



Estimation statistique de la répartition des classes de sol Eurocode 8 sur le territoire français Phase 1

Rapport final

BRGM/RP-66250-FR

Septembre 2016



Estimation statistique de la répartition des classes de sol Eurocode 8 sur le territoire français Phase 1

Rapport final

BRGM/RP-66250-FR
Septembre 2016

D. Monfort et A. Roullé

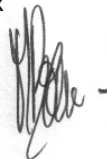
Avec la collaboration de

**J-M. Schroetter, M. Terrier, C. Cartannaz, B. Troadec,
L. Grabenstaetter et C. Greffié**

Vérificateur :

Nom : Myriam Belvaux

Date : 07/10/2016

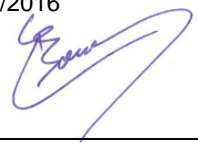


Approbateur :

Nom : Olivier Bouc

Date : 28/10/2016

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : Risque sismique, Règlementation parasismique, Eurocode 8

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

D. Monfort et A. Roullé avec la collaboration de J-M. Schroetter, M. Terrier, C. Cartannaz, B. Troadec, L.rabenstaetter et C. Greffié (2016). - Estimation statistique de la répartition des classes de sol Eurocode 8 sur le territoire français. Phase 1. Rapport final. Rapport BRGM/RP-66250-FR, 48 p., 14 fig., 7 tab., 1 ann.

© BRGM, 2016, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

À la demande de la DHUP, le BRGM a réalisé une analyse statistique de la répartition spatiale des classes de sol A, B, C, D, E (définies dans l'Eurocode 8, EC8) dans les zones de sismicité faible, modérée et moyenne du zonage sismique de la France. Une sélection de 52 départements métropolitains a été considérée.

Cette étude a consisté i) à classier l'ensemble des départements concernés (cf. Figure 1) en termes de classes de sol EC8 (hors zone d'aléa très faible), ii) à attribuer des niveaux de confiance à chaque classification (afin de traduire l'imprécision de l'estimation des classes de sol) puis iii) à croiser les informations obtenues sur les classes de sol avec les données d'urbanisme afin d'obtenir des indicateurs de répartition des classes de sol selon différents critères géographiques et urbanistiques.

Les résultats obtenus pour chacun des 51 départements de l'étude sont présentés sous forme d'indicateurs (Tableau 5 au Tableau 7 de l'annexe 1) correspondant au :

- pourcentage estimé de l'extension de chaque classe de sol dans les zones d'aléa faible à moyen (indicateur n° 1) ;
- pourcentage estimé de l'extension de chaque classe de sol dans les aires urbanisées en zone d'aléa faible à moyen (indicateur n° 2) ;
- nombre de maisons individuelles existantes concernées par classe de sol et zone d'aléa (indicateur n° 3).

Les deux premiers indicateurs ont été complétés par le calcul d'un indice de confiance rendant compte du niveau de confiance des classifications de sols EC8 sur un même département et une même zone de sismicité.

Ces résultats ont pour vocation à être utilisés dans le cadre d'une étude actuellement en cours et portée par le MEEM via la DHUP, visant à évaluer au niveau national le coût lié à l'application des règles parasismiques depuis 2011.

Sommaire

1. Introduction	7
2. Rappels sur la réglementation parasismique nationale et les classes de sol selon l’Eurocode8	9
2.1. ZONAGE SISMIQUE NATIONAL ET APPLICATION	9
2.2. LA CLASSIFICATION DES SOLS SELON L’EUROCODE 8.....	10
3. Caractérisation des classes de sol Eurocode 8 par département	13
3.1. CAS DES DÉPARTEMENTS DISPOSANT D’UNE CLASSIFICATION DES SOLS TIRÉE D’ÉTUDES ANTÉRIEURES	13
3.2. CAS DES DÉPARTEMENTS NE DISPOSANT PAS DE CLASSIFICATION PRÉALABLE	16
3.3. SYNTHÈSE DES DÉPARTEMENTS TRAITÉS	17
3.4. NIVEAU DE CONFIANCE DANS L’ATTRIBUTION DES CLASSÉS DE SOL EC8....	25
4. Estimation des indicateurs départementaux de répartition statistique des classes de sol EC8	27
4.1. INDICATEUR DÉPARTEMENTAL DE RÉPARTITION DES CLASSES DE SOL EC8 SUR LA SURFACE TOTALE DU DÉPARTEMENT	27
4.2. INDICATEUR DÉPARTEMENTAL DE DE RÉPARTITION DES CLASSES DE SOL EC8 SUR LA SURFACE URBANISÉE DU DÉPARTEMENT	28
4.2.1. Cartographie des zones habitées.....	29
4.2.2. Calcul de l’indicateur	30
4.3. INDICATEUR DÉPARTEMENTAL DE RÉPARTITION DU NOMBRE DE MAISONS INDIVIDUELLES PAR CLASSES DE SOL EC8.....	30
4.4. INDICE DE CONFIANCE ET VARIABILITÉ DES INDICATEURS	32
4.5. RÉSULTATS FINAUX PAR DÉPARTEMENT	34
4.6. RECOMMANDATIONS D’USAGE POUR DES ÉTUDES ULTÉRIEURES	36
5. Conclusions	37
6. Bibliographie	39

Liste des figures

Figure 1 : Départements concernés par l'analyse statistique des classes de sol (en vert).	8
Figure 2 : Carte du zonage sismique en vigueur depuis le 1 ^{er} mai 2011.	9
Figure 3 : Règles de construction parasismique applicables aux bâtiments neufs selon leur catégorie d'importance et leur zone de sismicité. La catégorie d'importance II se divise en deux, les maisons individuelles et l'habitat collectif.....	10
Figure 4 : Détermination du spectre de réponse réglementaire.....	11
Figure 5 : Classes de sol EC8 du massif pyrénéen (extraite de Colas <i>et al.</i> , 2012).....	14
Figure 6 : Zonage du département des Pyrénées-Orientales en classes de sol EC8 modifiées. Extrait de Colas <i>et al.</i> (2013). Les zones en blanc n'ont pas été couvertes par l'étude.	15
Figure 7 : Cartographie de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur des effets de site lithologique (selon les classes de sol EC8) proposée par Bertrand (2015).....	16
Figure 8 : zonage sismique de la France de 2011 pour le département du Var.	28
Figure 9 : Exemple du découpage du centre d'une commune en plusieurs îlots IRIS.	29
Figure 10 : Fusion de l'ensemble de carrés (200 m) pour délimiter les zones habitées (exemple de Fontenay-le-Comte, 85).....	30
Figure 11 : Schéma représentant l'obtention des trois indicateurs. Focus sur le département du Var.	31
Figure 12 : Représentation de l'indicateur 1 (en %) pour la zone de sismicité modérée des Pyrénées-Orientales.....	35
Figure 13 : Représentation de l'indicateur 2 (en %) pour la zone de sismicité modérée des Pyrénées-Orientales.....	35
Figure 14 : Représentation de l'indicateur 3 (en %) pour la zone de sismicité modérée des Pyrénées-Orientales.....	35

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classes de sol selon l'Eurocode 8.	11
Tableau 2 : Synthèse des 52 départements traités dans l'étude, méthodes utilisées pour classer les sols selon les classification EC8 et principales références consultées.	24
Tableau 3 : Valeurs proposées pour les % de variation possible des indicateurs 1 et 2 en fonction de la valeur de l'indice de confiance.	34
Tableau 4 : Indicateurs pour les Pyrénées-Orientales, zone de sismicité modérée.	34
Tableau 5 : Indicateur 1. Répartition des classes de sol en % de surface totale du département, par département, et par zone de sismicité.	44
Tableau 6 : Indicateur 2. Répartition des classes de sol EC8 en % de la surface habitée, par département et par zone de sismicité.	47
Tableau 7 : Indicateur 3. Nombre de maisons individuelles (INSEE 2012) par département, par classe de sol EC8 et par zone de sismicité.....	50

Liste des annexes

Annexe 1 Indicateurs départementaux.....	41
--	----

1. Introduction

Une étude portée par le Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (MEEM) et pilotée par la Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages (DHUP) est actuellement en cours pour évaluer l'impact de la mise en œuvre de la nouvelle réglementation parasismique en vigueur depuis 2011, en réalisant notamment une évaluation financière globale du coût lié à l'application des règles parasismiques sur le territoire métropolitain. Cette étude se focalise notamment sur les zones de sismicité faible et modérée du zonage sismique de la France. Une estimation de la répartition des classes de sol définies dans l'Eurocode 8 (EC8) sur les territoires français exposés à un aléa faible à moyen selon le zonage sismique de la France lui permettrait d'améliorer la précision de cette évaluation.

Afin de mieux caractériser cet impact et répondre aux besoins de la DHUP, le présent travail propose une méthode d'estimation statistique de cette répartition des sols par département et par zone de sismicité. L'analyse n'est pas effectuée dans les zones de sismicité très faible, qui ne présentent pas d'enjeu en termes de coût de la réglementation parasismique. Par ailleurs, un croisement entre la répartition des classes de sol et la présence de logements en dehors des centres-villes est proposé, en se focalisant notamment sur les pavillons individuels directement concernés par les nouvelles règles CPMI (AFPS, 2004). Ce travail s'appuie sur l'exploitation des données cartographiques disponibles sur le bâti et l'urbanisation ainsi que sur les données de répartition de classes de sol issues de l'étude CCR-BRGM menée depuis 2014 pour la réalisation d'une cartographie nationale du risque sismique.

Cette étude a consisté i) à classer le territoire de l'ensemble des départements concernés (cf. Figure 1) en termes de classes de sol EC8, ii) à attribuer des niveaux de confiance à chaque classification (afin de traduire l'imprécision de l'estimation des classes de sol) puis iii) à croiser les informations obtenues sur les classes de sol avec les données d'urbanisme afin d'obtenir des indicateurs de répartition des classes de sol selon différents critères géographiques et urbanistiques.

L'analyse a concerné les départements indiqués sur la Figure 1, afin d'une part de valoriser les travaux déjà réalisés par le BRGM dans les Massifs alpins et pyrénéens et d'autre part d'étudier de nouvelles zones géographiques (Massif Armoricaire, Fossé Rhénan, ...) majoritairement concernées par des zones de sismicité faible ou modérée. L'étude décrite ici concerne donc 51 départements répartis dans le Massif Armoricaire, le nord du Bassin Aquitain et du Centre, le Fossé Rhénan, la région alpine et les Pyrénées.

Le présent rapport rappelle la réglementation parasismique actuelle pour le bâti courant, décrit la méthodologie employée pour estimer les classes de sol EC8 dans chaque département concerné par l'étude, et présente les résultats obtenus (par département).

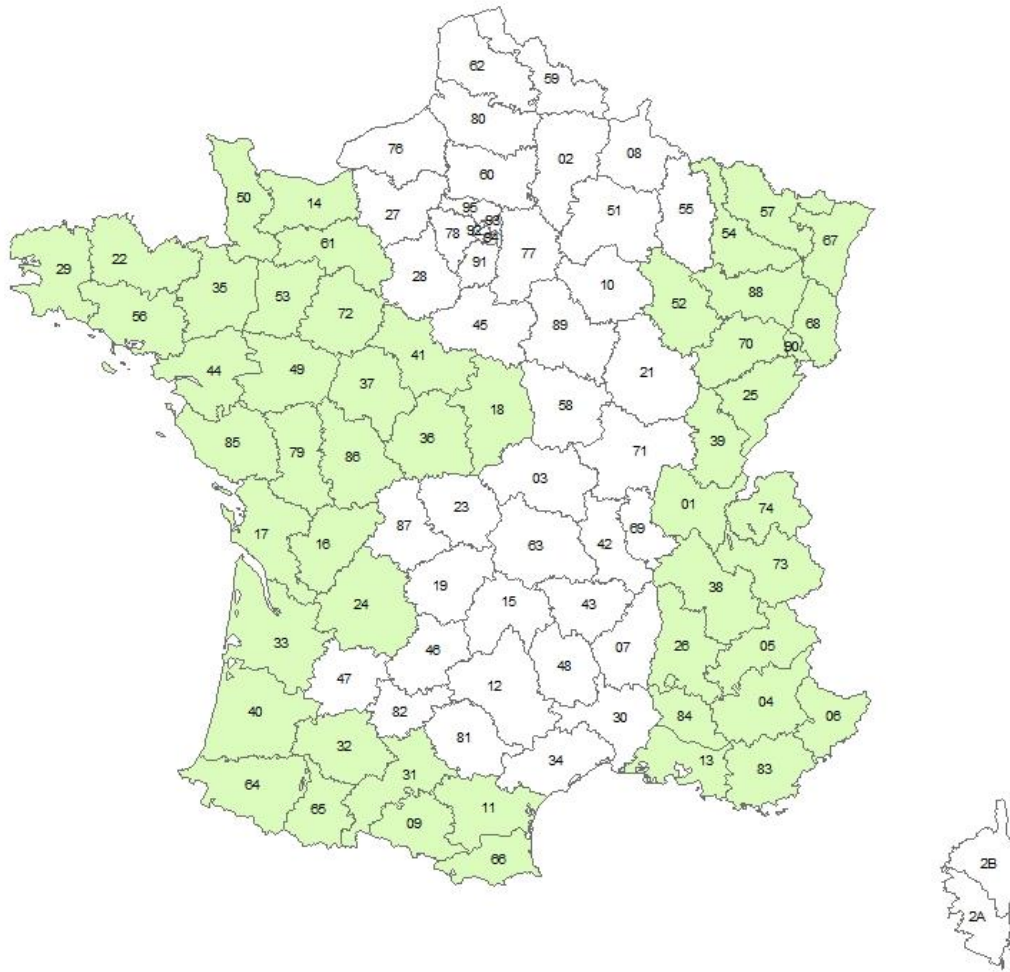


Figure 1 : Départements concernés par l'analyse statistique des classes de sol (en vert).

2. Rappels sur la réglementation parasismique nationale et les classes de sol selon l'Eurocode8

2.1. ZONAGE SISMIQUE NATIONAL ET APPLICATION

La France dispose depuis le 24 octobre 2010 d'une nouvelle réglementation parasismique, entérinée par la parution au Journal Officiel de deux décrets sur le nouveau zonage sismique national (Figure 2) et d'un arrêté fixant les règles de construction parasismique à utiliser pour les bâtiments de la classe dite « à risque normal » sur le territoire national.

Cette nouvelle réglementation est rentrée en vigueur depuis le 1^{er} mai 2011.

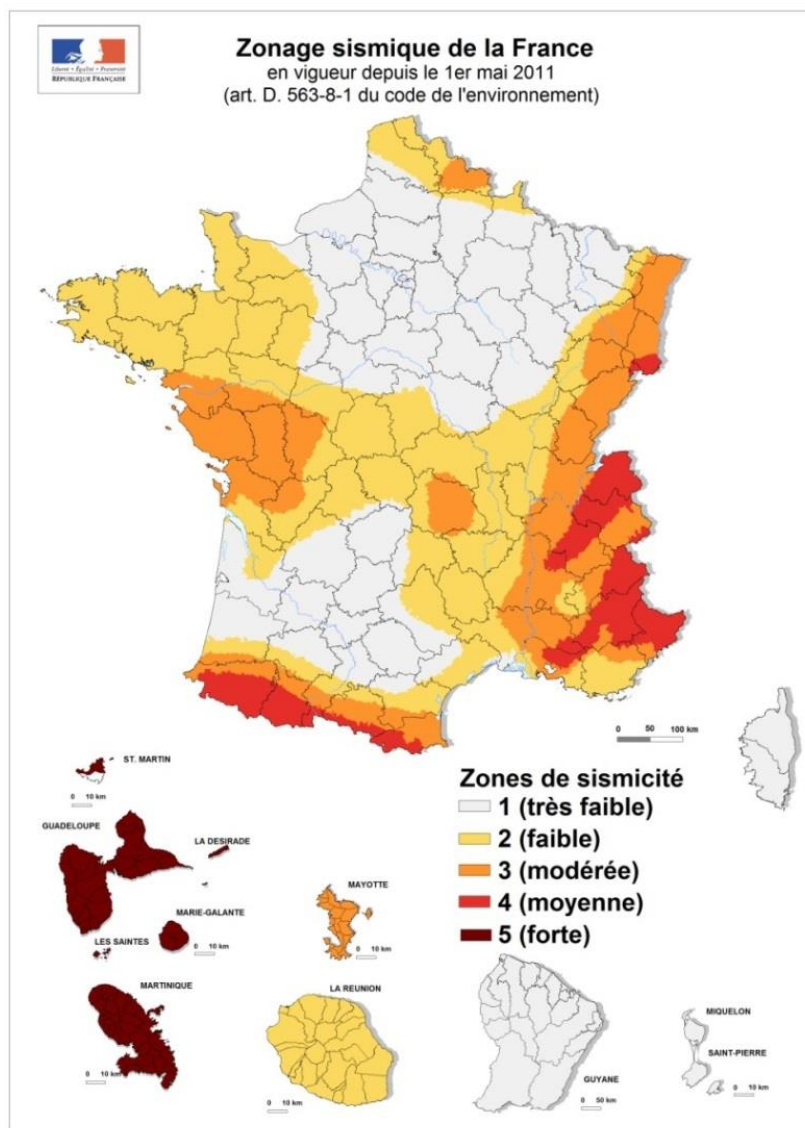






Figure 2 : Carte du zonage sismique en vigueur depuis le 1^{er} mai 2011.

La Figure 3 montre les conditions d'application de la réglementation parasismique et les textes de référence à appliquer en fonction de la catégorie d'importance du bâtiment (I, II, III et IV) et des zones de sismicité de la carte du zonage national.

	I	II	III	IV
				
Zone 1	aucune exigence			Eurocode 8 ³ $a_{gr}=0,7 \text{ m/s}^2$
Zone 2	aucune exigence			Eurocode 8 ³ $a_{gr}=0,7 \text{ m/s}^2$
Zone 3		PS-MI ¹	Eurocode 8 ³ $a_{gr}=1,1 \text{ m/s}^2$	Eurocode 8 ³ $a_{gr}=1,1 \text{ m/s}^2$
Zone 4		PS-MI ¹	Eurocode 8 ³ $a_{gr}=1,6 \text{ m/s}^2$	Eurocode 8 ³ $a_{gr}=1,6 \text{ m/s}^2$
Zone 5		CP-MI ²	Eurocode 8 ³ $a_{gr}=3 \text{ m/s}^2$	Eurocode 8 ³ $a_{gr}=3 \text{ m/s}^2$

¹ Application possible (en dispense de l'Eurocode 8) des PS-MI sous réserve du respect des conditions de la norme PS-MI
² Application possible du guide CP-MI sous réserve du respect des conditions du guide
³ Application obligatoire des règles Eurocode 8

Figure 3 : Règles de construction parasismique applicables aux bâtiments neufs selon leur catégorie d'importance et leur zone de sismicité. La catégorie d'importance II se divise en deux, les maisons individuelles et l'habitat collectif.

2.2. LA CLASSIFICATION DES SOLS SELON L'EUROCODE 8

L'agression sismique est prise en compte dans l'Eurocode8 (EC8) par le biais de spectres de référence, qui définissent le degré d'accélération sismique de dimensionnement en fonction de la fréquence de vibration du bâtiment. Différents spectres sont attribués en fonction de la classe de sol, qui constitue une façon forfaitaire de prendre en compte les effets de site lithologiques, c'est-à-dire, l'amplification locale de l'onde sismique produite par le contraste d'impédance entre le substratum rigide et les formations géologiques de surface plus molles.

L'EC8 définit cinq classes de sol, de A à E (Tableau 1), pour les sols soumis à des modifications locales du mouvement sismique qui se manifestent par une amplification et/ou un allongement de la durée de la secousse (on parle alors d'effet de site lithologique). L'EC8 définit aussi deux classes de sol S1 et S2 pour traiter de l'aléa liquéfaction ; ces deux classes ne sont pas traitées dans le présent rapport.

La classification des sols selon les EC8 repose essentiellement sur la vitesse moyenne des ondes de cisaillement calculée sur les 30 premiers mètres de profondeur (paramètre $V_{s,30}$). Idéalement, pour estimer la classe de sol EC8 d'un site, chaque colonne de sol au droit de ce site devrait être caractérisée par :

- l'épaisseur de la couche superficielle molle ;
- la vitesse des ondes S de la couche molle ;
- la vitesse des ondes S du substratum sous-jacent ;
- des paramètres géotechniques complémentaires comme ceux indiqués dans le tableau ci-dessous (ces paramètres sont en réalité rarement disponibles).

La classe A correspond au rocher horizontal affleurant, qui est considéré comme la référence sans effet de site lithologique. Les autres classes sont susceptibles de présenter des effets de site lithologiques. Leur classification dépend essentiellement de l'épaisseur de la couche de terrains mous superficiels et de la vitesse moyenne des ondes de cisaillement calculée sur les 30 premiers mètres de profondeur (paramètre $V_{s,30}$). Il est à remarquer que la classe E est caractérisée par deux critères très locaux d'épaisseur de couche et de contraste de vitesse,

critères qui ne peuvent en général pas être estimés à une échelle de travail départementale : dans cette étude, la classe E n'a été traitée que là où la qualité des données d'entrée le permettait.

Classe de sol	Description du profil stratigraphique	Paramètres		
		$V_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (bl/30cm)	c_u (kPa)
A	Rocher ou tout autre formation proche du rocher, incluant au plus 5 m de formation plus molle en surface.	> 800	–	–
B	Dépôts de sable très dense, de gravier ou d'argile très dure, au moins sur plusieurs dizaines de mètres, caractérisés par une augmentation graduelle des propriétés mécaniques avec la profondeur.	360 – 800	> 50	> 250
C	Dépôts profonds de sable dense ou moyennement dense, de gravier ou d'argiles dures avec des profondeurs de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres.	180 – 360	15 - 50	70 - 250
D	Dépôts de sols de cohésion faible à moyenne (avec ou sans couches de sols mous cohérents) ou dépôts prédominants de sol cohérent mou à ferme.	< 180	< 15	< 70
E	Profil de sol consistant en une couche de surface d'alluvions avec une valeur de $V_{s,30}$ des classes C ou D et des épaisseurs variant entre 5 et 20 m, reposant sur du matériau plus ferme de $V_{s,30} > 800$ m/s			
S ₁	Dépôts contenant (ou consistés de) des couches d'au moins 10 m d'épaisseur, d'argiles / limons avec une forte plasticité ($PI > 40$) et une forte teneur en eau.	< 100 (indicative)	–	10 - 20
S ₂	Dépôts de sols liquéfiables, d'argiles molles ou tout profil de sol non compris dans les classes A –E ou S ₁			

Tableau 1 : Classes de sol selon l'Eurocode 8.

Une fois définie la classe de sol EC8 au droit du bâtiment concerné, il est possible de définir le spectre de réponse en accélération auquel ledit bâtiment doit résister et qui induit un potentiel surcoût de construction lié à l'application des règles parasismiques en vigueur. Ce spectre forfaitaire dépend finalement de (Figure 4) :

- la zone de sismicité (Figure 2) ;
- de la catégorie d'importance du bâtiment (I à IV) ;
- de la classe de sol EC8 (Tableau 1) qui nous intéresse dans la présente étude.

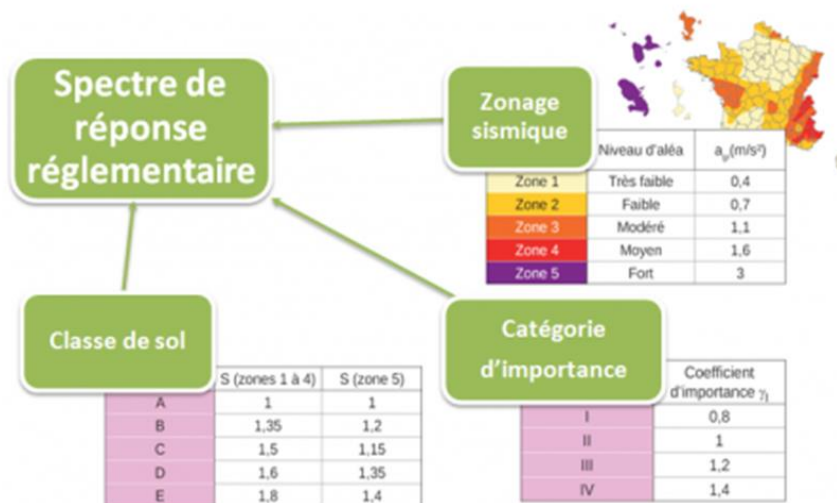


Figure 4 : Détermination du spectre de réponse réglementaire.

3. Caractérisation des classes de sol Eurocode 8 par département

3.1. CAS DES DÉPARTEMENTS DISPOSANT D'UNE CLASSIFICATION DES SOLS TIRÉE D'ÉTUDES ANTÉRIEURES

Pour les départements disposant déjà d'une classification des sols résultant d'études antérieures au projet (soit 21 départements), le travail se caractérise par une harmonisation et une exploitation des données existantes en suivant les étapes listées ci-dessous :

- revue des matériels disponibles dans les archives BRGM: rapports concernant l'évaluation des effets de site (par exemple, études de microzonage ou scénarios de risque sismique) ;
- harmonisation des critères de classement des sols : la classification finale se fera strictement avec des classes EC8, des éventuels écarts avec cette classification dans les études originales (p.ex. classes de sol intermédiaires ou supplémentaires) seront traités au cas par cas.

Cette étude a compilé les travaux faits au BRGM ou par d'autres organismes et qui avaient porté d'une manière ou d'une autre sur la cartographie et la caractérisation des effets de site lithologiques à une échelle macroscopique sur les départements français de la Métropole. Les principales études prises en compte sont décrites ci-après.

Travaux BRGM-CCR

Dans le cadre d'un partenariat de recherche collaborative entre la CCR et le BRGM (Rey *et al.*, 2015a, 2015b), une étude commune visant à réaliser une cartographie nationale homogène et cohérente du risque sismique est en cours depuis 2014. Cette étude se base sur une chaîne de traitement complète de modélisation des dommages engendrés par le séisme, incluant notamment la caractérisation de l'aléa. Pour mener à bien cette caractérisation, une répartition des classes de sol EC8 est réalisée.

Depuis 2014, 21 ont été traités par cette convention, certains ayant aussi fait l'objet d'un exercice Richter.

Exercices Richter

Les exercices Richter ont lieu tous les ans ou tous les deux ans. Il s'agit d'exercices « séisme » qui impliquent des acteurs de la gestion de crise (ministère de l'intérieur, préfectures, SDIS, etc.). Ils sont basés sur l'estimation des dommages d'un séisme plausible dans un département. Ces estimations sont faites à l'aide de l'outil Armagedom (Sedan *et al.*, 2013) et nécessitent une cartographie des zones à effet de site à niveau départemental. Parmi les derniers exercices réalisés et dont les données ont été utilisées dans cette étude, on citera : Haut-Rhin et Territoire de Belfort (2010), Isère (2011), Alpes-de-Haute-Provence (2013), Savoie et Haute-Savoie (2014). Un exercice dans les Alpes-Maritimes est prévu sur le 2^{ème} semestre 2016.

Shakemap SisPyr

Les ShakeMaps sont un des principaux résultats du projet Interreg SisPyr (2009-2012) entre organismes espagnols et français. Les Shakemaps sont des cartes du mouvement du sol qui se calculent automatiquement dans les minutes qui suivent un séisme de magnitude supérieur

à 3 dans les Pyrénées. Dans ce cadre, les effets de site lithologiques sont pris en compte à partir d'une étude spécifique (Figure 5) faite pour les départements français du massif pyrénéen (départements 64, 40, 65, 31, 11 et 66) (Colas et al. 2012). Dans ces travaux, les effets de site ont été pris en compte via le calcul de coefficients d'amplification à appliquer aux cartes Shakemap en suivant les étapes suivantes :

- zonage des formations géologiques superficielles tenant compte à la fois de leur nature, leur épaisseur et leurs propriétés géomécaniques ;
- définition de plusieurs colonnes de sol type associées à chaque unité géologique et assignation d'une classe de sol EC8 (ou dérivée) à chaque colonne de sol ;
- cartographie des classes de sol via une grille de pas 500 m ;
- attribution de coefficients d'amplification par classe de sol.

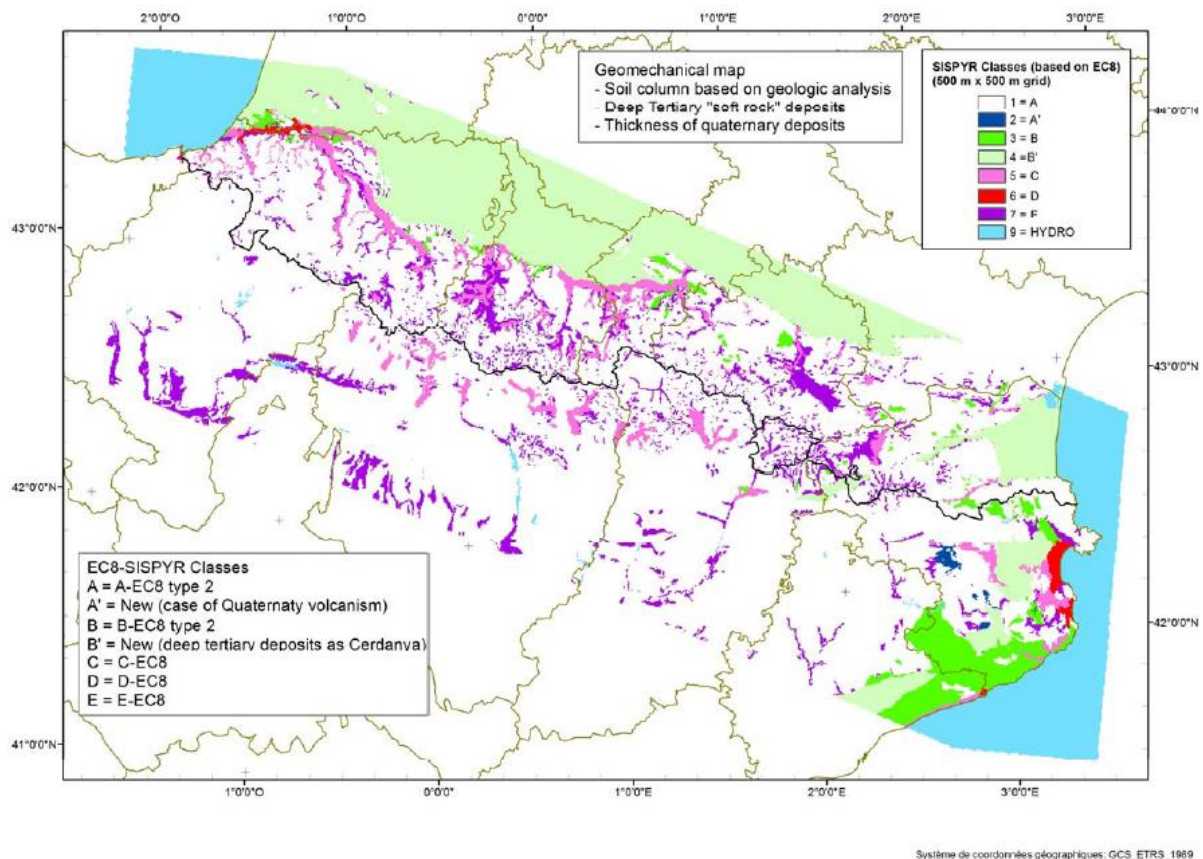


Figure 5 : Classes de sol EC8 du massif pyrénéen (extraite de Colas et al., 2012).

Macrozonage des Pyrénées-Orientales

En 2013, à la demande de la DDTM, un macrozonage sismique des Pyrénées-Orientales (Figure 6) a été réalisé (Colas et al., 2013). Ce travail a consisté notamment en une cartographie des classes de sol EC8 pour les zones à enjeu de ce département en intégrant les données géologiques, géotechniques et géophysiques existantes, mais aussi avec l'acquisition de nouvelles données géophysiques (H/V).

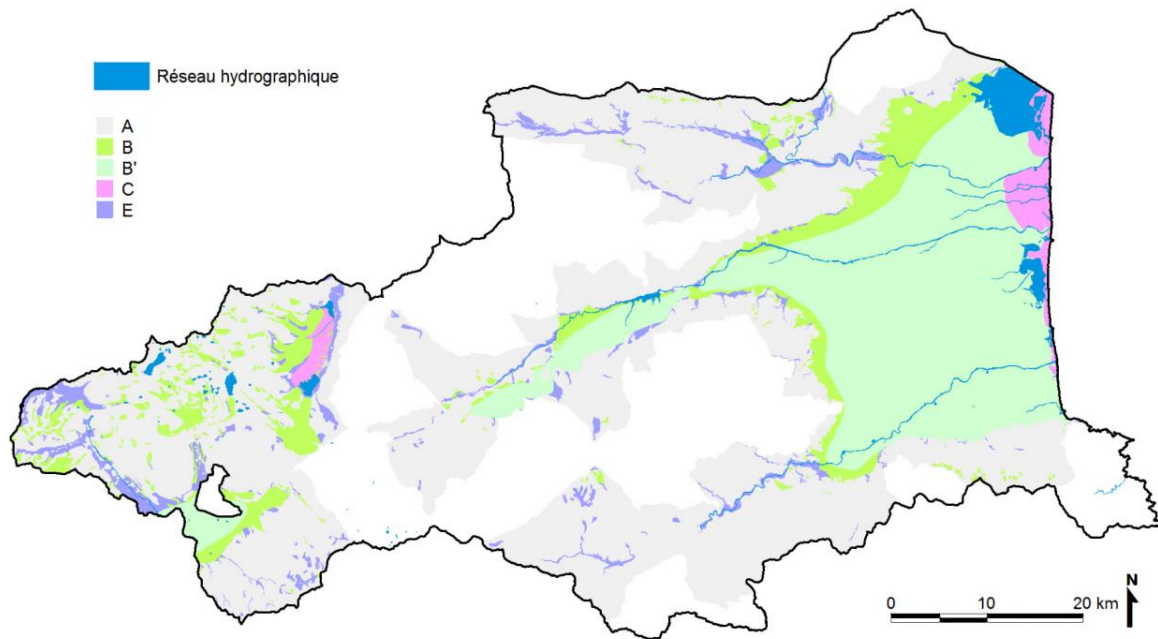


Figure 6 : Zonage du département des Pyrénées-Orientales en classes de sol EC8 modifiées. Extrait de Colas et al. (2013). Les zones en blanc n'ont pas été couvertes par l'étude.

Macrozonage de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur

L'étude de Bertrand (2015) a consisté à cartographier en classes de sol EC8 toute la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (Figure 7) en utilisant la méthode Wald et Allen (2007). Cette méthode permet de corréliser automatiquement les pentes issues d'un MNT avec les classes de sol forfaitaires (initialement les classes de sols NEHRP du code parasismique américain).. Cette méthode est facilement transposable aux classes de sol EC8. Bertrand (2015) a ensuite approfondi la méthode en agrégeant les données par polygones géologiques basés sur la carte géologique au 1/50 000.

Dans la présente étude, nous avons utilisé la cartographie régionale faite par Bertrand (2015) malgré l'existence de cartographies plus détaillées (par exemple à Nice, vallée de la Durance, Richter 04 ou dans le Pays d'Aix). Ce choix a été décidé par souci d'homogénéité de traitement pour l'ensemble de la région. Néanmoins, il faut signaler que cette cartographie reste incomplète et présente certaines limites liées à la méthode utilisée. Bertrand (2015) explique ainsi que : « Celle-ci nécessite d'être adaptée dans la région à partir de l'analyse d'une grande quantité de données géotechniques et géophysiques qu'il reste à collecter et interpréter en termes de classe de sol ».

Sur la Figure 7 on note par exemple que les massifs montagneux sont globalement classés en A (rocher), en cohérence avec les résultats attendus. Les fonds de vallées, eux, sont majoritairement classés en B, ce qui mériterait d'être validé par des données géotechniques ou géophysiques. Deux autres points de cette classification sont contre-intuitifs et mériteraient d'être validés par des données terrain :

- l'absence totale de classe de sol C sur la région alors que cette classe est assez courante notamment sur toutes les zones alluvionnaires récentes ;
- une grande partie des zones les plus plates, situées surtout à l'ouest de la région (basse Durance et bas Rhône, Camargue) sont classées en classe de sol D alors que l'expérience acquise dans les études d'effets de site antérieures (microzonages métropolitains ou antillais, macrozonage 66, etc.) montre que c'est une configuration que l'on retrouve très

peu en France. L'auteur de cette étude signale d'ailleurs que la classe attendue pour cette zone serait plutôt B au vu de leurs travaux antérieurs sur la zone.

Le classement résultant de cette étude est par conséquent très pénalisant pour la zone ouest de la région, ce qui a une forte influence sur le résultat final dans les départements concernés (Bouches-du-Rhône et Vaucluse).

Par ailleurs, la méthode de Wald et Allen (2007) ne permet pas d'identifier les classes de sol E.

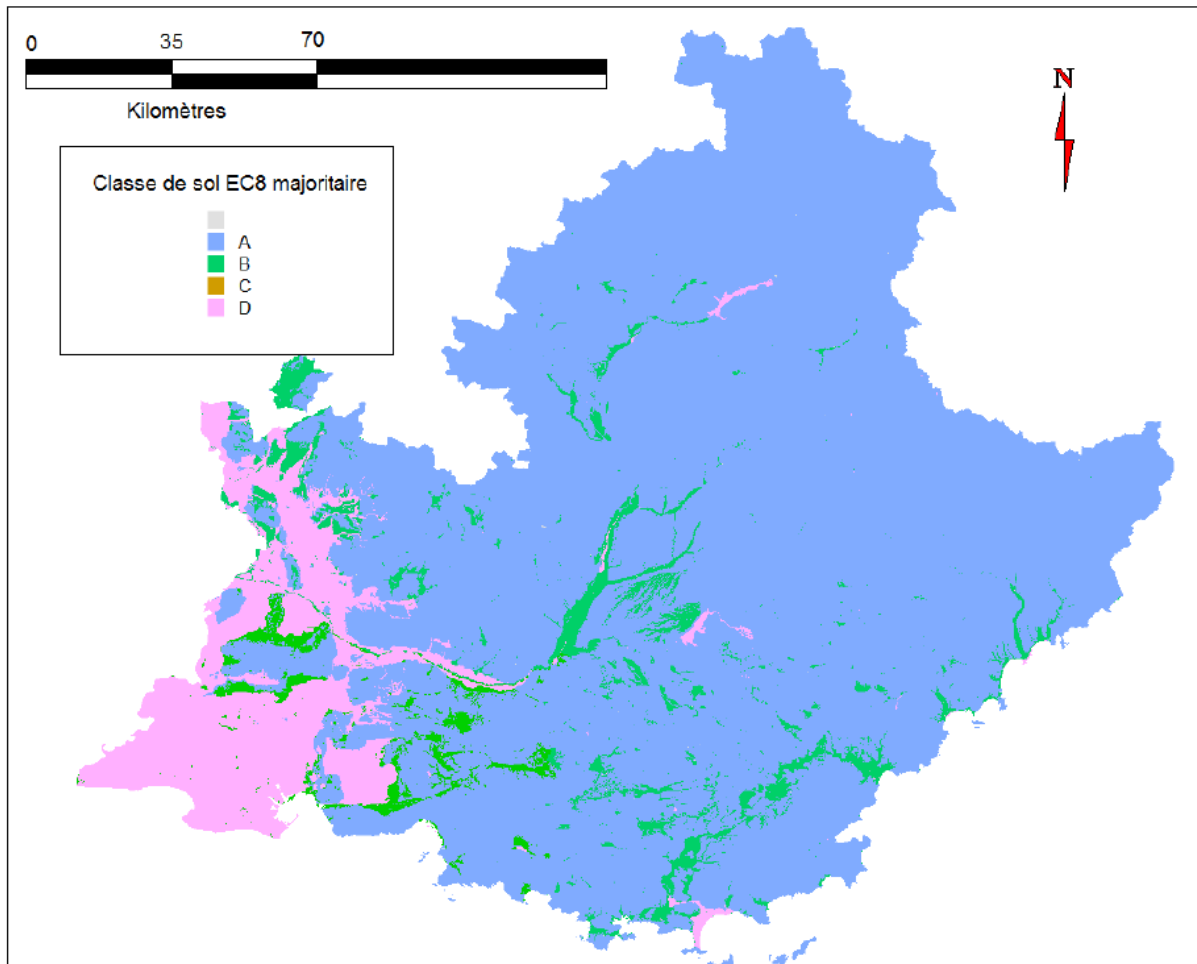


Figure 7 : Cartographie de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur des effets de site lithologique (selon les classes de sol EC8) proposée par Bertrand (2015).

3.2. CAS DES DÉPARTEMENTS NE DISPOSANT PAS DE CLASSIFICATION PRÉALABLE

Pour les départements ne disposant pas à ce jour de classification des sols selon les EC8 (soit 30 départements), la classification des terrains en classes EC8 s'est faite dans le cadre de cette étude. La méthodologie employée se résume ainsi :

- analyse géologique de la zone d'étude, avec le but d'identifier et de localiser les formations superficielles sur la base des cartes géologiques 1/50 000 ;
- évaluation des caractéristiques mécaniques et des épaisseurs des formations identifiées au point précédent sur la base des notices des cartes géologiques ainsi que des données

de sondages et forages dans la Banque de Données du Sous-Sol (BSS) et des travaux existants ;

- classification de ces formations en classes de sol homogènes sur la base de la classification forfaitaire des sols définie dans le cadre des EC8.

Pour la plupart de ces départements, la méthode appliquée a consisté à corréliser des caractéristiques lithologiques extraites de la cartographie géologique au 1/50 000 et des informations ponctuelles d'épaisseur (via la BSS) avec le classement forfaitaire des EC8.

D'autres sources d'information comme les cartes départementales d'aléa retrait-gonflement des argiles, la cartographie et caractérisation des altérites en Bretagne ou des mesures géophysiques de sismique réflexion ou de MASW (mesure de V_s par ondes de surface) ont également été utilisées.

Ce travail s'est appuyé en grande partie sur les Directions Régionales du BRGM et ses géologues régionaux, qui ont apporté leur expertise et connaissance du terrain.

3.3. SYNTHÈSE DES DÉPARTEMENTS TRAITÉS

Le Tableau 2 indique, pour chaque département traité (hors zone d'aléa très faible), la méthodologie employée pour estimer la classe de sol EC8, dans quel cadre cette classification s'est faite (étude antérieure ou étude actuelle), les limites potentielles de la classification obtenue ainsi que les principales références utilisées.

Département	Méthode	Cartographie faite dans le cadre de cette étude ?	Données complémentaires utilisées et limites de la classification	Références et sources utilisées
Ain - 01	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui		Géologie 1/50 000 - BSS
Alpes Haute Provence - 04	Méthode cartographie des VS30 à partir de la pente (Wald et Allen 2007) moyennée par formation géologique	Non	La méthode utilisée ne permet pas de distinguer les classes C et D et tend à tout classer en D lorsque les zones sont très plates. La classe E n'est pas considérée.	Bertrand (2015)
Hautes Alpes - 05	Méthode cartographie des VS30 à partir de la pente (Wald et Allen 2007) moyennée par formation géologique	Non	La méthode utilisée ne permet pas de distinguer les classes C et D et tends à tout classer en D lorsque les zones sont très plates. La classe E n'est pas considérée.	Bertrand (2015)
Alpes Maritimes - 06	Méthode cartographie des VS30 à partir de la pente (Wald et Allen 2007) moyennée par formation géologique	Non	La méthode utilisée ne permet pas de distinguer les classes C et D et tend à tout classer en D lorsque les zones sont très plates. La classe E n'est pas considérée.	Bertrand (2015)
Ariège - 09	Conversion du zonage géomécanique du massif pyrénéen en classes de sol EC8.	Non	Cartographie utilisée pour faire les cartes Shakemaps des Pyrénées, une classe de sol par maille carrée de 500 m (faible résolution). La classe E n'est pas considérée.	Colas et al. (2012)
Aude - 11	Conversion du zonage géomécanique du massif pyrénéen en classes de sol EC8.	Non	Cartographie utilisée pour faire les cartes Shakemaps des Pyrénées, une classe de sol par maille carrée de 500 m. Le nord du département n'était pas couvert par le zonage de Colas et al. (2012), il a été complété à partir d'une analyse de la géologie au 1/50 000.	Colas et al. (2012) Géologie 1/50 000 BSS

Bouches du Rhône - 13	Méthode cartographie des VS30 à partir de la pente (Wald et al. 2007) moyennée par formation géologique	Non	La méthode utilisée ne permet pas de distinguer les classes C et D et tend à tout classer en D lorsque les zones sont très plates. Une grande extension à l'Ouest du département (Camargue) est classée en D alors qu'elle correspondrait plutôt à de la classe B selon l'auteur de cette étude. La classe E n'est pas considérée.	Bertrand (2015)
Calvados – 14	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur, études RGA)	Oui	La cartographie départementale de l'aléa retrait gonflement des argiles a été utilisée pour distinguer les formations « rocheuses » et sans altération.	Géologie 1/50 000 Carte Aléa RGA, Duriez et al. (2008)
Charente – 16	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui		Géologie 1/50 000 BSS
Charente Maritime - 17	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui		Géologie 1/50 000 BSS
Cher – 18	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur, études RGA)	Oui	La cartographie départementale de l'aléa retrait gonflement des argiles a été utilisée pour distinguer les formations « rocheuses » et sans altération.	Géologie 1/50 000 ^{ème} Carte aléa RGA, Vincent et al. (2004)
Côtes d'Armor – 22	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur, études RGA, cartographie et épaisseur des altérites)	Oui	Etude sur les altérites en Bretagne avec cartographie et modélisation d'épaisseurs L'information géophysique (mesures VS) des formations altérites est manquante dans le département.	Les altérites en Bretagne : Ricordei-Prognon et al. (2015) Aléa retrait gonflement des argiles, Schroetter et al. (2010)
Dordogne – 24	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur), et données géophysique ponctuelles	Oui	Une mesure de vitesses existe, sur une carrière qui exploitait des colluvions (Desindes et al. 2004).	BSS, Géologie 1/50 000 Desindes et al. (2004).
Doubs – 25	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui		BSS, Géologie 1/50 000
Drôme – 26	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Non		BSS, Géologie 1/50 000 CCR 2015

Finistère – 29	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur, études RGA, cartographie et épaisseur des altérites)	Oui	Etude sur les altérites en Bretagne avec cartographie et modélisation d'épaisseurs La cartographie départementale de l'aléa retrait gonflement des argiles a été utilisée pour distinguer les formations « rocheuses » et sans altération.	Etudes sur les altérites en Bretagne Ricordel-Prognon <i>et al.</i> (2015) Aléa retrait gonflement des argiles, Schroetter <i>et al.</i> (2010)
Haute Garonne - 31	Conversion du zonage géomécanique du massif pyrénéen en classes de sol EC8.	Non	Cartographie utilisée pour faire les cartes Shkemaps des Pyrénées, une classe de sol par maille carrée de 500 m (faible résolution). Le nord du département n'était pas couvert par le zonage de Colas <i>et al.</i> (2012), il a été complété à partir d'une analyse de la géologie au 1/50 000 ^{ème} .	Colas <i>et al.</i> (2012)
Gers – 32	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui	Une portion au sud de la zone est couverte par le zonage pyrénéen de 2012. L'ensemble du département repose sur des terrains du bassin sédimentaire aquitain (classe B). Les formations alluvionnaires superficielles (classe C) ont été différenciées du bassin profond (classe B).	Colas <i>et al.</i> (2012) Géologie 1/50 000 BSS
Gironde – 33	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui		Géologie 1/50 000 BSS
Ile et Vilaine - 35	Classification forfaitaire des classes de sol à partir d'une corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur, études RGA)	Oui	La cartographie départementale de l'aléa retrait gonflement des argiles a été utilisée pour distinguer les formations « rocheuses » et sans altération.	Carte RGA, Schroetter <i>et al.</i> (2010)
Indre - 36	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui		Géologie 1/50 000 BSS
Indre et Loire - 37	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui		Géologie 1/50 000 BSS
Isère – 38	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur).	Non	Prise en compte des travaux spécifiques dans le bassin de Grenoble (Cornou <i>et al.</i> 2003).	Richter 38 Cornou <i>et al.</i> (2003)
Jura – 39	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui		Géologie 1/50 000 BSS

Landes – 40	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui (partie Nord)	Une portion au sud de la zone couverte par le zonage pyrénéen de 2012.	Colas <i>et al.</i> (2012) Géologie 1/50 000 BSS
Loir et Cher – 41	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui	La cartographie départementale de l'aléa retrait gonflement des argiles a été utilisée pour distinguer les formations « rocheuses » et sans altération.	BSS, Géologie 1/50 000 Carte RGA, Bouchut <i>et al.</i> (2004)
Loire Atlantique – 44	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Non		CCR 2015 BSS, Géologie 1/50 000
Maine et Loire – 49	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui	La cartographie départementale de l'aléa retrait gonflement des argiles (RGA) a été utilisée pour distinguer les formations « rocheuses » et sans altération.	Carte RGA, Le Guern <i>et al.</i> (2005).
Manche - 50	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui	La cartographie départementale de l'aléa retrait gonflement des argiles a été utilisée pour distinguer les formations « rocheuses » et sans altération.	Carte RGA, Pannet <i>et al.</i> (2010).
Haute Marne - 52	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui		BSS, Géologie 1/50 000
Mayenne - 53	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui	La cartographie départementale de l'aléa retrait gonflement des argiles a été utilisée pour distinguer les formations « rocheuses » et sans altération.	Carte RGA, Plat <i>et al.</i> (2010)
Meurthe et Moselle – 54	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui		BSS, Géologie 1/50 000
Morbihan – 56	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui	La cartographie départementale de l'aléa retrait gonflement des argiles a été utilisée pour distinguer les formations « rocheuses » et sans altération.	BSS, Géologie 1/50 000 Carte RGA, Schroetter <i>et al.</i> (2010).
Moselle – 57	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui		BSS, Géologie 1/50 000
Orne – 61	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui	La cartographie départementale de l'aléa retrait gonflement des argiles a été utilisée pour distinguer les formations « rocheuses » et sans altération.	Géologie 1/50 000 BSS Carte RGA, Lereculey <i>et al.</i> (2008).

Pyrénées-Atlantiques - 64	Conversion du zonage géomécanique du massif pyrénéen en classes de sol EC8.	Non	Cartographie utilisée pour faire les cartes Shakemaps des Pyrénées, une classe de sol par maille carrée de 500 m (faible résolution).	Colas <i>et al.</i> (2012)
Hautes Pyrénées – 65	Conversion du zonage géomécanique du massif pyrénéen en classes de sol EC8.	Non	Cartographie utilisée pour faire les cartes Shakemaps des Pyrénées, une classe de sol par maille carrée de 500 m (faible résolution).	Colas <i>et al.</i> (2012)
Pyrénées Occidentales – 66	Classification forfaitaire des classes de sol à partir des données géologiques, géotechniques et géophysiques.	Non	Le zonage retenu est une superposition de 2 zonages. 1) Macrozonage sismique : zonage spécifique en fonction des données géologiques, géotechniques et géophysiques. Acquisition des données dans le cadre du projet. Zone couverte : zones à enjeux du département. 2) Pour le reste du département le macrozonage pyrénéen issu de l'étude de 2012, plus dégradé.	Zonage pyrénéen : Colas <i>et al.</i> (2012) Macrozonage 66 : Colas <i>et al.</i> (2013)
Bas-Rhin – 67	Classification à dire d'expert en fonction de la géologie et des mesures VS de certaines formations géologiques	Oui	Certaines formations du Fossé Rhénan disposent de mesures de vitesses d'ondes S Vs. Ces valeurs de Vs ont généralement été extrapolées à l'ensemble du département. Le modèle géologique 3D de l'Alsace (Gabalda <i>et al.</i> 2013) a été utilisée pour connaître les épaisseurs de certaines formations géologiques.	Géologie 1/50 000BSS, RGF Alsace (Gabalda <i>et al.</i> 2013) Havenith <i>et al.</i> (2007), Roullé <i>et al.</i> (2007), Granet <i>et al.</i> (2006)
Haut-Rhin – 68	Classification à dire d'expert en fonction de la géologie et des mesures VS de certaines formations géologiques.	Non	Pour ce département, de multiples sources ont été utilisées pour cartographier les classes de sol EC8. Un zonage en classes de sol EC8, basé sur les données existantes en 2010 (mesures de Vs sur l'agglomération de Mulhouse et la zone des trois frontières près de Bâle ; microzonage de la ville de Mulhouse), a été réalisé sur le département dans le cadre d'un exercice Richter.	Richer 68 (2010) BSS, RGF Alsace (Gabalda <i>et al.</i> 2013) Havenith <i>et al.</i> (2007), Roullé <i>et al.</i> (2007), Granet <i>et al.</i> (2006)

				Le modèle géologique 3D de l'Alsace (Gabalda et al. 2013) a été utilisé pour valider les zonages existants.			
Haute-Saône – 70	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui			Géologie 1/50 000 BSS		
Saône et Loire – 71	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Non			CCR 2015 Rey et al. (2016)		
Sarthe - 72	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur) et géophysiques	Oui		Lebert et al. (2004) avaient caractérisé des formations géologiques par sismique de réflexion et SASW autour du Mans. La corrélation entre ces points et la lithologie de la carte géologique a été extrapolé au reste du département, où la caractérisation de l'aléa retrait gonflement des argiles a aussi été utilisé (Le Guern et al. (2007)).	Géologie 1/50 000 BSS Le Guern et al. (2007) Lebert et al. (2004).		
Savoie - 73	Classification à dire d'expert en fonction de la géologie – corrélation avec la lithologie	Non			Richter 73-74		
Haute-Savoie - 74	Classification forfaitaire des classes de sol à partir d'une corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur) Microzonage sismique	Non		Le zonage intègre deux sources d'information : Dans le district d'Annecy (10 communes) un microzonage sismique existe (Dominique et Samarcq 1997). Pour le reste macrozonage à partir d'une corrélation entre lithologie et classes de sol.	Richter 73-74 Microzonage sismique Annecy (Dominique et Samarcq 1997).		
Deux-Sèvres - 79	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui			Géologie 1/50 000 BSS		
Var – 83	Méthode cartographie des VS30 à partir de la pente (Wald et Allen 2007) moyennée par formation géologique	Non		La méthode utilisée ne permet pas de distinguer les classes C et D et tend à tout classer en D lorsque les zones sont très plates. La classe E n'est pas considérée.	Bertrand (2015)		

Vaucluse – 84	Méthode cartographie des VS30 à partir de la pente (Wald et Allen 2007) moyennée par formation géologique	Non	La méthode utilisée ne permet pas de distinguer les classes C et D et tend à tout classer en D lorsque les zones sont très plates. Une grande extension à l'Ouest du département est classée en D alors qu'elle correspondrait plutôt à de la classe B selon l'auteur de cette étude. La classe E n'est pas considérée.	Bertrand (2015)
Vendée – 85	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Non		CCR 2015 Rey <i>et al.</i> (2015) Géologie 1/50 000 BSS
Vienne - 86	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui		Géologie 1/50 000 BSS
Vosges - 88	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Oui		Géologie 1/50 000 BSS
Territoire de Belfort – 90	Corrélation avec des données géologiques (lithologie, épaisseur)	Non		Richter 90 (2010) Géologie 1/50 000 BSS

Tableau 2 : Synthèse des 52 départements traités dans l'étude, méthodes utilisées pour classer les sols selon les classification EC8 et principales références consultées.

3.4. NIVEAU DE CONFIANCE DANS L'ATTRIBUTION DES CLASSÉS DE SOL EC8

La précision de l'estimation des caractéristiques géomécaniques d'un territoire tel qu'un département dépend de façon drastique des données de base disponibles :

- cas favorable : des données géophysiques et/ou géotechniques (éventuellement avec des colonnes de sol type) sur certains points d'une zone (à la suite d'un microzonage par exemple) sont disponibles. Dans ce cas, la classification se fait avec précision sur ces points et, si elle est jugée cohérente, est étendue aux zones correspondantes du zonage départemental préliminaire. On obtient alors une classification fiable et précise ;
- cas intermédiaire : dans ce cas, l'attribution de la classe de sol repose sur l'information de la carte géologique et des informations de sondages géotechniques assez parcellaires ou ponctuelles. En l'absence de mesures in situ, l'attribution se fait par similitude avec des contextes semblables. Il est alors possible de définir une ou deux classes EC8 correspondant à la zone ;
- cas défavorable : aucune information quantitative concernant les paramètres mécaniques d'une zone n'est disponible. La classification est alors basée sur l'épaisseur des formations Quaternaire et une évaluation qualitative du type de sols en surface (on pourra pour cela utiliser les descriptions qualitatives associées aux classes EC8). De ce fait, cette classification est imprécise.

Ce point est abordé dans cette étude via l'estimation d'un niveau de confiance défini pour chaque formation géologique classifiée selon les EC8. Ce niveau de confiance permet par la suite de définir un indice d'incertitude au niveau départemental (paragraphe 4.4) afin de quantifier une incertitude sur la classification des sols et les différents indices en découlant.

Chaque niveau de confiance est décrit ci-dessous avec quelques exemples illustrant les situations rencontrées dans notre étude.

Niveau de confiance « élevé »

Ce niveau de confiance correspond aux cas favorables du paragraphe précédent. Dans notre étude, cela correspond aux cas suivants :

- zones pour lesquelles une étude antérieure de macrozonage ou microzonage sismique a été réalisée, avec acquisition de données géophysiques ou géotechniques spécifiques et révision éventuelle des contours des formations géologiques superficielles ;
- formations associées à des mesures géophysiques de vitesse in situ réalisées dans le cadre d'études hors domaine risque sismique. C'est le cas de certaines formations géologiques en Alsace ou dans la Sarthe pour lesquelles des mesures terrain antérieures existaient ;
- zones pour lesquelles les informations disponibles dans la cartographie géologique sont suffisantes et ne laissent pas de doute sur la nature des formations géologiques rencontrées : cela concerne notamment les zones de rocher (par exemple, un granite sain sera classé en A, sans doute possible).

Niveau de confiance « intermédiaire »

Ce niveau de confiance correspond aux cas intermédiaires décrits précédemment.

Dans notre étude, cela a concerné des zones où une formation géologique présente des propriétés mécaniques variables spatialement ou dont la valeur de V_s est proche d'une limite entre deux classes de sol : c'est le cas par exemple de certaines marnes dont les valeurs de vitesse V_s sont à la limite entre les classes A et B ou certaines moraines dont les propriétés mécaniques peuvent être très variables spatialement (exemples tirés des travaux pyrénéens de SISPYR, par exemple Macau *et al.*, 2012).

Niveau de confiance « faible »

Ce niveau de confiance correspond aux cas défavorables décrits précédemment.

Dans ce cas, aucune information quantitative concernant les paramètres mécaniques d'une formation géologique n'est disponible. La classification est alors basée uniquement sur avis d'expert en fonction de la qualification a priori de l'épaisseur des formations du Quaternaire et d'une évaluation qualitative du type de sols en surface. Ces situations amènent généralement à l'identification d'une formation géologique susceptible de créer un effet de site (classes de sol B, C, D et E) mais le choix d'une classe unique de sol est problématique. Dans ce cas, le classement est imprécis.

Dans notre étude, c'est le cas par exemple des altérites peu ou mal connues, avec des épaisseurs très variables spatialement et/ou des variabilités importante en termes de qualité de cartographie en raison de la forte hétérogénéité de la cartographie de ce type de formations géologiques en fonction notamment de l'ancienneté de la carte géologique disponible.

4. Estimation des indicateurs départementaux de répartition statistique des classes de sol EC8

Une fois les classes de sol EC8 A à E définies sur tous les départements concernés (hors zone d'aléa très faible) avec attribution de niveaux de confiance à chaque classification, un premier indicateur départemental a pu être calculé afin de rendre compte de la répartition de chaque classe de sols EC8 : il s'agit du pourcentage d'extension de chaque classe de sol dans les zones d'aléa faible à moyen. Nous rappelons que l'analyse n'est pas effectuée pour les zones de sismicité très faible car elles ne sont pas concernées par la réglementation parasismique.

Pour faciliter l'interprétation des données, la dernière étape du travail a consisté à croiser les informations obtenues sur les classes de sol avec les données d'urbanisme afin d'obtenir deux indicateurs supplémentaires :

- le pourcentage estimé de l'extension de chaque classe de sol dans les aires urbanisées en zone d'aléa faible à moyen ;
- le nombre et le pourcentage estimé de maisons individuelles existantes concernées par classe de sol et zone d'aléa (pour l'aléa faible à moyen).

Ce travail s'est fait via l'outil SIG ArcGIS à partir des données carroyées à 200 mètres de l'INSEE et des données Corine Land Cover.

Nous précisons ici que, même si des supports cartographiques ont été produits au cours de l'étude, ceux-ci restent uniquement des outils de travail et ne seront pas diffusés en fin d'étude. En effet, cette étude ne vise pas à se substituer au besoin de réaliser une étude de site spécifique pour les ouvrages qui en ont besoin, et doit être comprise comme une analyse purement statistique à l'échelle départementale.

4.1. INDICATEUR DÉPARTEMENTAL DE RÉPARTITION DES CLASSES DE SOL EC8 SUR LA SURFACE TOTALE DU DÉPARTEMENT

L'objectif de l'étude est de donner par département et par zone de sismicité de chaque département, un indicateur de la répartition des classes de sol EC8.

Ainsi, un département comme le Var (Figure 8), qui couvre trois niveaux de sismicité (faible, modéré et moyen), donne lieu à trois valeurs d'indicateurs, une pour chacune des zones de sismicité.

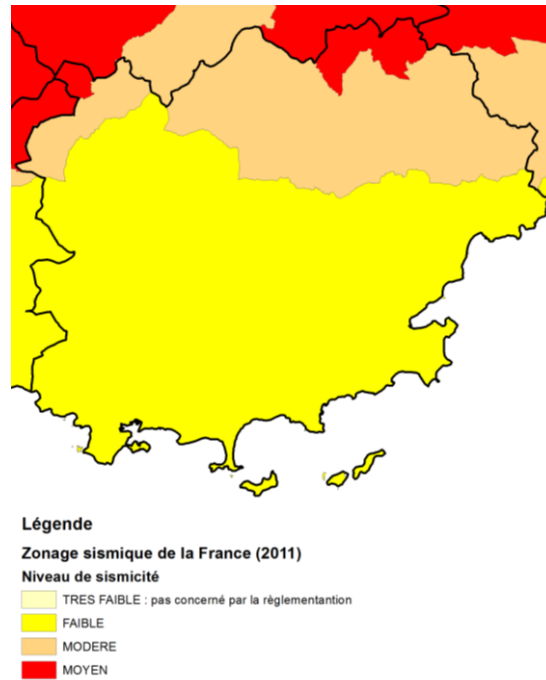


Figure 8 : zonage sismique de la France de 2011 pour le département du Var.

Pour le département i , la zone de sismicité z (faible, modéré et moyen) et la classe de sol x (A, B, C, D et E), l'indicateur départemental de répartition de classes de sol EC8 (en %) se calcule comme suit:

$$\text{Indicateur Surface Totale}_{i,z,x} = \frac{\text{Surface}_{i,z,x}}{\text{Surface}_{i,z}}$$

Avec $\text{Surface}_{i,z}$ la surface du département i en zone de sismicité z et $\text{Surface}_{i,z,x}$ la surface du département i en zone de sismicité z classé en classe de sol x .

Le Tableau 5 de l'annexe 1 fournit toutes les valeurs de cet indicateur n° 1.

4.2. INDICATEUR DÉPARTEMENTAL DE RÉPARTITION DES CLASSES DE SOL EC8 SUR LA SURFACE URBANISÉE DU DÉPARTEMENT

Un indicateur basé uniquement sur la surface totale d'un département peut sous-estimer l'exposition des constructions à de forts effets de site car les habitations ont tendance à se concentrer en zone plate et en fond de vallées, c'est-à-dire généralement sur des zones susceptibles de présenter des effets de site lithologiques importants (dépôts alluvionnaires notamment). Pour éviter ce biais, le calcul d'un deuxième indicateur est proposé, du même type que le précédent mais pour les surfaces habitées : l'extension probable de chaque classe de sol a ainsi été comparée avec les aires urbanisées soumises à un aléa faible à moyen dans chaque département.

4.2.1. Cartographie des zones habitées

L'INSEE¹ a publié en 2013 une couche SIG cartographiant la population recensée, restituée par mailles carrées de 200 mètres. Cette couche géographique a été considérée ici comme une cartographie fine des zones habitées et construites. En-dehors du périmètre cartographié par l'INSEE on considèrera, comme cela est supposé par l'INSEE, qu'il n'y a pas d'habitation et donc pas d'habitant concerné. L'avantage de cette cartographie est qu'elle permet de tenir compte des modes d'expansion en mode « tâche d'huile » (c'est-à-dire où les constructions nouvelles sont à proximité de constructions déjà existantes).

Par la suite cette cartographie a été superposée au découpage infra-communal des îlots IRIS² fournis également par l'INSEE (Figure 9 et Figure 10). Nous rappelons que le découpage infra-communal est celui qui donne le plus d'informations sur le nombre de logements (avec la différenciation entre maison individuelle et bâti collectif) et les années de construction.

Cette couche résultat sera nommée « Occupation du sol » dans la suite du document et sert de donnée d'entrée pour modéliser les enjeux. Elle a été préférée à l'occupation du sol fournie par les données Corinne Land Cover (2006) qui tend à sous-estimer les surfaces construites en zones d'habitat dispersé ou en zones rurales.

Cette cartographie ne couvre pas exhaustivement les zones urbanisées non habitées, comme les zones industrielles, commerciales, portuaires, etc.

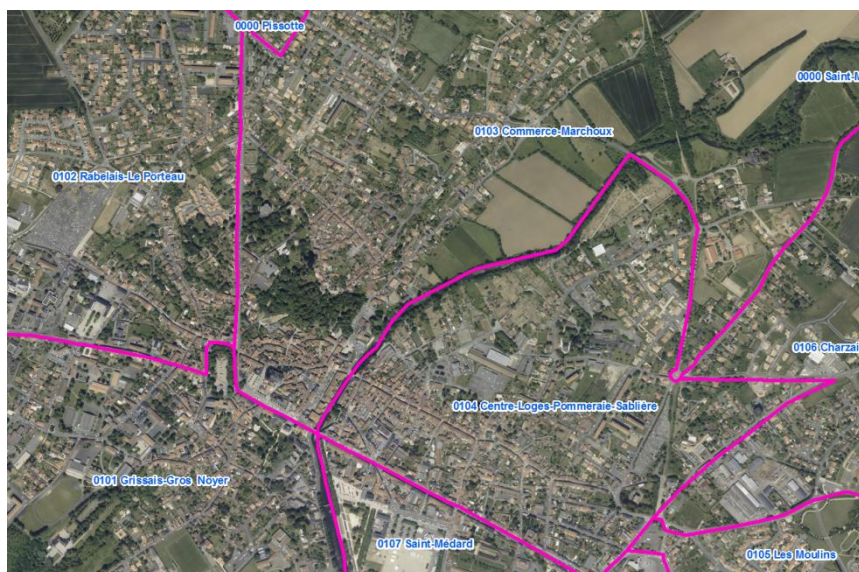


Figure 9 : Exemple du découpage du centre d'une commune en plusieurs îlots IRIS.

¹ http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?reg_id=0&ref_id=donnees-carroyees

² <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/iris.htm>

Estimation statistique de la répartition des classes de sol Eurocode 8 sur le territoire français.

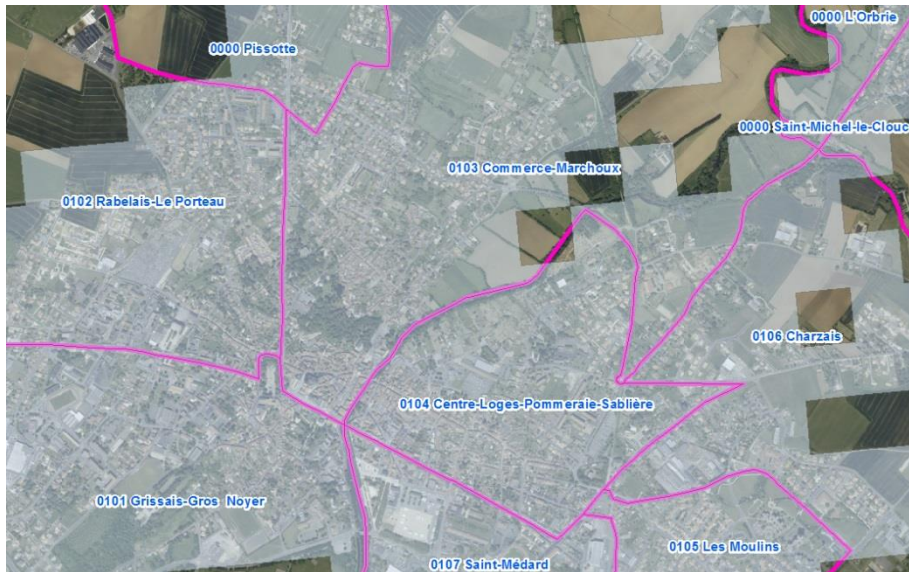


Figure 10 : Fusion de l'ensemble de carrés (200 m) pour délimiter les zones habitées (exemple de Fontenay-le-Comte, 85).

4.2.2. Calcul de l'indicateur

La cartographie de l'occupation du sol ainsi obtenue sur l'ensemble de départements traités dans l'étude, est intersectée avec la cartographie des classes de sol EC8.

L'indicateur sur la répartition des zones urbanisées par classe de sol EC8 se calcule de la même manière que l'indicateur précédent à savoir :

$$\text{Indicateur Surface Habitée}_{i,z,x} = \frac{\text{Surface Habitée}_{i,z,x}}{\text{Surface Habitée}_{i,z}}$$

Le Tableau 6 de l'annexe 1 fournit toutes les valeurs de cet indicateur n° 2.

4.3. INDICATEUR DÉPARTEMENTAL DE RÉPARTITION DU NOMBRE DE MAISONS INDIVIDUELLES PAR CLASSES DE SOL EC8

Les deux indicateurs présentés ci-dessus se réfèrent uniquement au poids de chaque classe de sol par rapport à la surface totale ou la surface totale des zones habitées des départements. Afin de donner une idée quantitative de l'exposition des zones bâties aux effets de site lithologiques, un indicateur de la répartition du nombre de maisons individuelles par classes de sol est proposé.

Le nombre de maisons individuelles est disponible dans les données du recensement INSEE en vigueur (c'est-à-dire 2012). Ce nombre de maisons individuelles est estimé dans chaque îlot IRIS.

Pour un département i , une zone de sismicité z , une classe de sol x et un îlot IRIS j , l'indicateur départemental de nombre de maisons individuelles par classe de sols EC8 se calcule de la façon suivante :

$$\text{Maisons Individuelles}_{i,z,x} = \sum_{j=1}^{\text{IRIS } i,z} \frac{MI_j}{S_j} \times S_{x,j}$$

Où :

- MI_j est le nombre de maisons individuelles de l'îlot IRIS j ,
- S_j est la surface totale de l'îlot IRIS j ,
- $S_{x,j}$ est la surface de sols en classe x dans l'îlot j ($S_{x,j} \leq S_j$),
- $\text{IRIS}_{i,z}$ est le nombre total d'îlots IRIS du département i en zone de sismicité z .

Le Tableau 7 de l'annexe 1 fournit toutes les valeurs de cet indicateur n° 3.

La Figure 11 schématise, en s'appuyant sur l'exemple du département du Var, l'obtention des trois indicateurs présentés.

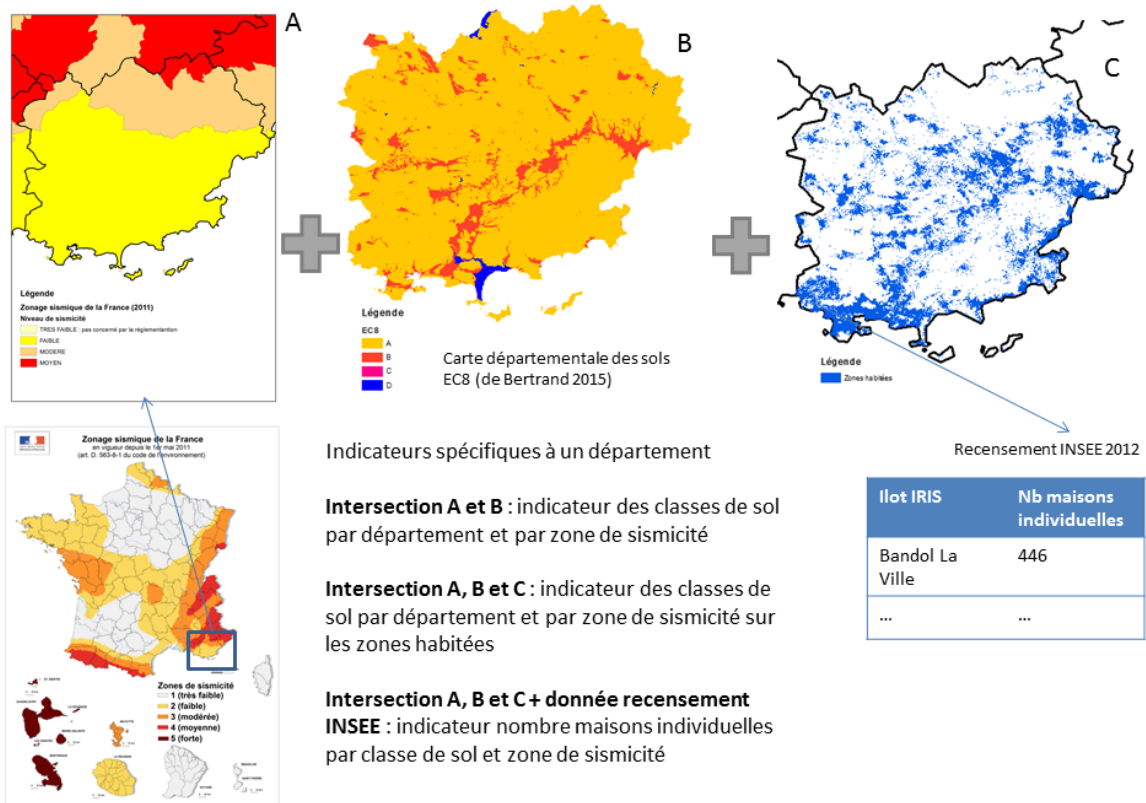


Figure 11 : Schéma représentant l'obtention des trois indicateurs. Focus sur le département du Var.

4.4. INDICE DE CONFIANCE ET VARIABILITÉ DES INDICATEURS

Chaque département est constitué par un ensemble de formations géologiques caractérisées par une « classe de sol EC8 » et par un « niveau de confiance » (cf. 3.4). Afin d'avoir un indicateur de l'incertitude de la cartographie en classes de sol EC8 sur l'ensemble d'un département et par zone de sismicité, le calcul d'un indice de confiance par département et zone de sismicité est proposé. Cet indice est une somme des niveaux de confiance pondérés en fonction de leur surface respective (S_{DEF} : surface totale classée en niveau de confiance faible, S_{INTER} : surface totale classée en intermédiaire et S_{SUR} : surface totale classée en niveau de confiance élevé) pour un département i et une zone de sismicité z :

$$Indice\ Confiance_{i,z} = \frac{S_{DEF\ i,z} \times 1 + S_{INTER\ i,z} \times 2 + S_{SUR\ i,z} \times 3}{S_{totale\ i,z}}$$

L'indice de confiance varie entre 1 et 3. Les valeurs les plus proches de 3 correspondent à des départements dont la majorité des classes de sol EC8 sont considérées comme ayant un niveau de confiance « élevé ». Au contraire, une valeur proche de 1 correspond à un département où une grande partie des formations a été classée en niveau de confiance « faible ».

À cet indice de confiance peut être associé un pourcentage de variation des indicateurs n° 1 et 2 décrits en 4.2 et 4.3. Ce pourcentage a été défini de façon empirique et traduit simplement l'incertitude des résultats liée au niveau de confiance attribué à chaque classification de sol. Afin d'associer un pourcentage de variation réaliste, nous avons testé l'influence d'une modification de classification EC8 sur l'indicateur 1 dans trois cas distincts :

- un département (Pyrénées-Orientales) dont la classification EC8 est considérée comme fiable en raison du nombre d'études réalisées sur la zone et du contexte géologique bien connu ;
- un département (Haut-Rhin) où la fiabilité de la classification EC8 est jugée moyenne en raison de la méconnaissance des épaisseurs et caractéristiques mécaniques de certaines formations (löss notamment) ;
- un département (Vaucluse) dont la fiabilité de la classification EC8 est jugée peu fiable car basée sur une méthode de calcul elle-même peu fiable.

Pour chacun de ces départements, nous avons identifié la ou les formations géologiques clés, celle(s) qui impacte(nt) fortement l'indice de confiance. Nous avons alors modifié de façon arbitraire la classification EC8 de cette ou ces formations pour obtenir une variation de l'extension de chaque classe de sol sur le département. Après plusieurs tests afin de vérifier la représentativité des résultats obtenus sur d'autres départements, ces pourcentages de variation ont ensuite été extrapolés à l'ensemble des départements de l'étude.

Cas des Pyrénées-Orientales (indices de confiance >2.7).

Ce département a été couvert dans une grande partie de son territoire par un macrozonage sismique (Colas *et al.*, 2013), et a été complété par un zonage plus dégradé dans les zones non couvertes car à faible enjeu (zonage Sispyr, Colas *et al.*, 2012).

Le niveau de confiance de la plupart des formations géologiques est « élevé », sauf pour certaines formations de type moraines, colluvions, formations de versant, etc., dont les épaisseurs sont mal connues et qui sont donc classées en E avec un niveau de confiance intermédiaire. Les sols de classe E représentent 4,8 % de la surface totale des Pyrénées Orientales. En prenant l'hypothèse que l'ensemble de ces sols classés initialement en E basculent dans une autre classe suite à une étude plus détaillée, l'erreur sur l'indicateur de répartition des classes de sol sur l'ensemble du département est inférieure à 5 %.

Cette valeur de pourcentage de variation de 5 % calculée sur les Pyrénées Orientales est supposée valable pour toutes les classes de sol ayant un niveau de confiance élevé et présentes dans les autres départements considérés dans notre étude.

Cas du Bas-Rhin (indices de confiance entre 2 et 2,7)

Dans ce département les alluvions du massif des Vosges et les loëss ont été classés en E avec une précision intermédiaire. Les informations concernant l'épaisseur de ces formations sont partielles et il est possible qu'une partie des sols classés en E soit en réalité des sols de classe C ou D, voire A (épaisseur de sols inférieure à 5 m). Les sols de classe E représentent 13 % de la surface totale du Bas-Rhin.

Par analogie, une valeur de pourcentage de variation de 10 % est supposée valable pour toutes les classes de sol ayant un niveau de confiance intermédiaire et présentes dans les autres départements considérés dans notre étude.

Cas du Vaucluse (indices de confiance inférieur à 2)

Seule une partie de ce département est située en zone d'aléa sismique modéré, où l'indice de confiance est inférieur à 2,27 % de la surface de cette zone se voit attribuer une classe de sol D, pourcentage qui paraît exagéré pour une classe de sol finalement très peu représentée dans les études disposant de mesures géophysiques appropriées.

La méthode de calcul automatique des classes de sol à partir de la pente utilisée dans le macrozonage de la région PACA (Bertrand 2015), ne fournit pas toujours une estimation fiable des différentes classes de sol EC8 (cf. Roullé *et al.*, 2010). Il est possible que la classe de sol D (soit 27 % de la surface totale du Vaucluse selon le calcul de l'indicateur n° 1) ait été surreprésentée dans ce département et qu'il s'agisse plutôt, en partie ou en totalité, de sols de classe C, voire B. Cette hypothèse induit une variabilité de la répartition des classes de sol EC8 de l'ordre de 30 %.

Cette valeur de 30 %, qui peut paraître importante, rejoint des constats faits lors d'études antérieures (microzonages antillais, travaux sur les Pyrénées-Orientales ou sur le Fossé Rhénan) où il apparaît que, si certaines formations géologiques semblent assez bien contraintes en termes de classes de sol (comme les alluvions récentes ou anciennes), d'autres formations géologiques, parfois étendues, nécessitent des investigations géophysiques ou géotechniques pour bénéficier d'une classification fiable. C'est le cas par exemple des matériaux présentant une grande variabilité spatiale en termes d'épaisseur ou de propriétés mécaniques (moraines, loëss) ou des formations type altérites qui sont mal cartographiées sur certaines cartes géologiques et donc mal identifiées lors des zonages préliminaires basés uniquement sur la géologie.

Pour toutes les classes de sol ayant un niveau de confiance faible et présentes dans les autres départements concernés par notre étude, nous fonctionnerons donc par analogie avec le cas du Var et nous retiendrons 30 % comme pourcentage de variation.

Indice de confiance	% de variation
Indice supérieur à 2,7	± 5 %
Indice entre 2,7 et 2	± 10 %
Indice inférieur à 2	± 30 %

Tableau 3 : Valeurs proposées pour les % de variation possible des indicateurs 1 et 2 en fonction de la valeur de l'indice de confiance.

Cette variation ayant été estimée de façon très rudimentaire, il serait intéressant de réaliser une étude plus approfondie en analysant les résultats provenant d'études variées en termes de méthodologie (macrozonage, microzonage avec acquisition de données géophysiques et géotechniques, méthode basée sur les corrélations pente-Vs30, analyse géologique simple, etc.) et de contexte géologique (présence de reliefs ou non, bassins profonds, présence d'altérites, etc.).

4.5. RÉSULTATS FINAUX PAR DÉPARTEMENT

Les résultats des trois indicateurs décrits dans les paragraphes précédents ainsi que l'indice de confiance applicable aux indicateurs 1 et 2 sont synthétisés dans les tableaux de l'annexe 1 pour les 51 départements de l'étude.

Un extrait des résultats obtenus pour les Pyrénées-Orientales est donné ici à titre d'exemple (Tableau 4).

	A	B	C	D	E
n° 1 : % surface totale zone sismicité modérée	58,86 %	36,11 %	1,86 %	0,00 %	3,16 %
n° 2 : % surface habitée zone sismicité modérée	18,53 %	55,96 %	9,15 %	0,00 %	16,36 %
n° 3 : % maisons individuelles zone sismicité modérée	15 %	58 %	15 %	0 %	12 %

Tableau 4 : Indicateurs pour les Pyrénées-Orientales, zone de sismicité modérée.

Un exemple d'illustration de chacun des indicateurs du Tableau 4 est donné par la Figure 12 (indicateur n° 1, surfaces de classe de sol par zone de sismicité), la Figure 13 (indicateur n° 2, surfaces de classe de sol en zone urbanisée par zone de sismicité), et la Figure 14 (indicateur n° 3, maisons individuelles par classe de sol par zone de sismicité).

On voit notamment l'importance de la prise en compte de l'urbanisation dans le calcul des surfaces correspondantes à chaque classe de sol puisque l'indicateur n° 1 donne plus de 59 % de la zone de sismicité modérée du département en classe A alors que, l'indicateur n° 2, qui tient compte uniquement des zones urbanisées, donne une valeur de l'ordre de 18 %. Les deux indicateurs 2 et 3 donnent, eux, des résultats proches ce qui semble logique puisque les deux tiennent compte de l'urbanisation soit de façon indifférenciée (indicateur n° 2) soit en se focalisant sur les maisons individuelles (indicateur n° 3).

Pour ce département, l'indice de confiance est supérieur à 2.7 (Tableau 5) ce qui correspond à un % de variation des indicateurs 1 et 2 de $\pm 5\%$. Cela se traduit par exemple par un pourcentage de la surface du département située en classe A variant entre 54 % et 64 % (indicateur n° 1, classe A, zone modérée).

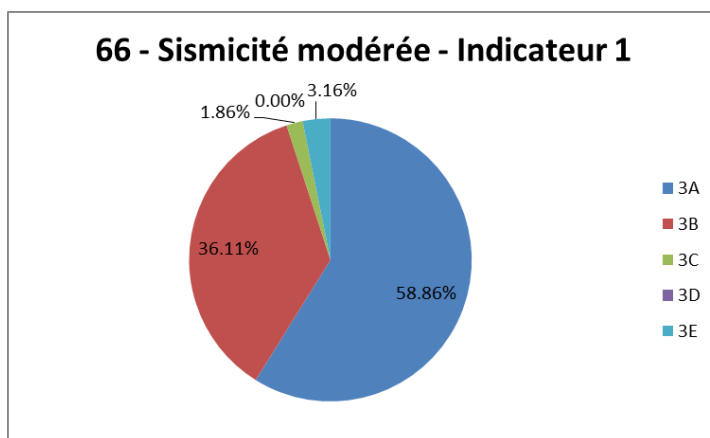


Figure 12 : Représentation de l'indicateur 1 (en %) pour la zone de sismicité modérée des Pyrénées-Orientales.

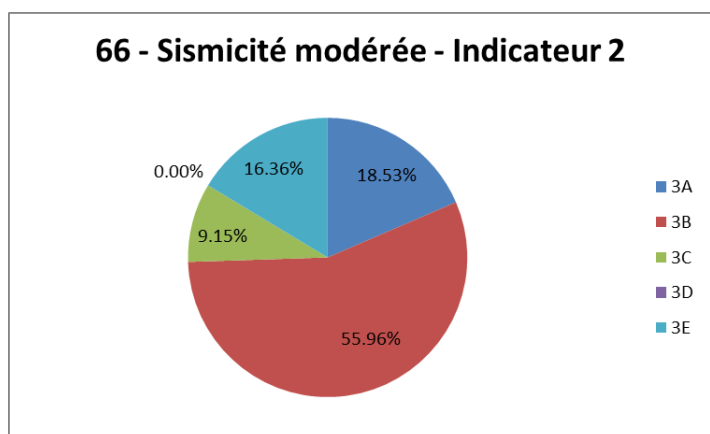


Figure 13 : Représentation de l'indicateur 2 (en %) pour la zone de sismicité modérée des Pyrénées-Orientales.

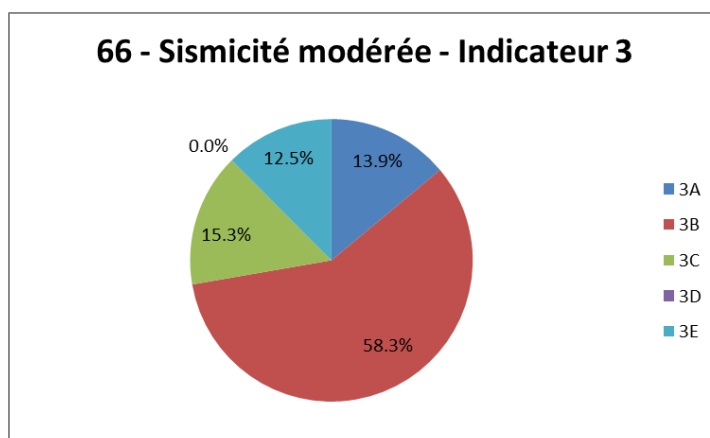


Figure 14 : Représentation de l'indicateur 3 (en %) pour la zone de sismicité modérée des Pyrénées-Orientales.

4.6. RECOMMANDATIONS D'USAGE POUR DES ÉTUDES ULTÉRIEURES

La présente étude a pour objectif l'estimation de la répartition statistique des différentes classes de sol EC8 par département et par zone d'aléa sismique. Les résultats de cette étude répondent à une demande spécifique de la DHUP et ont pour vocation à n'être utilisés que dans le cadre d'une évaluation à niveau national du coût (et du bénéfice) de l'application de la réglementation parasismique depuis 2011.

Si ces études d'évaluation de l'impact économique portent sur les bâtiments construits dans la période 2011-2015, l'indicateur basé sur la surface des zones habitées nous semble le plus pertinent (indicateur n° 2, basé sur une cartographie des zones habitées en 2012). En effet, durant cette période, ce périmètre nous semble représentatif de l'occupation du sol dans ces territoires.

Pour des travaux portant sur des scénarios prospectifs à moyen-long terme, se restreindre au périmètre des zones habitées en 2012 n'est pas forcément adapté. En effet la croissance par densification et par extension en mode « tâche d'huile » existera toujours, mais la possibilité de développement de villes nouvelles ou de nouveaux quartiers, s'étendant sur des terrains jusque-là inoccupés, n'est pas exclue. Dans ce cas l'indicateur n° 1, indépendant de l'urbanisation, semble le plus approprié. Il est également possible de corriger les indicateurs n° 2 et 3 en pondérant la répartition des nouvelles constructions en fonction de la répartition des classes de sol selon l'indicateur n° 1.

5. Conclusions

Pour répondre à la demande de la DHUP, le BRGM a réalisé une estimation statistique de la répartition des classes de sol définies dans l'Eurocode 8 (EC8) sur les territoires français exposés à un aléa faible à moyen selon le zonage sismique de la France. Cette étude a porté sur les 51 départements représentés sur la Figure 1 et s'est appuyée notamment sur l'exploitation des données cartographiques disponibles sur la géologie, le bâti et l'urbanisation ainsi que sur les données de répartition de classes de sol issues de l'étude CCR-BRGM menée depuis 2014 pour la réalisation d'une cartographie nationale du risque sismique.

Le travail a consisté i) à classifier l'ensemble des départements concernés (cf. Figure 1) en termes de classes de sol EC8 (hors zone d'aléa très faible), ii) à attribuer des niveaux de confiance à chaque classification (afin de traduire l'imprécision de l'estimation des classes de sol) puis iii) à croiser les informations obtenues sur les classes de sol avec les données d'urbanisme afin d'obtenir des indicateurs de répartition des classes de sol selon différents critères géographiques et urbanistiques.

Les résultats obtenus pour les 51 départements de l'étude ont été présentés sous forme d'indicateurs (Tableau 5 au Tableau 7) correspondant au :

- pourcentage estimé de l'extension de chaque classe de sol dans les zones d'aléa faible à moyen (indicateur n° 1) ;
- pourcentage estimé de l'extension de chaque classe de sol dans les aires urbanisées en zone d'aléa faible à moyen (indicateur n° 2) ;
- nombre estimé de maisons individuelles existantes concernées par classe de sol et zone d'aléa, pour les zones d'aléa faible à moyen (indicateur n° 3).

Les deux premiers indicateurs ont été complétés par le calcul d'un indice de confiance rendant compte du niveau de confiance des classifications EC8 sur un même département et une même zone de sismicité. À cet indice de confiance peut être associée une variation de l'indicateur correspondant (en %) (Tableau 3) ce qui permet d'en déduire simplement des fourchettes d'extension probable de chaque classe de sol dans un département. Cette variation ayant été estimée de façon très rudimentaire, il serait intéressant de réaliser une étude plus approfondie en analysant les résultats provenant d'études variées en termes de méthodologie et de contexte géologique.

Par ailleurs, une deuxième phase de travail permettrait de compléter cette étude pour les 22 départements n'ayant pas encore été traités, afin de couvrir tout le territoire exposé à un aléa faible, modéré ou moyen. À l'issue des deux phases, l'étude concernerait au total 73 départements métropolitains.

6. Bibliographie

- AFPS (2004). - Construction parasismique des maisons individuelles aux Antilles - Guide CPMI-Antilles. Recommandations AFPS, tome IV, nouvelle édition 2004.
- Bertrand E. (2015). - Méthodologie pour un macrozonage sismique en région PACA Echelle 1/50000 - 1/100000. Rapport CEREMA, Direction Territoriale Méditerranée.
- Bouchut J., Giot D., Cruz-Mermy D. avec la collaboration de Demelemestre F., Halbwachs C. (2004). - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département du Loir-et-Cher. Rapport BRGM/RP 52950-FR, 192p, 28 ill., 6 ann., 3 cartes h-t.
- C. Cornou, P.-Y. Bard, and M. Dietrich. - Contribution of dense array analysis to the identification and quantification of basin-edge-induced waves, part II: Application to Grenoble basin (French Alps). Bulletin of the Seismological Society of America, 93(6):2624–2648, 2003.
- Colas B., Goula X., Roullé A., Garcia I., Buxo P., Roviro J., Dewez T. and Nus E. (2012). - Shake-Map. Site effect corrections. Action 4 – Sub Action 4.1. http://www.sispyr.eu/IMG/pdf/R10-M41-ShakeMap_Site_effect_corrections.pdf
- Colas B., Roullé A., Terrier M., Le Goff E. avec la collaboration de Auclair S. et Vanoudheusden E. (2013). - Macrozonage sismique des Pyrénées-Orientales. Rapport final. BRGM/RP-62994-FR, 150 p., 108 ill., 5 ann., 1 CD.
- Duriez M., Lereculey A. avec la collaboration de Kostecki J., Levesque J-C. et Plat E. (2008) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Calvados. Rapport BRGM/RP-56219-FR, 120 p., 26 ill., 4 ann., 3 cartes h.-t.
- Gabalda.S., Vernhet.Y., Rambourg.D., Prognon.C., Chevremont.P., Capar.L., Courrioux.G., Guillen.A., Leynet.A., Martelet.G., Le.Bayon.B., Baudin.T., Allier.D., Beccaletto.L., Charles.N., Dessandier.D., Dezayes.C., Roulle.A., Tertre.F. (2013). - Élaboration d'un chantier RGF : retour d'expérience du chantier pilote Vosges - Fossé rhénan. Rapport final. BRGM/RP-63008-FR, 233p., 1 CD.
- Granet M., Boulanger M.-O. (2006). - Microzonage de la région sud du Rhin Supérieur - Rapport final d'activité 2002-2006 - Contrat INTERREG III n° 3c.8
- Havenith H.-B., D. Fäh, U. Polom, A. Roullé (2007). "S-wave velocity measurements applied to the seismic microzonation of Basel, Upper Rhine Graben", Geophys. J. Int., 170, 346-358.
- Le Guern C, Notturmo L. avec la collaboration de Béchenec F., et Baudouin V. (2005). – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département du Maine-et-Loire. BRGM/RP-53753-FR., rapport final, 146 p., 28 ill., 5 ann., 3 cartes hors texte.
- Le Guern C., Javanaud T., avec la collaboration de Béchenec F., Rouxel E., Guillet J. et Guignat S. (2007). - Cartographie de l'aléa retrait gonflement des argiles dans le département de la Sarthe. Rapport BRGM RP-55777-FR, 149 pages, 22 illustrations, 5 annexes, 3 cartes hors texte.
- Lereculey A., Duriez M. avec la collaboration de Imbault M. (2008). – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de l'Orne. Rapport BRGM/RP-56594-FR. 115 p., 26 ill., 4 ann., 3 cartes h.-t.
- Macau A., S. Figueras, A. Roullé, L. Kingne, F. Bellmunt, C. Meneses (2012). « Seismic microzonation in two Pyrenean Valleys : Val d'Aran and Luchonnais ». 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbonne, Portugal, 24-28 septembre 2012.
- Pannet P., Tirard E., Bellenger C., Lereculey A. et Lemoine Y. (2010). – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de la Manche. BRGM/RP-58168-FR., 120 p., 26 ill., 4 ann., 3 cartes hors texte.

Plat E., Hewitt T., Le Guern C. avec la collaboration de Imbault M. et Prône E. (2010). – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de la Mayenne. BRGM/RP-58896-FR., 136 p., 30 ill., 6 ann., 3 cartes hors texte.

Rey J. et Tinard P., avec la collaboration de J. Abad, D. Bertil, D. Monfort-Climent et N. Taillefer (2015a). – Partenariat CCR-BRGM 2014-2019. Travaux menés en 2014 dans le cadre du programme commun sur le risque sismique. Rapport BRGM/RP-64454-FR.

Rey J. et Tinard P., avec la collaboration de J. Abad, D. Bertil, D. Monfort-Climent et N. Taillefer (2015b). – Partenariat CCR-BRGM 2014-2019. Travaux menés en 2015 dans le cadre du programme commun sur le risque sismique. Rapport BRGM/RP-65372-FR.

Roullé A., S. Auclair, T. Dewez, A. Hohmann, A. Lemoine, J. Rey (2010). – Cartographie automatique des classes de sol à l'échelle régionale à partir d'un modèle numérique de terrain ou de surface. Rapport BRGM/RP-58853-FR.

Roullé A., Bitri A., Mathieu F., Richalet G. (2007). - Microzonage sismique de la région du sud du Rhin Supérieur – Synthèse du travail réalisé par le BRGM. Rapport BRGM/RP-53712-FR. 102 p. 67 fig., 3 ann.

Schroetter J.M. avec la collaboration de Launay E., Desprez A., Imbault M., Le Roy S. et Plat E. (2010). - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département du Finistère. Rapport BRGM/RP-58916-FR, 118p., 35 ill., 3 ann., 3 cartes h-t.

Schroetter J.M. avec la collaboration de Launay E., Quinton A., Imbault M., Le Roy S. et Plat E. (2010). - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de l'Ille-et-Vilaine. Rapport BRGM/RP-58120-FR, 151p., 60 ill., 4 ann., 3 cartes h-t.

Schroetter J.M. avec la collaboration de Poilvet J.C., Launay E., Imbault M., Le Roy S. et Plat E. (2010). - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département des Côtes d'Armor. Rapport BRGM/RP-58917-FR, 132p., 47 ill., 3 ann., 3 cartes h-t.

Schroetter J.-M., avec la collaboration de Launay E., Ollivaud N., Imbault M., Le Roy S. et Plat E. (2010). – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département du Morbihan. Rapport BRGM/RP-58041-FR. 160 p., 71 ill., 4 ann., 3 cartes h.-t.

Sedan O., Terrier M., Negulescu C., Winter T., Roulle A., Douglas J., Rohmer J., Bes-De-Berc S., De Martin F., Arnal C., Dewez T., Fontaine M. (2008). - Scénario départemental de risque sismique- Méthodologie et processus de réalisation. Rapport BRGM/RP-55415-FR, 459p, 96 fig., 45 tabl., 25 annexes

Sedan O., Negulescu C., Terrier M., Roullé A., Winter T., Bertil D. (2013). - Armagedom – A Tool for Seismic Risk Assessment Illustrated with Applications. *Journal of Earthquake Engineering*, 17, 253-281.

Vincent M., Prian JP, avec la collaboration de Giot D., Halbwachs C., Journeau B., Brière B. (2008). – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département du Cher. Rapport BRGM/RP-52682-FR. 159p, 13 fug., 13 tab., 4 ann., 3 cartes hors texte.

Wald D. J. and Allen T. I. (2007). - Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site Conditions and Amplification. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 5, pp. 1379–1395

Annexe 1

Indicateurs départementaux

Pour chaque tableau, les résultats sont présentés pour les 51 départements de l'étude (identifiant de la colonne 1), par zone de sismicité (jaune : zone de sismicité faible, orange : zone de sismicité modérée, rouge : zone de sismicité moyenne) et par classes de sol (A, B, C, D et E). La colonne « 2A » du Tableau 5 donne par exemple la valeur de l'indicateur n°1 pour la classe EC8 A et pour la zone de sismicité 2 (sismicité faible).

Pour les Tableau 5 et Tableau 6, trois colonnes supplémentaires en fin de tableau donnent les indices de confiance pour chaque zone de sismicité.

DEP	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	3D	3E	4A	4B	4C	4D	4E	CONFIANCE 2	CONFIANCE 3	CONFIANCE 4
01	0.00	42.96	53.62	1.75	1.67	41.92	23.40	25.44	0.99	8.24	45.5	15.8	35.5	1.2	2.0	2.63	2.63	2.37
04						92.08	7.24	0.00	0.68	0.00	95.7	4.0	0.0	0.3	0.0	1.47	1.70	1.90
05	98.53	1.47	0.00	0.00	0.00	97.63	2.37	0.00	0.00	0.00	98.9	0.3	0.0	0.7	0.0	1.88	1.90	1.96
06	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	94.25	5.57	0.00	0.18	0.00	98.5	1.4	0.0	0.1	0.0	2.00	1.75	1.97
09	5.76	93.29	0.02	0.00	0.92	72.30	9.37	3.66	0.00	14.67	87.1	0.0	0.8	0.0	12.1	1.13	2.66	2.87
11	40.94	57.19	1.71	0.00	0.16	86.93	5.83	1.64	0.00	5.61						2.33	2.87	3.00
13	47.48	5.45	0.00	47.08	0.00	45.83	14.00	0.00	40.17	0.00	69.3	11.4	0.0	19.4	0.0	1.35	1.27	1.30
14	71.07	0.00	0.26	0.57	28.10											2.39		
16	63.78	5.74	3.81	0.77	25.90	63.45	0.00	12.23	7.47	16.85						2.53	2.52	
17	62.10	19.51	6.30	4.33	7.77	64.82	0.07	14.69	15.61	4.81						2.61	2.63	
18	11.96	73.12	11.23	0.72	2.97											2.07		
22	77.87	0.56	0.00	0.06	21.52											2.34		
24	60.32	23.58	0.10	0.00	16.00											2.31		
25	42.71	22.69	22.69	0.00	11.91	83.40	5.33	5.33	0.78	5.17	71.2	9.6	9.6	0.0	9.7	2.85	2.89	2.63
26	24.95	46.99	27.37	0.48	0.21	25.96	42.39	30.73	0.25	0.68	50.5	30.3	19.1	0.0	0.2	2.21	2.23	2.49
29	84.55	0.09	0.00	0.59	14.77											2.56		
31	9.50	88.32	1.16	0.00	1.02	35.69	38.95	19.13	0.00	6.23	79.0	0.0	10.2	0.0	10.8	1.23	2.36	2.79
32	0.00	84.52	15.48	0.00	0.00	0.00	88.85	11.15	0.00	0.00						2.36	2.07	
33	0.00	66.07	32.24	1.69	0.00											2.14		
35	62.39	11.24	0.00	2.37	24.00											2.31		
36	19.45	59.51	9.00	2.20	9.84											2.14		
37	0.02	86.83	8.32	4.83	0.00	3.48	87.73	5.96	2.84	0.00						2.01	2.04	
38						42.99	17.65	17.65	0.29	21.43	44.1	15.6	15.6	0.1	24.7		2.43	2.44
39	17.28	40.43	40.43	0.00	1.87	58.52	14.18	17.01	0.41	9.87						2.41	2.66	
40	1.96	66.39	31.46	0.20	0.00	4.39	77.02	14.20	4.40	0.00						2.17	2.25	
41	0.00	76.57	13.75	9.66	0.03											2.00		
44	39.10	40.71	19.22	0.00	0.97	23.60	43.64	31.88	0.31	0.58						2.00	2.00	

49	43.65	30.71	0.00	0.00	25.64	78.67	11.44	0.00	0.00	9.88									2.38	2.72		
50	69.12	4.02	0.00	0.86	26.00														2.57			
52	59.30	15.99	15.99	0.00	8.71														2.82			
53	70.64	9.94	0.00	0.00	19.42														2.32			
54	65.68	9.70	6.04	0.00	18.58	86.28	0.00	0.00	0.00	13.72								2.45	2.72			
56	87.36	0.72	0.00	0.83	11.09														2.63			
57	54.34	11.54	13.25	0.00	20.87	86.94	4.12	4.72	0.23	3.98								2.68	2.86			
61	76.63	6.79	0.00	0.06	16.53														2.52			
64	0.00	100	0.00	0.00	0.00	28.92	56.65	9.46	1.72	3.25	69.4	16.1	7.1	0.0	7.5			2.00	2.29		2.69	
65	0.00	100	0.00	0.00	0.00	0.76	95.23	3.62	0.00	0.40	64.0	7.9	10.8	0.0	17.3			2.00	2.01		2.64	
66						58.86	36.11	1.86	0.00	3.16	82.1	9.5	0.9	0.0	7.5				2.97	2.97		2.93
67	65.23	10.17	0.00	0.00	24.60	42.50	13.97	31.14	0.36	12.02								2.64	2.50			
68						38.97	20.60	25.19	0.00	15.24	12.4	12.6	10.1	0.0	64.8				2.67	2.67		2.47
70	50.44	10.19	10.19	0.00	29.18	54.60	12.56	12.56	0.06	20.22								2.50	2.59			
72	23.05	57.28	19.67	0.00	0.00													2.35				
73						53.08	0.32	32.85	2.99	10.75	53.3	0.1	35.3	0.2	11.0				2.51	2.51		2.52
74						11.23	8.48	77.19	0.40	2.71	36.4	3.7	43.0	0.8	16.1				2.06	2.06		2.36
79						74.63	1.51	5.67	1.21	16.98									2.72	2.72		
83	87.66	11.31	0.00	1.03	0.00	94.81	4.34	0.00	0.85	0.00	91.4	8.6	0.0	0.0	0.0			1.60	1.60		1.68	
84						60.11	12.71	0.00	27.18	0.00	86.9	4.2	0.0	8.9	0.0				1.46	1.46		1.61
85						33.03	49.83	5.24	0.22	11.69									2.00	2.00		
86	29.27	8.86	5.64	0.50	55.72	25.55	34.74	6.11	0.82	32.78								1.75	1.94			
88	66.36	14.30	5.08	0.00	14.26	72.62	1.20	0.88	0.23	25.07								2.80	2.74			
90						52.67	6.33	6.98	0.00	34.02	19.2	4.8	24.5	0.0	51.5				2.53	2.53		2.19

Tableau 5 : Indicateur 1. Répartition des classes de sol en % de surface totale du département, par département, et par zone de sismicité.

DEP	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	3D	3E	4A	4B	4C	4D	4E	CONFIANCE 2	CONFIANCE 3	CONFIANCE 4
01	0.00	32.62	58.12	2.44	6.81	19.75	25.81	30.91	3.19	20.34	22.8	10.0	33.3	7.3	26.7	2.29	2.33	2.11
04						66.85	30.51	0.00	2.65	0.00	70.4	26.1	0.0	3.4	0.0		1.39	1.38
05	81.33	18.67	0.00	0.00	0.00	78.19	21.81	0.00	0.00	0.00	83.9	9.6	0.0	6.5	0.0	1.41	1.41	1.45
06	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	75.65	21.93	0.00	2.42	0.00	75.8	22.4	0.0	1.8	0.0	1.85	1.41	1.43
09	10.69	81.24	1.28	0.00	6.79	40.40	14.56	17.40	0.00	27.64	41.5	0.0	9.7	0.0	48.8	1.34	2.35	2.41
11	24.91	63.84	10.82	0.00	0.43	49.71	20.10	9.48	0.00	20.72						2.11	2.54	
13	69.32	20.96	0.00	9.73	0.00	50.38	24.69	0.00	24.93	0.00	59.7	26.5	0.0	13.8	0.0	1.34	1.24	1.27
14	46.04	0.00	1.50	1.10	51.35											2.09		
16	29.34	2.40	24.08	8.55	35.63	23.17	0.00	37.29	18.35	21.19						2.18	2.16	
17	24.90	8.91	22.01	19.21	24.97	26.77	0.39	28.16	22.34	22.35						2.14	2.16	
18	28.02	31.64	30.53	2.41	7.41											2.06		
22	44.14	1.12	0.00	2.31	52.43											1.88		
24	34.41	22.72	0.42	0.00	42.45											1.68		
25	35.99	24.44	24.44	0.00	15.13	50.76	14.56	14.56	2.60	17.52	73.0	9.9	9.9	0.0	7.1	2.87	2.64	2.26
26	22.51	37.79	35.61	2.06	2.03	18.17	38.36	37.48	2.50	3.48	20.3	38.4	39.3	0.0	2.0	2.18	2.16	2.18
29	38.40	0.49	0.00	10.38	50.72											1.98		
31	13.91	70.78	5.23	0.00	10.09	26.30	32.83	22.15	0.00	18.71	37.9	0.0	37.4	0.0	24.7	1.48	2.26	2.38
32	0.00	73.76	26.24	0.00	0.00	0.00	77.44	22.56	0.00	0.00						2.12	2.01	

33	0.00	67.74	31.20	1.06	0.00																2.13				
35	38.13	16.60	0.00	2.48	42.79																1.86				
36	17.18	32.37	29.78	5.83	14.84																2.13				
37	1.04	45.78	39.99	13.11	0.08																2.24		2.24		
38																							2.30		2.28
39	15.34	39.60	39.60	0.00	5.45																				
40	8.48	64.21	25.39	1.92	0.00																				
41	0.00	42.28	34.99	18.97	3.76																2.00				
44	32.75	33.69	28.90	0.00	4.66																2.00				
49	35.72	21.18	0.00	0.00	43.11																2.19				
50	34.07	7.94	0.00	1.08	56.91																2.10				
52	41.48	22.00	22.00	0.00	14.52																2.32				
53	54.90	15.12	0.00	0.00	29.98																2.29				
54	38.32	5.43	4.90	0.00	51.35																2.11				1.85
56	44.20	5.05	0.00	6.35	44.40																1.93				
57	36.69	15.87	22.46	0.00	24.99																2.36				2.40
61	47.95	7.49	0.00	0.40	44.17																2.11				
64	0.00	100.0	0.00	0.00	0.00																2.00				2.33
65	0.00	100.0	0.00	0.00	0.00																2.00				2.27
66																									2.75

67	49.29	15.41	0.00	0.00	35.30	36.58	21.60	21.16	1.21	19.45							2.41	2.35	
68						21.20	15.65	25.24	0.00	37.91	16.9	14.5	12.6	0.0	55.9			2.22	2.27
70	35.90	16.23	16.23	0.00	31.64	38.52	15.82	15.82	0.95	28.89							2.42	2.44	
72	21.90	47.25	30.85	0.00	0.00												2.19		
73						33.82	0.91	38.19	2.55	24.53	35.0	1.1	37.4	1.9	24.5			2.34	2.34
74						21.23	29.27	36.61	3.60	9.28	28.6	13.9	31.4	7.3	18.9			2.08	2.21
79						32.32	1.58	24.31	3.40	38.38								2.15	
83	65.09	29.75	0.44	4.71	0.00	73.82	22.53	0.00	3.65	0.00	69.5	24.0	0.0	6.5	0.0	1.31	1.37	1.39	
84						47.13	25.52	0.00	27.35	0.00	60.5	21.1	1.8	16.7	0.0			1.22	1.31
85						33.04	34.78	16.68	0.66	14.84								2.00	
86	27.08	6.52	25.65	9.11	31.65	23.24	14.27	24.15	11.94	26.40						2.18	2.14	2.14	
88	43.00	16.86	8.91	0.00	31.23	43.26	2.48	2.41	6.52	45.33						2.52	2.49	2.49	
90						29.45	11.20	8.04	0.00	51.31	23.8	11.8	12.4	0.0	52.0			2.29	2.24

Tableau 6 : Indicateur 2. Répartition des classes de sol EC8 en % de la surface habitée, par département et par zone de sismicité.

DEP	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	3D	3E	4A	4B	4C	4D	4E
01	0	94437	172405	10244	21336	112088	143540	167008	20952	114464	2303	1101	3622	782	2941
04						34650	16790	0	1635	0	125307	50080	0	7127	0
05	16796	3391	0	0	0	50232	12800	0	0	0	52730	5336	0	3826	0
06	11792	0	0	0	0	176108	52319	0	4609	0	194366	64709	0	4790	0
09	3339	36975	702	0	2127	53585	18646	29686	0	41046	7974	0	2206	0	8887
11	66062	149440	56386	0	992	16728	16102	8609	0	7736					
13	281940	62331	0	26143	0	263375	131140	0	97962	0	171784	74218	0	42925	0
14	246098	0	9865	13659	268009										
16	135171	5933	139534	49763	144391	111890	0	190661	95399	86463					
17	128085	27426	126363	89436	123050	277584	6927	294815	270988	216600					
18	109563	120418	119167	11695	31928										
22	513556	10229	0	44021	579190										
24	41604	27031	429	0	52899										
25	20418	13763	13763	0	8333	169355	51810	51810	7305	59884	6207	1041	1041	0	752
26	5733	10710	10061	664	603	89254	211812	221103	15565	24879	10740	21342	21391	0	862
29	550604	6723	0	173819	702628										
31	9367	39149	4072	0	6397	16617	16318	18801	0	12355	8081	0	7274	0	5549
32	0	78061	29746	0	0	0	10325	2760	0	0					
33	0	500002	297589	7808	0										

68								75437	67424	114702	0	154523	27896	29752	25127	0	92976
70	39436	18445	18445	0	34859	90654	41366	41366	41366	1153	73320						
72	175049	377573	253897	0	0												
73						35903	708	39334	2136	26051	94052	2188	104119	4487	61490		
74						12861	17469	24624	3010	7732	188881	91891	217899	52680	140705		
79						181912	7713	140913	22187	193258							
83	558015	250232	467	34439	0	115851	35744	0	5339	0	10074	4005	0	1623	0		
84						244080	144520	0	172496	0	56657	20825	1149	13663	0		
85						331284	326886	193797	5001	189230							
86	38473	9074	38902	13095	45892	122100	58323	122476	60722	143139							
88	33479	11838	5524	0	23694	110061	6845	6670	12971	116553							
90						25238	9733	7296	0	44141	10080	4824	5084	0	21024		

Tableau 7 : Indicateur 3. Nombre de maisons individuelles (INSEE 2012) par département, par classe de sol EC8 et par zone de sismicité.



Centre scientifique et technique
Direction Risques et Prévention
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34