

PICOREF : Piégeage du CO₂ dans les réservoirs géologiques en France

Évaluation du risque sismique
Rapport final

BRGM/RP-54675-FR
avril 2006

PICOREF : Piégeage du CO₂ dans les réservoirs géologique en France

Évaluation du risque sismique
Rapport final

BRGM/RP-54675-FR
avril 2006

Étude réalisée dans le cadre de la convention CEP&M n° 2005/04

A. Roullé

Vérificateur :

Original signé par :

Nom : Hubert Fabriol

Date :

Signature :

Approbateur :

Original signé par :

Nom : Hormoz Modaressi

Date :

Signature :

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : Stockage, CO₂, Risque sismique, Ile-de-France, Bourgogne, Champagne-Ardenne, PICOREF.

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

Roullé A. (2006) – PICOREF : Piégeage du CO₂ dans les réservoirs géologiques en France. Évaluation du risque sismique. Rapport final BRGM/RP-54675-FR, 27 p., 6 fig., 1 tabl.

Synthèse

Dans le cadre du projet PICOREF « Piégeage du CO₂ dans les réservoirs géologiques en France », cofinancé par le Réseau des Technologies Pétrolières et Gazières (RTPG), deux objectifs principaux doivent être atteints : la caractérisation de sites français adaptés au piégeage du CO₂ et la préparation d'un dossier de demande d'autorisation de stockage. Le projet inclut également la mise au point d'une méthodologie pour étudier et surveiller un site de stockage. Un secteur d'étude a été sélectionné dans le Bassin parisien. Il se situe entre Sézanne et Sens, Romilly-sur-Seine et Nangis.

Le présent rapport a pour objectif d'évaluer le risque sismique et d'en déduire les règles parasismiques susceptibles d'être appliquées aux installations de surface sur le futur site de stockage du CO₂.

Par rapport au zonage sismique de la France de 1991, la zone d'étude retenue serait située dans une zone de sismicité 0, c'est-à-dire de sismicité quasiment nulle. Le risque sismique ne constituera donc pas un élément majeur quant au choix du site. Les sources potentiellement sismogéniques dans les domaines sismotectoniques du Bassin parisien septentrional et de la Seine moyenne, qui couvrent la majeure partie de la zone d'étude, sont d'intensité très faible (intensité épiscopale inférieure ou égale à IV MSK). Ce sont donc plutôt les sources sismogéniques des domaines sismotectoniques de Bourgogne-Morvan au sud, des failles de la Seine, de la Loire et du sillon houiller septentrional à l'ouest, et éventuellement de la faille de Bray au nord qui seraient les plus pénalisantes pour le futur site de stockage et qui détermineront le mouvement sismique à prendre en compte au rocher horizontal affleurant.

Les règles parasismiques à appliquer sur le futur site de stockage de CO₂ dépendront de la classification de ses installations de surface. Celles-ci pourront être considérées, soit comme un ouvrage à « risque normal » de type A, B, C, ou D, soit comme un ouvrage à « risque spécial », sachant que le site pourra comprendre les différents types d'ouvrage. Il est important de noter que la réglementation est en cours de révision (sortie prévue courant 2006) et qu'il sera nécessaire d'appliquer les nouvelles directives dès qu'elles seront disponibles.

Concernant la classification applicable aux installations de surface d'un futur site de stockage, on notera :

- que les stockages souterrains de gaz combustibles sont visés par la directive européenne « Seveso II » relative à la prévention des accidents majeurs. À ce titre, les exploitants sont tenus de réviser périodiquement (tous les 5 ans) leur étude de dangers et de mettre en place un Système de Gestion de la Sécurité (SGS) sur leurs installations ;
- que les exploitations de CO₂ naturel, tel celui de Montmiral (Drôme), ne sont pas considérées comme des installations classées de type Seveso.

Sommaire

1. Introduction	7
2. Zone d'étude	9
2.1. CONTEXTE TECTONIQUE ET SISMICITÉ	9
2.2. INDICES NÉOTECTONIQUES.....	10
3. Réglementation parasismique : risque normal/risque spécial	11
3.1. RAPPEL DE LA RÉGLEMENTATION.....	11
3.2. EXEMPLE	12
3.3. CONCLUSIONS SUR LA RÉGLEMENTATION À APPLIQUER	12
4. Risque normal	15
4.1. RÉGLEMENTATION EN VIGUEUR	15
4.2. RÉGLEMENTATION À VENIR (2006).....	16
5. Risque spécial	19
5.1. MÉTHODOLOGIE.....	19
5.2. CONTEXTE SISMOTECTONIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE	22
6. Conclusion	25
7. Bibliographie	27

Liste des figures

Figure 1 - Carte de sismicité historique de la France métropolitaine (SisFrance, 2006) et localisation des failles extraites de la carte géologique de la France au 1/1 000 000. Chaque cercle indique un séisme ressenti et répertorié dans la base SisFrance. Les intensités épacentrales sont indiquées en échelle MSK. La zone d'étude est indiquée par le polygone rouge.....	9
Figure 2 - Zonage sismique de la France (décret du 14 mai 1991). Le polygone rouge indique la zone d'étude.....	16
Figure 3 - Aléa sismique de la France présentée lors de la réunion de lancement du Plan Séisme le 21 novembre 2005 au MEDD.....	17
Figure 4 - Zonage sismotectonique de la France (Blès <i>et al.</i> , 1998) et sismicité historique (SisFrance, 2006)	20
Figure 5 - Spectres forfaitaires au rocher horizontal affleurant pour la zone de sismicité 0 selon l'arrêté du 10 mai 1993 fixant les règles parasismiques pour les installations de type « risque spécial »	21
Figure 6 - Zonage sismotectonique (Blès <i>et al.</i> , 1998) autour de la zone d'étude indiquée par un polygone rouge et sismicité historique (SisFrance, 2006). Les séismes de référence indiqués dans le texte sont repérés par leur date. Cette figure est un agrandissement de la Figure 4	23

Liste des tableaux

Tableau 1 - Tableau récapitulatif des obligations en termes de règles parasismiques à prendre en compte pour le site de référence détaillé dans le paragraphe précédent.	12
---	----

1. Introduction

Le projet PICOREF a pour objectif d'étudier la faisabilité du stockage de CO₂ dans un réservoir géologique profond du bassin de Paris. Dans cette éventualité, le BRGM a étudié les éléments relatifs aux risques sismiques qu'il serait nécessaire de renseigner au regard de la réglementation existante pour établir le dossier de site, pièce constitutive du dossier de demande d'autorisation de stockage de CO₂ dans le sous-sol.

Le lieu de stockage n'étant pas défini à ce jour, il n'est pas possible de réaliser une étude complète de risque sismique sur l'ensemble du périmètre. Ce rapport inventorie les différentes réglementations applicables aux installations dites à risque normal et à risque spécial, décrit les dispositions réglementaires à mettre en œuvre pour chacun des cas envisagés et commente celles-ci en fonction des conditions de la région étudiée.

2. Zone d'étude

2.1. CONTEXTE TECTONIQUE ET SISMICITÉ

La zone d'étude se situe à cheval sur quatre départements : la Seine-et-Marne (77), l'Yonne (89), l'Aube (10) et la Marne (51). Comme l'indique la carte de sismicité déduite de la base de données de sismicité historique SisFrance (www.sisfrance.net), elle est située dans une zone à sismicité quasiment nulle située à l'est du bassin de Paris.

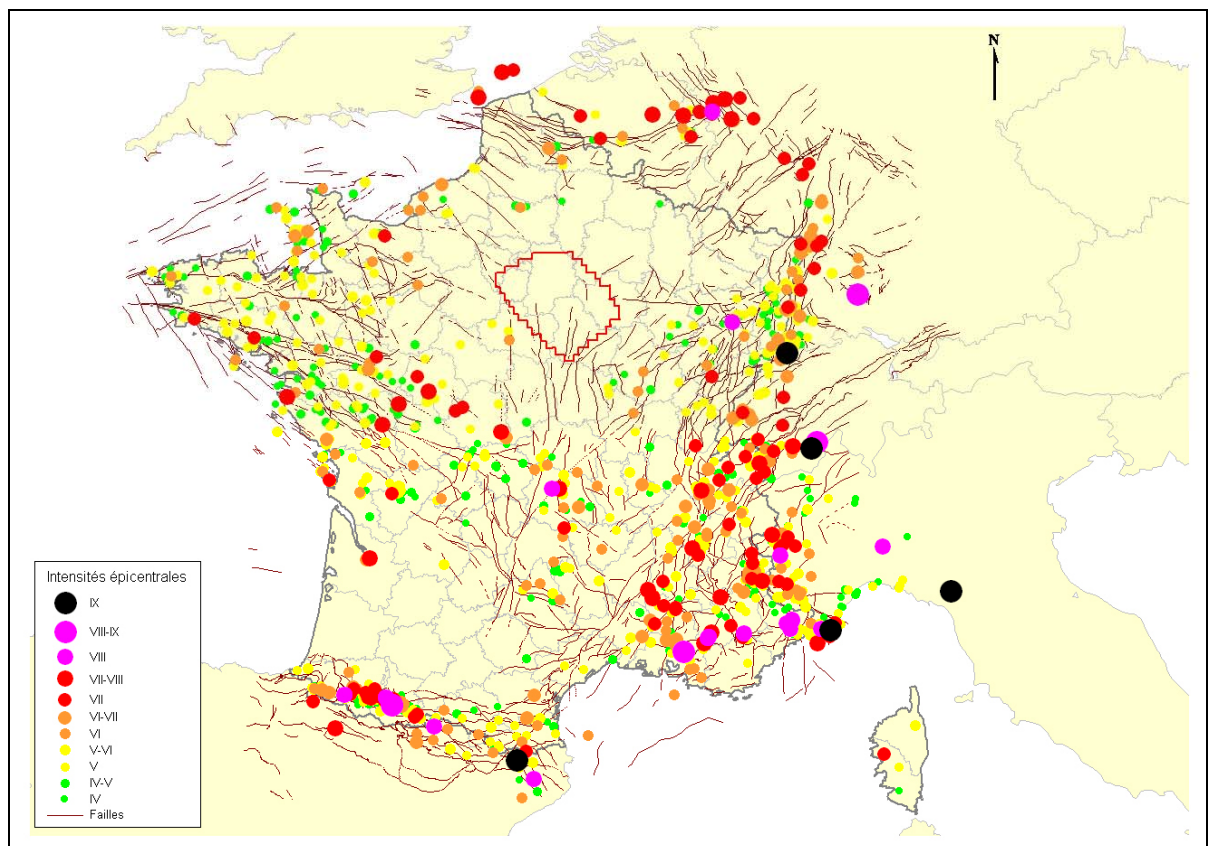


Figure 1 - Carte de sismicité historique de la France métropolitaine (SisFrance, 2006) et localisation des failles extraites de la carte géologique de la France au 1/1 000 000. Chaque cercle indique un séisme ressenti et répertorié dans la base SisFrance. Les intensités épicentrales sont indiquées en échelle MSK. La zone d'étude est indiquée par le polygone rouge.

2.2. INDICES NÉOTECTONIQUES

La base de données Néopal recense les indices néotectoniques et paléosismiques du territoire métropolitain provenant des fichiers d'organismes publics (tels que le BRGM, EDF, IRSN, CEA) ou d'instituts de recherche. Il s'agit de déformations quaternaires affectant des couches géologiques proches de la surface : failles, zones broyées, décalages de strates, glissements de terrain, traces de liquéfaction. Ces indices sont précieux, en particulier dans les zones à faible sismicité où il existe peu (ou pas) d'événement sismique important connu historiquement.

Pour la zone qui nous intéresse, seul un indice néotectonique est recensé dans la base Néopal. Il s'agit d'un indice en cours d'étude à Romilly-sur-Seine (Aube) en limite est de la zone d'étude. Il n'est donc pas exploitable en l'état.

3. Réglementation parasismique : risque normal/risque spécial

3.1. RAPPEL DE LA RÉGLEMENTATION

Le décret n°91-461 du 14 mai 1991 relatif à la prévention du risque sismique (Journal Officiel du 17 mai 1991), distingue et définit deux catégories d'ouvrages :

- la catégorie des ouvrages dite « **à risque normal** » qui comprend les équipements et installations pour lesquels les conséquences d'un séisme demeurent circonscrites à leurs occupants et à leur voisinage immédiat (article 3) ;
- la catégorie dite « **à risque spécial** » qui comprend les bâtiments, les équipements et les installations pour lesquels les effets sur les personnes, les biens et l'environnement, de dommages mêmes mineurs résultant d'un séisme peuvent ne pas être circonscrits au voisinage immédiat des dits bâtiments, équipements et installations (article 6).

La première catégorie d'ouvrages comprend quatre classes : A, B, C, et D dont la définition a été précisée dans l'arrêté du 29 mai 1997 paru au JO le 03 juin 1997 relatif « à la classification et aux règles de construction applicables aux bâtiments de la catégorie dite à risque normal ». La classification de ces bâtiments est synthétisée ci-dessous :

- classe A : bâtiments dans lesquels est exclue toute activité humaine (ex : hangars) ;
- classe B : habitations individuelles, immeubles d'au plus 28 m de hauteur et établissements recevant du public et industriels de moins de 300 personnes ;
- classe C : immeubles de plus de 28 m de hauteur, établissements recevant du public et bâtiments industriels (300 personnes et plus), certains établissements sanitaires et sociaux, bâtiments des centres de production d'énergie ;
- classe D : tous les bâtiments nécessaires à la gestion de crise tels que les préfectures, casernes de pompiers, centres de secours, hôpitaux, commissariats de police, casernes de l'armée et de la gendarmerie, centres de télécommunications, aéroports, réservoirs d'eau potable, etc...

La seconde catégorie d'ouvrages (dite à « risque spécial ») a, quant à elle, fait l'objet de l'arrêté du 10 mai 1993 qui fixe « les règles parasismiques applicables aux installations soumises à la législation sur les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) » (Journal Officiel du 17 juillet 1993). Dans ce cas, il convient de distinguer deux types d'ICPE particulières selon la directive 96/82 du 9 décembre 1996 (directive Seveso II) : les installations de type Seveso seuil haut (installations classées à haut risque) et les installations de type Seveso seuil bas (installations classées à risque).

3.2. EXEMPLE

À titre d'exemple, on peut considérer un site industriel comprenant :

- des bâtiments de classe B, ou C selon la taille et la capacité d'accueil (ex : bureaux) ;
- des bâtiments de classe A (ex : hangars) ;
- une installation classée de type Seveso seuil haut (ex : cuve de chlore) ;
- une installation classée de type Seveso seuil bas (ex : pompe à essence).

Sur ce site et selon la réglementation en vigueur, les différentes installations seront classées de la manière suivante :

Installation considérée	Type d'ouvrage	Obligations en termes de règles parasismiques
Bâtiments de classe B, ou C	Risque normal	Dépend de la zone de sismicité
Bâtiments de classe A	Risque normal	Non
Installation Seveso seuil haut	Risque spécial	Oui
Installation Seveso seuil bas	Risque normal	Non

Tableau 1 - Tableau récapitulatif des obligations en termes de règles parasismiques à prendre en compte pour le site de référence détaillé dans le paragraphe précédent.

3.3. CONCLUSIONS SUR LA RÉGLEMENTATION À APPLIQUER

Les règles parasismiques à appliquer sur le futur site de stockage de CO₂ dépendront de la classification de ses installations de surface, qui pourront être considérées soit comme un ouvrage à « risque normal » de type A, B, C, ou D, soit comme un ouvrage à « risque spécial », sachant que le site pourra comprendre les différents types d'ouvrage. Il est important de noter que la réglementation est en cours de révision (sortie prévue courant 2006) et qu'il sera nécessaire d'appliquer les nouvelles directives dès qu'elles seront disponibles.

Si l'on recherche des analogies entre les sites de stockage souterrain de gaz combustibles tels celui de Chemery (Loir-et-Cher) ou les sites de production de CO₂ tel celui de Montmiral, des différences de classification notables apparaissent.

Les stockages souterrains de gaz combustibles et les installations de liquéfaction de gaz sont visés par la directive européenne « Seveso II » relative à la prévention des accidents majeurs. À ce titre, les exploitants sont tenus de réviser périodiquement (tous

les 5 ans) leur étude de dangers et de mettre en place un Système de Gestion de la Sécurité (SGS) sur leurs installations
(http://www.aquitaine.drire.gouv.fr/ssol/stockages_gaz.html#LUG).

Cependant, de tels établissements comportent à la fois des installations classées de type Seveso seuil haut et de type Seveso seuil bas (<http://www.centre.drire.gouv.fr>).

Le gisement de CO₂ de Montmiral (Drôme), quant à lui, n'est pas considéré comme une ICPE de type Seveso.

4. Risque normal

Dans ce chapitre, nous décrivons la réglementation parasismique à appliquer pour les installations du futur site considérées comme des ouvrages à « risque normal ».

4.1. RÉGLEMENTATION EN VIGUEUR

Pour l'application de la réglementation à la catégorie « risque normal », le territoire national est divisé en cinq zones de sismicité croissante : 0, Ia, Ib, II et III (Figure 2). La zone 0 correspond à une zone de sismicité quasiment nulle, la zone I à une sismicité faible, la zone II à une sismicité modérée et la zone III à une sismicité forte (Antilles). Ce zonage est basé essentiellement sur les données de sismicité historique (intensité maximale et fréquence des secousses), pondérées par la prise en compte de données sismotectoniques. L'annexe du décret du 14 mai 1991 indique la répartition des départements, arrondissements et cantons par rapport aux cinq zones de sismicité selon le découpage administratif du 1^{er} janvier 1989.

La zone d'étude se situant en zone de sismicité 0, c'est-à-dire en zone de sismicité quasiment nulle, il n'y a pas lieu d'appliquer les règles parasismiques PS92 actuellement en vigueur.

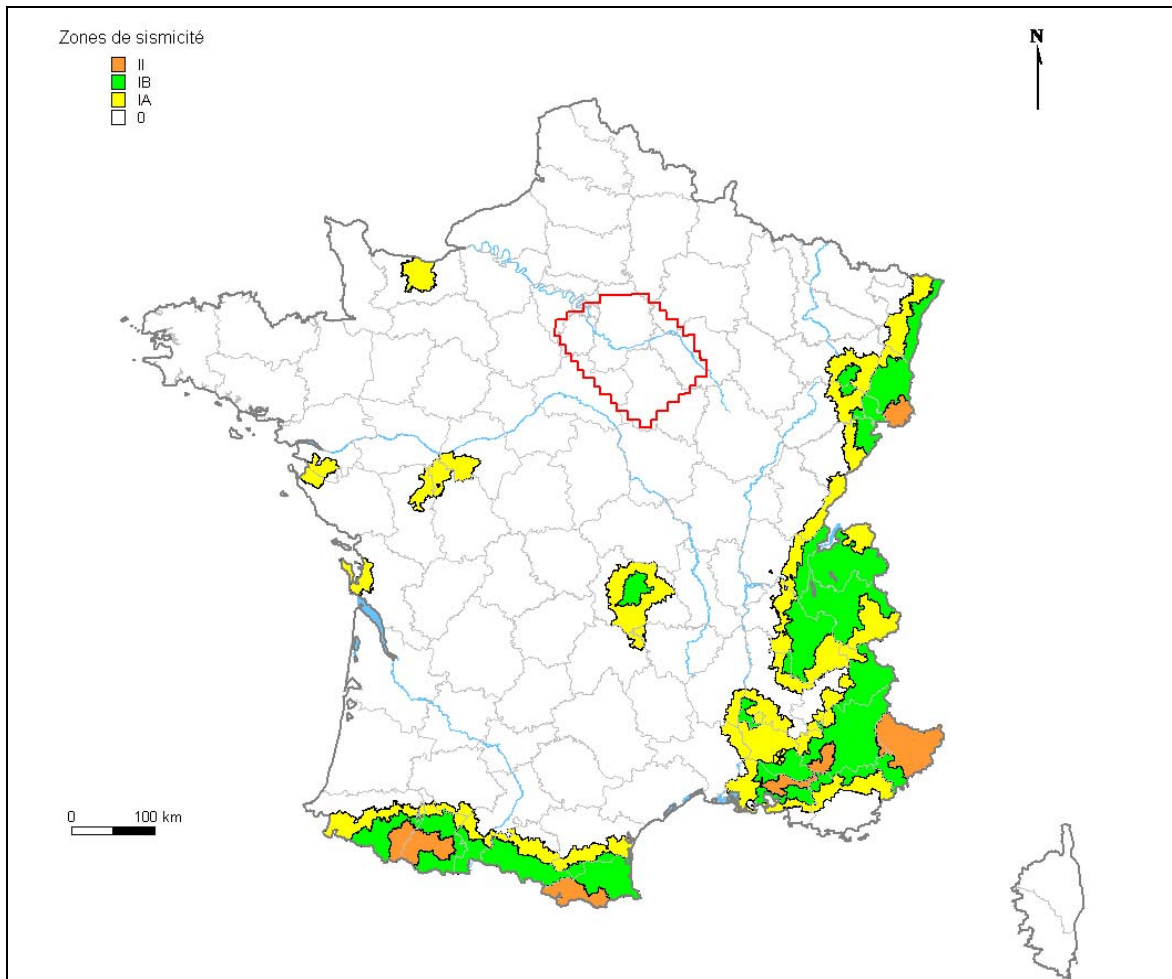


Figure 2 - Zonage sismique de la France (décret du 14 mai 1991). Le polygone rouge indique la zone d'étude.

4.2. RÉGLEMENTATION À VENIR (2006)

Un nouveau zonage réglementaire de la France est en cours de réalisation. Il sera probablement disponible courant 2006. Ce zonage s'appuiera sur la carte d'aléa sismique présentée lors de la réunion de présentation du Plan Séisme du 21 novembre 2005 (Figure 3) et sur de nouvelles règles parasismiques actuellement en discussion et basées sur les règles européennes EuroCode 8 (EC8).

Il conviendra de prendre en compte ce nouveau zonage réglementaire et ces nouvelles règles parasismiques lors de l'étude finale, si ces éléments sont alors disponibles.

On peut voir dès à présent sur la Figure 3 que la zone d'étude est située en zone d'aléa très faible, ce qui correspond à des accélérations du sol inférieures à $0,7 \text{ m/s}^2$ pour des conditions standard de sol (rocher horizontal affleurant) et une période de retour de 475 ans (équivalent à une probabilité d'occurrence de 10 % sur 50 ans).

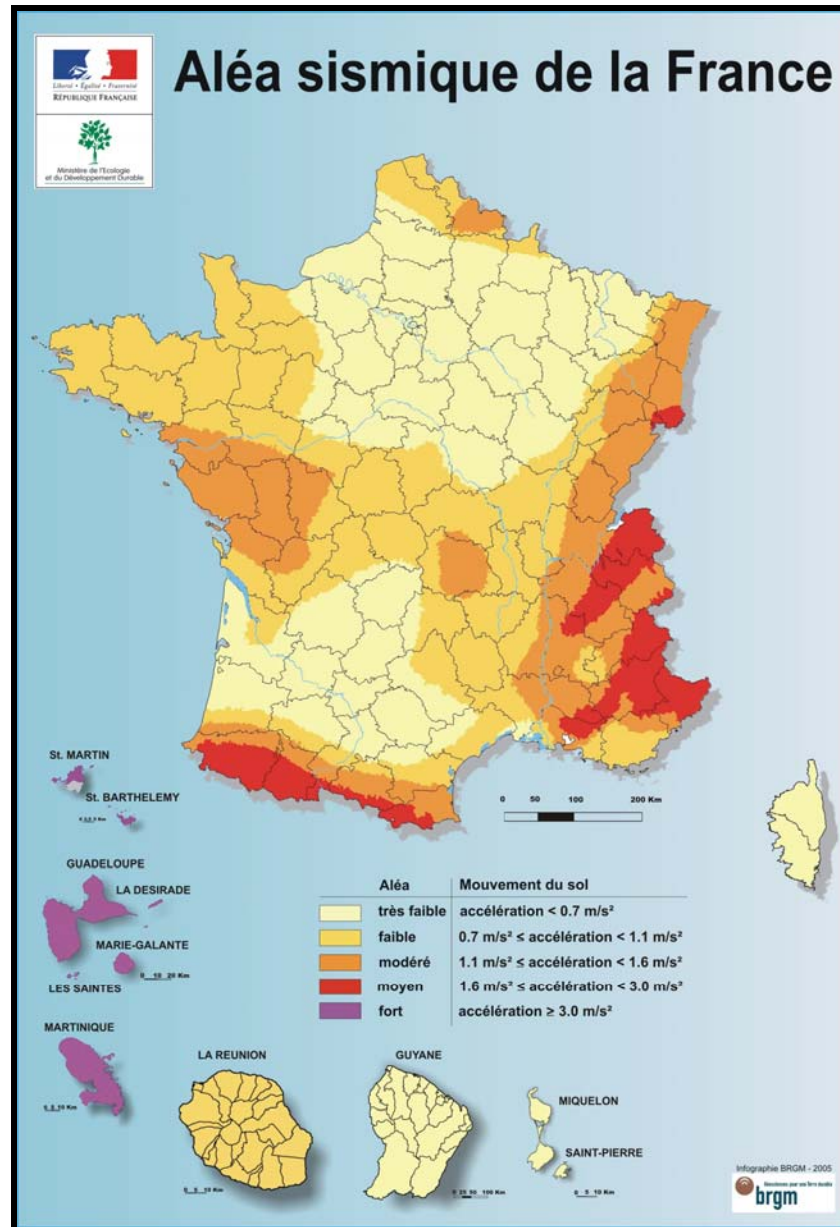


Figure 3 - Aléa sismique de la France présenté lors de la réunion de lancement du Plan Séisme le 21 Novembre 2005 au MEDD.

5. Risque spécial

Pour les installations de type « risque spécial », il conviendra d'appliquer les règles parasismiques définies par l'arrêté du 10 mai 1993 et la circulaire du 27 mai 1994.

5.1. MÉTHODOLOGIE

La démarche à suivre est une démarche au cas par cas aboutissant à l'estimation d'un spectre de réponse spécifique adapté au contexte sismotectonique local et aux conditions de sol sous l'installation étudiée.

La méthodologie à suivre est la suivante :

- évaluation du ou des séismes maximaux historiquement vraisemblables (SMHV) à partir des données historiques et géologiques. On s'appuiera notamment sur le zonage sismotectonique de la France réalisé par Blès *et al.* (1998, Figure 4) et sur la base de sismicité historique SisFrance (www.sisfrance.net). Ces séismes sont définis de manière déterministe, en supposant que des séismes analogues aux séismes historiquement connus sont susceptibles de se produire dans l'avenir, avec une position d'épicentre qui soit la plus pénalisante pour le site (sous réserve que cette position reste compatible avec les données géologiques et sismiques) ;
- pour chaque SMHV, définition d'un ou de plusieurs séisme(s) majoré(s) de sécurité (SMS) déduit(s) du SMHV par la relation en intensité suivante : $I_{SMS} = I_{SMHV} + 1$ (sous réserve que cette intensité reste compatible avec les données géologiques et sismiques) ;
- calcul des spectres de réponse élastique correspondant à chaque SMS pour différents amortissements. Ces spectres de réponse représentent l'amplitude maximale de la réponse d'un oscillateur simple en fonction de sa fréquence ;
- prise en compte des effets de site géologiques au droit du site, si cela s'avère nécessaire au vu des conditions géologiques locales (présence de sols mous susceptibles d'amplifier les mouvements du sol ; par exemple : présence d'argiles, de sables, de limons ou de rocher altéré).

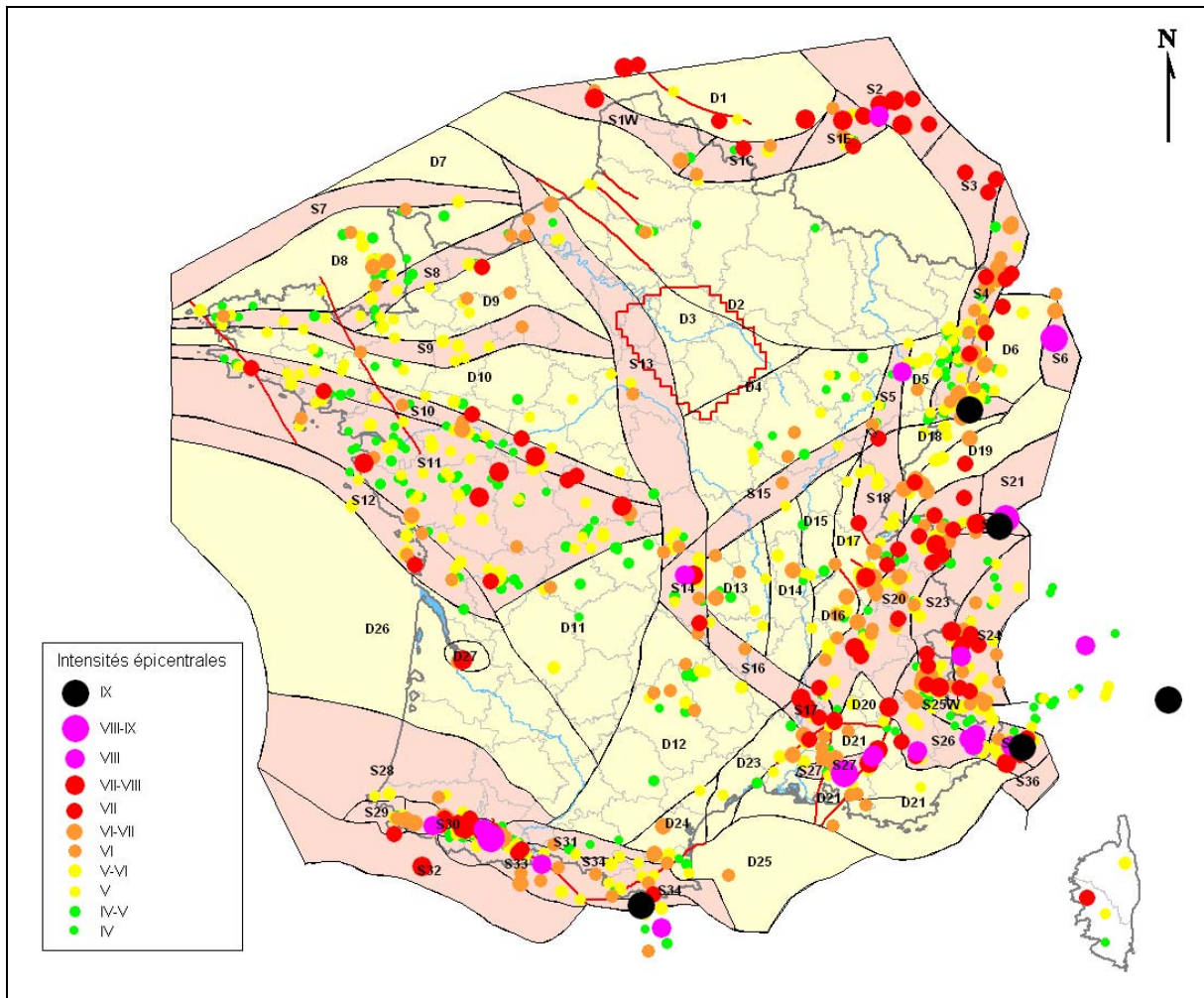


Figure 4 - Zonage sismotectonique de la France (Blès et al., 1998) et sismicité historique (SisFrance, 2006).

Il est à noter que, pour les installations classées en zone de sismicité 0 comme c'est le cas ici, l'exploitant peut utiliser un SMS *a priori* caractérisé par un spectre de réponse forfaitaire défini par rapport au spectre de réponse de référence décrit dans l'arrêté du 10 mai 1993 auquel on applique un coefficient multiplicateur (accélération de calage) au moins égal à $1,5 \text{ m/s}^2$ (Figure 4). Néanmoins, même pour la zone de sismicité 0, si le préfet dispose d'éléments mettant en évidence des différences notables entre les SMS obtenus forfaitairement et les SMS obtenus par une étude spécifique, il peut imposer à l'exploitant de réaliser une étude spécifique comme décrite ci-dessus, sans possibilité d'y déroger pour l'exploitant.

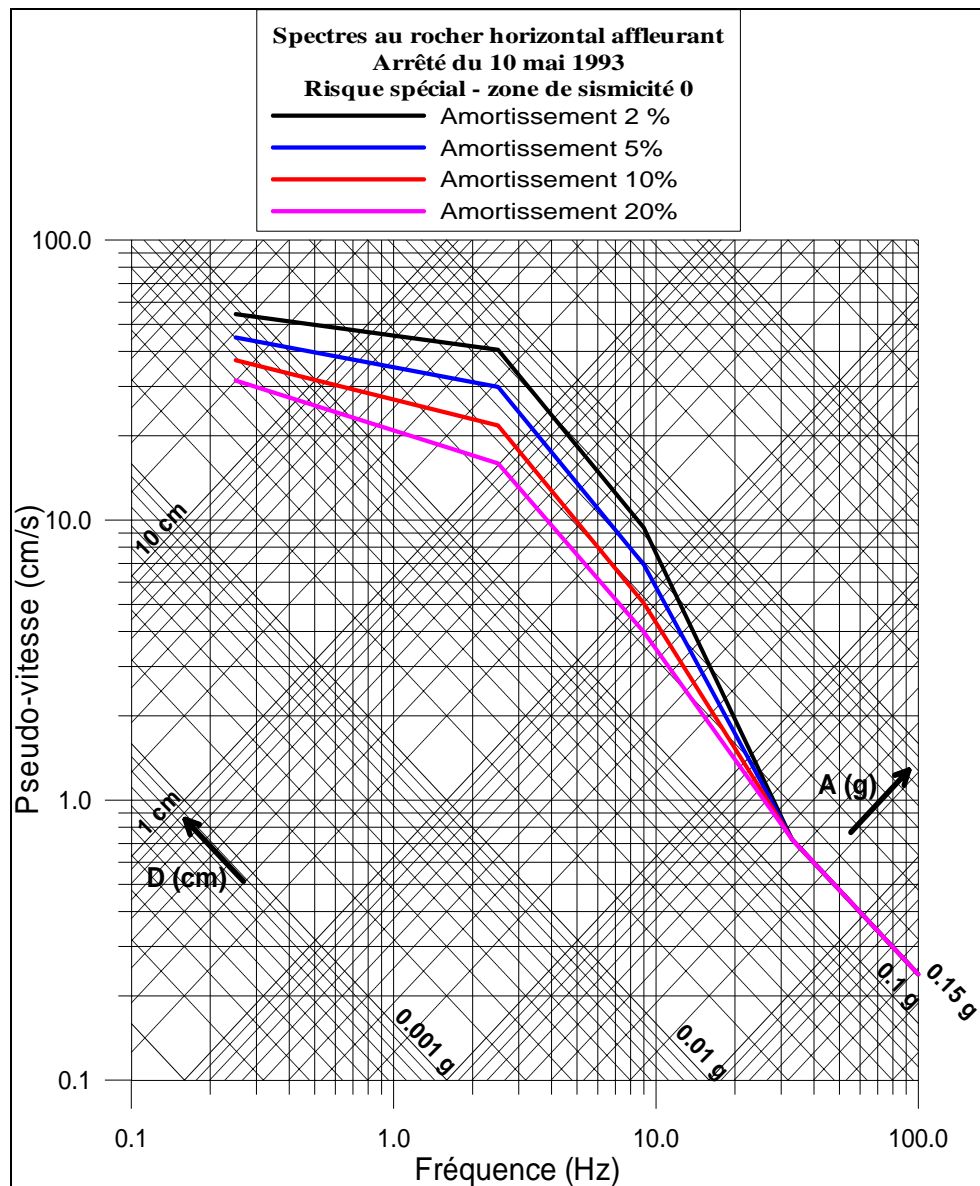


Figure 5 - Spectres forfaitaires au rocher horizontal affleurant pour la zone de sismicité 0 selon l'arrêté du 10 mai 1993 fixant les règles parasismiques pour les installations de type « risque spécial ».

Concernant la prise en compte des effets de site géologiques, la méthodologie suivie habituellement au BRGM pour ce genre d'études est la suivante :

- collecte des données géologiques, géophysiques et géotechniques existantes au droit du site ;

- si cela est nécessaire, réalisation de mesures géophysiques et géotechniques complémentaires pour avoir une bonne caractérisation des paramètres mécaniques de la colonne de sol au droit du site ;
- définition d'une ou de plusieurs colonne(s) de sol représentatives(s) de la géologie locale ;
- simulation numérique de la réponse 1D des colonnes de sol à l'aide du logiciel CyberQuake (Modaressi *et al.*, 1997) qui permet de prendre en compte d'éventuels effets non-linéaires. Les données d'entrée pour ces simulations sont des accélérogrammes synthétiques calculés à l'aide du logiciel SimQuake (Gasparini et Vanmarcke, 1976) et des accélérogrammes naturels tirés des bases de données sismologiques européennes ou mondiales ;
- estimation des spectres de réponse adaptés aux conditions locales de sol.

Attention, il est à noter que la réglementation actuelle est en cours de révision. De nouvelles règles parasismiques seront donc probablement à prendre en compte lors de l'étude finale, une fois la localisation du futur site de stockage définie précisément.

5.2. CONTEXTE SISMOTECTONIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

Bien qu'il ne soit pas encore possible de définir les SMHV et SMS adaptés au futur site de stockage de CO₂ faute de localisation précise, il est intéressant d'étudier les sources sismogéniques les plus importantes pour cette zone d'étude d'après le zonage sismotectonique de Blès *et al.* (1998), représenté sur la Figure 6.

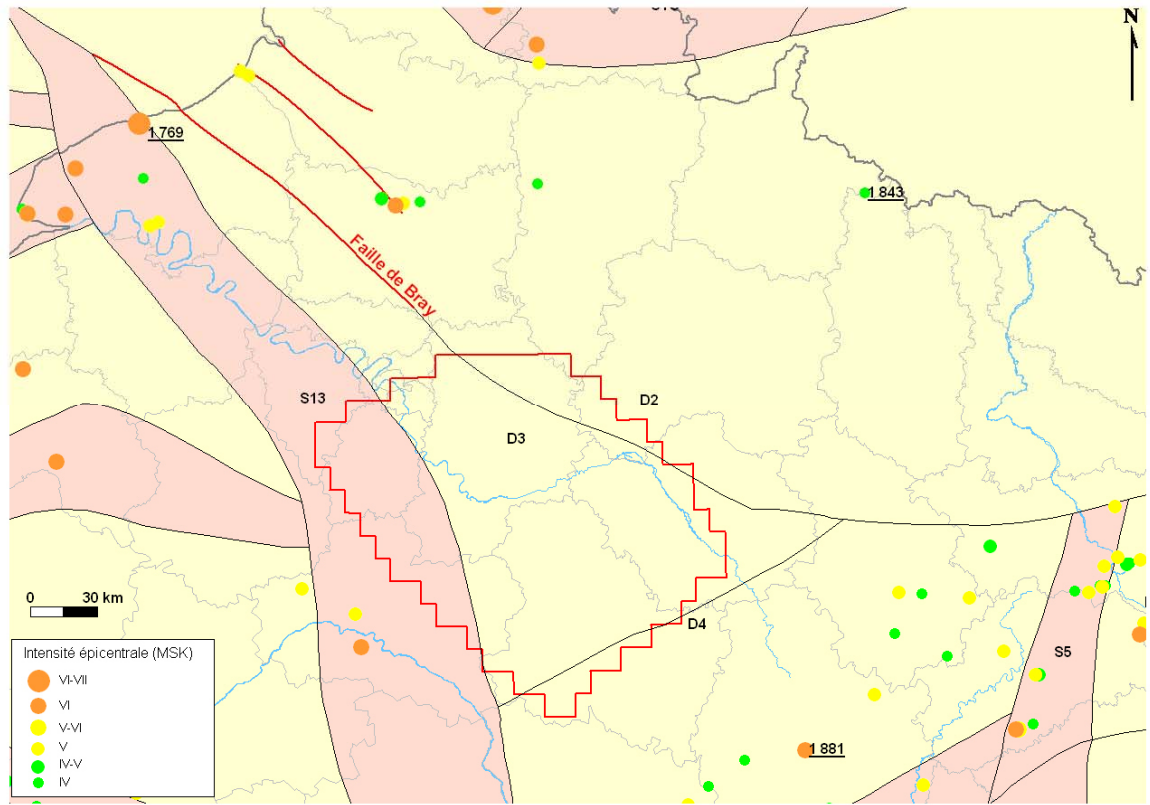


Figure 6 - Zonage sismotectonique (Blès et al., 1998) autour de la zone d'étude indiquée par un polygone rouge et sismicité historique (SisFrance, 2006). Les séismes de référence indiqués dans le texte sont repérés par leur date. Cette figure est un agrandissement de la Figure 4.

Les domaines simotectoniques les plus importants pour la zone d'étude sont les suivants :

- Bassin parisien septentrional (D2), qui comprend la majeure partie de la Champagne, la Lorraine, le Luxembourg et leurs alentours frontaliers. Cette zone est quasiment asismique et caractérisée par le séisme de référence du 8 avril 1843 d'intensité épicentrale IV MSK (magnitude estimée à 4,0) ;
- Seine moyenne (D3), quasiment asismique. Aucun séisme de référence n'est identifiable dans ce domaine sismotectonique en dehors de rares séismes d'intensité épicentrale proche de III dont la fiabilité quant à la localisation et à l'intensité est elle-même très faible ;
- Bourgogne-Morvan (D4), de sismicité modérée et traversé par des failles de direction NNE-SSW et NE-SW. Cette zone est caractérisée par le séisme de référence du 4 juillet 1881 de magnitude macrosismique estimée à 4,5 et d'intensité épicentrale VI MSK ;

- Failles de la Seine, de la Loire et sillon houiller septentrional (S13). Ce système de structures sismogènes se superpose à la grande anomalie magnétique du Bassin parisien. Il se caractérise par des failles de direction NNW-SSE au nord et NS au sud et par le séisme de référence du 1^{er} décembre 1769 de magnitude macrosismique estimée à 4,8 et d'intensité épiscopale VI-VII MSK.

Au cas où le futur site de stockage serait choisi au nord de la zone d'étude indiquée par un polygone rouge sur la Figure 6, il sera également nécessaire de considérer comme source sismogénique potentielle la faille du pays de Bray (surlignée en rouge sur la limite entre les domaines sismotectoniques D2 et D3). Cette faille est de type décrochante dextre, de direction NW-SE et son séisme de référence est celui du 1^{er} décembre 1769 de magnitude macrosismique estimée à 4,8 et d'intensité épiscopale VI-VII MSK (comme pour le domaine sismotectonique S13).

En conclusion, les sources potentiellement sismogéniques des domaines D2 et D3 sont d'intensité très faible (intensité épiscopale inférieure ou égale à IV MSK). Ce sont donc plutôt les sources sismogéniques des domaines sismotectoniques D4, S13 et la faille du pays de Bray qui seront les plus pénalisantes pour le futur site de stockage et détermineront le mouvement sismique à prendre en compte au rocher horizontal affleurant.

6. Conclusion

Le futur site de stockage de CO₂ serait situé dans une zone de sismicité quasiment nulle. Le risque sismique ne constituera donc pas un élément majeur quant au choix du site. Il conviendra néanmoins de prendre en compte les règles parasismiques en vigueur lors de la conception des installations de surface, en distinguant les bâtiments soumis aux règles de type « risque normal » de ceux soumis aux règles de type « risque spécial ». Les nouvelles règles parasismiques françaises étant actuellement en cours d'élaboration, il sera nécessaire d'appliquer la réglementation en vigueur lors de la réalisation du projet.

7. Bibliographie

Blès J.L., Bour M., Dominique P., Godefroy P., Martin C., Terrier M. (1998) - Zonage sismique de la France métropolitaine pour l'application des règles parasismiques aux installations classées. Document BRGM, n°279, 56 p.

BRGM, EDF, IRSN, SisFrance (2006) - www.sisfrance.net.

Gasparini D., Vanmarcke E.H. (1976) - Simulated earthquake motions with prescribed response spectra. M.I.T. Department of Civil Engineering Research Report R76-4, order n°527, January 1976.

Modaressi H., Foerster E., Mellal A. (1997) - Computer aided seismic analysis of soils. Proc. of the 6th Int. Symp. on numerical models in geomechanics, NUMOG VI, Montréal, Québec, Canada, July 2-4.



Centre scientifique et technique
Service Aménagement et risques naturels
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34