

Introduction

L'évaluation d'un certain nombre de problèmes de génie civil nécessite souvent la considération du comportement dynamique des sols comme dans le cas des fondations sous chargements sismiques, de vibrations dues à des machines ou bien à la circulation routière et ferroviaires. Un problème très fréquent de nos jours est l'effondrement du sol, près d'une source à mouvement vibratoire, soit sous les fondations des structures existantes soit en surface. Les raisons de cet effondrement restent variées et fortement dépendantes de la nature du sol elle-même. En France, l'affaissement dû à l'effondrement des sols loessiques sur la ligne du TGV Nord en Picardie se présentait sous forme de cuvettes de 3m à 5m de diamètre avec un tassement de 0,5m à 1m environ (Cui, 1995). Les recherches menées depuis 2003 (Marcial et Cui, 2003a et 2003b) ont montré que cet effondrement est principalement le résultat de l'infiltration d'eau, de l'endommagement dû aux passages du train quand il se présentait dans des conditions non saturées et de la liquéfaction de certaines couches quand elles sont saturées. Les travaux réalisés et présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans le cadre des recherches financées par le Réseau Ferré de France (RFF) et menées conjointement par la Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF) et l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC) afin de mieux comprendre le comportement des sols loessiques sous les sollicitations ferroviaires.

La déformation, potentiellement importante, des sols loessiques est un problème géotechnique sérieux, capable de causer des dégâts souvent irréparables, tant à des ouvrages existants qu'à de nouvelles constructions. En raison de leur genèse et de leur constitution, les dépôts de loess forment des structures remarquablement *poreuses*, maintenues par des *liants*, dont la force augmente avec le temps, d'où la terminologie de *cimentation naturelle*. En général, ces dépôts ont une granulométrie semblable, une même composition minérale, une structure poreuse et un faible degré de saturation. Bien que cette formation puisse maintenir une structure relativement poreuse sous une épaisseur considérable des sols sus jacents, elle restera métastable et la structure s'effondrera dans les conditions d'un surchargement et/ou d'humidification (Derbyshire et al., 1995b).

Dijkstra et al. en 1994 ont relié le problème d'effondrement de ces sols à des conditions initiales de faible densité sèche et de faible teneur en eau. Toutefois, on pense que l'infiltration d'eau n'est pas la seule cause d'un tel effondrement; leur liquéfaction une

fois qu'ils sont saturés et soumis à des chargements cycliques dus aux passages répétés de trains est aussi une cause importante. Pour montrer le caractère liquéfiable de ces sols, Marcial et Cui ont réalisé en 2003 des essais triaxiaux monotones sur des échantillons pris sur le site de Beugnâtre à différentes profondeurs, 1,20m ;2,20m ;3,50m et 4,90m respectivement. Ils ont observé une augmentation de la pression interstitielle qui a atteint un palier proche de la pression de confinement. Ainsi, la susceptibilité de ces sols à la liquéfaction statique a été mise en évidence. Clairement, il devenait important de trouver une méthode qui permet de localiser les couches à risque vis-à-vis de la liquéfaction afin de pouvoir les traiter pour assurer le bon fonctionnement de toutes les structures fondées sur ces dépôts. Cependant, et bien avant qu'une technique sûre, efficace et économique soit établie, il est essentiel que les mécanismes de métastabilité des loess et de son effondrement soient compris. Ainsi, l'objectif de l'étude dans le cadre de la thèse est de développer à travers plusieurs essais expérimentaux réalisés, deux modèles, le premier correspondant à une méthode de localisation des couches à risque in situ et ce à travers des paramètres géotechniques classiques et le deuxième étant un modèle rhéologique capable de décrire les phénomènes de liquéfaction et d'endommagement.

Plan de l'étude

Ce rapport est divisé en deux parties, la première comprend l'étude bibliographique et expérimentale et la deuxième la partie modélisation. Il contient six chapitres au total. Dans le chapitre I, on présentera les caractéristiques géotechniques du loess de Picardie en comparaison avec quelques loess du monde. Ensuite, on présentera un résumé sur ses propriétés d'effondrement, d'endommagement et ses propriétés sous chargement cyclique. On s'intéresse ensuite aux méthodes d'évaluation du risque de liquéfaction basées sur les mesures in situ tel le *SPT*, le *CPT*, le *DMT* et les mesures de la vitesse de cisaillement V_s . Finalement, on présente un résumé sur les modèles de surface de frontière (Pastor et al., 1985), de plasticité généralisée (Pastor et al., 1990) et le modèle élastoplastique avec endommagement (Gens et Vaunat, 2003).

Dans le chapitre II, une présentation du matériau étudié sera faite et les techniques expérimentales seront développées: le protocole des essais de liquéfaction sur la cellule triaxiale cyclique, Buhel et Faubel, et son étalonnage, le protocole des essais d'endommagement sur la presse MTS de 100 KN et le protocole des essais de mesure de la vitesse de cisaillement réalisés sur les bender element seront présentés en détail. Pour les

essais de liquéfaction, deux cas seront abordés : liquéfaction à l'état saturé et liquéfaction à l'état proche de la saturation.

Dans le chapitre III, une interprétation des essais triaxiaux cycliques réalisés sur des échantillons pris à quatre profondeurs différentes, 1,20m ; 2,20m ; 3,50m et 4,90m respectivement et une synthèse sur le comportement cyclique du loess seront présentées : les courbes de résistance à la liquéfaction montrent que le sol situé à 2,20m est le moins résistant. Les essais cycliques sur des échantillons initialement non saturés montrent qu'à une teneur en eau proche de celle de saturation, le potentiel à la liquéfaction est significatif.

Le chapitre IV sera consacré à l'étude du comportement d'endommagement du loess sous grandes fréquences. Les résultats des essais réalisés sur la presse MTS seront présentés, l'accent sera mis sur l'effet de la teneur en eau et de la fréquence sur l'endommagement du sol. Les résultats ont montré que l'endommagement défini comme la variation des déformations avec le nombre de cycles, est d'autant plus important que la teneur en eau est élevée. Cette variation est, pour une même fréquence, de l'ordre de 1% pour le sol à 1,20m et de 0,6% pour le sol à 3,50m. Avec l'augmentation de la fréquence, l'amplitude des déformations semble augmenter légèrement. L'effet de la pression et du degré de saturation, du pourcentage des fines et des carbonates et de la densité sur les mesures de la vitesse des ondes de cisaillement à travers des essais réalisés sur bender element seront présentés par la suite. Le chapitre terminera par la proposition d'une corrélation reliant V_s à tous ces paramètres.

La deuxième partie sera consacrée à la modélisation. Dans le chapitre V, une application des méthodes d'évaluation du risque de liquéfaction existantes à partir des données in situ procurées par la SNCF sera présentée en détail. Les résultats montrent que les prévisions de certaines méthodes telles que le CPT sont cohérentes du point de vue de localisation des couches à risque, mais en revanche les valeurs importantes du facteur de sécurité montrent une certaine limite de ces méthodes qui ne prennent pas en considération l'effet de la cimentation et du passage des conditions non saturées aux conditions saturées. On présente par la suite le développement d'une nouvelle méthode basée sur les mesures de la vitesse de cisaillement et les courbes de résistance à la liquéfaction déterminées dans le chapitre III avec son application à différents sites. La relation proposée dans le chapitre précédent est essentielle dans cette méthode qui nécessite la connaissance de la vitesse de cisaillement à l'état saturé.

Enfin, dans le chapitre VI, on présentera le développement d'un modèle basé sur celui de Gens et Vaunat (2003), pour l'aspect d'endommagement, sur le modèle de Pastor et al. (1985) pour l'aspect élasto-plastique et sur le modèle d'Alonso et al. (1990) pour l'effet de la succion. Ce modèle est capable de décrire les principaux phénomènes observés expérimentalement sur les lœss de Picardie comme l'effondrement dû à la diminution de succion, l'endommagement dû au chargement cyclique et la liquéfaction sous sollicitations cycliques à l'état saturé. La détermination des paramètres du modèle sera discutée et les résultats d'une étude paramétrique sera présentée.