes fréquences (*PGA* élevé) qui ne génèrent pas de dommages sur les bâtiments. Ce paradoxe a clairement fait apparaître la nécessité d'associer à un niveau d'excitation la notion de durée.

En intégrant une fois l'accélérogramme on obtient le vélocigramme  $v(t)$  du mouvement. Une deuxième intégration permet d'obtenir le sismogramme en déplacement  $d(t)$ . Nous obtenons :

$$v'(t) = a(t) = d''(t)$$

La valeur maximale en vitesse est généralement notée *PGV* et celle en déplacement *PGD* :

$$PGV = \underset{t \in [0, D]}{\text{Max}} \left( |v(t)| \right)$$

$$PGD = \underset{t \in [0, D]}{\text{Max}} \left( |d(t)| \right)$$

Pour prendre en compte d'une façon approchée le contenu spectral tout en gardant le concept simple de valeur maximale temporelle, il a été proposé de considérer non seulement le *PGA* mais aussi le *PGV* et le *PGD*. En effet, alors que le *PGA* est généralement associé au contenu spectral haute fréquence (quelques Hertz), le *PGV* est lui associé aux fréquences intermédiaires (autour de l'Hertz) et le *PGD* aux basses fréquences (en

dessous de l'Hertz). Pour un mouvement sismique destructeur, les valeurs varient généralement de quelques cm/s à plus d' 1 m/s pour le *PGV* et de quelques millimètres à quelques mètres pour le *PGD*. Le *PGV* et surtout le *PGD* sont beaucoup plus sensibles à la taille du séisme que le *PGA* car la taille du séisme agit beaucoup plus sur le contenu basse fréquence que sur le contenu haute fréquence du mouvement. L'estimation du *PGV* et surtout du *PGD* est moins directe que celle du *PGA*, puisqu'il faut intégrer une ou deux fois les accélérogrammes pour les estimer.

## 2.2. Représentation spectrale des mouvements forts

Les représentations spectrales sont très utilisées en sismologie. Elles portent des informations beaucoup plus riches et pertinentes que les simples valeurs temporelles maximales. Il existe deux types de représentations spectrales :

- les sismologues utilisent traditionnellement le spectre de Fourier en raison de la parfaite dualité temps-fréquence qu'il offre et de la possibilité d'établir des relations avec la physique de génération des ondes lors de la rupture sismique et de leur propagation (produits de convolution dans l'espace temporel qui se traduit par un simple produit dans l'espace dual des fréquences).

- Les ingénieurs des structures ont, quant à eux, pris l'habitude de raisonner en termes de spectre de réponse, une notion très bien adaptée à une modélisation simplifiée des structures de génie civil (réponse d'un oscillateur simple à un degré de liberté).

Les spectres de réponse tirent leur origine et leur intérêt de l'assimilation, en première approximation, du comportement sismique d'un bâtiment à la réponse d'un oscillateur simple à un degré de liberté. La représentation en spectre de réponse vise à donner accès directement aux mouvements subis par le centre de gravité de la structure. Considérons, un oscillateur viscoélastique linéaire à un degré de liberté, caractérisé par sa fréquence  $f$  et son amortissement  $\xi$ . Sous l'action du séisme caractérisé par une accélération  $a(t)$ , cet oscillateur subira un déplacement relatif  $u(t)$ , une vitesse relative  $u'(t)$  et une accélération absolue  $u''(t) + a(t)$ . On définit les spectres de réponse comme les maxima temporels des réponses de l'oscillateur en déplacement relatif, vitesse relative et accélération absolue :

$$S_d(f, \xi) = \text{Max}_{t \in [0, D]} \left( |u(t, f, \xi)| \right)$$

$$S_v(f, \xi) = \text{Max}_{t \in [0, D]} \left( |u'(t, f, \xi)| \right)$$

$$S_a(f, \xi) = \text{Max}_{t \in [0, D]} \left( |u''(t, f, \xi) + a(t)| \right)$$

En faisant varier la fréquence  $f$  de l'oscillateur, on obtient pour un amortissement  $\xi$  fixé, trois fonctions de la fréquence  $S_d(f)$ ,  $S_v(f)$ ,  $S_a(f)$  définissant les spectres de réponse en déplacement, vitesse et accélération. Ces fonctions sont habituellement représentées pour des valeurs discrètes de l'amortissement (2%, 5%, 10%, 20%...), la plus fréquente étant  $\xi=5\%$ .

Le spectre de réponse met en évidence le contenu fréquentiel du mouvement : il fournit la réponse maximale d'oscillateurs linéaires élastiques soumis à un mouvement sismique. Cette réponse se calcule simplement pour un oscillateur linéaire de masse  $m$ , de raideur  $k$  et d'amortissement  $c$ , dont le déplacement relatif par rapport à son support soumis à une excitation sismique représentée par son accélérogramme  $a(t)$  est  $u(t)$ .

$$m u''(t) + c u'(t) + k u(t) = m a(t)$$

En posant  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  ;  $\xi = \frac{c}{2\sqrt{k m}}$  et  $\omega_1 = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$ , la réponse de l'oscillateur s'écrit :

$$u(t) = -\frac{1}{\omega_1} \int_0^t a(\tau) e^{-\xi \omega_0 (t-\tau)} \sin(\omega_1 (t-\tau)) d\tau$$

D'après cette définition des spectres de réponse, on peut remarquer les propriétés suivantes :

$$S_a(\infty, \xi) = \text{Max}_{t \in [0, D]} (|a(t)|) = \text{PGA} \quad (\text{\grave{a} haute fr\u00e9quence } S_a \text{ tend vers le } \text{PGA} \quad \forall \xi \geq 0)$$

$$S_d(0, \xi) = \text{Max}_{t \in [0, D]} (|-d(t)|) = \text{PGD} \quad (\text{\grave{a} basse fr\u00e9quence } S_d \text{ tend vers le } \text{PGD} \quad \forall \xi \geq 0)$$

$$S_a(f, 0) = 4\pi^2 f^2 S_d(f, 0) = 2\pi f S_v(f, 0) \quad (\text{attention : pas g\u00e9n\u00e9ralisable \u00e0 } \xi \neq 0)$$

Si  $\xi$  est petit, alors  $\omega_1 \approx \omega_0$  et on peut faire l'approximation que :

$$S_v(f, \xi) \approx 2\pi f S_d(f, \xi)$$

$$S_a(f, \xi) \approx 4\pi^2 f^2 S_d(f, \xi)$$

Ces deux derni\u00e8res formules n'\u00e9tant qu'approximatives, deux autres quantit\u00e9s ont \u00e9t\u00e9 introduites \u00e0 partir du spectre de r\u00e9ponse en d\u00e9placement  $S_d$ . Ce sont le pseudo-spectre en vitesse ( $PS_v$ ) :

$$PS_v(f, \xi) = 2\pi f S_d(f, \xi)$$

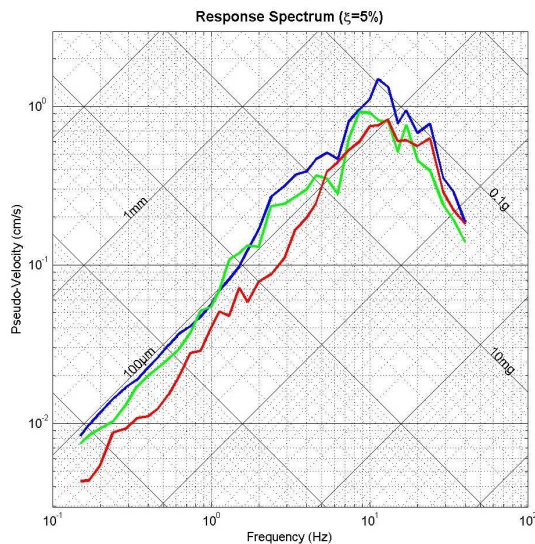
et le pseudo-spectre en acc\u00e9l\u00e9ration ( $PS_a$ ) :

$$PS_a(f, \xi) = 4\pi^2 f^2 S_d(f, \xi) = 2\pi f PS_v(f, \xi)$$

Cette derni\u00e8re relation autorise pour un amortissement donn\u00e9 (en g\u00e9n\u00e9ral  $\xi=5\%$ ) une repr\u00e9sentation quadrilogarithmique des pseudo-spectres de r\u00e9ponse (Figure 2), avec en abscisse le logarithme de la fr\u00e9quence  $f$  et en ordonn\u00e9e le logarithme du  $PS_v$ . Les valeurs du  $PS_a$  et du  $S_d$  peuvent alors se lire sur les axes diagonaux puisque :

$$\text{Log}(PS_a) = \text{Log}(PS_v) + \text{Log}(2\pi) + \text{Log}(f)$$

$$\text{Log}(S_d) = \text{Log}(PS_v) - \text{Log}(2\pi) - \text{Log}(f)$$

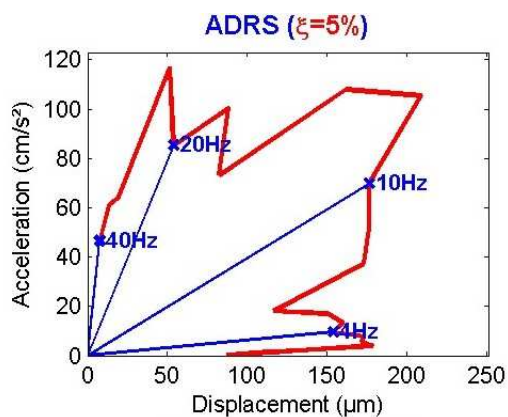


**Figure 2.** Exemple d'une repr\u00e9sentation quadrilogarithmique de pseudo-spectres de r\u00e9ponse avec un amortissement de 5%. Nous pouvons lire en abscisse le logarithme de la fr\u00e9quence et en ordonn\u00e9e le logarithme du pseudo spectre de r\u00e9ponse en vitesse. Les valeurs du pseudo spectre de r\u00e9ponse en acc\u00e9l\u00e9ration et du spectre de r\u00e9ponse en d\u00e9placement se lisent sur les axes diagonaux de cette repr\u00e9sentation graphique.

La fréquence associée à la valeur maximale du spectre de réponse indique la fréquence la plus excitée. A un spectre de réponse donné, correspond une infinité de traces temporelles, ayant toutes la même valeur maximale en accélération et en déplacement mais ayant des durées et des phases très variées. L'information, sur la répartition de l'arrivée de l'énergie dans le temps n'est plus présente dans la représentation du mouvement sous la forme de spectre de réponse. La génération d'accélérogrammes adaptés à un spectre de réponse donnée est donc un exercice délicat mais toutefois nécessaire pour conduire des études temporelles. En effet, dans la plupart des réglementations le niveau d'aléa est défini sous la forme de spectres de réponse mais de nombreuses méthodes nécessitent des séries temporelles en particulier pour réaliser des études non-linéaires temporelles.

Les spectres de réponse élastiques sont très utilisés en ingénierie parasismique car, en première approximation, les structures simples peuvent être assimilées à un oscillateur à un degré de liberté dont la fréquence propre et l'amortissement sont à peu près connus. Les mouvements au centre de gravité peuvent alors être raisonnablement estimés dès lors que l'on suppose que la structure se comporte de manière élastique linéaire. Cette dernière hypothèse n'est évidemment plus vraie lorsque la structure est sévèrement endommagée : d'autres spectres de réponse non-linéaires ont donc été développés, les plus simples correspondant à un comportement élastoplastique parfait. Ils nécessitent l'introduction d'un paramètre supplémentaire, la demande en ductilité définie comme le rapport entre le déplacement maximal de la structure élastoplastique et celui de la structure élastique associée (c'est-à-dire ayant la même raideur et le même amortissement à faible accélération). Comme l'estimation de la réponse dynamique de systèmes non-linéaires est un exercice délicat, il a été proposé récemment de remplacer l'analyse non-linéaire temporelle par une analyse non-linéaire statique, appelée dans le jargon parasismique analyse « push-over » (relation entre l'effort appliquée et le déplacement subi). Des procédures ont alors été proposées pour transformer les spectres de réponse élastiques en courbes effort-déformation ou inversement pour transformer ces dernières en courbes sur une représentation  $PS_a-S_d$ , en reliant la force à l'accélération par le biais de la masse modale.

La représentation  $PS_a-S_d$  du spectre de réponse ou représentation ADRS (Accélération-Displacement Response Spectrum ; Figure 3) est construite à partir des ordonnées du spectre de réponse en déplacement pour ses abscisses et de celles du pseudo-spectre de réponse en accélération pour ses ordonnées.



**Figure 3.** Sur cette représentation ADRS du spectre de réponse avec un amortissement de 5% les droites radiales, issues de l'origine, correspondent à des isofréquences.

### 2.3. Autres indicateurs de nocivité

D'autres grandeurs ont une plus grande signification physique que les valeurs pics ( $PGA$ ,  $PGD$ ,  $PGV$ ), mais sont en même temps plus simples que les représentations spectrales. De très nombreux indicateurs ont été définis par les ingénieurs et les sismologues. Ne sont repris dans ce rapport que ceux qui ont trouvé un écho assez large dans la communauté parasismique à la date d'aujourd'hui.

### 2.3.1. Intensité spectrale ou intensité de Housner

Pour Benioff (1934) le potentiel endommageant d'un signal sismique devait s'exprimer comme l'intégrale du spectre de réponse en déplacement sur une gamme de fréquence. Sur ce principe Housner (1952) a défini l'intensité spectrale à partir des spectres de pseudo-vitesse avec amortissement fixé. Il a considéré l'intégrale du  $PS_v$  sur la gamme de périodes allant de 0.1 à 2.5 secondes. Cette gamme de fréquence (0,4 – 10 Hz) correspond au domaine d'intérêt pour la plupart des structures de génie civil.

$$I_H(\xi) = \int_{T=0,1s}^{T=25s} PS_v(T, \xi) dT = \int_{f=0,4Hz}^{f=10Hz} \frac{PS_v(f, \xi)}{f^2} df \quad (I_H \text{ s'exprime en m})$$

D'autres indicateurs, basés aussi sur l'intégration du spectre de réponse peuvent être définis en changeant les bornes de l'intégration, la variable d'intégration (période ou fréquence) ou encore la valeur de l'amortissement.

### 2.3.2. Intensité d'Arias

De nombreux indicateurs sont basés sur la fonction strictement croissante  $I(t)$  suivante :

$$I(t) = \int_0^t a^2(\tau) d\tau \quad (I \text{ s'exprime en } m^2/s^3)$$

La valeur finale de cette fonction est reliée à l'énergie contenue dans le signal. Arias s'en est servi pour définir l'intensité d'Arias :

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^D a^2(t) dt = \frac{\pi I(D)}{2g} \quad (I_A \text{ s'exprime en } m/s)$$

Le théorème de Parseval permet d'interpréter l'intensité d'Arias comme une grandeur proportionnelle à l'énergie pour une direction donnée et par unité de masse injectée dans l'ensemble des structures de fréquence comprises entre zéro et l'infini. L'intensité d'Arias peut être utilisée pour évaluer le facteur de sécurité vis-à-vis du risque de liquéfaction (Kayen et Mitchell, 1997).

### 2.3.3. Durée de phase forte et durée de Trifunac

La durée  $D$  de l'accélérogramme est arbitraire car elle est largement conditionnée par le seuil de déclenchement des appareils de mesures et par les paramètres de pré et de post événements choisis. Cela ne lui offre qu'une représentation physique limitée, d'autant plus que les phases à faibles accélérations, d'une durée variable, sont généralement sans intérêt pour l'analyse des structures. Il a donc été nécessaire de définir une durée de phase forte plus significative pour conduire l'analyse sismique d'un ouvrage. Cette durée est généralement définie à l'aide du diagramme d'Husid qui est la représentation graphique de la fonction  $I(t)$  normalisée par sa valeur maximale. C'est une fonction croissante qui vaut 0 % à  $t=0$  et 100 % à  $t=D$  :

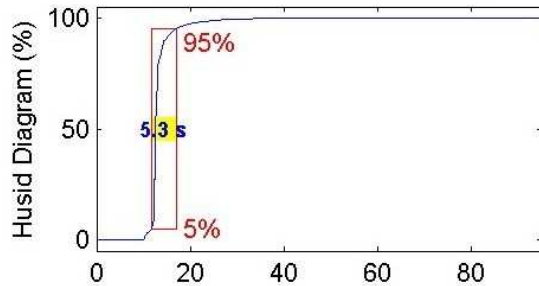
$$H(t) = \frac{I(t)}{I(D)} \quad (H \text{ s'exprime en } \%)$$

Le diagramme d'Husid permet de définir une durée de phase forte de la manière suivante :

$$D_{PF}(\alpha_1, \alpha_2) = t(\alpha_2) - t(\alpha_1) \text{ avec } t(\alpha_i) \text{ tel que } H(t(\alpha_i)) = \alpha_i ; \alpha_i \in [0,1] ; \alpha_1 < \alpha_2$$

La définition la plus répandue de cette durée de phase forte est la durée de Trifunac (Trifunac et Brady, 1975). C'est la durée de phase forte correspondant à l'intervalle de temps entre les valeurs de 5% et 95% du diagramme de Husid (Figure 4) :

$$D_T = D_{PF}(5\%, 95\%) = t(5\%) - t(95\%) \text{ où } H(t(5\%)) = 0,05 \text{ et } H(t(95\%)) = 0,95$$



**Figure 4.** Exemple de calcul de durée de phase forte selon la durée de Trifunac.

Une autre définition, un peu moins courante de la durée de phase forte correspond à l'intervalle de temps séparant le premier et le dernier point ayant une accélération (en valeur absolue) supérieure à une valeur donnée (on prend souvent ce seuil égal à 0,05 g).

#### 2.3.4. Accélération quadratique moyenne

Une fois une durée de phase forte définie, on peut définir une accélération quadratique moyenne  $a_{RMS}(\alpha_1, \alpha_2)$  sur cette durée de la manière suivante :

$$a_{RMS}(\alpha_1, \alpha_2) = \sqrt{\frac{(\alpha_2 - \alpha_1) I(D)}{D_{PF}(\alpha_1, \alpha_2)}}$$

#### 2.3.5. CAV

Un autre indicateur visant à caractériser le potentiel destructeur d'un accélérogramme est le CAV (Cumulative Absolute Velocity). Il est défini de la manière suivante :

$$CAV = \int_0^D |a(t)| dt$$

Le CAV représente la surface cumulée comprise entre l'accélérogramme et l'axe des temps.

### 3. Intérêt des indicateurs de nocivité sismique

Parmi les indicateurs recensés précédemment, aucun, aussi complexe soit-il, n'est suffisant à lui seul pour caractériser totalement des mouvements sismiques complexes. L'endommagement des structures fragiles est essentiellement contrôlé par le niveau d'excitation. A l'inverse, l'endommagement des structures ductiles est surtout sensible à la durée de la sollicitation. Il est donc recommandé pour décrire la nocivité d'un signal enregistré lors d'un séisme particulier ou pour calculer la tenue aux séismes d'une structure d'utiliser une panoplie d'indicateurs pertinents. L'ensemble de ces indicateurs doit renfermer des informations relatives aux

valeurs maximales temporelles, au contenu fréquentiel, à la durée de phase forte et à l'énergie totale du signal sismique.

### 3.1. Indicateur de nocivité et ShakeMap

Les données acquises à l'aide de stations de mouvement fort pendant un séisme permettent d'avoir accès à la nocivité sismique à l'endroit où la donnée a été acquise. Quand elles sont disponibles en nombre suffisant, ces données sont utilisées afin de mieux cerner la zone où les mouvements ont été les plus agressifs. On peut les utiliser pour caler des ShakeMap qui sont des cartes représentant généralement l'amplitude maximale du mouvement du sol en accélération ou en vitesse générée par le tremblement de terre qui vient de se produire. Dans les pays disposant de très nombreuses stations de mouvement fort, les données de ces stations permettent de déterminer des intensités instrumentales. Cela permet d'avoir une estimation cartographique de l'agressivité des vibrations bien plus rapidement que lorsque l'on doit établir une carte d'intensité classique à partir d'une enquête auprès de la population et d'une appréciation des dommages.

### 3.2. Indicateurs de nocivité et systèmes d'arrêt d'urgence

Des capteurs de mouvement forts reliés à un dispositif d'alerte en cas de dépassement de seuil de nocivité permettent la mise en sécurité d'installations à risque ou l'arrêt d'urgence de moyen de transport ou plus marginalement l'évacuation immédiate de bâtiments dans de grandes agglomérations comme la ville de Mexico où l'on dispose de quelques secondes pour réagir.

## 4. Seuil de nocivité correspondant à l'apparition des dommages

L'information cruciale que cherchent à avoir les personnes concernées par les secours immédiatement après un gros tremblement de terre est l'étendue géographique de la zone de dégâts. En temps réel, les données de mouvements forts permettent d'avoir une idée de l'ampleur des dégâts sur les structures proches des stations. En effet il existe un seuil de nocivité sismique au-delà duquel les niveaux de dommages croissent brusquement.

### 4.1. Relation entre Nocivité et Dommage

Le niveau de nocivité à partir duquel des dommages commencent à apparaître peut être évalué à l'aide de tables vibrantes (Nazé, 2004) sur des structures particulières. Ces études montrent qu'une seule valeur seuil en amplitude (PGA par exemple) n'est pas suffisante pour relier simplement le niveau d'endommagement à cet indicateur de nocivité. En effet l'endommagement dépend aussi de la durée du signal, de ses fréquences dominantes et de la vulnérabilité des structures à ces fréquences.

### 4.2. Relations entre Nocivité et Intensité

Le seuil d'apparition des dommages peut aussi être estimé à partir de relations empiriques entre les valeurs de nocivité atteintes en un lieu et le niveau d'intensité observé en ce même lieu (Souriau, 2006). Cette approche a l'avantage de prendre en compte de manière globale un ensemble de structures caractéristiques du type de construction d'une région et pas simplement quelques bâtiments particuliers. Il n'existe pas de paramètre de nocivité idéal afin d'estimer l'intensité toutefois certains paramètres semblent plus appropriés que d'autres. Par exemple le PGV est de plus en plus préféré au PGA qui fut le premier indicateur utilisé.



### 4.3. Seuil de nocivité

Afin d'identifier les indicateurs de nocivité les plus pertinents et les seuils à partir desquels on commence à avoir des dégâts, on peut suivre la méthodologie de Reed et Kassawara (1990). Appliquée au niveau d'intensité VI, cette méthode peut se formuler de la manière suivante :

- Tout d'abord, à partir d'une base de données de mouvements forts, on associe à chaque indicateur de nocivité une valeur d'intensité quand cela est possible et on rejette les autres données.
- On cherche ensuite la valeur de l'indicateur la plus petite (seuil de nocivité) sur l'ensemble des données pour lesquelles l'intensité est strictement supérieure à VI.
- On compte enfin le nombre d'enregistrements ayant une valeur d'intensité inférieure ou égale à VI et pour lesquels la valeur de l'indicateur de nocivité est supérieure à la valeur seuil définie dans le point précédent. Ces cas sont ceux pour lesquels l'indicateur considéré va de façon erronée mais conservatrice prédire un endommagement supérieur au niveau de dégât réellement observé.

Si l'on applique cette méthode à un ensemble de 513 accélérogrammes européen (Danciu, 2006) on obtient les résultats synthétiques du Tableau 1.

Indicateur de nocivité	Seuil de nocivité (I > VI) - pertinence de l'indicateur à augurer des dégâts	Pourcentages d'enregistrement au dessus du seuil de nocivité en fonction du niveau d'intensité		
		IV et moins	V et moins	VI et moins
<b>PGA</b>	50 cm/s <sup>2</sup> - <b>moyenne</b>	1,2 %	12,9 %	31,9 %
<b>PGV</b>	3 cm/s - <b>bonne</b>	<b>0,6 %</b>	5,7 %	26,5 %
<b>PGD</b>	0,2 cm - <b>mauvaise</b>	14,4 %	46,2 %	74,7 %
<b>Durée de Trifunac</b>	2,2 s - <b>très mauvaise</b>	20,1 %	55,2 %	82,8 %
<b>Intensité d'Arias</b>	4,8 cm/s - <b>bonne</b>	<b>0 %</b>	<b>0,4 %</b>	10,3 %
<b>CAV</b>	143 cm/s - <b>bonne</b>	<b>0 %</b>	<b>0 %</b>	11,5 %
<b>Intensité de Housner</b>	1 m - <b>bonne</b>	<b>0,4 %</b>	9,4 %	24,6 %

**Tableau 1.** Tous les lieux d'observation ayant dépassé le niveau d'intensité VI ont au minimum atteint le seuil de nocivité indiqué dans la seconde colonne.

Le Tableau 1 montre, pour chacun des indicateurs retenus, le seuil en dessous duquel aucun mouvement fort n'est présent dans la base de données quand l'intensité a dépassé le niveau VI. Cela garantit, si la base est représentative des mouvements sismiques qui peuvent être atteints, qu'aucun dommage correspondant à un niveau d'intensité supérieur à VI puisse être provoqué par un niveau de nocivité inférieur à ce seuil de nocivité.

Le Tableau 1 montre aussi le pourcentage de données de mouvement fort pour l'indicateur de nocivité considéré ayant dépassé le seuil de cet indicateur mais ne correspondant qu'à une intensité inférieure ou égale à VI ou à V ou à IV. Dans ce tableau, plus le pourcentage de données ayant dépassé le seuil (bien que l'intensité soit inférieure ou égale à VI) est grand moins l'indicateur de nocivité est pertinent pour estimer les dommages. Ainsi sur les bases d'un indicateur de nocivité ayant dépassé le seuil on peut estimer de façon conservatrice qu'un

mouvement a créé des dégâts alors qu'il n'en a pas forcément créé. Il est donc recommandé de focaliser son attention sur les indicateurs de nocivité les plus pertinents. Comme on peut le remarquer dans le tableau, le CAV et l'intensité d'Arias sont les paramètres les plus pertinents car ce sont ceux qui indiquent le plus faible nombre de fausses estimations de dommage (seuil de nocivité dépassé alors que l'intensité est en fait inférieure ou égale à VI). Pour ces deux indicateurs seulement 11% des données ont dépassé le seuil alors que l'intensité n'a pas dépassé VI.

## 5. Conclusion

Afin de traiter les données accélérométriques, nous avons développé un outil qui, après un événement sismique, permet de juger rapidement du caractère nocif d'une agression sismique pour peu qu'un signal ait été acquis sur le site d'intérêt.

L'étude de la nocivité du signal sismique ne suffit toutefois pas à prédire à coup sûr les dommages subis par les structures d'une part parce que la représentation scalaire de la nocivité n'est pas toujours facile à relier à la réalité physique à laquelle est confrontée la structure du fait des caractéristiques propre au bâti considéré et d'autre part à cause de la grande dispersion des dommages souvent constatée pour un même niveau de nocivité sismique.

## 6. Bibliographie

- Benioff V.H. (1934). « The physical evaluation of seismic destructiveness ». *Bulletin of the Seismological Society of America*, 24, 398-403.
- Danciu L. (2006) Development of a system to assess the earthquake damage potential for buildings: Intensiometer. PhD thesis, University of Patras.
- Housner, G.W. (1952) « Intensity of ground motion during strong earthquakes. Technical Report: CaltechEERL:1952.EERL.1952.001.
- Kayen, R.E., and Mitchell, J.K. (1997). « Assessment of Liquefaction Potential During Earthquakes by Arias Intensity ». *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1162-1174.
- Nazé, P.-A. (2004). Contribution à la prédiction du dommage des structures en béton armé sous sollicitations sismiques. Thèse de doctorat, INSA Lyon.
- Reed J.W., R.P. Kassawara (1990). « A criterion for determining exceedance of the operating basis earthquake ». *Nuclear Engineering and Design*, Volume 123, Issues 2-3, 2, Pages 387-396
- Souriau A. (2006). « Quantifying felt events: A joint analysis of intensities, accelerations and dominant frequencies ». *Journal of Seismology*, 10, 23-38.
- Trifunac, M. D. and Brady, A. G. (1975). « On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded ground motion ». *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65, 139-162.