

Les micropieux sont des éléments structuraux très minces, qui ont la capacité de supporter des charges très élevées compte tenu de leur capacité intrinsèque, mais également s'ils sont fichés dans un sol résistant. Cependant, lorsqu'ils traversent des couches molles ou très molles, il existe un risque de flambement, ce qui peut limiter leur capacité portante.

Les normes nationales et européennes prescrivent de vérifier le risque de flambement pour les micropieux installés dans des sols très mous caractérisés par une résistance au cisaillement non drainée $c_u < 15$ kPa et $c_u < 10$ kPa, respectivement. En cas de résistances au cisaillement plus élevées, la vérification n'est généralement pas exigée. Dans certains exemples cependant cette prescription ne s'avère pas sûre et des flambements se produisent avant que la capacité intrinsèque ultime de la section du pieu ne soit atteinte. Les publications analysées, qui rendent compte des modèles de calcul pour résoudre le problème du flambement ou des essais de chargement de pieux, indiquent explicitement que le risque de rupture du pieu suite à un flambement est sous-estimé dans les réglementations techniques. C'est pour vérifier, au-delà d'une simple analyse calculatoire, le comportement de flambement des micropieux en sols mous et très mous, que des essais appropriés ont été conduits dans le cadre de la mission de recherche que conclut le présent rapport.

Dans un premier temps, un petit banc d'essai a été construit, permettant de soumettre à des charges-tests des pieux de 80 cm de long s'appuyant latéralement sur des sols mous et très mous. Deux différentes sections de pieux et plusieurs sols de consistances différentes ont été utilisés. Le flambement a déterminé systématiquement l'état ultime du système, même dans des sols caractérisés par une résistance au cisaillement non drainée supérieure à 15 kPa. Lors des essais, non seulement la charge exercée mais aussi le déplacement latéral de l'axe des micropieux ont été mesurés.

Sur la base de l'expérience acquise lors des séries d'essais à échelle réduite, un banc d'essai a ensuite été monté permettant de soumettre à des charges-tests des pieux de quatre mètres de long appuyés aux deux extrémités. On a monté les pieux à tester au centre de deux récipients cylindriques, et comblé l'espace compris entre le pieu et la paroi avec de l'argile très plastique. Pour permettre de mettre en place l'argile et assurer l'homogénéité de sa résistance au cisaillement non drainée, l'argile avait été préparée sous consistance liquide. Le niveau de résistance au cisaillement non drainée recherché, auquel l'essai de chargement doit être effectué, est atteint par consolidation contrôlée réalisée à l'aide de surcharges additionnelles et d'électro-osmose. Les pieux composites ont une section constituée d'une tige centrale en acier, de diamètre $\varnothing = 28$ mm, et d'un enrobage de ciment de diamètre $\varnothing = 100$ mm. Dans la mesure où les charges limites de ces pieux (sans appui latéral) sont très variables en raison de la résistance à la traction incertaine du ciment, on a aussi effectué des essais sur des profilés d'aluminium 40x100 mm, qui présentent une rigidité à la flexion semblable à celle des pieux composites. Quatre pieux au total avec appui latéral dans le sol ont été soumis à des charges croissantes jusqu'à la rupture, et ont fait l'objet de mesures exhaustives. La résistance au cisaillement non drainée variait entre 8 et 25 kPa. Les pieux d'essais ont d'abord fait preuve d'une grande rigidité, avec des déformations latérales à peine perceptibles. La rupture, qui a été atteinte dans tous les cas, ne s'est pas annoncée par des signes préalables. Elle est, au contraire, intervenue de façon impromptue, bien avant que les forces normales produisent la plastification complète du matériau. Une fois la charge limite de flambement atteinte, les

déplacements latéraux ont augmenté significativement. Dès lors, même en réduisant les charges, il est devenu impossible de retrouver une situation d'équilibre. Après le démontage des pieux on a pu constater que les profilés d'aluminium n'avaient pas subi de déformation permanente. Dans tous les essais, les pieux ont flambé avec des modes de flambement dont les demi-longueurs d'ondes étaient sensiblement plus courtes que la longueur des pieux.

Le calcul des capacités ultimes des pieux fichés dans le sol et qui risquent de flamber est mené sur la base d'hypothèses et d'estimations trouvées dans les publications sur le sujet; celles-ci sont soumises dans le rapport à une analyse critique et sont comparées avec les résultats des expériences. Dans ces publications, soit le sol constituant l'appui latéral et les pieux eux-mêmes sont supposés élastiques linéaires (solution de ENGESSER, 1885), soit le sol est supposé idéalement plastique (WENZ, 1972), soit on part d'une déformation latérale du pieu pour calculer les courbures résultant de la charge normale et de la réaction du sol croissantes, jusqu'à ce que le pieu se plastifie du fait contraintes induites (p.ex. solutions de MEEK, 1999, WIMMER & ETTINGER, 2004). Tous ces modèles ne peuvent pas rendre compte avec pertinence du problème qui nous occupe.

C'est pourquoi des procédés de calcul spécifiques ont été élaborés dans le cadre de ce travail de recherche, dans lesquels tous les effets essentiels observés dans les expériences sont pris en compte. On emploie pour cela des procédés numériques. La réaction latérale du sol y est décrite par une fonction de mobilisation bilinéaire, dans laquelle on inclut une réaction ultime du sol caractérisant l'écoulement autour du pieu. Le calcul peut prendre en compte des imperfections préexistantes ainsi que des résistances limitées des matériaux du pieu. On calcule des courbes charge-déplacement, qui donnent les états d'équilibre du pieu dans le sol à réaction non linéaire. Elles se caractérisent par deux branches. La charge normale augmente jusqu'à ce que la réaction ultime du sol soit atteinte. Lorsque la déflexion latérale du pieu dépasse la déflexion nécessaire à la mobilisation complète de la résistance latérale ultime du sol, les forces normales nécessaires à l'équilibre diminuent tandis qu'augmente la déflexion latérale. L'équilibre devient instable et le point d'inflexion des deux branches marque la rupture par perte de stabilité. On teste également si, avant d'atteindre ce point, la résistance en compression et flexion du matériau du pieu est dépassée. Dans la mesure où les états d'équilibre cités dépendent de la demi longueur d'onde du mode de flambement, on doit vérifier plusieurs modes possibles.