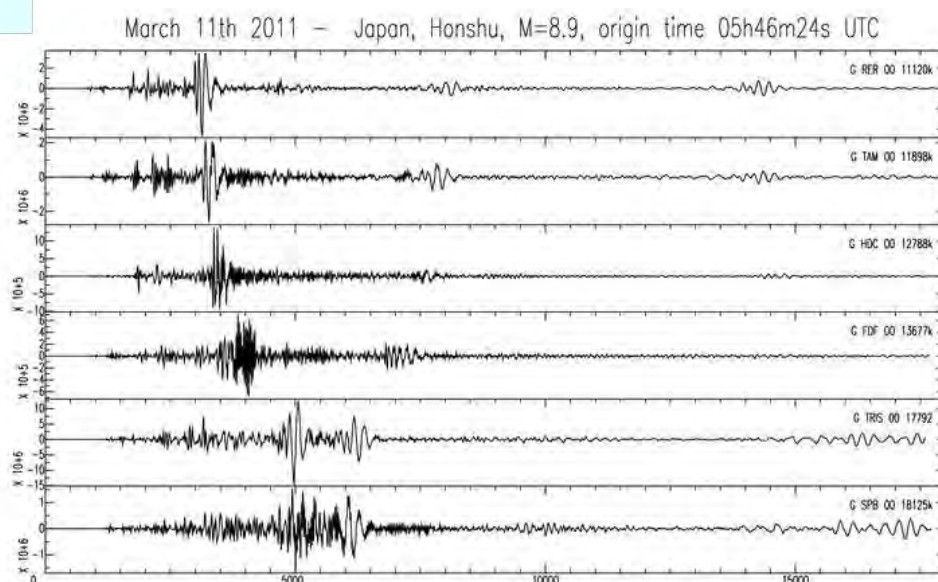
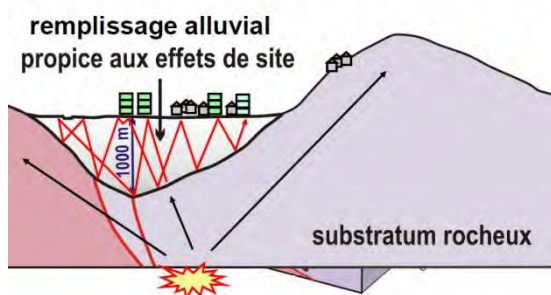
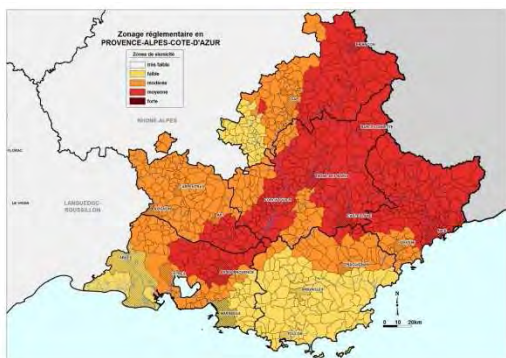


Études préalables à l'établissement du Plan de Prévention des Risques sismiques

Risques naturels sur les communes de Grans, Salon et Pelissanne



Études préalables à l'établissement du Plan de Prévention des Risques sismiques

Risques naturels sur les communes de Grans,
Salon et Pelissanne

date : octobre 2014

auteur : Direction Territoriale Méditerranée

responsable de l'étude : Elise TRIELLI

participants : Jean-Luc GASTAUT (cartographie)

Relecteurs : E. BERTRAND pour la partie sismique, P. MAURIN pour la partie géotechnique

résumé de l'étude :

Ce rapport présente une mise à jour des études menées par le CETE Méditerranée en 1998 puis 2005 en vue de la prescription d'un PPR sismique sur les communes de Grans, Salon de Provence et Pélissanne. Cette mise à jour a pour objectif de :

- prendre en compte le passage au nouveau contexte réglementaire français (notamment le décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010 et la norme NF EN 1998-5 d'application de l'Eurocode 8),
- considérer les données géotechniques, géologiques et sismologiques nouvelles éventuellement disponibles dans la région.

Les éléments du rapport CETE Méditerranée daté de 2005 sont ainsi repris ici par le CEREMA et modifiés le cas échéant.

zone géographique : Département des Bouches du Rhône

nombre de pages : 34

n° d'affaire : C13MN0038

maître d'ouvrage : DDTM13

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
0	29/05/2015	Version initiale de reprise du rapport de 2005
1	28/01/2016	Prise en compte des remarques de la DDTM13
2	12/07/2016	Ajout des annexes

Affaire suivie par

Etienne BERTRAND - Service Risque Sismique
<i>Tél. : 04 92 00 81 61/ Fax : 04 92 00 81 39</i>
<i>Courriel : etienne.bertrand@cerema.fr</i>

Rédacteur

Elise TRIELLI - Service Risques Géologiques, Géotechnique et Chaussées

Relecteurs

Etienne BERTRAND- Service Risque Sismique

Patrice MAURIN- Service Risques Géologiques, Géotechnique et Chaussées

SOMMAIRE

1	Introduction.....	8
1.1	Études précédentes.....	8
1.2	Objectifs de l'étude.....	8
2	Contexte	8
2.1	Contexte géographique	8
2.2	Contexte géologique	10
2.3	Contexte géotechnique	15
2.4	Contexte hydrogéologique	16
2.5	Contexte sismique	17
3	Évaluation des aléas naturels en conditions dynamiques	17
3.1	Evaluation et caractérisation de l'aléa liquéfaction sous séisme.....	17
3.1.1	Présentation du phénomène de liquéfaction.....	17
3.1.2	Aspects réglementaires: norme NF-EN- 1998-5 (Eurocode 8).....	23
3.1.3	Liste des études disponibles sur la liquéfaction dans la zone d'études	24
3.1.4	Méthodologie utilisée dans le cadre du PPR pour la détermination de la l'aléa à la liquéfaction.....	24
3.1.5	Recensement des sols susceptibles de liquéfaction sur la zone d'étude.....	25
3.1.6	Proposition pour le zonage réglementaire PPR.....	27
3.2	Mouvements de terrain sous séisme : la méthode pseudo-statique dans le cadre du PPR	28
3.2.1	Généralités.....	28
3.2.2	Cartographie de l'aléa mouvement de terrain en situation dynamique sur la zone des PPR.....	28
3.3	Glissements de terrain en situation dynamique	29
3.3.1	Application de la méthode pseudo-statique	29
3.3.2	Cartographie de l'aléa de glissement sur les communes de GRANS, SALON et PELISSANNE	31
3.4	Evaluation et caractérisation de l'aléa chute de blocs sous séisme	32
3.4.1	Application de la méthode pseudo-statique	32
3.4.2	Cartographie de l'aléa de chute de blocs sur les communes de GRANS, SALON et PELISSANNE	32
4	Synthèse	33
	ANNEXE.....	35
	Exemples de trajectographie.....	36
	Principe de la méthode	36
	Présentation de la méthode	36
	Paramètres fournis au logiciel de trajectographie	38
	Les exemples	39

1 Introduction

1.1 Études précédentes

Un Plan d'Exposition aux Risques avait été prescrit en 1985 pour les aléas inondation, mouvement de terrain et séisme sur les communes de Salon de Provence, Grans et Pélissane. Des études préliminaires ont été réalisées en 1988 par le BRGM et le CETE Méditerranée pour les risques "mouvements de terrain" et "séisme". Ces études ont été complétées en 2005 par le CETE Méditerranée afin de prendre en compte :

- L'amélioration de la connaissance et de l'appréciation du niveau de sismicité des failles.
- L'évolution des méthodes d'évaluation des effets de site.
- Les avancées dans le domaine de l'approche de la vulnérabilité des structures aux séismes.

L'évolution de la réglementation en 2010 a également poussé la DDTM13 à demander au service Risque Sismique de la DTER MED du CEREMA une nouvelle mise à jour des études, sur la base de ce qui avait déjà été produit. Celle-ci permet également de bénéficier des derniers progrès en matière de définition de l'aléa régional et local.

1.2 Objectifs de l'étude

La mission consiste à actualiser les études effectuées en 1988 et 2005 en vue de la prescription d'un PPR pour les risques sismique et éventuellement mouvements de terrain sur les communes de Grans, Salon de Provence et Pélissanne.

Le présent rapport complète le rapport spécifique sur les risques sismiques.

2 Contexte

2.1 Contexte géographique

La zone d'étude formée par les communes de SALON, GRANS et PELISSANNE se trouve au Nord-Nord-Ouest du département des Bouches-du-Rhône. Elle s'étend au contact de trois grandes unités morphologiques :

- A l'Ouest, l'extrémité orientale de la plaine de la Crau. Avec une altitude moyenne comprise entre 70 et 90 m, elle constitue une zone particulièrement plane qui occupe presque les deux tiers du territoire de la commune de SALON.
- A l'Est, les premiers reliefs liés à la chaîne des Costes (Roc de Caronte : 291mNGF)
L'extrémité de la chaîne des Costes : on y rencontre deux types de relief:
 - Au Nord de SALON un relief assez vif constitué par les calcaires et marno-calcaire Crétacé. On y observe des escarpements importants avec des dénivellations pouvant atteindre 100 m.

- Au Sud de SALON, des reliefs peu marqués de collines et petits escarpements constitués par les molasses tertiaires.
- Au Sud, la plaine alluviale de la rivière *Touloubre* qui traverse les communes de GRANS et PELISSANNE d'Ouest en Est, caractérisée par une morphologie plus méandriforme sur la commune de GRANS. Les villages de GRANS et PELISSANNE sont situés le long de la rivière. Au Sud de GRANS, le paysage est marqué par de faibles reliefs formant de petits plateaux, localement des buttes témoin.
Le canal de Craonne traverse également la commune de PELISSANNE dans une direction globale Nord-Sud.

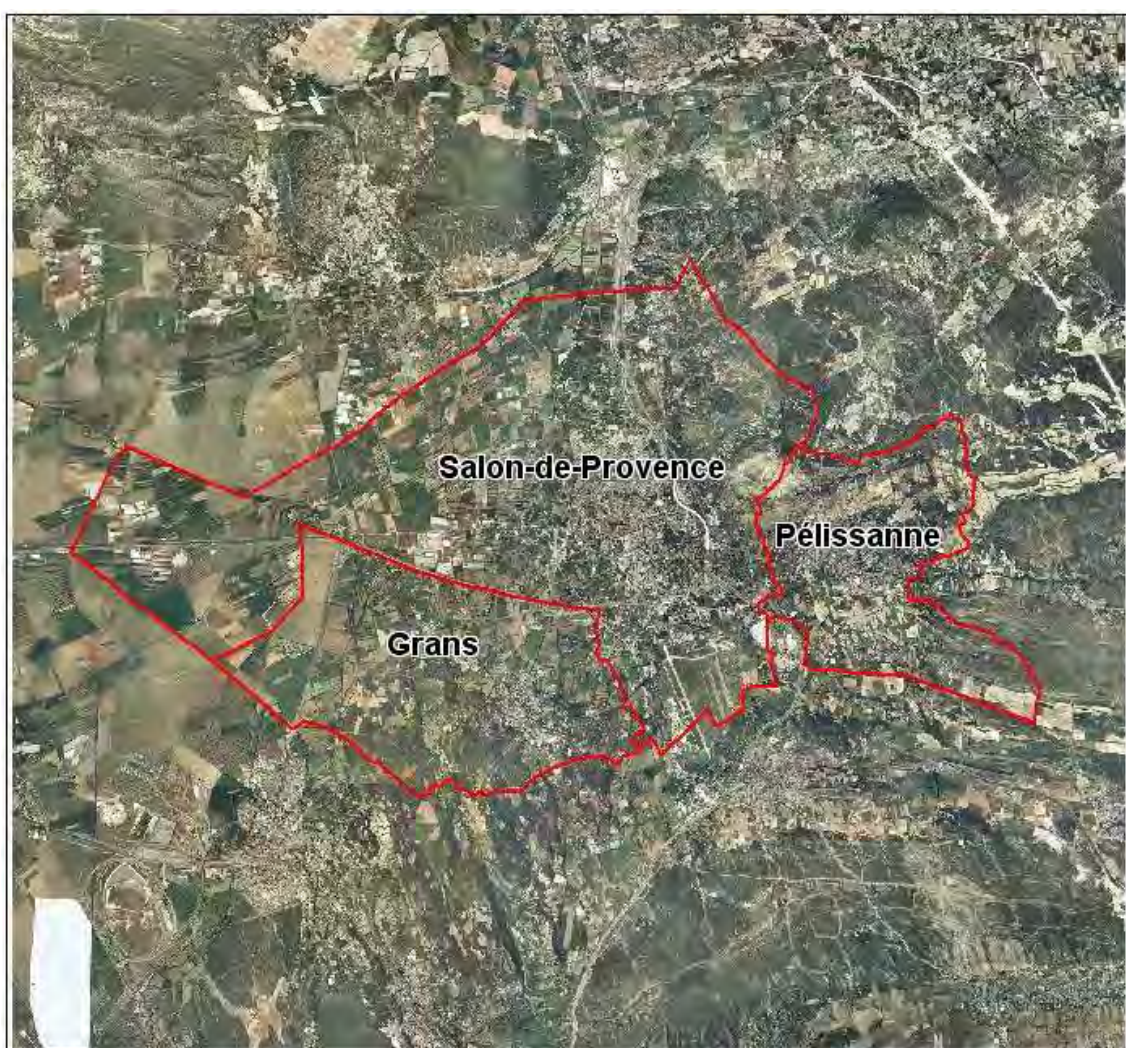


Figure 1 : Photo aérienne des communes de Salon, Grans et Pélissanne.

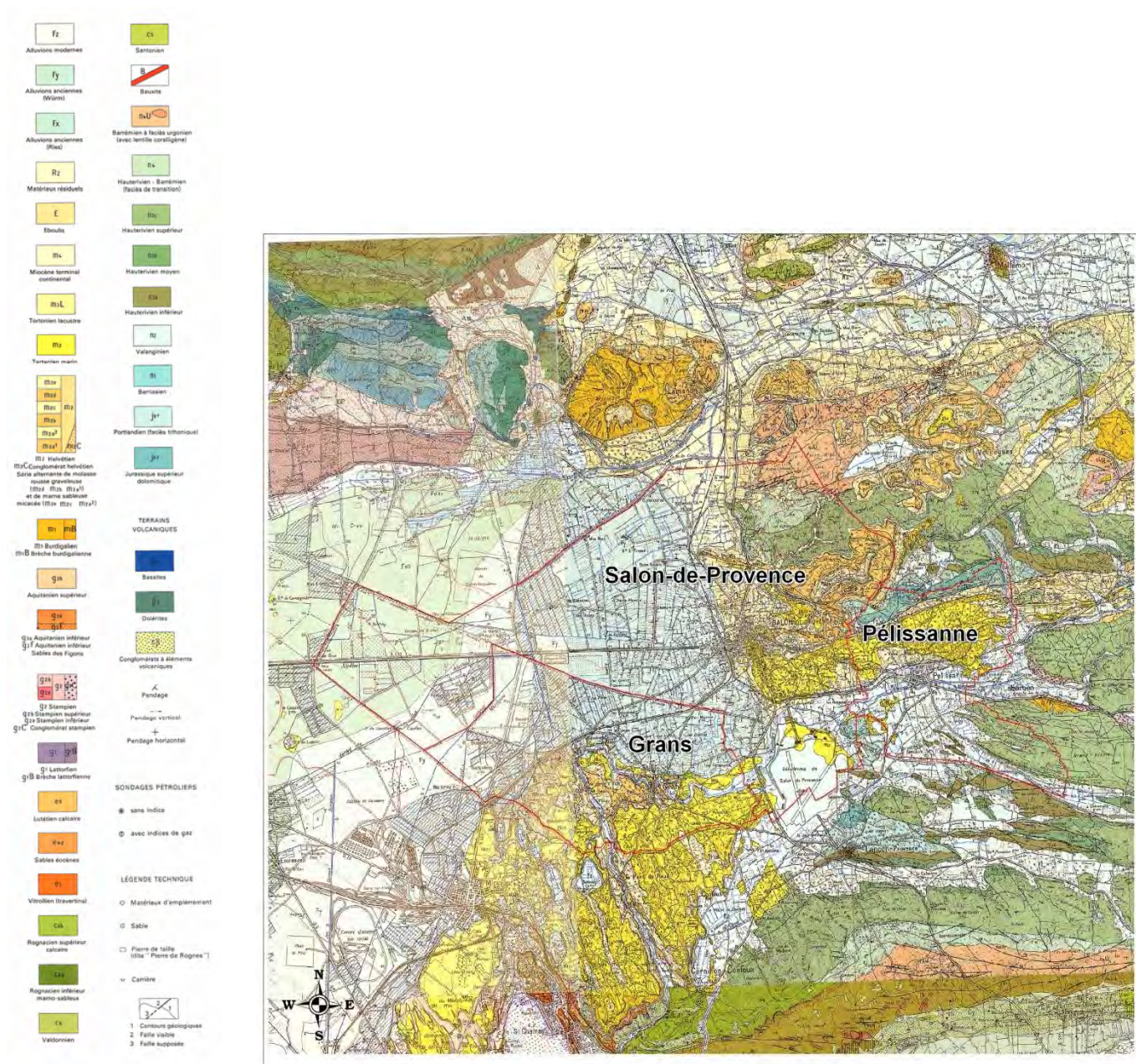
2.2 Contexte géologique

Les différentes formations sédimentaires qui affleurent sur les communes de GRANS, PELISSANE et SALON (ou dans ses environs), permettent de reconstituer l'histoire géologique de cette région de la Provence depuis le début de l'ère secondaire. Ses principales étapes sont les suivantes:

- à une sédimentation sous faible épaisseur d'eau au Trias (entre 230 et 195 MA¹) fait suite une sédimentation essentiellement carbonatée franchement marine au jurassique et au Crétacé inférieur (entre 195 et 110 MA),
- à la fin du Crétacé inférieur, il y a 120 MA, les mouvements prémonitoires à la formation de la chaîne pyrénéo-provençale entraînent la surrection et l'émersion d'une partie de la Provence, constituant ce que l'on appelle l'"isthme durancien" sur lequel, en conséquence d'une érosion subaérienne, se développe une surface karstique où seront piégées des bauxites,
- il y a 45 MA (Eocène supérieur) la formation de la chaîne pyrénéo-provençale s'exprime par la mise en place de grands chevauchements et localement de nappes,
- l'Oligocène (-40 à -20 MA) est essentiellement caractérisé par une tectonique en distension avec une sédimentation détritique puis carbonatée,
- premiers mouvements alpins fin Oligocène,
- sédimentation marine épicontinentale au Miocène sur des bassins qui peuvent être indépendants des bassins Oligocène avec une phase terminale lacustre,
- mouvement alpin post Miocène, provoquant les chevauchements de la chaîne des Costes vers le Sud.

Un levé à 1/10000 réalisé en 1988 par le CETE méditerranée en collaboration avec le BRGM, précise la géologie de l'ensemble des trois communes de Salon, Grans et Pélissanne. Une mise à jour a été effectuée dans le cadre de la présente étude à partir des éléments disponibles. Les descriptions qui suivent se bornent à l'aspect lithologique des formations et à la localisation de leurs principaux affleurements.

¹ Millions d'Années



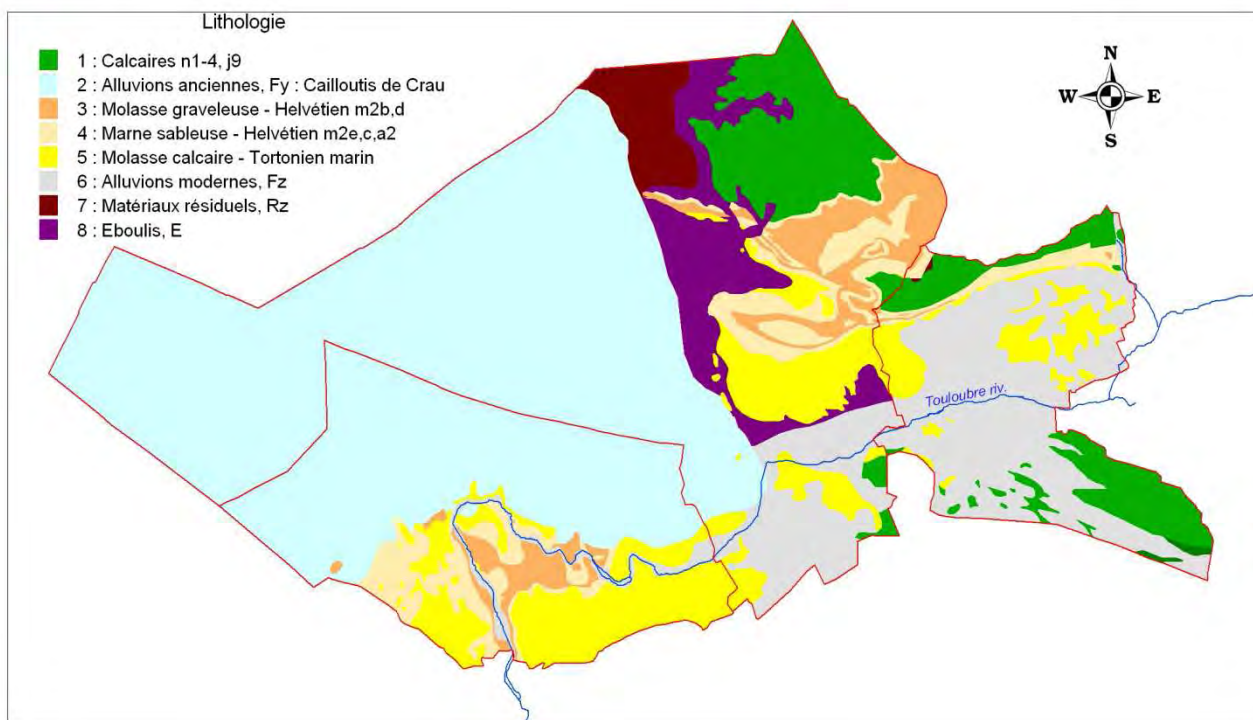


Figure 3 : Géologie détaillée des communes de Salon, Grans et Pélissanne, levé au 1/10 000. Trait rouge : limite des communes

La sédimentation marine Jurassique- Crétacé (Figure 4 : lithologie n°1)

Les formations rapportées à cette période affleurent sur les communes de SALON et PELISSANNE en formant :

- des reliefs vifs du Nord de la commune de SALON (Crétacé). Il s'agit essentiellement de calcaires compacts bioclastiques (faciès Urgonien du Barrémien), série chevauchante sur les calcaires Hauterivien où certains niveaux sont composés de calcaire argileux.
- des îlots au sein des alluvions dans la partie Sud de la commune PELISSANNE. Ils forment au Nord les reliefs du Roc de Caronte. Dans la partie Sud, leur pendage très variable montre que ces terrains sont affectés par de nombreux replis. Cette formation représente le substratum d'un bassin miocène particulièrement bien représenté au Nord de PELISSANNE. Ce substratum forme un repli anticlinal faillé au niveau du Roc de Caronte qui vient chevaucher vers le Sud le bassin miocène dont les sédiments sont fortement redressés au contact. Cette faille, qui souligne le chevauchement, porte le nom de faille des Costes. La base du bassin est probablement occupée par un conglomérat oligocène qui n'affleure pas au niveau de la commune, mais qui a été reconnu près du Château de La Barben à l'Est. Cette formation détritique, discordante sur les terrains crétacés a une épaisseur inconnue, probablement faible. Localement, des brèches burdigaliennes recouvrent vraisemblablement les conglomérats oligocènes. Elles forment des placages de faible épaisseur.

Les sédiments jurassiques-crétacés n'affleurent pas sur la Commune de Grans, mais peuvent être observés plus au Sud, près de Lançon.

La sédimentation marine Miocène (Figure 4 : lithologie n°3, 4 et 5)

Ces sédiments affleurent au droit des trois communes.

A l'Ouest de SALON et au Nord de PELISSANNE on observe une importante série Miocène (Helvétien) constituée d'une alternance de marnes sableuses et de molasses calcaires. On y note deux unités bien distinctes:

- le Miocène tabulaire de Vernègues qui occupe toute la partie la plus à l'Ouest;
- le Miocène plissé de SALON, qui se développe jusqu'au lieu dit les "Manières" et borde au Sud la série précédente.

Le contact entre ces deux unités s'effectue le long d'une faille oblique. Il est possible de décrire la structure plissée et écaillée du Miocène de SALON.

Au pli anticlinal des Manières que l'on découvre au Nord de la tranchée du canal succède le synclinal de St-Norbert. Le flanc Nord de ce dernier pli est séparé par faille oblique de l'unité tabulaire du Val de Cuech. La position relative des molasses révèle un enfouissement (sous-charriage) du dispositif tectonique de Val de Cuech sous celui de St Norbert. L'exaltation du phénomène à l'Ouest (Semboules) se traduit par un froissement des couches et une individualisation d'écaillés.

Les déformations tectoniques du Miocène de la région salonnaise sont en relation avec un déplacement vertical, suivi d'un mouvement de translation vers le Sud, du horst d'Aurons Vernègues.

La flexure située à la limite des deux secteurs, tabulaire et plissé, évoluant ultérieurement en faille, témoigne du déplacement de bas en haut des formations crétacées. Le plissement du Miocène, accompagné d'un écaillage des flancs de plis, traduit de son côté une poussée vers le SSW ne pouvant avoir pour origine qu'un déplacement du horst dans cette direction. La preuve d'un tel déplacement nous est fournie par la position chevauchante du Jurassique et du Crétacé de Caronte sur le Miocène de Pélissanne. Ces mouvements tectoniques datent de la fin du Miocène.

Sur la Commune de GRANS, au Sud, la série, subhorizontale, d'une épaisseur moyenne de 30 m, forme de petits plateaux. Elle est surmontée par la molasse tortonienne.

L'effondrement de la Crau est contemporain de ces mouvements. Cependant, l'évolution du réseau hydrographique de la Durance, au nord de SALON, montre un nouveau rejet des failles de la bordure Ouest à la fin du Pliocène (d'après C. Gouvemet).

L'unité plissée de SALON est surmontée par la molasse Tortonienne qui peut localement être discordante sur le Crétacé: (Aérodrome de SALON), son épaisseur est de 40 m environ.

Les dépôts quaternaires (Figure 4 : lithologie n°2, 6, 7 et 8)

- Les Alluvions Anciennes de la Crau, composées essentiellement de galets à liant limoneux, constituent la majorité des dépôts quaternaires affleurant sur les Communes de GRANS et SALON. Suite à l'affaissement du seuil de Lamanon, la Durance abandonne son lit d'Eyguières. Sollicitée par une mer en régression, elle emprunte le sillon effondré et répand ses cailloutis dans la nouvelle dépression.

Cet affaissement semble s'être poursuivi tardivement créant des accidents nord-sud depuis le seuil de Lamanon. Les cailloutis de la Crau ont été déposés au Würm, mais une partie du matériel détritique qui les constitue appartient à une terrasse rissienne remaniée. L'épaisseur de cette formation n'excède pas 3 à 5 m au Sud Ouest de SALON alors qu'elle peut atteindre 20 à 30 m en moyenne sur le reste de la commune. Au Nord de GRANS, elle varie entre 0 et 30 m d'épaisseur. La présence d'accidents Nord-Sud a pu également induire localement des surépaisseurs de cailloutis par affaissement d'un compartiment du substratum (13 m de cailloutis au niveau de la Gare de SALON). D'autre part, dans l'ancien lit de la Durance, l'épaisseur des dépôts augmente pour atteindre localement 150 m. Sous les cailloutis on trouve alors des niveaux de graviers surmontant des dépôts silteux. Les données de sondages, les coupes géologiques interprétées et les profils géophysiques effectués dans la plaine de la Crau mettent en évidence un niveau continu de poudingue très induré de 2 mètres d'épaisseur vers 1 à 3 mètres de profondeur. Dans cette formation, la vitesse de propagation des ondes P serait de l'ordre de 1200 m/s.

- Des Eboulis et éluvions (E) divers se sont déposés en pied des anciens reliefs soit sur les calcaires et molasses, soit pour partie sur les dépôts Wurmiens. Sont regroupés sous cette rubrique non seulement de véritables éboulis de pentes et épandages cryoclastiques, consolidés ou non, mais aussi des formations où alternent les dépôts cryoclastiques et éboulis de piedmont. Pendant le Quaternaire, au moins depuis le Riss, les reliefs de bordure n'ont jamais cessé de nourrir de leurs débris des éboulis et limons caillouteux de pentes. Dans le secteur d'étude, ils forment une bande qui limite les reliefs calcaires et molassiques. On y distingue deux compartiments séparés par un petit relief de molasse (LE TOURET). Au Nord mis à part une frange en pied des reliefs, l'épaisseur de ces dépôts atteints 10 à 20 m. Au Sud de ce relief les épaisseurs sont beaucoup plus faibles et n'excèdent pas 3 à 5 m.
D'après la description de la carte géologique BRGM de Salon de Provence (1/50000), en profondeur, les dépôts renferment en abondance des « menus galets » à variolite (éléments provenant de la destruction d'une très ancienne terrasse dont on trouve des vestiges à l'état d'un semis graveleux jusqu'à l'Étang de Berre) ; en surface, ce sont les plaquettes calcaires cryoclastiques qui constituent l'essentiel de la formation.
- Des matériaux résiduels (Rz) sont également représentés à l'affleurement sur la commune de SALON ; Il s'agit d'une formation provenant d'une accumulation sur place d'éléments résiduels d'anciennes terrasses mêlés à des éluvions (dégradation du substratum des anciens épandages alluviaux) et à des apports colluviaux auxquels s'ajoutent les limons d'irrigation.
- Les Alluvions modernes de la Touloubre (Fz) sont des dépôts principalement limoneux, renfermant des bandes caillouteuses et lentilles graveleuses. Leur épaisseur connue est toujours inférieure à 10 m. La Figure 3 présente la carte géologique mise à jour pour la présente étude.

2.3 Contexte géotechnique

Les études de 2005 ont permis d'obtenir près de 150 sondages sur les communes de Salon, Grans et Pélissanne à partir de la BSS (banque de données du sous-sol, <http://infoterre.brgfm.fr>) et des archives du CETE Méditerranée (maintenant DTerMed). Cependant, la plupart de ces sondages ne comportent pas d'essai géotechnique. Ils nous permettent toutefois de connaître la nature et l'épaisseur des niveaux quaternaires.

Une nouvelle recherche n'a pas permis de trouver des sondages plus récents pertinents dans le cadre de l'étude. Les caractéristiques mécaniques des matériaux n'ont ainsi pas été modifiées par rapport à l'étude de 2005. Elles sont rappelées ici.

Limons argileux	E compris entre 2 et 15 MPa Pl compris entre 0,3 et 0,6 MPa
Molasse miocène	E compris entre 100 et 150 MPa Pl > 3,5 MPa
Cailloutis	E > 20 MPa Pl > 2,5 MPa

E: module pressiométrique Pl: Pression limite

Pour réaliser la carte de microzonage sismique des effets de site, les caractéristiques mécaniques retenues pour les différentes formations ont été évaluées par analogie avec des terrains équivalents connus dans la région.

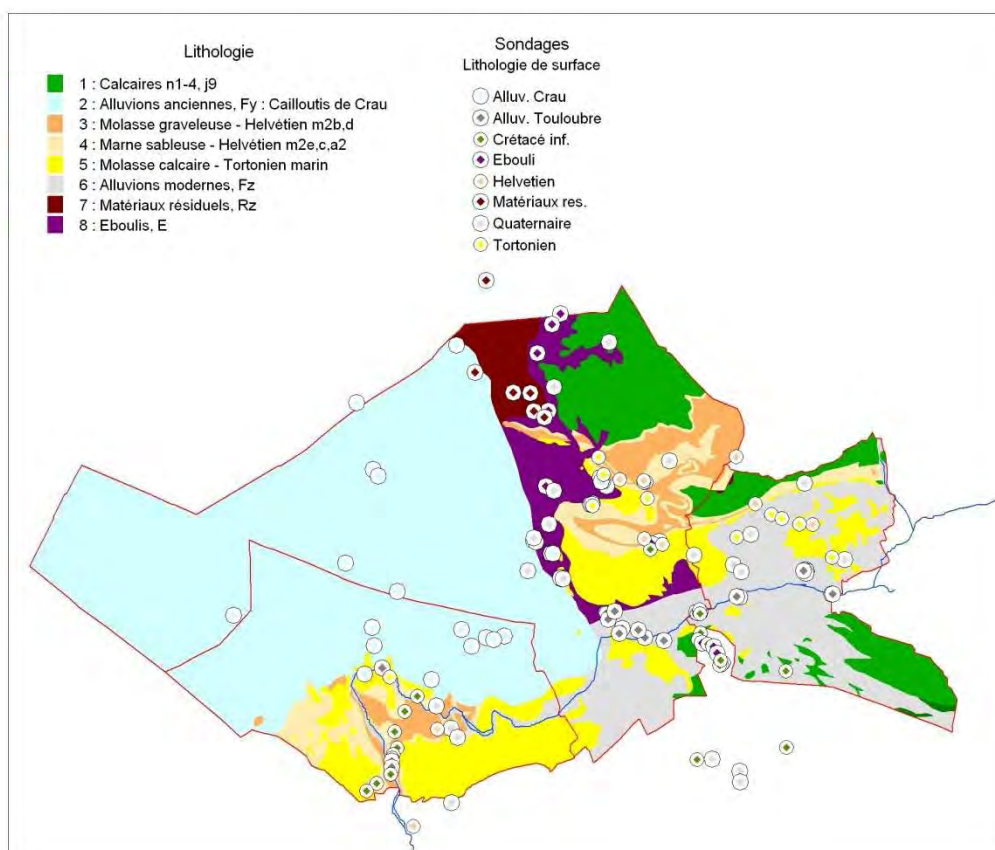


Figure 4 : Sondages géotechniques analysés

2.4 Contexte hydrogéologique

Les aquifères principaux présents sur les Communes de Grans, Salon et Pélissanne sont les suivants :

- Le réservoir aquifère de la CRAU s'étend sur environ 50000 ha. Il est constitué de cailloutis grossiers déposés par l'ancienne Durance lorsqu'elle passait par le seuil d'Eyguieres au Villafranchien (Crau d'Arles verdoyante) ou par le seuil de Lamanon au quaternaire récent (Crau de Miramas).

Le substratum des cailloutis le plus souvent grés-marneux a un modelé très irrégulier, il affleure même en certains points. Ils sont recouverts d'une couche de limons qui constituent une richesse pour les agriculteurs.

La perméabilité des cailloutis de Crau est élevée (la nappe est localement exploitée pour l'alimentation en eau potable) et la transmissivité, très variable en fonction de l'épaisseur de l'aquifère, atteint 0,5 m²/s dans le sillon qui longe la bordure Est. Lorsque la nappe est libre ce qui est le cas le plus général, les coefficients d'emmagasinement s'étagent de 1.10⁻² à 6,5.10⁻².

Le débit moyen de la nappe d'après diverses estimations serait compris entre 5 et 7,5 m³/s à l'aval près des exutoires.

L'alimentation de la nappe provient pour les 3/4 de l'infiltration des excès d'irrigation. Leur suppression ou la modification technique d'arrosage provoqueraient une baisse généralisée et même son tarissement.

La nappe s'écoule du col de LAMANON en direction d'un réseau de drainage établi en bordure du Rhône et de la mer. Dans la zone considérée la nappe s'établit au NE à la cote + 90 et au SW cote + 65.

- La molasse tortonienne (Miocène), de faible perméabilité, ainsi que le sommet de l'Helvétien sont situés au-dessus du niveau de base hydrogéologique imposé par la Touloubre et ne sont donc pas aquifères.
- Les terrains de l'Helvétien (Miocène) ont des caractéristiques hydrodynamiques variables tant verticalement que latéralement, les variations de faciès étant importantes. Dans les terrains les plus aquifères, (molasses, quelques niveaux sableux), la perméabilité est cependant relativement faible, juste suffisante pour l'alimentation individuelle.
- Les calcaires du Crétacé et du Jurassique doivent être le lieu de circulations profondes dans un karst développé. Les caractéristiques de ce système karstique sont peu connus (peu de forages ayant exploré ces niveaux).

2.5 Contexte sismique

Les données relatives à l'aléa et au microzonage sismique sur la zone d'études (communes de Grans, Salon de Provence, Pélissanne) sont fournies dans le rapport « *Études préalables à l'établissement du Plan de Prévention des Risques sismiques - Microzonage des communes de Grans, Salon et Pélissanne* » référencé C13MN0038 et daté d'octobre 2015.

3 Évaluation des aléas naturels en conditions dynamiques

3.1 Evaluation et caractérisation de l'aléa liquéfaction sous séisme

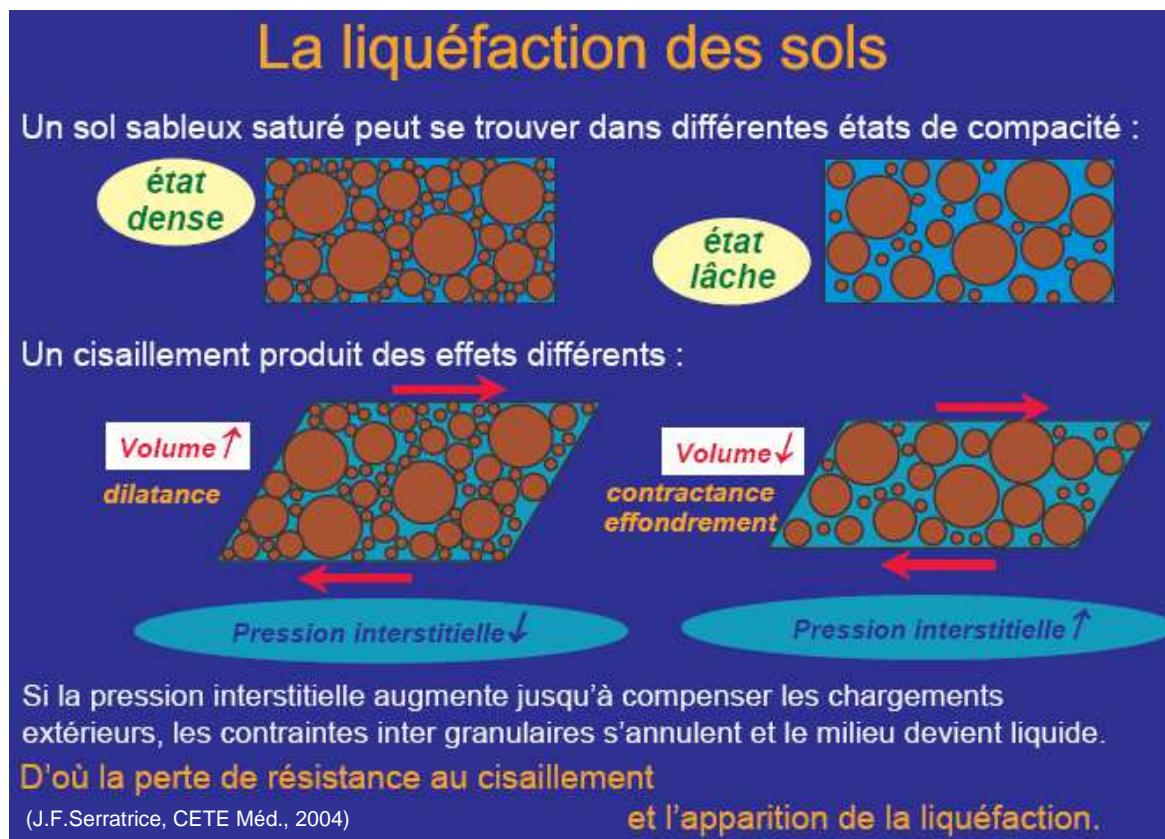
3.1.1 Présentation du phénomène de liquéfaction

On appelle liquéfaction d'un sol, le processus conduisant à la perte totale de résistance au cisaillement du sol par augmentation de la pression interstitielle. Elle est accompagnée de déformations dont l'amplitude peut être limitée ou quasi-illimitée.

Le risque de liquéfaction résulte de la combinaison de deux facteurs:

- La susceptibilité du sol à la liquéfaction, qui fait intervenir la granulométrie et l'état de compacité du sol, le niveau de la nappe, et la contrainte verticale initiale. Cette susceptibilité est directement liée au caractère contractant ou dilatant du matériau sous cisaillement. Dans le cas d'une configuration saturée, si le sol est dilatant sous contrainte cyclique, le squelette solide augmente de volume et donc la pression interstitielle chute. Au contraire, si le sol est contractant, le squelette solide se contracte et donc la pression interstitielle augmente et il peut y avoir liquéfaction.
- Les caractéristiques de l'action sismique (amplification, durée, etc.) qui a pour effet de solliciter le terrain en cisaillement.

Le risque de liquéfaction est d'autant plus grand que le sol est contractant (sable lâche) et est d'autant plus rapide que le sol est proche de la saturation.

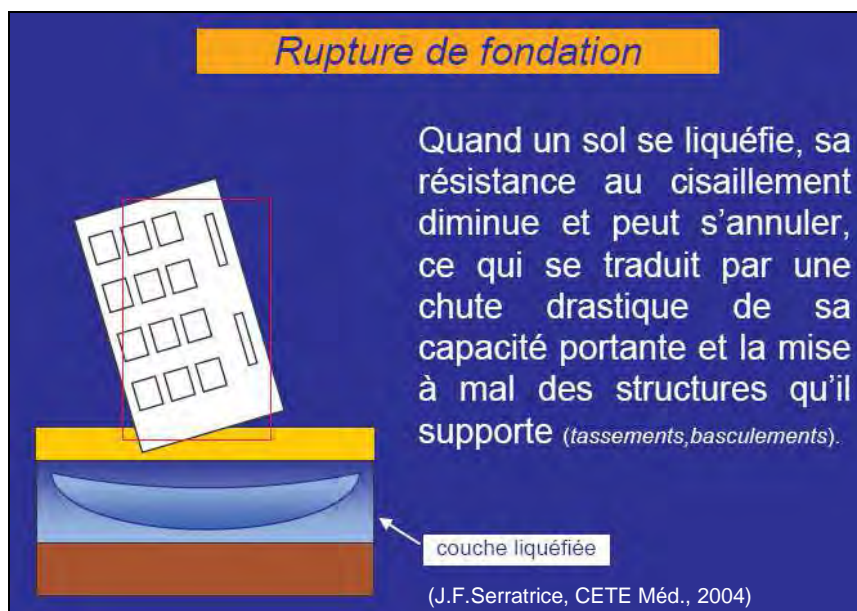


La liquéfaction des terrains en profondeur se manifeste généralement par les événements suivants:

- Ejection de sable, volcan de boue, fissures émissives,



- Remontées d'eau et de sable sous pression par les fissures,
- Rupture du sol par poinçonnement,



- Phénomènes de tassements,
- Glissements latéraux.

Glissement de terrain

Génération de
pressions interstitielles
Perte de résistance
et effet gravitaire.



Yualin, 1999



(J.F.Serratrice, CETE Méd., 2004)

couche liquéfiée

Ouvrages en terre Remblais



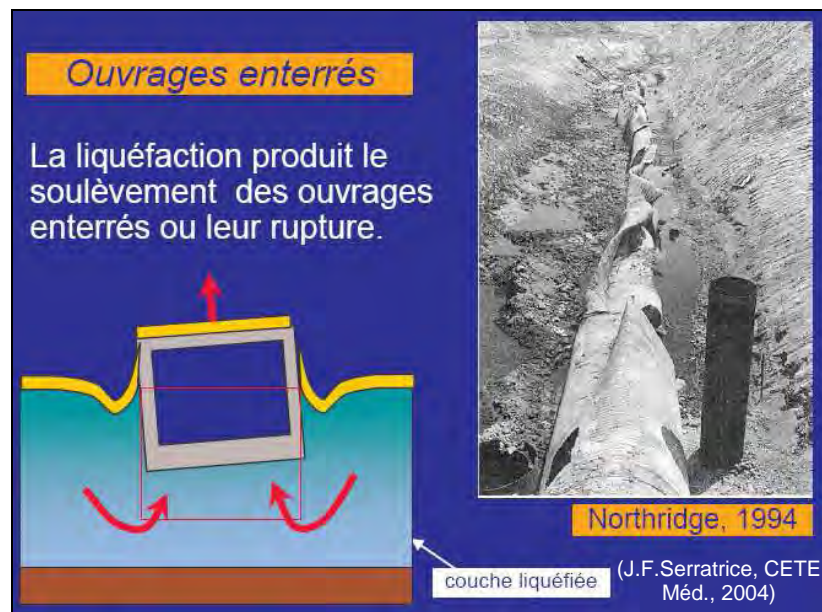
Remblai

Étalement
latéral

(J.F.Serratrice, CETE Méd., 2004)

Southern Peru, 2001

- Soulèvements des ouvrages enterrés.



L'ensemble des observations in situ montrent que seuls les terrains du Quaternaire sont affectés par la liquéfaction (Youd et Perkins, 1978).

Comme le montre le tableau ci-après, les sols susceptibles de se liquéfier sont ceux dont les contextes de dépôt sont les suivants :

- Les vallées alluviales,
- Les deltas,
- Les rives de fleuves et de lacs, les bords de mer.

Nature du dépôt	Possibilité d'occurrence de liquéfaction de sols pulvérulents saturés			
	< 500 ans	Holocène < 1 000 ans	Pléistocène ³ < 1 650 000 ans	Prépléistocène > 1 650 000 ans
DEPOTS CONTINENTAUX				
Rivière	Très élevée	Élevée	Faible	Très faible
Plaine alluviale	Élevée	Modérée	Faible	Très faible
Dépôts éoliens	Modérée	Faible	Faible	Très faible
Terrasses marines	-	Faible	Très faible	Très faible
Deltas	Élevée	Modérée	Faible	Très faible
Dépôts lacustres	Élevée	Modérée	Faible	Très faible
Colluvions	Élevée	Modérée	Faible	Très faible
Dunes	Élevée	Modérée	Faible	Très faible
Loess	Élevée	Élevée	Élevée	
Moraines glaciaires	Faible	Faible	Très faible	Très faible
ZONES COTIERES				
Deltas	Très élevée	Élevée	Faible	Très faible
Estuaires	Élevée	Modérée	Faible	Très faible
Plages	Modérée à élevée	Modérée à faible	Faible à très faible	Très faible
Lagons	Élevée	Modérée	Faible	Très faible
REMBLAIS ARTIFICIELS				
Non compacté	Très élevée	-	-	-
Compacté	Faible	-	-	-

Figure 5: Susceptibilité des dépôts sédimentaires à la liquéfaction en fonction de la nature et de l'âge du dépôt (d'après Youd et Perkins, 1978)

La plupart des épisodes de liquéfaction a apparemment lieu à des faibles profondeurs (probablement moins de 10 mètres) et dans des zones où la nappe phréatique (libre ou perchée) était près de la surface ou bien à quelques mètres de celle-ci.

La vulnérabilité à la liquéfaction décroît avec la baisse de la nappe et seulement quelques exemples de liquéfaction ont eu lieu à des profondeurs de plus de 10 mètres (Youd et Idriss, 2001)

Âge du dépôt	Profondeur de la nappe (m)			
	0 - 3	3 - 10	10 - 15	> 15
Holocène récent < 500 ans	Élevée à très élevée	Modérée	Faible	Très faible
Holocène < 10 000 ans	Élevée	Modérée	Faible	Très faible
Pléistocène récent < 1 650 000 ans	Faible	Faible	Très faible	Très faible
Prépléistocène > 1 650 000 ans	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible

Figure 6: Susceptibilité des dépôts sédimentaires à la liquéfaction en fonction de leur âge et de la position de la nappe (AFPS, 1993)

3.1.2 Aspects réglementaires: norme NF-EN- 1998-5 (Eurocode 8)

- **Cas où le risque de liquéfaction est suspecté selon NF EN 1998-5**

(1) « Une évaluation de la susceptibilité à la liquéfaction doit être effectuée lorsque le sol de fondation comprend des couches étendues ou des lentilles épaisses de sables lâches, avec ou sans fines silteuses ou argileuses, au-dessous du niveau de la nappe phréatique, et lorsque ce niveau est proche de la surface du sol. » (NF-EN-1998-5).

- **Cas où le risque de liquéfaction peut être négligé selon NF EN 1998-5**

(2) La norme NF EN 1998-5 (Eurocode 8) permet de négliger le risque de liquéfaction dans les cas suivant :

Si $\alpha \cdot S < 0.15$ où $\alpha = a_{gr} / g$

g = accélération de la pesanteur et S est le paramètre caractéristique de la classe de sol selon EN 1998-1

a_{gr} = pic de l'accélération de référence du sol pour le sol de classe A

et au moins une des conditions suivant est remplie :

- les sables contiennent de l'argile en proportion supérieure à 20% avec un indice de plasticité $IP > 10$;
- les sables contiennent des silts en proportion supérieure à 35% et, simultanément le nombre de coups SPT normalisé pour l'effet de surcharge due au terrain et du rapport d'énergie, $N_1(60) > 20$;
- les sables sont propres, avec la valeur du nombre de coups SPT normalisé pour l'effet de surcharge due au terrain et du rapport d'énergie, $N_1(60) > 30$.

Dans le cas des Communes de Grans, Salon et Pélissanne, $\alpha = 1.6$

Le paramètre de sol S étant supérieur à 1 pour l'ensemble des profils de sols pouvant être considérés, il en résulte **$\alpha \cdot S \geq 0.16$** .

Par conséquent, sur la zone d'étude, le risque de liquéfaction ne peut pas être écarté pour les matériaux correspondant aux conditions définies dans le paragraphe (1) ci-dessus.

- **Recommandations sur les méthodes d'analyse du risque de liquéfaction**

(3) Afin d'appréhender le comportement des sols vis à vis de la liquéfaction, la norme NF-EN-1998-5 exige d'effectuer des reconnaissances basée sur des essais in situ comportant a minima des essais granulométriques en laboratoire associés :

- soit à des essais de pénétration standard (SPT),
- soit à des essais de pénétration au cône (CPT).

Sur la base des résultats de ces essais, la norme permet d'évaluer la susceptibilité à la liquéfaction des sols.

3.1.3 Liste des études disponibles sur la liquéfaction dans la zone d'études

Afin d'affiner la connaissance des sols présents au droit des communes de GRANS, SALON, et PELISSANNE, les études géotechniques (principalement routières) disponibles au sein de la DTer Méditerranée ont été passées en revue. Une seule s'est avérée pertinente ;

- l'étude de la liaison Salon-Fos qui traverse les communes de SALON et de GRANS

La base de données du sous-sol du BRGM a également été consultée.

N.B. : Aucune donnée de ce type n'est disponible dans la Base de Données du Sol et du Sous-sol du BRGM. Par ailleurs, une campagne d'investigation effectuée à l'échelle d'une commune n'est pas envisageable dans le cadre de la réalisation du PPR.

Il en découle que les seuls éléments de réflexion pouvant être considérés dans le cadre du PPR sont les conclusions d'études de liquéfaction menées par le passé, dans l'emprise de la zone d'études (GRANS, SALON et PELISSANNE). Il convient cependant de considérer ces conclusions avec précaution ; en effet, chaque étude correspond à un contexte géotechnique spécifique (variation spatiale du faciès d'une formation géologique, variation des caractéristiques mécaniques associées, variation des conditions hydriques et hydrogéologiques etc.). Une formation considérée non liquéfiable dans le cadre ponctuel d'une étude, dont l'emprise est délimitée, n'est pas extrapolable à l'ensemble de son affleurement sur une commune.

3.1.4 Méthodologie utilisée dans le cadre du PPR pour la détermination de la l'aléa à la liquéfaction

Dans le cadre des PPRs des communes de GRANS, SALON et PELISSANNE, les études menées pour déterminer l'aléa à la liquéfaction des sols, correspondent à des études **qualitatives**, qui résultent de l'exploitation des données géologiques, hydrogéologiques ou géomorphologiques ;

- Les données relatives à l'*hydrogéologie* ne sont pas suffisamment précises à l'échelle de la zone d'études pour permettre d'identifier les terrains non saturés, exempts de risques de liquéfaction.
- Les données *géotechniques* permettant d'effectuer ces analyses qualitatives sont précisées aux paragraphes 3.1.3 et 2.3. Pour l'essentiel, ces données géotechniques ne correspondent pas aux exigences de la norme NF EN 1998-5 en matière de techniques de reconnaissance, et ne permettent pas d'écarter le risque (cf. paragraphe 3.1.1). Se pose également le problème de la représentativité des données (obtenues à l'échelle d'un projet et non extrapolable à l'échelle d'une commune).

Par conséquent, **l'aléa de liquéfaction ne pourra être strictement écarté que par un critère géologique**. Ainsi, nous considérerons que les roches et les sols purement cohérents ne présentent pas d'aléa de liquéfaction. A ces formations sera donc attribué un **aléa « nul »**.

Lorsque des données géotechniques sont existantes, si les caractéristiques lithologiques ou géotechniques d'une formation permettent d'identifier, de manière justifiée, une faible probabilité de liquéfaction, l'aléa est alors qualifié de « **faible** ». En revanche, si une **majorité de sondages** in situ, ont avéré conformément à la norme, pour une formation géologique donnée, un aléa à la liquéfaction, alors le niveau d'aléa est qualifié d' « **élevé** » sur l'ensemble de l'affleurement de la formation. A l'inverse, dans le cas où les sondages identifiant la formation comme liquéfiable constituent une **minorité**, alors l'aléa est qualifié de « **modéré** ».

En l'absence de données géotechniques, pour toute formation géologique non-cohérente et non-rocheuse, l'aléa à la liquéfaction ne pouvant être écarté, celui-ci sera considéré « **modéré** » a minima.

Cette graduation dans la susceptibilité à la liquéfaction, reflète, à l'échelle de la commune un niveau d'aléa associé à un certain degré d'incertitude.

3.1.5 Recensement des sols susceptibles de liquéfaction sur la zone d'étude

Compte tenu de ce qui précède, l'inventaire des différentes formations est effectué sur les trois communes de Grans, Salon et Pélissanne :

- E: éboulis quaternaires,
- Rz : Matériaux résiduels,
- Fz: limon et cailloutis du Quaternaire,
- Fy: cailloutis de Crau du Quaternaire,
- m1-3: molasse calcaire du Tortonien marin,
- m2_{a2,c,e}: molasse sableuse, marnes sableuses de l'Helvétien,
- m2_{b,d} : molasse calcaire de l'Helvétien.
- N3_b: marne et calcaire marneux de l'Hauterivien moyen
- N4_U, n3_{a,b,c}, n1, n2, n1-n2, n3_{a,c}, J7-8, J9_T, J9: Calcaires du Crétacé inférieur ou supérieur et Calcaire du Jurassique supérieur.

Considérant la lithologie de ces faciès, décrite au paragraphe 2.2, et en l'absence de sondage géotechnique permettant d'écarter le risque, les formations qui pourraient présenter *a priori* un aléa de liquéfaction sont les suivantes :

- Les alluvions du Quaternaire (Fz et Fy),
- Les formations résiduelles (Rz)

Les autres formations ont été écartées pour les raisons suivantes :

- Le substratum affleurant est constitué de roche et non d'un sol (Calcaire, Molasses)
- Les caractéristiques géotechniques correspondent à celles de sols consolidés présentant une forte cohésion (faciès marneux N3_b et m2_{a, c, e}).
- La nature des éboulis (Eboulis de pente E), formés essentiellement par des dépôts cryoclastiques rocheux et de « menus galets » à variolite issus d'une ancienne terrasse alluviale présentent, une granulométrie et des caractéristiques mécaniques permettant d'écarter le risque de liquéfaction.

Par ailleurs, la seule source bibliographique permettant d'apprécier complémentirement l'aléa à la liquéfaction des sols sur la zone d'étude, a été l'étude de la liaison Salon-Fos qui traverse les communes de SALON et de GRANS. Cette étude a recoupé l'ensemble des formations géologiques.

L'analyse des résultats de cette étude de tracé routier qui comportait beaucoup de sondages et d'essais d'identification a permis de montrer que, sur la zone d'étude :

- Les cailloutis de Crau (Fy) ne présentaient pas les caractéristiques géotechniques des sols liquéfiables au sens de la norme NF-P-06-013.
- Un niveau de sable et gravier liquéfiable, situé entre 5.50 et 6.00 m de profondeur, a été rencontré dans un sondage carotté réalisé dans les alluvions Fz de la Touloubre.²

Il en résulte que les formations retenues comme susceptibles de liquéfaction dans le cadre du PPR des communes de SALON, GRANS et PELISSANNE sont les suivantes :

- Les alluvions anciennes du Quaternaire (Fy), => Aléa **nul**
N.B. : Outre le fait que les cailloutis de Crau ne sont pas reconnus liquéfiables dans l'emprise de l'étude³, compte tenu de la granulométrie essentiellement grossière de ces alluvions anciennes, cimentées à faible profondeur (poudingue), ainsi que de leurs caractéristiques géotechniques élevées, la susceptibilité à la liquéfaction est considérée nulle sur l'ensemble de l'affleurement de cette formation au droit des communes de Grans et Salon.

² Sondage C13 de la liaison Salon-Fos, niveau de "sable vert moyen et graviers" situé entre les cotes 5.50 et 6.00 m/TN.
Valeurs des passants de l'analyse granulométrique:

20 mm	5 mm	2 mm	0.4 mm	0.08 mm
100 %	95 %	85 %	58 %	5 %

=> $D_{60}/D_{10} \approx 4 < 15$ et $D_{50} \approx 0.3$ mm donc compris entre 0.05 mm et 1.5 mm.

- Les alluvions modernes du Quaternaire (Fz), pour lesquels un sondage dans les alluvions de la Touloubre a montré un niveau de sable et gravier liquéfiable entre 5,50 et 6,00 m de profondeur. => Aléa **modéré**
- Les formations résiduelles (Rz), en l'absence de données géotechniques prouvant le contraire => Aléa **modéré**

3.1.6 Proposition pour le zonage réglementaire PPR

Le précédent zonage présente une graduation de l'aléa à la liquéfaction à trois niveaux (faible, modéré ou élevé). Cependant, dans le cadre du PPR, les implications en termes de recommandations ne peuvent se faire qu'à deux niveaux :

- Si la susceptibilité à la liquéfaction est non nulle, il convient de mener une étude spécifique à l'échelle du projet, avec réalisation d'investigations conformément aux exigences de la norme NF EN 1998-5.
- Si la susceptibilité à la liquéfaction est considérée nulle, aucune investigation relative à la susceptibilité de liquéfaction n'est nécessaire.

Par conséquent, le zonage réglementaire établi pour le PPRs pourrait se traduire par une carte qui comporterait finalement deux zones :

- Les zones pour lesquelles la susceptibilité est nulle,
- Les zones pour lesquelles la susceptibilité ne peut être écartée compte tenu des éléments à notre disposition.

La synthèse sur les communes de GRANS, SALON et PELISSANNE serait donc la suivante :

Nature lithologique	Zonage réglementaire pour la liquéfaction
Fz: limon et cailloutis du Quaternaire	Investigations géotechniques conformément à la norme NF EN 1998-5
Rz: Matériaux résiduels	
Autres formations	Aucune disposition à prévoir

3.2 Mouvements de terrain sous séisme : la méthode pseudo-statique dans le cadre du PPR

3.2.1 Généralités

L'effet des séismes sur la stabilité des pentes dépend de nombreux facteurs tels que la géologie, l'hydrogéologie, la topographie, les caractéristiques mécaniques des terrains constituant la pente, les conditions préexistantes de stabilité, qui sont inhérents à l'environnement du site.

A ces facteurs, viennent s'ajouter les caractéristiques de la sollicitation sismique: accélération maximale, contenu en fréquence, durée.

Avant de proposer une carte d'aléa mouvement de terrain en dynamique, la première étape de l'évaluation de l'aléa consiste à établir une carte d'aléa de type classique, c'est-à-dire sans tenir compte des conditions sismiques.

Dans ces cartes, l'intensité des aléas est déterminée en fonction de la probabilité d'occurrence d'un phénomène mouvement de terrain, sur un territoire donné, sans préjuger de la date de son déclenchement ni des dommages qu'il peut causer.

La légende adoptée pour la carte d'aléa statique, est le croisement de deux informations:

- Le type de phénomène qui peut être avéré ou potentiel, et
- La probabilité d'apparition de l'événement qui va de nulle à très élevée.

3.2.2 Cartographie de l'aléa mouvement de terrain en situation dynamique sur la zone des PPR

Pour les mouvements de terrain en dynamique (sous séisme), la présente étude s'appuie sur les cartes d'aléa statique réalisées dans le cadre des P.E.R. de GRANS, SALON-DE-PROVENCE et PELISSANNE.

Rappel : Les cartes d'aléa statique avaient recensé l'ensemble des aléas de mouvements de terrain (glissements, effondrements, affaissements, érosion, chutes de blocs, etc.) présents au droit de la commune ainsi que les aires susceptibles d'être affectées par ces aléas.

La prise en compte de la sismicité se traduit pour les mouvements de terrain en dynamique par⁴ :

- un ajout de phénomènes spécifiques, tels que les glissements subhorizontaux sur les berges, ainsi qu'éventuellement les glissements provoqués par le phénomène de liquéfaction
- une aggravation de l'aléa, pour une zone de phénomène donné,
- une extension des zones d'épandage pour les éboulements rocheux.

3.3 Glissements de terrain en situation dynamique

3.3.1 Application de la méthode pseudo-statique

On emploie une méthode qui repose en premier lieu sur la cartographie réalisée en statique puis sur l'application d'une méthode pseudo statique simplifiée qui détermine la majoration de l'aléa dû aux conditions dynamique. Il convient cependant de noter que:

- Cette procédure ne peut être appliquée aux terrains dans lesquels des surpressions interstitielles seraient susceptibles de se produire.
- Pour le calcul pseudo statique, le coefficient sismique est pris conventionnellement égal à a_{gR} l'accélération de référence du sol, pour le sol de classe A de calage du spectre divisée par 2.

On admet que le zonage statique de l'aléa mouvement de terrain, reflète l'attribution d'un **"coefficient de sécurité statique" noté F_s** , fonction des propriétés mécaniques du sol (cohésion c et angle de frottement interne ϕ), de la géométrie du versant (pente α) et des pressions interstitielles (u).

Le degré d'aléa peut être assimilé à la valeur de F_s , plus ou moins proche de 1; F_s est estimé approximativement à partir des conditions actuelles, mais certains paramètres sont susceptibles d'évoluer (changement de la géométrie du versant par réalisation de terrassement, modification des conditions hydrauliques et hydrogéologiques, etc.)

Ainsi, on peut distinguer quatre degrés d'aléa avec des coefficients de sécurité statiques estimés comme suit (d'après Guide Méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique – AFPS – novembre 1993):

- Niveau 1: $2.0 < F_s$
- Niveau 2: $1.5 < F_s < 2.0$
- Niveau 3: $1.25 < F_s < 1.5$
- Niveau 4: $1 < F_s < 1.25$

⁴ Cf. Guide méthodologique pour la réalisation d'études de microzonage sismique, AFPS, Novembre 1993

La définition retenue pour le coefficient de sécurité est la définition usuelle des géotechniciens à savoir, le rapport entre les forces résistantes maximales et les forces motrices.

La prise en compte de l'action sismique se traduit par l'introduction dans le calcul pseudo-statique, d'un coefficient sismique horizontal K, représentant l'accélération au site, exprimée en g (1 g= 9,81 m/s²). **$K = 0.5 \cdot a_{gr}$**

Pour des zones où le terrain et les pentes moyennes sont homogènes, on définit alors à partir de la pente moyenne (α) du versant, de l'aléa sismique (K), du niveau d'aléa hors séisme (Fs), un "**coefficient de sécurité pseudo-statique**" noté **Fd**.

Fd a été déterminé pour les cas de sols suivants:

- Sols purement cohérents (argiles, etc.)
- Sols purement frottants (sables, etc.)

Pour une accélération parallèle à la pente et égale à K, la formule donnant les coefficients de sécurité dynamique s'écrit:

$$Fd = Fs \frac{\phi(K, \alpha)}{\phi(0, \alpha)}$$

La fonction ϕ dépend du type de sol et s'écrit :

Sol purement frottant	Sol purement cohérent
$Fd = \tan \varphi \cdot (1 - K \cdot \tan \alpha) / (K + \tan \alpha)$	$Fd = c / (\gamma \cdot H) \times 1 / (\sin \alpha + k \cdot \cos \alpha)$

Une fois que Fd a été déterminée, comme pour Fs, on revient à la notion d'aléa dynamique à quatre niveaux comme suit:

- Niveau 1: 2.0 < Fd
- Niveau 2: 1.5 < Fd < 2.0
- Niveau 3: 1.25 < Fd < 1.5
- Niveau 4: 1 < Fd < 1.25

3.3.2 Cartographie de l'aléa de glissement sur les communes de GRANS, SALON et PELISSANNE

Cette partie de l'étude reprend les analyses et les conclusions des PER de 1988. La planche n°2 reprend ainsi intégralement les zones définies dans ce PER en termes de limites de zone et de nature d'aléa.

Cinq niveaux d'aléa ont été différenciés:

- 1: nul
- 2: faible
- 3: moyen
- 4: élevé
- 5: très élevé

Les études réalisées en juin 1986 par le CETE Méditerranée et le BRGM indiquaient :

- dans le cadre du P.E.R. de Grans, pour l'aléa mouvement de terrain que « *l'analyse des différents éléments déterminants pour l'étude de la stabilité des terrains [...] ne permet pas de mettre en évidence actuellement un risque de mouvement de terrain actif ou potentiel* ».
- dans le cadre du P.E.R. de Pélissanne que le risque de chutes de blocs est le seul représenté sur la partie Nord de la commune (Pied du chevauchement des Costes, Roc de Caronte).
- dans le cadre du P.E.R. de Salon-de-Provence que le risque de chutes de blocs est le seul représenté, sur la partie Nord-Est de la commune uniquement. La carte d'aléa statique établie alors n'a pas été modifiée dans le cadre de la présente étude.

Aucune des trois communes n'est concernée par l'aléa glissement en statique, les glissements à considérer en dynamique seraient donc limiter à d'éventuels glissements superficiels dans les formations de faibles caractéristiques mécaniques de types alluvions modernes.

Conclusion :

En situation dynamique, il peut donc être considéré, sur les communes de Salon, Grans et Pelissanne, que seules les alluvions des rives de la Touloubre peuvent être concernées par des mouvements superficiels, avec une probabilité d'occurrence proche de nulle.

Par conséquent, l'aléa glissement n'est représenté en annexe sur aucune des communes.

3.4 Evaluation et caractérisation de l'aléa chute de blocs sous séisme

3.4.1 Application de la méthode pseudo-statique

Actuellement, **il n'existe aucune méthodologie** permettant d'apprécier l'effet d'un séisme sur une zone soumise à un aléa chutes de blocs. En cas de séisme, on assiste surtout à une généralisation des éboulements dans les zones à risques (effet de "purge" produit par la secousse) et à un allongement des trajectoires des blocs libérés lors du séisme.

Par conséquent, on augmente de manière empirique la zone de réception sous sollicitation sismique en tenant compte de la topographie et de la limite pressentie en statique.

Les rédacteurs d'études peuvent s'appuyer localement sur des calculs trajectographiques en statique afin de vérifier la zone de réception dynamique, définie de manière empirique.

Nous fournissons en annexe quelques exemples de calculs de trajectographie de chutes de blocs en statique. Ces exemples ont été réalisés sur des profils fictifs ne concernant pas la commune. La limite statique définie dans ces conditions la zone de propagation minimale à prendre en compte.

3.4.2 Cartographie de l'aléa de chute de blocs sur les communes de GRANS, SALON et PELISSANNE

L'étude réalisée en juin 1986, indique que le risque de chute de blocs est présent sur

- *le territoire de la commune de Salon-de-Provence, où il est le seul risque représenté et ce, sur sa partie Nord-Est uniquement.*
- *Le territoire de la commune de Pélissanne, dans deux zones :*
 - *Au Nord de la Commune, dans les Molasses Calcaires du Tortonien avec un risque élevé à très élevé*
 - *Au Nord-Est, en limite de commune où est situé un important relief calcaire constitué par une série de petites falaises (le Roc de Caronte) présentant un risque qualifié comme faible à moyen.*

Les cartes d'aléa de mouvement de terrain avaient été réalisées en 2005 (première version du rapport) et n'ont pas été modifiées par la présente étude.

Sur les communes, les vitesses issues de l'analyse déterministe de l'aléa sismique sont très faibles (entre 4 et 13 cm/s) et ne permettent pas la prise en compte directe dans des modélisations fines de trajectographie de cet incrément de vitesse en situation dynamique.

Conclusion :

En l'état actuel des connaissances, seuls les PPRs de Salon-de-Provence et de Pélissanne mettent en évidence un aléa non nul vis-à-vis des chutes de blocs.

4 Synthèse

Les études préalables à la production d'un plan de prévention des risques sismiques pour les communes de Grans, Salon de Provence et Pélissanne ont permis d'établir un zonage des aléas naturels (chutes de blocs, glissement et liquéfaction) en contexte dynamique sur les trois communes. Dans le cas de la liquéfaction, une proposition de zonage réglementaire associé est également soumise, en accord avec le contexte réglementaire de l'Eurocode 8.

Une carte de synthèse des aléas combinant le microzonage sismique et les aléas naturels en conditions dynamiques est proposée dans la Planche 4 («carte de zonage des aléas») en annexe du présent rapport.

ZONAGE ALEAS

-  Z1
-  Z1 Eb2
-  Z1 Eb3
-  Z1 Eb4
-  Z1 Eb5
-  Z1 L2
-  Z1t
-  Z1t Eb2
-  Z1t Eb3
-  Z1t Eb4
-  Z1t Eb5
-  Z2
-  Z3
-  Z3 Eb4
-  Z3 L2
-  Z3 L2 Eb2
-  Z3 L2 Eb4
-  Z3 L2 Eb5
-  Z4
-  Z4 L2
-  Z5 L2
-  Z6

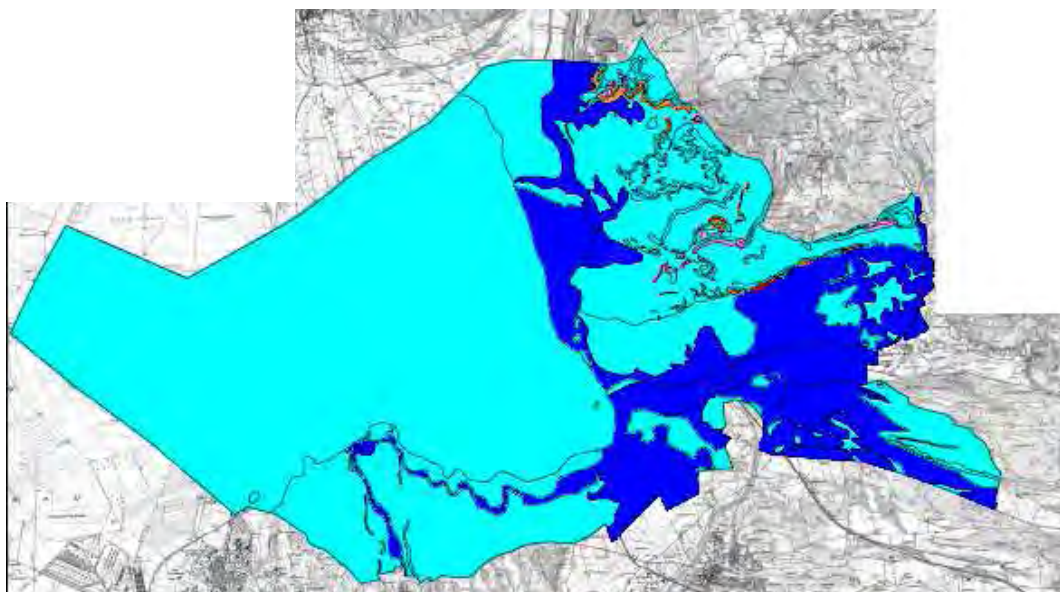


Figure 7 : Carte de zonage des aléas sur les communes de Salon, Grans et Pélissanne, levé au 1/10 000.

Le chef du service RGGC

Le chef du laboratoire de Nice

Patrice MAURIN

Benoît CANAL

ANNEXE

Exemples de trajectographie

Exemples de trajectographie

Principe de la méthode

L'analyse de propagation peut être réalisée par simulation sur modèle numérique mis au point par le Laboratoire des Ponts et Chaussées Rhône-Alpes⁵.

Présentation de la méthode

Dans ce modèle d'impact, le mécanisme essentiel mis en jeu est l'énergie potentielle libérée au cours de l'éboulement et transformée, en partie, par la propagation en énergie cinétique.

La résistance à l'air étant négligeable, cette énergie est produite et dissipée progressivement au cours du déplacement, notamment lors des impacts par :

- le frottement,
- la déformation plastique du terrain,
- la projection des matériaux,
- la fragmentation des blocs,
- les vibrations transmises au sol.

Ce modèle est basé sur les études théoriques et les observations de terrain faites précédemment, c'est à dire la topographie, les caractéristiques du terrain, le volume et la forme des blocs (qui agit sur la rotation) et la fragmentation ; qui sont autant de paramètres pour la dissipation de l'énergie.

Quatre fonctions de transfert caractérisent les relations entre l'énergie cinétique incidente et l'énergie cinétique après l'impact :

- une fonction de transfert normale Ψ_n caractérisant l'énergie cinétique transmise dans la direction normale ; Ψ_n traduit la partie élastique du rebond. Celle-ci est très faible ;
- une fonction de transfert de glissement Ψ_g caractérisant l'énergie cinétique transmise dans la direction tangentielle ; Ψ_g traduit l'influence du mécanisme de glissement associé à un déplacement tangentiel au cours de l'impact ;
- une fonction de transfert de rotation Ψ_p caractérisant l'énergie cinétique transmise, liée à la rotation du bloc ; celle-ci est prépondérante, ce mécanisme jouant un rôle essentiel dans la propagation ;
- un facteur de roulement K_p lié à la variation de l'énergie cinétique entre deux impacts successifs.
 K_p est une fonction dont la valeur est comprise entre 0 et 1, traduisant l'influence relative des mécanismes de rotation et de glissement lors d'un impact.

⁵L. Rochet (1987)-Application des modèles numériques de propagation à l'étude des éboulements rocheux. Bull. Liaison. Labo Ponts et Chaussées, 150/151, Juil-Août/Sept-Oct.

Les valeurs des fonctions de transfert dépendent de plusieurs paramètres principaux: la nature des terrains dans la zone d'impact, le volume des blocs, la vitesse d'impact.

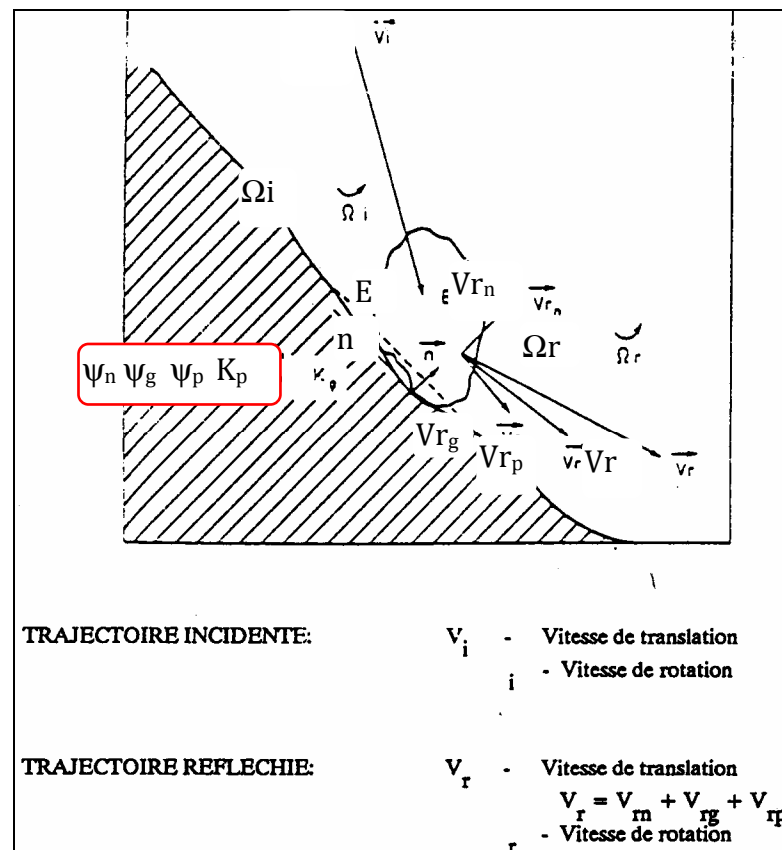


Figure 8: représentation des vecteurs vitesses et des fonctions de transfert au moment de l'impact d'un bloc.

V_{rn} : vitesse réfléchie normale à la direction de propagation (rebond élastique),

V_{rg} : vitesse réfléchie tangentielle à la direction de propagation (glissement),

V_{rp} : vitesse réfléchie liée à la rotation du bloc. L'orientation de ce vecteur dépend de l'élancement cinématique E du bloc,

F_n, F_g, F_p : effort normal à la trajectoire, de glissement et de rotation,

V_i : vitesse de translation incidente,

E : élancement cinématique.

Le vecteur V_r correspondant à la vitesse réfléchie à la sortie de l'impact est décomposé, dans le plan vertical de la trajectoire émergente, en :

$$V_r = V_{rn} + V_{rg} + V_{rp}$$

dans lesquels les composantes V_{rn} , V_{rg} et V_{rp} ne dépendent que des mécanismes de transfert d'énergie correspondants :

$$Vr_n = F_n (Vi, n, E, \Psi_n)$$

$$Vr_g = F_n (Vi, n, E, \Psi_g, K_p)$$

$$Vr_p = F_p (Vi, n, E, \Psi_p, K_p)$$

Les vecteurs Vr_n , Vr_g sont orientés respectivement suivant les directions normale et tangentielle du versant ; l'orientation du vecteur Vr_p est liée à l'élancement cinématique E du bloc.

Le rapport entre l'énergie cinétique de rotation et l'énergie cinétique de translation dépend de la valeur du facteur de roulement K_p et de l'élancement cinématique E.

Ces fonctions, caractérisant les mécanismes d'échange et de dissipation d'énergie, ne permettent pas une détermination directe des paramètres de calcul.

L'estimation des valeurs caractéristiques repose sur l'analyse des données expérimentales précises. Cette rétro-analyse permet le calage du modèle à partir de l'analyse de données relatives à des éboulements antérieurs observés sur site.

Cette analyse de l'extension probable d'un éboulement, des caractéristiques limites des trajectoires, de l'étude des conditions de propagation est effectuée au moyen de modèles dits à trajectoire enveloppe : conditions limites de propagation générées par l'enchaînement d'impacts successifs sur l'ensemble de la trajectoire. Modèle aléatoire calé à partir des trajectoires enveloppes.

Paramètres fournis au logiciel de trajectographie

Topographie

Pour chaque profil il faut intégrer les valeurs d'abscisse et d'altitude afin d'obtenir la trajectoire de propagation suivie. De la topographie du versant dépend l'énergie potentielle mise en jeu lors de l'éboulement.

Paramètres cinétiques

Il faut définir :

- la vitesse initiale du bloc en m/s, cette valeur est égale à 1 m/s par défaut à la zone de départ du bloc. Elle influence directement la trajectoire.
- l'angle d'incidence en degré au départ du bloc, par défaut il est choisi à 0° par rapport à l'horizontale.

- l'abscisse (X) et l'altitude (Z) de départ, en mètres, à l'origine des profils ne correspondent pas nécessairement à la zone de départ des blocs. Plusieurs départs de blocs ont été définis sur un même profil en fonction des observations faites lors de l'étude d'aléa.

Paramètres mécaniques

Il faut définir :

- le volume en m^3 ; les essais effectués sur un même profil montrent son rôle négligeable sur la trajectoire du bloc.
- l'élanement : l'élanement cinématique E du bloc est un paramètre essentiel du fait de l'importance de la rotation des blocs dans les conditions de propagation.

Paramètre de calcul

Le pas de calcul est choisi égal à 1 par défaut

Caractéristiques de terrain

Le choix des caractéristiques de terrain, qui traduisent les phénomènes d'échange et de dissipation d'énergie lors des impacts, est essentiel.

Les classes de terrain correspondent à des valeurs de référence, on distingue :

- Rocher Sain,
- Rocher Altéré
- Éboulis Compact,
- Éboulis Meuble,
- Terrain Naturel,
- Liquide.

Les caractéristiques cinématiques des terrains règlent le mécanisme d'échange et de dissipation d'énergie au cours de l'impact. Les valeurs correspondantes sont déterminées expérimentalement à partir d'observations de terrains effectuées sur différents sites (calage de modèle)

Sur les profils obtenus on observe que le rocher sain favorise les trajectoires aériennes alors que les éboulis meubles réduisent la vitesse et favorisent le roulement.

Les exemples

Connaissance et prévention des risques - Développement des infrastructures - Énergie et climat - Gestion du patrimoine d'infrastructures
Impacts sur la santé - Mobilités et transports - Territoires durables et ressources naturelles - Ville et bâtiments durables

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Direction Territoriale Méditerranée - Pôle d'activités 30 Avenue Albert Einstein - CS 70499 - 13593 AIX-EN-PROVENCE Cedex 3 - Tél : +33 (0)4 42 24 76 76

Siège : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30 - www.cerema.fr