

## Résumé de la thèse de Cécile Clément

La liquéfaction des sols s'observe lors de forts séismes dans des zones saturées en eau, elle provoque la remontée des eaux et un enfoncement ou une inclinaison des bâtiments dans la terre. D'après un modèle conventionnel, la liquéfaction résulte de l'augmentation de la pression de pores due à une compaction du sol provoquée par les ondes sismiques. Le modèle conventionnel explique la moitié des déclenchements de liquéfaction due à des séismes. Dans cette thèse on propose un nouveau modèle de liquéfaction qui vient compléter le modèle actuel, donnant une explication à de nombreux cas de liquéfaction incompris jusque là.

Nous avons mis au point un modèle analytique de milieu granulaire saturé, surmonté d'une sphère modélisant un bâtiment. C'est l'enfoncement de la sphère dans le milieu qui caractérise pour nous l'état liquéfié du milieu. On calcule l'accélération seuil  $\Gamma$  à partir de laquelle les grains du milieu peuvent glisser les uns sur les autres. Cette accélération ne permet pas à la sphère de glisser sur les grains alentours. En effet, contrairement à la sphère les grains du milieu sont immergés et ressentent donc une force d'Archimède. On fait l'hypothèse que l'enfoncement de la sphère est provoqué par le réarrangement progressif des particules plus éloignées. Pour valider notre modèle, on réalise des expériences, des simulations numériques et une analyse de données de terrain.

Nous avons élaboré un setup expérimental qui modélise un milieu granulaire soumis à une excitation horizontale contrôlée. Comme grains, nous avons utilisé du sable et des billes de polystyrène non expansé. On pose notre modèle de bâtiment, une sphère, à la surface. On observe trois comportements selon les paramètres de secousses : un comportement rigide où le milieu se comporte comme un milieu indéformable ; un comportement liquéfié où la sphère s'enfonce dans le milieu ; enfin un comportement globalement excité pour les fortes secousses, où tous les grains glissent les uns au dessus des autres et où des cellules de convection apparaissent. Nous suivons la hauteur de la sphère grâce une caméra explorant le domaine de fréquences entre 0.1 et 50 Hz et le domaine d'accélération entre 0.001 et 4  $\text{ms}^{-2}$ . On peut alors tracer un diagramme de phases en fonction des paramètres de secousses.

Le résultat est que le comportement rigide, liquéfié, ou globalement excité ne dépend que de l'accélération des secousses au premier ordre. L'accélération à partir de laquelle on observe de la liquéfaction correspond à la limite théorique  $\Gamma$  du modèle analytique. Nous avons ensuite étendu nos résultats à des milieux dont le niveau d'eau par rapport à la surface du milieu granulaire est variable, allant des milieux secs jusqu'aux milieux inondés. On conclut que l'enfoncement de la sphère est maximal lorsque l'eau affleure à la surface du milieu granulaire. Cette observation est cohérente avec le modèle analytique qui stipule que c'est le contraste entre la sphère non portée par l'eau et les grains portés par l'eau qui permet à la sphère de s'enfoncer.

En parallèle nous avons écrit un programme basé sur la dynamique moléculaire qui simule le comportement mécanique de milieux granulaires. Dans ces milieux numériques, l'eau est représentée par une force d'Archimède. Comme dans les expériences, on modélise la présence d'un bâtiment au dessus du milieu par une large sphère posée à la surface du milieu et on applique une oscillation horizontale. On suit l'enfoncement de la sphère pour caractériser le comportement du milieu. Après avoir retrouvé le même diagramme de phases que dans les expériences, on analyse la micromécanique au sein des particules du milieu. On confirme les hypothèses faites par le modèle analytique en montrant que le comportement liquéfié se caractérise par des contacts rigides entre la sphère et les particules voisines et des contacts glissant au loin.

Nous comparons enfin ces résultats avec les cas de liquéfaction déclenchés par des événements sismiques observés dans des conditions naturelles. On convertit notre accélération seuil  $\Gamma$  en densité d'énergie et on conclut qu'elle correspond au premier ordre à la densité d'énergie à partir de laquelle on observe de la liquéfaction sur le terrain. Notre modèle permet donc d'expliquer des cas de liquéfaction lointaine, ou liquéfaction basse énergie qui étaient non compris jusque là. Bien qu'ils soient totalement indépendants, les résultats du modèle analytique, des simulations numériques, des expériences et des observations sur le terrain coïncident. Notre travail nous a également permis d'obtenir des résultats sur les sables mouvants et sur l'impact des fondations des bâtiments dans un sol liquéfié.