

Partie I : Aléa sismique et géologique

Apport des données accélérométriques et caractérisation géophysique pour le dimensionnement parasismique

Contribution of accelerometric data and geophysical characterization for paraseismic design

Résumé

À proximité des failles actives ou sur les sites sensibles, l'enregistrement des mouvements sismiques est généralement réalisé à l'aide d'accéléromètres, car ils offrent une large dynamique de mesure permettant de ne pas atteindre la saturation. Les paramètres des secousses à enregistrer dépendent à la fois des caractéristiques de la source sismique et du milieu de propagation des ondes jusqu'au site d'enregistrement, il est nécessaire de bien caractériser les propriétés géotechniques et géophysiques des couches superficielles du sol. En effet, celles-ci ont une forte influence sur l'amplitude, la durée et le contenu fréquentiel des ondes sismiques qui sont mesurées. Ces paramètres qui définissent les caractéristiques de la nocivité des secousses sont ensuite utilisés pour dimensionner les structures à protéger.

Abstract

Near the earthquake source or sensitive areas, accelerometers are generally used because of their ability to measure the strong ground motion without saturation. The seismic motion characteristics depend on the seismic source and on the propagation medium up to the data recording site. So, it is necessary to characterize the geotechnical and geophysical properties of soil layers because of their strong influence on the amplitude, duration and frequency content of the seismic waves. These harmful ground motion parameters are then used to design the structures.

B. HERNANDEZ,
A. DECHAMP, V. BOUTIN,
V. NOAILHAC,
A. LAURENDEAU
CEA – DAM Île-de-France
F. HOLLENDER
CEA Cadarache
S. THOMASSIN
RÉSONANCE Ingénieurs-
Conseils SA, Carouge, Suisse
S. GODEY
Centre sismologique
euro-méditerranéen (CSEM),
Bryères-le-Châtel

Les termes spécialisés et les sigles, définis dans le glossaire en fin de numéro, apparaissent en bleu.

L'estimation des mouvements sismiques potentiels est nécessaire pour caractériser l'aléa sismique auquel les structures à dimensionner peuvent être soumises. Pour répondre à cette demande, un effort de la communauté scientifique et des gestionnaires des risques a consisté à développer les réseaux accélérométriques (Réseau accélérométrique permanent – RAP – en France) [1]. Ce développement prend en considération à la fois l'évolution des capteurs, la mise en service de nouvelles stations sismologiques et la caractérisation des sites d'enregistrement.

La France est une région où la sismicité est faible à modérée (voir articles 2 et 3, ce numéro). Même si le nombre d'enregistrements sismiques disponibles a considérablement augmenté ces dernières années, les séismes, contre les effets desquels on cherche à se prémunir, ont de grandes périodes de retour et n'ont pas encore été enregistrés. Pour pallier ce manque, les mouvements sismiques enregistrés dans des contextes sismotectoniques similaires, dans des régions actives et couvertes par un réseau de capteurs, peuvent être employés pour dimensionner les structures.



Actuellement, plusieurs projets européens visent à constituer des bases de données de mouvements forts (voir par exemple la base européenne RESORCE dans le projet SIGMA [2]) et à proposer de nouveaux modèles empiriques pour la prédiction du mouvement sismique. Ces modèles étant calés sur des données enregistrées dans différentes stations à la géologie contrastée (sédimentaire, rocher...), il est important de bien caractériser les conditions de sites pour mieux quantifier leurs effets sur le mouvement sismique. Dans ce cadre, des études visent à proposer une caractérisation validée et justifiée des sites. Le CEA participe à des actions menées par le groupement d'intérêt scientifique RAP [1] visant à caractériser les sites où sont installées les stations du Réseau accélérométrique permanent français. Dans le cadre du projet Cashima (CAdarache Seismic Hazard Integrated Multidisciplinary) et du benchmark InterPacific (Intercomparaison of Methods for Site Parameter and Velocity Profile Characterization), qui sont portés par le CEA, différentes méthodes de caractérisation sont comparées.

La sollicitation sismique

Les secousses sismiques peuvent être représentées sous la forme d'accélérogrammes ou encore de spectres. Dans le domaine de l'aléa, elles sont aussi décrites par des indicateurs de nocivité. Ces paramètres sont des grandeurs physiques calculées à partir des accélérogrammes qui représentent l'agressivité des mouvements sismiques pour les structures. Les bases de données accélérométriques permettent de caler des modèles de prédiction des mouvements sismiques. Ces modèles décrivent la décroissance des indicateurs de nocivité en fonction de la distance entre la source et le site, leur croissance avec la magnitude et, plus généralement, leur dépendance vis-à-vis d'autres phénomènes physiques pouvant modifier les propriétés des ondes sismiques depuis la source jusqu'au site d'intérêt. Ces modèles sont ensuite utilisés pour évaluer l'aléa sismique qui, pour chaque indicateur de nocivité, définit un niveau qui est utilisé pour dimensionner les structures (encadré).

Indicateurs de nocivité

Pour quantifier l'agressivité d'un mouvement sismique, des indicateurs de nocivité sont employés. Les scientifiques du génie parasismique utilisent principalement le spectre de réponse qui donne la réponse maximale en déplacement, vitesse ou accélération de la structure (figure 1).

Il existe de très nombreux indicateurs. Ne sont repris ici que ceux qui ont trouvé un large écho dans la communauté parasismique. En intégrant une fois l'accélérogramme, nous obtenons le vélocigramme. Une deuxième intégration permet d'obtenir le sismogramme en déplacement. À partir des représentations temporelles du mouvement sismique, on définit classiquement trois indicateurs de nocivité notés PGA (Peak Ground Acceleration), PGV et PGD qui correspondent respectivement aux valeurs maximales de l'accélérogramme, du vélocigramme et du sismogramme en déplacement.

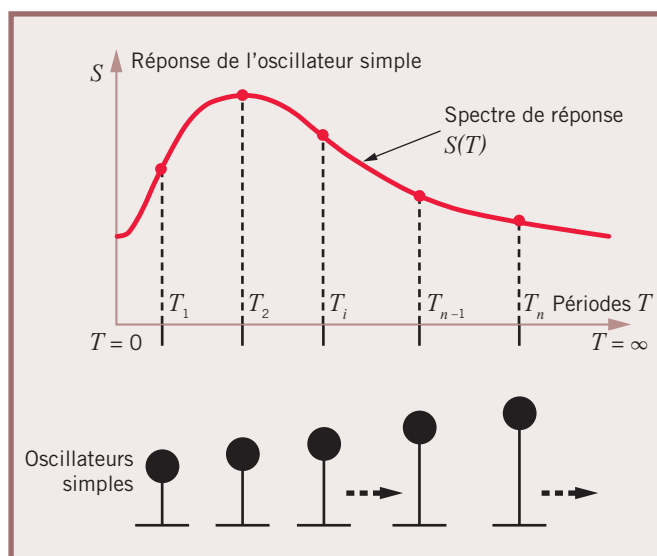


Figure 1

Le spectre de réponse représente les amplitudes maximales (en ordonnée) de la réponse d'oscillateurs à un degré de liberté, avec des périodes de vibration différentes (en abscisse), soumis à la même sollicitation sismique pour un amortissement fixé.

Le potentiel endommageant d'un signal sismique peut aussi s'exprimer comme l'intégrale du spectre de réponse en déplacement sur une gamme de fréquences. L'intensité spectrale calculée sur des périodes allant de 0,1 à 2,5 secondes s'appelle l'intensité de Housner. Cette gamme de fréquences (0,4 - 10 Hz) correspond au domaine d'intérêt pour la plupart des structures de génie civil.

De nombreux indicateurs sont basés sur la fonction de l'intégrale du carré de l'accélération a , car la valeur finale de cette fonction est liée à l'énergie contenue dans le signal. Par exemple, l'intensité d'Arias I_A est définie de la manière suivante :

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^D a^2(t) dt$$

Cette fonction croissante, normalisée par sa valeur finale, s'appelle le diagramme d'Husid (il vaut 0 % au début de la secousse sismique et 100 % quand celle-ci est terminée). La durée de l'accélérogramme D est arbitraire, car elle est largement conditionnée par le seuil de déclenchement des appareils de mesure 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. Le diagramme d'Husid permet de définir une durée de phase forte correspondant à l'intervalle de temps entre les valeurs de 5 % et 95 % de ce diagramme.

Prise en compte du risque sismique dans le dimensionnement d'installations nucléaires

La démarche globale de prise en compte du risque sismique lors de la conception d'installations nucléaires nouvelles ou de la réévaluation d'ouvrages existants est dictée par les textes suivants :

- la règle fondamentale de sûreté RFS n° 2001-01 [12] définissant la méthode de détermination des caractéristiques des séismes à retenir pour les sites accueillant les installations nucléaires de base dites « de surface » ;
- le guide ASN 2/01 [13] proposant des méthodes de modélisation et de calcul pour la détermination de la réponse sismique des ouvrages ;
- les règlements techniques en vigueur imposant les critères de dimensionnement à vérifier pour la démonstration de la bonne tenue sismique des structures.

L'exemple pris est celui d'un portique de manutention d'une installation nucléaire dont le modèle de calculs par éléments finis est illustré sur la figure E1.

Le guide ASN 2/01 préconise une démonstration linéaire de la tenue sismique de la structure, soit par une approche spectrale modale basée sur les spectres de sol du site considéré transférés au niveau des chemins de roulement du portique, soit par une approche temporelle transitoire basée sur un jeu d'accélérogrammes représentatifs des spectres transférés évoqués ci-dessus. Dans l'hypothèse où ces deux approches ne se révèlent pas pertinentes, du fait de non-linéarités géométriques, de déformations plastiques ou de déplacements relatifs de parties en contact (glissement ou décollement des galets de roulement du portique par exemple), le guide admet

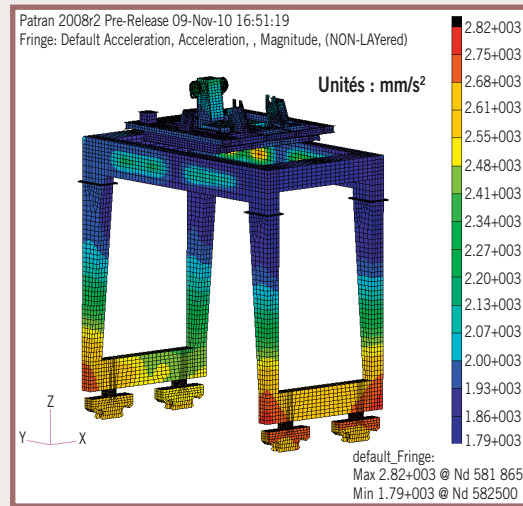


Figure E1
Exemple de portique choisi pour notre étude.

la mise en œuvre de calculs non linéaires plus délicats et nécessitant des validations complexes. Seule l'approche spectrale linéaire est abordée ici. Cette dernière permet le calcul de la réponse sismique du portique à l'aide d'une modélisation élastique linéaire en raideur et visqueuse en amortissement.

L'action sismique est représentée par un spectre d'oscillateurs par direction (figure E2) et des règles d'emploi sont associées, en particulier la règle de combinaison des maxima modaux.

La méthode spectrale permet la détermination de la valeur absolue maximale d'une grandeur physique scalaire dépendant linéairement de l'amplitude des modes.

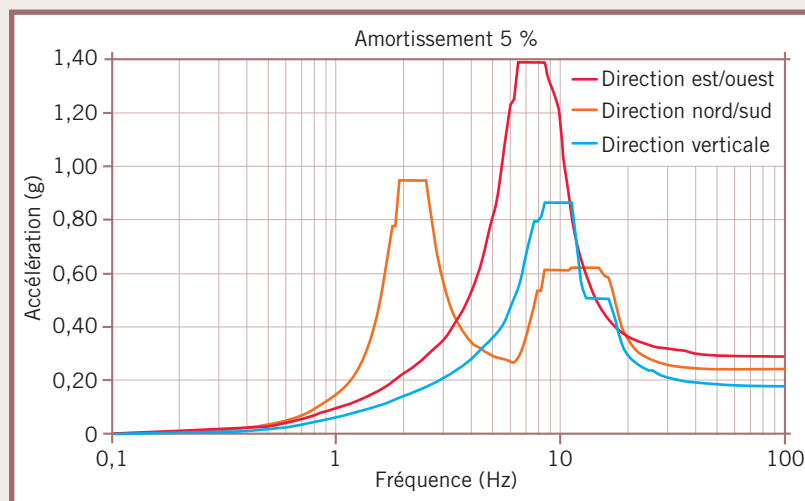


Figure E2
Spectres sismiques transférés au niveau des chemins de roulement du portique.

Les différentes étapes de cette méthode sont les suivantes :

- la détermination des modes propres du portique, des fréquences propres et des coefficients de participation modale par direction de séisme ;
- la détermination des amortissements réduits modaux, compte tenu des amortissements des matériaux de l'équipement ;
- la détermination, par direction de séisme, de l'amplitude maximale de la réponse de chaque mode à partir de la lecture, à la fréquence et à l'amortissement du mode, du spectre appliqué (figure E2) et du coefficient de participation du mode dans la direction considérée ;
- l'établissement de la réponse du portique à une direction de séisme, par combinaison des différentes réponses modales correspondantes. Pour être représentative dans le cas général des hypothèses sur le signal sismique, cette combinaison requiert l'établissement de coefficients de corrélation des réponses modales maximales ;

- l'établissement de la valeur absolue de la réponse globale du portique à toutes les directions de séisme par combinaison des réponses aux trois directions de séisme.

La figure E1 illustre la réponse sismique en accélérations du portique à l'issue de l'analyse spectrale linéaire, après combinaison des réponses maximales des modes et des directions sismiques.

Outre les déplacements, vitesses et accélérations sismiques, le modèle de calculs donne accès aux états de contraintes dans les parties courantes du portique (palées, poutres, chariot) et aux torseurs d'efforts dans les mécanismes de translation et de direction (boggies, galets), les mécanismes du levage (tambour, poulies de renvoi, points fixes, câbles) et ceux du mouflage (moufle, crochet). Ces contraintes et efforts sont utilisés pour vérifier la tenue sismique de la structure par comparaison aux critères de dimensionnement imposés par les règlements techniques, en l'occurrence les règles pour le calcul des appareils de levage [14].

suite

encadré

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.

Les indicateurs couramment utilisés sont définis dans le tableau 1 et illustrés sur la figure 2.

Indicateur de nocivité	Sigles	Définition	Caractéristiques		
			Amplitude	Durée	Contenu fréquentiel
Pic d'accélération du sol (m/s ²)	PGA	$PGA = \text{Max}_{t \in [0, D]} (a(t))$	X		
Pic de vitesse du sol (m/s)	PGV	$PGV = \text{Max}_{t \in [0, D]} (v(t))$	X		
Pic de déplacement du sol (m)	PGD	$PGD = \text{Max}_{t \in [0, D]} (d(t))$	X		
Intensité d'Housner (m)	I_H	$I_H(\xi) = \int_{T=0,1s}^{T=2,5s} PS_v(T, \xi) dT$	X		X
Intensité d'Arias (m/s)	I_A	$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^D a^2(t) dt$	X	X	X
Durée de phase forte (s)	D	Intervalle de temps entre 5 % et 95 % sur le diagramme d'Husid		X	
Vitesse cumulée absolue (m/s)	CAV	$CAV = \int_0^D a(t) dt$	X	X	X

Tableau 1

Définition des principaux indicateurs de nocivité sismique.

En plus des paramètres de ce tableau, il est important de savoir que chaque point du spectre de réponse est un indicateur de nocivité qui est l'amplitude spectrale du spectre de réponse à un oscillateur ayant une fréquence propre et un amortissement donnés.

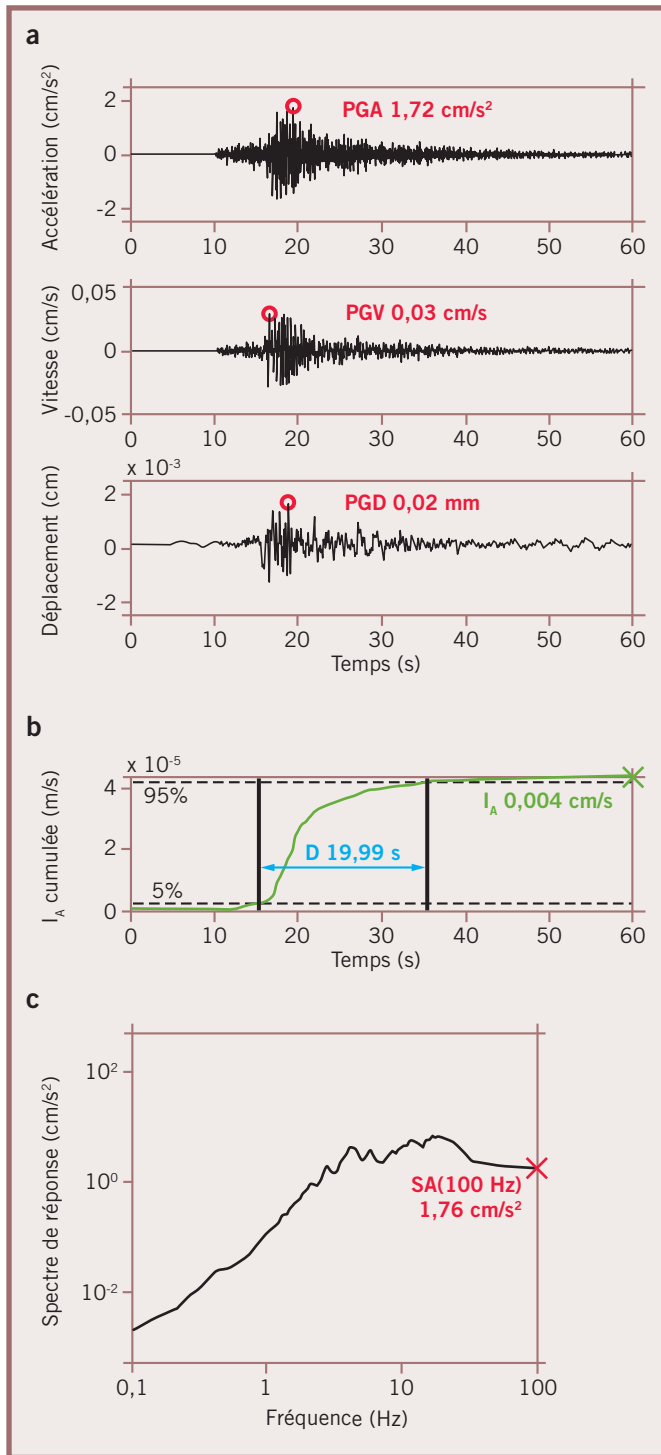


Figure 2
Indicateurs de nocivité calculés sur la composante est-ouest du signal sismique du séisme de magnitude 4,8 dans la région de Lourdes le 30 décembre 2012 à 23 h 35 enregistré à la station accélérométrique EPF du CEA/DASE.
(a) : Traces temporelles (en accélération, vitesse et déplacement) sur lesquelles sont indiqués les pics (PGA, PGV et PGD) par un cercle rouge.
(b) : Intensité d'Arias (I_A) cumulée au cours du temps et durée de phase forte (D) entre 5 et 95% de I_A .
(c) : Spectre de réponse en accélération dont chaque point est un indicateur de nocivité correspondant à l'amplitude du spectre de réponse à un oscillateur ayant une fréquence propre et un amortissement donnés.

Relation entre nocivité et dommages

Les spectres de réponse et les courbes de capacité des structures peuvent être comparés pour déterminer si la conception est sécurisante (figure 3). Si la courbe du spectre de réponse coupe celle de capacité dans le domaine élastique ou près de celui-ci, alors la conception est sécurisante ; sinon, la conception n'est pas adéquate ; on peut même atteindre l'effondrement puis la ruine.

Le niveau de nocivité à partir duquel des dommages commencent à apparaître peut être, dans certains cas, évalué à l'aide de tables vibrantes sur des structures particulières [3]. 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.

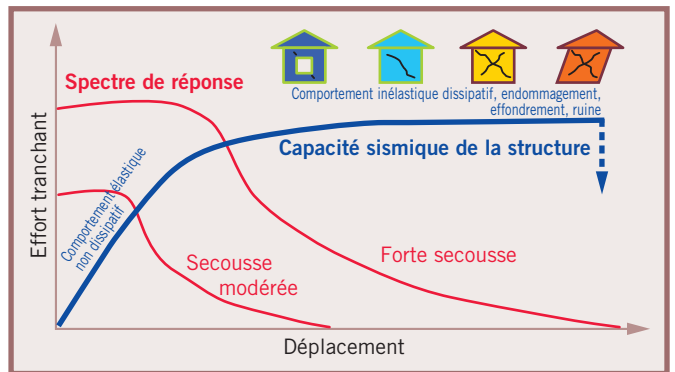


Figure 3
Comparaison de deux spectres de réponse pour deux niveaux de secousse avec la courbe de capacité d'une structure.

Le seuil d'apparition des dommages peut aussi être estimé à partir de relations empiriques entre les valeurs des indicateurs de nocivité atteintes en un lieu et le niveau d'intensité macrosismique [4] observé en ce même lieu. Cette approche statistique a l'avantage de prendre en compte l'ensemble des types de construction d'une région et pas simplement quelques bâtiments particuliers.

Exemple d'application

La méthodologie de Reed et Kassawara, développée en 1990 [5], permet d'identifier les indicateurs de nocivité les plus pertinents et les seuils à partir desquels des dégâts apparaissent. Cette méthode a été appliquée à une sous-base de données accélérométriques européenne [2] composée de 513 accélérogrammes pour lesquels une mesure d'intensité macrosismique était disponible. Les différents indicateurs de nocivité présentés précédemment ont été estimés. Pour les données avec une intensité macrosismique supérieure à VI (dégâts), la plus faible valeur de chacun des indicateurs est identifiée. Cette valeur correspond au seuil de nocivité de l'indicateur pour une intensité VI (tableau 2, colonne 2). Pour les données avec une intensité inférieure ou égale à VI, le nombre d'enregistrements avec une valeur d'indicateur dépassant la valeur seuil est comptabilisé.



Indicateur de nocivité	Seuil à partir duquel toutes les observations ont une intensité supérieure à VI <i>Validité de l'indicateur à augurer des dégâts</i>	Pourcentages d'enregistrement au-dessus du seuil de nocivité en fonction du niveau d'intensité		
		IV et moins 103 enregistrements	V et moins 278 enregistrements	VI et moins 429 enregistrements
PGA	50 cm/s ² - moyenne	1,2 %	12,9 %	31,9 %
PGV	3 cm/s - bonne	0,6 %	5,7 %	26,5 %
PGD	0,2 cm - mauvaise	14,4 %	46,2 %	74,7 %
Durée de phase forte	2,2 s - très mauvaise	20,1 %	55,2 %	82,8 %
Intensité d'Arias	4,8 cm/s - bonne	0 %	0,4 %	10,3 %
CAV	143 cm/s - bonne	0 %	0 %	11,5 %
Intensité de Housner	1 m - bonne	0,4 %	9,4 %	24,6 %

Tableau 2
Seuil d'apparition des dégâts.

Le seuil d'apparition des dégâts (indiqué dans la deuxième colonne) correspond à la valeur de l'indicateur de nocivité sismique au-delà de laquelle toutes les observations ont une intensité macrosismique supérieure à VI. Le seuil est ainsi fixé car, au-delà de l'intensité VI, les dégâts commencent à devenir modérés (intensité VII), puis importants (intensité VIII). L'intensité VI correspond à des dégâts légers et, de I à V, il n'y a plus de dégâts (le ressenti est toutefois fort pour l'intensité V et devient faible pour une intensité III).

Cette information est indiquée dans le **tableau 2** sous la forme de pourcentages de données pour une **intensité macrosismique** inférieure ou égale à VI (dégâts légers), V (fortement ressenti) et IV (largement ressenti).

Dans ce tableau, plus le pourcentage de données ayant dépassé le seuil est grand, moins l'indicateur de nocivité est pertinent pour estimer les dommages. Le CAV et l'intensité d'Arias sont les paramètres les plus pertinents : seulement 11 % des données ont dépassé le seuil alors que l'intensité n'a pas dépassé VI. La durée de phase forte est, quant à elle, le paramètre le moins pertinent avec plus de 82 % des données ayant dépassé la valeur seuil. Contrairement aux autres indicateurs, le CAV et l'intensité d'Arias contiennent de l'information à la fois sur les amplitudes, la durée et le contenu fréquentiel du mouvement sismique (**tableau 1**), ce qui peut expliquer leur pertinence.

L'étude de la nocivité du signal sismique ne suffit toutefois pas à prédire à coup sûr les dommages subis par les structures,

puisque une dispersion des dommages pour un même niveau de nocivité sismique peut être observée. Une partie de cette variabilité peut être directement reliée aux conditions de site d'enregistrement des mouvements sismiques et/ou aux interactions avec les structures présentes.

Caractérisation des conditions de sols

Pour mieux prendre en compte les **effets de site** ou étudier les mouvements au rocher [6], ou encore caractériser les propriétés géotechniques ou géophysiques d'un site sur lequel on veut estimer l'**aléa sismique** [7], des reconnaissances géophysiques sont réalisées. Elles incluent une méthode active (MASW) et une méthode passive (AVA) utilisées pour l'exemple du site de la station sismique d'Arette, PYAT, dans les Pyrénées (**figure 4**).

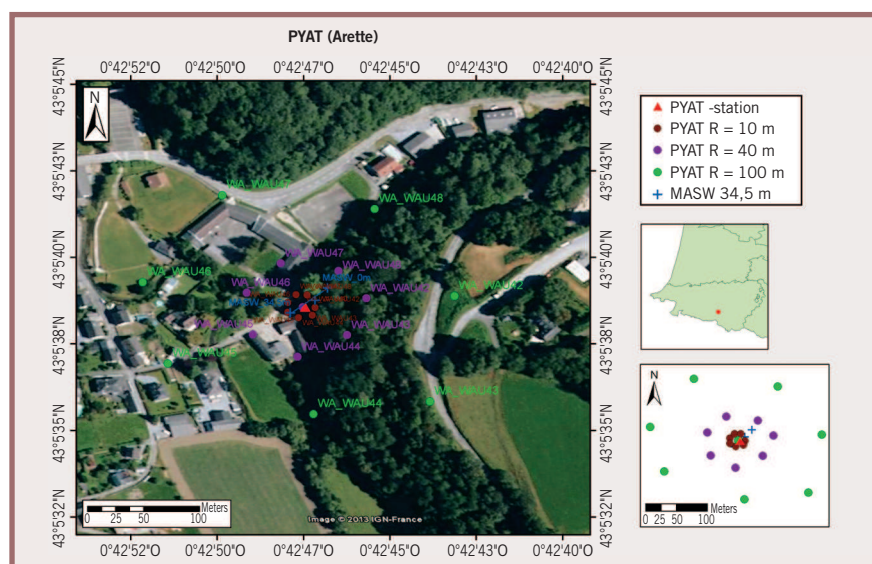


Figure 4
Exemple de reconnaissance sur la station d'Arette (PYAT) : localisation et géométries des mesures effectuées.

Ces deux méthodes de prospection, développées ci-après, basées sur les propriétés dispersives des **ondes sismiques de surface**, sont complémentaires, car elles permettent de couvrir des gammes de fréquences et profondeurs différentes en fonction de la géométrie des capteurs mis en place. L'objectif est d'obtenir, à partir des données traitées *via* ces deux méthodes, des profils de vitesse en **ondes S** (ondes de cisaillement) et plus particulièrement une valeur de V_{S30} (valeur moyenne de la vitesse des **ondes S** sur les 30 premiers mètres), permettant de « classer » le sol selon l'Eurocode 8 [8].

Méthode active MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

Elle consiste à déployer une ligne de capteurs sismiques à base de géophones (figure 5) et à enregistrer les vibrations produites par une source ponctuelle en surface localisée aux deux extrémités et au milieu de la ligne.

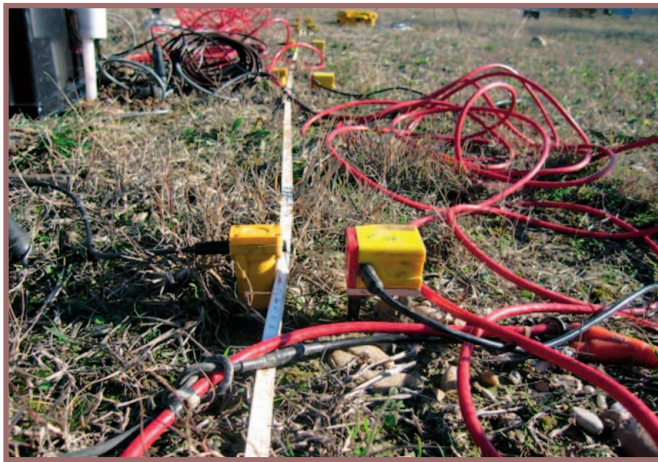


Figure 5
Lignes de géophones implantées sur le terrain lors de mesures MASW.

L'analyse des signaux obtenus vise à déterminer la vitesse de propagation des **ondes de surface** (Rayleigh et Love) qui dépend de la fréquence. Les grandes longueurs d'onde échantillonnent les couches les plus profondes, qui présentent des rigidités et vitesses de propagation plus grandes, tandis que les petites longueurs d'onde échantillonnent les couches superficielles, généralement plus meubles, aux vitesses de propagation plus lentes. Une analyse *FK* (fréquence-nombre d'onde) permet de passer du domaine temporel au domaine fréquentiel. On obtient ainsi la courbe de dispersion qui donne la variation de la vitesse des ondes en fonction de la fréquence (figure 6).

Méthode passive AVA (Ambient Vibration Array)

Cette méthode est basée sur l'enregistrement synchrone du bruit ambiant par un réseau 2D de capteurs (réseaux en cercle, triangle...). Ces vibrations sont analysées de deux manières distinctes : la méthode H/V (voir article 6, ce numéro), qui permet

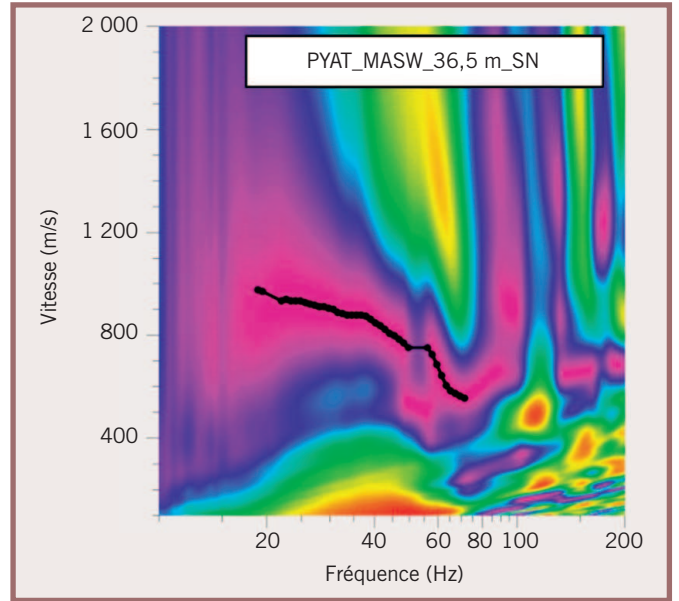


Figure 6
Exemple de distribution des vitesses de phase obtenues par la méthode MASW sur un site pyrénéen (PYAT).
Les courbes de dispersion sont pointées manuellement en noir sous le logiciel GEOPSY [9]. La couleur rose correspond au maximum de la fonction d'énergie dans le diagramme vitesse-fréquence.

de calculer la fréquence fondamentale du site $f = V_s/4h$ avec V_s la vitesse des ondes de cisaillement de la première couche de sol et h son épaisseur, et l'analyse en réseaux. Seule la seconde méthode permet de déterminer de manière directe la courbe de dispersion des **ondes de surface**. Le bruit de fond sismique étant composé principalement de ce type d'ondes, les techniques de traitement permettent d'extraire leurs propriétés dispersives. L'analyse des données se fait par des méthodes fréquence-nombre d'onde (figure 7) de façon similaire à l'analyse de signaux MASW mais pour une géométrie d'acquisition 2D, ou par méthode d'autocorrélation spatiale [10].

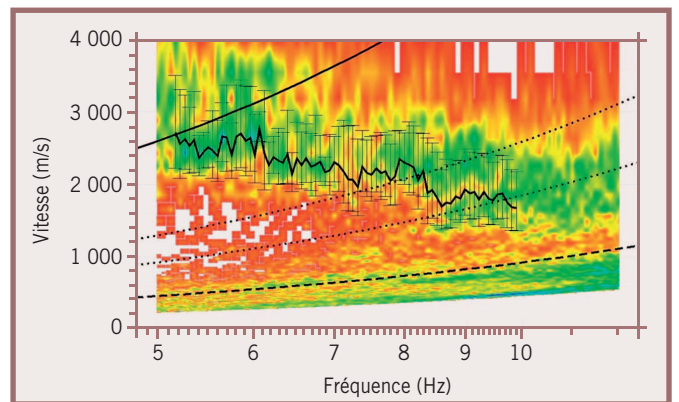


Figure 7
Courbe de dispersion (en noir) obtenue pour un réseau de 100 mètres de rayon sur PYAT.
Les couleurs représentent la densité de probabilité de la vitesse de phase pour chaque bande de fréquences (les couleurs verte et bleue correspondent aux densités de probabilité les plus fortes). Les autres courbes indiquent les limites de validité du réseau.



Inversion des courbes de dispersion

La dernière étape de l'interprétation consiste à inverser les courbes de dispersion issues des deux méthodes (figure 8) pour les différentes fréquences, afin d'obtenir les profils de vitesse des ondes S et une valeur de V_{S30} . Ce paramètre est utilisé pour caractériser géotechniquement la classe d'un sol dans le cadre de l'Eurocode 8 (détermination de la classe d'un sol en fonction du paramètre V_{S30}) [8].

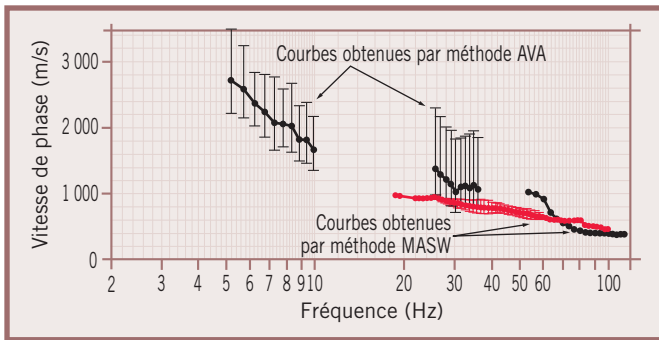


Figure 8
 Courbes de dispersion de Rayleigh (courbe noire) et Love (courbe rouge) utilisées pour l'inversion du site PYAT.

La courbe de dispersion est principalement fonction des vitesses d'ondes S dans le sous-sol et, dans une moindre mesure, des vitesses d'ondes P et des densités. Dans l'étape d'inversion, il existe souvent plusieurs jeux de paramètres qui ajustent la courbe expérimentale de manière analogue. L'objectif de cette étape est donc d'envisager les possibilités qui sont compatibles avec les résultats expérimentaux et cohérentes avec les hypothèses géologiques du milieu. Au fur et à mesure que l'inversion progresse, le maillage est adapté et la courbe de dispersion expérimentale est de mieux en mieux reproduite, ce qui permet de proposer un profil de vitesse des ondes S et de déduire ensuite une valeur de V_{S30} (figure 9).

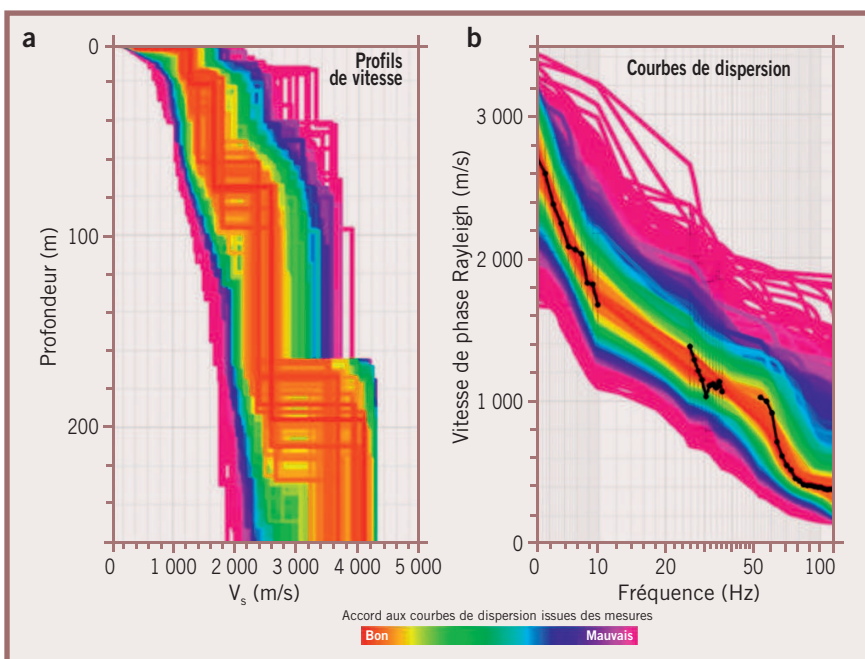


Figure 9
 Profils de vitesse inversés (a) et courbes de dispersion (b) pour le site PYAT (valeur de $V_{S30} = 1\ 075$ m/s, classe de sol A).
 Les profils de vitesse en rouge (a) sont ceux qui reproduisent le mieux les courbes de dispersion issues des mesures (en noir (b)).

Conclusion

Les accélérogrammes et les paramètres caractérisant les sites permettent de caler des modèles de prédiction des mouvements sismiques qui servent à évaluer l'aléa sismique en un site d'intérêt. Une fois le niveau d'aléa défini en termes de spectre de réponse ou d'indicateurs de nocivité, des accélérogrammes réels ou synthétiques compatibles et des spectres normalisés sont ensuite utilisés pour le dimensionnement parasismique des structures [11].

Dans les bases de données accélérométriques, l'analyse des incertitudes sur les paramètres relatifs aux événements (magnitudes des séismes, distances à la source...) et aux sites (V_{S30} ...) est un enjeu très fort. En effet, ces incertitudes impactent fortement la prédiction des mouvements sismiques et leur variabilité, et influencent au premier ordre les niveaux d'aléa, en particulier pour les périodes de retour élevées.

Le paramètre V_{S30} est classiquement utilisé pour caractériser le site dans les études d'aléa. Pour quantifier plus finement les effets de site, il apparaît nécessaire d'intégrer le profil de l'évolution des vitesses des ondes de cisaillement sur une profondeur d'investigation adaptée à chaque site étudié et de considérer les incertitudes associées.

Pour les sites les mieux caractérisés par des campagnes de prospection denses (géophysiques, géotechniques et géologiques), comme sur plusieurs sites tests en Grèce bien instrumentés et sur lesquels ont été enregistrés des séismes, il est possible de réaliser une modélisation 3D complète de la géométrie du bassin étudié et de comparer les résultats des calculs aux données enregistrées. Ces pistes de recherche ont naturellement vocation à être mises en œuvre dans les études d'aléa sismique (projets SIGMA et SINAPS@ et applications à des sites industriels).

Références

- [1] C. PÉQUEGNAT, P. GUÉGUEN, D. HATZFELD, M. LANGLAIS, "The French accelerometric network (RAP) and National Data Centre (RAP-NDC)", *Seismol. Res. Lett.*, **79**(1), p. 79-89 (2008).
- [2] S. AKKAR, M. A. SANDIKKAYA, M. SENYURT, A. AZARI SISI, B. O. AY, P. TRAVERSA, J. DOUGLAS, F. COTTON, L. LUZI, B. HERNANDEZ, S. GODEY, "Reference database for seismic ground-motion in Europe (RESORCE)", *Bull. Earthq. Eng.* (2013) - [doi: 10.1007/s10518-013-9506-8](https://doi.org/10.1007/s10518-013-9506-8).
- [3] P.-A. NAZÉ, *Contribution à la prédiction du dommage des structures en béton armé sous sollicitations sismiques*, Thèse de doctorat, INSA Lyon (2004).
- [4] *European Macroseismic Scale 1998*, sous la direction de G. Grünthal, *Cahiers du Centre européen de géodynamique et de séismologie*, vol. 19, Luxembourg (2001).
- [5] J. W. REED, R. P. KASSAWARA, "A criterion for determining exceedance of the operating basis earthquake", *Nucl. Eng. Des.*, **123**(2-3), p. 387-396 (1990) - [doi: 10.1016/0029-5493\(90\)90259-Z](https://doi.org/10.1016/0029-5493(90)90259-Z).
- [6] A. LAURENDEAU, F. COTTON, O.-J. KTENIDOU, L.-F. BONILLA, F. HOLLENDER, "Rock and Stiff-Soil Site Amplification: Dependency on V_{S30} and kappa (κ_0)", *B. Seismol. Soc. Am.*, **103**, p. 3131-3148 (2013) - [doi:10.1785/0120130020](https://doi.org/10.1785/0120130020).
- [7] F. HOLLENDER, C. GUYONNET-BENAIZE, A. DECHAMP, C. CORNOU, S. FOTI, F. GAROFALO, B. R. COX, M. OHRNBERGER, P.-Y. BARD, "Taking Advantage of the Different Shear Wave Velocity Evaluation Methods for a Better Characterization of Sites", *Proc. Seismological Society of America 2013*, Annual Meeting, 17-19 April, Salt Lake City, Utah (2013).
- [8] CEN (2005), Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European Standard EN 1998-1, Comité européen de normalisation, Brussels, Belgium (2005).
- [9] GEOPSY : Comprehensive and free platform for the interpretation of geophysical experiments (<http://www.geopsy.org>).
- [10] K. AKI, "Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors", *Bull. Earthquake. Res. Inst. Tokyo*, **25**, p. 415-457 (1957).
- [11] M. CAUSSE, A. LAURENDEAU, M. PERRAULT, J. DOUGLAS, L.-F. BONILLA, P. GUÉGUEN, "Eurocode 8-compatible synthetic time-series as input to dynamic analysis", *Bull. Earthq. Eng.* (2013) - [doi: 10.1007/s10518-013-9544-2](https://doi.org/10.1007/s10518-013-9544-2).
- [12] "Règle fondamentale de sûreté n° 2001-01 relative à la détermination du risque sismique pour la sûreté des installations nucléaires de base de surface".
- [13] Guide de l'ASN, *Prise en compte du risque sismique à la conception des ouvrages de génie civil d'installations nucléaires de base à l'exception des stockages à long terme des déchets radioactifs*, ASN/GUIDE/2/01.
- [14] *Règles pour le calcul des appareils de levage*, F.E.M 1.001 3^e édition révisée (1998).