

**Ingénierie Géotechnique et Sismique
Etude Bibliographique****FOS SUR MER (13)****FOS FASTER LNG TERMINAL****Mars 2010****N° projet : 10L-0004-a01**

Mission réalisée à la demande de : FOS FASTER LNG Terminal

Mission réalisée pour le compte de : FOS FASTER LNG Terminal

Chef de Projet : David MOREAU

Rapport rédigé par : David MOREAU

Version	Date	Pages	Modifications	Visa du Rédacteur	Validation du Chef de projet
1	17/05/2010	14		DMO	DMO

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION

- 1.1 Description du projet
- 1.2 Données contractuelles
- 1.3 Détails des études menées
- 1.4 Limites de l'étude

2.0 GEOLOGIE STRUCTURALE REGIONALE – ELEMENTS DE TECTONIQUE

- 2.1 Introduction
- 2.2 Séismicité
- 2.3 Sources sismiques potentielles

3.0 EXAMEN DES ETUDES SISMQUES REGIONALES

- 3.1 Introduction
- 3.2 Programme d'évaluation globale du risque sismique
- 3.3 Bibliographie concernant l'évaluation du risqué sismique au droit du site
- 3.4 Résumé

4.0 ETUDE COMPLEMENTAIRE RESTANT A MENER

- 4.1 Etude sismique détaillée de risque
 - 4.1.1 Developpement d'un modèle sismo-tectonique
 - 4.1.2 Analyse probabiliste du risque
 - 4.1.3 Analyse des effets de site
 - 4.1.4 Evaluation de la liquéfaction
 - 4.1.5 Analyse simplifiée des interactions sol/structure

5.0 REFERENCES

FIGURES

Figure 1 : sismicité régionale

Figure 2 : failles régionales

1 INTRODUCTION

1.1 Description du projet

Le projet de Terminal Méthanier FOS FASTER se situe à FOS SUR MER à 50km environ au Nord Ouest de Marseille (13). Le projet se situe plus précisément dans le prolongement du terminal minéralier dans une zone triangulaire comprise entre les chenaux d'accès des darses 1 et 2 du bassin Ouest du Port de Marseille-Fos. Le projet prévoit le remblaiement de cette zone puis la création d'un terminal minéralier (bacs de stockage de gaz, des process associés et appontements nécessaires à la livraison par voie maritime de cette énergie).

1.2 Données contractuelles

Cette mission est réalisée par FUGRO WEST INCORPORATED sous la supervision de FUGRO Géotechnique SA à la demande et pour le compte de FOS FASTER LNG Terminal dans le cadre de la commande FFLNG 020 du 18/02/2010 conformément à notre devis 09L-DEV-0210-DMO du 25/01/2010.

1.3 Mission de FUGRO Géotechnique SA

La mission de FUGRO Géotechnique SA consiste à conduire une étude préliminaire du risque sismicité présent au niveau du site considéré sur la base d'une étude de la sismicité historique et de la revue des données disponibles concernant le risque sismique dans la région d'étude.

Le présent rapport comprend :

- 1) – L'examen des données historiques disponibles sur la séismicité de la région ;
- 2) – Une vue d'ensemble de la séismicité de la région d'étude et la définition des principales sources de risques sismiques ;
- 3) – L'examen de tous les rapports d'analyses du risque sismique disponibles afin d'obtenir une évaluation préliminaire des valeurs d'accélération maximales du sol et magnitude prévisibles au droit du site retenu.

Ce rapport présente ces éléments sous la forme suivante :

1. Introduction
2. Contexte géologique et structural régional
3. Examen des rapports d'analyse du risque sismique disponibles et applicables au projet
4. Détail du programme de reconnaissance et d'études recommandé au stade de l'étude détaillée sismique et géotechnique

1.4 Limitations de l'étude

Cette note s'intègre dans les études préliminaires de site. Les résultats de cette étude ne s'appliquent qu'à cette zone d'étude spécifique et ne peuvent être étendus à un autre projet. Les recherches, conclusions et avis présentés dans ce rapport ont été proposés selon les règles techniques professionnelles en pratique en France. Nous rappelons que ce type de projet n'entre pas dans le cadre spécifique des règles parasismique PS 92 définies par la norme NFP 94.

Bien que les informations contenues dans ce rapport puissent être utilisées par d'autres sujets, il est probable qu'elles ne soient pas assez complètes pour tous sujets ou pour toutes les parties. Si des changements intervenaient dans le projet décrit dans le présent rapport, les conclusions, avis et recommandations de ce rapport ne pourraient être utilisés à moins d'une validation ou d'une modification de celle-ci par FUGRO Géotechnique SA.

Comme indiqué ci-après au paragraphe 4, la présente étude doit être complétée en phase projet pour permettre l'aboutissement du dimensionnement du projet.

2 Géologie structurale régionale – Eléments de tectonique

2.1 Introduction

L'emplacement du projet FOS FASTER se situe dans le Sud de la France, en Provence, le long de la côte méditerranéenne (Figure 1). L'aire d'étude se situe sur la plaque tectonique Eurasienne, au sein d'une large zone de déformation active correspondant à une zone de convergence relative des plaques Eurasienne au Nord et Africaine au Sud (Bird, 2003 ; Oldow et al., 2002). Plusieurs indices de déformation associés à ces mouvements tectoniques à grande échelle sont visibles, comme la chaîne alpine au Nord-Est, les Pyrénées à l'Ouest, les Apennins à l'Est, ainsi que de nombreuses zones de déformation en extension à travers la Méditerranée (Jolivet et Faccenna, 2000 ; Oldow et al., 2002). Actuellement, la vitesse de convergence des plaques Africaine et Eurasienne est estimée à 4-6 mm/an dans une direction globalement Nord-Sud (DeMets et al., 1994 ; Jolivet et Faccenna, 2000 ; Reilinger et al., 2006 ; UNAVCO, 2009). Cette convergence est considérée comme étant à l'origine, directe ou indirecte, de l'apparition de séismes et de déformation active dans le Sud de la France (Calais et al., 2002, Courboux et al., 2007).

La région provençale possède une histoire géologique complexe qui s'étend de l'ère Paléozoïque à nos jours, ainsi que l'illustrent les nombreux jeux et re-jeux tectoniques des principales structures géologiques de la région. Par exemple, les failles de Nîmes et de la Durance, deux des plus importantes failles aux alentours du site, ont fonctionné en décrochement durant le Paléozoïque inférieur (-300 Ma). Ces failles ont ensuite été réactivées en failles normales au Jurassique (-110 Ma) puis réactivées à nouveau en décrochements lors de l'orogénèse Pyrénéenne (-70 à -40 Ma) qui a formé les chaînes des Pyrénées actuelle (Choukroune, 1992 ; Cushing et al., 2008 ; Dercourt et al., 1986 ; Sibuet et al., 2004 ; Vergés et al., 2002). Ces failles et d'autres structures tectoniques en Provence ont également été réactivées en failles normales entre l'Oligocène et le Miocène Inférieur (-25 Ma) lors de l'ouverture du Bassin Méditerranéen occidental (Cushing et al., 2008 ; Jolivet et Faccenna, 2000). En plus de ces accidents tectoniques majeurs (failles de Nîmes et de la Durance), la région Provençale compte de nombreux plis et failles crustales superficielles qui se sont formés lors des orogénèses Alpine et Pyrénéenne (failles de La Fare, des Costes et de la Trévaresse, Figure 2).

La région provençale est actuellement dans un état de contrainte en compression dans la direction Nord-Sud qui est du au déplacement vers le Nord de la plaque Africaine et à sa collision avec la plaque Eurasienne. L'influence de cet état de contrainte sur la sismicité moderne, historique et sur la paléo-sismicité de la région est mise en évidence par :

- l'apparition de chevauchements et de failles inverses, indiqués par les mécanismes au foyer compressifs des tremblements de terre du sud de la France (par exemple le séisme de Lambesc en 1909, Baroux et al., 2003) ;
- L'orientation des failles actives au Quaternaire (Cushing et al., 2008 ; Neopal, 2010) ;
- L'orientation des mouvements crustaux observés par le biais d'études géodésiques (Calais et al., 2002).

Etant donné la direction Nord-Sud du régime compressif actuel, les failles préexistantes Est – Ouest sont parfaitement orientées pour accommoder les mouvements inverses ou compressifs, alors que les failles d'orientation Nord-Est – Sud-Ouest fonctionnent en décrochements sénestres.

2.2 Sismicité

Les données de sismicité décrites historiquement ou instrumentalement dans la région d'étude entre l'an 470 et l'an 2009 sont reportées sur la figure 1. La grande majorité de tremblements de terre se produit à faible et moyenne profondeur dans la croûte terrestre (moins de 30 kilomètres). Les taux de sismicité les plus élevés sont observés dans les Alpes et les Pyrénées, juste au delà d'un rayon de 200 kilomètres de distance de la zone d'étude (cf figure 1). La sismicité aux abords du site est significativement plus faible que dans les régions montagneuses avoisinantes ; cependant plusieurs séismes de magnitude moyenne se sont produits dans la région au cours des 100 dernières années. Le plus grand séisme ayant eu lieu à moins de 200 kilomètres du site est le séisme de Lambesc, de magnitude 6,0, le 11 juin 1909 (Baroux et al., 2003). Celui-ci était situé approximativement à 46 kilomètres du site. Ce séisme s'est probablement produit au niveau de la faille de la Trévaresse (figure 2), une structure vraisemblablement capable de générer des séismes de magnitude 6. En plus du séisme de Lambesc, 8 séismes de magnitude supérieure ou égale à 5 ont été recensés à moins de 200 kilomètres, le plus proche étant situé à plus de 155 kilomètres du site (figure 1).

2.3 Sources sismiques potentielles

Etant donné la convergence relativement lente entre des plaques Africaine et Eurasienne, la large zone sur laquelle cette convergence est répartie, et les nombreuses structures entre les côtes du nord de l'Afrique et du sud de la France qui permettent une répartition des déformations, la zone d'étude (FOS FASTER) présente un risque sismique relativement bas comparé aux régions méditerranéennes centrales tectoniquement plus actives (Courboulex et al., 2007 ; Marin et al., 2004). Cependant, la région de la Provence où se situe le site d'étude possède la concentration la plus élevée d'accidents tectoniques identifiés comme actifs ou potentiellement actifs dans toute la France (Amorèse et al., 2009 ; Baroux et al., 2003 ; Chardon et al., 2005 ; Marin et al., 2004 ; Neopal, 2010 ; Sebrier et al., 1997). Parmi les sources potentielles de séisme de grande ampleur au droit du site, nous pouvons de ce fait citer les failles actives locales d'une part et d'autre part les séismes aléatoires (n'étant pas reliés à des failles actives connues et cartographiées) se produisant aux alentours.

Selon les relevés sismographiques et les données de séismes historiques dans un rayon de 200 kilomètres autour du site, les principales zones à forte sismicité sont les Pyrénées et les Alpes (cf figure 1).

Pour une analyse probabiliste de risque sismique, ces régions seront caractérisées en tant que zones source distinctes. La seule autre zone remarquable à moins de 200 kilomètres du site est localisée à l'Est, près de Marseille (Figure 1). Des recherches complémentaires devraient être conduites afin d'apprécier le contexte tectonique et pour déterminer si la région dans laquelle les séismes se produisent doit être caractérisée comme une zone source distincte. A première vue, la carte de localisation des séismes suggère que la zone située à moins de 200 kilomètres du site appartienne à une seule et même zone sismotectonique.

Les failles actives et potentiellement actives identifiées à moins de 200 kilomètres du site incluent les failles des Cévennes, de Nîmes, du Ventoux-Lure, de la Durance, de Vautubière, du Concors, des Alpilles, des Costes, de Salon-Cavaillon et de Vauvert (cf figure 2). Les failles inverses et chevauchements de la Trévaresse, du Ventoux-Attrait, de Vautubière, de Concors, des Alpilles, des Costes et de Vauvert présentent un pendage vers le Nord et s'enracinent probablement dans un détachement basal d'échelle régionale situé à 5-6 km de profondeur. Ces failles, associées à des plis à vergence sud formés durant les orogénèses Pyrénéenne et Alpine (Baroux et al., 2003), sont orientées de manière à être potentiellement réactivées au vu de l'arrangement tectonique actuel. Les autres failles actives ou potentiellement actives identifiées (Cévennes, Nîmes, Durance, Salon-Cavaillon) sont des décrochements sénestres qui semblent accommoder les déformations Nord-Sud engendrées au niveau des failles inverses (Baroux et al., 2003 ; Cushing et al., 2008 ; Imposa et al., 2009 ; Volant et al., 2000). Celles-ci sont également bien orientées pour accommoder indirectement les efforts de la convergence tectonique Nord-sud.

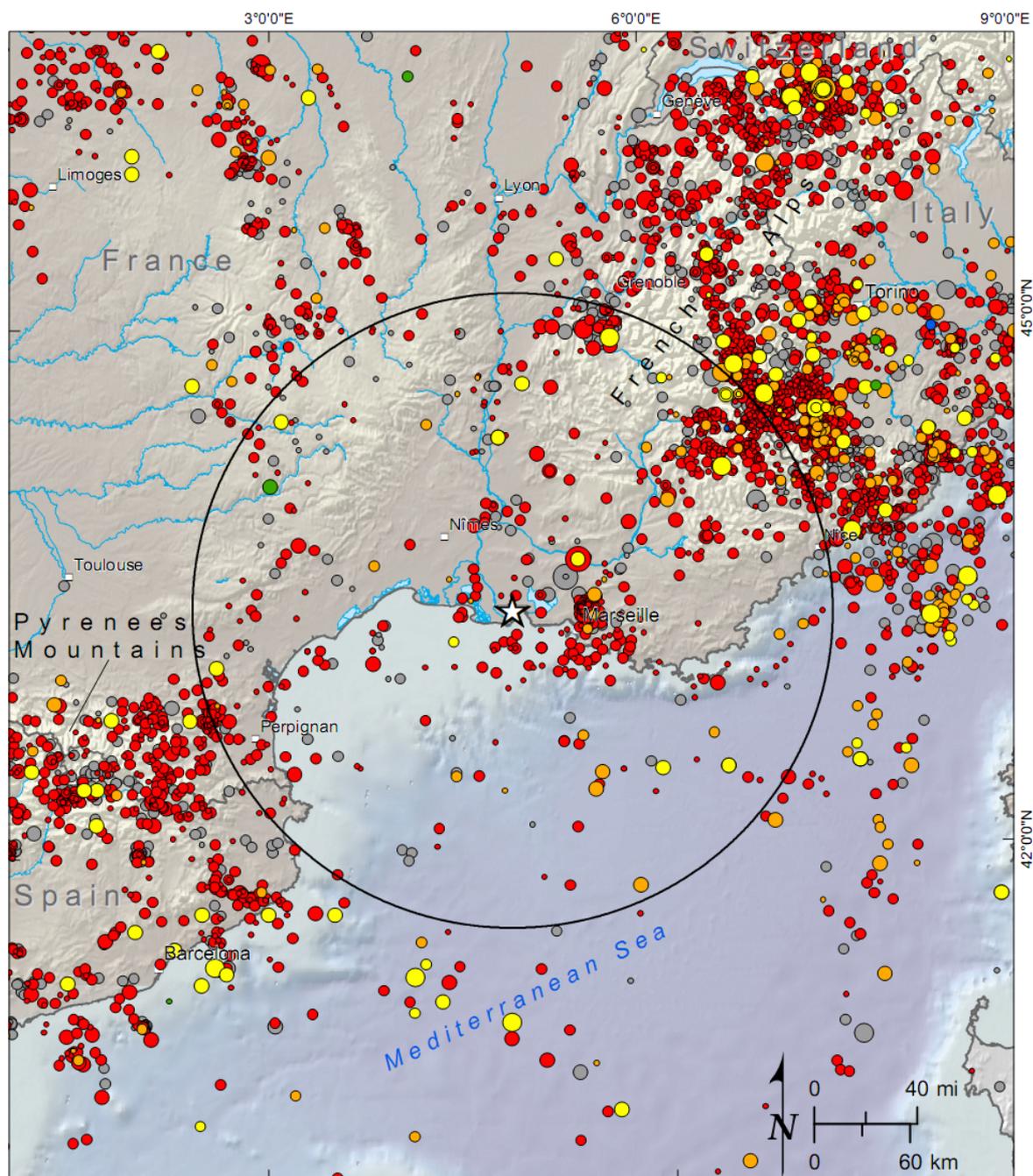
Les principaux accidents tectoniques à retenir pour le projet de Fos FASTER compte tenu de leur proximité sont :

- la faille de Salon-Cavaillon,
- la faille de La Fare,
- la faille de la Trévaresse

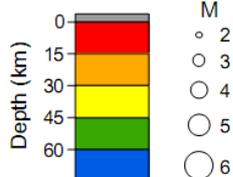
• Le tremblement de terre de Lambesc en 1909 s'est produit au droit de la faille de la Trévaresse, cette structure devra donc être considéré comme une source sismique active. Les séismes associés à cette faille peuvent atteindre des magnitudes de 6 à 6,5 (Baroux et al., 2003 ; Courboux et al., 2007 ; Marin et al., 2004 ; Neopal, 2010 ; Sébrier et al., 1997). La faille de la Trévaresse se situe à environ 40 kilomètres du site.

• La faille de la Fare est située directement au Sud de la faille de la Trévaresse. Certains auteurs suspectent une activité de cet accident au Quaternaire et la base de données française des failles actives présente les preuves d'une possible activité récente de cette faille (Neopal, 2010). La faille de La Fare se situe à 30 kilomètres au Nord-Est du site.

• L'extrémité sud de la faille de Salon-Cavaillon pourrait être située à quelques kilomètres du site (cf figure 2). Quelques auteurs indiquent que la faille a pu être en activité durant l'Holocène et le Quaternaire (Amorèse et al., 2009 ; Boyer et al., 2005) ; cependant, la base de données française des failles actives ne donne aucune preuve d'activité le long de cet accident. Etant donné la proximité de la faille par rapport au site de FOS FASTER et les informations contradictoires sur l'activité de cette faille, des recherches complémentaires devraient être entreprises afin d'améliorer la connaissance de la localisation de cette faille et d'acquérir des preuves de son activité ou non-activité, si possible.

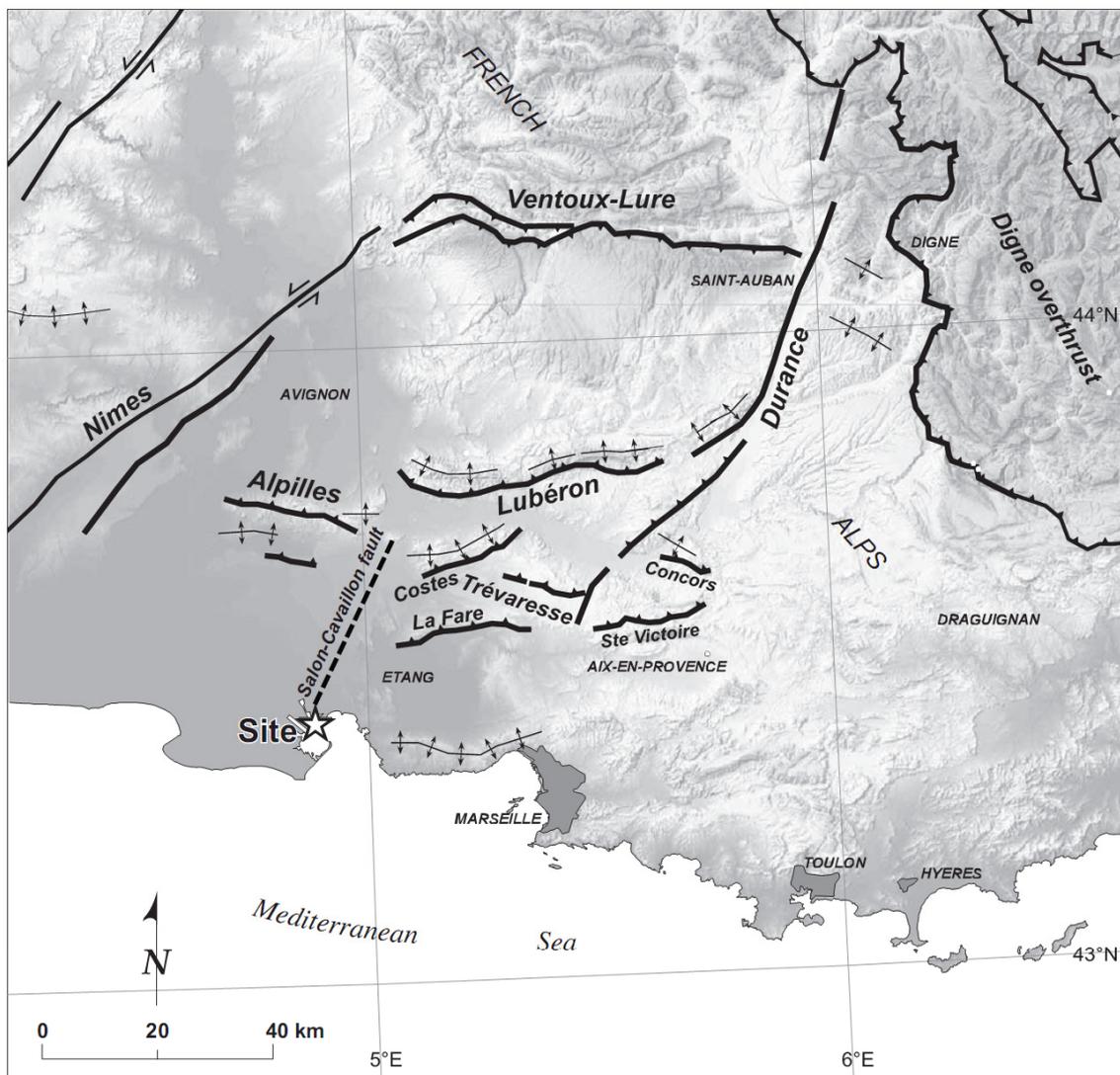


Seismic events, displayed by magnitude and depth



- Site location
- 200-km radius
- Country boundary

Regional Seismicity
FIGURE 1



Modified from Baroux et al. (2003)

Explanation

- Strike-slip fault; arrows show relative motion
- Reverse or thrust fault; teeth on upthrown block
- Fault; location is approximately known
- Anticline

Regional Faults

FIGURE 2

Graphics, Active Projects\0102.30 Fig 2 Regional Faults.ai Friday, March 19 2010 10:28:30

3 Examens des études sismiques régionales

3.1 Introduction

Dans le cadre de cette étude préliminaire d'ingénierie parasismique, FUGRO a examiné les évaluations régionales de risque sismique disponibles aux abords de la zone du projet afin d'obtenir une première évaluation générale des accélérations nominales à prévoir au droit du site pour différents niveaux de risque.

Des évaluations régionales du risque sismique ont également été conduites dans le cadre du « Programme d'Evaluation Globale du Risque Sismique » ou « *Global Seismic Hazard Assessment Program* ». Cette section du rapport présente les résultats de ces études régionales de risque.

3.2 Programme d'Evaluation Globale du Risque Sismique – 1999

Le Programme d'Evaluation Globale du risque sismique (ou GSHAP, Giardini et al., 1999) a été lancé en 1999 par le Programme International sur la Lithosphère avec l'appui de l'ICSU (*International Council for Seismic Unions*). Des informations concernant le GSHAP sont disponibles sur le site Web du programme international (<http://www.seismo.ethz.ch/gshap/>). Les résultats du GSHAP sont disponibles en terme d'accélération maximale du sol en surface pour une période de retour de 475 ans (c.-à-d. que ces valeurs d'accélération maximale ont 10% de chances d'être dépassées sur une période de 50 ans). Les valeurs sont données pour une classe de site de type « rocher ». Au niveau du site étudié les valeurs sont comprises entre 0.05g et 0.06g. Cependant, il convient de noter que le modèle du GSHAP est un modèle régional et ne considère probablement pas certains accidents locaux potentiellement actifs présentés dans les paragraphes précédents. Cependant, les résultats du GSHAP confirment le caractère faible à modéré des accélérations auxquelles il est possible de s'attendre au droit du site.

3.3 Bibliographie concernant l'évaluation du risque sismique au droit du site

Dominique et al. (1998) ont réalisé des analyses probabilistes du risque sismiques (ou PSHA, pour *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*) afin d'établir une carte des accélérations maximales au sol pour une période de retour de 475 ans. L'étude, de nature régionale, a été conduite nationalement et de nombreuses zones sismiques ont ainsi été définies à l'échelle nationale. L'atténuation du mouvement de terrain a été définie en utilisant la formule d'Ambraseys (1995). A partir cette étude, les accélérations maximales du sol sont estimées à 0.1g au droit du projet. Dominique et al. (1998) indiquent que ces valeurs ne peuvent pas être employées directement pour d'autres études à moins d'être appuyés par une analyse détaillée de sensibilité (impliquant l'utilisation d'un zonage sismique approprié et des paramètres caractérisant l'activité sismique) et corrigé par l'utilisation d'équations d'atténuation appropriées. Il s'agit essentiellement d'une étude régionale qui confirme le risque séisme de niveau modéré et recommande d'entreprendre des études de risque sismique spécifiques au droit des sites de projets afin de définir les accélérations nominales de sol utiles à la conception des structures envisagées.

Marin et al. (2004) ont également réalisé une analyse probabiliste du risque sismique et estimé les accélérations maximales au sol de six grandes villes en France pour des périodes de retour de 475, 975, et 1975 ans (correspondant respectivement à des probabilités de dépassement de 10%, de 5%, et de 2,5% sur une période de 50 ans). Cette étude définit également à l'échelle nationale des courbes d'iso-valeurs d'accélération maximale du sol pour ces périodes de retour. Une formule d'atténuation a d'autre part été développée spécifiquement pour la France, et les résultats

de l'étude sont basés sur cette formule. Cependant, nous notons que celle-ci a été développée sur la base d'un nombre relativement faible de séismes. De plus, la formule d'atténuation apparaît avoir été développée uniquement pour l'accélération maximale du sol, et non pour d'autres périodes structurales. Cette formule a été développée pour un « substratum raide », avec des facteurs d'amplification pour des sites de type « roche tendre » et « sol ferme ».

Le modèle a inclus 28 zones sismiques « sources », couvrant toute la France, ainsi que les failles actives majeures situées en Provence. Selon cette étude, les accélérations maximales du sol sont estimées à 0,03 et 0,05 g au droit du projet pour des périodes de retour de 475 et 975 ans. Pour la période de retour de 1975 ans, la gamme d'accélérations maximales du sol est de 0,05 à 0,08 g. Cependant, ces valeurs sont basées sur un modèle qui n'inclut pas les failles actives dans la région provençale mais seulement les zones sismiques « source ». Une comparaison des résultats avec et sans l'action des failles provençales actives est également présentée. Cependant, les résultats de l'étude comprenant les failles provençales actives montrent des valeurs d'accélération maximale du sol plus faibles dues à la diminution relative de la contribution des sources régionales avoisinantes caractérisées par de fortes magnitudes.

D'autre part, les caractéristiques attribuées aux failles provençales actives sont relativement faibles et le modèle considérant ces failles est fondé sur l'hypothèse que des tremblements de terre de magnitude $M_L > 5,1$ peuvent uniquement avoir lieu le long de ces failles. Cette hypothèse mène à une sous-estimation des séismes qui seraient générés ailleurs que le long des principales failles actives.

L'étude présente également une comparaison des résultats avec ceux obtenus d'après la formule d'atténuation d'Ambraseys (1995) et montre que les résultats obtenus avec la formule d'atténuation spécifique à l'étude sont inférieurs. Il est rappelé que le modèle d'atténuation utilisé pour cette étude est basé sur peu de données et n'est donc pas aussi bien contraint que les modèles d'atténuation régionaux tel que celui d'Ambraseys (1995), ou que les modèles d'atténuation développés pour les environnements sismiques semblables aux Etats-Unis orientaux et occidentaux, en particulier la Nouvelle Génération de modèles d'Atténuation (NGA).

D'autres études telles que celles de Baroux et al. (2003) et Quenet et al. (2004) ont investigué les estimations d'intensité de tremblements de terre historiques tels que le séisme de Lambesc en 1909 et le séisme de Manosque en 1708, mais l'estimation des accélérations maximales du sol n'a pas été fournies dans ces études.

3.4 Résumé

Plusieurs études de risques sismiques (Dominique et al., 1998 ; Marin et al., 2008 ; GSHAP, 1999) ont été examinées afin d'obtenir une évaluation de l'accélération maximale du sol dans la région du site d'étude. A partir de ces études, des évaluations d'accélération maximale du sol de l'ordre de 0,05 à 0,1 g ont été obtenues pour une période de retour de 475 ans. Cependant, nous notons que (1) toutes ces études ont été conduites à échelle régionale et ne considèrent probablement pas en juste proportion les accidents tectoniques locaux situés à proximité de la zone d'étude (2) les études sont basées sur des formules d'atténuation assez anciennes ou sur des formules d'atténuation qui ne sont pas assez contraintes et (3) les études n'incluent pas d'effets de site tels que l'amplification ou l'atténuation des mouvements de terrain, notamment dans les sols en surface, la liquéfaction des sols ou l'apparition de pression interstitielle dans les sols superficiels ou dans les remblais au droit du projet. Des études complémentaires détaillées doivent être menées pour déterminer l'ampleur des mouvements du sol à prendre en compte dans la conception du projet.

4 Etudes complémentaires restant à mener

La zone d'étude se situe, selon les études régionales disponibles, dans un secteur à sismicité faible à modérée. Cependant, ces études ont été menées à une échelle très régionale et il est possible qu'elles ne considèrent pas les accidents locaux. Une étude de risque sismique détaillée devrait être entreprise afin d'établir l'amplitude des mouvements de sol nécessaires à la conception du projet. D'après notre analyse du projet, nous recommandons la réalisation des travaux suivant dans le but d'établir les paramètres de conception sismique pour le projet. FUGRO reste à la disposition de Fos FASTER pour mener à bien ces études.

4.1 Etude sismique détaillé de risque

Une étude de risque sismique détaillée devrait être entreprise afin d'élaborer les critères sismiques pour la conception du projet. Une telle étude inclut la réalisation d'un modèle sismo-tectonique centré sur la zone du projet, la conduite d'une analyse probabiliste du risque sismique pour les périodes de retour d'intérêt, la prise en compte des règles et conditions de conception applicables à la zone ainsi que de tous les effets de site tels que l'amplification des mouvements de sol, et, enfin, l'étude des risques de liquéfaction.

4.1.1 Développement de modèle sismo-tectonique

Nous recommandons la réalisation d'un modèle sismo-tectonique intégrant les paramètres d'activité des principales sources sismiques, ainsi que les informations disponibles concernant tous les accidents tectoniques locaux aux abords du site. Une attention particulière devrait également être accordée à l'utilisation des formules d'atténuation les plus récentes qui permettent de tirer bénéfice d'une large base de données d'enregistrements de tremblements de terre.

4.1.2 Analyse probabiliste de risque sismique

Nous recommandons également qu'une analyse probabiliste du risque sismique (PSHA) soit menée au droit du projet pour les périodes de retour d'intérêt. Les critères sismiques de conception pour le projet devront être élaborés en utilisant les résultats de la PSHA ainsi que les directives et codes techniques applicables en France.

4.1.3 Analyses des effets de site

Au droit du projet, le site est composé d'une alternance de sables et de silt au toit du substratum constitué par les cailloutis de Crau. De plus, le projet prévoit la réalisation d'un remblai de comblement réalisé à partir de matériaux de récupération de granulométrie et de nature probablement similaire. Ce type de sol peut amplifier les mouvements du sol au droit du projet. Les mouvements de terrain obtenus à partir des études de risque décrites dans la section 4.1.2 correspondent au modèle « rocher ». Avec une intercalation en surface de sol plus mous ou plus lâches, les valeurs de forces et les vitesses d'ondes de cisaillement sont probablement inférieures aux valeurs de ce modèle.

Une étude de réponse spécifique de site est nécessaire pour définir la propagation des mouvements de sol du substratum vers la surface et pour évaluer l'amplification ou l'atténuation potentielle des mouvements du sol. Ces études comprennent :

- a) le développement d'accélérogrammes dont le spectre est compatible avec les caractéristiques sismiques de la zone ;
- b) la définition de paramètres dynamiques de sol et de profils de sol idéalisés ;
- c) la conduite d'analyses des effets de site ;
- d) la déduction d'un spectre de réponse en surface pour la conception des structures.

4.1.4 Evaluation de la Liquéfaction

Si des sables lâches ou relativement lâches sont prévus en remblai ou attendus dans les sols sous-jacents, une évaluation des risques de liquéfaction devra être effectuée. Si les sols s'avèrent liquéfiables, des analyses additionnelles devront être conduites pour déterminer la répartition spatiale des sédiments liquéfiables, les éventuels tassements différentiels en résultant, les possibles déplacements latéraux provoqués par le phénomène de *lateral-spreading*, et les charges additionnelles provoquées par la liquéfaction sur les fondations profondes (sous la forme de *downdrag* et de charges latérales). Les analyses de liquéfaction devront être réalisées à partir de l'accélération maximale du sol et de la magnitude du séisme déterminé par les analyses spécifiques au site pour la conception du projet.

4.1.5 Analyses simplifiées des interactions Sol-Structure

Les sollicitations sismiques peuvent altérer les capacités de sol par dégradation cyclique, ramollissement de contrainte, liquéfaction ou génération de pression interstitielle, ou bien par les effets des vitesses de déformation. FUGRO peut réaliser l'analyse simplifiée d'interaction Sol/Structure afin de déterminer l'impact des sollicitations sismiques sur les paramètres de conception des fondations et de développer des facteurs de multiplication des PY et TZ :

- Déterminer la borne basse du facteur de résistance pour les interactions axiales sol-pieux (multiplicateur t) à partir de la dégradation potentielle de la résistance de sol sous sollicitations cycliques, et de l'augmentation de la résistance de sol due sous l'effet de chargement ;
- Déterminer la borne haute du multiplicateur t sur la base de frottement unitaire sol pieu et de la résistance au cisaillement non drainé du sol avoisinant ;
- Déterminer le facteur de réduction pour la résistance aux charges latérales (multiplicateur p) en considérant la dégradation cyclique de la résistance du sol.

Les analyses d'interactions sol / structures sont basées sur les données géotechniques spécifiques au site, les données statiques de conception des fondations, les analyses de site (liquéfaction, propagation).

FUGRO reste à la disposition des concepteurs pour la réalisation de ces études complémentaires.

5 REFERENCES

- Ambraseys, N. N., (1995), "The Prediction of Earthquake Peak ground Acceleration in Europe", *Earthquake Engg and Struct. Dyn.*, vol. 24, p. 467 – 490.
- Amorèse, D., Lagarde, J.-L., Baroux, E., Font, M., and Santoire, J.-P., 2009, Accurate analysis of the distribution of epicenters in western Provence and eastern Languedoc (Southern France): *J. Geodynamics*, v. 47, p. 20-29.
- Baroux, E., Pino, N.A., Valensise, G., Scotti, O., and Cushing, M.E., 2003, Source parameters of the 11 June 1909, Lambesc (Provence, southeastern France) earthquake: Areappraisal based on macroseismic, seismological, and geodetic observations: *J. Geophys. Res.*, v. 108, p. 2454.
- Bird, P., 2003, An updated digital model of plate boundaries: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 4, p. 1027.
- Boyer, J., Duvail, C., Strat, P.L., Gensous, B., and Tesson, M., 2005, High resolution stratigraphy and evolution of the Rhône delta plain during Postglacial time, from subsurface drilling data bank: *Marine Geology*, v. 222-223, p. 267-298.
- Calais, E., Nocquet, J.-M., Jouanne, F., and Tardy, a.M., 2002, Current strain regime in the Western Alps from continuous Global Positioning System measurements, 1996–2001: *Geology*, v. 30, p. 651-654.
- Chardon, D., Hermitte, D., Nguyen, F., and Bellier, O., 2005, First paleoseismological constraints on the strongest earthquake in France (Provence) in the twentieth century: *Geology*, v. 33, p. 901-904.
- Choukroune, P., 1992, Tectonic evolution of the Pyrenees: *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, v. 20, p. 143-158.
- Courboulex, F., Larroque, C., Deschamps, A., Kohrs-Sansorny, C., Gelis, C., Got, J.L., Charreau, J., Stephan, J.F., Bethoux, N., Virieux, J., Brunel, D., Maron, C., Duval, A.M., Perez, J.-L., and Mondielli, P., 2007, Seismic hazard on the French Riviera: observations, interpretations and simulations: *Geophys. J. Int.*, v. 170, p. 387-400.
- Cushing, E.M., Bellier, O., Nechtschein, S., Sébrier, M., Lomax, A., Volant, P., Dervin, P., Guignard, P., and Bove, L., 2008, A multidisciplinary study of a slow-slipping fault for seismic hazard assessment: the example of the Middle Durance Fault (SE France): *Geophys. J. Int.*, v. 172, p. 1163-1178.
- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., and Stein, S., 1994, Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal timescale on estimates of current plate motions: *Geophys. Res. Lett.*, v. 21, p. 2191-2194.
- Dercourt, J., Zonenshain, L.P., Ricou, L.-E., Kazmin, V.G., Pichon, X.L., Knipper, A.L., Grandjacquet, C., Sbertshikov, I.M., Geyssant, J., Lepvrier, C., Pechersky, D.H., Boulin, J., Sibuet, J.-C., Savostin, L.A., Sorokhtin, O., Westphal, M., Bazhenov, M.L., Lauer, J.P., and Biju-Duval, B., 1986, Geological evolution of the Tethys belt from the Atlantic to the Pamirs since the Lias: *Tectonophysics*, v. 123, p. 241-315.
- Dominique, P., Autran, A., Bles, J. L., Fitzenz, D., Samarcq, F., Terrier, M., Cushing, M., Gariel,

J. C., Mohammadioun, B., Combes, Ph., Durouchoux, Ch., Goula, X., (1998), "Part Two: Probabilistic Approach, Seismic Hazard Map on the National Territory (France)", *11th European Conf. on Earthquake Engineering*, Balkema, Rotterdam.

Giardini, D.; Grünthal, G.; Shedlock, K.M.; Zhang, P., (1999) "The GSHAP Global Seismic Hazard Map," *Annali di Geofisica*, Vol. 42, No.6, pp. 1,225-1,230.

Imposa, S., Fournon, J.-P., Raffaele, R., Scaltrito, A., and Scarfi, L., 2009, Accurate hypocentre locations in the Middle-Durance Fault Zone, South-Eastern France: *Central European Journal of Geosciences* v. 1, p. 416-423.

Jolivet, L., and Faccenna, C., 2000, Mediterranean extension and the Africa-Eurasia collision: *Tectonics*, v. 19, p. 1095-1106.

Marin, S., Avouac, J.-P., Nicolas, M., and Schlupp, A., 2004, "A probabilistic approach to seismic hazard in metropolitan France", *Bulletin of Seismological Society of America*, v. 94, p. 2137-2163.

Neopal, 2010, Recent Paleoseismic Deformation, <http://www.neopal.net/donnees.asp>.

Oldow, J.S., Ferranti, L., Lewis, D.S., Campbell, J.K., D'Argenio, B., Catalano, R., Pappone, G., Carmignani, L., Conti, P., and Aiken, C.L.V., 2002, Active fragmentation of Adria, the north African promontory, central Mediterranean orogen: *Geology*, v. 30.

Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrotsa, A., Filikov, S.V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R., and Karam, G., 2006, GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions: *J. Geophys. Res.*, v. 111, p. B05411.

Sébrier, M., Ghafiri, A., and Bles, J.-L., 1997, Paleoseismicity in France: Fault trench studies in a region of moderate seismicity: *J. Geodynamics*, v. 24, p. 207-217.

Sibuet, J.-C., Srivastava, S.P., and Spakman, W., 2004, Pyrenean orogeny and plate kinematics: *J. Geophys. Res.*, v. 109, p. B08104.

UNAVCO, 2009, Plate Motion Calculator (http://sps.unavco.org/crustal_motion/dxdt/model/), http://sps.unavco.org/crustal_motion/dxdt/model/.

Vergés, J., Fernández, M., and Martínez, A., 2002, The Pyrenean orogen: pre-, syn-, and postcollisional evolution: *J. Virtual Explorer*, v. 8.

Volant, P., Berge-Thierry, C., Dervin, P., Cushing, M., Mohammadioun, G., and Mathieu, F., 2000, The South Eastern Durance fault permanent network: Preliminary results: *J. Seismology*, v. 4, p. 175-189.